

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم زمین

پایان نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی زیست محیطی

ارزیابی غلظت و منشأ هیدروکربن های آروماتیک چندحلقه ای (PAH) در گردوغبار خیابان

شهر کرج

نگارنده: فهیمه بیرامعلی کیوی

استاد راهنما: دکتر افشین قشلاقی

تیر ۱۳۹۷

شماره: ۱۴۰۳۴
تاریخ: ۹۷/۶/۱۱

باسمه تعالی



دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم فهیمه بیرامعلی با شماره دانشجویی ۹۴۰۴۰۳۴ رشته زمین شناسی گرایش زیست محیطی تحت ارزیابی غلظت و تعیین منشا هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای در گردوغبار خیابان شهر کرج که در تاریخ ۹۷/۴/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ مردود ☒ قبول (با درجه: <u>خیلی خوب</u>)			
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر افشین قشلاقی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر عزیزالله طاهری	استاد	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر هادی جعفری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر گیتی فرقانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر پرویز لاریجانی
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۷/۶/۱۱

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

با احترام تقدیم به

آموزگارانی که برایم زندگی، آزادی و انسانیت را معنا کردند:

پدرم، راهنمای زندگی ام، مردی که به من آموخت اندیشیدن را.

مادرم، بلندتکیه گاهم، مهربانی که عشق ورزیدن را از او آموختم.

و تقدیم به همسرم، همدلی که تلاش راستین را می شناسد و مراد را راه رسیدن به اهداف عالی یاری می رساند. کسی

که وجود پر مهرش تمام آن چیزی است که از زندگی می خواهم. او که هستی اش آرامش و اطمینانی ابدی است.

سپاس از

ذات همیشه مهربان که بزرگترین امید و یاور در تمام لحظات زندگی ست.

استاد گران قدرم جناب آقای دکتر اوشین قشلاقی که بانس نیک خود همواره مرا پذیرا بود و در به انجام رساندن

این مهم یاری ام نمود.

همسفران مهربان زندگی ام: فرشته، نیا و پویا

که باهم آغاز کردیم، در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می دوزیم. قلبم لبریز از عشق به شماست و

سعادت شما منتهای آرزویم.

فهیمة بیرا معلی کیوی

تیرماه ۱۳۹۷

تعهدنامه

اینجانب فهیمه بیرامعلی کیوی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته زمین‌شناسی - گرایش زیست‌محیطی دانشکده علوم زمین دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "ارزیابی غلظت و منشأ هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه ای (PAHs) در گردوغبار خیابان شهر کرج" تحت راهنمایی آقای دکتر افشین قشلاقی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

لیست مقالات استخراج شده از پایان نامه

۱- ارزیابی غلظت و منشأ هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) در گردوغبار خیابانی شهر

کرج (کنفرانس ملی پیشرفت‌های اخیر در مهندسی و علوم نوین ۱۳۹۷)

چکیده

گردوغبار خیابانی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های منعکس‌کننده وضعیت آلودگی در محیط‌زیست شهری است. این ذرات حامل آلاینده‌هایی چون هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAH)^۱ هستند که آثار و پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوب بر زندگی و سلامتی ساکنین شهرها می‌گذارند. هدف از انجام این مطالعه بررسی غلظت و منشأ این ترکیبات و تأثیر آن‌ها بر سلامتی انسان در شهر کرج است. به همین منظور، تعداد ۱۳ نمونه گردوغبار از سطح شهر کرج در خرداد ماه ۱۳۹۶ جمع‌آوری شد. نمونه‌ها پس از آماده‌سازی توسط دستگاه GC-MS آنالیز شدند. جهت تعیین منشأ احتمالی PAHs از نسبت‌های زمین-شیمیایی آروماتیکی استفاده گردید. تمام ۱۶ ترکیب تعیین شده توسط EPA^۲ در نمونه‌ها شناسایی شد. بر اساس نتایج به دست آمده غلظت PAHs از ۸۸/۴ ppb تا ۷۷۱/۰۲ ppb در نمونه‌های گردوغبار تغییر می‌کند. مقدار $\sum \text{COMB} / \sum \text{PAH}$ نیز بین ۰/۵ ppb تا ۰/۸ ppb به دست آمد. نسبت آنتراسن به مجموع آنتراسن و فنانترن $\text{Ant} / (\text{Ant} + \text{Phe})$ بین ۰/۰۸ ppb تا ۰/۶۹ ppb، بنزو(a)آنتراسن به مجموع بنزو(a)آنتراسن و کرایزن $\text{BaA} / (\text{BaA} + \text{CRY})$ بین ۰/۳۳ ppb تا ۰/۵۶ ppb و ایندنوپیرن به مجموع ایندنوپیرن و بنزوپیرن $\text{IND} / (\text{IND} + \text{BGP})$ بین ۰/۱۳ ppb تا ۰/۲۸ ppb محاسبه شد. در این مطالعه مشخص شد که منابع پیروژنیک منشأ اصلی ورود PAHها به گردوغبار خیابانی شهر کرج هستند. بنزو پیرن به عنوان سرطان‌زاترین ترکیب PAH در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری با غلظت‌های مختلفی تشخیص داده شد. نتایج این مطالعه نشان داد کلان‌شهر کرج به دلیل موقعیت شهری، افزایش روزافزون جمعیت و به عنوان قطب صنعتی کشور شدیداً تحت تأثیر فعالیت‌های افزایش دهنده غلظت PAHها در گردوغبارهای شهری است که این روند می‌تواند در سال‌های آتی نیز تشدید شود.

واژگان کلیدی: گردوغبار خیابانی، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAH)، کرج

^۱ Polycyclic aromatic hydrocarbons

^۲ Environmental protection agency

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه و بیان مسأله.....	۲
۱-۲- ضرورت انجام تحقیق.....	۲
۱-۳- اهداف تحقیق.....	۳
۱-۴- روش انجام تحقیق.....	۳
۱-۵- موقعیت جغرافیایی منطقه.....	۴
۱-۶- اقلیم منطقه.....	۵
۱-۶-۱- بارش.....	۶
۱-۶-۲- دما.....	۶
۱-۶-۳- رطوبت نسبی.....	۶
۱-۶-۴- جهت باد غالب.....	۶
۱-۷- زمین‌شناسی منطقه.....	۷
۱-۸- بررسی موقعیت شهری.....	۸
۱-۸-۱- بررسی راه‌های ارتباطی شهر.....	۸
۱-۸-۲- وضعیت ترافیک شهر.....	۱۰
۱-۸-۳- جمعیت شهر.....	۱۱
۱-۸-۴- منابع آلاینده شهر.....	۱۱
۱-۸-۵- روزهای آلوده شهر.....	۱۱

فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین

۲-۱- مقدمه.....	۱۴
۲-۲- گردوغبار خیابان.....	۱۴
۲-۳- هیدروکربن‌ها.....	۱۵
۲-۴- هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAH).....	۱۶
۲-۵- خواص فیزیکوشیمیایی PAHها.....	۱۸

۲۰	۶-۲- منابع انتشار ترکیبات PAH.....
۲۱	۲-۶-۱- منابع طبیعی.....
۲۱	۲-۶-۲- منابع ناشی از فعالیت انسان زاد.....
۲۳	۲-۷- رفتار ترکیبات PAH در هوا.....
۲۴	۲-۸- زمین پزشکی ترکیبات PAH.....
۲۵	۲-۸-۱- راه های ورود ترکیبات PAH به بدن انسان.....
۲۵	۲-۸-۲- رفتار ترکیبات PAH در بدن.....
۲۶	۲-۹- مروری بر مطالعات پیشین.....
	فصل سوم: روش انجام پژوهش
۳۲	۳-۱- مقدمه.....
۳۲	۳-۲- انتخاب نقاط نمونه برداری و تعداد نمونه ها.....
۳۳	۳-۳- روش نمونه برداری گردوغبار.....
۳۵	۳-۴- آماده سازی نمونه ها.....
۳۶	۳-۴-۱- روش کروماتوگرافی گازی (GC-MS).....
۳۷	۳-۵- روش های محاسباتی.....
۳۷	۳-۵-۱- بررسی نسبت های PAH.....
۳۸	۳-۵-۲- زمین پزشکی ترکیبات PAH.....
۳۸	۳-۵-۳- ضریب هم ارز سمناکي.....
۳۹	۳-۵-۴- متوسط غلظت دریافت روزانه (ADD).....
۴۰	۳-۵-۵- خطر ابتلا به سرطان با افزایش طول عمر (ILCR).....
۴۱	۳-۶- تحلیل آماری داده ها.....
۴۱	۳-۶-۱- ضریب همبستگی پیرسون.....
۴۱	۳-۶-۲- تحلیل مؤلفه اصلی (PCA).....
	فصل چهارم: نتایج و بحث
۴۴	۴-۱- مقدمه.....
۴۴	۴-۲- نتایج آنالیز.....

۴۸	۳-۴- ارزیابی درجه آلودگی.....
۵۱	۴-۴- مقایسه غلظت PAH در گردوغبار شهر کرج با دیگر شهرهای ایران و جهان.....
۵۲	۵-۴- بررسی نسبت‌های ترکیبات PAH و تعیین منشأ احتمالی آن‌ها.....
۵۵	۶-۴- تحلیل آماری.....
۵۵	۱-۶-۴- ضریب همبستگی پیرسون.....
۵۷	۲-۶-۴- تحلیل مؤلفه اصلی (PCA).....
۶۰	۷-۴- زمین‌پزشکی ترکیبات PAH.....
۶۰	۱-۷-۴- ضریب هم‌ارز سمناکی (TEF).....
۶۲	۲-۷-۴- متوسط غلظت دریافت روزانه (ADD).....
۶۳	۳-۷-۴- خطر ابتلا به سرطان با افزایش طول عمر (ILCR).....
	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۶۶	۱-۵- مقدمه.....
۶۶	۲-۵- نتایج به دست آمده در این پژوهش.....
۶۹	۳-۵- پیشنهادها.....
۷۰	منابع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی استان البرز و شهر کرج..... ۴
- شکل ۱-۲- جهت باد غالب، تغییرات سرعت آن و گلباد شهر کرج..... ۷
- شکل ۱-۳- نقشه زمین‌شناسی شهر کرج..... ۸
- شکل ۱-۴- راه‌های ارتباطی درون‌شهری کرج..... ۹
- شکل ۱-۵- وضعیت ترافیک شهری کرج..... ۱۰
- شکل ۲-۱- نحوه اتصال حلقه‌های بنزن در ترکیبات PAH..... ۱۶
- شکل ۲-۲- ساختار انواع اصلی ترکیبات PAH..... ۱۸
- شکل ۲-۳- منابع مختلف ترکیبات PAH در یک محیط شهری..... ۲۰
- شکل ۲-۴- پیرولیز هیدروکربن‌های سوختی و تبدیل آن‌ها به ترکیبات PAH..... ۲۲
- شکل ۲-۵- ترکیبات PAH در جو و حذف آن‌ها از طریق ریزش خشک و تر..... ۲۴
- شکل ۳-۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری از گردوغبار در گستره شهر کرج..... ۳۳
- شکل ۳-۲- نمایی از ایستگاه سوم (ورودی جاده چالوس)..... ۳۴
- شکل ۳-۳- نمونه‌برداری در ایستگاه یازدهم (چهارراه هفت تیر)..... ۳۴
- شکل ۳-۴- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سوکسله..... ۳۵
- شکل ۳-۵- دستگاه GC-MS..... ۳۶
- شکل (۱-۴ الف)- کروماتوگرام ترکیبات PAH در ایستگاه S₇..... ۴۵
- شکل (۱-۴ ب)- کروماتوگرام ترکیبات PAH در ایستگاه S₉..... ۴۶
- شکل (۱-۴ ج)- کروماتوگرام ترکیبات PAH در ایستگاه S₁₁..... ۴۶
- شکل (۱-۴ د)- کروماتوگرام ترکیبات PAH در ایستگاه S₁₂..... ۴۶
- شکل ۲-۴- نمودار Σ PAH و درجات مختلف آلودگی در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری... ۴۹
- شکل ۳-۴- طبقه‌بندی آلودگی در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری شهر کرج..... ۵۰
- شکل ۴-۴- نمودار غلظت PAHs با تعداد حلقه‌های مختلف در ایستگاه‌های نمونه‌برداری..... ۵۰
- شکل ۵-۴- نمودار نسبت‌های ایزومری ترکیبات PAH..... ۵۳
- شکل ۶-۴- مؤلفه‌های اصلی استخراج شده از ساختار اولیه داده‌ها..... ۵۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱	- مشخصات ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرج.....	۵
جدول ۱-۲	- علامت اختصاری، فرمول شیمیایی، وزن مولکولی و تعداد حلقه‌های PAH.....	۱۷
جدول ۲-۲	- مهم‌ترین خواص فیزیکوشیمیایی ترکیبات PAH.....	۱۹
جدول ۳-۲	- تقسیم‌بندی نیمه‌عمر.....	۱۹
جدول ۱-۳	- شاخص و مکان نمونه‌های برداشت‌شده در شهر کرج.....	۳۲
جدول ۲-۳	- تقسیم‌بندی غلظت مجموع PAH بر اساس میزان آلودگی.....	۳۸
جدول ۳-۳	- مقادیر TEF برای ترکیبات PAH.....	۳۹
جدول ۴-۳	- پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی خطر ابتلا به سرطان با افزایش طول عمر....	۴۰
جدول ۱-۴	- غلظت ترکیبات PAH در نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر کرج.....	۴۷
جدول ۲-۴	- Σ PAH با وزن مولکولی بالا و پایین، ماکزیمم، مینیمم و میانگین غلظت آن‌ها..	۴۸
جدول ۳-۴	- مقایسه غلظت ترکیبات PAH در گردوغبار شهر کرج با سایر شهرها.....	۵۱
جدول ۴-۴	- نسبت‌های ایزومری PAHها در نمونه‌های مختلف گردوغبار شهر کرج.....	۵۳
جدول ۵-۴	- نسبت‌های ایزومری PAH و مقادیر آن‌ها در تشخیص منشأهای احتمالی.....	۵۴
جدول ۶-۴	- ضرایب هم‌بستگی بین ترکیبات PAH.....	۵۶
جدول ۷-۴	- نتایج روش تحلیل مؤلفه اصلی بر روی متغیرهای اندازه‌گیری شده.....	۵۷
جدول ۸-۴	- مؤلفه‌های اصلی استخراج شده پس از چرخش متغیرها به روش واریماکس.....	۵۸
جدول ۹-۴	- منشأ ترکیبات PAH.....	۵۹
جدول ۱۰-۴	- مقادیر TEF و BaP برای ترکیبات PAH در نمونه‌های گردوغبار شهر کرج.....	۶۱
جدول ۱۱-۴	- مقدار ضریب ADD برای ترکیبات PAH.....	۶۲
جدول ۱۲-۴	- خطر ابتلا به سرطان با قرارگیری در معرض PAHs در شهر کرج.....	۶۳

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه و بیان مسأله

استفاده از منابع انرژی کم و بیش با اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، نظیر آلودگی هوا، خاک و آب همراه است. وابستگی زیاد به نفت و مشتقات آن یکی از نگرانی‌های موجود در زمینه آلودگی محیط زیست به شمار می‌رود، چرا که احتراق و استفاده از سوخت‌های نفتی موجب رها شدن انواع آلاینده‌ها به جو می‌شود. این آلاینده‌ها به صورت گازی شکل و یا به صورت ذرات گردوغبار وارد جو می‌شوند. گرد و غبار یکی از مهم‌ترین شاخص‌های منعکس کننده وضعیت آلودگی در محیط زیست شهری است. این ذرات می‌توانند حامل و یا حاوی آلاینده‌های کربنی و فلزی باشند. در میان این آلاینده‌ها، ترکیبات آلی آروماتیک چند حلقه‌ای (PAH) به دلیل آثار نامطلوب سلامتی و زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. ذرات گردوغبار به طور طبیعی از طریق بارش خشک از جو خارج و بر روی سطوح مختلف شهری از قبیل خیابان‌ها ته‌نشین می‌شوند. در سالیان اخیر با توسعه سریع شهرها و افزایش ترافیک شهری و هم‌چنین تمرکز صنایع در اطراف شهرها میزان تولید و ورود ذرات گردوغبار حاوی PAH به هوای شهرها نیز افزایش یافته است. بنابراین هدف از مطالعه حاضر ارزیابی غلظت و منشأ هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای در گردوغبار شهر کرج است.

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

توسعه روزافزون صنعتی، اقتصادی و جمعیتی در شهر کرج باعث افزایش ترافیک شهری، ازدیاد ساخت و سازهای درون شهری و تمرکز صنایع مختلف شده است. پیامد همه این مسائل آلودگی شدید این شهر و افزایش گردوغبار شهری بوده است به طوری که در زمستان و پاییز پدیده وارونگی و مه‌دود به دفعات در آن رخ می‌دهد. گردوغبار خیابان به عنوان یک منبع و حمل‌کننده برای آلاینده‌های آلی در محیط زیست شهری عمل می‌کند. گردوغبار خیابان حاوی غلظت‌های بالایی از ترکیبات آلی سمی نظیر هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای است که در نتیجه تعامل مواد در فازهای گازی، جامد و مایع تولید می‌شوند.

آروماتیک‌ها از لحاظ بیوشیمیایی و بیولوژیکی بسیار فعال و برخی از آن‌ها بالقوه سرطان‌زا هستند (Saeedi et al, 2015). لذا به دلیل اهمیت اکولوژیکی و زیست‌محیطی این آلاینده‌ها بررسی غلظت و پراکندگی آن‌ها در مناطق پر جمعیت شهری مانند کرج ضروری به نظر می‌رسد.

۱-۳- اهداف تحقیق

پژوهش حاضر به بررسی میزان غلظت و تمرکز هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAH) در غبارهای خیابانی شهر کرج پرداخته و از آن‌جا که ماهیت کاربردی دارد هدف کلی آن تعیین غلظت این نوع آلاینده‌ها و منشأ آن‌ها است: بر این اساس اهداف زیر در این پژوهش دنبال می‌شود:

۱- اندازه‌گیری غلظت PAH و غنی‌شدگی آن‌ها در ذرات گردوغبار

۲- بررسی توزیع مکانی و تغییرات غلظت PAH در ایستگاه‌های نمونه‌برداری

۳- تعیین منشأ PAH‌ها و مقایسه با مقادیر PAH اندازه‌گیری شده در ذرات گردوغبار در مکان یا

شهرهای دیگر

۴- بررسی اثرات احتمالی PAH در ذرات گردوغبار بر سلامتی انسان

روشن شدن و تبیین اهداف فوق می‌تواند زمینه‌های شناخت بهتری را در درک محیط و تغییرات آن در سال‌های اخیر به ما ارائه دهد.

۱-۴- روش انجام تحقیق

۱- انجام مطالعات کتابخانه‌ای: شامل اطلاعات جغرافیایی، آب و هوایی و زمین‌شناسی منطقه، جمع-

آوری اطلاعات مربوط به محیط زیست و مروری بر مطالعات پیشین انجام شده در ایران و جهان.

۲- مطالعات میدانی، نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها: انتخاب ایستگاه‌هایی جهت جمع‌آوری ۱۳ نمونه

از گردوغبار خیابانی شهر کرج، اندازه‌گیری غلظت PAH‌ها (۱۶ ترکیب اصلی).

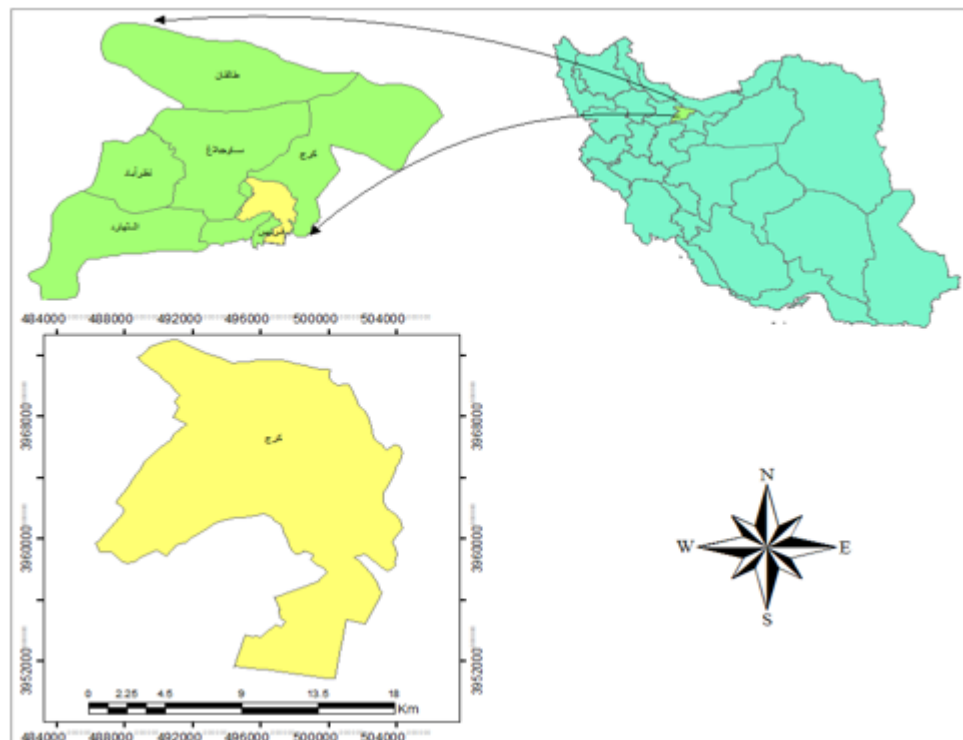
۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از محاسبه شاخص‌های ارزیابی کمی آلودگی، تحلیل‌های آماری

و تهیه نقشه‌های پراکندگی.

۴- جمع‌بندی نتایج و تدوین پایان‌نامه.

۱-۵- موقعیت جغرافیایی منطقه

شهر کرج با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و صفر دقیقه و ۳۰ ثانیه خاوری و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه و ۴۵ ثانیه شمالی در دامنه جنوبی رشته کوه البرز قرار گرفته است (فصل‌نامه علوم زمین، ۱۳۹۳). این شهر از نظر موقعیت جغرافیایی از شمال به استان مازندران، از شرق به شهرستان‌های شمیرانات و تهران (استان تهران) از جنوب به شهرستان شهریار و از سمت غرب به هشتگرد و نظرآباد محدود می‌شود شکل (۱-۱).



شکل ۱-۱- موقعیت جغرافیایی استان البرز و شهر کرج

در شمال شهر کرج ارتفاعات جنوبی البرز با ارتفاع متوسط ۲۵۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است که از شمال به سمت جنوب به تدریج از ارتفاع آن‌ها کاسته می‌شود. این رشته ارتفاعات در امتداد شرقی _ غربی شهر کرج قرار دارند. ارتفاع متوسط شهر کرج ۱۳۲۰ متر از سطح دریا است.

این شهر به دلیل قرارگیری در دره چالوس و عبور رودخانه کرج از نظر آب و هوایی تحت تاثیر سیستم‌های شمالی، شمال غربی، غربی و به ویژه جنوب غربی بوده و به همین علت دارای هوای مرطوب و خنک است. بخش قابل توجهی از نواحی گسترش یافته این شهر بر روی زمین‌های کشاورزی، حاشیه رودخانه‌ای کرج و شیب‌های تند دامنه‌ای در شمال و شرق قرار دارند (طرح جامع گردشگری استان البرز، ۱۳۹۰).

۱-۶- اقلیم منطقه

اقلیم هر منطقه حاصل ترکیب عوامل مختلف آب و هوایی است. به عبارت دیگر در شکل‌گیری سیمای اقلیمی یک منطقه عوامل متعددی نظیر دما، رطوبت، باد، تبخیر و نظایر آن دخالت دارند که تحت عنوان عوامل سازنده اقلیم یک منطقه شناخته می‌شوند. بر اساس آمارهای هواشناسی موجود در منطقه کرج دوره خشک چهار ماهه در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و آبان و دوره مرطوب هشت ماهه در ماه‌های آبان تا خرداد در طول سال کرج رخ می‌دهد (طرح جامع گردشگری استان البرز، ۱۳۹۰).

جهت بررسی شرایط اقلیمی از اطلاعات و آمار ایستگاه سینوپتیک کرج استفاده شد که مشخصات آن در جدول (۱-۱) آورده شده است.

جدول ۱-۱- مشخصات ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرج

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	عرض جغرافیایی		طول جغرافیایی		ارتفاع
کرج	سینوپتیک	دقیقه	درجه	دقیقه	درجه	۱۳۱۲/۵
		۵۵	۳۵	۵۴	۵۰	

۱-۱-۶- بارش

میزان کل بارش سالیانه در منطقه کرج ۲۴۳/۸ میلی‌متر است که از این میزان ۵۷/۸ میلی‌متر در فصل بهار، ۵/۱ میلی‌متر در فصل تابستان، ۵۷/۳ میلی‌متر در فصل پاییز و ۱۰۵/۶ میلی‌متر در فصل زمستان رخ می‌دهد.

۱-۲-۶- دما

بررسی آمار هواشناسی از ایستگاه سینوپتیک کرج نشان می‌دهد که در منطقه کرج میانگین سالیانه دما، ۱۴/۹ درجه سانتی‌گراد، میانگین سالیانه حداقل درجه حرارت ۸/۷ سانتی‌گراد، میانگین سالیانه حداکثر درجه حرارت ۲۱/۲ درجه سانتی‌گراد، حداقل دمای مطلق ۱۷- درجه سانتی‌گراد در ماه اسفند و حداکثر مطلق دما ۴۲ درجه سانتی‌گراد و در ماه تیر است. دامنه تغییرات حرارتی نیز ۵۹ درجه است.

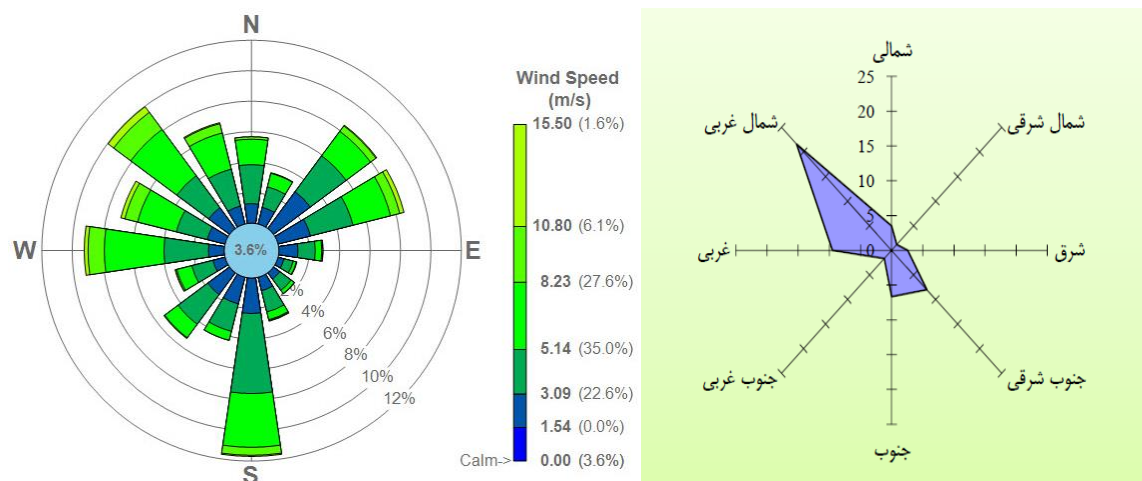
۱-۳-۶- رطوبت نسبی

رطوبت نسبی یکی از پارامترهای مهم و موثر در بررسی وضعیت آب و هوایی یک منطقه محسوب می‌شود. میانگین رطوبت نسبی سالیانه در منطقه کرج ۴۷ درصد و حداکثر رطوبت نسبی سالیانه ۶۹ درصد و حداقل رطوبت نسبی سالیانه نیز ۳۲ درصد است.

۱-۴-۶- جهت باد غالب

باد یکی از عوامل موثر در بروز فرآیند هواشناختی، تغییر درجه حرارت و انتقال آلودگی است. جهت باد غالب در کرج شمال غربی بوده و میانگین سالیانه سرعت باد در منطقه ۷/۲ نات^۳ است. همچنین میانگین ماهیانه سرعت باد از ۴/۵ نات در ماه شهریور ۸/۹ نات در ماه فروردین تغییر می‌کند (طرح جامع گردشگری استان البرز، ۱۳۹۰).

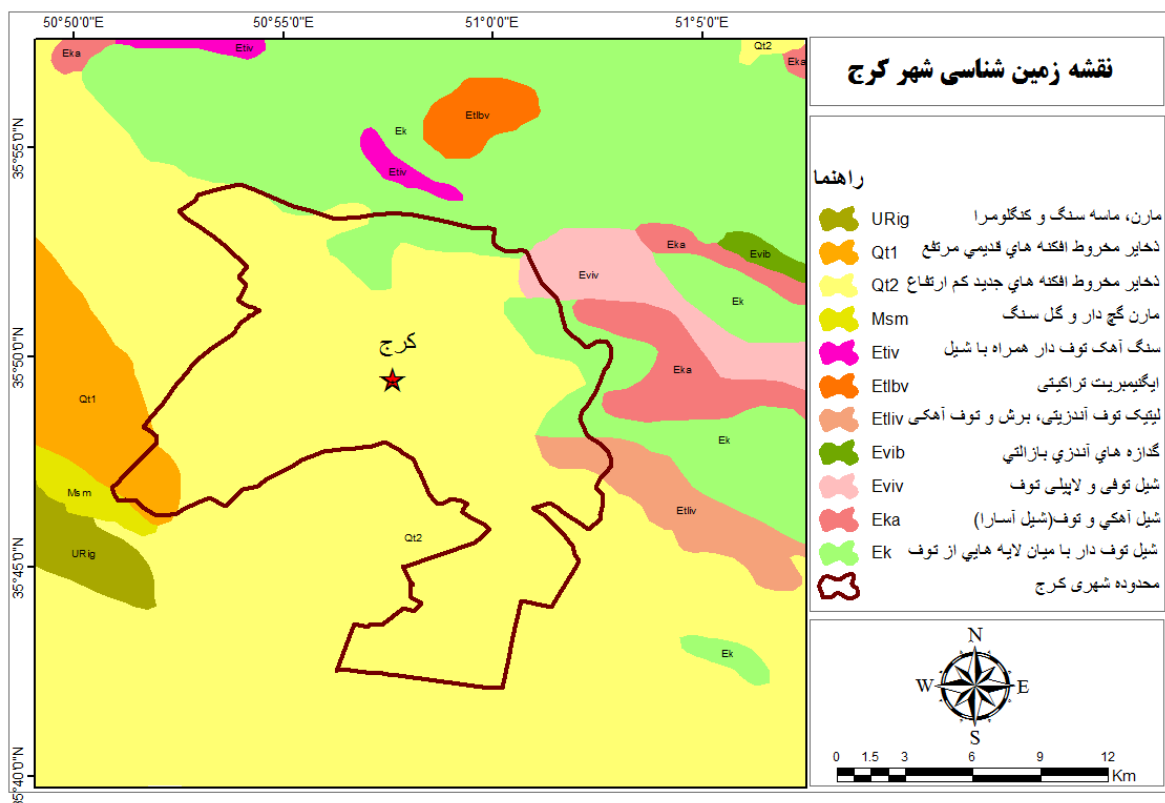
^۳ 1 Knot = 1.852 km/h



شکل ۱-۲- جهت باد غالب و تغییرات سرعت آن در ایستگاه سینوپتیک کرج (طرح جامع گردشگری استان البرز، ۱۳۹۰)

۷-۱- زمین شناسی منطقه

سازند زمین ساختی منطقه کرج را عموماً شامل سنگ‌های رسوبی و رسوبات جوان است. حرکات کوه‌زایی رشته کوه‌های البرز در شمال شهر کرج موجب گردیده که توف‌های سبز چین خوردگی پیدا نموده و موقعیت مناسبی جهت ذخیره آب‌های زیر زمینی ناشی از نزولات جوی به وجود آورند. بخش‌های سطحی دشت کرج از رسوبات تخریبی پلیوسن تا زمان حاضر به وجود آمده که به ترتیب از نزدیک دامنه‌های جنوبی البرز با دانه بندی درشت آغاز و در بخش‌های جنوبی به دانه بندی ریزتری تبدیل می‌گردد. بخش‌های جنوبی دامنه‌های البرز و شمال دشت کرج به صورت آبرفت‌های چین خورده مربوط به اواخر دوران سنوزوئیک است. در یک نگاه دقیق‌تر ورقه کرج بیش‌تر شامل مجموعه‌های آتشفشانی و آذرآواری ائوسن میانی و پسین در گستره البرز مرکزی و ایران مرکزی است و برونزدهای وابسته به پیش از ائوسن در آن گسترش ندارد. واحدهای چینه‌ای در این ناحیه بر اساس تقسیم‌بندی کروئواستراتیگرافی (چینه‌بندی زمانی) شامل سه مجموعه ائوسن میانی-پسین، الیگوسن و نئوژن است که در هر یک از آن‌ها تقسیمات لیتواستراتیگرافی (چینه‌نگاری سنگی) زیادی وجود دارد (گزارش نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ کرج).



شکل ۱-۳- نقشه زمین‌شناسی شهر کرج

۸-۱- بررسی موقعیت شهری

۸-۱-۱- بررسی راه‌های ارتباطی شهر

شهر کرج که هم‌اکنون در ردیف ۶ کلان‌شهر کشور قرار دارد با معضلات زیست‌محیطی متعددی ناشی از رشد جمعیت در این منطقه و آلودگی هوا روبروست. کلان‌شهر کرج از دیرباز به عنوان پل ارتباطی مهم در بین استان‌های تهران، قزوین و مازندران عمل کرده است. این شهر از نظر جابجایی داخلی با توجه به جمعیت روزافزون آن و عدم کارایی شبکه راه‌ها دچار مشکل ترافیک است و ترافیک سال‌های نه چندان دور شهر تهران اکنون در شهر کرج قابل لمس است.

مهم‌ترین راه‌های ارتباطی درون‌شهر کرج عبارتند از:

۱- آزادراه تهران - کرج - قزوین به طول ۱۵۹ کیلومتر

۲- راه آسفاته کرج - هشتگرد به طول ۳۸ کیلومتر

۳- راه آسفalte كرج - چالوس به طول ۱۶۱ كيلومتر

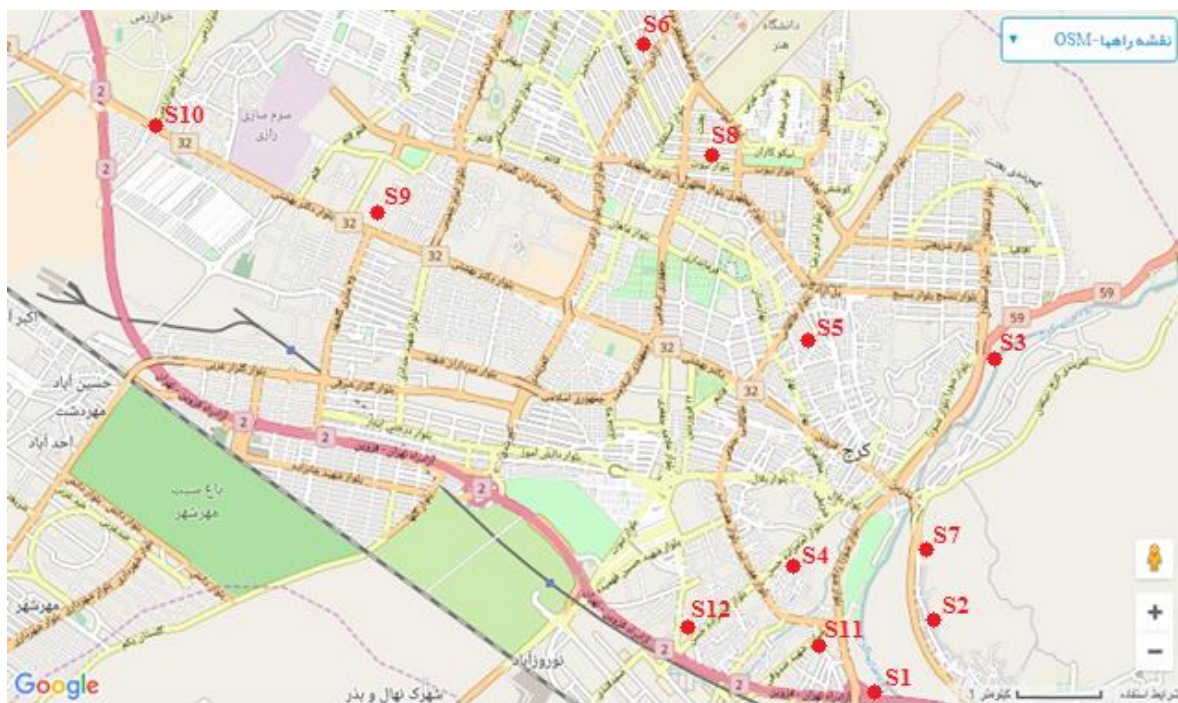
۴- راه آسفalte كرج - شهریار به طول ۱۸ كيلومتر

۵- راه آسفalte كرج - بوئين زهرا به طول ۹۸ كيلومتر

۶- راه آسفalte كرج - رباط كريم به طول ۹۸ كيلومتر

۷- راه آسفalte كرج - ديزين - شمشك به طول ۸۸ و ۱۰۳ كيلومتر

آزادراه تهران - كرج - قزوین و هم‌چنین محور كرج - چالوس كمربند اصلی نواحی شمال و غرب به مركز هستند و با توجه به تغییرات آب و هوا در مناطق مذکور در ایام تعطیل ترافیک بسیار سنگینی دارند. در شكل (۴-۱) نقشه راه‌های ارتباطی درون‌شهری كرج و موقعیت نقاط نمونه‌برداری آورده شده است.

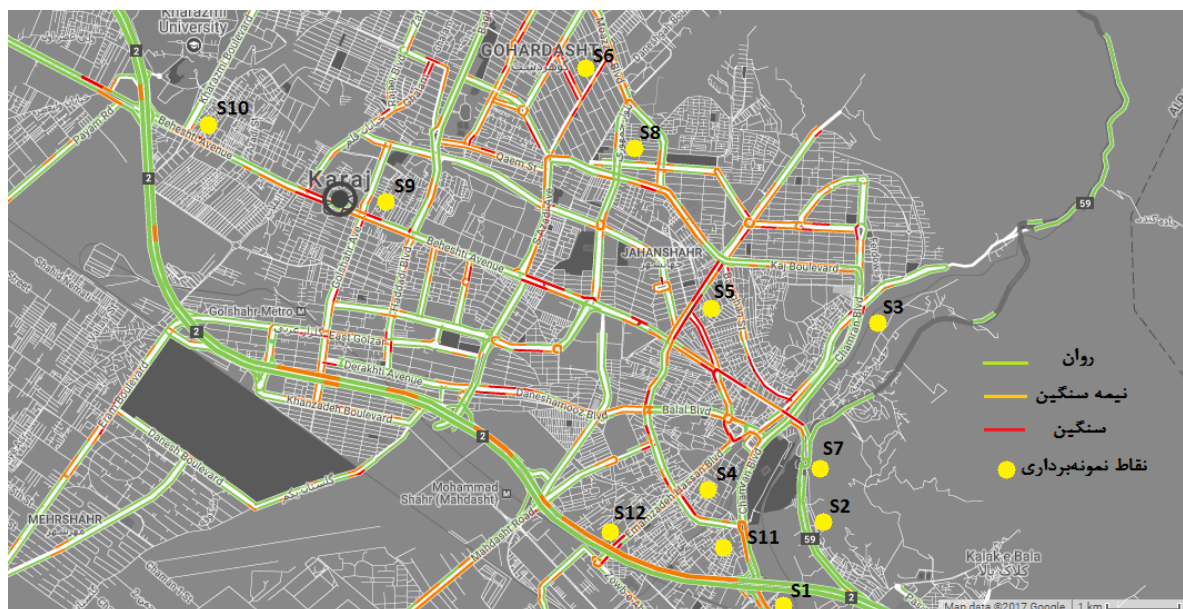


شكل ۴-۱- راه‌های درون‌شهری كرج و موقعیت نقاط نمونه‌برداری

۸-۱-۲- وضعیت ترافیک شهری

رشد سریع شهرنشینی و به تبع آن ازدیاد جمعیت شهر، گسترش فضایی شهرها و حجم بالای ترافیک را به دنبال دارد. ترافیک ساکن یکی از مشکلات عمده در حمل و نقل شهری است که امروزه به عنوان یکی از معضلات اصلی برخی شهرهای بزرگ محسوب می‌شود.

شهر کرج قطب صنعتی ایران به شمار می‌رود. توسعه چشم‌گیر این منطقه و روند رو به افزایش مهاجرت به این شهر و به تبع آن تقاضای سفرهای فراوان و ناکافی بودن تسهیلات ترافیکی باعث افزایش استفاده از وسایل نقلیه شخصی، تراکم ترافیک و آلودگی هوا شده است. خیابان‌ها و بزرگراه‌های شهر کرج با توجه به نزدیکی به تهران و هم‌جوار بودن با مناطق شمالی کشور همه روزه به ویژه در ایام تعطیل ترافیک سنگینی را متحمل می‌شود، به طوری که ۱۸ درصد ترافیک کشور را تشکیل می‌دهد. شکل (۵-۱) بیان‌گر وضعیت ترافیک شهری کرج می‌باشد.



شکل ۵-۱- وضعیت ترافیک شهری کرج و موقعیت نقاط نمونه‌برداری

۳-۱-۸- جمعیت شهری

استان البرز سی و یکمین استان ایران است. در جلسه هیئت دولت در تاریخ بهمن ماه سال ۱۳۸۸ لایحه تاسیس این استان تصویب شد. در ادامه با تصویب نمایندگان مجلس در تاریخ تیرماه سال ۱۳۸۹ استان البرز به طور رسمی شکل گرفت. در این طرح پیشنهادی کرج به عنوان مرکز استان در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج سرشماری سال ۱۳۹۵ جمعیت استان البرز ۲ میلیون و ۷۱۲ هزار و ۳۳۵ نفر و کلان‌شهر کرج به عنوان مرکز استان با یک میلیون و ۹۷۳ هزار و ۴۷۰ نفر چهارمین شهر پرجمعیت کشور محسوب می‌شود (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵).

۴-۱-۸- منابع آلاینده منطقه مورد مطالعه

استان البرز یکی از هشت استان دارای آلودگی هوا است که روزانه حجم عظیمی از ناوگان حمل و نقل عمومی و شخصی (سبک و سنگین) را از خود عبور می‌دهد. آمارها نشان می‌دهد که در کلان‌شهرها حداقل ۷۰ درصد آلاینده‌های هوا ناشی از ناوگان خودروهاست که این امر در مورد شهر کرج نیز صدق می‌کند. هم‌چنین با وجود نیروگاه فردیس در شهر کرج و هم‌چنین قرار گرفتن ۳۵۰۰ واحد فعال صنعتی در استان البرز بخش مهمی از آلودگی نیز به منابع ثابت اختصاص دارد، به طوری که طبق آمار ۱۳۵ واحد بزرگ آلاینده هوا در استان البرز وجود دارد که با در نظر گرفتن جهت باد غالب بر آلودگی هوای شهر کرج می‌افزایند (سازمان هواشناسی استان البرز، ۱۳۹۵).

۵-۱-۹- روزهای آلوده شهر

طبق آمارهای ارائه شده تعداد روزهای ناسالم استان البرز در سال ۱۳۹۵ برابر با ۱۶۸ روز بوده است. رشد بی‌رویه جمعیت در این منطقه به دلیل نزدیکی به پایتخت و حجم بالای تردهای روزانه در خیابان‌ها و بزرگراه‌های منتهی به شهر زمینه مستعدی برای آلودگی هوا به وجود آورده است. با ارتقای کامل ساختار

اداری این منطقه به استان البرز و مهاجرت بیش تر به این استان در آینده قطعاً حجم ورود آلاینده جوی از جمله ذرات گردوغبار نیز افزایش خواهد یافت (سازمان هواشناسی استان البرز، ۱۳۹۵).

فصل دوم

مروری بر مطالعات پیشین

در دهه‌های اخیر تعداد و تنوع آلاینده‌ها در جوامع شهری به طور قابل توجهی افزایش یافته است (Long et al, 2013). گردوغبار خیابان حاوی غلظت‌های بالایی از ترکیبات آلی سمی مانند PAHها است که در اثر برهم‌کنش مواد در فازهای گازی، جامد و مایع ایجاد می‌شوند. PAHهای موجود در گردوغبار خیابان به عنوان یکی از عوامل مسبب نرخ بالای مرگ و میر در محیط‌های شهری در نظر گرفته می‌شوند (Kaushik et al, 2012). از آنجایی که برخی از ترکیبات PAH خاصیت سرطان‌زایی و جهش‌زایی دارند لذا اندازه‌گیری غلظت این ترکیبات در محیط شهری بسیار حائز اهمیت است (Cachada et al, 2012).

۲-۲- گردوغبار خیابان (Street dust)

گردوغبار خیابان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های منعکس‌کننده وضعیت آلودگی جوی در محیط‌زیست شهری به حساب می‌آیند. این ذرات حامل و یا حاوی آلاینده‌های کربنی و یا فلزی هستند که آثار و پیامدهای زیست‌محیطی نامطلوب بر زندگی و سلامتی ساکنین شهرها می‌گذارد (Wang et al, 2011). در سالیان اخیر با توسعه سریع شهرها و افزایش ترافیک شهری و هم‌چنین تمرکز صنایع در اطراف شهرها میزان تولید و ورود ذرات گردوغبار به هوای شهرها نیز افزایش چشمگیری یافته است. گردوغبار شهری به ذرات صرفاً جامدی با ابعاد معمولاً کمتر از ۱۸۰ میکرون اطلاق می‌شود که بر روی سطوح غیرقابل نفوذ شهرها (مانند خیابان‌ها، معابر آسفالت شده، پیاده‌روهای سنگ‌فرش شده و غیره) ته‌نشین می‌شوند (Lau and Stenstorm, 2005). ذرات ریز گردوغبار خیابان به دلیل داشتن سطح ویژه بالا در نگهداری آلاینده‌ها، یک منبع آلودگی انسان‌زاد برای محیط‌های شهری و هوا محسوب می‌شوند (Wang et al, 2010). معمولاً دو منشأ طبیعی برای گردوغبار خیابانی در نظر گرفته می‌شود:

۱- ته‌نشینی ذرات معلق قبلی (آئروسول‌های جوی) و ۲- غبارهای برخاسته از سطح خاک‌ها. با این حال امروزه منبع دیگری یعنی آلودگی‌های انسان‌زاد را نیز باید در نظر گرفت. این منابع به طور کلی خود به

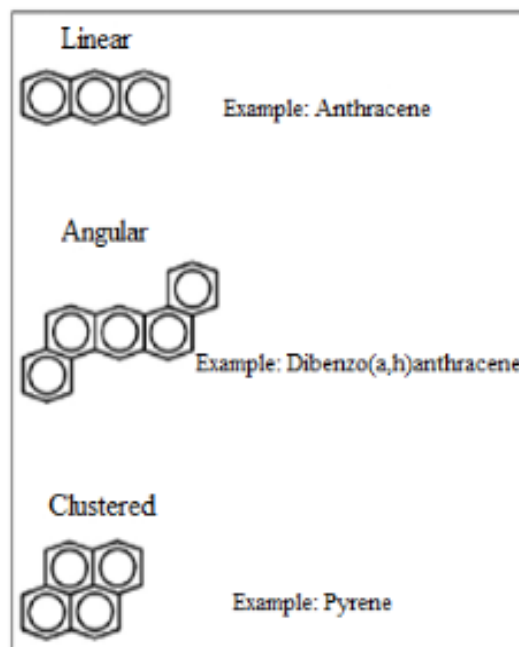
منابع آلاینده متحرک (Mobile) و غیرمتحرک (Stationary) تقسیم می‌شوند که از جمله آن‌ها می‌توان به ترافیک‌های شهری، گسیل از سیستم‌های گرمایشی منازل (دودکش‌ها)، ساخت‌وسازهای شهری و غیره اشاره نمود. (Irvine et al, 1997). در این میان انواع آلاینده‌ها، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAH) به دلیل خاصیت ماندگاری بالا در محیط و خاصیت سرطان‌زایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند (Glob and Burce, 1984). این آلاینده‌ها عمدتاً در محیط‌های شهری از احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی (بنزین و گازوئیل) حاصل می‌شوند (EPA, 2001).

۲-۳- هیدروکربن‌ها

در یک تعریف ساده، ترکیبات آلی که شامل دو عنصر هیدروژن و کربن هستند را هیدروکربن می‌نامند. ترکیبات آلی هیدروکربنی خود به دو نوع آلیفاتیک (Aliphatic) و آروماتیک (Aromatic) تقسیم می‌شوند. به طور کلی ترکیبات آلیفاتیک به آلکان‌های خطی و آروماتیک‌ها به آلکان‌های یک یا چند حلقه‌ای اطلاق می‌شوند. تحقیقات نشان داده است که اکثر ترکیبات آروماتیک سمیت، سرطان‌زایی و پایداری بالایی دارند. مدت زمان تجزیه ترکیبات آلیفاتیک در طبیعت نسبت به ترکیبات آروماتیک کوتاه‌تر است و همچنین سرعت تجزیه آروماتیک‌ها با افزایش تعداد حلقه‌های آن‌ها کاهش می‌یابد (EPA, 2001). هیدروکربن‌های آلیفاتیک به طور معمول در واکنش‌های فوتوشیمیایی اتمسفر نقش ندارند ولی آروماتیک‌ها از لحاظ بیوشیمیایی و بیولوژیکی فعال و برخی از آن‌ها بالقوه سرطان‌زا هستند. لذا به دلیل اهمیت اکولوژیکی و زیست محیطی و پراکندگی منابع این گروه از آلاینده‌ها در مناطق مختلف کشور پایش آن ضروری به نظر می‌رسد. مهم‌ترین جزء تشخیص‌دهنده ترکیبات آروماتیک بنزن (C_6H_6) است که از نظر تأثیرات منفی بر سلامت افراد بسیار با اهمیت است. این ماده به سرعت جذب سیستم اعصاب مرکزی می‌شود و بخارات آن سبب تحریک چشم و ناهنجاری در سیستم گردش خون می‌گردد. امروزه بنزن را به مقدار زیاد از نفت خام استخراج می‌کنند.

۴-۲- هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAH)

هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای یا Polycyclic Aromatic Hydrocarbon گروهی از ترکیبات آلی با ۲ یا چند حلقه بنزن هستند (Hassan et al, 2012). نحوه پیوند این حلقه‌های بنزن به صورت خطی، زاویه‌دار و یا خوش‌هایی است (شکل ۱-۲). ترکیبات PAH را بر اساس تعداد حلقه‌های آروماتیک آن‌ها دسته‌بندی می‌کنند که عبارت‌اند از: ۱- ترکیب با دو حلقه آروماتیکی شامل نفتالن (NA)، ۲- ترکیبات با سه حلقه آروماتیکی شامل فلورن (FLU)، اسنافتن (ACE)، اسنافتلن (ACY)، آنتراسن (ANT) و فنانترن (PHE)، ۳- ترکیبات چهار حلقه‌ای شامل کرایزن (CRY)، بنزو (a) آنتراسن (BaA)، پیرن (PYR) و فلورانتن (FLT)، ۴- ترکیبات پنج حلقه‌ای شامل بنزو (b) فلورانتن (BbF)، بنزو (k) فلورانتن (BkF)، دی‌بنزو (a,h) آنتراسن (DBA)، بنزو (a) پیرن (BaP) و ۵- ترکیبات شش حلقه‌ای شامل بنزو (g,h,i) پیرلن (BGP) و ایندنو (1,2,3-cd) پیرن (IND).



شکل (۱-۲) نحوه اتصال حلقه‌های بنزن در ترکیبات PAH

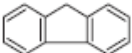
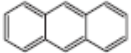
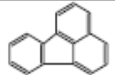
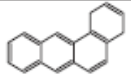
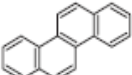
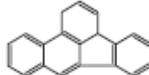
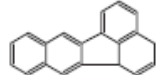
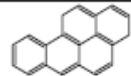
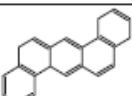
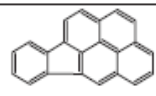
از نظر وزن مولکولی نیز آروماتیک‌ها به دو دسته تقسیم می‌شوند: ۱- PAH‌های با وزن مولکولی پایین (LMW)^۴ شامل نفتالن (NA)، اسنافتلن (ACY)، اسنافتن (ACE)، فلورن (FLU)، فنانترن (PHE)، آنتراسن (ANT) و ۲- PAH‌های با وزن مولکولی بالا (HMW)^۵ شامل بنزو (a) آنتراسن (BaA)، کرایزن (CRY)، بنزو (b) فلورانتن (BbF)، بنزو (a) پیرن (BaP)، (a,h) آنتراسن (DBA)، ایندنو (1,2,3-cd) پیرن (IND)، فلورانتن (FLT)، پیرن (PYR)، بنزو (g,h,i) پیرلن (BGP) و بنزو (k) فلورانتن (BkF). PAH‌های با وزن مولکولی بالا عمدتاً ناشی از منابع پیروژنیک (احتراق زغال‌سنگ و نفت) هستند (Wang et al, 2010). نام و مشخصات ۱۶ ترکیب اصلی آروماتیک‌های حلقوی که توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده (EPA) سرطان‌زا شناخته شده‌اند در جدول (۱-۲) آورده شده است. در شکل (۲-۲) نیز ساختارهای گوناگون انواع PAH و تعداد حلقه‌ها و چگونگی پیوند بین حلقه‌های آن‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱-۲- علامت اختصاری، فرمول شیمیایی، وزن مولکولی و تعداد حلقه‌های ترکیبات PAH

تعداد حلقه‌های بنزن	وزن مولکولی	فرمول شیمیایی	علامت اختصاری	ترکیب
۲	۱۲۸	C ₁₀ H ₈	NA	Naphthalene
۳	۱۵۲	C ₁₂ H ₈	ACY	Acenaphthylene
۳	۱۵۴	C ₁₂ H ₁₀	ACE	Acenaphthene
۳	۱۶۶	C ₁₃ H ₁₀	FLU	Fluorene
۳	۱۷۸	C ₁₄ H ₁₀	PHE	Phenanthrene
۳	۱۷۸	C ₁₄ H ₁₀	ANT	Anthracene
۴	۲۰۲	C ₁₆ H ₁₀	FLT	Fluoranthene
۴	۲۰۲	C ₁₆ H ₁₀	PYR	Pyrene
۴	۲۲۸	C ₁₈ H ₁₂	BaA	Benzo(a)anthracene
۴	۲۲۸	C ₁₈ H ₁₂	CRY	Chrysene
۵	۲۵۲	C ₂₀ H ₁₂	BbF	Benzo(b)fluoranthene
۵	۲۵۲	C ₂₀ H ₁₂	BaP	Benzo(a)pyrene
۵	۲۷۸	C ₂₂ H ₁₄	DBA	Dibenzo(a,h)anthracene
۵	۲۵۲	C ₂₀ H ₁₂	BkF	Benzo(k)fluoranthene
۶	۲۷۶	C ₂₂ H ₁₂	BGP	Benzo(ghi)perylene
۶	۲۷۶	C ₂₂ H ₁₂	IND	Indeno(1,2,3-cd)pyrene

⁴ Low Molecular Weight

⁵ High Molecular Weight

 <i>naphthalene*</i> $C_{10}H_8$	 <i>acenaphthylene (D)</i> $C_{12}H_8$	 <i>acenaphthene</i> $C_{12}H_{10}$
 <i>fluorene (D)</i> $C_{13}H_{10}$	 <i>phenanthrene (D)</i> $C_{14}H_{10}$	 <i>anthracene (D)</i> $C_{14}H_{10}$
 <i>fluoranthene (D)</i> $C_{16}H_{10}$	 <i>pyrene (D)</i> $C_{16}H_{10}$	 <i>benzo[a]anthracene (B2)</i> $C_{18}H_{12}$
 <i>chrysene (B2)</i> $C_{18}H_{12}$	 <i>benzo[b]fluoranthene (B2)</i> $C_{20}H_{12}$	 <i>benzo[k]fluoranthene</i> $C_{20}H_{12}$
 <i>benzo[j]fluoranthene</i> $C_{20}H_{12}$	 <i>benzo[a]pyrene (B2)</i> $C_{20}H_{12}$	 <i>benzo[e]pyrene</i> $C_{20}H_{12}$
 <i>dibenz[a,h]anthracene (B2)</i> $C_{22}H_{14}$	 <i>benzo[g,h,i]perylene (D)</i> $C_{22}H_{12}$	 <i>indeno[1,2,3-c,d]pyrene (B2)</i> $C_{22}H_{12}$

شکل ۲-۲- ساختار انواع اصلی ترکیبات PAH (Ravindra et al., 2007)

۲-۵- خواص فیزیکوشیمیایی PAHها

انتشار ترکیبات PAH در محیط به خصوصیات فیزیکوشیمیایی آن‌ها بستگی زیادی دارد. این خواص در هر کدام از ترکیبات PAH از دیگری متفاوت است. ویژگی نیمه‌فرار بودن بعضی از این ترکیبات سبب تحرک بالای آن‌ها در محیط می‌شود (Alcock et al, 2003). جدول‌های (۲-۲) و (۳-۲) برخی از مهم‌ترین خصوصیات ترکیبات PAH را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲- مهم ترین خواص فیزیکوشیمیایی ترکیبات (PAH) (WHO., 1998)

ترکیب	نقطه ذوب (°C)	نقطه جوش (°C)	فشار بخار (Pa/°C)	حلالیت در آب (µg/litr)	نیمه عمر (ساعت)			
					هوا	آب	خاک	رسوب
Acenaphthylene	۹۲-۹۳	۲۷۹	$۸/۹ \times 10^{-1}$	-	۲	۴	۶	۷
Acenaphthene	۹۵	۲۹۵	$۲/۹ \times 10^{-1}$	$۳/۳۹ \times 10^{-3}$	-	-	-	-
Fluorene	-۱۱۶ ۱۱۵	۳۴۰	۸×10^{-2}	$۱/۹۸ \times 10^{-3}$	۲	۴	۶	۷
Phenanthrene	۱۰۰/۵	۳۴۲	$۱/۶ \times 10^{-2}$	$۱/۲۹ \times 10^{-3}$	۲	۴	۶	۷
Anthracene	۲۱۶/۴	۳۷۵	۸×10^{-4}	۷۳	۲	۴	۶	۷
Fluoranthene	۱۰۸/۸	۳۹۳	$۱/۲ \times 10^{-3}$	۲۶۰	۳	۵	۷	۸
Pyrene	۱۵۰/۴	۴۰۰	۶×10^{-4}	۱۳۵	۳	۵	۷	۸
Benzo(a)anthracene	۱۶۰/۷	۴۴۸	$۲/۸ \times 10^{-5}$	۱۴	۳	۵	۷	۸
Chrysene	۲۵۳/۸	۴۸۱	$۸/۴ \times 10^{-5}$	۲	۳	۵	۷	۸
Benzo(b)fluoranthene	۱۶۸/۳	۴۸۰	$۶/۷ \times 10^{-5}$	۱/۲	-	-	-	-
Benzo(j)fluoranthene	۱۶۵/۴	۴۸۰	۲×10^{-6}	۲/۵	-	-	-	-
Benzo(k)fluoranthene	۲۱۵/۷	۴۹۶	$۱/۳ \times 10^{-8}$	۰/۷۶	۳	۵	۷	۸
Benzo(a)pyrene	۱۷۸/۱	۵۳۶	$۷/۳ \times 10^{-7}$	۳/۸	۳	۵	۷	۸
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	۱۶۳/۶	۵۲۴	$۱/۳ \times 10^{-8}$	۶۲	-	-	-	-
Dibenzo(a,h)anthracene	۲۶۶/۶	۵۹۴	$۱/۳ \times 10^{-8}$	۰/۵	۳	۵	۷	۸
Dibenzo(a,i)pyrene	۲۸۲	۵۲۵	$۳/۲ \times 10^{-10}$	۰/۱۷	-	-	-	-

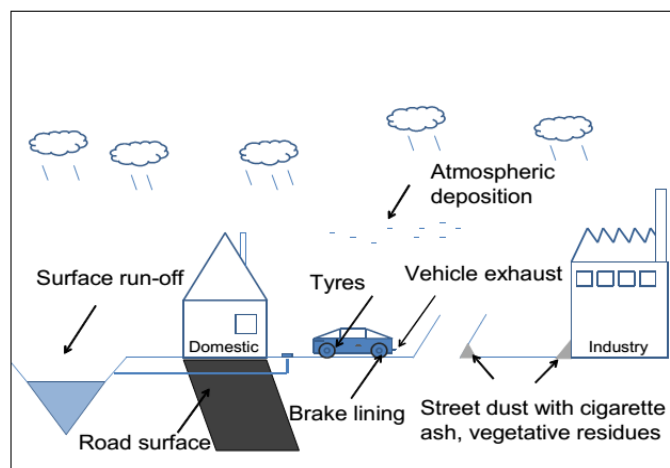
جدول ۳-۲- تقسیم بندی نیمه عمر (WHO., 1998)

تقسیم بندی	نیمه عمر (ساعت)	
	میانگین	بازه
۱	۱۷	۱۰-۳۰
۲	۵۵	۳۰-۱۰۰
۳	۱۷۰	۱۰۰-۳۰۰
۴	۵۵۰	۳۰۰-۱۰۰۰
۵	۱۷۰۰	۱۰۰۰-۳۰۰۰
۶	۵۵۰۰	۳۰۰۰-۱۰۰۰۰
۷	۱۷۰۰۰	۱۰۰۰۰-۳۰۰۰۰
۸	۵۵۰۰۰	>۳۰۰۰۰

آگاهی از خواص ترکیبات PAH در تعیین رفتار آنها در محیط مؤثر است. برای مثال PAH های با وزن مولکولی پایین فرارتر از PAH های با وزن مولکولی بالا هستند که این می تواند بر توزیع آنها در فاز گازی اثر بگذارد. در مورد نقطه جوش هم همانطور که در جدول (۲-۲) مشاهده می شود نقطه جوش نفتالن که یک PAH با وزن مولکولی پایین است از دی بنزو آنتراسن که یک PAH با وزن مولکولی بالا است کمتر می باشد. انحلال پذیری ترکیبات PAH نیز با وزن مولکولی آنها تغییر می کند به طوری که انحلال پذیری این ترکیبات با افزایش وزن مولکولی آنها در آب و در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد کاهش می باید. به طور کلی ترکیبات PAH ترکیباتی آب گریز (هیدروفوبیک) هستند و به همین علت انحلال پذیری کمی در آب دارند و در عوض تمایل دارند که در بافت چرب موجودات زنده انباشته شوند (WHO, 1998).

۲-۶- منابع انتشار ترکیبات PAH

برای کاهش خطرات مربوط به PAH ها باید منشأ آن ها کنترل شود، بنابراین شناسایی منابع احتمالی PAH ها لازم و ضروری است. منظور از منابع انتشار فعالیت هایی هستند که باعث گسیل این آلاینده ها در محیط می شوند (Hassan et al, 2012). در یک تقسیم بندی کلی، منابع انتشار PAH ها به دو دسته منابع طبیعی و منابع انسان زاد تقسیم می شوند (Maura et al, 2006). شکل (۲-۳) به طور شماتیک منابع مختلف PAH ها را در یک محیط شهری نشان می دهد.



شکل (۲-۳) منابع مختلف ترکیبات PAH در یک محیط شهری (Abdel-Shafy et al, 2016)

۱-۲-۶- منابع طبیعی

هیدروکربن‌ها به طور طبیعی در نفت، زغال‌سنگ و گازهای طبیعی وجود دارند. هم‌چنین مقادیر زیادی از این ترکیبات در طبیعت می‌تواند با مواد آلی موجود در خاک همراه باشند (Alcock et al, 2012). مهم‌ترین منابع طبیعی تولیدکننده PAHها، آتش‌سوزی جنگل‌ها و فوران‌های آتشفشانی است که قادرند مقادیر زیادی از این ترکیبات را وارد محیط سازند. منابع انتشار طبیعی ممکن است در شرایط زمانی و مکانی خاص نظیر فعالیت وسیع آتشفشانی سهم مهمی در بالا رفتن غلظت یک آلاینده داشته باشند (Hassan et al, 2012). دمای مطلوب تولید PAHها در بازه دمایی ۵۰۰-۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است و تولید آن‌ها در اثر کاهش فشار اکسیژن در طبیعت شدت می‌یابد (Ronger, 1997). به دلیل فشار بخار پایین این ترکیبات بسیاری از آن‌ها به صورت آئروسول در هوا پخش می‌شوند (Alcock et al, 2003). از دیگر منابع طبیعی PAHها می‌توان به بیوسنتز باکتریایی و جلبکی، چشمه‌های نفتی، فرسایش سنگ‌های رسوبی هیدروکربن-دار و تجزیه بقایای گیاهی اشاره نمود (Abdel-Shafy et al, 2016). شایان ذکر است که منابع طبیعی عمدتاً PAHهای با وزن مولکولی پایین را گسیل می‌سازند.

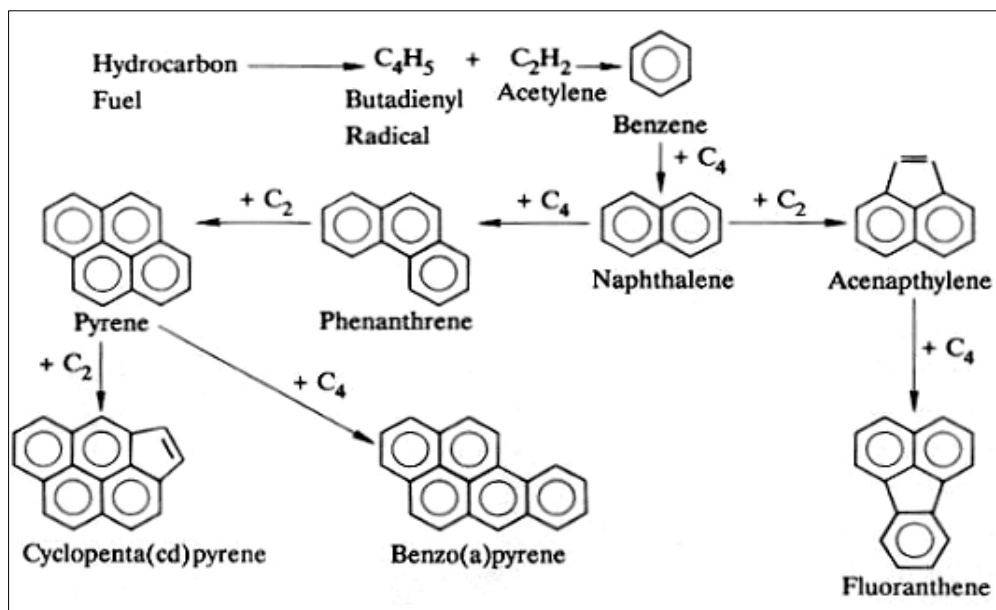
۲-۲-۶- منابع ناشی از فعالیت‌های انسان‌زاد

مهم‌ترین منابع انتشار آلاینده‌ها به فعالیت‌های انسانی مربوط می‌شود. بیش‌ترین آلودگی شهرهای بزرگ ناشی از احتراق فرآورده‌های نفتی است. در بین منابع انتشار انسان‌زاد، فرآیندهای احتراق بیش‌ترین سهم را به خود اختصاص می‌دهند. در حقیقت، احتراق انواع سوخت به‌ویژه سوخت‌های فسیلی و فرآیندهای مربوط به آن‌ها راه ورود این آلاینده‌ها به محیط هستند. به طور کلی منابع انسان‌زاد PAHها را به دو دسته پیروژنیک^۶ و پتروژنیک^۷ تقسیم می‌کنند. منابع تولید PAH از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی (نفت و زغال‌سنگ) و زیست‌توده را منابع پیروژنیک می‌نامند. فرایند تولید این نوع PAHها، پیرولیز (گرم‌کافت)

^۷ Pyrogenic

^۶ Petrogenic

یا پیروکسنتز نامیده می‌شود که در طی این فرایندها مواد آلی در دمای بالا و در شرایط کم اکسیژن یا بدون اکسیژن دچار احتراق (سوزاندن) می‌شوند. در حقیقت در حین این دو فرایند زمانی که دمای محیط به بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد پیوندهای کربن-کربن و کربن-هیدروژن شکسته شده که نتیجه آن تشکیل رادیکال‌های آزاد است (شکل ۲-۴). این رادیکال‌های آزاد به استیلین تبدیل شده که در اثر میعان بیشتر تشکیل حلقه‌های آروماتیک را می‌دهند (Ravindra et al, 2007). از آنجا که این فرایند در شرایط بودن اکسیژن انجام می‌شود بنابراین نوعی احتراق ناقص سوخت رخ می‌دهد. نمونه‌های دیگر آن در احتراق ناقص محفظه احتراق خودروها و در حین احتراق ناقص سوخت رخ می‌دهد. نمونه‌های دیگر آن در احتراق ناقص چوب در آتش‌سوزی جنگل‌ها و یا بخارهایی چوبی صورت می‌گیرد. دمایی که در آن فرایند پیرولیز رخ می‌دهد بازه‌ای بین ۵۰۰ تا بیش از ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را در بر می‌گیرد. PAH های پیروژنیک در غلظت‌های بالا در محیط‌های شهری یافت می‌شوند. منابع پتروژنیک عمدتاً PAH هایی با وزن مولکولی بالا (HMW) را وارد محیط می‌سازند.



شکل (۲-۴) پیرولیز هیدروکربن‌های سوختی و تبدیل آنها به ترکیبات PAH (Ravindra et al, 2007)

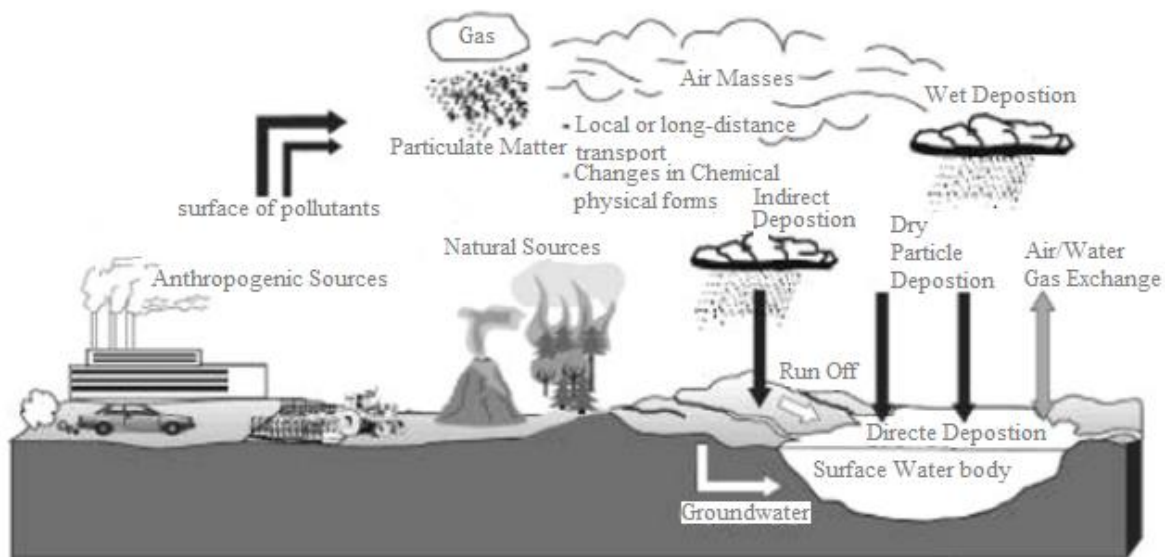
منابع پتروژنیک PAHها شامل کلیه ترکیباتی است که در حین بلوغ نفت خام و یا فرایندهای مشابه آن ایجاد می‌شوند. این گونه ترکیبات در اثر تبخیر و یا فراریت مواد نفتی سوخته نشده ایجاد می‌شوند. همچنین PAHهای پتروژنیک می‌توانند در حین نشت، حمل و یا ذخیره‌سازی مواد نفتی وارد محیط آبرگین (آب‌های زیرزمینی) و یا خاک شوند. این منابع بیشتر PAHهایی با وزن مولکولی پایین (LMW) را وارد محیط پیرامونی می‌کنند.

در محیط‌های شهری، گردوغبار خیابانی دارای مخلوطی از هر دو منبع پتروژنیک و پیروژنیک است (Boonyatumanond et al, 2007). علاوه بر احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی، تبخیر ترکیبات آلی فرار، دستگاه‌های گرمایشی خانگی و تجاری، قیر و آسفالت سطح خیابان‌ها و حتی استعمال دخانیات از دیگر منابع انتشار هیدروکربن‌های حلقوی در محیط‌های شهری به حساب می‌آیند. همچنین از ترکیبات PAH برای ساخت رنگ‌ها، پلاستیک‌ها و حشره‌کش‌ها نیز استفاده می‌شود.

۲-۲- رفتار ترکیبات PAH در هوا

ترکیبات PAH موجود در جو پس از انتشار در بازه‌های کوتاه و یا درازمدت از طریق ریزش خشک و تر ته‌نشین می‌شوند (شکل ۲-۵). PAH به صورت فاز گازی و یا جذب ذرات معلق در جو حضور دارد. به طور کلی PAHهای دو و سه حلقه‌ای (Naphthalene, Anthracene, Fluorene, Phenanthrene, Accenaphthene) در هوا به صورت فاز گازی حضور دارند. PAHهای چهار حلقه‌ای (Pyrene, Chrysene) به هر دو صورت گازی و هم ذره‌ای در هوا دیده می‌شوند. PAHهای پنج حلقه‌ای و یا بیش‌تر (BaP, Benzo(ghi)perylene) نیز عمدتاً در فاز ذره‌ای وجود دارند. وزن مولکولی مهم‌ترین عامل برای توزیع ترکیبات PAH بین فازهای گازی و ذره‌ای است. بیش‌تر ترکیبات PAH همراه ذراتی با قطر کم‌تر از $\frac{3}{3}$ میکرومتر هستند، به همین دلیل می‌توانند مسافت‌های زیادی را طی کنند. PAHها در واکنش با نور خورشید و دیگر مواد شیمیایی در هوا می‌توانند به محصولات با پایداری بیشتر تبدیل شوند. فرآیندهایی

که باعث تجزیه PAHs می‌گردد شامل فوتولیز و واکنش با NO_x، ازن و دی اکسید گوگرد است. واکنش این ترکیبات با دی اکسید گوگرد منجر به تولید اسید سولفوریک می‌شود (Alcock et al, 2003).



شکل (۵-۲) ترکیبات PAH در جو و حذف آنها از طریق ریزش خشک و تر (EPA, 2000)

۸-۲- زمین‌پزشکی ترکیبات PAH

PAHها دسته بزرگی از مواد سرطان‌زایی محیطی هستند که در بخش‌های محیط محیطی از جمله آب، هوا و خاک دیده می‌شوند و به واسطه پایداری‌شان در محیط‌های مختلف برای سلامتی انسان مضر هستند (Hassan et al, 2012). از بین آلاینده‌های جوی متنوع نیز PAHها به عنوان مهم‌ترین آلاینده‌های جوی سمی در محیط شهری به حساب می‌آیند. به همین علت افرادی که در شهرهای صنعتی زندگی می‌کنند در معرض غلظت بالایی از PAHهای انسان‌زاد موجود در محیط‌زیست شهری (هوا، خاک، گردوغبار) قرار دارند. سمیت گردوغبار خیابان بستگی به وزن مولکولی PAH توزیع شده دارد (Lee and Dong, 2011). PAHs با وزن مولکولی بالا نسبت به PAHs با وزن مولکولی پایین تأثیر بیشتری بر روی سلامت انسان می‌گذارند. به طور کلی تمرکز بیولوژیکی برای ترکیبات با وزن مولکولی بالاتر بیشتر از ترکیبات با وزن

مولکولی کم‌تر است (Hassan et al, 2013). از نظر سم‌شناختی ترکیب بنزوپیرن BaP خطرناک‌ترین ترکیب PAH به حساب می‌آید (Peng et al, 2015).

۱-۲-۸- راه‌های ورود ترکیبات PAH به بدن انسان

ترکیبات PAHs از راه‌های مختلف می‌توانند وارد بدن انسان شوند. معمول‌ترین راه‌های دریافت PAHs شامل غذا، جذب محیطی (استنشاق ذرات) و استعمال دخانیات است. در شرایط طبیعی برای افراد غیر سیگاری و افرادی که در محیط‌های آلوده زندگی نمی‌کنند غذا منبع اصلی انتقال این ترکیبات به بدن آن‌ها است. ترکیبات PAH می‌توانند به صورت آلودگی اولیه در محصولات غذایی به دلیل آلودگی‌های محیطی وجود داشته باشند و یا در طی فرآیندهای خشک کردن، دودی کردن، کباب کردن و سرخ کردن وارد مواد غذایی شوند (Menzie et al, 1992). استنشاق گردوغبار خیابانی یکی از منابع اصلی ورود این ذرات به بدن انسان هستند. قرار گرفتن انسان در برابر این ذرات و استنشاق آن‌ها می‌تواند مشکلات شدید تنفسی، بیماری‌های ریوی و حتی سرطان را در انسان به وجود آورد (Lorenzi et al, 2011).

۲-۲-۸- رفتار ترکیبات PAH در بدن

ترکیبات PAH محلول در چربی هستند و از طریق غشای پروتئینی سلول وارد آن می‌شوند. مسیر اصلی ورود این ترکیبات در بدن انسان‌ها از طریق شش‌ها و دستگاه تنفسی در اثر استنشاق ذرات معلق در هوا آلوده است. مهم‌ترین تأثیر این ترکیبات بر سلامتی انسان به ویژه از طریق استنشاق افزایش خطر ابتلا به سرطان ریه است (Alcock et al, 2013). میزان جذب ترکیبات PAH از طریق تنفس به نوع ترکیب، اندازه ذرات حاوی PAH و همچنین نوع ترکیب ماده بستگی دارد. خطر استنشاق PAHها به شکل فازی آن‌ها (گاز و ذرات جامد) و مدت زمان تماس نیز بستگی دارد (Hassan et al, 2013). در زنان باردار این ترکیبات باعث بروز کم‌خونی می‌شود و در روند رشد جنین اثرگذار است. تماس پوستی با دوده (Soot) حاوی این مواد در بلندمدت سبب بروز سرطان پوست می‌شود (Alcock et al, 2013).

۲-۹- مروری بر مطالعات پیشین

با توجه به ورود انواع آلاینده‌ها از جمله آلاینده‌های آلی یا آروماتیک به جو در جوامع شهری و روند رو به رشد جمعیت در این نواحی، آلودگی هوا یکی از مسائل زیست‌محیطی مهم در دنیا به شمار می‌رود. تاکنون پژوهش‌های مختلفی در زمینه گردوغبار خیابانی و غلظت PAHها در شهرهای مختلف جهان صورت گرفته است که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود:

سعیدی و همکاران (۲۰۱۲) در سطح شهر تهران ۲۱ نمونه گردوغبار خیابانی را به منظور ارزیابی غلظت فلزات سنگین و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای و همچنین ارزیابی خطر زیست‌محیطی آن‌ها جمع‌آوری نمودند. تجزیه و تحلیل‌های آماری شامل محاسبه ضریب هم‌بستگی، آنالیز خوشه‌ای و مؤلفه اصلی نشان داد که منشأ ترکیبات PAH انسان‌زاد بوده و تمامی نمونه‌ها دارای خطر زیست‌محیطی بالا هستند. ترافیک شهری منشأ اصلی ترکیبات PAH و فعالیت‌های مرتبط از قبیل سایش لاستیک خودروها با آسفالت خیابان و کارخانجات قدیمی نیز به عنوان منابع فرعی معرفی گردیدند. مطالعات این محققین نشان داد که ترکیبات PAH دارای هر دو منشأ پتروژنیک و پیروژنیک هستند.

ورا سامبوروا (Verasambura, 2017) با مطالعه بر روی ۱۳ پروژه که در مجموع تعداد ۸۸ نمونه را از منابع مختلف مانند زیست‌توده، استخراج معادن و خودروهای دیزلی برای اندازه‌گیری غلظت PAH در هر دو فاز گازی و جامد مورد بررسی قرار داده بودند به این نتیجه رسید که، تمام ۱۶ ترکیب اصلی ترکیبات PAH پتانسیل سرطان‌زایی دارند. همچنین غلظت این ترکیبات را با استفاده از غلظت معادل بنزوپیرن (BaP) و ضریب هم‌ارز سمناکی محاسبه نمودند. وی نشان داد که این ۱۶ ترکیب در ذرات ریز فاز جامد خطر سرطان‌زایی کم‌تری نسبت به فاز گازی دارند و ارزیابی ریسک سلامتی به مقادیر TEF و غلظت ترکیبات PAH بستگی دارد.

وانگ (Wang, 2017) ۱۶ نمونه گردوغبار شهری را در شهر زوژو برای ارزیابی غلظت ترکیبات PAH و ریسک سلامتی ناشی از آن‌ها و همچنین تعیین منشأ این ترکیبات با استفاده از دستگاه اسپکترومتر گازی (GC-MS) مورد آنالیز قرار داد. وی مقدار غلظت کل کربن را نیز اندازه‌گیری نمود و نشان داد که همبستگی معناداری بین غلظت کربن و غلظت کل ترکیبات PAH وجود دارد. وی با محاسبه ضریب ILCR به این نتیجه رسید که خطر ابتلا به سرطان برای افراد بزرگسال بیش‌تر از افراد خردسال است. در این مطالعه منابع پیروژنیک به عنوان منابع اصلی این ترکیبات معرفی گردید.

بونیاتومانوند (Boonyatumanond, 2007) برای ارزیابی غلظت ترکیبات PAH در شهر بانکوک تایلند، تعیین منشأ آن‌ها و مقایسه این منشأ با سایر منابع بالقوه چند نمونه از گردوغبار خیابان، مواد خروجی از آگزوز خودروها، روغن‌موتور و آسفالت جاده‌ها جمع‌آوری و مورد آنالیز قرار داد. نتایج حاصل از آنالیز خوشه‌ای نشان داد که منشأهای مختلف باهم سبب افزایش غلظت PAH می‌شود. همچنین تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه منشأ اصلی غلظت این ترکیبات را خودروهای دیزلی تعیین کرد. گردوغبارهای حاوی ترکیبات PAH منبع اصلی آلوده‌کننده رسوبات این شهر محسوب می‌شوند.

لورنزی و همکاران (Lorenzi et al, 2011) با بررسی ترکیبات PAH در گردوغبار شهری و مطالعه تأثیر آن‌ها بر سلامتی انسان در شهر نیوکاسل به این نتیجه رسیدند که تمام ۱۶ ترکیب اصلی PAHs بالقوه خطرناک هستند و قرار گرفتن در برابر این ذرات و استنشاق آن‌ها می‌تواند مشکلات شدید تنفسی، بیماری‌های ریوی و حتی سرطان را به وجود آورد. آنان بیان کردند سمیت گردوغبار خیابان بستگی به وزن مولکولی PAH توزیع شده دارد و PAHs با وزن مولکولی بالا نسبت به PAHs با وزن مولکولی پایین تأثیر بیش‌تری بر روی سلامت انسان می‌گذارند.

پتل و همکاران (Patel et al, 2015) با مطالعه بر روی شهر راپور در هند و اندازه‌گیری غلظت ترکیبات PAH به این نتیجه رسیدند که غلظت این ترکیبات با افزایش ذرات گردوغبار رابطه معکوس دارد.

هرچقدر اندازه ذرات بزرگ‌تر شود به دلیل کاهش سطح ویژه آن‌ها تمرکز ترکیبات PAH کاهش می‌یابد. شهر راپور به دلیل فعالیت‌های تجاری و صنعتی و تولید زغال‌سنگ، آلومینیوم و فولاد دارای غلظت بالای این نوع از آلاینده‌ها است. این پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که ترکیبات PAH با تعداد حلقه بالا منشأ پیروژنیک و ترکیبات با تعداد حلقه‌های پایین منشأ پتروژنیک دارند.

حسن و همکاران (Hassan et al, 2012) به منظور بررسی غلظت ذرات در فاز گازی، چگونگی توزیع آن‌ها و ارزیابی ریسک سلامتی در شهر پر ترافیک جیزه در مصر، تعدادی نمونه گردوغبار در فاصله زمانی تابستان و زمستان برداشت کرده و با استفاده از دستگاه GC-MS مورد آنالیز قرار دارند. آن‌ها نشان دادند که غلظت ترکیبات PAH در فصل زمستان بالاتر از فصل تابستان است. توزیع این ترکیبات بر اساس تعداد حلقه‌های آروماتیک در هر دو فصل تقریباً مشابه بوده که نشان‌دهنده منشأ مشترک آن‌ها است. این منبع مشترک صنایع پتروشیمی و تردد بالای خودروها است. آنان ریسک سلامتی برای ترکیبات PAH را بر اساس غلظت معادل بنزوپیرن (BaP) محاسبه کردند و به این نتیجه دست یافتند که این ترکیبات در فاز ذرات ریسک بالاتری دارند.

رستگاری‌مهر و همکاران (Rastegari Mehr et al, 2016) با بررسی سطح آلودگی گردوغبار خیابانی در بندر ماهشهر به فلزات سنگین و ترکیبات PAH و همچنین ارزیابی خطر سلامتی این ترکیبات به این نتیجه رسیدند که ترکیبات PAH با چهار حلقه آروماتیک بیش‌ترین مقدار را در گردوغبار این شهر دارند. آنان ترافیک را منشأ اصلی این آلاینده‌ها در نظر گرفتند. آلودگی در این منطقه با استفاده از گاز طبیعی به جای زغال‌سنگ و نفت کنترل می‌شود. با ارزیابی ریسک سلامتی و مطالعه بر روی افراد مختلف از جمله کارگران مناطق باز دریافتند که در شرق این منطقه به دلیل تراکم ترافیک و جمعیت افراد در معرض خطر بیش‌تری هستند.

کشاوری و همکارانش (Keshavarzi et al, 2017) غلظت ۱۶ ترکیب اصلی PAH در ۱۹ نمونه گردوغبار جمع‌آوری شده از سطح شهر بوشهر را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که غلظت ترکیبات آروماتیک با وزن مولکولی و تعداد حلقه بالا (۴-۶ حلقه‌ای) در بخش شمالی شهر به دلیل تراکم ترافیک بیش‌تر است. همچنین به این نتیجه دست یافتند که بین غلظت ترکیبات PAH و TEQ یک ضریب هم-بستگی مثبت وجود دارد. آنان با بررسی ضریب ILCR تماس پوستی با گردوغبار را راه اصلی ابتلا به سرطان در این منطقه شناختند. آنان همچنین با بررسی رابطه بین غلظت ترکیبات PAH با عواملی مانند جهت و سرعت باد بیان کردند که غلظت PAH با سرعت باد رابطه معکوس دارد و در جهت سرعت باد غلظت این ترکیبات افزایش می‌یابد.

فصل سوم

روش انجام پژوهش

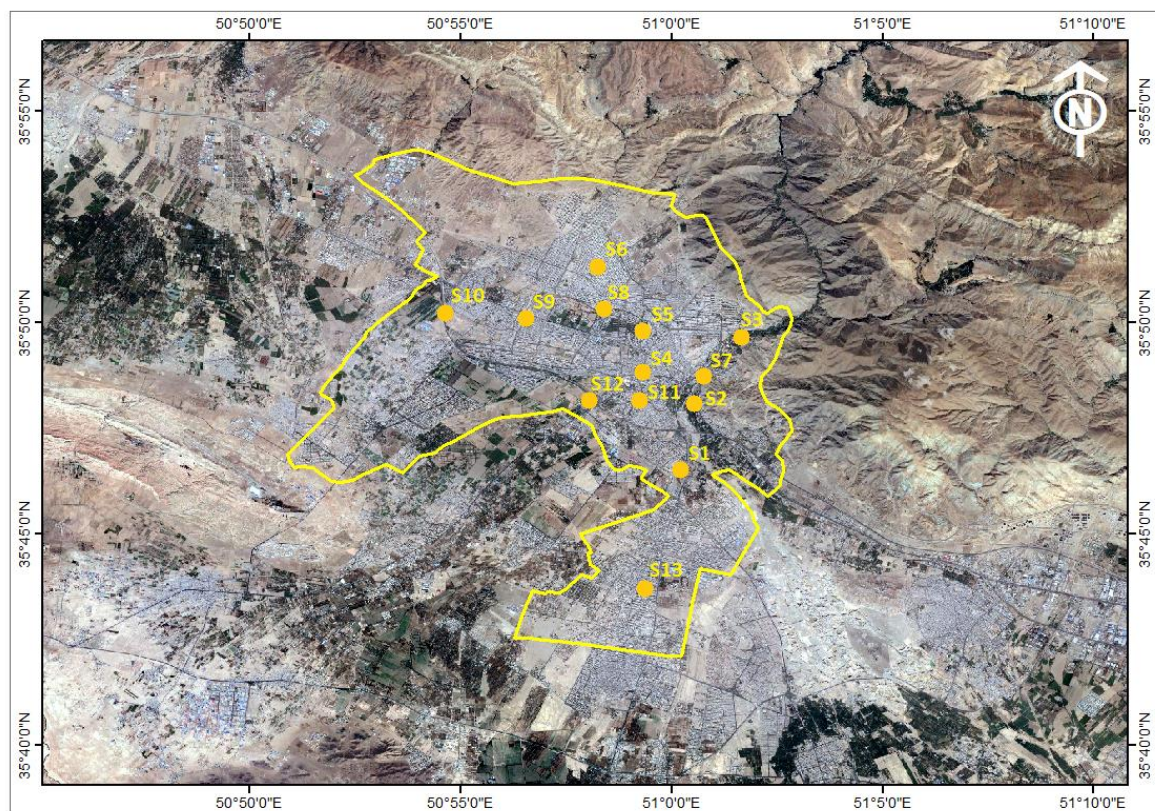
گردوغبار خیابان و ترکیبات PAH از آلاینده‌های مهم محیط شهری هستند که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان علوم زیست‌محیطی را به خود جلب کرده‌اند. با توسعه اقتصادی و افزایش شهرنشینی ورود آلاینده‌ها از جمله PAH به محیط‌زیست شهری افزایش یافت. گردوغبار شهری یک مخزن مهم برای نگه‌داشت آلاینده‌هاست که اثرات نامطلوبی را بر روی اکوسیستم و سلامتی انسان می‌گذارد. هدف اصلی این پژوهش ارزیابی غلظت این نوع از ترکیبات در گردوغبار خیابان‌های شهر کرج است و مراحل انجام مطالعه را می‌توان در سه بخش نمونه‌برداری، بررسی‌های آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل داده‌ها عنوان کرد.

۳-۲- انتخاب نقاط نمونه‌برداری و تعداد نمونه‌ها

با در نظر گرفتن عواملی چون حجم ترافیک در معابر، دسترسی به نقاط و هم‌چنین جهت باد غالب، تعداد ۱۳ نمونه گردوغبار از سطح شهر برداشت گردید. جدول (۳-۱) مشخصه و مکان نمونه‌های برداشت شده و شکل (۳-۱) موقعیت نقاط نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱- شاخص و مکان نمونه‌های برداشت‌شده در شهر کرج

شماره ایستگاه نمونه‌برداری	مکان نمونه‌برداری	مشخصه
S ₁	مترو کرج	ایستگاه قطار
S ₂	میدان کرج	منطقه پرتراфик
S ₃	ورودی جاده چالوس	منطقه پرتراфик
S ₄	آزادگان	منطقه پرتراфик
S ₅	بلوار نبوت	منطقه پرتراфик
S ₆	دانشگاه آزاد کرج	منطقه پرتراфик
S ₇	جهان‌شهر	پارک شهری
S ₈	سه راه رجایی‌شهر	منطقه پرتراфик
S ₉	۴۵ متری گلشهر	منطقه پرتراфик
S ₁₀	حصارک	منطقه پرتراфик
S ₁₁	چهارراه هفت تیر	منطقه پرتراфик
S ₁₂	ترمینال	ایستگاه اتوبوس
S ₁₃	نیروگاه شهید منتظر قائم	منطقه صنعتی



شکل ۳-۱- موقعیت نقاط نمونه‌برداری از گردوغبار در گستره شهر کرج

۳-۳- روش نمونه‌برداری از گردوغبار

نمونه‌برداری در فصل خشک و در شرایط پایداری جوی صورت گرفت. با استفاده از برس و کاردک پلاستیکی، حدود ۵۰۰ گرم نمونه گردوغبار از حاشیه خیابان‌های پرتردد جمع‌آوری گردید و در کیسه‌های پلاستیکی زیپ‌دار ریخته شد. این نمونه‌ها سپس با فویل‌های آلومینیومی پوشانده شده و بعد از شماره‌گذاری تا زمان ارسال به آزمایشگاه در یخچال قرار داده شدند. شکل (۳-۲) نمایی از ورودی جاده چالوس در ایام تعطیل و حجم بالای ترافیک این منطقه را نشان می‌دهد. هم‌چنین شکل (۳-۳) بیان‌گر نحوه نمونه‌برداری است.



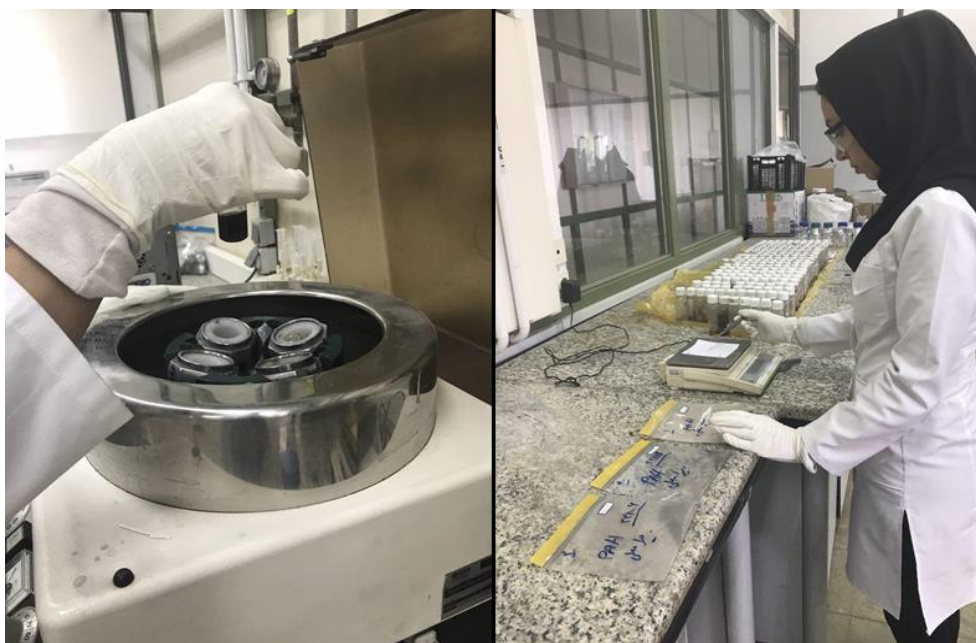
شکل ۳-۲- نمایی از ایستگاه سوم (جاده چالوس)



شکل ۳-۳- نمونه برداری در ایستگاه یازدهم (چهارراه هفت تیر)

۳-۴- آماده‌سازی نمونه‌ها

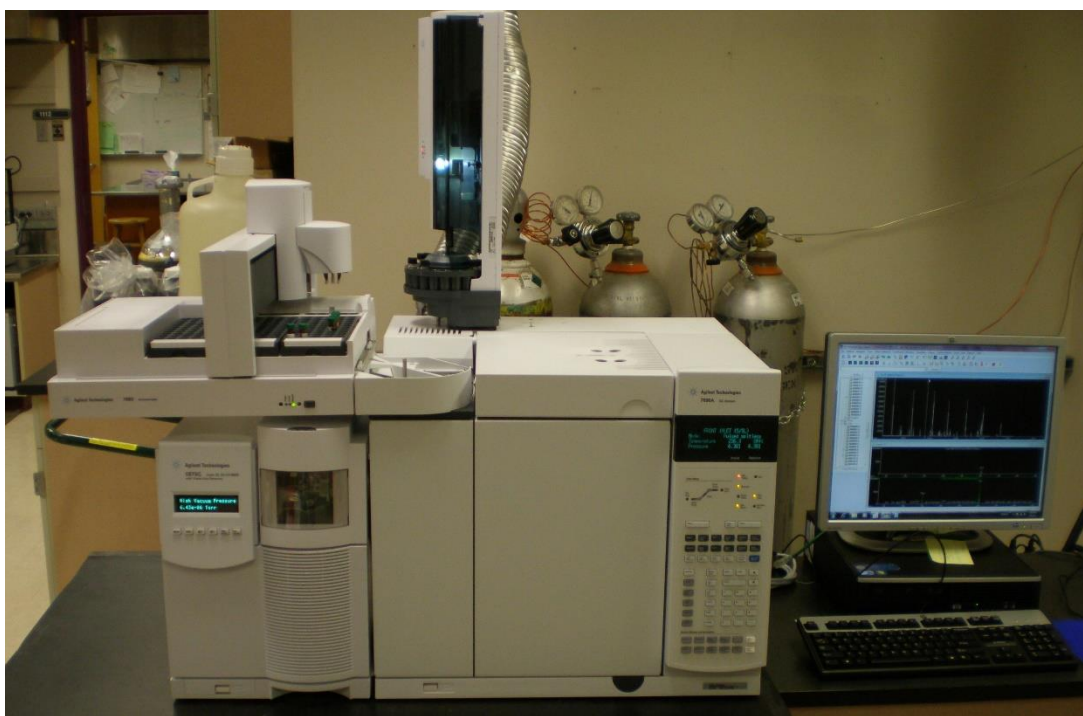
نمونه‌ها در آزمایشگاه در دمای اتاق کاملاً خشک شده و سپس با الک ۲۰۰مش الک گردیدند. معادل ۱۰ گرم وزن خشک از هر نمونه همگن جدا و در دستگاه سوکسله ۲۰۰ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان و ۲ گرم مس فعال شده به ارلن اضافه شد. مس فعال شده برای گوگردزدایی از نمونه‌ها استفاده می‌شود. نمونه‌ها حدود ۶ تا ۹ ساعت در دستگاه سوکسله با درجه حرارت ۵۳ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند (۳-۴). بعد از گذشت مدت زمان تعیین شده عصاره ایجاد شده توسط تبخیرکننده دوار (دستگاه روتاری) تغلیظ شد. در ادامه نمونه‌های تغلیظ شده به ستون سیلیکاژل که برای جداسازی انواع ترکیبات آلی استفاده می‌شود اضافه شدند. اولین مرحله ۱۵ میلی‌لیتر n هگزان به ستون اضافه شد. در این مرحله بعد از اضافه کردن n هگزان، هیدروکربن‌های آلیفاتیک جدا شدند. بخش دوم حاوی PAHs است که توسط ۷۰ میلی‌لیتر مخلوطی از دی‌کلرومتان و n هگزان (۶۰:۴۰، v/v) از ترکیب جدا شدند. در ادامه از دستگاه روتاری و گاز بی‌اثر نیتروژن برای کاهش حجم نمونه‌ها تا ۱ میلی‌لیتر استفاده شد (Long et al, 2013). تمامی نمونه‌های استخراج شده نهایتاً به کمک دستگاه GC/MS در مرکز تحقیقات مواد فرآوری مواد معدنی ایران (ایمیدرو) آنالیز گردیدند.



شکل ۳-۴- مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه سوکسله

۳-۴-۱ روش کروماتوگرافی گازی (GC-MS)

روش‌های کروماتوگرافی بهترین روش جدایش و تجزیه مخلوط‌های پیچیده آلی از جمله PAHها محسوب می‌شود. کروماتوگرافی روشی است برای جدایش که در آن اجزا شیمیایی متعدد به منظور تجزیه بعدی بر اساس میزان تمایل آن‌ها به توزیع بین دو فاز مختلف از یکدیگر جدا می‌گردند. فاز اول را فاز ساکن و به فاز دیگر که در یک جهت خاص حرکت می‌کند فاز متحرک می‌گویند (میرنژاد، ۱۳۹۲). در دستگاه GC-MS ترکیبات ابتدا به روش کروماتوگرافی گازی جداسازی و سپس با استفاده از طیف‌سنج جرمی شناسایی می‌شوند. در واقع طیف‌سنج جرمی دستگاهی است که مولکول‌های گازی باردار را بر اساس جرم آن‌ها از یکدیگر جدا کرده و مقدار آن‌ها را در محلول اندازه‌گیری می‌کند. همچنین بر اساس داده‌های این دستگاه می‌توان اطلاعات کمی و کیفی درباره وزن مولکولی و ساختار ترکیبات به دست آورد (Stein, 2000). شکل (۳-۴) دستگاه GC-MS مورد استفاده برای شناسایی نوع و مقدار ترکیبات PAH را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵- دستگاه GC-MS

۳-۵- روش‌های محاسباتی

۳-۵-۱- بررسی نسبت‌های PAH

نسبت‌های PAH به طور گسترده برای پیش‌بینی منابع یا منشأ آن‌ها به کار می‌رود. در مطالعات اخیر روی گردوغبار آلوده به PAH از نسبت‌هایی مانند $BaA/(BaA + Chr)$ ، $IND/(IND + BGP)$ ، $Flu/(Flu + PYr)$ ، Phe/Ant ، $Ant/(Ant + phe)$ ، BaP/BGP برای تعیین منشأ PAH‌ها استفاده شده است. نسبت $(Ant + Phe)/Ant$ اگر کمتر از ۰/۱ باشد نشان‌دهنده منابع نفتی است در حالی که این نسبت بیش از ۰/۱ بر منابع احتراق سوخت‌های فسیلی دلالت دارد. اگر مقدار نسبت $BaA/(BaA + Chr)$ کم‌تر از ۰/۲ باشد نشان‌دهنده منابع نفتی و پتروژنیک است. وقتی که این مقدار بین ۰/۲ تا ۰/۳۵ باشد و مقدار $IND/(IND + BGP)$ بین ۰/۲ تا ۰/۵ باشند مشخص‌کننده احتراق نفت و سوخت‌های فسیلی است. همچنین اگر مقدار این دو نسبت بیش از ۰/۵ باشد مشخص‌کننده احتراق زغال‌سنگ و زیست‌توده است (Saeedi et al, 2012).

$\Sigma COMB$ که مجموع غلظت‌های ترکیبات BaP ، $BghiP$ ، BkF ، CHR ، BaA ، Pyr ، FL و IND است، می‌تواند ترکیبات PAH با منشأ احتراق را نشان دهد. با افزایش نسبت $\Sigma COMB / \Sigma PAH$ ، جز مربوط به منشأ احتراق هم افزایش می‌یابد.

LMW/HMW نیز از جمله نسبت‌هایی است که برای تعیین منشأ ترکیبات PAH از آن استفاده می‌شود. در صورتی که LMW/HMW بیش از یک باشد نشان‌دهنده منشأ پتروژنیک ولی در صورتی که مقدار LMW/HMW کم‌تر از یک باشد نشان‌دهنده منبع پیروژنیک است. Phe/Ant نسبت فنانترن به آنتراسن phe/Ant اگر بزرگ‌تر از ۱۰ باشد نشان‌دهنده نفتی بودن منشأ هیدروکربن‌ها در محیط است و اگر کوچک‌تر از ۱۰ باشد نشان‌دهنده منبع احتراقی می‌باشد (Wang et al, 2011).

غلظت مجموع PAH را بر اساس سطح آلودگی به چهار دسته تقسیم می‌شود (Maliszewska, 1996). بر اساس این تقسیم‌بندی که در جدول (۲-۳) مشاهده می‌شود، می‌توان درجه آلودگی نمونه‌های برداشت شده را پیش‌بینی و برای مدیریت و کاهش آن برنامه‌ریزی کرد.

جدول ۲-۳- تقسیم‌بندی غلظت مجموع PAH بر اساس میزان آلودگی (Maliszewska, 1996)

شدت آلودگی	میزان (Σ PAH) بر حسب ppb
غیر آلوده	$200 >$
سطح آلودگی پایین	$200 - 600$
آلوده	$600 - 1000$
به شدت آلوده	$1000 <$

۳-۵-۲- زمین پزشکی ترکیبات PAH

بنزو(a)پیرن (BaP) سرطان‌زاترین ترکیب PAHs شناخته شده است. این ترکیب توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO 1987) به عنوان شاخصی برای سرطان‌زایی کل PAHs در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این از BaP اغلب به عنوان شاخص در معرض قرار گرفتن کل PAHs در محیط‌زیست استفاده می‌شود. (Lee and Dang, 2011).

۳-۵-۲-۱- ضریب هم‌ارز سمناکی (TEF)^۸

خطر سلامت وابسته به استنشاق ترکیبات PAH سرطان‌زا به وسیله ضریب معادل سمیت (TEF) برای هر کدام از ترکیبات PAH اندازه‌گیری شد. این ضریب سرطان‌زایی هر کدام از ترکیبات PAH را نسبت به سرطان‌زایی BaP مقایسه می‌کند (Peng et al, 2015). مطابق فرمول (۱-۳) قدرت سرطان‌زایی هر کدام از ترکیبات PAH بر اساس غلظت معادل بنزوپیرن (BaPeq) ارزیابی می‌شود. با استفاده از فرمول (۲-۳) غلظت BaPeq برای هر کدام از ترکیبات PAH به وسیله ضرب کردن غلظت هر کدام از ترکیب PAH در مقدار

⁸ Toxic elements factor

(TEF) محاسبه می‌شود (Peng et al, 2015). جدول (۳-۳) مقادیر (TEFi) برای ترکیبات PAH را نشان می‌دهد.

$$\text{BaPeq} = \text{PAHi} \times \text{TEFi} \quad \text{فرمول (۱-۳)}$$

$$\text{TEFs} = (\text{Ci} \times \text{TEFi}) \quad \text{فرمول (۲-۳)}$$

جدول ۳-۳- مقادیر TEF برای ترکیبات PAH (Peng et al, 2015)

PAH	TEFi
NA	۰/۰۰۱
ACY	۰/۰۰۱
ACE	۰/۰۰۱
FLU	۰/۰۰۱
PHE	۰/۰۰۱
ANT	۰/۰۱
FLT	۰/۰۰۱
PYR	۰/۰۰۱
BaA	۰/۱
CRY	۰/۰۱
BbF	۰/۱
BaP	۱
DBA	۱
BGP	۰/۰۱
IND	۰/۱
BkF	۰/۱

۳-۵-۲- متوسط غلظت دریافتی روزانه (ADD)^۹

مطابق فرمول (۳-۳) ضریب ADD برای انواع ترکیبات PAH به صورت زیر محاسبه می‌شود (Wang et al, 2017):

^۹ Average Daily Dose

$$ADD = \frac{C \times IR \text{ inhalation}}{BW}$$

فرمول (۳-۳)

۳-۲-۶-۳- خطر ابتلا به سرطان با افزایش طول عمر (ILCR)^{۱۰}

تاثیر ترکیبات PAH بر سلامتی انسان به عواملی از جمله میزان ورود مواد به بدن انسان، مدت زمان تماس با آن‌ها، پاسخ بدن به این مواد که با سن، جنسیت، نوع تغذیه و سلامت شخص تفاوت می‌کند (Soltani et al, 2015). (ILCR) بر اساس مدل‌های استاندارد EPA به صورت کمی برای ارزیابی خطر تمرکز PAH‌های موجود در ذرات گردوغبار مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$ILCRs \text{ inhalation} = \frac{Cs \times (CFs \text{ inhalation} \times \sqrt[3]{\frac{BW}{70}} \times IR \text{ inhalation} \times EF \times ED)}{BW \times AT \times PEF} \quad \text{فرمول (۴-۳)}$$

که در آن Cs غلظت ترکیبات آروماتیک برحسب μgkg^{-1} است، از ضرب TEF در ترکیبات PAH بر مبنای سمناکی Bapeq به دست می‌آید، CFs نیز شیب سرطان‌زایی (برحسب $mgkg^{-1}$) برای استنشاق است که برابر ۳/۸۵ می‌باشد.

جدول ۳-۴- پارامترهای مورد استفاده در ارزیابی خطر ابتلا به سرطان با افزایش طول عمر (Soltani et al., 2015)

پارامتر	واحد	خردسال	بزرگسالان
وزن بدن (BW)	Kg	۱۵	۶۱/۵
قرارگیری در معرض فرکانس (EF)	Day year ⁻¹	۱۸۰	۱۸۰
مدت تماس (ED)	Year	۶	۲۴
میزان استنشاق (IR inhalation)	M ³ day ⁻¹	۱۰	۲۰
میزان بلع (IR ingestion)	Mg day ⁻¹	۲۰۰	۱۰۰
تماس پوست با آلاینده (SA)	Cm ² day ⁻¹	۲۸۰۰	۵۷۰۰
فاکتور چسبندگی پوستی (AF)	Mg cm ⁻²	۰/۲	۰/۰۷
فاکتور جذب پوستی (ABS)	Unitless	۰/۱۳	۰/۱۳
زمان متوسط (AT)	Day	۷۰×۳۶۵	۷۰×۳۶۵
فاکتور انتشار ذرات (PEF)	M ³ kg ⁻¹	۱۰۹×۱/۳۶	۱/۳۶×۱۰۹

¹⁰ Incremental Lifetime Cancer Risk

۳-۶- تحلیل آماری داده‌ها

امروزه در تمام مطالعات زیست‌محیطی از یک یا چند روش آماری استفاده می‌شود. این روش‌ها معمولاً در تعیین منشأ آلاینده‌ها، عوامل موثر بر چگونگی توزیع آن‌ها و در توصیف و تحلیل مشخصات (کیفیت) کلی سیستم‌های زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش از دو روش آماری پرکاربرد یعنی تحلیل همبستگی و تحلیل مؤلفه اصلی استفاده شد.

۳-۶-۱- تحلیل همبستگی

این روش برای تعیین شدت و جهت وابستگی بین دو متغیر به کار می‌رود. ضریب همبستگی (r) در محدوده بین -1 (برای متغیرهایی با رابطه منفی کامل) تا $+1$ (برای متغیرهایی با رابطه مثبت کامل) قرار می‌گیرد. زمانی که این ضریب برابر با صفر باشد به این معنی است که هیچ رابطه خطی میان متغیرها برقرار نیست. در واقع هر چه r به $+1$ نزدیک‌تر باشد، رابطه مثبت خطی، قوی‌تر است و با افزایش یک متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد، در حالی که با نزدیک شدن r به -1 رابطه منفی خطی برقرار می‌شود و افزایش یک متغیر موجب کاهش متغیر دیگر می‌شود. در صورتی که داده‌ها توزیع نرمال داشته باشند، برای محاسبه ضریب همبستگی می‌توان از روش پیرسون استفاده کرد (Lue et al, 2010). در غیر این صورت از روش اسپیرمن استفاده می‌شود.

۳-۶-۲- تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)

روش تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) از جمله روش‌های آماری چند متغیره کاربردی و رایج در مطالعات زیست-محیطی است. در این روش داده‌های اولیه به تعدادی مؤلفه با ابعاد کوچک‌تر کاهش می‌یابند. در واقع مؤلفه‌های اولیه‌ای که بیش‌ترین مقدار واریانس از واریانس کل را دارا بوده و امتیاز ویژه (eigen value) بالاتر از یک دارند، به عنوان مؤلفه‌های اصلی انتخاب می‌شوند (Kaiser, 1960). به طور کلی این مؤلفه‌ها اطلاعاتی از متغیرهای اولیه و هم‌چنین اطلاعات پنهانی در ارتباط با ساختار اصلی داده‌ها و نیز تغییرپذیری آن‌ها در

اختیار ما قرار می‌دهد (Boruvka and Jehlicka, 2005). کاهش ابعاد مجموعه داده‌های اولیه از طریق چرخش مؤلفه‌های اصلی حول محورهای مختصات صورت می‌گیرد که در این حالت اختلاف واریانس میان مؤلفه‌های اصلی به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد و به همین دلیل به آن چرخش واریماکس (varimax) گفته می‌شود (Kaiser, 1960).

فصل چہارم

نتیجہ و بحث

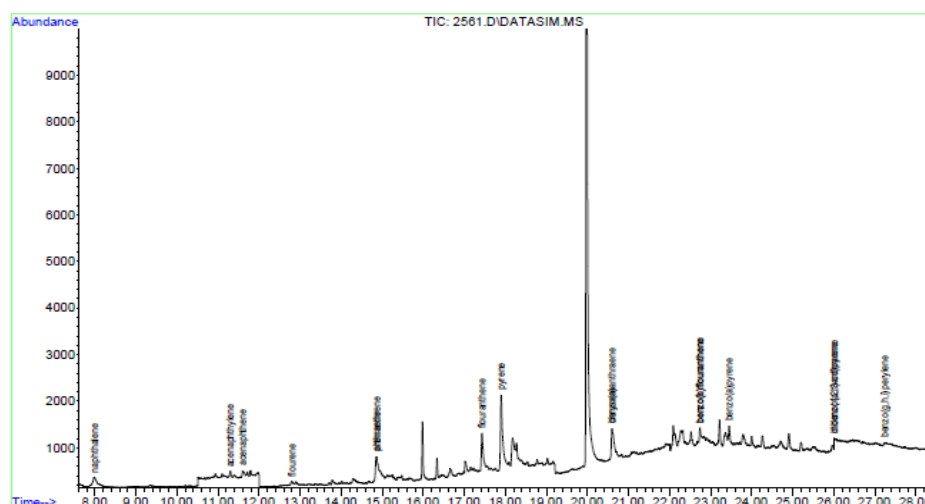
۴-۱- مقدمه

آلاینده‌های تولید شده در جوامع شهری به طور مداوم در حال افزایش است. گردوغبار در شهرهای بزرگ و صنعتی دارای غلظت بالایی از ترکیبات PAH است که از فعالیت‌های صنعتی و ترافیک ناشی می‌شوند. افرادی که در شهرهای بزرگ زندگی می‌کنند در معرض PAH‌های خطرناک انسان‌زاد موجود در محیط‌های مختلف از جمله هوا، خاک و گردوغبار خیابان قرار دارند. حضور این ترکیبات در محیط‌های مختلف به عواملی مانند ساختار شیمیایی، منشأ، غلظت و پراکندگی آن‌ها بستگی دارد (Boyle et al, 1998). در این مطالعه به منظور بررسی نوع و غلظت ترکیبات PAH و تعیین منشأ آن‌ها در گردوغبار خیابانی شهر کرج، نمونه‌هایی از نقاط مختلف این شهر جمع‌آوری شده و با استفاده از دستگاه GC-MS مورد تجزیه قرار گرفتند. غلظت و نوع ترکیبات PAH در نمونه‌ها با دیگر شهرهای جهان مقایسه شده است. همچنین برای تعیین منشأ این ترکیبات و ارائه راه‌کار برای کاهش آلودگی از نسبت‌های ایزومری ترکیبات PAH و آنالیز آماری شامل ضریب همبستگی پیرسون، تحلیل مؤلفه اصلی و آنالیز خوشه‌ای استفاده شد که در این فصل به توضیح هر یک از آن‌ها می‌پردازیم.

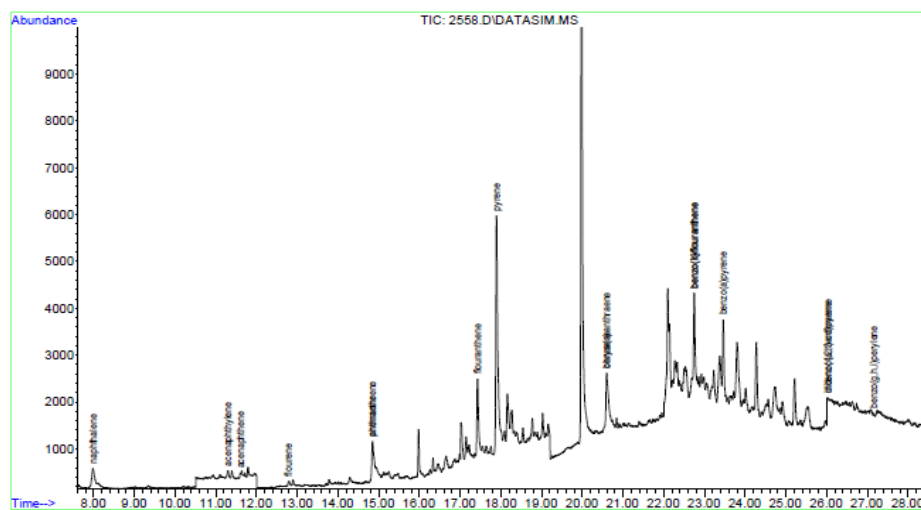
۴-۲- بررسی نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های گردوغبار

ترکیبات PAH بر اساس تعداد حلقه‌های موجود در ساختار خود دارای طیف نشری فلورسانس هستند که در دستگاه GC-MS به صورت یک سیگنال الکتریکی توسط سیستم پردازش شده نشان داده می‌شود. این سیگنال که با مقدار کمی یا غلظت ترکیبات PAH متناسب است در نهایت به صورت یک کروماتوگرام به دست می‌آید. در شکل‌های (۴-۱ الف، ب، ج، د) برای چهار ایستگاه ۷، ۹، ۱۱ و ۱۲ این کروماتوگرام‌ها آورده شده است. لذا اساس نتایج بدست آمده (جدول ۴-۱) هر ۱۶ ترکیب PAH که از سوی سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) به عنوان ترکیبات سرطان‌زا معرفی شده‌اند، در نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر کرج قابل تشخیص هستند. به طور کلی غلظت ترکیبات PAH به دست آمده محدوده‌ای از ۱/۱۸ ppb

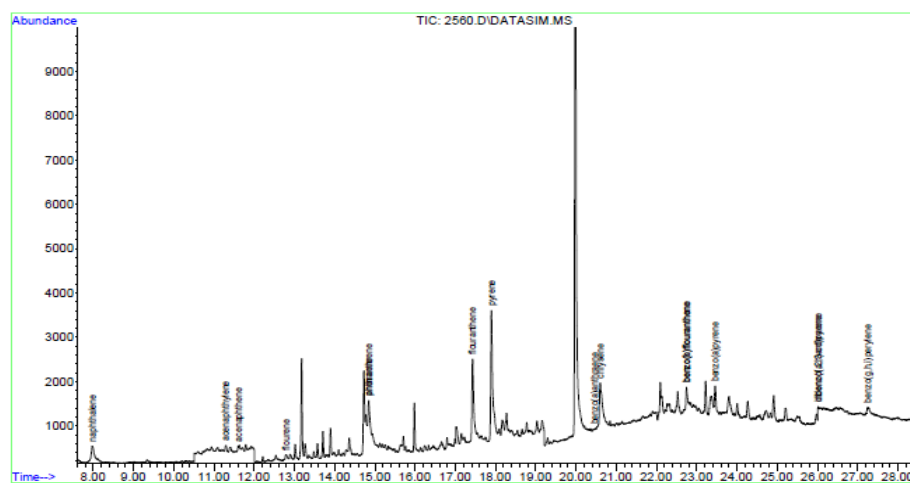
تا ۲۸۵/۴۱ ppb را در بر می‌گیرد. بیش‌ترین مجموع غلظت PAH ها (Σ PAH) در ایستگاه S₁₂ و کم‌ترین غلظت در ایستگاه S₇ بدست آمد. ایستگاه S₁₂ پایانه اتوبوس‌رانی شهر کرج است که به دلیل تردد بالای وسایل نقلیه و توقف اتوبوس‌ها و هم‌چنین قرار گرفتن این مکان در مجاورت بزرگراه تهران-کرج دارای غلظت بالای از ترکیبات PAH است. ایستگاه S₇ پارک شهری است که به دلیل دارا بودن پوشش گیاهی مناسب و کم‌تر بودن تردد وسایل نقلیه در مقایسه با سایر خیابان‌ها دارای غلظت پایین‌تری از PAH‌ها است. مجموع غلظت (Σ PAH) نیز از ۸۸/۴ ppb تا ۷۷۱/۰۲ تغییر می‌کند. بالا بودن غلظت کل به ویژگی‌های مکان نمونه‌برداری مانند حجم ترافیک و وجود عوامل صنعتی مانند کارخانه‌ها بستگی دارد. نبود برخی ترکیبات PAH مانند Fluoranthene, Dibenzo(a,h)anthracene و Fluorene در نمونه‌ها به دلیل بالا بودن درجه دمای محیط در طی نمونه‌برداری است. بسیاری از این ترکیبات آروماتیک به دلیل فشار بخار پایین در محدوده دمایی ۳۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد دچار تبخیر می‌شوند. حسن و همکاران (Hassan et al, 2011) با بررسی غلظت PAH ها در یک منطقه پرتراфик مصر و نمونه‌برداری در فصول مختلف نشان دادند که میزان این ترکیبات در فصول سرد (زمستان و پاییز) بیش از فصول گرم (بهار و تابستان) است که این مسئله به فشار بخار بالای ترکیبات آروماتیک در فراریت زیاد آنها در دماهای بالا باز می‌گردد.



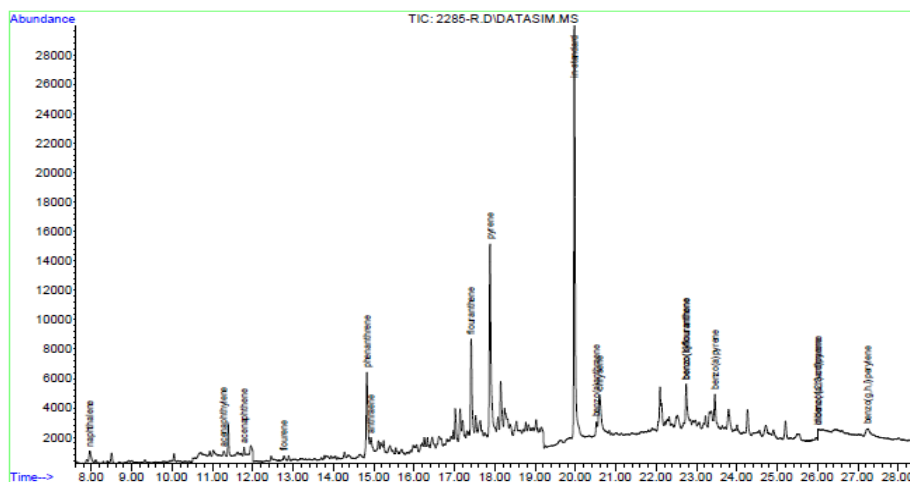
شکل (۴-۱ الف) کروماتوگرام ترکیبات PAH در ایستگاه S₇



شکل (۴-۱) ب) کروماتوگرام ترکیبات PAH در ایستگاه S₉



شکل (۴-۱) ج) کروماتوگرام ترکیبات PAH در ایستگاه S₁₁



شکل (۴-۱) د) کروماتوگرام ترکیبات PAH در ایستگاه S₁₂

جدول ۴-۱- غلظت ترکیبات PAH در نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر کرج (مقادیر بر حسب ppb)

PAH	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃
NA	۱۰/۰۲	۱۷/۷۸	۱۲/۴۷	۲۶/۷۳	۱۹/۴	۷/۱۲	۱۵/۱۹	۱۳/۰۱	۱۹/۳۳	۱۲/۹۱	۲۱/۶۳	۲۴/۴۳	۱۶/۲۳
ACY	۱۵/۵۳	ND	۹/۶۳	۷/۰۱	ND	۸/۷۸	۴/۲۱	۲/۰۱	۱۱/۱۲	۳/۲۳	۶/۷	۱۵/۷۸	۱۰/۱۲
ACE	۸/۹۱	۷/۱۲	۷/۷۱	۳/۴۵	۳/۱۱	۳/۲۱	۵/۱۱	۵/۹۳	۱۱/۲۳	۶/۷۶	۴/۲۳	۱۴/۱	۷/۷۲
FLU	۷/۱۱	۱/۲۸	۱۳/۰۲	ND	۳/۱۳	۱۰/۱۲	۸/۸	۱۰	۱۰/۱۲	۲/۱۱	۱۲/۵۲	۴/۵۱	۳/۴۴
PHE	۱۲/۲۶	۲۷/۶۳	۱۸/۶۳	۱۸/۱۲	۲۰/۰۲	۱۵/۱۲	۳/۱۴	۱۶/۲۳	۲۳/۷۲	۱۸/۲۳	۲۰/۰۱	۳۴/۱۲	۱۶/۰۳
ANT	۱۲/۰۳	۴/۲۳	۳/۲۱	۳/۲۲	۶/۶۲	۱/۹۷	۷/۰۱	۷/۲۳	۶/۳۴	۶/۱۷	۲/۲۹	۳/۲۴	۱۶/۰۵
FLT	۷۷/۰۵	۳۵/۰۸	۲۸/۷۸	۳۸/۰۸	۳۱/۱۱	۲۱/۳۳	۱۵/۰۳	۲۲/۱۷	۴۴/۱۹	ND	۵۶/۱۲	۱۶۲/۱۷	۴۶/۱۳
PYR	۱۱۴/۳۱	۶۳/۰۱	۳۶/۳۲	۵۶/۶۳	۴۵/۲۳	۲۴/۰۸	۱۲/۰۳	۳۴/۰۱	۱۳۳/۱۹	۳۱/۰۳	۸۲/۸۱	۲۸۵/۴۱	۴۱/۹۹
BaA	۱۶/۱۹	۱۰	۱۱/۱۷	۳۱/۹۱	۱۹/۸۳	۱۸/۳۱	۴/۰۸	۱۰/۰۵	۲۸/۳۲	۱۴/۰۵	۲۴/۰۲	۳۲/۵۲	۱۳/۳۲
CRY	۳۳/۱۷	۱۰/۰۱	۱۱/۱۷	۳۲/۷۸	۱۹/۲۳	۱۸	۴/۶۳	۱۰/۱۷	۲۸/۰۱	۱۴/۶۴	۲۵/۷۳	۶۲/۶۶	۱۰/۱۹
BbF	۲/۹۳	۱۱	۱۰/۲۵	ND	۹/۱۲	۱۳/۰۱	۱/۱۸	ND	۲۷/۰۵	۱۰/۲۳	۱۳/۰۵	۴۴/۵۶	۱/۱۷
BaP	۶/۱۳	۲۳/۱۴	۷/۱۲	۱۷/۸۱	۱۸/۳۱	۱۴/۲۳	۴/۹۳	۱۰/۲۱	۴۶/۲۳	۱۳/۰۱	۲۱/۰۲	۷/۳	۱۰/۰۲
DBA	ND	۲/۱۲	ND	ND	۴/۳۱	ND	۲/۱	ND	ND	ND	۳/۰۱	۱۰/۲۳	ND
BkF	۸/۲۳	۱۲/۱	۲۹/۳۲	۱۰/۷۸	۱۰	۱۳/۲۹	ND	۱۳/۰۲	۲۶/۳۱	ND	۱۲/۷۸	۴۳/۳۴	۱۰/۱۲
BGP	۱۰/۴۱	۸/۴۱	۱۰/۰۱	۴/۲۳	۹/۳۸	۹/۷۸	۱/۲۶	۷/۲۳	۱۰/۲۱	۸/۹۹	۷/۳۱	۲۳/۰۳	۴/۳۳
IND	۲/۵۳	۱/۶۱	۲/۱۹	۱/۶۹	۱/۷۸	ND	۲/۸۴	۱/۷۲	۲/۷۳	۲/۱۲	۱/۹	۳/۶۲	۱/۶۶
ΣPAH	۳۳۶/۸	۲۳۴/۴۴	۲۱۱	۲۵۲/۴۴	۲۲۰/۵	۱۷۸/۳۵	۸۸/۴	۱۶۲/۹	۴۲۸/۱	۱۴۳/۴۸	۳۱۵/۱	۷۷۱/۰۲	۲۰۸/۵۲

جدول شماره (۴-۲) مقادیر ماکزیمم (max) و مینیمم (min) غلظت ترکیبات PAH و هم‌چنین میانگین

آن‌ها را در هر ایستگاه نشان می‌دهد. علاوه بر این، مجموع ترکیبات PAH با وزن مولکولی پایین (LMW)

و PAH‌های با وزن مولکولی بالا (HMW) نیز در این جدول نمایش داده شده‌اند. LMW مجموع PAH‌هایی

با ۲ و ۳ حلقه بنزن و HMW مجموع PAH‌های با ۴، ۵ و ۶ حلقه بنزن هستند. غلظت PAH‌های با وزن

مولکولی پایین محدوده‌ای از ۴۳/۴۶ تا ۹۶/۱۸ و غلظت PAH‌های با وزن مولکولی بالا محدوده‌ای از ۴۸/۰۸

تا ۶۷۴/۸۴ میکروگرم بر کیلوگرم را در بر می‌گیرند. با توجه به جدول (۴-۲)، ترکیبات غالب PAH در همه

نمونه‌های گردوغبار، PAH‌های با وزن مولکولی بالا است. بالا بودن غلظت این نوع از PAH‌ها در محیط

شهری به دلیل پایداری بیشتر این ترکیبات، غالب بودن منابع پتروژنیک و تمایل تجمع HMW‌ها در نزدیکی

منابع انتشار آن‌ها است (Morillo et al, 2010).

به طور کلی ویژگی‌های شیمیایی مولکول‌های PAH به تعداد حلقه‌های بنزن و نحوه اتصال آن‌ها به یکدیگر بستگی دارد. PAH‌های با وزن مولکولی پایین اغلب حلالیت و پتانسیل تجزیه و تبخیر بالایی دارند، در حالی که PAH‌های با وزن مولکولی بالا دارای پایداری بیش‌تری هستند و در فاز ذرات ظاهر می‌شوند. PAH‌های جوی در دو فاز ذره‌ای و گازی وجود دارند. ترکیبات سه حلقه‌ای به صورت فاز گازی، ترکیبات پنج و شش حلقه‌ای اغلب در فاز ذره‌ای و ترکیبات با چهار حلقه در هر دو فاز یافت می‌شوند. هرچه مدت زمان همزیستی PAH‌ها با دیگر آلاینده‌ها بالاتر باشد، زمان اقامت این ترکیبات در محیط بیشتر خواهد بود (Cerniglia et al, 1992).

۳-۴- ارزیابی درجه آلودگی

در این بخش به منظور ارزیابی درجه آلودگی نمونه‌های گردوغبار از تقسیم‌بندی مالیزوسکا (Maliszewska et al, 1996) که در جدول (۲-۴) آورده شده است، استفاده گردید. در این تقسیم‌بندی بر اساس مجموع غلظت‌ها، ترکیبات PAH به چهار دسته (الف) غیرآلوده (کم‌تر از ۲۰۰ ppb)، (ب) سطح آلودگی پایین (بین ۲۰۰-۶۰۰ ppb)، (ج) آلوده (بین ۶۰۰-۱۰۰۰ ppb) و (د) به شدت آلوده (بیش از ۱۰۰۰ ppb) تقسیم می‌شوند.

جدول ۲-۴- مجموع ترکیبات PAH با وزن مولکولی بالا و پایین، ماکزیمم، مینیمم و میانگین غلظت این ترکیبات در ایستگاه‌های نمونه‌برداری (مقادیر بر حسب ppb)

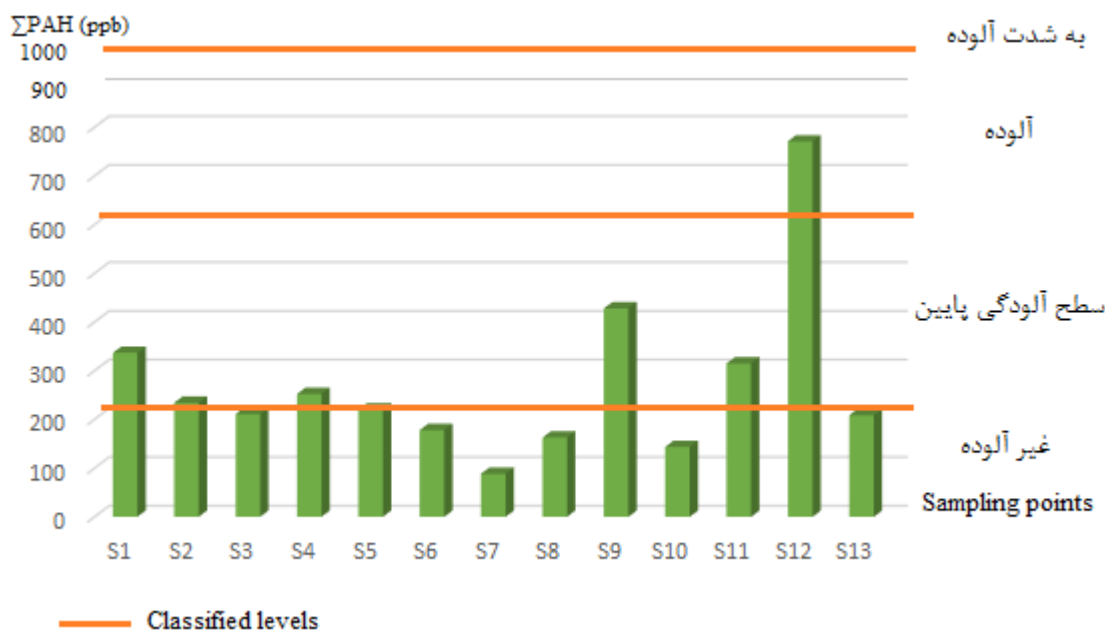
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃
Max	۲۴/۰۸	۳۴/۰۱	۵۶/۶۳	۳۱/۰۳	۱۳۳/۱۹	۳۶/۳۲	۸۲/۸۱	۱۵/۱۹	۶۳/۰۱	۴۵/۲۳	۲۸۵/۴۱	۱۱۴/۳۱	۴۶/۱۳
Min	۱/۹۷	۱/۷۲	۱/۶۹	۲/۱۱	۲/۷۳	۱۲/۱۹	۱/۹	۱/۱۸	۱/۲	۱/۷۸	۳/۲۴	۲/۵۲	۱/۱۷
Mean	۱۱/۱۴	۱۰/۱۸	۱۵/۷۷	۸/۹۶	۲۶/۷۵	۱۳/۱۸	۱۹/۶۹	۵/۵۲	۱۴/۶۵	۱۳/۷۸	۴۸/۱۸	۲۱/۰۵	۱۳/۰۳
HMW	۱۳۲/۰۲	۱۰۸/۵۸	۱۹۳/۹۱	۹۴/۰۷	۳۴۶/۲۴	۱۴۶/۳۳	۲۴۷/۷۵	۴۸/۰۸	۱۷۶/۴۸	۱۶۸/۳	۶۷۴/۸۴	۲۷۰/۹۴	۱۳۸/۹۳
LMW	۴۶/۳۲	۵۴/۴۱	۵۸/۵۳	۴۹/۴۱	۸۱/۸۶	۶۴/۶۷	۶۷/۳۸	۴۳/۴۶	۶۸/۷۶	۵۲/۲۸	۹۶/۱۸	۶۵/۶۸	۶۹/۵۹
LMW/HMW	۰/۳۵	۰/۵	۰/۳	۰/۵۲	۰/۲۳	۰/۴۴	۰/۲۷	۰/۹	۰/۳۸	۰/۳۱	۰/۱۴	۰/۲۴	۰/۵

LMW= Low Molecular Weight

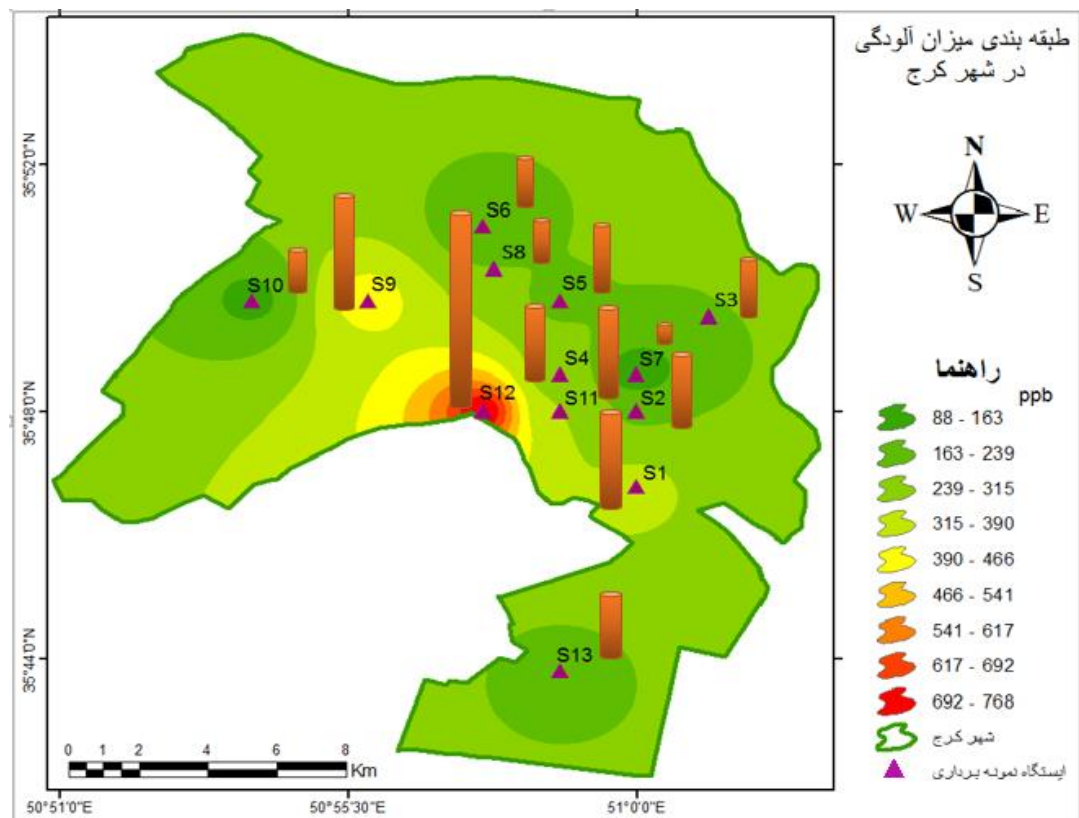
HMW= High Molecular Weight

مطابق این تقسیم‌بندی و جدول (۴-۱) تمام ایستگاه‌های نمونه‌برداری شهر کرج از نظر مجموع ترکیبات PAH درجه مختلف آلودگی را نشان می‌دهند. ایستگاه‌های S₁₀، S₆، S₇ و S₈ غیرآلوده هستند. ایستگاه S₇ مربوط به پارک شهری است که دارای پوشش گیاهی و حجم ترافیک کم است. ایستگاه‌های S₆ و S₈ نیز دو ایستگاه با فاصله نسبتاً کم هستند که در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها دارای ارتفاع بیش‌تر، حجم ترافیک کم‌تر و فاصله بیش‌تر از جایگاه‌های سوخت‌گیری می‌باشند. ایستگاه S₁₀ خروجی شهر می‌باشد و نسبت به مرکز شهر حجم ترافیک کم‌تری دارد. ایستگاه S₁₂ پایانه مسافربری است که به دلیل تمرکز بالای خودروهای سواری و اتوبوس‌ها و ترافیک پر حجم جز مناطق آلوده شهر کرج است. سایر ایستگاه‌ها جز مناطق آلوده با درجه پایین به حساب می‌آیند.

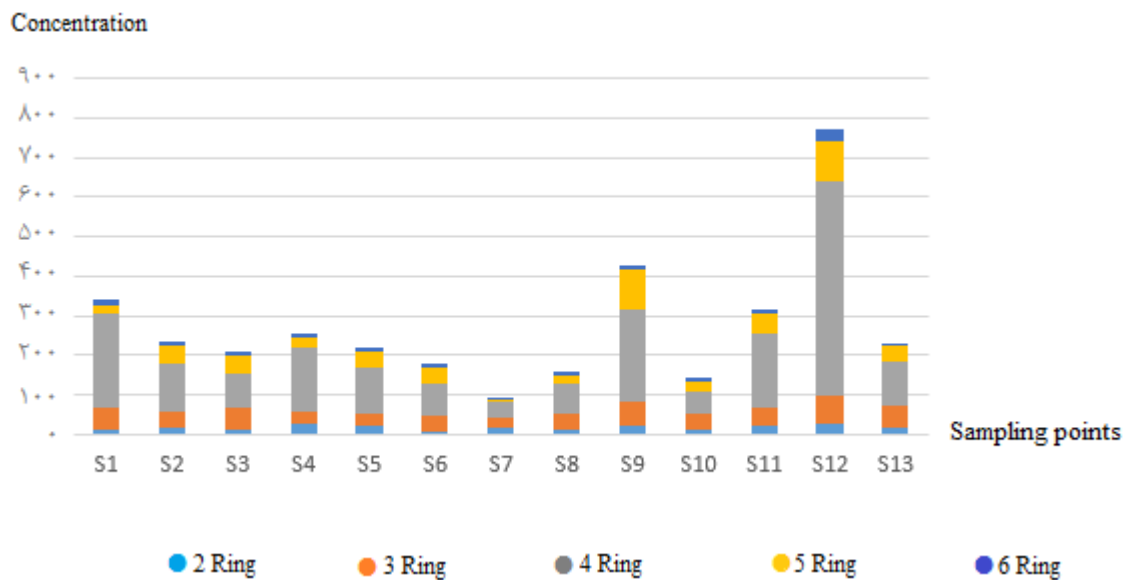
نمودار (۴-۲) درجه آلودگی ایستگاه‌های مختلف و نمودار (۴-۳) غلظت ترکیبات PAH با تعداد حلقه‌های مختلف را در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری نشان می‌دهد. شکل (۴-۵) نیز مربوط به طبقه‌بندی میزان آلودگی در شهر کرج است.



شکل ۴-۲- غلظت مجموع ترکیبات PAH و درجات مختلف آلودگی PAH در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری



شکل ۴-۵- طبقه بندی میزان آلودگی در ایستگاه های مختلف نمونه برداری از گردوغبار شهری در شهر کرج



نمودار ۴-۳- غلظت ترکیبات PAH با تعداد حلقه های مختلف در ایستگاه های نمونه برداری از گردوغبار

۴-۴- مقایسه غلظت PAH در گردوغبار شهر کرج با شهرهای دیگر ایران و جهان

به منظور دستیابی به دیدگاه دقیق‌تر در مورد آلودگی گردوغبار شهری کرج به PAHها، غلظت این ترکیبات با غلظت آن‌ها در گردوغبار شهرهای دیگر مورد مقایسه قرار گرفت. جدول (۳-۴) غلظت میانگین ترکیبات PAH گردوغبار شهر کرج را در مقایسه با گردوغبار شهر تهران، عسلویه و دو شهر دیگر جهان نشان می‌دهد. با بررسی جدول (۳-۴) می‌توان دریافت که غلظت ۱۶ ترکیب PAH در مقایسه با سه شهر عسلویه، گوانگجو، زوژو بسیار کم‌تر و تقریباً مشابه غلظت‌های به دست آمده در شهر تهران است. این شباهت به دلیل نزدیکی این دو شهر به همدیگر و همچنین وجود شرایط مشابه صنعتی و ترافیکی است. بالا بودن غلظت ترکیبات PAH در شهر عسلویه در مقایسه با سایر شهرهای کشور به دلیل وجود واحدهای پتروشیمی است (Zarasvandi et al, 2016). عدم وجود برخی ترکیبات PAH مانند NA، ACE و FLT در گردوغبار این شهر به دلیل فشار بخار پایین آن‌ها است که به آسانی تبخیر می‌شوند (Essumang et al, 2006). مجموع غلظت ترکیبات LMW در شهر کرج کم‌تر و مجموع غلظت ترکیبات HMW بیش‌تر از شهر تهران است. همچنین غلظت بنزوپیرن به عنوان سرطان‌زاترین و خطرناک‌ترین ترکیب در گردوغبار خیابانی شهر کرج (۱۵ ppb) بیش از شهر تهران (۶ ppb) است.

جدول ۳-۴- مقایسه غلظت ترکیبات PAH در گردوغبار شهر کرج با سایر شهرها (کلیه مقادیر بر حسب ppb)

Compounds	کرج ^۱	تهران ^۲	عسلویه ^۳	گوانگجو (چین) ^۴	زوژو (چین) ^۵
Naphthalene	۱۶	۲	ND	۱۴۰	۱۰۰۶
Acenaphthylene	۸	۴۸	۶۳	۳۰	۶۸
Acenaphthene	۶	۴۱	ND	۱۰	۴۸
Fluorene	۷	۸	۸۳۳	۳۰	۱۹۹
Phenanthrene	۲۰	۷۰	۸۸	۵۲۰	۱۰۶۷
Anthracene	۶	۶	۱۲۷	۴۰	۱۶۰
Fluoranthene	۴۸	۱۳	ND	۹۰۰	۱۰۰۸
Pyrene	۷۳	۲۰	۳۲۲	۵۶۰	۷۳۲
Benzo(a)anthracene	۱۷	۱۰	۱۹۴۵	۲۱۰	۳۵۰
Chrysene	۲۱	۲۰	۲۱۹	۵۲۰	۹۵۷

ادامه جدول ۴-۳- مقایسه غلظت ترکیبات PAH در گردوغبار شهر کرج با سایر شهرها (کلیه مقادیر بر حسب ppb)

Benzo(b)fluoranthene	۱۳	۴	۱۰۵۸	۶۲۰	۲۸۷
Benzo(a)pyrene	۱۵	۶	۲۱۲۷	۲۴۰	۲۴۳
Dibenzo(a,h)anthracene	۴	۳۰	۳۲۸	۹۰	۳۲
Benzo(k)fluoranthene	۱۷	۵	۷۰	ND	۲۰۵
Benzo(ghi)perylene	۸	۲۷	۱۰۶	۴۸۰	۱۷۰
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	۲	۱۵	۶۵	۴۰۰	۷۹

¹ This Study

² Saeedi et al, 2012

³ Zarasvandi et al, 2016

^{4,5} Wang, 2017

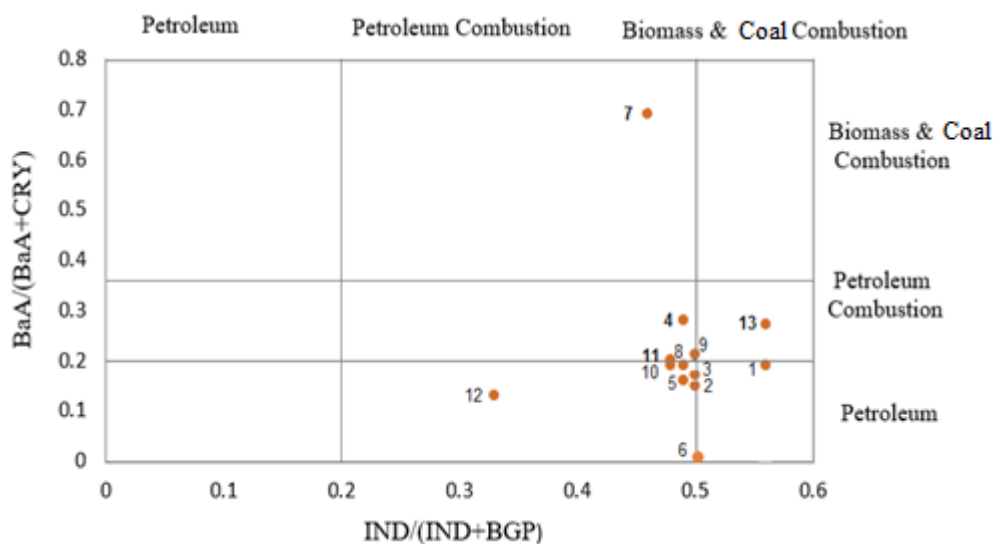
۴-۵- بررسی نسبت‌های ترکیبات PAH و تعیین منشأ احتمالی آن‌ها

داده‌های مربوط به پراکندگی ترکیبات PAH در گردوغبار خیابان می‌تواند اطلاعات مناسبی برای تعیین درجه آلودگی، شناسایی منابع انتشار و ارزیابی خطرات زیست‌محیطی این ترکیبات در اختیار ما قرار دهد. ترکیبات PAH به طور کلی در اثر احتراق مواد آلی مانند سوخت‌های فسیلی تشکیل می‌شوند. این آلاینده‌ها از انواع مختلف فرآیند احتراق مانند منابع خانگی، صنعتی و کشاورزی به محیط وارد می‌شوند. PAH‌های پیروژنیک با بیش از دو حلقه بنزن از سوختن ناقص سوخت‌های فسیلی و زیست‌توده به وجود می‌آیند. PAH‌های پتروژنیک با بیش از ۴ حلقه از فرآیندهای پالایش نفت خام و تبخیر محصولات نفتی حاصل می‌شوند (Lee and Dong, 2011).

از نسبت‌های ایزومری که در فصل سوم بخش (۳-۵-۱) به آن‌ها اشاره شده می‌توان برای تعیین منشأ احتمالی ترکیبات PAH استفاده کرد. در این پژوهش از نسبت‌های ایزومری $BaA/(BaA+CRY)$ ، $IND/(IND+BGP)$ و $Ant/(Ant+Phe)$ استفاده شد. جدول (۴-۴). به منظور بررسی دقیق‌تر منشأ PAH‌ها نسبت‌های مختلف ایزومری این ترکیبات دوبه‌دو مقابل یکدیگر رسم گردیدند. شکل (۴-۶) نیز نمودار نسبت‌های $BaA/(BaA+CRY)$ و $IND/(IND+BGP)$ را برای نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴- نسبت‌های ایزومری PAH ها در نمونه‌های مختلف گردوغبار شهر کرج

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	S ₉	S ₁₀	S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃
BaA/(BaA+CRY)	۰/۵۶	۰/۴۹	۰/۵	۰/۴۹	۰/۵	۰/۵	۰/۴۶	۰/۴۹	۰/۵	۰/۴۸	۰/۴۸	۰/۳۳	۰/۵۶
IND/(IND+BGP)	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۱۵	-	۰/۶۹	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۲۰	۰/۱۳	۰/۲۷
Ant/(Ant+Phe)	۰/۴۹	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۲۴	۰/۱۱	۰/۶۹	۰/۳	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۱	۰/۰۸	۰/۵
ΣCOMB / ΣPAH	۰/۷۹	۰/۶۹	۰/۶۴	۰/۷۶	۰/۷	۰/۶۶	۰/۵	۰/۶۶	۰/۷۴	۰/۵۸	۰/۷۳	۰/۸	۰/۶۶



شکل ۴-۶- نمودار نسبت‌های $BaA/(BaA+CRY)$ به $IND/(IND+BGP)$

مطابق شکل (۴-۵) اکثر نمونه‌های گردوغبار خیابان شهر کرج در محدوده احتراق سوخت‌های فسیلی قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده منشأ عمدتاً پتروژنیک آن‌ها است. همان‌طور که در فصل سوم بخش (۳-۵-۱) اشاره شد اگر LMW/HMW بیش از یک باشد مبین منبع پتروژنیک و در صورتی که این نسبت کمتر از یک باشد نشان‌دهنده منبع پتروژنیک است. ورود نفت خام و تبخیر ترکیبات نفتی از منابع پتروژنیک محسوب می‌شوند، در حالی که احتراق سوخت‌های فسیلی جز منابع پتروژنیک می‌باشند. با توجه به جدول (۴-۲) در همه ایستگاه‌های نمونه‌برداری مقدار نسبت LMW/HMW کمتر از یک و نشان‌دهنده منبع

پیروژنیک برای ترکیبات PAH موجود در گردوغبار خیابانی شهر کرج است. نسبت $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ اگر کمتر از ۰/۱ باشد نشان‌دهنده منابع نفتی است در حالی که این نسبت بیش از ۰/۱ باشد بر منابع احتراق سوخت‌های فسیلی دلالت دارد. اگر نسبت $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ کم‌تر از ۰/۲ باشد نشان‌دهنده منابع نفتی و پتروژنیک است. زمانی که این مقدار بین ۰/۲ تا ۰/۳۵ به دست آید و مقدار $\text{IND}/(\text{IND} + \text{BGP})$ نیز بین ۰/۲ تا ۰/۵ باشد، مشخص‌کننده احتراق نفت و سوخت‌های فسیلی است. اگر مقدار این دو نسبت بیش از ۰/۵ باشد مشخص‌کننده احتراق زغال‌سنگ و زیست‌توده است. با افزایش نسبت $\sum \text{COMB} / \sum \text{PAH}$ اجزا مربوط به منشأ احتراق هم افزایش می‌یابد (Lee and Dong, 2011). با توجه به جدول (۴-۴) نسبت $\sum \text{COMB} / \sum \text{PAH}$ در نمونه‌های گردوغبار شهر کرج محدودهایی از ۰/۵ تا ۰/۸ را در برمی‌گیرند که نشان‌دهنده منشأ احتراق سوخت‌های فسیلی برای ترکیبات PAH است. جدول (۴-۵) نسبت‌های ایزومری، مقادیر آن‌ها و منشأهای احتمالی ترکیبات PAH را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۵- نسبت‌های ایزومری PAH و مقادیر آن‌ها در تشخیص منشأهای احتمالی

نسبت‌های PAH	محدوده	منشأ	این پژوهش	منشأ احتمالی (کرج)
$\text{Ant} / (\text{Ant} + \text{Phe})$	< ۰/۱	پتروژنیک	۰/۲۶	پیروژنیک
	> ۰/۱	پیروژنیک		
$\text{BaA} / (\text{BaA} + \text{Chr})$	< ۰/۲	پتروژنیک	۰/۴۵	گازوئیل
	۰/۲۲-۰/۵۵	گازوئیل		
	۰/۳۸-۰/۶۴	دیزل		
	۰/۳۵-۰/۵	پتروژنیک		
$\text{IND} / (\text{IND} + \text{BGP})$	> ۰/۲ - < ۰/۵	احتراق سوخت‌های فسیلی	۰/۲۲	سوخت‌های فسیلی
	> ۰/۵	زغال‌سنگ و زیست‌توده		
$\sum \text{LMW} / \sum \text{HMW}$	< ۱	پیروژنیک	۰/۳۹	پیروژنیک
	> ۱	پتروژنیک		

۶-۴- تجزیه و تحلیل آماری

۶-۴-۱- ضریب همبستگی پیرسون

در این پژوهش جهت بررسی ارتباط میان ترکیبات PAH و نیز منشأ احتمالی آن‌ها، از ضریب همبستگی پیرسون در دو سطح آماری ۰/۰۱ و ۰/۰۵ استفاده شد. جدول (۶-۴) همبستگی این ترکیبات با یکدیگر را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، همبستگی قوی و معناداری بین ترکیبات FLT با ACY و ACE با ضریب ۰/۷ و هم‌چنین بین PYR با ACE و FLT به ترتیب با ضرایب ۰/۸ و ۰/۹ و نیز بین ترکیبات CRY با FLT، PYR، BaA و ضرایب ۰/۹ و ۰/۸ در سطح اطمینان ۰/۰۱ مشاهده می‌شود؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این ترکیبات در نمونه‌های گردوغبار منشأ مشترک دارند. هم‌چنین همبستگی مثبت و معناداری بین ترکیبات BbF، BkF و BGP با ترکیبات ذکر شده در بالا در کنار دو ترکیب دیگر PHE و BaP وجود دارد که نشان‌دهنده منشأ مشترک این دو می‌باشد. مطابق جدول (۵-۴) ترکیب IND با بیش از نیمی از سایر ترکیبات از جمله ACE، PHE، FLT، PYR، CRY، BbF، BaP و BkF همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ نشان می‌دهد؛ این مسئله نشان می‌دهد تمام ترکیبات PAH در نمونه‌های گردوغبار دارای منشأ مشترک و عمدتاً انسان‌زاد هستند.

جدول ۴-۶- ضرایب همبستگی بین ترکیبات PAH

	NA	ACY	ACE	FLU	PHE	ANT	FLT	PYR	BaA	CRY	BbF	BaP	DBA	BkF	BGP	IND
NA	۱															
ACY	۰/۰۰۹	۱														
ACE	۰/۱۵۴	۰/۶۵۳*	۱													
FLU	-۰/۳۸۸	۰/۲۲۴	۰/۰۰۹	۱												
PHE	۰/۴۹۲	۰/۱۷۵	۰/۵۲۳	-۰/۲۶۶	۱											
ANT	-۰/۲۴۷	۰/۱۷۶	۰/۱۸۰	-۰/۲۱۵	-۰/۳۴۳	۱										
FLT	۰/۴۴۶	۰/۷۰۰**	۰/۷۰۳**	-۰/۰۷۴	۰/۵۸۱*	-۰/۰۲۹	۱									
PYR	۰/۴۷۷	۰/۶۵۸*	۰/۸۰۵**	-۰/۰۷۶	۰/۶۸۳*	-۰/۱۲۴	۰/۹۴۵**	۱								
BaA	۰/۶۷۶*	۰/۴۶۲	۰/۲۷۴	-۰/۱۶۰	۰/۵۹۷*	-۰/۳۳۸	۰/۵۸۶*	۰/۶۶۷*	۱							
CRY	۰/۵۲۳	۰/۶۶۸*	۰/۵۶۶*	-۰/۱۴۶	۰/۵۹۴*	-۰/۲۳۰	۰/۸۸۷**	۰/۹۱۴**	۰/۸۳۸**	۱						
BbF	۰/۳۳۰	۰/۵۶۸*	۰/۶۹۴**	۰/۲۴۲	۰/۷۱۱**	-۰/۳۳۷	۰/۷۲۰**	۰/۷۶۶**	۰/۵۳۶	۰/۵۶۰*	۱					
BaP	۰/۳۵۴	۰/۴۶۳	۰/۷۰۶**	۰/۰۶۷	۰/۷۴۵**	-۰/۴۰۱	۰/۷۱۳**	۰/۸۵۱**	۰/۶۰۱*	۰/۷۲۹**	۰/۸۱۲**	۱				
DBA	۰/۳۲۳	-۰/۱۰۴	۰/۰۹۶	۰/۰۳۰	۰/۳۷۷	-۰/۱۹۹	-۰/۱۲۲	۰/۱۱۳	۰/۴۲۹	۰/۰۵۷	۰/۱۴۶	۰/۳۰۰	۱			
BkF	۰/۵۲۳	۰/۲۲۷	۰/۴۴۴	-۰/۱۷۲	۰/۵۶۳*	-۰/۲۷۸	۰/۷۹۳**	۰/۷۶۸**	۰/۴۳۲	۰/۶۹۲**	۰/۵۸۴	۰/۷۳۷**	-۰/۱۵۵	۱		
BGP	۰/۳۷۸	۰/۴۴۵	۰/۷۵۱**	۰/۰۲۴	۰/۱۸۷	۰/۰۸۷	۰/۶۰۸*	۰/۶۸۹**	۰/۲۱۹	۰/۵۲۶	۰/۴۴۸	۰/۵۲۹	-۰/۰۶۰	۰/۵۶*	۱	
IND	۰/۱۵۹	۰/۵۱۷	۰/۶۹۲**	-۰/۰۰۸	۰/۷۵۳**	-۰/۲۸۹	۰/۷۸۵**	۰/۸۵۰**	۰/۵۱۱	۰/۷۸۰**	۰/۷۹۴**	۰/۸۷۱**	-۰/۰۱۲	۰/۷۳۱**	۰/۴۵۱	۱

* معنی‌دار در سطح ۰/۰۵

** معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

۶-۴-۲- تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)

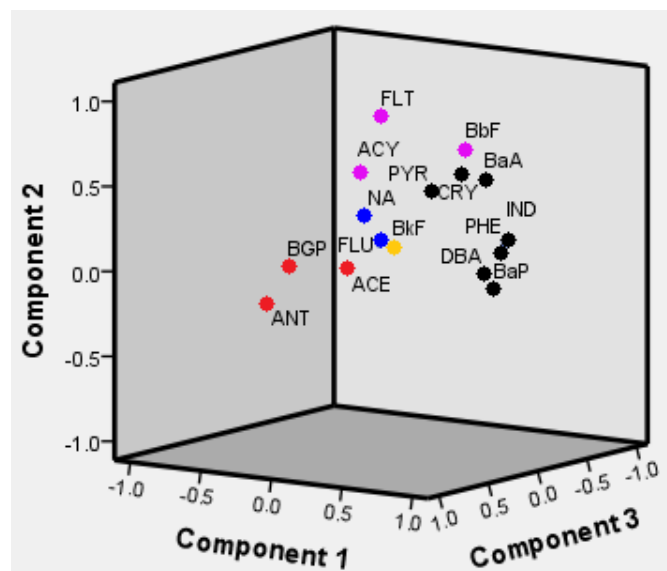
تحلیل مؤلفه اصلی از جمله دیگر روش‌های آماری است که با مشخص نمودن گروه‌ها یا مؤلفه‌های مختلف ترکیبات مرتبط باهم، رفتار مشابه و منشأ مشترک آن‌ها را تأیید می‌کند (Taheri et al, 2005). در جدول (۷-۴) نتایج به دست آمده از انجام تحلیل مؤلفه اصلی بر روی متغیرهای اندازه‌گیری شده در نمونه‌های گردوغبار شهر کرج آورده شده است. با انجام روش PCA در ابتدا ۱۶ مؤلفه از ساختار اولیه داده‌ها استخراج شد. با توجه به شکل (۷-۴) مؤلفه‌هایی که دارای بیش‌ترین واریانس از واریانس کل هستند و به عبارتی مقادیر ویژه آن‌ها بیش‌تر از یک است به عنوان مؤلفه اصلی انتخاب شدند. سپس داده‌ها حول محور مختصات به روش واریماکس چرخش یافته و واریانس میان مؤلفه‌ها به حداکثر می‌رسد. در این حالت مؤلفه‌ها کاملاً نسبت به یکدیگر ناهم‌بسته می‌شوند. پنج مؤلفه اصلی استخراج شده بعد از چرخش داده‌ها در جدول (۴-۸) آورده شده است.

جدول ۷-۴- نتایج روش تحلیل مؤلفه اصلی بر روی متغیرهای اندازه‌گیری شده در نمونه‌های گردوغبار شهر کرج

مؤلفه	کل	درصد واریانس	درصد تجمعی	کل	درصد واریانس	درصد تجمعی	کل	درصد واریانس	درصد تجمعی
۱	۵/۹۱۷	۳۶/۹۸۴	۳۶/۹۸۴	۵/۹۱۷	۳۶/۹۸۴	۳۶/۹۸۴	۴/۳۰۱	۲۶/۸۸۳	۲۶/۸۸۳
۲	۲/۴۹۸	۱۵/۶۱۳	۵۲/۵۹۷	۲/۴۹۸	۱۵/۶۱۳	۵۲/۵۹۷	۲/۸۴۵	۱۷/۷۸۲	۴۴/۶۶۵
۳	۲/۱۲۴	۱۳/۲۷۴	۶۵/۸۷۱	۲/۱۲۴	۱۳/۲۷۴	۶۵/۸۷۱	۲/۳۱۵	۱۴/۴۷۱	۵۹/۱۲۶
۴	۱/۴۵۲	۹/۰۷۳	۷۴/۹۴۴	۱/۴۵۲	۹/۰۷۳	۷۴/۹۴۴	۲/۰۸۷	۱۳/۰۴۶	۷۲/۱۸۱
۵	۱/۳۶۹	۸/۵۵۶	۸۳/۴۹۹	۱/۳۶۹	۸/۵۵۶	۸۳/۴۹۹	۱/۸۱۱	۱۱/۳۱۸	۸۳/۴۹۹
۶	۰/۹۷۰	۶/۰۶۱	۸۹/۵۶۱						
۷	۰/۷۰۱	۴/۳۸۴	۹۳/۹۴۵						
۸	۰/۴۵۱	۲/۸۱۹	۹۶/۷۶۴						
۹	۰/۲۷۴	۱/۷۱۴	۹۸/۴۷۸						
۱۰	۰/۱۴۲	۰/۸۸۹	۹۹/۳۶۷						
۱۱	۰/۰۷۹	۰/۴۹۷	۹۹/۸۶۳						
۱۲	۰/۰۲۲	۰/۱۳۷	۱۰۰						
۱۳	۰	۰	۱۰۰						
۱۴	۰	۰	۱۰۰						
۱۵	۰	۰	۱۰۰						
۱۶	۰	۰	۱۰۰						

جدول ۴-۸- پنج مؤلفه اصلی استخراج شده پس از چرخش متغیرها به روش واریماکس

	۱	۲	۳	۴	۵
NA	۰/۰۴۹	۰/۳۱۲	۰/۲۴۹	۰/۶۸۰	۰/۵۲۳
ACY	۰/۰۵۰	۰/۵۹۰	۰/۲۸۰	-۰/۳۹۹	-۰/۳۹۱
ACE	۰/۳۵۰	۰/۱۲۶	۰/۸۳۳	-۰/۲۳۰	-۰/۰۲۳
FLU	-۰/۰۰۳	۰/۱۱۵	۰/۰۱۰	-۰/۸۶۳	۰/۰۳۴
PHE	۰/۸۶۵	۰/۲۰۴	-۰/۰۲۲	۰/۳۰۵	۰/۰۳۲
ANT	-۰/۳۵۸	-۰/۱۶۸	۰/۶۴۱	۰/۱۲۲	-۰/۳۲۳
FLT	۰/۰۲۲	۰/۸۶۸	۰/۰۴۴	-۰/۰۶۲	۰/۲۸۵
PYR	۰/۶۴۸	۰/۵۶۴	۰/۴۱۲	۰/۱۶۲	۰/۱۶۴
BaA	۰/۶۷۲	۰/۵۵۲	-۰/۰۹۱	۰/۳۴۹	-۰/۰۷۷
CRY	۰/۶۳۲	۰/۶۰۴	۰/۱۰۶	۰/۱۸۲	۰/۰۱۰
BbF	۰/۵۰۳	۰/۷۰۵	-۰/۱۲۷	-۰/۰۴۲	۰/۰۴۹
BaP	۰/۸۰۶	-۰/۰۷۱	۰/۰۱۹	-۰/۳۰۴	۰/۳۷۹
DBA	۰/۵۲۱	-۰/۰۴۹	-۰/۳۲۰	۰/۵۰۴	-۰/۰۲۲
BkF	۰/۱۲۱	۰/۱۱۶	۰/۰۷۱	۰/۰۳۵	۰/۹۴۲
BGP	-۰/۰۴۴	۰/۰۹۴	۰/۸۶۵	۰/۰۸۶	۰/۳۶۱
IND	۰/۹۱۴	۰/۱۸۴	۰/۰۷۱	-۰/۱۳۶	۰/۰۰۸



شکل ۴-۷- مؤلفه‌های اصلی استخراج شده از ساختار اولیه داده‌ها

با انجام PCA مشخص شد که پنج مؤلفه استخراج شده، ۸۳/۴۹ درصد از واریانس کل را شامل می‌شوند. مطابق جدول (۷-۴) مؤلفه اول ۳۶/۹۸۴ درصد از کل واریانس را در بر گرفته و شامل DBA، PHE، PYR، BaA، CRY و BaP است. ترکیبات CRY و IND معرف منابع بنزین و ترکیبات PHE، PYR به عنوان منابع نفتی و یک ردیاب منابع ترافیک و وسایل نقلیه هستند (Guo et al, 2003). IND هم‌چنین به مقدار زیادی توسط موتورهای بنزینی تولید می‌شود (Harrison et al, 1996). ترکیبات DBA، BaP و BaA نشان‌دهنده منبع وسایل نقلیه با سوخت دیزلی هستند (Maselet et al, 1986). بنابراین می‌توان گفت مؤلفه اول بیان‌گر انتشار PAHها حاصل از ترافیک وسایل نقلیه است. مؤلفه دوم ۱۵/۶۱۳ درصد از کل واریانس را شامل می‌شود که خود شامل ترکیبات ACY، FLT و BbF است که عمدتاً معرف منابع نفتی و است (Long et al, 2013). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل دوم بیان‌گر منابع نفتی حاصل از وسایل نقلیه است. مؤلفه سوم با ۱۳/۲۷۴ درصد از کل واریانس شامل ترکیبات ACE، ANT و BGP می‌شود که مانند فاکتور دوم نشان‌دهنده منابع نفتی است. مؤلفه چهارم با ۹/۰۷۳ درصد از کل واریانس دارای ترکیبات NA و FLU بیان‌گر منابع نفت و وسایل نقلیه با سوخت دیزلی است. درنهایت مؤلفه پنجم با ۸/۵۵۶ درصد از واریانس کل شامل ترکیب BkF است که منشأ مشابه سایر منابع مذکور دارد. بنابراین احتراق سوخت‌های فسیلی توسط وسایل نقلیه و ترافیک مهم‌ترین منبع ترکیبات PAH در گردوغبار خیابان شهر کرج هستند. به عبارت دیگر PAHها در اکثر ایستگاه‌های نمونه‌برداری شهر منبع یکسانی دارند. جدول (۹-۴) منشأ ۱۶ ترکیب اصلی ترکیبات PAH را نشان می‌دهد.

جدول ۹-۴- منشأ ترکیبات PAH (Majumbar et al, 2016)

منشأ	PAH
احتراق ناقص	Naphthalene
خودرو	Acenaphthylene
پتروژنیک	Acenaphthene
ترافیک	Fluorene
دیزل	Phenanthrene

ادامه جدول ۴-۹- منشأ ترکیبات PAH

Anthracene	نفت
Fluoranthene	دیزل
Pyrene	دیزل
Benzo(a)anthracene	گاز طبیعی
Chrysene	زغال سنگ
Benzo(b)fluoranthene	دیزل
Benzo(a)pyrene	وسایل نقلیه
Dibenzo(a,h)anthracene	قیر و گازوئیل
Benzo(k)fluoranthene	موتور
Benzo(ghi)perylene	گازوئیل
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	گازوئیل

۴-۷- زمین پزشکی ترکیبات PAH

ترکیبات PAH دارای پتانسیل جهش‌زایی و سرطان‌زایی هستند که باعث نگرانی‌های زیست‌محیطی شده است. بنزوپیرن (BaP) سرطان‌زاترین ترکیب PAH شناخته شده است (Wang et al, 2002). نرخ جذب PAHها به دلیل پتانسیل بالای آنها برای تجمع در زنجیره غذایی بسیار بالا است (Tao et al, 2006). در نمونه‌های مورد مطالعه غلظت ترکیب BaP بازه‌ای بین ۴/۹۳ تا ۴۶/۲۳ را در بر می‌گیرد. کم‌ترین غلظت مربوط به منطقه پارک شهری (S7) و بیش‌ترین غلظت مربوط به یک مسیر پرترافیک و شلوغ (S9) است. از عوارض این ترکیب می‌توان به مشکلات تولید مثلی، نارسایی جنین و سرطان ریه اشاره کرد (Essumang et al, 2006).

۱-۴-۷- ضریب هم‌ارز سمناکی (TEF)

در این پژوهش خطر مرتبط با ترکیبات PAH با محاسبه ضریب هم‌ارز سمناکی برای این نوع از آلاینده‌ها ارزیابی گردید. این ضریب، سرطان‌زایی هر یک از ترکیبات PAH را نسبت به سرطان‌زایی BaP مقایسه می‌کند. هر یک از این ترکیبات و قدرت سرطان‌زایی آنها بر اساس غلظت معادل BaP در جدول (۴-۱۰) نشان داده شده است. با توجه به این جدول سرطان‌زایی ترکیب ACY از همه کم‌تر و BaP بیش از ترکیبات

دیگر است. ترکیبات PAH با تعداد حلقه‌های ۴، ۵ و ۶ که دارای وزن مولکولی بالا هستند بیش‌ترین میزان TEF را دارا هستند. اگرچه ترکیبات با وزن مولکولی پایین ریسک سرطان‌زایی کم‌تری برای انسان دارند، ولی امکان حضور این ترکیبات در فاز گازی در جو بیش‌تر است و بدین علت با دیگر آلاینده‌ها واکنش نشان داده و ترکیباتی با درجه سمناکی بالاتر را تشکیل می‌دهند (Hassan et al, 2012). هم‌چنین در بین ترکیبات PAH با وزن مولکولی پایین تنها نفتالن (NA) به عنوان ماده شیمیایی سرطان‌زا شناخته شده است (Lee and Dong, 2011).

جدول ۴-۱۰- مقادیر TEF و BaP برای ترکیبات PAH در نمونه‌های گردوغبار شهر کرج

PAH	TEF	BaP
NA	۰/۰۰۱	۰/۲۱
ACY	۰/۰۰۱	۰/۰۹
ACE	۰/۰۰۱	۰/۰۸
FLU	۰/۰۰۱	۰/۰۸
PHE	۰/۰۰۱	۰/۲۴
ANT	۰/۰۱	۰/۷۹
FLT	۰/۰۰۱	۰/۵۷
PYR	۰/۰۰۱	۰/۹۶
BaA	۰/۱	۲۳/۲۷
CRY	۰/۰۱	۲/۸
BbF	۰/۱	۱۴/۳۵
BaP	۱	۱۹۹/۴۶
DBA	۱	۲۱/۷۷
BGP	۰/۰۱	۱/۱۴
IND	۰/۱	۲/۶۳
BkF	۰/۱	۱۸/۹۲

۷-۴-۲- متوسط غلظت دریافت روزانه (ADD¹¹)

همان‌طور که در فصل سوم بخش (۳-۵-۲-۲) گفته شد ضریب (ADD) دریافت متوسط غلظت مجاز را نشان می‌دهد (Wang et al., 2017). در جدول (۴-۱۱) این ضریب برای ترکیبات PAH برای دو گروه سنی خردسال و بزرگسال محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود متوسط غلظت دریافت روزانه برای گروه سنی بزرگسالان برای هر ۱۶ ترکیب PAH پایین است ولی برای خردسالان این ضریب تا حدی بالاست.

جدول ۴-۱۱- مقدار ضریب ADD برای ترکیبات PAH

PAH	ADD برای بزرگسال (ppb)	ADD برای خردسال (ppb)
NA	۷۰/۳۲	۱۴۴/۱۶
ACY	۳۰/۶	۶۲/۷۴
ACE	۲۸/۸	۵۹/۰۶
FLU	۲۷/۹۹	۵۷/۳۸
PHE	۷۸/۰۸	۱۶۰/۰۸
ANT	۲۵/۸۸	۵۳/۰۷
FLT	۱۸۷/۷۲	۳۸۴/۸۲
PYR	۶۱۲/۲۱	۶۴۰/۰۳
BaA	۷۶/۰۲	۱۵۵/۸۴
CRY	۹۱/۱۸	۱۸۶/۹۲
BbF	۴۶/۶۸	۹۵/۷
BaP	۶۴/۸۶	۱۳۲/۹۷
DBA	۷/۰۷	۱۴/۵۱
BGP	۳۷/۲۶	۷۶/۳۸
IND	۸/۵۷	۱۷/۵۸
BkF	۶۱/۵۵	۱۲۶/۱۹

¹¹ Average Daily Dose

۷-۴- خطر ابتلا به سرطان با افزایش طول عمر (ILCR^{۱۲})

ضریب ILCR برای ارزیابی پتانسیل خطر PAH های موجود در ذرات گردوغبار مورد استفاده قرار می گیرد (Rastegari Mehr et al., 2016؛ Soltani et al., 2015). مطابق پارامترهای جدول (۳-۴)، ضریب ILCR برای هر کدام از ترکیبات PAH برای دو گروه سنی بزرگسال و خردسال محاسبه شد که در جدول (۴-۱۲) نتایج آن آورده شده است. حداقل و حداکثر این ریسک از طریق استنشاق در خردسالان به ترتیب برابر با $2/8 \times 10^{-13}$ و $7220/05 \times 10^{-13}$ است و همچنین حداقل و حداکثر این ریسک در بزرگسالان به ترتیب برابر $13/3 \times 10^{-13}$ و $34025/9 \times 10^{-13}$ بدست آمد. این اعداد نشان می دهند که گروه سنی بزرگسالان در معرض خطر بیش تری نسبت به گروه خردسالان می باشند. ترکیب BaP بیش ترین ریسک سرطان زایی را در هر دو گروه به خود اختصاص داده است و ترکیب ACE کم ترین ریسک سرطان زایی را دارا است.

جدول ۴-۱۲- خطر ابتلا به سرطان با قرارگیری در معرض PAHs در شهر کرج

PAH	ILCR برای خردسال	ILCR برای بزرگسال
NA	$7/5 \times 10^{-13}$	$35/4 \times 10^{-13}$
ACY	$3/7 \times 10^{-13}$	$17/7 \times 10^{-13}$
ACE	$2/8 \times 10^{-13}$	$13/3 \times 10^{-13}$
FLU	$3/2 \times 10^{-13}$	$15/5 \times 10^{-13}$
PHE	$9/4 \times 10^{-13}$	$44/3 \times 10^{-13}$
ANT	$28/7 \times 10^{-13}$	$135/3 \times 10^{-13}$
FLT	$22/5 \times 10^{-13}$	$106/4 \times 10^{-13}$
PYR	$34/3 \times 10^{-13}$	$161/9 \times 10^{-13}$
BaA	$846/2 \times 10^{-13}$	$3988/2 \times 10^{-13}$
CRY	$101/2 \times 10^{-13}$	$476/9 \times 10^{-13}$
BbF	$614/2 \times 10^{-13}$	$2894/6 \times 10^{-13}$
BaP	$7220/05 \times 10^{-13}$	$34025/9 \times 10^{-13}$
DBA	$2047/4 \times 10^{-13}$	$9648/8 \times 10^{-13}$
BGP	$41/4 \times 10^{-13}$	$195/2 \times 10^{-13}$
IND	$103/07 \times 10^{-13}$	$485/7 \times 10^{-13}$
BkF	$809/5 \times 10^{-13}$	$3815/2 \times 10^{-13}$

¹² Incremental Lifetime Cancer Risk

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

در سال‌های اخیر، با توسعه اقتصادی و جمعیتی، مناطق شهری به سرعت گسترش پیدا کرده‌اند. تقریباً ۵۰ درصد جمعیت جهانی در مناطق شهری زندگی می‌کنند که در نتیجه آن آلاینده‌های بسیاری به محیط‌زیست شهری وارد می‌شوند. از جمله این آلاینده‌ها، هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای (PAHs) هستند. گردوغبار شهری یک منبع مهم برای ته‌نشینی آلاینده‌های مختلف مانند PAHها است که اثرات مضر را از طریق استنشاق، تماس پوستی و بلع بر سلامت افراد می‌گذارد.

شهر کرج که هم‌اکنون در ردیف ۶ کلان‌شهر کشور قرار دارد با معضلات زیست‌محیطی متعددی ناشی از رشد جمعیت و آلودگی هوا روبروست. این شهر از نظر جابه‌جایی داخلی با توجه به جمعیت روزافزون آن و عدم کارایی شبکه راه‌ها دچار مشکل ترافیک است. همچنین شهر کرج قطب صنعتی ایران به شمار می‌رود. توسعه چشم‌گیر این منطقه و روند رو به افزایش مهاجرت به این شهر و به تبع آن تقاضای سفرهای فراوان و ناکافی بودن تسهیلات ترافیکی باعث افزایش استفاده از وسایل نقلیه شخصی، تراکم ترافیک و آلودگی هوا شده است. کسب اطلاعات زمینه در مورد عوامل آلاینده‌های بالقوه جوی و حامل‌های آن و همچنین بررسی اثرات آنها یکی از راهکارهای مدیریت آلودگی هوا به‌ویژه در محیط‌های شهری است. هدف از این پژوهش اندازه‌گیری نوع و غلظت ترکیبات PAH در نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر کرج، مقایسه نوع و غلظت ترکیبات PAH با نتایج به دست آمده از سایر کشورها، محاسبه آلودگی و منشأ احتمالی ترکیبات PAH و بالاخره ارزیابی ریسک سلامتی ناشی از این آلاینده‌ها است. در این فصل به مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش پرداخته می‌شود.

۵-۲- نتایج به‌دست آمده در این پژوهش

نتایج به‌دست آمده از این مطالعه را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- بررسی آلودگی گردوغبار خیابان شهر کرج از نظر ترکیبات PAH نشان داد که ۱۶ ترکیب اصلی تعیین شده توسط EPA با غلظت‌های متفاوت در نمونه‌های مورد مطالعه وجود دارند.

۲- مجموع غلظت (Σ PAH) از ۸۸/۴ ppb تا ۷۷۱/۰۲ تغییر می‌کند که به ویژگی‌های نقاط نمونه‌برداری بستگی دارد. کم‌ترین غلظت مربوط به ترکیب FLU در ایستگاه S₂ (پارک شهری) با مقدار ppb ۱/۲۶ و بیش‌ترین غلظت نیز مربوط به ترکیب PYR در ایستگاه S₁₂ (ایستگاه اتوبوس) با مقدار ppb ۲۸۵/۴۱ است.

۳- میانگین غلظت ترکیبات PAH با نتایج به دست آمده در دیگر شهرها در دنیا مقایسه شد. غلظت ۱۶ ترکیب PAH در مقایسه با سه شهر عسلویه، گوانگجو، زوژو بسیار کم‌تر و تقریباً مشابه غلظت-های بدست آمده از شهر تهران است. با این تفاوت که مجموع غلظت ترکیبات LMW در شهر کرج کم‌تر و مجموع غلظت ترکیبات HMW بیش‌تر از شهر تهران به دست آمد.

۴- در این پژوهش از نسبت‌های ایزومری BaA/(BaA+CRY)، IND/(IND+BGP) و Ant/(Ant+Phe) برای تعیین منشأ PAH‌ها در نمونه‌های گردوغبار خیابانی شهر کرج استفاده شد. نتایج نشان دادند که PAH‌های موجود در نمونه‌های گردوغبار دارای منشأ پیروژنیک هستند و عمدتاً از احتراق سوخت‌های فسیلی حاصل شده‌اند.

۵- در تحلیل‌های آماری از ضریب همبستگی پیرسون و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) برای تعیین منشأ استفاده شد. همبستگی قوی و معناداری بین ترکیبات FLT با ACY و ACE با ضریب ۰/۷ و هم‌چنین بین PYR با ACE و FLT به ترتیب با ضرایب ۰/۸ و ۰/۹ و نیز بین ترکیبات CRY با FLT، PYR و BaA با ضرایب ۰/۹ و ۰/۸ در سطح اطمینان ۰/۰۱ مشاهده می‌شود؛ هم‌چنین همبستگی مثبت و معناداری بین ترکیبات BbF، BkF و BGP با ترکیبات ذکر شده در بالا در کنار دو ترکیب دیگر PHE و BaP نشان‌دهنده منشأ مشترک این دو ترکیب می‌باشد. ترکیب IND با

بیش از نیمی از سایر ترکیبات از جمله ACE، PHE، FLT، PYR، CRY، BbF، BaP و BkF همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ دارد؛ این نشان می‌دهد تمام ترکیبات PAH در نمونه‌های گردوغبار دارای منشأ مشترک و عمدتاً انسان‌زاد هستند. با انجام روش PCA پنج مؤلفه اصلی از ساختار اولیه داده‌ها استخراج شد. مؤلفه اول ۳۶/۹۸۴ درصد از کل واریانس را در بر گرفته و شامل DBA، PHE، PYR، BaA، CRY، BaP و IND است. این مؤلفه بیان‌گر انتشار PAH حاصل از ترافیک وسایل نقلیه است. مؤلفه دوم ۱۵/۶۱۳ درصد از کل واریانس را شامل می‌شود که خود شامل ترکیبات ACY، FLT و BbF است که مبین منابع نفتی حاصل از وسایل نقلیه است. مؤلفه سوم با ۱۳/۲۷۴ درصد از کل واریانس شامل ترکیبات ACE، ANT و BGP می‌شود که مانند مؤلفه دوم نشان‌دهنده منابع نفتی است. مؤلفه چهارم با ۹/۰۷۳ درصد از کل واریانس دارای بارگذاری ترکیبات NA و FLU است که نشان‌دهنده منابع نفت و وسایل نقلیه با سوخت دیزلی است. در نهایت مؤلفه پنجم با ۸/۵۵۶ درصد از واریانس کل شامل ترکیب BkF است که منشأ مشابه سایر منابع مذکور دارد. بنابراین احتراق سوخت‌های فسیلی توسط وسایل نقلیه و ترافیک مهم‌ترین منبع ترکیبات PAH در گردوغبار خیابانی شهر کرج هستند.

۶- خطر وابسته به ترکیبات PAH سرطان‌زا در این مطالعه به وسیله ضریب هم‌ارز سمناک (TEF) برای تمام ترکیبات PAH محاسبه شد. سرطان‌زایی ترکیب ACY از همه کم‌تر و BaP بیش از ترکیبات دیگر به دست آمد.

۷- متوسط غلظت دریافت روزانه (ADD) برای ترکیبات PAH برای دو گروه سنی خردسال و بزرگسال محاسبه شد. متوسط غلظت دریافت روزانه برای گروه سنی بزرگسالان برای هر ۱۶ ترکیب PAH پایین است ولی برای خردسالان این ضریب تا حدی بالاست.

۸- ضریب ILCR برای هر کدام از ترکیبات PAH برای دو گروه سنی بزرگسال و خردسال محاسبه شد. حداقل و حداکثر این ریسک از طریق استنشاق در خردسالان به ترتیب برابر $10^{-13} \times 2/8$ و $10^{-13} \times 7220/0.5$ است و حداقل و حداکثر این ریسک در بزرگسالان به ترتیب برابر $10^{-13} \times 13/3$ و $10^{-13} \times 34025/9$ به دست آمد. این اعداد نشان می‌دهند که گروه سنی بزرگسالان در معرض خطر بیش‌تری نسبت به گروه خردسالان می‌باشند. همچنین ترکیب BaP بیش‌ترین ریسک سرطان‌زایی را در هر دو گروه به خود اختصاص داده است و ترکیب ACE کم‌ترین ریسک سرطان‌زایی را دارا است.

۵-۳- پیشنهادها

- ۱- برداشت نمونه‌های گردوغبار بیش‌تر به منظور پوشش دادن کل سطح شهر و تعیین پراکندگی دقیق ترکیبات PAH و سایر آلاینده‌ها (فلزات، VOCها) به‌ویژه در مناطق مرکزی شهر کرج.
- ۲- بررسی نوع و غلظت ترکیبات PAH در فصل زمستان (در زمان وقوع آلودگی هوا در شهر کرج) و تعیین رابطه بین فراوانی این ترکیبات در نمونه‌های گردوغبار با اندازه ذرات.
- ۳- اندازه‌گیری و بررسی ترکیبات PAH در هوا و ذرات قابل استنشاق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) و ارزیابی خطر سلامتی ناشی از آنها به‌ویژه برای گروه‌های حساس.
- ۴- شناسایی دقیق منابع تولیدکننده ترکیبات PAH در سطح شهر کرج و تقسیم‌بندی آنها بر اساس شدت انتشار به منظور ارائه راهکارهای عملی برای مدیریت و پایش آلودگی هوا

Reference

- Abdel-Shafy, H.I. and Mansour, M. (2016). "A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation." *Egyptian Journal of Petroleum*, Vol. 25, pp. 107-123.
- Alcock, R. (2003). "Health risks of persistent organic pollutants from logrange transboundary air pollution". Joint WHO/Convention task force on the health aspects of air pollution, Vol. 45, pp. 65-74.
- Boonyatumanond, R., Murakami, M., Wattayakorn G., Togo, A. and Takada, H. (2007). "Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust in a tropical Asian mega-city, Bangkok, Thailand." *Science of the Total Environment*, Vol. 384, pp. 420-432.
- Boruvka, L., Vacek, O. and Jehlicka, J. (2005). "Principal component analysis as a tool to indicate the origin of potentially toxic elements in soils." *Geoderma*, Vol. 128, pp 289-300.
- Boyle, D., Wiesner, C. and Richardson, A. (1998). "Factors affecting the degradation of polyaromatic hydrocarbons in soil by white-rot fungi." *Soil Biology & Biochemistry*, Vol. 30(7), pp. 873-882.
- Cerniglia, C.E. (1992). "Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons." Springer. *Advance Applied Microbiology*, Vol. 3, pp. 351-368.
- Cachada, A., Pato, P., Rochasanton, T., Ferreira, E. and Duarte, A.C. (2012). "Levels sources and potential human health risks of organic pollutants in urban soils." *Sci Total Ennviron*, Vol. 430, pp. 84-92.
- Essumang, D.K., Dodoo, D.K., Obiri S., and Oduro A.K. (2006). "Analysis of polycilic aromatic hydrocarbons in street soil dust in Kumasi metropolis of Ghana." *Environ. Monit.Assess*, Vol. 121, pp. 401–408.
- Golob, R. and Bruss, E. (1984). "Statistical analysis of oil pollution in the Kuwait Action Plan Region and the implications of selected world-wide oil spills to the region. In combating oil pollution in the Kuwait Action Plan Region." UNEP Nairobi, Kenya, Vol. 44, pp. 7-34.
- Guo, H., Lee, S.C., Ho, K.F., Wang, X.M. and Zou, S.C. (2003). "Particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in urban air of Hong Kong." *Atmos. Environ.* Vol. 37, 5307–5317.

Harrison, R.M., Smith, D.J.T. and Luhana, L. (1996). "Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham." UK. Environ. Sci. Technol. Vol. 30, pp. 825–832.

Hassan, S.K. and Khoder, M.I. (2012). "Gas–particle concentration, distribution, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons at a traffic area of Giza, Egypt." Environmental monitoring and assessment. Vol. 184(6), pp. 3593-3612.

Irvine, K.N. and Loganathan, B.G. (1997). "Localized enrichment of PCB levels in street dust due to redistribution by Water, Air and Soil Pollution Vol. 105, pp. 603–615.

Joop V. (2007). "Urban soils—an emerging problem?." J Soils Sediments. Vol. 43, pp. 7- 63.

Kaiser, H.F. (1960). "The application of electronic computers to factor analysis." Educational and Psychological Measurement, Vol. 20, pp.141-151.

Keshavarzi B., Abbasi S., Moor F., Deshlab H. and Soltani N. (2017). "Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Street Dust of Bushehr City, Iran: Status, Source, and Human Health Risk Assessment." Polycyclic Aromatic Compounds. Vol. 52, 1040-6638.

Lau, S.L., and Stenstrom, M.K. (2005). "Metals and PAHs adsorbed to street particles." Water Research, Vol. 39, pp. 4083– 4092.

Lee B.K. and Dong T.T. (2011). "Toxicity and source assignment of polycyclic aromatic hydrocarbons in road dust from urban residential and industrial areas in a typical industrial city in Korea." J Mater Cycles Waste Manag. Vol. 13, pp. 34–42.

Lorenzi D., Entwistle J.A., Cave M. and Dean J.R. (2011). "Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust: Implications for human health." Chemosphere, Vol. 83, pp. 970-977.

Long Y., Dai T. and Wu Q. (2013). "Sources and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust from the Chang-Zhu-Tan Region, Hunan, China." Environ Monit Assess, Vol. 18, pp. 1377–1390.

Luo, X.J., Chen, S.J., Mai, B.X., Sheng, G.Y., Fu, J.M. and Zeng, E.Y. (2008). "Distribution, source apportionment, and transport of PAHs in sediments from the Pearl River Delta and the northern South China Sea." Archives of Environmental Contamination and Toxicology, Vol. 55, pp. 11–20.

Majumbar, D., Rjaram, B., Meshram, S., Suryawanshi, C.V. and Rao, C. (2016). "Worldwide distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust." *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, Vol. 71, pp. 13-35.

Maliszewska K.B. (1996). "Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination." *Appl Geochem*, Vol. 11, pp. 121–127.

Maselet, P., Mouvier, G. and Nikolaou, K. (1986). "Relative decay index and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons." *Atmos Environmental*, Vol. 20: 439–446.

Mauro, D.M., DeClercq, P.J., Siegener, R. and Coleman, A. (2006). "Survey of the distribution and sources of PAHs in urban surface soils." *Land Contamination and Reclamation*, Vol. 14(2), pp. 513-521.

Menzie C.A., Potocki B.B. and Santodonato J. (1992). "Exposure to carcinogenic PAHs in the environment." *Environmental Science & Technology*. Vol. 26(7), pp. 1278-1284.

Morillo E., Romero A.S., Maqueda C., Madrid L., Ajmone-Marsan F. and Grerman H. (2007). "Soil pollution by PAHs in urban soils: a comparison of three European cities." *J Environ Monit*. Vol. 9, pp. 1001–1008.

Patel S.K., Ramteke S., Yogita N., Sahu B.L., Sharma S., Lintelmann J. and Georg M. (2015). "Contamination of Environment with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in India." *Journal of Environmental Protection*. Vol. 6, pp. 1268-1278.

Peng, C., Chen, W., Liao, X., Wang, M., Ouyang, Z., Jiao, W. and Bai, Y. (2011). "Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Beijing: status, sources, distribution and potential risk." *Environ. Pollut*, Vol. 159, pp. 802-808.

Praveena, S.M., Ahmad, A., Radojevic, M., Abdullah, M.H. and Aris, A.Z. (2007). "Factor-Cluster Analysis and enrichment study of Mangrove sediments-an example from Mengkabong, Sabah." *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, Vol. 11, pp. 421-430.

Rastegari Mehr M., Keshavarzi B., Moor F., Sacchi E., Lahijanzadeh A.R., Eydivand S., Jaafarzadeh N., Naserian S., Setti M. and Rostami S. (2016). "Contamination level and human health hazard assessment of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in street dust deposited in Mahshahr, Southwest of Iran." *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. Vol. 505, pp. 1080-7039.

Ravindra K., Sokhi R. and Grieken R.V. (2007). "Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation." *Atmospheric Environment Journal*. Vol. 13, pp. 2895-3194.

Rogner, H.H. (1997). "An assessment of world hydrocarbon resources. Annual review of energy and the environment." Vol. 22(1), pp. 217-262.

Saeedi, M., Li, L.Y. and Salmanzadeh, M. (2012). "Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: pollution and ecological risk assessment in street dust of Tehran." *Journal of hazardous materials*, Vol. 227, pp. 9-17.

Stein, S.E. (2000). "An integrated method for spectrum extraction and compound identification from gas chromatography/mass spectrometry data." *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, Vol. 10(8), pp. 770-781.

Taheri, M., Benyaich, F., Bounakhla, M., Bilal, E., Gruffat, J.J., Moutte, J. and Garcia, D. (2005). "Multivariate Analysis of Heavy Metal contents in soils, sediments and water in the region of Meknes (Central Morocco)." *Environmental Monitoring and Assessments*, Vol. 102, pp. 405-417.

Tao, S., Jiao, X.C., Chen, S.H., Liu, W.X., Coveney, R.M., Zhu, L.Z. and Luo, Y. M. (2006). "Accumulation and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in rice (*Oryza sativa*)." *Environmental Pollution*, Vol. 140(3), pp. 406-415.

USEPA. (2001) "Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites." *OSWER Vol. 9355*, pp. 4-24.

Sambrova V., Zielinska B. and Khlystov A. (2017). "Do 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Represent PAH Air Toxicity?." *Environ Toxicol Pharmacol*. Vol. 86, pp. 5-17.

Nazari, Sh., Kermani, M., Fazlzadeh, M., Alizadeh-Matboo, S. and Yari, A.R. (2016). "The origin and sources of dust of particles, their effects on environment and health, and control strategies: A Review." *Journal of Air Pollution and Health*, Vol. 1(2), pp. 137-152.

Wang, X.L., Tao, S., Dawson, R.W., and Xu, F.L. (2002). "Characterizing and comparing risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in a Tianjin wastewater-irrigated area." *Environmental Research*, Vol. 90, pp. 201-206.

Wang, W., Huang M.J., Kang, Y., Wang, H.S., Leung, A.O.W, Cheung, K.C. and Wang, M.H. (2011). "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban surface dust of Guangzhou, China: status, sources and human health risk assessment." *Sci Total Environ*, Vol. 409, pp. 4519–4527.

Wang X,S. (2017). "Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust: sources and health risk assessment." *Environ Geochem Health*, Vol. 54, pp. 173-180.

WHO, World Health Organization (1987), "Air quality guidelines for Europe Polynuclear aromatic hydrocarbons (PAH). Copenhagen, WHO Regional Office for Europe (WHO Regional Publications, European Series, Vol. 91, pp. 92–96.

Zarasvandi, A.R, (2009), Environmental impacts of dust storms in the Khuzestan province, Environmental Protection Agency (EPA) of Khuzestan province, Internal Report, 375p.

Abstract

Street dust is one of the most important indicators reflecting the pollution situation in urban environments. These particles carry carbon monoxide, such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), which have adverse environmental effects and impacts health of the city's inhabitants. The purpose of this study was to evaluate the concentration and source of these compounds and their effects on human health. For this purpose, 13 dust samples were collected. PAHs levels in dust samples were determined by GC-MS. To determine the possible origin of PAHs, aromatic chemical ratios were calculated. All 16 environmentally important compounds were identified in the samples. PAHs levels ranged 88.4 ppb to 771.02 ppb. The $\sum\text{PAH} / \sum\text{COMB}$ value was between 0.5 ppb and 0.8 ppb. The ratio of Ant / (Ant + Phe) was found between ppb 0.08 to 0.98 ppb, BaA / (BaA + CRY) between ppb 0.33 to ppb 0.56 and IND / (IND + BGP) between 0.13 ppb 0.8 ppb. In this study, it was revealed that the pyrogenic source is the principal source of PAHs in street dusts. Benzoylpyrene was identified as the most common PAH cancer in all of the sampling stations at different concentrations. The results of this study showed that the metropolitan area of Karaj is strongly influenced by the type and composition of PAHs because of its urban location, increasing population and traffic intensity.

Keywords: street dust, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), Karaj



Shahrood University of Technology
Faculty of Earth Sciences
M.Sc. Thesis in Environmental Geology

**Assessment of concentration and source of polycyclic aromatic
hydrocarbons (PAHs) in street dust / Karaj city**

By:

Fahimeh Beiramali Kivi

Supervisor:

Dr. A. Qishlaqi

July 2018