



## استفاده از گلسنگ در ارزیابی بیولوژیکی کیفیت هوا

محمد صادق رهبانی\*<sup>۱</sup>، زینب سادات امامی العریضی<sup>۲</sup>، اسماء دلاوری دوسر<sup>۳</sup>

۱- دانشجو، مهندسی طبیعت، دانشگاه تهران، تهران.

۲- فارغ التحصیل، کارشناسی زنتیک، دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی، تهران.

۳- فارغ التحصیل، کارشناسی زنتیک، دانشگاه علوم پزشکی آزاد اسلامی، تهران.

\* تهران، [sadeghrohan@gmail.com](mailto:sadeghrohan@gmail.com)

### چکیده

در این مقاله به پایش بیولوژیکی کیفیت هوا با استفاده از گلسنگ‌ها در مناطق صنعتی، شهری و حومه‌ی شهرهای مجاورت منابع آلودگی، براساس مطالعات انجام شده در دهه‌های گذشته، پرداخته می‌شود.

همچنین مطالعات مختلف پیرامون گلسنگ‌ها در مناطق طبیعی و مکان‌های آلوده و روش‌های تحلیلی مورد استفاده در این مطالعات مورد بحث واقع شده است.

بعلاوه، این مقاله شامل اطلاعاتی تکمیلی در رابطه با موضوع اصلی است. به عنوان مثال، فاکتورهای زیست محیطی و انسانی که بر میزان حساسیت آلودگی جوامع گلسنگ موثر هستند، اثرات منفی آلودگی بر ساختار گلسنگ‌ها و مکانیسم‌های جذب فلز.

به طور ویژه بر بکار گرفتن گلسنگ‌ها به عنوان نشانگر زیستی جهت تشخیص کیفیت هوا به لحاظ کمی و تأثیرات آلاینده‌های هوا مانند دی‌اکسید گوگرد، فلزات سنگین، ذرات معلق و رادیونوکلیدها، تاکید گردیده است.

باتوجه به ویژگی گلسنگ، روش‌های بیولوژیکی مناسب، مزایا و معایب آن‌ها، مطالعات گذشته در مورد این موضوع در جهان، ارزیابی مقالات و اعتبار نتایج به دست آمده در یک چشم‌انداز گسترده بررسی شده است.

امید است که این مقاله به عنوان یک منبع راهنما برای ارزیابی بیولوژیکی کیفیت هوا، ایجاد مدیریت و استراتژی‌های حفاظتی به وسیله‌ی گلسنگ مورد استفاده قرار بگیرد.

**واژگان کلیدی:** کیفیت هوا، آلودگی هوا، نشانگر زیستی، گلسنگ‌ها، فلزات سنگین



## Use of Lichens in Biological Monitoring of Air Quality

Mohammad Sadegh Rohbani<sup>\*1</sup>, Zeinab Sadat Emami Alorezyi<sup>2</sup>, Asma Delavari Dosar<sup>3</sup>

1- Student, Nature Engineering, University of Tehran, Tehran.

2- B.Sc in Genetics, Islamic Azad University Tehran Medical Sciences, Tehran.

3- B.Sc in Genetics, Islamic Azad University Tehran Medical Sciences, Tehran.

[sadeghrohban@gmail.com](mailto:sadeghrohban@gmail.com) \*

### Abstract

This article focuses on biomonitoring of air quality using lichens in the industrial, urban and suburban areas in cities and in the vicinity of pollution sources, mainly based on the studies carried out in the last decades.

Also lichen diversity studies in natural areas and in polluted sites used in these studies are discussed.

In addition, the article covers complementary information on the subject, for instance, environmental and anthropogenic factors which are effective on pollution sensitivity of lichen communities, negative effects of pollution on structure of lichen, metal uptake mechanisms changes in lichen vitality parameters.

In particular, it is emphasized how to utilize the lichens featuring bioindicators and biomonitors to determine air quality in terms of quantities and impacts of airborne pollutants such as sulphur dioxide, heavy metals, particulate matters and radionuclides. With respect to lichen biomonitoring, the appropriate biological methods, their advantages and disadvantages, past to present studies on this subject in the world, the assessment of the relevant literature and the reliability of the obtained results are reviewed from a broad perspective.

It is envisaged that this compilation will serve as a guiding source for biologic monitoring of air quality and creation of management and conservation strategies with lichens today.

**Keywords:** Air quality, Air pollution, Lichens, Heavy metals.

## ۱- مقدمه

با وجود غلظت نسبتاً کم دی‌اکسید گوگرد در سال‌های اخیر به دلیل استفاده کمتر از سوخت‌های فسیلی، آلاینده‌های موجود در جو که با تغییرات آب‌وهوای جهانی همراه است، هنوز هم تهدیدی جدی برای سلامت انسان محسوب می‌شوند. آلاینده‌های هوا بر سلامت انسان از طریق تضعیف عملکرد سیستم ایمنی بدن، کاهش عملکرد ریه، تغییر در تنفس و سیستم گردش خون، پیشرفت بیماری‌های آلرژیک انسانی، بیماری‌های تنفسی و سایر بیماری‌ها اثر می‌کنند. اقدامات مداوم و جدی جهت نظارت بر منابع آلودگی ضروری است. برای دستیابی به کیفیت هوای پایدار، لازم است ابتدا میزان آلودگی هوا تعیین شود و سپس راه‌حل‌های مناسب در جهت کاهش سطح آلودگی بررسی شود. سطح آلودگی هوا به صورت آبی یا مداوم می‌تواند از دو روش مستقیم یا غیرمستقیم اندازه‌گیری شود. گل‌سنگ‌ها نمونه‌های موفق از همزیستی برخی قارچ‌ها (اغلب *Ascomycota*) و جلبک‌های سبز (*Chlorophyta*) و یا جلبک‌های سبز آبی (سیانوباکتρία) هستند، که تقریباً با ۲۰۰۰۰ گونه در جهان نشان داده می‌شوند. این زندگی مشترک یا در اصطلاح "همزیستی"، یک ارتباط متقابل است (که هر دو شریک در آن سود می‌برند). عبارت‌های "mycobiont" برای جزء قارچی و "photobiont" برای جزء فتوسنتزکننده اغلب هنگامی که این دو از هم مجزا هستند استفاده می‌شود، در حالی که شرکای زندگی همزیستی در گل‌سنگ‌ها به عنوان "symbiont" نامیده می‌شوند. این وحدت همزیستی یک "تالوس" (بدنه گیاه) مشترک بدون ریشه و کوتیکول (پوشش خارجی ضد آب) را تشکیل می‌دهد و اساساً مواد معدنی را از اتمسفر جذب می‌کند. توانایی‌های خارق‌العاده گل‌سنگ‌ها در تکامل در یک طیف وسیع جغرافیایی و همچنین انباشته شدن بیش از نیاز عناصر معدنی در آن‌ها، گل‌سنگ‌ها را در میان بهترین اندیکاتورهای بیولوژیکی آلودگی هوا قرار داده است [1]. انواع مختلفی از روش‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته‌است تا سطح و اثرات زیست محیطی آلاینده‌های موجود در جو را تعیین کنند. مطالعات سه دهه اخیر توجه بسیار زیادی به رابطه بین گل‌سنگ‌ها و آلودگی هوا و نقش آن‌ها در ارزیابی ریزگردهای عامل آلودگی هوا نشان داده‌اند. در این بخش، مطالعات مربوط به نشانگر زیستی بودن گل‌سنگ و نقش آن در مدیریت کیفیت هوا مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بررسی مطالعات مربوط به ویژگی نشانگر زیستی گل‌سنگ به آگاهی از تغییر محیط‌زیست ناشی از آلودگی هوا، اقداماتی که باید صورت گیرد و رویکردهای جدید برای حفاظت و مدیریت محیط‌زیست کمک می‌کند.

## ۲- مزایای بیولوژیکی گل‌سنگ به عنوان نشانگرهای زیستی

گل‌سنگ‌ها ارگانیسم‌هایی شبیه گیاهان هستند که در بیشتر اکوسیستم‌های روی زمین بر سطح بسترهای مختلفی مثل درخت، سنگ و خاک رشد می‌کنند. شبیه گیاهان هستند، به لطف جزء کلروفیل‌دار که قادر به فتوسنتز است، گل‌سنگ می‌تواند برای خود غذا تولید کند. در حقیقت، گل‌سنگ‌ها "lichenized fungi" نیز نامیده می‌شوند که در طبقه‌بندی بر اساس فیلوژنی جزء قارچی، در فرمانروی قارچ‌ها گنجانده شده‌اند. گونه‌های قارچی که نمی‌توانند مواد مغذی خود را تولید کنند با برخی از جلبک‌های میکروسکوپی یا گونه‌های سیانوباکتریوم (مانند *Trebouxia*, *Trentepohlia* or *Nostoc*) که می‌توانند در طبیعت آزادانه زندگی کنند اما اغلب آن‌ها را ترجیح می‌دهند، برای تشکیل گل‌سنگ گرد هم می‌آیند.

به دلایل مختلف، گل‌سنگ‌ها به عنوان ابزار ارزیابی بیولوژیکی در مطالعات جوی مفید هستند. گل‌سنگ‌ها را می‌توان در مقیاس جهانی مقایسه کرد چون گستردگی جغرافیایی وسیعی دارند. مزیت دیگر گل‌سنگ‌ها این است که، موجوداتی چند ساله و دارای رشد کند

هستند و برخلاف گیاهان گلدار فصلی یک مورفولوژی واحد را نشان می‌دهند که با گذشت زمان تغییر نمی‌کند. بنابراین تغییرات ریخت‌شناختی در خود گل‌سنگ‌ها در اثر انباشتگی‌هایی است که در طول زمان ایجاد می‌شود. گل‌سنگ‌ها ارگانسیم‌های "poikilohydric" هستند که فعالیت متابولیکی آن‌ها توسط رطوبت جو محدود می‌شود. شاید مهم‌ترین توانایی گل‌سنگ‌ها، ذخیره‌کردن عناصر به میزان بسیار بیشتر از نیازهای فیزیولوژیکی آن‌ها باشد. گزارش شده است که گل‌سنگ‌ها ۱۰۰ برابر بیشتر از گیاهان آوندی دی‌اکسید گوگرد جذب می‌کنند. وقتی گل‌سنگ‌ها را از نظر نقشی که در تعیین آلودگی هوا ایفا می‌کنند با گیاهان گلدار مقایسه می‌کنیم، گل‌سنگ‌ها و خزها مهم‌تر هستند. زیرا، وقتی صحبت از نظارت بر کیفیت هوا می‌شود، انتخاب گل‌سنگ‌ها به عنوان یک تالوس (بدنه گیاه) کامل (بدون ریختن برگ یا گل) برای سال‌های طولانی، نتایج قابل اعتماد و بلند مدت بیشتری می‌دهد. [2]

حساسیت زیاد گل‌سنگ‌ها به آلودگی با بیولوژی آن‌ها ارتباط نزدیک دارد. گل‌سنگ‌های با عمر طولانی به عنوان یک ارگانسیم چند ساله که در طول سال در معرض آلاینده‌ها قرار می‌گیرند، باید تعادل همزیستی را حفظ کنند. همه‌ی گونه‌های گل‌سنگ به صورت همزمان حساس به آلودگی نیستند. اما به طور کلی آن‌ها می‌توانند آلودگی را فقط در حد خاصی تحمل کنند. به همین دلیل، نقش آن‌ها در ارزیابی کیفیت هوا اهمیت پیدا کرده‌است. روش دوم بررسی تغییرات ریخت‌شناختی و آناتومی گونه‌های گل‌سنگ در پاسخ به آلودگی است. روش سوم نیز بررسی پاسخ فیزیولوژیکی است (یکپارچگی غشا، تبادل گاز  $CO_2$ ، کلروفیل، تخریب رنگدانه، تثبیت  $N_2$  و فعالیت آنزیم).

برخی از تغییراتی که به دلیل آسیب به واسطه‌ی آلودگی در گل‌سنگ‌ها رخ می‌دهد، شامل علائم مورفولوژیکی و آناتومیک، ساختار ریز، اختلالات سیستم غشایی، اختلال فلورسانس کلروفیل، اختلالات فیزیولوژیکی و اختلالات تکوینی-تولید مثلی و اختلالات سرعت رشد می‌باشند. برخی از این تغییرات (ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی) را می‌توان روی زمین مشاهده کرد، در حالی که برخی دیگر از تغییرات با مطالعات آزمایشگاهی کنترل شده قابل مشاهده است. [3]

### ۳- نقش گل‌سنگ‌ها در ارزیابی آلودگی‌های هوا

آلاینده‌های عمومی طبقه بندی شده به شرح زیر است:

۱. آلاینده‌های اولیه: ترکیبات  $SO_2$ ،  $NO_2$  و  $F$  که به همان شکل شیمیایی در اتمسفر باقی می‌مانند.
۲. آلاینده‌های ثانویه: نتیجه واکنش‌های شیمیایی آلاینده‌های اولیه در حین جابه‌جایی در اتمسفر است، مانند اسید سولفوریک ( $H_2SO_4$ ) و اسید نیتریک ( $HNO_3$ ) که در باران‌های اسیدی اتفاق می‌افتد، همچنین  $O_3$  ازن و پراکسی استیل نترات (PAN).
۳. گروه سوم آلاینده‌ها: ترکیبات آلی صنعتی که سموم را وارد هوا می‌کنند، آفت‌کش‌های کشاورزی، فلزات کمیاب و شبه فلزات هستند.

معمولاً ترکیبات گوگرد و نیتروژن به صورت گاز در اتمسفر موجود است، در حالی که فلزات سنگین به صورت متصل به ذرات معلق یافت می‌شوند. برخی از ذرات به طور طبیعی از آتشفشان‌ها، گرد و غبار و طوفان‌های شن، جنگل و آتش‌سوزی مراتع، پوشش گیاهی زنده می‌آیند.

علاوه بر این، فعالیت‌های مختلف انسان مانند نیروگاه‌ها، فعالیت‌های صنعتی و استفاده از سوخت‌های فسیلی در وسایل نقلیه مقدار قابل توجهی ذرات آلاینده تولید می‌کنند که باعث افزایش میزان سرطان‌ها، مشکلات قلبی، بیماری‌های تنفسی و مرگ و میر نوزادان می‌شوند.

تنوع گل‌سنگ، توزیع مکانی و زمانی گونه‌های آن، یکی از ارزشمندترین ابزارهای بیولوژیکی برای ارزیابی محیط‌زیست به ویژه در مورد آلودگی هوا است. میزان تنوع گل‌سنگ (LDV) براساس گونه‌های epiphytic، روشی اروپایی است که برای استرس محیطی / شاخص کیفیت، توسعه یافته است.

از زمانی که در سال ۱۹۶۰ حساسیت گلسنگ‌ها به آلاینده‌های گازی، مانند  $SO_2$  (دی‌اکسید گوگرد) مورد توجه قرار گرفت، گلسنگ‌ها به عنوان شاخص، در اطراف منابع ایجاد آلودگی و انتشار آن‌ها استفاده شده‌اند. با توجه به توانایی آن‌ها در جمع‌آوری عناصری که در غلظت کم در هوا یافت می‌شود، گلسنگ‌ها به یک موضوع مهم از آن زمان تا به امروز تبدیل شده‌اند.

گلسنگ‌ها علاوه بر حساسیت به آلاینده‌های هوا، جذب‌کننده فلزات نیز هستند. مواد مغذی معدنی، فلزات سبک و سنگین در بارندگی و گرد و غبار و همچنین در بسترهای طبیعی (پوسته، خاک، سنگ) وجود دارد.

عناصر  $Pb$ ،  $Ni$ ،  $Hg$ ،  $Cr$ ،  $Zn$ ،  $Ti$  و  $V$  از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های فلزی هستند. اصطلاح فلزات سنگین، که اغلب در مطالعات بیولوژیک استفاده می‌شود، به عناصری اشاره دارد که در صورت وجود مقادیر زیاد آن‌ها در اتمسفر، برای موجودات زنده سمی هستند. چه فلز باشد، چه فلزات واسطه و چه نیمه فلزات. [4]

#### ۴- نقش نشانگر زیستی گلسنگ‌ها در آلودگی هوا

نشانگرهای زیستی موجودات زنده‌ای هستند که با عملکردهای خود در برابر آلودگی محیط‌زیست واکنش نشان می‌دهند. به دلیل خواص بیولوژیکی، گلسنگ‌ها، که قدرت انعکاس آلودگی هوا را دارند، در صف مقدم نشانگرهای زیستی قرار می‌گیرند.

ویژگی‌هایی که اجازه می‌دهد گلسنگ‌ها شاخص‌های قابل اعتمادی برای تغییرات اقلیمی باشند، به شرح زیر است:

۱. گونه‌های گلسنگ در حساسیت به تغییرات جوی متفاوت هستند.

۲. گلسنگ‌ها موجوداتی با رشد آهسته هستند و مورفولوژی آن‌ها تغییرات فصلی را نشان نمی‌دهد.

۳. گلسنگ‌ها توزیع گسترده‌ای دارند و تقریباً در همه بیوم‌های زمینی یافت می‌شوند.

توزیع گونه‌های گلسنگ در یک منطقه می‌تواند تخمین آلودگی هوا، به ویژه سطح دی‌اکسید گوگرد را ارائه دهد. از آنجا که حساسیت گونه‌ها به آلودگی هوا متفاوت است، توزیع گونه‌های گلسنگ انگلی در برخی از کشورهای اروپایی با توجه به مقادیر متوسط  $SO_2$  در زمستان، توسط سطح آلودگی هوا، منطقه‌بندی می‌شود. بنابراین، می‌توان سطح  $SO_2$  را در آن منطقه با بررسی اینکه کدام گونه گلسنگ در یک منطقه وجود دارد، تخمین زد. [5]

#### ۵- گلسنگ‌ها به عنوان ناظر زیستی کیفیت هوا

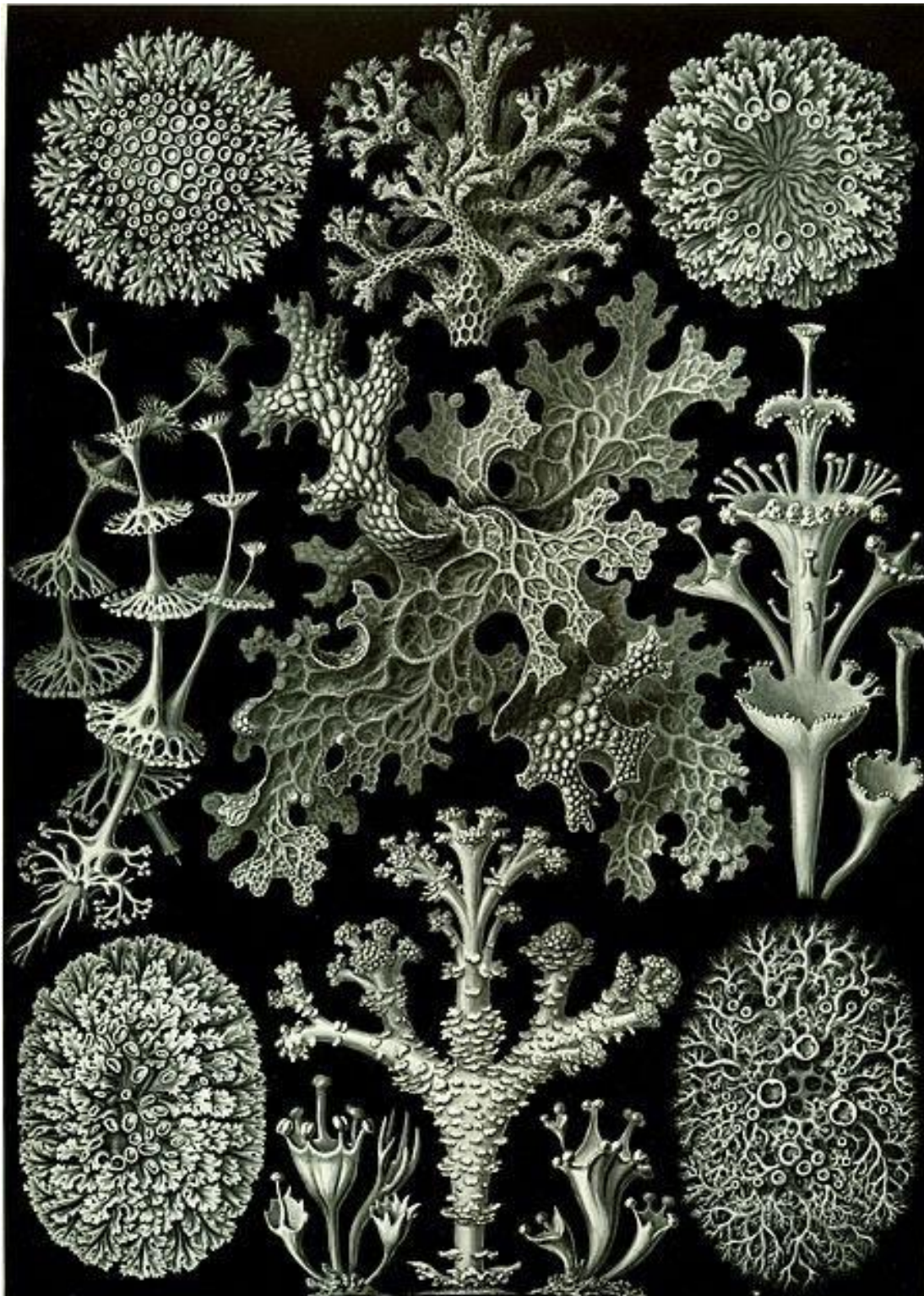
ارزیابی زیست محیطی بر روی جمعیت گلسنگ برای اثرات آلودگی طولانی مدت انجام شده است. به عنوان مثال، طی یک دوره ۱۵ ساله، تغییرات در جوامع گلسنگ تحت تأثیر آب و هوا و آلودگی، از منظر رسوب ترکیبات نیتروژن (N) و گوگرد (S) در نروژ، که در آن بیشترین تغییر در ترکیب گونه با بیشترین کاهش در رسوب گوگرد همراه است، مشاهده شد.

درجه‌ای که گونه‌های گلسنگ، فیزیولوژی، مورفولوژی و شرکای زندگی هم‌زیستی‌شان به طور جداگانه تحت تأثیر آلاینده‌های هوا قرار گرفته‌است، زیر سوال رفته‌است.

به عنوان مثال، اثرات فیزیولوژیکی و فراساختاری ناشی از مواجهه حاد با اوزون ( $O_3$ ) در *Xanthoria parietina* توسط Vannini و همکاران (۲۰۱۷) بررسی شد. آن‌ها اظهار داشتند که حالت هیدراسیون ممکن است نقش اصلی در تعیین میزان آسیب داشته باشد و وجود پاریتین ممکن است از بهبودی پشتیبانی کند.

گلسنگ‌ها به دلیل رشد آهسته و عمر طولانی، از موجودات زنده مهمی هستند که در نظارت بر تغییرات محیطی منطقه بسته به کیفیت هوا مورد استفاده قرار می‌گیرند.

اکثر مطالعات اخیر در حوزه نظارت بیولوژیکی گلسنگ‌ها در توزیع عناصر یا رادیونوکلیدها در مناطق شهری یا حومه‌ای، جنگل‌ها یا سایت‌های طبیعی مجاور منابع آلودگی مانند کارخانه‌ها، آسیاب‌ها، معادن یا نیروگاه‌های حرارتی و غیره ثبت شده‌است. [6]



شکل (۱) گل‌سنگ‌ها، از کتاب «اشکال هنری طبیعت»



شکل ۲) گلستگها حجم زیادی از آلودگی هوا را جذب می کنند

## ۶- روش‌های مورد استفاده در نظارت زیستی با گل‌سنگ‌ها

به دلیل رشد سریع جمعیت، صنعت، کشاورزی و فناوری در جهان، ناگزیر آلودگی محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته است. در مناطقی که آلودگی هوا مشاهده می‌شود، بسته به نوع آلاینده ( $SO_2$ )، رادپونوکلیدها، فلزات سنگین و غیره) و سطح آلاینده‌ها، روش‌های مختلفی که به صورت محلی اعمال می‌شوند، باید توسعه یابد.

از زمان ظهور این ایده که می‌توان با استفاده از روش‌های بیولوژیکی نتایج قابل اندازه‌گیری، بلندمدت، ارزان و قابل اطمینانی را به دست آورد، به طور فزاینده‌ای، فعالیت‌های مرتبط در تعیین و نظارت بر کیفیت محیط گسترش یافته‌است.

در بیشتر کشورها، تعداد محدودی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری آلودگی هوا در شهرهای بزرگ و مناطق صنعتی، غلظت ذرات معلق و  $SO_2$  در روز را ثبت می‌کنند. ارزیابی سطح تأثیرات آلاینده‌ها بر پوشش گیاهی به عنوان یک روش جایگزین در ارزیابی آلودگی هوا مطرح شده است.

برآوردهای انجام شده بر اساس پوشش گیاهی نشان می‌دهد که گل‌سنگ‌هایی که بسیار آهسته رشد می‌کنند و برای مدت طولانی زنده می‌مانند، می‌توانند شاخص‌های بهتری از سطح کمی آلودگی هوا نسبت به اندازه‌گیری‌های کمی شیمیایی باشند که در یک دوره زمانی خاص انجام می‌شود؛ به عنوان جوامعی که می‌توانند تعادل بیشتری با محیط خود ایجاد کنند.

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای ارزیابی کیفیت محیط (آلودگی هوا) بر اساس داده‌های گل‌سنگ پیشنهاد شده‌است. روش‌های کیفی را می‌توان با تعیین کمیت همزمان تعداد گونه‌های منطقه، توزیع‌ها و فراوانی گونه‌ها، به روش‌های کمی تبدیل کرد. روش‌های کمی عموماً توسط ابزارهای تجزیه و تحلیل بنیادی و تجزیه و تحلیل آماری برای تعیین سطح آلاینده‌ها (فلزات و مواد رادیواکتیو) تجمع یافته در بدنه گل‌سنگ اعمال می‌شود. آلاینده‌های اتمسفر باعث آسیب حاد ریخت‌شناسی و معمولاً فیزیولوژیکی گل‌سنگ‌ها می‌شوند.

آسیب‌های مزمن پس از قرار گرفتن طولانی مدت یا مکرر در معرض آلودگی ایجاد می‌شود، که یک بیماری آهسته و مرتبط با رشد است و پیش از آسیب به بافت، رشد و نمو را با مشکل مواجه می‌کند. این اتفاق منجر به ناپدید شدن گونه‌های حساس جمعیت می‌شود. [7]

روش‌های کنترل بیولوژیکی گل‌سنگ را می‌توان با توجه به هدف و محتوای برنامه، به اشکال مختلف طبقه‌بندی کرد. عمدتاً از دو روش تحلیلی برای تعیین کمی پاسخ گل‌سنگ‌ها به آلاینده‌های هوا و ارزیابی حساسیت آن‌ها استفاده کرد:

(۱) مطالعه تجزیه و تحلیل شیب و (۲) مطالعه بخور یا ضد عفونی سازی.

در مطالعه تجزیه و تحلیل شیب، اثرات مضر درجه آلودگی بر روی گل‌سنگ‌های آلوده، اثرات زیست‌محیطی و مقادیر قابل اندازه‌گیری در غنای گونه (اطراف یک منبع آلودگی) مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

گونه‌های گل‌سنگ به بهترین وجه می‌توانند در محیط خود مورد بررسی قرار گیرند زیرا نه تنها آلودگی هوا بلکه اقلیم و خصوصیات مربوط به لایه‌های زیرین (مانند آتش‌سوزی، حیوانات در حال چرا) بر گل‌سنگ‌ها نیز تأثیر می‌گذارد.

در مطالعه بخور (ضد عفونی سازی)، میزان قابل استفاده از گل‌سنگ در پایش بیولوژیکی کیفیت هوا از گل‌سنگ‌های در معرض آلاینده‌ها در یک سیستم بسته تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاهی بررسی می‌شود.

روش‌های مختلفی که در محدوده مطالعات پایش کیفیت هوا با استفاده از گل‌سنگ‌ها اجرا شده‌است، می‌تواند به طور عمده در عناوین زیر طبقه‌بندی شود:



الف - نظارت بیولوژیکی منفعل:

۱. روش مبتنی بر فلورهای کامل گل‌سنگ (مطالعه عمومی گل‌سنگ و روش نقشه‌برداری).
۲. روش مبتنی بر گونه‌های نشانگر زیستی و روش IAP (شاخص خلوص جو).
۳. تجزیه و تحلیل کمی آزمایشگاهی (تجزیه و تحلیل چند عنصر و رادیونوکلئید).

ب - نظارت بیوماتیک فعال:

۱. پیوند

۲. بخور کنترل شده

۳. فرهنگ سازی

هنگام تعیین کیفیت هوا، "روش‌های فعال" منجر به اثرات کنترل شده آلاینده‌ها به طور مستقیم بر روی گل‌سنگ‌ها می‌شوند، در حالی که "روش‌های غیرفعال" منجر به تعیین مقادیر جمع شده در گل‌سنگ‌ها یا نظارت بر فلورهای طبیعی گل‌سنگ می‌شوند، که تحت تأثیر آلاینده‌ها هستند. [8]

#### ۷- نقش گل‌سنگ در مدیریت پایدار کیفیت هوا

آلودگی هوای شهری با  $SO_2$ ،  $NO_x$  و CO و ذرات معلق هنوز یک به‌عنوان یک مشکل جدی در کشورهای توسعه یافته یا در حال توسعه قلمداد می‌شود. به طور کلی، منابع اصلی تأثیرگذار بر کیفیت هوا، وسایل نقلیه، گرمایش خانگی، تأسیسات صنعتی و فعالیت‌های کشاورزی است.

در طی سال‌های گذشته، به دلیل فعالیت‌های مختلف انسانی از جمله آتش‌سوزی و ساخت و ساز، تعداد زیادی از اکوسیستم‌های جنگلی با وجود برخی اقدامات محافظتی، تخریب و حتی نابود شده‌اند.

این امر منجر به تغییرات اساسی همچون افزایش اثرات جانبی در جنگل‌ها، تغییرات میکروکلیم و از بین رفتن محیط جنگل می‌شود. تخریب اکوسیستم، بر تنوع زیستی جنگل تأثیر منفی می‌گذارد. (تنوع زیستی عامل مهمی است که پایداری اکوسیستم، پویایی، تعادل و بهره‌وری آن را کنترل می‌کند).

در جهت پرداختن به موضوعات زیست‌محیطی و اطمینان از توسعه پایدار، بایستی تلاشی یکپارچه برای شناسایی منابع محلی، منطقه‌ای و جهانی انجام شود. (توسعه پایدار مفهومی است که در آن نیازهای اساسی انسان بدون صرفه جویی در سیستم‌های طبیعی برآورده می‌شود).

نظارت زیستی یک روش مقرون به صرفه و قابل اعتماد برای نظارت بر مشکلات زیست‌محیطی است. اکنون کاملاً مشخص است، که گل‌سنگ‌ها تحت تأثیر تغییرات جوی با گذشت زمان کیفیت هوا را منعکس می‌کنند. در نتیجه، درک روند زمانی نظارت بیولوژیکی و بررسی اثرات آلاینده‌های شهری بر آرگانیسم گل‌سنگ در شرایط تنش مهم و ارزشمند به نظر می‌رسد. [9]

برای تعیین کیفیت هوا، باید روش‌های مدیریتی قابل قبول از نظر اجتماعی و سازگار با محیط‌زیست تهیه شوند. علاوه بر اندازه‌گیری‌های دوره‌ای شیمیایی، برای نظارت بر تغییرات کیفیت هوا نباید از مطالعات نظارت بیولوژیکی با گل‌سنگ‌ها، به تنهایی یا در کاربردهای جایگزین و حمایتی غافل شد. داده‌های پایش بیولوژیکی نشان‌دهنده وجود و تغییر آلاینده‌ها در محیط است. گونه‌های مختلف گل‌سنگ نظارت بیولوژیکی داده‌ها را برای توزیع غلظت آلاینده‌ها در مناطق متفاوت تضمین می‌کنند.

## ۸- نتیجه گیری

پس از درک اینکه برخی از گونه‌های گل‌سنگ در درجه‌های مختلف به آلودگی هوا ( $SO_2$ ) حساس هستند، زمینه مطالعه و استفاده از نظارت بیولوژیکی بر کیفیت هوا به طور مستقیم با سلول‌های زنده به طور پیوسته در حال افزایش است.

"موجودات زنده طبیعی برای نظارت بر کیفیت هوا" رویکردی طبیعی‌تر به محیط است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری بیولوژیکی با استفاده از نشانگرهای زیستی مانند گل‌سنگ وجود دارد. اگرچه این یک استاندارد کامل برای استفاده از این روش‌های بیولوژیکی نیست اما ملاحظه شده‌است که هنگام انتخاب صحیح، می‌توان آن را به عنوان جایگزینی برای ایستگاه‌های اندازه‌گیری آلودگی هوا، که معمولاً محدود به شهرهای بزرگ و مناطق صنعتی هستند، استفاده کرد.

غلظت‌های مختلف جوی آلاینده‌ها (عناصر کمیاب، فلزات سنگین، رادیونوکلیئیدها و مواد آلی) را می‌توان با تجزیه و تحلیل گل‌سنگ‌های ناظر زیستی تعیین کرد، نه تنها دی‌اکسید گوگرد، بلکه پیگیری دوره‌ای کیفیت هوا از مسیر بیولوژیک نیز امکان‌پذیر است.

برخی از نتیجه‌گیری‌های مهمی که می‌توان از مطالعات مربوط به نظارت بر کیفیت هوا با گل‌سنگ‌ها برداشت کرد، به شرح زیر است:

۱. خواص زیست‌ساختاری گل‌سنگ‌ها به میزان قابل توجهی بر میزان نگهداری عناصر از جو موثر هستند.
۲. انتخاب و استفاده از مناسب‌ترین روش (های) نظارت زیستی در منطقه تحقیقاتی برای دستیابی به نتایج دقیق بسیار مهم است.
۳. در حالی که انتظار می‌رود احتمال وجود گل‌سنگ‌های منتخب برای تجزیه و تحلیل در یک منطقه دقیقاً منعکس‌کننده غلظت آلاینده‌های هوا باشد، اما اثرات مختلف میکرو زیستگاه‌ها، لایه‌های زیرزمینی یا عوامل آب‌وهوایی، تحت تأثیر عوامل انسانی، نادیده گرفته می‌شوند. از این لحاظ، میانگین نرخ عناصر بدست آمده از تعداد زیادی از نمونه‌ها ممکن است نتایج قابل اطمینان‌تری به همراه داشته باشد. عوامل موثر بر حساسیت گل‌سنگ‌ها در ارزیابی نتیجه این مطالعات نیز باید به عنوان یک کل در نظر گرفته شوند. [10]
۴. مشاهدات کیفی نیز ضروری هستند زیرا ممکن است نگهداری متغیرها در مناطقی که نمونه‌های تجزیه و تحلیل کمی جمع‌آوری می‌شود دشوار باشد. به عنوان مثال، شناسایی تنوع گونه‌های گل‌سنگ در یک منطقه و پیگیری تغییرات در فلور گل‌سنگ برای سال‌های طولانی، داده‌های حمایتی را در تعیین سطح آلودگی فراهم می‌کند.
۵. مطالعه دقیق مکانیسم‌های نظارتی در گل‌سنگ‌ها برای فراهمی زیستی، تجمع، سمیت و سم‌زدایی از فلزات سنگین ضروری است.

استفاده از آزمایش‌های سمیت ژنی می‌تواند استفاده موثرتر از گل‌سنگ‌ها را به عنوان ناظر زیستی هنگام نظارت بر آلاینده‌های هوا، بهبود بخشد. تجزیه و تحلیل تنوع ژنتیکی درون گونه‌ای، پاسخ گونه‌ها به شرایط مختلف محیطی و تجربی را روشن می‌کند و همزمان به درک بهتری از تنوع محتوای بدنه‌ی گیاه در یک گونه واحد کمک می‌کند.

کاهش تعداد گونه‌های یک گروه زنده که از آلودگی هوا در پوشش گیاهی رنج می‌برند، قطعاً سایر گروه‌های زنده را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد.

اگر یکی از حلقه‌های زنجیره غذایی تحت تأثیر آلودگی باشد، در نهایت با تأثیر بر دیگران که به آن متصل هستند (به عنوان مثال حیواناتی که تغذیه می‌کنند و تغذیه می‌شوند همچنین حیواناتی که از آن‌ها تغذیه می‌کنند) به افراد می‌رسد.

بنابراین، آلودگی به طور مستقیم و هم از طریق اختلال در تعادل طبیعی به انسان آسیب می‌رساند. از این نظر، روش‌های توسعه‌یافته با رویکرد تعیین کیفی و کمی سطح تأثیرات آلودگی بر روی پوشش گیاهی می‌تواند به عنوان یک سیستم هشدار سریع در برابر آلودگی مورد استفاده قرار گیرد.



## منابع

- [1] Nash TH (2008) Lichen biology. Cambridge University Press, Cambridge
- [2] Branquinho C, Matos P, Pinho P (2015) Lichens as ecological indicators to track atmospheric changes: future challenges. In: Indicators and surrogates of biodiversity and environmental change. CSIRO Publishingpp, Clayton, pp 77–90
- [3] Conti ME, Cecchetti G (2001) Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review.
- [4] Behxhet M, Hajdari A, Lokös L, Krasniqi Z (2013) Lichen diversity value and heavy metal concentrations in mosses around the lignite power plants ‘Kosova’.
- [5] Vallero D (2008) Fundamentals of air pollution, 4th edn. Academic, London
- [6] Vannini A, Paoli L, Ceccarelli S, Sorbo S, Basile A, Carginale V, Nali C, Lorenzini G, Pica M, Loppi S (2017) Physiological and ultrastructural effects of acute ozone fumigation in the lichen *Xanthoria parietina*: the role of parietin and hydration state.
- [7] Blasco M, Domeno C, Lopez P, Nerin C (2011) Behaviour of different lichen species.
- [8] Branquinho C, Catarino F, Brown DH, Pereira MJ, Soares A (1999) Improving the use of lichens as biomonitors of atmospheric metal pollution.
- [9] Bargagli R, Monaci F, Borghini F, Bravi F, Agnorelli C (2002) Mosses and lichens as biomonitors of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former Mining District in Italy. *Environ Pollut* 116:279–287
- [10] Bačkor M, Loppi S (2009) Interactions of lichens with heavy metals