



بازنگری در روش شناسی پایش محیطی آلودگی هوا در محوطه‌های میراث صخره‌ای^۱

I حمید فدایی

II سید محمدامین امامی

III ایوب کریمی جشنی

(صص: ۱۰۷ - ۹۳)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۲۶
شناسه دیجیتال (DOI): 10.30699/PJAS.3.9.93

چکیده

میراث صخره‌ای ایران در میان انواع هنر صخره‌ای جهان، جایگاه ویژه‌ای دارد. نمونه‌هایی از این آثار، نظیر بیستون در فهرست میراث جهانی به ثبت رسیده‌اند و بسیاری از آن‌ها همچون نقش‌رستم در منظر فرهنگی میراث جهانی قرار گرفته‌اند. ارتباط این آثار با محیط در حال توسعه موجبات تهدید آن‌ها در معرض فعالیت انسانی، به خصوص در شکل آلودگی محیطی را افزایش داده است. خطرات و تهدید آلاینده‌های محیطی ایجاد شده در مناطق فوق ناشی از حضور صنایع آلاینده خرد و کلان و به‌ویژه مجموعه‌های پتروشیمی می‌تواند تهدید کننده موضوع یکپارچگی چنین منظرهای فرهنگی قلمداد گردد. به همین دلیل برنامه‌ریزی جهت پایش دقیق محیطی این آثار ضروری است و در گام نخست، ضرورت دارد روش‌های مختلف پایش آلاینده‌های هوایی در میراث صخره‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد. در واقع شیوه‌های مختلفی از اندازه‌گیری‌های محیطی برای ارزیابی شرایط حفاظت میراث صخره‌ای در ایران و جهان به‌کار رفته‌اند. در این میان، روش‌های پایش را می‌توان به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم دسته‌بندی نمود. پرسش اصلی پژوهش در زمینه مزایا و معایب هر یک از این دو شیوه جهت انتخاب سامانه مناسب پایش میراث صخره‌ای است. در این مقاله، پس از گردآوری اطلاعات برآمده از مشاهدات عینی و مطالعات نظری، داده‌ها از طریق شیوه تجزیه و تحلیل کیفی حاصل آمده است. در این تحقیق با بررسی ویژگی‌های پایش، شیوه پایش مستقیم جهت شناخت بستر محیطی میراث صخره‌ای و کنترل آن ضروری تشخیص داده شده است. در این میان تجارب جدید حفاظت در محوطه‌های تاریخی می‌تواند نگرانی در مورد محدودیت مربوط به ایجاد زیرساخت‌های انرژی را برطرف نموده و هزینه پایش ممتد میراث صخره‌ای را کاهش دهد؛ لذا نتایج حاصل، علاوه بر دارا بودن ارزش‌های بنیادی و نظری، کاربردی نیز خواهند بود.

کلیدواژگان: میراث صخره‌ای، آلودگی هوا، پایش محیطی، نقش‌رستم.

مقدمه

پایش رویکرد اندازه‌گیری دوره‌ای محیطی است که با مقایسه داده‌های به‌دست آمده با شاخصه‌های از قبل تعیین شده همراه می‌گردد (Thomson, 1965). در ارتباط با محوطه‌های میراثی، ضرورت دارد روند تغییرات محیطی در فواصل زمانی کوتاه‌مدت، میان مدت و بلندمدت در رابطه با اثر تاریخی و مراکز توسعه بررسی شده و در مورد این‌که آیا دو امر حفاظت آثار تاریخی و توسعه اقتصادی به هماهنگی لازم رسیده‌اند یا خیر، تحلیل می‌گردد (Íñigo et al., 2006). انجام مداوم پایش‌ها می‌تواند ملاک تصمیم‌سازی‌های حفاظتی برای اثر قلمداد گردد و بدین‌وسیله منافع مشترکی را برای محوطه‌های میراثی با هدف اصلاح و بهبود مدیریت محوطه و حفاظت پیش‌گیرانه فراهم آورد (اسمیت، ۱۳۸۹).

اهداف و ضرورت پژوهش: هدف اصلی از این مقاله، ارزیابی روش‌های پایش آلاینده‌های هوایی در میراث صخره‌ای است. توسعه تدریجی شهری و صنعتی به‌شکلی پیش می‌رود که تغییر فضاها و تاریخی و باستانی حتی در دوردست‌ترین نقاط غیرقابل اجتناب به نظر می‌رسد. این موضوع در مورد محوطه‌های ثبت شده در فهرست میراث جهانی و منظر فرهنگی پیرامون آن‌ها به بحثی چالش برانگیز تبدیل شده است و چگونگی کنترل عوارض ناشی از این وضعیت هر روز پیش از قبل اهمیت می‌یابد. بدون شک در این میان اندازه‌گیری‌های محیطی، گام نخستین به حساب می‌آید.

پرسش و فرضیات پژوهش: در پژوهش حاضر ضمن پرداختن به پرسش‌های اساسی در زمینه مزایا و معایب شیوه‌های پایش مستقیم و غیرمستقیم در زمینه میراث صخره‌ای، تلاش گردیده است سامانه مناسب‌تر جهت پایش این دسته از آثار تحلیل و ارائه گردد. به منظور انتخاب روش مؤثر پایش به نظر می‌رسد باید نخست تأثیرات آن‌ها در اندازه‌گیری کیفیت تغییرات موجود در محوطه ارزیابی گردد و با توجه به اهداف تعیین شده مقیاس و روش آن تعیین شوند.

روش پژوهش: در این مقاله به همراه تحلیل و توصیف اطلاعات و داده‌های برآمده از مطالعات نظری و میدانی، ضمن دسته‌بندی عوامل مولد آلاینده‌های زیست‌محیطی، دغدغه فرسایش محوطه‌های میراث صخره‌ای تحت تأثیر آلودگی هوا مطرح شده و در این باره لزوم انتخاب یک رویکرد مناسب پایش در تعیین دستور اجرایی کار، گوش زد شده است؛ همچنین ضمن بررسی روش‌ها و تجارب مختلف اندازه‌گیری و پایش آلاینده‌های هوا، به مزایا و معایب شیوه‌های پایش مستقیم و غیرمستقیم جهت انتخاب سامانه مناسب‌تر پایش میراث صخره‌ای پرداخته می‌شود. به همین جهت به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، ضمن انجام مشاهدات عینی، اطلاعات گردآوری شده از طریق شیوه تجزیه و تحلیل کیفی مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است.

پیشینه پژوهش

میراث صخره‌ای در ایران دارای ویژگی‌های خاصی هستند که به سختی قابل مقایسه با هنرهای صخره‌ای دیگر اقوام و سرزمین‌ها است (رفیع‌فر، ۱۳۸۴). آثار صخره‌ای در میان بسیاری از اقوام چیزی جز نقوش پیش‌اتاریخی که به صورت کم‌عمق در سنگ کنده شده‌اند و یا با رنگ بر سطح صخره‌ای ترسیم شده‌اند، نیستند (Whitley, 2005). در این میان، میراث صخره‌ای شاخص ایرانی، نوعی یادمان تاریخی هستند که معمولاً به صورت برجسته‌تر و عمیق‌تر از سنگ و در سنگ تراشیده شده‌اند؛ به این ترتیب، ایرانیان از دیرباز به این آثار دل بسته و آن‌ها را نمود اصلی شکوه قومی خود و تاریخ پرفراز و شیب این سرزمین و نمایندگان آن که پادشاهان، وزرا، روحانیون و جنگ سالاران بوده‌اند، دانسته‌اند. به همین سبب گاه در پناه همین صخره‌ها استقرارهای خود را ایجاد می‌کردند یا این مکان‌ها را به عنوان بیلاق و محل تفریحی حاشیه شهرهای خود در نظر می‌گرفتند

و از آن‌ها به‌عنوان شاخصه‌ای در مسیرهای گذر بین‌شهری استفاده می‌کردند. به این ترتیب، بسیاری از این آثار طی سده‌های متمادی در مسیر زندگی انسان قرار داشته و ضمن بهره بردن از حمایت‌های انسانی، گاه هم در معرض تهدید انسانی بوده‌اند؛ به‌ویژه امروزه با توسعه شکل زندگی مدرن که شامل توسعه صنایع و مصرف انرژی فسیلی نسبتاً زیاد برای رفع نیازهای روزمره است، این تهدیدها گسترده‌تر شده‌اند و مدیریت و نگهداری میراث صخره‌ای به نمونه‌ای از چالش‌های معاصر پژوهشگران میراث فرهنگی برای حفاظت این دسته از آثار بدل شده است (Alebic-Juretic, 2009).

به‌طور کلی عوامل مولد آلاینده‌های زیست‌محیطی در چند دسته بزرگ تقسیم‌بندی می‌شوند که عبارتند از: (۱) صنایع کوچک و بزرگ؛ (۲) فعالیت‌های کشاورزی با مقیاس بزرگ؛ و (۳) وسایل نقلیه جاده‌ای که هر یک از این منابع با تولید انواع گونه‌های آلاینده‌های زیست‌محیطی ظرفیت بالایی برای آسیب به بافت‌های سنگی را دارند و مهم‌ترین آن‌ها را می‌توان به‌صورت پیش‌رو دسته‌بندی نمود: (۱) گازهای سبک با بنیان اسیدی که ایجادکننده آسیب‌های اسیدی می‌باشند (Likens Gene E., 2013: 259)؛ (۲) ترکیبات اکسند با فشار بخار پایین که بافت‌های سخت کربناتی و آهنی موجود در آثار تاریخی را به مواد اکسید شونده قابل انحلال در آب تبدیل می‌کند (Motherwell & Crich, 1992: 29)؛ (۳) سولفکتنت‌های قلیایی که زمینه تخریب فیزیکی آثار را تحت یک مکانیزم انبساطی فراهم می‌آورد (Gaubert et al., 2016: 36)؛ (۴) سموم و آفت‌کش‌ها که به‌دلیل عدم تجزیه طبیعی، در محیط انباشته شده و تحت تأثیر دما و رطوبت به ترکیبات بسیار خورنده تغییر ماهیت می‌دهند (Buurma, 2017: 69)؛ (۵) برخی از کودهای کشاورزی که به‌صورت صنعتی و یا نیمه‌صنعتی تهیه شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کودها در شرایط رطوبت کافی به‌دلیل دارا بودن مقادیر بسیار زیادی فسفر، نیتروژن و گوگرد به‌ترتیب موجب آزاد کردن اسیدفسفریک، اسید نیتریک و اسید سولفوریک در محیط می‌گردند (Karanam et al., 2018: 59)؛ (۶) روغن‌های صنعتی سبک که به‌راحتی توسط جریان‌های هوا جابه‌جا شده و به‌دلیل داشتن ساختارهای اشباع هیدروکربنی به سختی قابل زدودن از روی سطوح می‌باشند و پس از مدتی موجب چسبندگی و کدری سطوح می‌گردند (List et al., 2017: 1)؛ (۷) فلزات سنگین، مثل: سرب، کبالت، مس و... که سبب بروز واکنش‌های کاتالیزوری و درنهایت تغییر ماهیت ساختاری آثار می‌شوند (Busca, 2014: 297)؛ و (۹) گازهای سنگین آلی که بزرگ‌ترین و مهم‌ترین مجموعه از این آلاینده‌ها هستند. این گازهای هیدروکربنی سنگین که عموماً دارای حلقه‌های آروماتیک و هالوژن می‌باشند، بیشتر به‌علت ایجاد بستر رشد و نمو برای میکروارگانیسم‌ها مورد اهمیت قرار می‌گیرند (Lamichhane et al., 2016: 336)؛ همچنین این ترکیبات آروماتیک هالوژن‌دار برای انجام واکنش‌های شیمیایی با بسیاری از ترکیبات از جمله رنگ‌دانه‌ها، تمایل بسیار زیادی دارند و به‌همین دلیل سبب ایجاد تغییرات ظاهری (تغییر رنگ، تردی، مات شدن و...) می‌شود (Sun J.-L. et al., 2013: 1751).
محوطه‌های صخره‌ای مهمی همچون تخت جمشید (ثبت جهانی ۱۹۷۹ م.)، نقش‌رستم در مسیر پارسه و بیستون کرمانشاه (ثبت جهانی شده ۲۰۰۶ م.) که در مجاورت صنایع بزرگی همچون مجتمع‌های پتروشیمی و یا مسیرهای جاده‌ای اصلی از شهرهای مرکز استان به پایتخت (تهران) واقع شده‌اند، موضوع نگرانی‌های جدی در مورد اثر آلودگی هوا هستند. به این ترتیب اندیشه انجام پایش محیطی آثار صخره‌ای ایران به تدریج تقویت شده است و انتخاب یک رویکرد مناسب پایش در تعیین دستور اجرایی کار بسیار ضروری است (تصاویر ۴-۱).

روش‌ها و تجارب پایش آلاینده‌ها

با بیشتر شدن محصولات صنعتی و تکنولوژی‌های نوظهور، نوع و میزان آلاینده‌های محیطی



تصاویر ۱ و ۲. فرسودگی سطحی در بخشی از میراث صخره‌ای در محوطه جهانی بیستون (راست) و محوطه تاریخی نقش‌رستم (چپ)، (نگارندگان، ۱۳۹۶).



تصویر ۳. موقعیت مجتمع پتروشیمی مرودشت نسبت محوطه‌های نقش‌رستم و تخت جمشید (در فاصله ۱۷ کیلومتری نقش‌رستم و ۱۵ کیلومتری تخت جمشید)، (Google Earth).



تصویر ۴. موقعیت مجتمع پتروشیمی بیستون نسبت به محوطه میراث جهانی بیستون (در فاصله ۲۰ کیلومتری محوطه)، (Google Earth).

به شدت افزایش یافته است و نگرانی‌های زیادی را به دنبال داشته است (Watt et al., 2009). به همین دلیل تاکنون تحقیقات بسیار زیادی در زمینه شناسایی و اندازه‌گیری آلاینده‌های زیست محیطی در سراسر جهان انجام شده است. دامنه مطالعاتی و گستردگی این تحقیقات علمی به قدری است که در دو دهه گذشته بیش از ۶۰٪ از موضوعات تحقیقاتی شیمی تجزیه (جداسازی، شناسایی و اندازه‌گیری) در نشریات بین‌المللی را به خود اختصاص داده است (Girotti et al., 2008: 2; Song et al., 1997: 297). در طی ۲۰ سال گذشته، انواع روش‌های جداسازی، آماده‌سازی نمونه، شناسایی آنالیت و همچنین اندازه‌گیری‌های دستگاهی برای گونه‌ها مختلف آلاینده معرفی شده است (Baig & Sajid, 2017: 1; Pichon & Chapuis-Hugon, 2008: 48).

دسته بزرگی از آلاینده‌ها که سال‌هاست به طور متداول توسط پایش سنسوری مورد شناسایی و اندازه‌گیری قرار می‌گیرند، تحت عنوان SO_x، NO_x و CO_x شناخته می‌شوند (Frassoldati et al., 2005). این ترکیبات تا کنون در بروز باران اسیدی و تخریب ساختارهای سنگی به شرح ذیل مورد مطالعه قرار گرفته است.

- گاز دی‌اکسید سولفور که در تماس با آب باران به سرعت به یون سولفات و یا سولفیت (SO₃) تغییر ماهیت داده و با ایجاد اسید سولفوریک بر زمین فرود می‌آید (Mathieu et al., 2013: 81).
- مونو و دی‌اکسید نیتروژن نیز در معرض رطوبت و یا آب باران به یون نیترات تغییر ماهیت داده و با ساخت اسید نیتریک با نزولات جوی به زمین باز می‌گردند (Twigg, 2013: 219).

- مونو و دی‌اکسید کربن که هم توسط فعل و انفعالات رادیکالی و هم به طور مستقیم با نفوذ به آب باران موجب تشکیل اسید کربنیک می‌گردند و قسمت بسیار بزرگی از گونه‌های سازنده باران‌های اسیدی را تشکیل می‌دهند (Schroot & Heggland, 2005: 2289).

این گازهای سبک برای اولین بار در سال ۱۹۸۴ م. با تکنیک لومینسانس شیمیایی اندازه‌گیری شده‌اند (Sanhueza et al., 1984) و به مرور با رشد و توسعه اندازه‌گیری‌های سنسوری، توسط سنسورهای نوساختاری از جنس SnO₂، TiO₂ و LaFeO₃ که عمدتاً از نوع نیمه‌هادی‌ها و یا نانوساختارهای با سطوح بالا می‌باشند، مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند (Belkin, 2003). این نوع بررسی‌ها که بیشتر برای آلاینده‌های گازی متداول می‌باشد، هنوز به طور بسیار گسترده‌ای انجام می‌شود و با توسعه تولید نانوساختارهای نیمه-هادی و ترکیبات جدیدتر مناسب جهت تشخیص و اندازه‌گیری مولکول‌های آلاینده با یکدیگر رقابت می‌کنند (Kularatna & Sudantha, 2008).

متداول‌ترین و کارآمدترین نوع شناسایی و اندازه‌گیری گازهای سبک با بنیان اسیدی همچون انواع مختلف اکسیدهای نیتروژن، گوگرد و کربن، پایش‌های سنسوری می‌باشد که همواره در حال توسعه و پیشرفت می‌باشد. پیشرفت حسگرها و سنسورهای گازی به اندازه‌ای است که می‌توانند به صورت درمحل (در مکان هدف بدون نیاز به آزمایشگاه) و در زمان (در زمان مورد نظر و نه پس از گذشت زمان)، انواع مختلف اکسیدهای نیتروژن، گوگرد و کربن را شناسایی نموده و مقدار هرکدام را در واحد غلظتی مورد نظر ارائه نمایند (Yu et al., 2015: 250; Zhang et al., 2018: 224).

درواقع اساس کار یک حسگر گازی بر پایه یک واکنش ویژه شیمیایی^۲ می‌باشد که مستقیماً با استفاده از یک کمیت فیزیکی (تغییر جریان الکتریکی، میزان کدورت سیستم و...) اندازه‌گیری می‌گردد. به این ترتیب هر حسگر گازی، بخشی به‌عنوان پذیرنده دارد که در آن قسمت، یک برهمکنش اختصاصی شیمیایی با یک گونه مشخص انجام می‌گردد. در نتیجه این برهمکنش ویژه، یک تغییر فیزیکی درون ساختمان حسگر اتفاق می‌افتد که عمدتاً به روش‌های الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود (Pang et al., 2018: 674).

بسیاری از این حسگرها از مایعات یونی به‌عنوان الکترولیت‌های اصلاح‌شده استفاده کرده‌اند یا از مصنوعات پلیمری به‌عنوان بستر (زیرلایه) در ساختمان سل استفاده نموده‌اند (Cichosz et al., 2018: 674).

342: al., 2018). گستره نوآوری‌های انجام شده در بروز نمودن ساختمان حسگرها به قدری است که انواع گوناگونی از نانو ساختارهای اصلاح شده به عنوان بستر استفاده شده‌اند. استفاده گسترده از نانولوله‌های تک دیواره و یا چنددیواره، اکسیدهای فلزاتی چون: روی، قلع، تنگستن، نیکل، لیتیم، نانوذرات طلا، نانوکامپوزیت‌های صنعتی با بافت کربنی و... مثال‌هایی از کاربرد ساختارهایی با ابعاد نانومتری در ساختمان حسگرها می‌باشد (Villarreal et al., 2017: 106).

مزیت این نوع خاص از شناسایی و اندازه‌گیری که به «پایش سنسوری» موسوم می‌باشد، عبارتند از: آنالیز مستقیم نمونه‌های گازی و همچنین شناسایی و اندازه‌گیری زمان-واقعی (در لحظه) و مکان-واقعی (در محل)؛ اما بزرگ‌ترین عیب و در واقع مشکلی که کاربرد حسگرها را به شکل بسیار گسترده‌ای محدود می‌سازد، هزینه بالا و قیمت تمام شده بسیار گران پایش‌های سنسوری می‌باشد. عیب دیگر حسگرها این است که هر سطح از حسگر طراحی شده، عمر مفید کوتاهی داشته و ناگزیر پس از پایان این عمر می‌بایست سطح مؤثر تعویض و یا بازاحیا گردد تا کارایی مناسبی از خود ارائه نماید؛ از این رو، هزینه‌های نگهداری بسترهای سنسوری نیز هزینه‌بر می‌باشد (Jiang et al., 2018: 21).

به علت همین محدودیت‌ها دانشمندان روش‌های دیگری را نیز در جهت شناسایی و اندازه‌گیری این گروه از آلاینده‌ها ارائه نموده‌اند. بسیاری از محققین مبنای شناسایی سنسوری را به گونه‌ای تغییر دادند که حسگر مورد نظر بتواند در محیط‌های مائی، گونه مورد نظر را شناسایی و اندازه‌گیری نماید. لذا امکان شناسایی و اندازه‌گیری بسیاری از آلاینده‌های گازی در محیط آب فراهم آمده است؛ یعنی به جای شناسایی و اندازه‌گیری مستقیم گونه‌هایی مانند CO_2 ، SO_2 و NO_2 از هوا، یون‌هایی مانند SO_4^{2-} ، CO_3^{2-} و NO_3^- در نمونه‌های آبی شناسایی شده و مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد (Ammam et al., 2010: 2132). این نوع از حسگرها، زیرمجموعه حسگرهای یون‌گزين (مانند حسگرهای pH سنج) بوده و به گونه خاصی از یون‌های محیط به صورت ویژه پاسخ می‌دهند. در بسیاری از نشریات تراز اول جهان، کاربردهای موفقیت‌آمیز سنسورهای پتانسیومتری، ولتامتری و آمپرومتری برای اندازه‌گیری گونه‌های مختلف آلاینده جوی که توسط فعل و انفعالات جوی و یا جغرافیایی به محیط‌های آبی راه یافته‌اند، گزارش شده است (Mahajan et al., 2007: 89).

علاوه بر توسعه سنسورها، روش‌های غیرفعال نیز توسعه یافته‌اند؛ بر این مبنا که می‌توان دسته‌های بزرگ‌تری از آلاینده‌ها را در نمونه‌های خاکی، آبی و زیستی (گیاهان، جانوران و انسان) جستجو نمود. روش‌های جدیدی که از فیبرهای گیرانداز بهره‌مند می‌گردند، محدودیتی از نظر حالت نمونه ندارند و صرف نظر از این که نمونه مورد نظر آبی، خاکی، گازی و یا دارای ساختار پیچیده باشد با استفاده از این فیبرها قابل ارزیابی می‌باشد. اولین گزارش‌های کویل شدن این نوع خاص از فیبرها با دستگاه‌های تجزیه گر جرمی در سال ۲۰۰۵ م. انتشار یافت و تا به امروز این نوع خاص از روش‌های اندازه‌گیری به مرور توسعه یافته‌اند. فیبرهای PDMS^۲ اولین نوع از فیبرهایی می‌باشند که به منظور اندازه‌گیری ترکیبات BTEX^۳ که اتفاقاً از جمله آلاینده‌های زیست محیطی می‌باشند و مورد استفاده قرار گرفتند. امروزه به منظور افزایش سطح مؤثر فیبرهای گیرانداز از نانو ساختارهای بسیار جدیدی استفاده می‌شود که با روش‌های مختلف بر روی سطوح سیلان شده تثبیت می‌گردند. مؤثرترین نوع این نانومواد، نانو ساختارهای کربنی (نانولوله‌های کربنی تک دیواره و یا چنددیواره، نانوکربن‌های مغناطیسی و فولرن‌ها^۴) می‌باشند. با فعال نمودن این نانو ساختارها در محیط‌های اسیدی و بازی می‌توان برهم‌کنش‌های تقویت شده‌ای بین گروه‌های عاملی آلاینده و نانومواد ایجاد نمود و بازده گیراندازی و تغلیظ آن‌ها را در محیط افزایش داد (Ren et al., 2011; Tang et al., 2011).

در بین تکنیک‌های مختلف شناسایی و اندازه‌گیری آلاینده‌ها، آن دسته از روش‌هایی که برپایه میکرواستخراج پایه‌ریزی شده‌اند قابل اعتمادتر بوده و تعامل آن‌ها با نمونه‌های حقیقی دارای ماتریس پیچیده، بیشتر می‌باشد. تکنیک‌های SPME^۱، DLLME^۲ و... در زمینه استخراج آلاینده‌های زیست محیطی بسیار کارآمد بوده و مقالات بسیار متعددی در زمینه کاربرد موفق آن‌ها در زمینه شناسایی و اندازه‌گیری ترکیباتی چون: آفت‌کش‌ها، قارچ‌کش‌ها، هیدروکربن‌های سبک، رنگ‌های آلی و حتی فلزات سنگین گزارش شده است. هرچند تکنیک‌های میکرواستخراج در شناسایی و اندازه‌گیری نمونه‌های گازی به اندازه کافی کارآمد نمی‌باشند؛ اما با استخراج گروه‌های آلاینده از بافت‌های گیاهی و یا نمونه‌های بیولوژیک امکان پایش و ارزیابی نوع و مقدار این آلاینده‌ها را امکان‌پذیر می‌سازند. دسته بزرگی از تحقیقات انجام‌شده در سراسر جهان به منظور شناسایی و اندازه‌گیری آلاینده‌ها، معطوف به تکنیک‌های میکرواستخراج بوده و گزارش‌های موفقی در زمینه اندازه‌گیری ترکیباتی چون: نیترات‌ها، سولفونات‌ها، ضایعات فرار پتروشیمیایی و فسفات‌های معدنی منتشر شده‌است (Tang et al., 2011; Farré et al., 2010).

علاوه بر تکنیک‌های پایش سنسوری، روش‌های دیگری نیز به مرور گسترش یافته که به دلیل کاربردهای فراوان آن در شناسایی و اندازه‌گیری همزمان یون‌های آلاینده توجه دانشمندان را در سراسر جهان به خود جلب نموده است. مبنای این نوع از شناسایی‌ها و اندازه‌گیری‌های تجزیه‌ای، استفاده از دستگاه‌های جداسازی مجهز به ستون‌های کروماتوگرافی است. عاملی که در فرآیندهای تجزیه‌ای کاربرد یک تکنیک را در شناسایی و اندازه‌گیری آنالیت محدود می‌نماید، عمدتاً پیچیدگی ماتریس نمونه و مزاحمت‌های احتمالی می‌باشد که در آن فرآیند اخلاص ایجاد می‌نماید. اما تکنیک‌های جداسازی مبتنی بر روش‌های کروماتوگرافی از این امر مستثنی می‌باشند؛ زیرا در یک فرآیند کروماتوگرافی، مزاحمت‌های احتمالی گونه‌ها و یا هم‌پوشانی‌های مشابه درون آشکارساز، با اعمال شرایط مشخص بر روی ستون کروماتوگرافی به راحتی قابل حذف می‌باشد و از طرف دیگر، این امکان را فراهم می‌نماید که تنها با یک آزمایش، شناسایی و اندازه‌گیری چند گونه مورد مطالعه به طور هم‌زمان انجام شود (Nesterenko & Paull, 2017: 205; Pohl, 2017: 353). از این رو استفاده از تکنیک یون-کروماتوگرافی در جوامع علمی دنیا رواج گسترده‌ای یافته است.

بحث و ارزیابی گزینه‌های اصلی پایش

دو گزینه اصلی جهت پایش پیش‌رو است: پایش به صورت مستقیم (به صورت فعال یا غیرفعال) یا غیرمستقیم (به صورت ساختاری یا با استفاده از مواد گیرانداز). انواع دیگر اندازه‌گیری‌های محیطی هم هستند که دقیقاً نمی‌تواند پایش خوانده شود و بهتر است در دسته‌بندی‌های دیگری نظیر «ارزیابی شرایط» یا «آسیب‌نگاری» قرار داده شوند. دسته‌های اخیر اقداماتی مقطعی یا دست‌کم میان مدت هستند، اما پایش روندی ممتد است که می‌تواند در نهایت به فراهم آوردن یک بانک اطلاعاتی گسترده منجر شود. در اینجا ما به فرآیندی ممتد نیاز داریم که در نقطه خاصی متوقف نشود. این رویکرد در خدمت کار دیگری نیست، بلکه خود اقدامی حفاظتی است و به همین سبب تا زمانی که دغدغه حفظ کردن وجود دارد، این روند هم تداوم می‌یابد.

رویکرد مستقیم در پایش به اندازه‌گیری میزان وجود آلاینده‌های هوا و همچنین ثبت مقادیر آن‌ها در بازه‌های زمانی مشخص می‌پردازد. در مقابل رویکرد غیرفعال به طور غیرمستقیم اثر آلاینده‌ها را روی آثار در فواصل مشخص زمانی که معمولاً طولانی‌تر هستند، اندازه می‌گیرد. مزیت روش غیرفعال این است که با نشان دادن میزان عوارض ناشی از آلودگی، تحلیل ملموس‌تری از میزان خرابی و فرسایش را به معرض دید مشاهده‌گر و گزارش‌گیرنده قرار می‌دهد و این امکان را فراهم می‌آورد که به شکلی مشخص، میزان بد بودن شرایط یا بدتر شدن آن، نسبت به حالت قبلی

درک گردد. در مقابل پایش فعال با تمرکز بر خود آلودگی به منزله منشأ فرسایش و همچنین عوامل محیطی مؤثر بر آن، نه مستقیماً بر عارضه، بلکه مستقیماً بر بیماری و تا اندازه‌ای عامل بیماری‌زا متمرکز می‌شود؛ این‌که کدام روش می‌تواند انتخاب شود، طبیعتاً به اولویت‌های محوطه و مدیران تصمیم‌گیر بستگی دارد. آیا دغدغه این است که تغییرات نرخ فرسایش نشان داده شوند تا بعد بتوان گام بعدی برای بهبود کیفیت هوا را برداشت و یا دغدغه اصلی شناخت بیماری‌ها و عوامل بیماری‌زا است؟

این نکته را می‌بایست در نظر داشت که تحلیل‌های محیطی در واقع غلظت‌های آلاینده‌ها و سایر ترکیبات جوی را نشان می‌دهند، اما ارزیابی چگونگی تأثیر این غلظت‌ها روی آثار تاریخی که اصطلاحاً پاسخ اثر در قبال تغییر یک عامل محیطی خوانده می‌شود^۸، مسئله‌ای است که نیاز به مطالعه آزمایشگاهی جداگانه دارد (Rizzo et al., 2007)؛ در واقع، این بخش از مطالعات نقطه تلاقی مباحث پایش ساختاری و پایش محیطی است که اجرای آن می‌تواند بسیاری از کمبودها و نقایص پایش‌ها در تفسیر درست وضعیت حفاظتی اثر را برطرف کند، اما باید در نظر داشت که انجام این‌گونه مطالعات هنوز بسیار کم‌شمار است و استانداردها و الگوهای دقیق انجام آن، تعریف نشده و یا در قیاس با استانداردهای سنجش‌های محیطی و یا ساختاری بسیار تازه هستند (وحیدزاده، ۱۳۸۸؛ Irwin et al., 2009).

سنجش‌های محیطی در هر یک از اشکال فوق، در واقع تصویری لحظه‌ای یا دوره‌ای از وضع موجود اثر در اختیار محقق می‌گذرانند و حداکثر می‌توان با اندازه‌گیری مداوم در طی یک سال یا بیشتر، تصور دقیق‌تری از رژیم تغییرات محیطی براساس تغییرات فصلی به دست آورد. برای بررسی غلظت عوامل آلاینده در درازمدت و بررسی سهم منابع آلاینده موجود در یک منطقه نیاز به مدل‌سازی ریاضی است؛ مدلسازی، یک تصویر زنده و پویا از اثر را در اختیار محقق قرار می‌دهد که از یک طرف مبتنی بر محاسبات و ارزیابی‌های مهندسی است، اما از یک طرف هم مرتباً با اندازه‌گیری‌های واقعی مقایسه و تصحیح می‌شود. به این ترتیب در صورت پیوسته بودن اندازه‌گیری‌ها، مدل‌سازی می‌تواند نقشه‌هایی از وضعیت محیطی یک منطقه در بازه‌های زمانی مختلف و با لحاظ کردن نقش و سهم مداخلات انسانی و اقلیمی مختلف ارائه دهد و مدل‌ها به ابزاری بسیار کارآمدی برای انجام طراحی‌های حفاظت و پیش‌گیری محیطی بدل می‌گردند (Hamilton, 2009).

پایش مستقیم (حس گر): محدودیت‌ها و محاسن

شناسایی و اندازه‌گیری تمام آلاینده‌های زیست‌محیطی توسط یک روش معین و یا دستگاه مشخص امکان‌پذیر نیست و ماهیت گونه مورد مطالعه تعیین‌کننده این مسئله است که از چه تکنیکی برای تعیین مقدار نمودن آن آنالیت استفاده شود؛ لذا ضرورت دارد تا آلاینده‌ها را براساس قابلیت تشخیص و تعیین مقدار، توسط روش و یا دستگاه معین، دسته‌بندی نمود. در بسیاری موارد می‌توان از چند تکنیک متفاوت جهت شناسایی و یا تعیین مقدار گونه مورد نظر استفاده نمود. در اینجا انتخاب با محقق است که بسته به شرایطی مانند: هزینه آنالیز، دقت دستگاهی اندازه‌گیری، حساسیت شناسایی و یا تعیین مقدار، ماهیت فیزیکی (جامد، مایع و یا گاز) آنالیت و همچنین پیچیدگی ماتریس نمونه، تکنیک مناسب برای شناسایی و اندازه‌گیری را انتخاب نماید (Jarque et al., 2016: 408).

به‌عنوان مثال، دسته‌ای از آلاینده‌ها که فرم گازی دارند، تنها با استفاده از تکنیک‌های آزمایشگاهی خاص و یا پایش سنسوری قابلیت شناسایی و اندازه‌گیری دارند. از آنجاکه روش‌های پایش سنسوری و راه‌اندازی مؤلفه‌های پیش‌گرا از یک طرف عمدتاً پرهزینه و بسیار زمان‌بر بوده و در شناسایی و اندازه‌گیری بسیاری از آلاینده‌ها محدودیت دارند و از طرف دیگر، جهت اعتبارسنجی

نیازمند تکنیک‌های دستگاهی و آزمایشگاهی می‌باشند؛ اکثر محققین ترجیح می‌دهند که به منظور انجام تحقیقات مرزدانشی و نه لزوماً پایش‌های همیشگی، از روش‌های آزمایشگاهی پیشرفته و دستگاه‌های حساس تجزیه‌ای بهره‌مند گردند. حال سؤال اینجاست که با توجه به پرهزینه و زمان‌بر بودن و همچنین محدودیت‌های پایش سنسوری، به‌منظور انجام یک بررسی همه‌جانبه و دقیق جهت شناسایی و تعیین مقدار آلاینده‌های آسیب‌رسان به آثار تاریخی، چه اقداماتی را می‌توان انجام داد؛ همچنین این سؤال مطرح می‌شود که برای هر نمونه مشخص، کدام روش آماده‌سازی مناسب می‌باشد؟ از این‌رو اگر گونه خاصی از آلاینده‌ها نیازمند فرآیندهای میکرواستخراج باشد، روش آماده‌سازی نمونه تغییر می‌کند. از طرف دیگر، با توجه به یکنواخت نبودن شرایط جوی در ۱۲ ماه سال، این سؤال مطرح می‌شود که نمونه‌برداری‌های لازم و آرایش جامعه آماری موردنظر به چه صورتی و در چه مناطقی باید انجام پذیرد.

بدیهی‌ست که چنانچه به دنبال درمان اساسی باشیم و نخواهیم روی رفع عارضه‌ها تمرکز کنیم، باید راهکار پایش فعال در پیش گرفته شود. این کار در حالت عادی پرهزینه‌تر از روش غیرفعال تصور می‌شود. بخش مهم این موضوع مربوط به لزوم حضور دستگاه‌های اندازه‌گیری در محل و ثبت اطلاعات توسط آن‌ها است. دستگاه‌های اندازه‌گیری نیاز به منبع انرژی دارند که بتوانند به‌طور پیوسته کار کنند. در گذشته لازم بود که نتایج اندازه‌گیری‌ها در فواصل زمانی روی سیستم ذخیره شود. این امر باعث می‌شد که دستگاه برای مدتی از مدار خارج شود و احياناً کل دستگاه یا قسمتی از آن به محل دیگری، -مرکز داده‌ها- منتقل شود تا تخلیه حافظه انجام شود. از حدود دهه نود میلادی به تدریج امکاناتی برای انتقال مستقیم اطلاعات با استفاده از سیستم‌های رادیویی و سپس با استفاده از امکانات شبکه‌ای فراهم شد. البته هنوز دو مسأله انتقال خط انرژی و اینترنت تا محوطه باقی‌مانده بود.

تا پایان دهه اول قرن بیست و یکم میلادی هنوز بسیاری از محوطه‌های تاریخی ایران، آنقدر دور افتاده به نظر می‌رسیدند که در آن‌ها ارتباطات تلفن همراه وجود نداشت. این موضوع امروزه تقریباً به‌طور کامل حل شده است؛ براین اساس، روش‌های پایش غیرمستقیم و غیرفعال، عملاً ارزش و اهمیت خود را از دست داده‌اند، مگر آن‌که ارزش و اهمیت موضوع آنقدر مشخص نباشد و یا کسانی باشند که مصراً بخواهند عارضه‌ها را ببینند و نه عامل آسیب را. تجربه فراهم کردن زیرساخت‌های پایش برای محوطه پاسارگاد اگرچه هنوز به‌طور کامل انجام نشده، اما می‌تواند گام مهمی برای انتقال دانش فنی و امکانات ایجاد مرکز پایش برای نقش‌رستم باشد. در پاسارگاد و محل کاخ اختصاصی آن، از قدیم مشکل فرسایش شدید سنگ‌های محافظت‌نشده سیاه‌رنگ وجود داشت که از زمان انجام کاوش‌ها به بعد، فرسایش بسیار جدی را به همراه داشت.

قطعات مربوط به پایه‌ستون‌ها و همین‌طور نقش برجسته‌های کار گذاشته شده در درگاه‌های ورودی در هوای باز به شدت تخریب شده و به صورت تکه‌های ریز از هم وارفته‌اند. تداوم این پدیده می‌تواند به تبدیل کل این آثار به تلی از خرده سنگ منجر شود؛ اگرچه باید پیش از هر کاری برای تثبیت و بازچسبانی این قطعه سنگ‌ها کاری شود، اما در عین حال لازم است که پایش عوامل محیطی هم در محل اثر به‌طور پیوسته انجام شود. پایش پیوسته نمی‌تواند با سیم‌کشی به داخل فضای محافظت‌شده و اسیل اثر انجام شود. ایده مهم گروه حفاظت‌کننده اثر، ایجاد بستری برای نصب سل‌های خورشیدی مولد برق برای تأمین زیرساخت‌های انرژی لازم برای پایش اثر و در درجه دوم امکانات ذخیره‌سازی و انتقال برخط داده‌های حاصل از پایش در این مجموعه بوده است. برای این منظور، ضمن احیای فرم معماری در یکی درگاه‌ها، سازه مخصوصی به‌عنوان سایبان محافظ درگاه و همچنین قرارگیری زیرساخت‌های انرژی و پایش تأمین شده است. در نقش‌رستم نیز ساختارهای تاریخی بسیاری وجود دارند که می‌توان با کمترین دخالت در ویژگی‌های فرمی

و بصری آن‌ها ضمن احیا قسمت‌های آسیب‌دیده به ایجاد زیرساخت‌های نصب سل‌های مولد انرژی و همین‌طور برقراری مسیر انتقال برخط داده‌های پایش از طریق آن‌ها اقدام کرد (تصاویر ۵ و ۶).



تصاویر ۵ و ۶. ساختار سایبان درگاه‌های کاخ اختصاصی پاسارگاد جهت حفاظت ساختارها و ایجاد زیرساخت‌های پایش از طریق نصب سلول‌های خورشیدی مولد برق در بالای سایبان (نگارندگان، ۱۳۹۶).

نتیجه‌گیری

انتخاب راهبرد مناسب مدیریت محیطی برای میراث صخره‌ای و با هدف حفاظت پیشگیرانه در برابر آلاینده‌های هوا، نیازمند درک درست ساختاری اثر، محیط پیرامون آن و رابطه میان آن دو است؛ لذا تعریف یک شیوه یکسان برای کنترل عوارض محیطی برای همه آثار ممکن نیست. این موضوع علاوه بر بنیان‌های مربوط به مطالعات علمی تا اندازه‌ای وابسته به میزان ارزش و اهمیتی است که اثر به لحاظ اجتماعی و فرهنگی کسب کرده است. مزایا و معایب کاربرد روش‌های پایش مستقیم و غیرمستقیم جهت انتخاب سامانه مناسب پایش میراث صخره‌ای و متغیرهای قابل اندازه‌گیری در جدول ۱، معرفی و جمع‌بندی شده است. بر این اساس، سیستم پایش مستقیم و فعال برای آثار صخره‌ای، راهکاری به مراتب مفیدتر برای رسیدن به درمان اساسی و پیشگیرانه خواهد بود؛ اگرچه بسیاری از مطالعه‌های دقیق آلودگی هوا در محوطه‌های تاریخی به دلیل

جدول ۱. مزایا و معایب کاربرد روش‌های پایش مستقیم و غیرمستقیم جهت انتخاب سامانه مناسب پایش میراث صخره‌ای (نگارندگان، ۱۳۹۶).

| محدودیت‌ها | مزایا | انواع پایش | | | |
|--|--|--|----------------|---|------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> - محدودیت حس‌گرهای مربوط به انواع آلاینده‌ها - محدودیت اندازه‌گیری هم‌زمان در نقاط متعدد به علت لزوم برپایی ایستگاه‌های هم‌زمان - هزینه ایجاد زیرساخت‌ها - نیاز به اطلاعات منطقه‌ای با همکاری صنایع و مراکز شهری و سازمان محیط‌زیست | <ul style="list-style-type: none"> - با حس‌گرها و با استفاده از دیتالاگرهای مناسب به صورت غیرفعال و یا به صورت فعال با کمک زیرساخت انرژی مناسب. - اندازه‌گیری پیوسته و لحظه‌ای - امکان استفاده از حس‌گرهای مخصوص عوامل جوی در کنار حس‌گرهای آلاینده - امکان استفاده از داده‌ها در مدل‌سازی و بررسی نقش عوامل آلاینده منطقه‌ای - تهیه نقشه‌های پراکندگی آلاینده‌ها | اندازه‌گیری آلاینده‌ها | پایش مستقیم | | |
| | | اندازه‌گیری عوامل جوی مؤثر | | <ul style="list-style-type: none"> - بررسی‌های میدانی - اندازه‌گیری دما و رطوبت نسبی و نوسانات آن‌ها در مکان‌های مورد مطالعه با دیتالاگرهای مربوطه - ارزیابی قابلیت خوردگی مکان‌های مورد نظر با استفاده از دزیمترهای فلزی و الاستومرها - بررسی و مطالعه بر روی ذرات معلق (گرد و غبار) با روش‌های فعال و غیرفعال - ارزیابی کیفی مواد و مصالح با استفاده از کهنگی مصنوعی آن‌ها | روش‌های تکمیلی سازگار |
| | | بررسی سهم عوامل اقلیمی و محل در تشدید یا تضعیف اثر منابع آلاینده | | <ul style="list-style-type: none"> - براساس روش‌های استخراجی با کمک مواد گیرانداز مناسب و روش‌های تجزیه‌ای نظیر انواع کروماتوگرافی - عدم محدودیت در اندازه‌گیری انواع آلاینده - عدم نیاز به زیرساخت‌های محلی - امکان اندازه‌گیری از نقاط زیاد | اندازه‌گیری آلاینده‌ها |
| <ul style="list-style-type: none"> - عدم اندازه‌گیری پیوسته و لحظه‌ای - نیاز به تأمین روش‌های تجزیه دستگاهی مناسب - دشواری ایجاد ارتباط بین اطلاعات حاصله جوی و اطلاعات اندازه‌گیری آلاینده‌ها به سبب عدم امکان تهیه اطلاعات لحظه‌ای تغییرات آلاینده‌ها - عدم امکان مدل‌سازی | <ul style="list-style-type: none"> - ارزیابی قابلیت خوردگی مکان‌های مورد نظر با استفاده از دزیمترهای فلزی و الاستومرها - ارزیابی کیفی مواد و مصالح با استفاده از کهنگی مصنوعی آن‌ها - بررسی‌های میدانی | اندازه‌گیری عوامل جوی مؤثر | پایش غیرمستقیم | | |
| | | بررسی سهم عوامل اقلیمی و محل در تشدید یا تضعیف اثر منابع آلاینده | | <ul style="list-style-type: none"> - به صورت مرز دانشی می‌توان با اندازه‌گیری در نقاط متعدد روی تغییرات احتمالی غلظت آلاینده مربوط به عملکرد منابع محلی بحث کرد. | روش‌های تکمیلی سازگار |
| | | روش‌های تکمیلی سازگار | | | |

محدودیت زیرساخت‌های فیزیکی، کمبود دانش فنی و بالاخره کمبود بودجه، ناقص باقی مانده است، ولی تجارب جدید حفاظت در محوطه‌های صخره‌ای می‌تواند تا حدودی نگرانی در مورد محدودیت زیرساخت‌های انرژی و هزینه پایش فعال را کاهش دهد. نباید از نظر دور داشت که هر نوع تعریف راهبرد، لزوماً به معنی محقق شدن حفاظت از اثر نیست و باید کار پایش محیطی بعد از اتخاذ تدابیر پیشگیرانه نیز تداوم یابد تا کارایی تدابیر اتخاذ مشخص و در صورت لزوم برای بازبینی و اصلاح آن‌ها اقدام شود.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از راهنمایی‌های دکتر رضا وحیدزاده، عضو محترم هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز و همچنین از همکاری‌های آقای دکتر امیر اسماعیل زاده سپاسگزاری نمایند.

پی‌نوشت

۱. این مقاله مستخرج از رساله دکتری با عنوان «پایش ساختاری و محیطی میراث صخره‌ای در محوطه تاریخی نقش‌رستم به منظور شناخت میزان تأثیر آلاینده‌های هوایی» است.

2. Polydimethylsiloxane
3. Specific chemical reaction
4. Benzene, Toluene, Ethylbenzene & Xylene
5. Fullerene
6. Solid Phase Micro extraction
7. Dispersive Liquid-Liquid Micro extraction
8. Response

کتابنامه

- رفیع‌فر، جلال‌الدین (۱۳۸۴). *سنگ‌نگاره‌های ارسباران*. تهران: سازمان میراث فرهنگی و گردشگری.
- گلداسمیت، فرانک باری (۱۳۸۹). *پایش برای اکولوژی و حفاظت*. ترجمه حسین ارزانی و احسان شهریاری، تهران: انتشارات دانشگاه تهران. چاپ سوم.
- وحیدزاده، رضا (۱۳۸۸). «آلودگی هوا در هفت تپه و چغازنبیل. نقش تحلیل‌های زیست محیطی در حفاظت پیشگیرانه از مصالح تاریخی موجود در محوطه‌ها». مجموعه مقالات هفتمین همایش حفاظت و مرمت آثار تاریخی فرهنگی و تزئینات وابسته به معماری. تهران ۱۳۸۴، تهران: پژوهشگاه میراث فرهنگی، صنایع دستی و گردشگری.

- Alebic-Juretic, A. & Sekulic-Cikovic, D., (2009). "The Impact of Air Pollution on the Paintings in Storage at The Museum Of Modern and Contemporary Art, Rijeka, Croatia". *Studies in Conservation*, 54(1). Pp: 49-57

- Ammam, M.; Keita, B.; Nadjo, L. & Fransær, J., (2010). "Nitrite sensor based on multilayer film of Dawson-type tungstophosphate α -K₇[H₄PW₁₈O₆₂]·18H₂O immobilized on glassy carbon". *Talanta*. 80(5). p: 2132. doi: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.11.020>

- Baig, N. & Sajid, M., (2017). "Applications of layered double hydroxides based electrochemical sensors for determination of environmental pollutants: A review".

Trends in Environmental Analytical Chemistry, 16, 1. doi: <https://doi.org/10.1016/j.teac.2017.10.003>

- Belkin, S., (2003). "Microbial whole-cell sensing systems of environmental pollutants". *Current Opinion in Microbiology*. 6(3).Pp: 206-212.
- Busca, G., (2014). *Chapter 9 - Metal Catalysts for Hydrogenations and Dehydrogenations, Heterogeneous Catalytic Materials*. Amsterdam: Elsevier, 297.
- Buurma, N. J., (2017). "Aggregation and reactivity in aqueous solutions of cationic surfactants and aromatic anions across concentration scale". *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 32(69). doi: <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2017.10.005>
- Cichosz, S.; Masek, A. & Zaborski, M., (2018). "Polymer-based sensors: A review". *Polymer Testing*, 67, 342. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.024>
- Frassoldati, A.; Frigerio, S.; Colombo, E.; Inzoli, F. & Faravelli, T., (2005). "Determination of NO_x emissions from strong swirling confined flames with an integrated CFD-based procedure". *Chemical Engineering Science*. 60(11). Pp: 2851-2869.
- Gaubert, A.; Clement, Y.; Bonhomme, A.; Burger, B.; Jouan-Rimbaud Bouveresse, D.; Rutledge, D.; Casabianca, H.; Lanteri, P. & Bordes, C., (2016). "Characterization of surfactant complex mixtures using Raman spectroscopy and signal extraction methods: Application to laundry detergent reformulation". *Analytica Chimica Acta*. 915(36). doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.02.016>
- Girotti, S.; Ferri, E. N.; Fumo, M. G. & Maiolini, E., (2008). "Monitoring of environmental pollutants by bioluminescent bacteria". *Analytica Chimica Acta*. 608(1). 2. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.12.008>
- Hamilton, R.; Crabbe, H.; Fitz, S. & Grøntoft, T., (2009). "Monitoring, modelling and mapping". Watt, J., Hamilton, Ron and Kucera, Vladimir and Tidblad, Johann (eds). *The effects of air pollution on cultural heritage*. Boston: Springer. Pp: 29-52.
- Irwin, J.; Tidblad, J. & Kucera, V., (2009). "Air Quality Policy". Watt, J., Hamilton, Ron and Kucera, Vladimir and Tidblad, Johann (eds.). *The effects of air pollution on cultural heritage*. Boston: Springer. Pp: 269- 296.
- Jarque, S.; Bittner, M.; Blaha, L. & Hilscherova, K., (2016). "Yeast Biosensors for Detection of Environmental Pollutants: Current State and Limitations". *Trends in Biotechnology*. 34(5). p: 408. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.01.007>
- Jiang, Y.; Liang, P.; Huang, X. & Ren, Z. J., (2018). "A novel microbial fuel cell sensor with a gas diffusion biocathode sensing element for water and air quality monitoring". *Chemosphere*, 203, 21. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.169>
- Karanam, P.; Reddy, G. M.; Koppolu, S. R. & Lin, W., (2018). "Recent topics of phosphine-mediated reactions". *Tetrahedron Letters*. 59(2). 59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2017.11.051>
- Kularatna, N. & Sudantha, B., (2008). "An environmental air pollution monitoring system based on the IEEE 1451 standard for low cost requirements". *IEEE Sensors*

Journal. 8(4). Pp: 415-422.

- Lamichhane, S.; Bal Krishna, K. C. & Sarukkalige, R., (2016). "Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal by sorption: A review". *Chemosphere*. 148, 336. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.01.036>.

- Likens, G. E., (2013). *Chapter 15 - Acid Rain*. Fundamentals of Ecosystem Science: Academic Press, 259.

- List, G. R.; Kenar, J. A. & Moser, B. R., (2017). *Chapter 1 - History of Fatty Acids Chemistry*. A2 - Ahmad, Moghis U, Fatty Acids: AOCS Press, 1.

- Mahajan, R. K.; Kaur, R.; Miyake, H. & Tsukube, H., (2007). "Zn(II) complex-based potentiometric sensors for selective determination of nitrate anion". *Analytica Chimica Acta*. 584(1). p: 89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.11.011>

- Mathieu, Y.; Tzanis, L.; Soulard, M.; Patarin, J.; Vierling, M. & Molière, M., (2013). "Adsorption of SO_x by oxide materials: A review". *Fuel Processing Technology*, 114, 81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.019>

- Motherwell, W. B. & Crich, D., (1992). *Substitution Reactions*. Free Radical Chain Reactions in Organic Synthesis, London: Academic Press, 29.

- Nesterenko, P. N. & Paull, B., (2017). "Chapter 9 - Ion chromatography A2 - Fanali, Salvatore". (In P. R. Haddad, C. F. Poole & M.-L. Riekkola (eds). *Liquid Chromatography* (Second Edition). Elsevier, 205.

- Pang, X.; Shaw, M. D.; Gillot, S. & Lewis, A. C., (2018). "The impacts of water vapour and co-pollutants on the performance of electrochemical gas sensors used for air quality monitoring". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 266, 674. doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.03.144>

- Pichon, V. & Chapuis-Hugon, F., (2008). "Role of molecularly imprinted polymers for selective determination of environmental pollutants—A review". *Analytica Chimica Acta*, 622(1), 48. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2008.05.057>.

- Pohl, C., (2017). *Chapter Ten - Use of Ion Chromatography for Monitoring Ionic Contaminants in Water A2 - Ahuja, Satinder*. Chemistry and Water: Elsevier, 353.

Ren, X. Ch., Changlun, N. & Masaaki, W. X., (2011). "Carbon nanotubes as adsorbents in environmental pollution management: a review". *Chemical Engineering Journal*. 170(2). Pp: 395-410.

- Rizzo, G.; D'Agostino, F.; Megna, B.; Parlapiano, M. & Ercoli, L., (2007). "Assessment of the conservation state of stone materials in relation to the level environmental pollution in the conservation place". *Conservation Science in Cultural Heritage*. 7(1). Pp: 129-143.

- Sanhueza, E.; Plum, C. N. & Pitts, J. N., (1984). "Positive interference of nitrous acid in the determination of gaseous HNO₃ by the NO_x chemiluminescence-nylon cartridge method: applications to measurements of ppb levels of HONO in air". *Atmospheric Environment*, 18(5). Pp: 1029-1031.

- Schroot, B. & Heggland, R., (2005). *Natural gas migration to the near-surface*

environment as an analogue to potential leakage of CO₂—detection and mechanisms. (Greenhouse Gas Control Technologies 7, Oxford: Elsevier Science Ltd, 2289.

- Song, L.; Xu, Z.; Kang, J. & Cheng, J., (1997). “Analysis of environmental pollutants by capillary electrophoresis with emphasis on micellar electrokinetic chromatography”. *Journal of Chromatography A*. 780(1), 297. doi: [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(97\)00365-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(97)00365-8)

- Sun, J.-L.; Zeng, H. & Ni, H.-G., (2013). “Halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment”. *Chemosphere*. 90(6). Pp: 1751. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.10.094>.

- Tang, Zi-R.; Li, F.; Fu, X. & Xu, Yi-J., (2011). “Composites of Titanate Nanotube and Carbon Nanotube as Photocatalyst with high mineralization ratio for gas-phase degradation of volatile aromatic pollutant”. *The Journal of Physical Chemistry C*. 115(16). Pp: 7880-7886.

- Thomson, G., (1965). “Air pollution—a review for conservation chemists”. *Studies in Conservation* 10(4). P: 147.

- Twigg, M. V., (2013). *Advanced integrated exhaust aftertreatment systems and the mechanisms of NO_x emissions control*. Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions: Woodhead Publishing, 219.

- Villarreal, C. C.; Pham, T.; Ramnani, P. & Mulchandani, A., (2017). “Carbon allotropes as sensors for environmental monitoring”. *Current Opinion in Electrochemistry*. 3(1). p: 106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2017.07.004>

- Watt, J.; Tidblad, J.; Kucera, V. & Hamilton, R., (2009). *The effects of air pollution on cultural heritage*. (Vol. 6). Springer.

- Whitley, D. S., (2005). *Introduction to Rock Art Research*. California: Left Coast Press

- Yu, H. W.; Anumol, T.; Park, M.; Pepper, I.; Scheideler, J. & Snyder, S. A., (2015). “On-line sensor monitoring for chemical contaminant attenuation during UV/H₂O₂ advanced oxidation process”. *Water Research*. 81. p: 250. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.064>

- Zhang, Y.; Chen, D.; Wang, S. & Tian, L., (2018). “A promising trend for field information collection: An air-ground multi-sensor monitoring system”. *Information Processing in Agriculture*. 5(2). p: 224. doi: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.02.002>.

- www.Googleearth.com