

“Research article”

Assessment of the Geochemistry of Cadmium (Cd) and its Environmental Implications in Mining Operations

Aynur Nasseri^{1*}

¹ Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Ah.C., Islamic Azad University, Ahar, Iran.

*Corresponding Author: Ay.Nasseri@iau.ac.ir, aynur.nasseri80@gmail.com

(Received: 25 February 2025, Accepted: 03 April 2025)

Abstract

Cadmium (Cd), a highly toxic heavy metal, is frequently encountered in mining operations and metal processing activities, notably within zinc, lead, and copper mining contexts. although it possesses limited economic value, cadmium presents substantial environmental and public health hazards owing to its high mobility, persistent nature in ecosystems, and high potential for bioaccumulation. this research aims to systematically examine cadmium contamination by evaluating its sources of emission, transmission routes, environmental distribution patterns, regulatory standards, remediation technologies, and associated health risks within mining areas. through an extensive review and synthesis of current literature, empirical research results, and mining industries reports, the study offers an integrated depiction of the extent and scope of cadmium contamination, its environmental and health impacts, and viable risk mitigation strategies. the results demonstrate that primary sources of cadmium contamination include mining processes, particularly acid mine drainage (AMD) and the improper handling and disposal of mining wastes. the collected data from reviews confirm that soil cadmium concentrations in surrounding the mining sites often surpass internationally accepted environmental guidelines, consequently causing soil degradation, water contamination, and adverse ecological impacts. furthermore, an assessment of existing regulatory frameworks reveals substantial inadequacies in regulatory standards or enforcement mechanisms concerning cadmium pollution control in numerous countries. consequently, the study underscores the critical importance of enhancing environmental regulations, incorporating advanced remediation technologies, and implementing sustainable mining operations to effectively mitigate the detrimental effects of cadmium contamination on ecological systems and public health.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Cadmium (Cd), Geochemistry, Mining Operations, Environmental Impact, Contamination



سال شانزدهم، شماره ۶۱
بهار ۱۴۰۴، صفحات ۵۴-۳۹

دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر
فصلنامه‌ی کاربرد شیمی در محیط زیست

"مقاله پژوهشی"

بررسی ژئوشیمی کادمیم (Cd) و اثرات زیست محیطی آن در عملیات معدن کاری

آینور ناصری^{*۱}

^۱ استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، اهر، ایران

*نویسنده مسئول E-mail: Ay.Nasseri@iaua.ac.ir, aynur.nasseri@gmail.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۱/۱۴)

چکیده

کادمیم (Cd) بعنوان یک فلز سنگین سمی معمولاً در ارتباط با عملیات معدنی و فراآوری فلزات، به ویژه در معادن روی، سرب و مس، یافت می شود. علی رغم ارزش اقتصادی محدود، این عنصر به دلیل قابلیت تحرک بالا، ماندگاری در محیط زیست و خاصیت زیست انباشتگی، تهدیدات جدی برای محیط زیست و سلامت انسان به همراه دارد. هدف از این مطالعه، بررسی منابع انتشار، مسیرهای انتقال، پراکندگی زیست محیطی، چارچوب های قانونی، راهکارهای پالایش و پیامدهای بهداشتی ناشی از آلودگی کادمیم در محیط های معدنی است. این مطالعه با تجزیه و تحلیل اطلاعات حاصل از تحقیقات انجام شده و گزارش های صنعتی و معدنی، تصویری جامع از میزان و گستره آلودگی کادمیم، تأثیرات آن و راهکارهای کاهش ریسک ارائه می دهد. نتایج نشان می دهد که فعالیت های معدنکاری، به ویژه زهاب اسیدی معدن (AMD) و دفع نامناسب پسماندهای معدنی، مهم ترین عوامل انتشار کادمیم هستند. همچنین، داده های گردآوری شده نشان می دهد که غلظت کادمیم در خاک های اطراف معادن در بسیاری از موارد از استانداردهای بین المللی فراتر رفته و منجر به کاهش کیفیت خاک، آلودگی منابع آبی، و آسیب به اکوسیستم های محلی شده است. علاوه بر این، بررسی چارچوب های قانونی نشان داد که در بسیاری از کشورها، استانداردهای نظارتی کافی برای کنترل آلودگی کادمیم وجود ندارد یا فاقد ضمانت اجرایی مناسب هستند. بر اساس این یافته ها، مطالعه حاضر بر لزوم اجرای مقررات زیست محیطی، بهره گیری از فناوری های نوین پالایش و اتخاذ شیوه های معدنکاری پایدار تأکید دارد تا اثرات زیانبار این آلاینده بر اکوسیستم و سلامت انسان به حداقل برسد.

واژه های کلیدی: کادمیم (Cd)، ژئوشیمی، عملیات معدنی، تأثیرات زیست محیطی، آلودگی

مقدمه

کادمیم (Cd) یک فلز واسطه از گروه IIB جدول تناوبی است که از نظر شیمیایی شباهت زیادی به روی (Zn) و جیوه (Hg) دارد. این عنصر برای نخستین بار در سال ۱۸۱۷ توسط شیمیدان آلمانی فریدریش استرومایر به‌عنوان ناخالصی در کانسنگ روی (اسمیت زونیت، $ZnCO_3$) کشف شد و از آن زمان به بعد، به‌عنوان یک فلز مهم اما بسیار سمی با کاربردهای صنعتی گسترده و پیامدهای زیست‌محیطی قابل توجه شناخته شده است (۱). کادمیم در طبیعت به‌صورت عنصری یافت نمی‌شود و معمولاً همراه با کانسنگ‌های روی، سرب-روی، و سرب-مس-روی حضور دارد. غلظت آن در این کانسنگ‌ها اغلب با میزان Zn همبستگی دارد که نشان‌دهنده رفتار ژئوشیمیایی مشابه این دو عنصر در محیط‌های زمین‌شناختی مختلف است (۲ و ۳).

رفتار ژئوشیمیایی کادمیم

ژئوشیمی کادمیم (Cd) عمدتاً تحت تأثیر ماهیت کالکوفیل آن قرار دارد، به این معنا که این عنصر دارای تمایل قابل‌توجهی به ترکیب با گوگرد بوده و عمدتاً در کانی‌های سولفیدی از جمله اسفالریت (ZnS)، گرینوکیت (CdS) و هاولیت (پلی مورف گرینوکیت) یافت می‌شود. علاوه بر این، کادمیم در ترکیبات کربناته نظیر اتاویت ($CdCO_3$) و اکسیدهایی همچون CdO ، به‌ویژه در محیط‌های اکسیدکننده، حضور دارد (۱). رفتار شیمیایی Cd به دلیل شباهت شعاع یونی آن ($Cd^{2+} = 0.97 \text{ \AA}$) با Zn^{2+} ($Zn^{2+} = 0.88 \text{ \AA}$) و ساختار الکترونی مشابه، شباهت زیادی به Zn دارد و این ویژگی موجب جایگزینی Cd در کانی‌های حاوی Zn می‌شود. حلالیت و تحرک این

عنصر در محیط‌های آبی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله pH، شرایط اکسیداسیون-احیاء، و تشکیل کمپلکس‌ها با لیگاندهای آلی و معدنی قرار دارد که این عوامل می‌توانند موجب افزایش قابلیت انتقال و دسترس‌پذیری زیستی آن در اکوسیستم‌های آبی و خشکی شوند.

کادمیم در سنگ‌ها و خاک‌ها

به دلیل شباهت شعاع یونی کادمیم با کلسیم ($Ca^{2+} = 0.99 \text{ \AA}$) و سدیم ($Na^{+} = 0.98 \text{ \AA}$)، این عنصر می‌تواند در ساختار برخی از کانی‌های اصلی سنگ ساز جایگزین این عناصر شود (۱). هرچند غلظت کادمیم در کانی‌های فرومنیزین نظیر بیوتیت، پیروکسن‌ها و آمفیبول‌ها پایین است، اما این عنصر در کانسارهای رسوبی و هیدروترمالی حضور قابل توجهی دارد. باتوجه به اینکه کادمیم (Cd) یکی از عناصر کمیاب در پوسته زمین محسوب می‌شود عمدتاً به‌عنوان یک عنصر فرعی در ترکیب با کانی‌های سولفیدی یافت می‌شود. جدول ۱ غلظت کادمیم را در کانی‌های مختلف سنگ‌ساز نشان می‌دهد (۱):

جدول (۱): محتوای کادمیم در کانی‌های سنگ‌ساز (۱)

کانی	ترکیب شیمیایی	مقدار کادمیم ($\mu g/g$)
اسفالریت	(Zn,Cd)S	1000 – 18.500
گرینوکیت	CdS	778.000 (77.8%)
هاولیت	CdS	778.000 (77.8%)
تالکوپیریت	$CuFeS_2$	<0.4 – 110
مارکاسیت	FeS_2	<0.3 – <50
گالن	PbS	<10 – 3.000
پیریت	FeS_2	<0.06 – 42
پیروتیت	$Fe(1-x)S$	مقادیر ناچیز
تراهیدریت	$(Cu,Fe,Zn,Ag)_{12}SbAs$	80 – 2.000
سید کادمیم	CdO	875.000 (87.5%)

ادامه جدول (۲):

انگلازیت	PbSO ₄	<5 - 1000
میت زونیت	ZnCO ₃	100 - 1000
اوتاویت	CdCO ₃	1 - 2.35%
آپاتیت	Ca ₅ (F,Cl)(PO ₄) ₃	<1 - 8

چرخه ژئوشیمیایی کادمیم در سیستم‌های طبیعی داشته و بر میزان دسترس‌پذیری آن در مناطق معدنی تأثیرگذار هستند. کادمیم (Cd) به‌عنوان یک عنصر کمیاب، در انواع مختلف سنگ‌ها حضور دارد. غلظت این عنصر به‌طور معمول بین $0.001 - 0.6 \mu\text{g/g}$ در سنگ‌های آذرین، $11 - 0.1 \mu\text{g/g}$ در سنگ‌های رسوبی، و حداکثر تا $5 \mu\text{g/g}$ در سنگ‌های دگرگونی متغیر است (۱). میانگین غلظت کادمیم در پوسته زمین $0.15 \mu\text{g/g}$ گزارش شده است (۴)، اما مقادیر آن بسته به نوع سنگ متفاوت است.

در سنگ‌های آذرین، میزان کادمیم معمولاً پایین است. این مقدار کم به دلیل عدم تشکیل کانی‌های پایدار کادمیم در فرآیندهای ماگمایی است (۲). در مقابل، سنگ‌های رسوبی، به‌ویژه شیل‌های سیاه و شیل‌های بیتومینه، می‌توانند دارای مقادیر بالاتری از کادمیم باشند که این امر ناشی از جذب بر روی مواد آلی و فرآیندهای غنی‌سازی ثانویه است (۱). این مسئله نشان‌دهنده نقش بالقوه این سنگ‌ها در انتشار کادمیم در محیط‌زیست به‌ویژه در نتیجه فرآیندهای هوازدگی و فعالیت‌های معدنی است. در سنگ‌های دگرگونی نیز غلظت‌های کادمیم به‌طور کلی منعکس‌کننده ترکیب پروتولیت آن‌هاست، اما فرآیندهایی مانند دگرسانی هیدروترمالی ممکن است منجر به غنی‌شدگی موضعی غلظت کادمیم شود (۴). جدول ۲ محتوای کادمیم در انواع مختلف سنگ‌ها را نشان می‌دهد.

در سنگ‌های آذرین، میزان کادمیم به‌ندرت از $1 \mu\text{g/g}$ فراتر می‌رود و عمدتاً در کانی‌هایی نظیر بیوتیت و آپاتیت متمرکز است. این عنصر در نهشته‌های سولفیدی هیدروترمالی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای غنی‌شدگی نشان داده و اغلب با ذخایر سرب و روی همراه است. مهم‌ترین کانی حاوی کادمیم، اسفالریت (Zn,Cd)S است که می‌تواند تا ۲٪ کادمیم را در ساختار خود جای دهد و به‌عنوان منبع اصلی صنعتی این فلز محسوب شود (۱). علاوه بر اسفالریت، کادمیم در کانی‌هایی نظیر مارکازیت (FeS₂)، کالکوپیریت (CuFeS₂)، گالن (PbS) و پیریت (FeS₂) نیز در مقادیر کم‌تر یافت می‌شود. این عنصر تحت شرایط خاص، کانی‌های مستقل نیز تشکیل می‌دهد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها گرینوکیست (CdS)، هاولیت (CdS)، اتاویت (CdCO₃) و اکسید کادمیم (CdO) می‌باشد. هوازدگی و اکسیداسیون اسفالریت و سایر کانی‌های غنی از کادمیم منجر به آزاد شدن این عنصر در محیط‌زیست می‌شود که می‌تواند به‌صورت محلول در آب حمل شده، بر روی سطح کانی‌ها جذب گردد یا در کانی‌های ثانویه مانند هیدروکسیدهای منگنز و آهن رسوب کند (۱). این فرآیندها نقش مهمی در

جدول (۲): محتوای کادمیم در انواع مختلف سنگ‌ها (۱)

نوع سنگ	مقدار کادمیم ($\mu\text{g/g}$)	نوع سنگ	مقدار کادمیم ($\mu\text{g/g}$)
سنگ‌های آذرین		سنگ‌های رسوبی	
گرانیت	0.001 – 0.60	شیل بیتومینه	< 0.3 – 11.0
گرانودیوریت	0.016 – 0.10	مارن	0.4 – 10.0
کوارتز مونزونیت	1.4 – 1.8	شیل	< 0.3 – 8.4
ریولیت	0.05 – 0.48	سنگ آهک	0.035
بازالت	0.006 – 0.60		
گابرو	0.08 – 0.20		
سنگ‌های دگرگونی			
اکلوژیت	0.04 – 0.26		
شیست گارنت‌دار	1.0		
گنیس خاکستری	0.12 – 0.16		

باتوجه به جدول فوق غلظت کادمیم در گروه سنگ‌های آذرین کم و معمولاً کمتر از $0.6 \mu\text{g/g}$ است. در کوارتز مونزونیت ($1.4 - 1.8 \mu\text{g/g}$) و برخی از گرانیت‌ها، مقادیر بالاتر ممکن است ناشی از جانشینی جزئی کادمیم در کانی‌های فلدسپات و میکا باشد (۲). همچنین، داده‌های مربوط به بازالت و گابرو نشان می‌دهد که تفکیک ماگمایی تأثیر چندانی بر غلظت کادمیم ندارد (۱). سنگ‌های رسوبی دارای مقادیر بالاتری از کادمیم هستند، به‌ویژه شیل‌های بیتومینه (تا $11 \mu\text{g/g}$ و مارن‌ها (تا $10 \mu\text{g/g}$). کادمیم در این سنگ‌ها با مواد آلی و کانی‌های رسی ترکیب شده و بر روی اکسیدهای آهن و ترکیبات آلی جذب می‌شود (۴). در مقابل، سنگ آهک دارای کم‌ترین مقدار کادمیم است که احتمالاً به ظرفیت پایین این سنگ در جذب و نگهداشت فلزات سنگین مربوط می‌شود (۲). در مورد سنگ‌های دگرگونی می‌توان گفت که غلظت کادمیم در این گروه منعکس‌کننده ترکیب پروتولیت آن‌هاست. شیسست گارنت‌دار دارای بیش‌ترین میزان کادمیم ($\sim 1.0 \mu\text{g/g}$) است که

احتمالاً از شیل‌های سیاه غنی از کادمیم به ارث رسیده است (۱). در مقابل، اکلوژیت‌ها و گنیس‌های خاکستری دارای مقادیر کم‌تری از کادمیم هستند که نشان‌دهنده عدم غنی‌شدگی قابل توجه این عنصر طی فرآیندهای دگرگونی است (۴).

به‌طور کلی، غلظت‌های بالای کادمیم در سنگ‌های رسوبی نشان‌دهنده نقش اساسی فرآیندهای رسوبی مانند تجمع مواد آلی و رسوب‌گذاری شیمیایی در غنی‌سازی کادمیم در پوسته زمین است. در مقابل، سنگ‌های آذرین به‌عنوان منابع اولیه کادمیم عمل کرده، در حالی که فرآیندهای رسوبی و دگرگونی در توزیع و تمرکز آن در محیط‌های خاص نقش دارند (۲). همچنین درک توزیع کادمیم در سنگ‌ها و کانی‌ها برای ارزیابی تحرک زیست‌محیطی، دسترس‌پذیری زیستی و مخاطرات بالقوه آن در مناطق معدنی ضروری است. این مطالعه نشان می‌دهد که کادمیم به‌طور طبیعی در سنگ‌های آذرین در مقادیر کم وجود دارد، اما در تشکیلات رسوبی، به‌ویژه شیل‌های غنی از مواد آلی، تجمع بیش‌تری

می‌یابد. این امر ضرورت پایش سطوح کادمیم در حوضه‌های رسوبی و مناطق معدنی را برجسته می‌کند، زیرا آلودگی ناشی از کادمیم می‌تواند خطرات زیست‌محیطی قابل توجهی ایجاد نماید.

درک توزیع کادمیم در سنگ‌ها، خاک‌ها و محیط زیست برای ارزیابی ریسک‌های زیست‌محیطی و تدوین راهکارهای کاهش آلودگی ضروری است. خاک‌ها نقش دوگانه‌ای به‌عنوان منبع ذخیره کادمیم در محیط زیست ایفا می‌کنند و در تحرک و دسترس‌پذیری زیستی این عنصر تأثیر قابل توجهی

دارند. منابع اصلی ورود کادمیم به خاک‌ها شامل هوازدگی طبیعی سنگ‌های حاوی کادمیم (۱)، رسوب‌گذاری ناشی از انتشار صنعتی، فعالیت‌های معدنی و فرآورده‌های ذوب فلزات (۲) و کاربرد کودهای فسفاته که حاوی مقادیر جزئی از کادمیم هستند (۳) می‌باشد. مقدار کادمیم در خاک‌های غیرآلوده معمولاً کم‌تر از $1 \mu\text{g/g}$ است، اما در مناطق صنعتی آلوده ممکن است به 10 تا $100 \mu\text{g/g}$ یا بیش‌تر برسد (۵). جدول ۳ مقدار کادمیم در انواع مختلف خاک‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۳): محتوای کادمیم در انواع مختلف خاک‌ها

عوامل مؤثر بر حفظ کادمیم	محدوده غلظتی ($\mu\text{g/g}$)	کادمیم ($\mu\text{g/g}$)	نوع خاک
هوازدگی سنگ‌ها، سطوح حدزمینه	0.05 – 2.0	0.1 – 1.0	خاک‌های طبیعی (غیرآلوده)
استفاده از کودهای فسفاته، آب آبیاری	0.1 – 10.0	0.2 – 3.5	خاک‌های کشاورزی
آلودگی فلزات سنگین، ذوب فلزات، معدنکاری	10.0 – 500.0	5.0 – 100	خاک‌های صنعتی/معدنی
تحرک بالای کادمیم، افزایش لیچینگ	0.2 – 15.0	0.5 – 5.0	خاک‌های اسیدی ($\text{pH} < 6$)
نگهداشت کادمیم از طریق پیوند با کربنات‌ها	0.05 – 5.0	0.1 – 2.0	خاک‌های کربناته (pH بالا)
جذب سطحی بالا توسط مواد آلی	0.5 – 20.0	1.0 – 10.0	خاک‌های غنی از مواد آلی

جدول ۳ نشان می‌دهد خاک‌های طبیعی دارای مقادیر کمی از کادمیم هستند و معمولاً میزان آن کم‌تر از $1 \mu\text{g/g}$ است (۱). خاک‌های کشاورزی مقادیر نسبتاً بالاتری از کادمیم را نشان می‌دهند که علت آن مصرف کودهای فسفاته و آلودگی ناشی از آب آبیاری است (۳). مناطق صنعتی و معدنی دارای تجمع بالای کادمیم هستند که معمولاً به بیش از $100 \mu\text{g/g}$ می‌رسد. این امر خطرات زیست‌محیطی و بهداشتی قابل توجهی ایجاد می‌کند (۲). خاک‌های اسیدی تحرک بالای کادمیم را نشان می‌دهند که خطر آلودگی آب‌های زیرزمینی و جذب کادمیم توسط گیاهان را افزایش می‌دهد (۵). خاک‌های غنی از مواد آلی و آهکی به دلیل ظرفیت بالای جذب سطحی و

تشکیل کمپلکس‌های پایدار، قابلیت تحرک کادمیم و دسترس‌پذیری زیستی آن را کاهش می‌دهند (۱). در حالت کلی میزان قابلیت تحرک کادمیم در خاک‌ها در راستای بررسی شعاع تأثیر آلودگی، تحت تأثیر عوامل زیر قرار دارد:

- pH خاک: کادمیم در شرایط اسیدی ($\text{pH} < 6$) تحرک بیشتری دارد.

- ماده آلی: میزان بالاتر ماده آلی می‌تواند از طریق جذب سطحی، قابلیت نگهداشت کادمیم را افزایش دهد.

- میزان کانیهای رسی: کانی‌های رسی می‌توانند کادمیم را جذب کرده و تحرک آن را کاهش دهند

(۱) و این مسأله از دیدگاه کنترل آلودگی و کاهش اثرات زیست‌محیطی قابل توجه می‌باشد.

بنابراین باتوجه به موارد مطرح شده، خاک‌های اسیدی و صنعتی بیش‌ترین خطرات را از نظر آلودگی کادمیم دارند، در حالی که خاک‌های آهکی و غنی از مواد آلی به دلیل ظرفیت بالای نگهداشت آن، تأثیر قابل توجهی در کاهش دسترس‌پذیری زیستی آن دارند.

کادمیم در فعالیت‌های معدنی و اثرات زیست‌محیطی

فعالیت‌های معدنی و صنایع مرتبط با استخراج و فرآوری فلزات سنگین، یکی از مهم‌ترین منابع انتشار آلاینده‌های فلزی در محیط‌زیست محسوب می‌شوند. کادمیم به عنوان یک محصول جانبی استخراج روی، سرب و مس شناخته شده و در محیط‌زیست پراکنده می‌شود. این فلز از طریق فرایندهای صنعتی نظیر ذوب و پالایش فلزات، پسماندهای معدنی و گازهای خروجی صنایع به خاک، آب و هوا منتقل شده و منجر به پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای می‌شود. هدف این مطالعه ارائه یک تحلیل جامع از پیامدهای انتشار کادمیم، تأثیرات آن بر اکوسیستم‌ها و بررسی روش‌های اصلاحی است.

آلودگی کادمیم (Cd) به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و بهداشتی در مقیاس جهانی مطرح شده است و در مناطق دارای فعالیت‌های معدنی، شدت این چالش به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. کادمیم (Cd) از طریق فرایندهای مختلف مرتبط با عملیات معدنی وارد محیط زیست می‌شود (۶ و ۷). منابع و مسیرهای اصلی انتشار کادمیم شامل فرآوری کانسنگ و پسماندهای معدنی است که طی

استخراج و فرآوری فلزات غیرآهنی، مقادیر قابل توجهی از این عنصر آزاد می‌شود. علاوه بر این، پساب‌های صنعتی و زهاب اسیدی معادن، سهم بسزایی در آلودگی منابع آبی با کادمیم دارند. پراکندگی کادمیم در جو نیز از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی و فرایندهای صنعتی صورت می‌گیرد و با ته‌نشست این ذرات بر سطح خاک، آلودگی خاک و انتقال آن به زنجیره غذایی رخ می‌دهد. شناسایی این مسیرهای انتشار، نقشی کلیدی در ارزیابی اثرات زیست‌محیطی کادمیم در مناطق معدنی دارد.

آلودگی ناشی از کادمیم (Cd) در فعالیت‌های معدنی، پیامدهای زیست‌محیطی و بهداشتی گسترده‌ای را به دنبال دارد و به‌عنوان یکی از عناصر سنگین سمی، تأثیرات مخربی بر کیفیت منابع طبیعی و سلامت موجودات زنده اعمال می‌کند. رسوب کادمیم در خاک منجر به کاهش حاصلخیزی و افت کیفیت خاک می‌شود و همچنین با نفوذ به آب‌های زیرزمینی، این منابع حیاتی را آلوده ساخته و کارایی آن‌ها را به‌عنوان منابع تأمین آب آشامیدنی و کشاورزی به چالش می‌کشد (۸ و ۹). از منظر اکولوژیکی، تجمع زیستی کادمیم در ارگانیسم‌های دریایی و خشکی‌زی موجب برهم خوردن توازن اکوسیستم‌ها و کاهش تنوع زیستی می‌گردد، که این امر به‌ویژه در اکوسیستم‌های حساس، اثرات جبران‌ناپذیری به دنبال دارد (۱۰). از بُعد سلامت، مواجهه طولانی‌مدت انسان با این عنصر سمی با بروز آسیب‌های کلیوی، اختلال در متابولیسم کلسیم و در نتیجه کاهش تراکم استخوان، و همچنین افزایش خطر ابتلا به انواع بیماری‌های بدخیم از جمله

سرطان‌های دستگاه تنفسی و ادراری همراه است (۱۲ و ۱۱). بنابراین، بررسی دقیق چرخه زیستی و رفتار ژئوشیمیایی کادمیم در محیط‌های معدنی، نقش کلیدی در تدوین راهبردهای مدیریتی و کاهش پیامدهای منفی آن ایفا می‌کند.

مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر به‌عنوان یک مرور سیستماتیک، با هدف تحلیل رفتار ژئوشیمیایی کادمیم (Cd) و بررسی پیامدهای زیست‌محیطی آن در فعالیتهای معدنکاری طراحی شده است. رویکرد پژوهش بر مبنای دستورالعمل‌های معتبر مرور سیستماتیک تدوین گردیده تا انسجام، شفافیت و قابلیت بازتولید علمی آن تضمین شود. جستجوی مؤثر منابع علمی در پایگاه‌های بین‌المللی معتبر انجام شد. دامنه زمانی جستجو بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ تعیین شد تا مطالعات به‌روز و معتبر پوشش داده شود. در مرحله اول، ۱۴۲ مقاله شناسایی شد. پس از حذف موارد تکراری، ارزیابی عنوان، چکیده و متن کامل، حدود ۳۰ مقاله واجد شرایط نهایی برای تحلیل انتخاب گردید. معیار ورود شامل مطالعاتی بود که به بررسی منابع، رفتار ژئوشیمیایی، توزیع محیطی و اثرات زیست‌محیطی کادمیم در ارتباط با فعالیتهای معدنکاری پرداخته بودند. در مقابل، مقالات فاقد اعتبار علمی یا دارای تمرکز بر کاربردهای غیرمعدنی کادمیم حذف شدند. داده‌های استخراج‌شده از مقالات منتخب با استفاده از روش تحلیل کیفی محتوا مورد بررسی قرار گرفت و اطلاعات در قالب مضامینی چون منشأ آلودگی، غلظت‌های گزارش‌شده در خاک، رسوبات و آب، مسیرهای انتقال، اثرات بهداشتی، استانداردهای زیست‌محیطی و فناوری‌های

پالایش طبقه‌بندی گردید. داده‌های کمی به‌صورت جداول و نمودار و یافته‌های کیفی در قالب تحلیل تفسیری ارائه شده‌اند. همچنین در راستای هدف راهبردی این مقاله، یک چارچوب مفهومی پیشنهادی برای طراحی مطالعات آینده در حوزه پایش و ارزیابی آلودگی کادمیم ارائه شده است. این چارچوب شامل مراحل نمونه‌برداری از خاک، رسوبات و منابع آبی، استفاده از روش آنالیز مناسب برای سنجش غلظت عناصر، تحلیل مکانی با GIS، و نیز ارزیابی ریسک بهداشتی بر پایه داده‌های اپیدمیولوژیک محلی می‌باشد. در این راستا، ارائه یک چارچوب پیشنهادی جامع برای ارزیابی و پایش آلودگی کادمیم (Cd) در عملیات معدنی و ارزیابی خطرات بهداشتی ناشی از آن، بر اساس جمع‌بندی و مرور گسترده مطالعات قبلی است. این چارچوب شامل تحلیل‌های کمی و کیفی بوده و سه گام اصلی شامل نمونه‌برداری میدانی، آنالیز آزمایشگاهی و تحلیل داده‌ها را شامل می‌شود.

انتخاب مناطق پیشنهادی برای مطالعات بر اساس سوابق عملیات معدنی، مستندات تولید کادمیم به‌عنوان محصول جانبی و شواهد زمین‌شناسی صورت می‌گیرد. برای نمونه‌برداری جامع و دقیق، استفاده از شبکه نمونه‌برداری سیستماتیک توصیه می‌شود. تعداد مجاز نمونه‌ها برای حصول دقت آماری، حداقل ۳۰ تا ۵۰ نمونه مرکب از خاک و رسوبات، و حداقل ۱۵ تا ۲۰ نمونه از منابع آبی (سطحی و زیرزمینی) تعیین می‌گردد.

نمونه‌های جمع‌آوری‌شده به روش ICP-MS (طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی) آنالیز می‌شوند که روشی دقیق و استاندارد برای تعیین

کادمیم و سرب شناخته شده است (۸). نتایج مطالعات انجام شده در این منطقه نشان‌دهنده سطوح بالای کادمیم در خاک و منابع آب بوده که این شرایط منجر به افزایش شیوع بیماری‌های کلیوی و بروز مشکلات رشد در کودکان شده است.

جدول (۴): مشخصات آلودگی معدن کابوه (۸)

پارامتر	مقدار
سطوح کادمیم در خاک	۶۰۰-۲۰۰ mg/kg
سطوح کادمیم در آب	۵۰-۵ µg/L
جمعیت آسیب‌دیده	بالای نفر ۳۰۰,۰۰۰

مجتمع ذوب لا اورویا (La Oroya Smelter) در کشور Peru یکی از آلوده‌ترین مناطق معدنی جهان از نظر انتشار کادمیم محسوب می‌شود (۱۱). فعالیت‌های صنعتی این مجتمع و انتشار ذرات فلزی به اتمسفر، منجر به بروز مشکلات جدی در سلامت عمومی، از جمله اختلالات تنفسی و نوروتوکسیسیته در میان ساکنان محلی شده است.

جدول (۵): مشخصات آلودگی معدن مجتمع ذوب لا اورویا (۱)

پارامتر	مقدار
سطوح کادمیم در خاک	۵۰۰-۱۵۰ mg/kg
غلظت کادمیم در هوا	۵-۱ µg/m³
جمعیت آسیب‌دیده	بالای نفر ۳۵/۰۰۰

همچنین مطالعات ذیل بر پیامدهای زیست‌محیطی آلودگی کادمیم ناشی از فعالیت‌های مختلف معدنی تأکید دارند که منجر به آلودگی خاک، آب و زیست‌بوم در مناطق تحت تأثیر شده است (جدول ۶).

غلظت عناصر کمیاب از جمله کادمیم است. استفاده از نمونه‌های کنترل (Blank) و نمونه‌های تکراری برای اطمینان از صحت آنالیز ضروری است.

همچنین برای ارزیابی اثرات بهداشتی و پزشکی ناشی از مواجهه با کادمیم، پیشنهاد می‌شود داده‌های اپیدمیولوژیکی و پزشکی، شامل سوابق مواجهه شغلی، بررسی اثرات طولانی‌مدت کادمیم بر سلامت انسان (مانند آسیب کلیوی، اثرات ریوی و خطر ابتلا به بیماری‌های مزمن) در مناطق مطالعاتی گردآوری و مورد تحلیل قرار گیرد.

جهت تحلیل داده‌ها و رسم نقشه‌های توزیع کادمیم و شناسایی زون‌های آلودگی، از تحلیل‌های فضایی و روش‌های زمین‌آماري استفاده می‌شود. چارچوب پیشنهادی حاضر، مبنایی برای انجام مطالعات جامع‌تر و پایش مستمر آلودگی و تأثیرات مرتبط با کادمیم در عملیات معدنی است.

نتایج و بحث

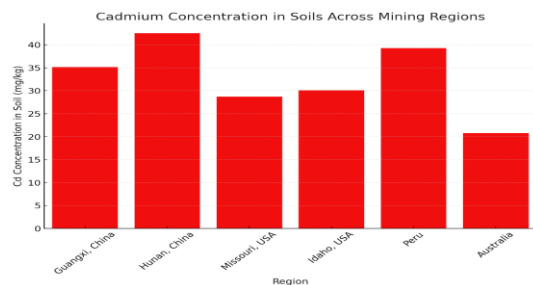
در این پژوهش، به‌منظور بررسی سیستماتیک تأثیرات زیست‌محیطی و بهداشتی کادمیم (Cd) در محیط‌های معدنی، از یک رویکرد ساختاریافته در مطالعات موردی استفاده شده است. انتخاب سایت‌های مطالعه بر اساس شناسایی مناطق آلوده به کادمیم با استفاده از داده‌های زیست‌محیطی، سوابق صنعتی و نتایج تحقیقات پیشین، داده‌های پزشکی، سوابق بیمارستانی و نتایج مطالعات اپیدمیولوژیکی در مناطق انجام شده است. نمونه‌ای از مطالعات انجام شده در ادامه ارائه شده است.

منطقه معدنی کابوه (Kabwe) زامبیا به‌عنوان یکی از آلوده‌ترین مناطق معدنی جهان از نظر آلودگی به

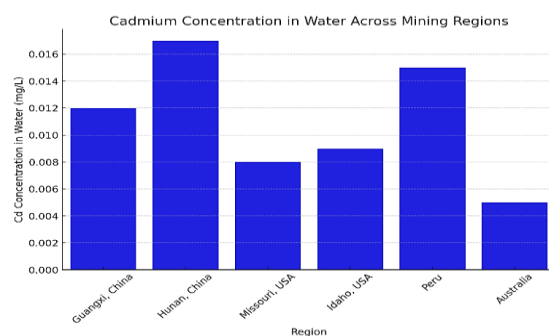
جدول ۶: خلاصه‌ای از آلودگی کادمیم (Cd) ناشی از فعالیت‌های معدنی

منطقه	فعالیت معدنی	تأثیرات زیست‌محیطی	رفرنس
چین	جینگدینگ، چین	آلودگی خاک با غلظت کادمیم تا 531 mg/kg به دلیل رسوب‌گذاری جوی و تخلیه فاضلاب.	(۱۳)
آمریکا	استخراج و تصفیه سرب-روی	آلودگی آب‌های زیرزمینی با غلظت کادمیم تا $77 \mu\text{g/L}$ به دلیل تخلیه فاضلاب.	(۱۳)
پرو	استخراج مس	آلودگی خاک با غلظت کادمیم تا 499 mg/kg ناشی از تخلیه فاضلاب.	(۱۳)
بولنیسی، گرجستان	استخراج طلا-مس	آلودگی خاک با غلظت کادمیم تا $121/5 \text{ mg/kg}$ ناشی از تخلیه فاضلاب.	(۱۳)
آریزونا، آمریکا	استخراج طلا-نقره-سرب-روی	آلودگی آب‌های زیرزمینی با غلظت کادمیم تا $19 \mu\text{g/L}$ به دلیل تخلیه فاضلاب.	(۱۳)
کوپگامه، هاوئی، توگو	استخراج فسفریت	آلودگی خاک با غلظت کادمیم تا 43 mg/kg به دلیل مواد باطله معدنی و فعالیت‌های حمل و نقل.	(۱۳)
پریرام، جمهوری چک	استخراج و تصفیه سرب	آلودگی خاک با غلظت کادمیم تا 48 mg/kg ناشی از رسوب‌گذاری جوی.	(۱۳)
رپل، بلژیک	تصفیه آرسنیک	آلودگی خاک با غلظت کادمیم تا 79 mg/kg ناشی از دفع مواد زائد.	(۱۳)
حوضه آمازون، آمریکای جنوبی	فعالیت‌های معدنی متنوع	غنی‌شدگی قابل توجه کادمیم در آب و رسوبات با غلظت‌هایی ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بیش‌تر از سطوح حد زمینه.	(۱۴)
ناحیه معدنی سه ایالت، آمریکا	استخراج سرب و روی	آلودگی زیست‌محیطی ناشی از کادمیم که حیات آبریان را تحت تأثیر قرار داده و سلامت ساکنان منطقه را تهدید می‌کند.	(۱)

برای موجودات زنده ایجاد کند و نیازمند اقدامات کنترلی و استراتژی‌های پایش بلندمدت است.



شکل (۱): تغییرات غلظت کادمیم در خاک را در مناطق مختلف معدنی

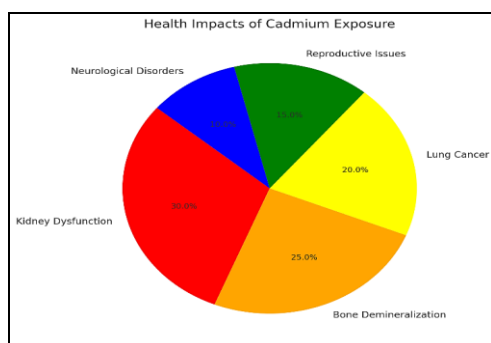


شکل (۲): میزان آلودگی کادمیم در منابع آبی نزدیک به سایت‌های مختلف معدنی

مطالعات موردی از کشورهای مختلف نشان‌دهنده گستردگی و شدت آلودگی کادمیم در مناطق معدنی است. به‌عنوان نمونه، فعالیت‌های استخراج و فرآوری Zn در منطقه گوانگشی چین (۲)، منجر به افزایش قابل‌توجه غلظت Cd در خاک شده است (شکل ۱ و جدول ۷). مطالعات مشابه در مناطق استخراج Pb-Zn در ایالت‌های میسوری و آیداهو ایالات متحده، نیز روندهای مشابهی را گزارش کرده‌اند (۱۵). آلودگی کادمیم در این مناطق نه‌تنها سبب تخریب کیفیت خاک شده، بلکه منجر به انتقال این فلز سنگین به منابع آبی مجاور شده است. شکل ۲ میزان آلودگی کادمیم در منابع آبی نزدیک به سایت‌های معدنی را نشان می‌دهد که می‌تواند پیامدهای جدی برای اکوسیستم‌های آبی و سلامت عمومی داشته باشد. انتقال کادمیم از طریق آب‌های سطحی و زیرزمینی به زنجیره غذایی می‌تواند خطرات مزمنی

جدول (۷): غلظت کادمیم در مناطق معدنی مختلف

غلظت کادمیم در آب (mg/L)	غلظت کادمیم در خاک (mg/kg)	نوع فعالیت معدنی	مورد مطالعه
0.012	35.2	استخراج روی	گوانگشی، چین
0.017	42.5	استخراج سرب-روی	هونان، چین
0.008	28.7	استخراج سرب-روی	میسوری، آمریکا
0.009	30.1	استخراج سرب-روی	آیداهو، آمریکا
0.015	39.3	استخراج مس-روی	پرو
0.005	20.8	استخراج نیکل	استرالیا



شکل (۳): میزان توزیع اثرات سلامت مرتبط با مواجهه با کادمیم

از دیگر اثرات زیست محیطی انتشار کادمیم، اشاره به مخاطرات سلامت انسانی ناشی از مواجهه با کادمیم در فعالیت های معدنی می باشد. کارگران معادن و صنایع ذوب فلزات از جمله گروه‌های در معرض خطر بالا برای مواجهه با کادمیم هستند. مسیرهای اصلی مواجهه شامل استنشاق ذرات معلق کادمیم و تماس پوستی با مواد آلوده است. مواجهه مزمن با کادمیم می‌تواند منجر به آسیب کلیوی برگشت‌ناپذیر، کاهش تراکم استخوان (استئوپنی و استئوپوروز) و افزایش خطر سرطان ریه شود. مطالعات اپیدمیولوژیک ارتباط مستقیمی بین مواجهه شغلی با کادمیم و افزایش شیوع بیماری‌های تنفسی، ناهنجاری‌های استخوانی و سمیت کلیوی گزارش کرده‌اند (۱۶). بنابراین، اعمال استانداردهای ایمنی شغلی، پایش مستمر میزان مواجهه و اجرای استراتژی‌های کنترلی مانند استفاده از تجهیزات حفاظت فردی و بهبود سیستم‌های تهویه، برای کاهش اثرات زیانبار کادمیم در محیط‌های صنعتی ضروری است. شکل ۳ توزیع اثرات سلامت ناشی از مواجهه با کادمیم را نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل، بیش‌ترین عارضه ناشی از قرارگیری در معرض این فلز سنگین، اختلالات کلیوی (۳۰٪) است که ناشی از تجمع کادمیم در کلیه‌ها و تأثیر آن بر عملکرد گلومرولی و توبولی است. کاهش تراکم استخوان (۲۵٪) یکی دیگر از اثرات عمده بوده که به دلیل دخالت کادمیم در متابولیسم کلسیم و ایجاد پوکی استخوان رخ می‌دهد. سرطان ریه (۲۰٪) یکی دیگر از پیامدهای مهم مواجهه طولانی‌مدت با کادمیم است که به‌ویژه در محیط‌های صنعتی و معدنی مشاهده می‌شود. مشکلات تولیدمثل (۱۵٪) نیز به دلیل تأثیرات منفی کادمیم بر عملکرد غدد درون‌ریز و سیستم هورمونی گزارش شده است. در نهایت، اختلالات عصبی (۱۰٪) نیز به‌عنوان یک اثر بالقوه شناخته شده که می‌تواند ناشی از استرس اکسیداتیو و سمیت عصبی

ناشی از تجمع کادمیم در سیستم عصبی مرکزی باشد. این یافته‌ها نشان می‌دهند که مواجهه با کادمیم، چه از طریق استنشاق، بلع یا تماس پوستی، می‌تواند منجر به طیف گسترده‌ای از بیماری‌های مزمن شود که نیازمند اقدامات پیشگیرانه از جمله پایش زیست‌محیطی، محدودیت مواجهه شغلی و بهبود راهکارهای درمانی برای کاهش اثرات این فلز سمی است.

همچنین جوامعی که در نزدیکی مناطق معدنی زندگی می‌کنند، از طریق آب، خاک و مواد غذایی آلوده در معرض مواجهه با کادمیم قرار دارند. این تماس مداوم می‌تواند منجر به مسمومیت‌های تکاملی و تولیدمثلی، اختلالات قلبی-عروقی و ناهنجاری‌های عصبی شود (۱۷). تأثیرات درازمدت مواجهه مزمن با کادمیم در این مناطق نیازمند برنامه‌های پایش زیست‌محیطی، مداخلات بهداشتی و اجرای سیاست‌های کنترلی برای کاهش خطرات مرتبط با این فلز سنگین است.

در ارتباط با چارچوب‌های قانونی و مقررات جهانی و ملی کادمیم می‌توان گفت که آلودگی کادمیم تحت نظارت سیاست‌های مختلف بین‌المللی و ملی قرار دارد. در ایالات متحده، آژانس حفاظت محیط‌زیست (EPA) حداکثر میزان مجاز کادمیم در آب آشامیدنی را 0.05 mg/L تعیین کرده است. همچنین، اداره ایمنی و بهداشت شغلی (OSHA) حد مجاز مواجهه شغلی با کادمیم در هوای محیط‌های کاری را $5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ در یک بازه زمانی ۸ ساعته تعیین کرده است. علاوه بر این، ترکیبات کادمیم به عنوان آلاینده‌های خطرناک هوا تحت قانون هوای پاک دسته‌بندی شده‌اند.

در سطح بین‌المللی، سازمان بهداشت جهانی (WHO) میزان دریافت ماهانه قابل تحمل کادمیم را 25 mg/kg وزن بدن پیشنهاد کرده و بر لزوم اعمال اقدامات کنترلی جدی برای محدودسازی مواجهه تأکید دارد. اتحادیه اروپا نیز استانداردهایی را برای کاهش سطح کادمیم در محصولات مختلف، از جمله کودهای شیمیایی و تجهیزات الکترونیکی، به‌منظور کاهش آلودگی زیست‌محیطی وضع کرده است (جدول ۸).

جدول (۸): استانداردهای قانونی مربوط به کادمیم	
مقررات	حد مجاز کادمیم
حد مجاز کادمیم در آب آشامیدنی WHO	0.003 mg/L
حد مجاز کادمیم در آب آشامیدنی EPA آمریکا	0.005 mg/L
حد مجاز مواجهه شغلی (OSHA)	$5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$

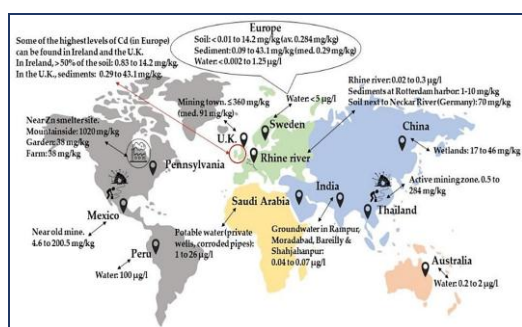
نتایج این مطالعات، نقش حیاتی کنترل آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های معدنی و لزوم اتخاذ راهبردهای مدیریت محیط‌زیستی مؤثر برای کاهش آثار منفی کادمیم را آشکار می‌سازد.

توزیع جهانی منابع کادمیم و نقش کشورهای تولیدکننده اصلی

نقشه ارائه‌شده توزیع جهانی منابع و تولید کادمیم (شکل ۴) را نشان می‌دهد و به‌طور خاص، پنج کشور برتر تولیدکننده این فلز را برجسته می‌کند. مطابق با این داده‌ها، چین با سهم $30/43\%$ از تولید جهانی، بزرگ‌ترین تولیدکننده کادمیم در جهان محسوب می‌شود. همچنین، این کشور $18/40\%$ از ذخایر جهانی این فلز را در اختیار دارد که نشان‌دهنده نقش کلیدی آن در تأمین این عنصر است. پس از چین، کره جنوبی ($17/83\%$)، ژاپن ($9/26\%$)، قزاقستان



شکل (۴): توزیع جهانی منابع و تولید کادمیم (۱۷)



شکل (۵): توزیع جهانی آلودگی کادمیم حاصل از معدن‌کاری و اثرات بالقوه آن بر محیط زیست (۲۵)

نقشه فوق نشان‌دهنده توزیع جهانی آلودگی کادمیم و اثرات بالقوه آن بر محیط زیست و سلامت انسان است. چین، مکزیک و پرو بیش‌ترین میزان آلودگی کادمیم را در خاک و منابع آبی نشان می‌دهند که این امر ناشی از فعالیت‌های معدنی گسترده و تخلیه پساب‌های صنعتی است. ایرلند و بریتانیا در اروپا دارای بالاترین میزان آلودگی خاک و رسوبات هستند، که به فعالیت‌های صنعتی و معدنی قدیمی مرتبط است. رود راین (آلمان و هلند) با غلظت نسبتاً پایین کادمیم در آب، اما آلودگی قابل‌توجه در رسوبات، نشان‌دهنده اثرات درازمدت آلودگی صنعتی در این منطقه است. هند و عربستان سعودی با آلودگی در آب‌های زیرزمینی و لوله‌های انتقال آب مواجه هستند که نشان‌دهنده تأثیر زیرساخت‌های

(۸/۵)، کانادا (۷/۷)، و مکزیک (۷) از دیگر کشورهای مهم تولیدکننده کادمیم به شمار می‌روند. کادمیم به‌عنوان یک فلز همراه در فرآیندهای استخراج روی، سرب و مس، در صنایع باتری‌سازی، آبکاری فلزات، رنگدانه‌ها و نیمه‌رساناها مورد استفاده قرار می‌گیرد. چین، کره جنوبی و ژاپن به‌دلیل فعالیت گسترده در صنایع الکترونیک و تولید باتری‌های نیکل-کادمیم، از جمله کشورهای اصلی در فرآوری و استفاده از این فلز محسوب می‌شوند. بدلیل اینکه کادمیم یکی از فلزات سنگین سمی است که انتشار آن از طریق فعالیت‌های معدنی، صنایع ذوب فلزات و دفع نامناسب پسماندهای صنعتی می‌تواند منجر به آلودگی گسترده خاک، آب و هوا شود. بنابراین کشورهای دارای سطح بالای تولید، به‌ویژه چین و کره جنوبی، با چالش‌های جدی در زمینه مدیریت پسماندهای صنعتی، جلوگیری از انتشار آلاینده‌ها و کنترل اثرات زیست‌محیطی مواجه هستند. مقررات سخت‌گیرانه زیست‌محیطی و توسعه فناوری‌های پایدار برای کنترل و کاهش انتشار کادمیم، به‌ویژه در کشورهای دارای تولید بالا، ضروری است. در آینده، بهینه‌سازی فرآیندهای استخراج، استفاده از فناوری‌های تصفیه، و توسعه جایگزین‌های زیست‌بوم، می‌تواند راهکار مؤثری برای کاهش تأثیرات منفی کادمیم بر محیط زیست و سلامت انسان باشد.

فرسوده و آلودگی صنعتی است. استرالیا و کشورهای اروپایی به دلیل قوانین زیست محیطی سختگیرانه‌تر، غلظت کادمیم کم‌تری را در مقایسه با سایر نقاط جهان نشان می‌دهند. پایش مستمر، مدیریت صحیح پسماندهای صنعتی، اجرای سیاست‌های زیست محیطی سخت‌گیرانه و توسعه فناوری‌های تصفیه آب و خاک برای کاهش انتشار کادمیم، از اقدامات کلیدی برای کنترل این آلاینده خطرناک محسوب می‌شوند.

استراتژی‌های کاهش و اصلاح آلودگی کادمیم

استراتژی‌های کاهش و اصلاح آلودگی کادمیم در محیط‌های معدنی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و به منظور کنترل و کاهش تأثیرات نامطلوب این عنصر سمی، رویکردهای گوناگونی پیشنهاد شده است. یکی از روش‌های کارآمد در این زمینه، فناوری‌های پالایش و کاهش آلودگی کادمیم در محیط‌زیست می‌باشد. در این راستا، اصلاح خاک از طریق استفاده از جاذب‌هایی همچون بیوجار، آهک و زئولیت‌ها است که با تثبیت کادمیم در ساختار خاک، قابلیت دسترسی آن برای موجودات زنده را کاهش می‌دهند (۱۹ و ۱۸). در حوزه تصفیه آب، به کارگیری سیستم‌های فیلتراسیون پیشرفته، تالاب‌های مصنوعی و فناوری‌های نانو، از جمله نانوذرات اکسید آهن و کربن فعال، نقش مؤثری در حذف کادمیم از منابع آبی و ارتقاء کیفیت آن‌ها ایفا می‌کند (۲۱ و ۲۰). این روش‌ها با تمرکز بر مکانیزم‌های تبادل یونی، جذب سطحی و انعقاد شیمیایی، سبب کاهش بار فلزات سنگین در محیط‌های آبی می‌شوند. همچنین، فناوری گیاه‌پالایی (Phytoremediation) به عنوان یک روش

زیستی پایدار، از گیاهان بیش انباشگر مانند *Thlaspi caerulescens* بهره می‌برد که قادرند کادمیم موجود در خاک را از طریق فرآیندهای جذب و تجمع در بافت‌های خود استخراج کنند (۲۳ و ۲۲). این فناوری مبتنی بر توانایی طبیعی گیاهان در جذب، انتقال و انباشت عناصر سنگین از خاک و رسوبات است و در دهه‌های اخیر به عنوان یک راهکار اقتصادی و زیست محیطی در مناطق آلوده مورد توجه قرار گرفته است. این فناوری‌ها با تکیه بر اصول ژئوشیمی و زیست فناوری، زمینه‌ساز کاهش آلودگی و بهبود کیفیت محیط‌زیست در مناطق معدنی آلوده به کادمیم هستند. از سوی دیگر، اجرای مقررات و استانداردهای زیست محیطی جدی از طریق نظارت بر فعالیت‌های معدنی و تعیین حدود مجاز انتشار کادمیم، نقش مؤثری در پیشگیری از آلودگی‌های جدید و کنترل منابع موجود ایفا می‌کند (۹). علاوه بر این، توسعه و به کارگیری فناوری‌های صنعتی پایدار، به ویژه فرآیندهایی که انتشار کادمیم را به حداقل می‌رسانند، به عنوان یک راهبرد پیشگیرانه و مؤثر در کاهش بار آلودگی زیست محیطی ناشی از فعالیت‌های معدنی مورد تأکید قرار گرفته است [۸]. تلفیق این رویکردها، همراه با پایش مستمر و ارزیابی‌های ژئوشیمیایی و اجرای چارچوب‌های قانونی و راهبردهای کاهش آلودگی کادمیم در فعالیت‌های معدنی، می‌تواند به کاهش تأثیرات مخرب کادمیم بر محیط‌زیست و سلامت جوامع محلی کمک شایانی نماید.

نتیجه‌گیری

کادمیم (Cd) به عنوان یک فلز سنگین سمی، به دلیل تحرک بالا، پایداری طولانی مدت در

محیط‌زیست و خاصیت زیست‌انباشتگی، از جمله آلاینده‌های مهم در محیط‌های معدنی محسوب می‌شود. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که فعالیت‌های معدنی و فراآوری فلزات پایه، به‌ویژه در معادن سرب، روی و مس، از اصلی‌ترین منابع انتشار کادمیم در محیط‌زیست هستند. این عنصر از طریق مکانیزم‌هایی مانند انتشار جوی، تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و دفع پسماندهای معدنی، به خاک، آب‌های سطحی و زیرزمینی راه یافته و از این طریق وارد زنجیره‌های غذایی می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده حاکی از آن است که آلودگی کادمیم، علاوه بر تهدید اکوسیستم‌های طبیعی، پیامدهای جدی بر سلامت انسان دارد. از مهم‌ترین اثرات سلامت این آلاینده می‌توان به آسیب کلیوی، اختلالات تنفسی، بیماری‌های قلبی-عروقی و افزایش ریسک سرطان اشاره کرد.

تحلیل پراکندگی و توزیع آلودگی کادمیم در مقیاس جهانی نیز نشان می‌دهد که مناطق نزدیک به معادن فعال، مناطق متروکه و مناطقی که مدیریت نامناسب پسماندهای معدنی در آن‌ها اعمال شده است، بیشترین میزان آلودگی و آسیب‌پذیری را تجربه می‌کنند. اگرچه در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل‌توجهی در توسعه فناوری‌های پالایش و کاهش آلاینده‌های فلزی صورت گرفته است، اما همچنان چالش‌های متعددی در مدیریت آلودگی کادمیم در محیط‌های معدنی وجود دارد. در این راستا، مطالعه حاضر بر ضرورت تدوین و اجرای مقررات زیست‌محیطی جدی، توسعه فناوری‌های نوین پالایش از جمله جذب زیستی، رسوب‌دهی شیمیایی، تثبیت خاک و استفاده از نانوذرات، و همچنین

افزایش آگاهی عمومی و آموزش بهره‌برداران معدنی تأکید دارد. نتایج این پژوهش همچنین بر اهمیت پایش مستمر و استفاده از ابزارهای نوین سنجش از دور و مدل‌سازی‌های پیشرفته برای ردیابی، پیش‌بینی و مدیریت آلودگی کادمیم تأکید دارد. دستیابی به توسعه پایدار در بخش معدن مستلزم اتخاذ رویکردهای یکپارچه و میان‌رشته‌ای، همکاری مؤثر میان نهادهای دولتی، مراکز دانشگاهی و بخش خصوصی، و بهره‌گیری از نتایج پژوهش‌های علمی به‌روز است. بدین ترتیب، می‌توان ضمن حفظ و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی، از پیامدهای نامطلوب کادمیم بر سلامت جامعه و محیط‌زیست کاست و زمینه‌ساز بهره‌برداری مسئولانه و پایدار از منابع معدنی شد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسنده مقاله تشکر و قدردانی خود را از هیأت تحریریه محترم مجله و داوران ارجمند اعلام می‌دارد.

منابع

- [1] Thornton, I., 1986, Geochemistry of cadmium, in Cadmium in the environment., Springer. p. 7-12.
- [2] Alloway, B.J., 2012, Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Vol. 22 : Springer Science & Business Media.
- [3] Kabata-Pendias, A., Mukherjee, A.B., 2007, Humans: Springer.
- [4] Kabata-Pendias, A., 2000. Trace elements in soils and plants 2001, : CRC press.
- [5] Adriano, D.C., Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals. Vol. 860: Springer.
- [6] Chanchaeva, E.A., et al., 2023, Cadmium concentrations in hair in the population of the subjects of the Russian Federation: a

health. *Journal of occupational medicine and toxicology*. 1: p. 1-6.

[18] Beesley, L., et al., 2014, Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil. *Environmental Pollution*. 186: p. 195-202.

[19] Rushimisha, I.E., et al., 2024, Application of biochar on soil bioelectrochemical remediation: behind roles, progress, and potential. *Critical Reviews in Biotechnology*. 44(1): p. 120-138.

[20] Ali, H., Khan, E., Ilahi, I., 2019, Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of chemistry*. 2019(1): p. 6730305.

[21] Fu, F., Q. Wang., 2011, Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of environmental management*. 92(3): p. 407-418.

[22] Salt, D.E., Smith, R., Raskin, I., 1998, Phytoremediation. *Annual review of plant biology*, 1998. 49(1): p. 643-668.

[23] Tan, H.W., et al., 2023, A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology & Innovation*. 30: p. 103043.

[24] <https://images.mapsofworld.com>

[25] Coakley, S., Cahill, G., Enright, A.-M., O'Rourke, B., and Petti, C., 2019, Cadmium hyperaccumulation and translocation in *Impatiens glandulifera*: from foe to friend? *Sustainability* 11, 5018

systematic review. *Hygiene and Sanitation*. 102(1): p. 40-49.

[7] Estrada, C., et al., 2024, A Systematic Review on Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soils: Identifying Hyperaccumulator Plants, Assessing Soil Quality, Analyzing Contamination Sources and Determining Health Risks 1*. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. 9.

[8] Hossain, S., et al., 2019, Review of cadmium pollution in Bangladesh. *Journal of Health and Pollution*. 9(23): p. 190913.

[9] Tavakkoli, L., Khanjani, N., 2016, Environmental and occupational exposure to cadmium in Iran: a systematic review. *Reviews on environmental health*. 31(4): p. 457-463.

[10] Torres, P., et al., 2023, Environmental impact of cadmium in a volcanic archipelago: Research challenges related to a natural pollution source. *Journal of Marine Science and Engineering*. 11(1): p. 100.

[11] Purushottam, B., Reddy, R.A., 2024, Cadmium Toxicity: Sources, Mechanisms and Human Health Implications: A Comprehensive Review. *UTTAR PRADESH JOURNAL OF ZOOLOGY*. 45(15): p. 442-450.

[12] Verougstraete, V., Lison, D., Hotz, P., 2003, Cadmium, lung and prostate cancer: a systematic review of recent epidemiological data. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*. 6(3): p. 227-256.

[13] Kubier, A., Wilkin, R.T., Pichler, T., 2019, Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied geochemistry*. 108: p. 104388.

[14] Moulatlet, G.M., et al., 2023, A systematic review on metal contamination due to mining activities in the Amazon basin and associated environmental hazards. *Chemosphere*. 339: p. 139700.

[15] Liu, L., et al., 2018, Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the total environment*. 633: p. 206-219.

[16] Järup, L., et al., 1998, Health effects of cadmium exposure—a review of the literature and a risk estimate. *Scandinavian journal of work, environment & health*: p. 1-51.

[17] Godt, J., et al., 2006, The toxicity of cadmium and resulting hazards for human