

Total and Extractable Concentrations of some Heavy Metals in Different Land Uses (Case study: Zanjanroud, Mianeh and Tarom)

Alamdari Parisa^{1*}, Afshari Ali², Golchin Ahmad¹, Askari Mohammad Sadegh¹

(Received: December, 2024 Accepted: May, 2025)

Abstract

Heavy metals in soil exhibit distinct characteristics that significantly affect environmental health and safety. This study examined the total concentrations and DTPA-extractable fractions of lead (Pb), zinc (Zn), copper (Cu), and nickel (Ni) across different land uses (agricultural, pasture, rice field, and vineyard), geographical locations (Zanjanrud, Mianeh, and Tarom plains), and soil depths (0-20, 20-40, and 40-60 cm). The highest total and extractable concentrations of Pb, Zn, and Cu were consistently observed in the surface layer (0-20 cm). Nickel distribution showed different patterns, with pastures in Zanjanrud and vineyards in Mianeh had the highest total Ni concentrations at 40-60 cm depth, while Tarom pastures had maximum Ni levels at 20-40 cm. DTPA-extractable Ni concentrations were highest in the surface layer across all regions, particularly in Zanjanrud pastures, Mianeh vineyards, and Tarom pastures. Source analysis revealed that Pb, Zn, and Cu concentrations were predominantly influenced by anthropogenic activities, whereas Ni distribution was mainly controlled by natural factors and parent material composition. These findings highlight the importance of considering both land use practices and natural geochemical processes in soil heavy metal management.

Key words: Profile Changes. Background concentration. Physical and chemical properties of soil. Qezl Ozen River

Alamdari P., Afshari A., Golchin A. and Askari M.S. 2025. Total and extractable concentrations of some heavy metals in different land uses (Case study: Zanjanroud, Mianeh and Tarom). *Applied Soil Research*, 13(3): 94-109.

1-Associated Professor, Professor and Associated Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Iran, respectively

2-PhD Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University, Iran

* Corresponding Author Email: p_alamdari@znu.ac.ir

غلظت‌های کل و قابل عصاره‌گیری برخی فلزات سنگین در کاربری‌های مختلف (مطالعه موردی: زنجان‌رود، میانه و طارم)

پریسا علمداری^{۱*}، علی افشاری^۲، احمد گلچین^۱، محمدصادق عسگری^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۰۵

چکیده

کاربری اراضی تأثیر مهمی در غلظت و توزیع عناصر سنگین در خاک دارد. این مطالعه با هدف تعیین غلظت کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA عناصر سرب، روی، مس و نیکل در کاربری‌های اراضی مختلف (زراعی، مرتع، شالیزار، باغ) و مناطق جغرافیایی منتخب (دشت زنجان‌رود، میانه و طارم) با تأکید بر تغییرات عمقی آنها انجام گرفت. نتایج نشان داد که هر یک از کاربری‌های اراضی تأثیر متفاوتی بر غلظت کل و قابل عصاره‌گیری عناصر دارند. همچنین، میزان غلظت عناصر در مناطق جغرافیایی مختلف متفاوت بود. بالاترین غلظت سرب، روی و مس در تمام کاربری‌ها مربوط به عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری بود که با افزایش عمق از غلظت آن کاسته شد. در حالی که روند تغییرات عمقی نیکل کل متفاوت‌تر از سایر عناصر بود و بالاترین غلظت مربوط به عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متر مشاهده شد. غلظت قابل عصاره‌گیری همه عناصر در عمق اول بیشتر بود و در عمق‌های پایین‌تر از غلظت آنها کاسته شد. با توجه به نتایج حاصل و بررسی منابع مختلف، به نظر می‌رسد منابع ورودی عناصر سرب، روی و مس باهم مشترک بوده و بیشتر متأثر از فعالیت‌های انسانی می‌باشند در حالی که نیکل تحت تأثیر مواد مادری و شرایط طبیعی زمین می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات عمقی، غلظت زمینه، رودخانه قزل‌اوزن، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

علمداری پ.، افشاری ع.، گلچین ا.، عسگری م.ص. ۱۴۰۴. غلظت‌های کل و قابل عصاره‌گیری برخی فلزات سنگین در کاربری‌های مختلف (مطالعه موردی: زنجان‌رود، میانه و طارم). تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۳، شماره ۳. صفحه: ۹۴-۱۰۹.

۱- به ترتیب دانشیار (مکاتبه کننده) و استاد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان
۲- دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان * پست الکترونیک: p_alamdari@znu.ac.ir

مقدمه

درک جامع از آلودگی فلزات سنگین در خاک برای تصمیم‌گیری آگاهانه در مورد روش‌های کاهش آلودگی و کاهش خطرات آنها برای انسان ضروری است (Afra et al., 2023). فلزات سنگین به دلیل خطرات بالقوه برای محیط زیست و سلامت انسان مضر بوده و توجه جامعه جهانی به آن بالا است. ویژگی‌های اصلی این فلزات شامل غیرقابل تجزیه بودن، سمی بودن و قابلیت انباشت زیستی است. وجود مقادیر فلزات سنگین در خاک می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی مانند انتشارات آتشفشانی در جو، انتقال گرد و غبار، هوازگی سنگ‌های مادری غنی از فلز و فوران‌های آتشفشانی باشد. همچنین، فعالیت‌های انسانی نظیر معدن‌کاوی، ذوب مواد شیمیایی حاوی فلزات سنگین، مصرف سوخت‌های فسیلی، آموزش‌های نظامی، تخلیه فاضلاب صنعتی و استفاده و دفع تجهیزات الکترونیکی نیز می‌تواند باعث ورود این فلزات به خاک شوند (Shahbazi et al., 2022). ویژگی‌های خاک در سطح مزرعه و حتی در مقیاس وسیع‌تر و منطقه‌ای، به عوامل ذاتی (خاکساز) و عوامل خارجی (مدیریت خاک، کوددهی و خاکورزی) بستگی دارد و به شدت تحت تأثیر سیستم‌های مدیریتی خاک و کاربری اراضی قرار می‌گیرد (Dehghani et al., 2011). در بسیاری از خاک‌های دنیا برهم‌کنش فلزات به عنوان عامل مهمی برای محدودیت رشد گیاهان شناخته شده است (Reyhanitabar et al., 2017).

رودخانه قزل‌اوزن، با تأثیرات اقتصادی و اجتماعی چشمگیر بر استان‌های مجاور، یکی از حوضه‌های آبریز حیاتی ایران به شمار می‌رود. این حوزه آبخیز، این حوضه آبخیز، به عنوان بخش وسیعی از حوزه اصلی سفیدرود-مرداب-تالش، در زمره هفت حوضه آبریز اصلی کشور قرار دارد که در نهایت به دریای خزر منتهی می‌شود. شهرهای مهمی چون زنجان، میانه، طارم، منجیل، خلخال، هشتروند، ماهنشان، ایجرود، خداآبند، بیجار و دیواندره، از جمله مراکز جمعیتی مهم واقع در این حوضه هستند.

سرچشمه رودخانه قزل‌اوزن، کوه‌های چهل چشمه در کردستان است که ساختار اصلی آن‌ها را سنگ‌های آهکی تشکیل می‌دهند. با این حال، این رودخانه پس از گذر از این منطقه کوهستانی، وارد تپه‌ماهورها و دشت‌هایی می‌شود که حاصل رسوبات پلیو پلیستوسن و کواترنر

جدید هستند. این دشت‌های رسوبی، زمینه‌های مناسبی برای کشاورزی فراهم آورده‌اند. به طور کلی، لیتولوژی حوضه قزل‌اوزن بیشتر شامل مارن‌های ماسه‌ای آهکی و رسوبات ناشی از فعالیت‌های رودخانه‌ای است (Rostamkhani, 2014). حوضه آبریز زنجان‌رود، واقع در شمال غرب کشور، بخش مهمی از حوضه آبریز بزرگ رودخانه قزل‌اوزن و یکی از زیرحوضه‌های هشت‌گانه سفیدرود محسوب می‌شود. دشت زنجان‌رود نیز با مساحتی حدود ۱۶۰۰ کیلومتر مربع، بخش قابل توجهی از کل حوضه آبریز زنجان‌رود را در بر گرفته است.

مطالعات انجام شده در منطقه زنجان‌رود و دشت زنجان نشان می‌دهد که تمرکز فعالیت‌های صنعتی در پایین‌دست دشت و اطراف شهر زنجان، یک تهدید بالقوه برای منابع آبی منطقه محسوب می‌شود. در همین راستا، فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی به عنوان اصلی‌ترین منابع آلودگی رودخانه زنجان‌رود شناخته شده‌اند (Rostamkhani, 2014). دشت زنجان‌رود از رسوبات آبرفتی متعلق به دوره کواترنر تشکیل شده است. این نهشته‌ها که به طور عمده در حوضه فرورفته زنجان و در امتداد کوهپایه‌های شمال شرقی سلطانیه و جنوب غربی طارم تا نزدیکی زنجان‌رود پراکنده‌اند، در مجاورت رودخانه و نواحی اطراف آن، بیشتر از پادگانه‌های جوان آبرفتی با ترکیبی غنی از سیلت، رس و کنگلومرا هستند. این نوع رسوبات، با داشتن نفوذپذیری بالا، نه تنها می‌توانند به عنوان منبع ثانویه آلودگی عمل کنند، بلکه نقش مهمی در انتقال آلاینده‌ها به آب‌های زیرزمینی منطقه ایفا می‌کنند (Shahmoradi, 2024).

این پژوهش، با توجه به اهمیت و وسعت حوزه آبریز رودخانه قزل‌اوزن و وجود جمعیت بهره‌بردار قابل توجه در آن، به منظور بررسی میزان و نحوه توزیع غلظت کل و قابل‌عصاره‌گیری با DTPA و تعیین غلظت زمینه فلزات سنگین روی، مس، سرب و نیکل در این حوزه آبریز انجام شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، سه منطقه جغرافیایی شامل ۱- زنجان‌رود (با وسعت حدود ۷۴/۹ کیلومتر مربع)؛ ۲- منطقه مربوط به محل تلاقی رودخانه‌های استان آذربایجان شرقی (قراقرق، آیدوغموش و شهرچایی) از طریق شهر میانه به رودخانه

قزل‌اوزن (با وسعت حدود ۵۲/۸ کیلومتر مربع) و ۳- منطقه مربوط به شهرستان طارم در استان زنجان (با وسعت حدود ۲۴۲ کیلومتر مربع)، انتخاب شد. در مشاهدات میدانی اقدام به تفکیک کاربری‌های اراضی مختلف گردید و انتخاب این کاربری‌ها بر اساس وسعت آنها و احتمال تأثیرگذاری آنها روی کیفیت آب و رسوب رودخانه انجام شد. در منطقه منتخب زنجان‌رود و میانه سه نوع کاربری اراضی شامل زراعی (گندم دیم و آبی)، باغ درخت (سیب و زردآلود) و مرتع انتخاب شدند. در منطقه میانه، از باغ انگور نیز جداگانه نمونه تهیه شد. ولی، در منطقه منتخب طارم با توجه به تنوع کاربری اراضی، چهار نوع کاربری شامل کاربری صیفی و سبزیجات، باغ زیتون، مرتع و شالیزار جهت نمونه‌برداری انتخاب گردیدند.

در هر کاربری اراضی حداقل تعداد ۲ و حداکثر ۳ خاک‌رخ (پروفیل) حفر و از عمق‌های ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ سانتی‌متری نمونه خاک تهیه شد. در هر کاربری، نمونه‌های برداشت شده از خاک‌رخ‌های مشابه در عمق‌های

نتایج و بحث

تغییرات برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تابعی از عمق در مناطق منتخب

نتایج برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک اندازه‌گیری شده تابعی از عمق در دشت‌های زنجان‌رود، میانه و طارم به ترتیب در جداول ۱، ۲ و ۳ ذکر شده است. با توجه به جدول، بالاترین میزان ماده آلی (OM)، شوری

یکسان با هم مخلوط شده و بعد از به هم‌زدن خاک، یک نمونه مخلوط ۲ کیلوگرمی جهت انجام آزمایش‌های مربوطه برداشت گردید. نمونه‌ها بعد از هوا خشک شدن با هم مخلوط شده و از هر عمق یک نمونه برای تهیه و آنالیزهای آزمایشگاهی انتخاب و به آزمایشگاه انتقال داده شد. در نمونه‌های انتخاب شده غلظت معادل کل فلزات سنگین (Ni, Cu, Zn, Pb) توسط هضم با اسید نیتریک ۵ مولار (Burt, 2004) و برای استخراج فلزات با DTPA از روش لیندزی و نورول استفاده گردید (Lindsay & Norvell, 1978). غلظت فلزات سنگین (Pb, Zn, Cu, Ni) توسط دستگاه جذب اتمی مدل Perkin-Elmer Analyst 200 در عصاره‌های نمونه‌ها تعیین شد. هدایت الکتریکی (EC) و pH در عصاره ۱:۲ آب به خاک در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، درصد رس، سیلت و شن به روش پیپت، مواد آلی (والکی-بلاک)، آهک (تیتراسیون اسید و باز)، ظرفیت تبادل کاتیونی (عصاره‌گیری با استات سدیم ۱ نرمال) در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد (Burt, 2004). (EC) و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) در تمام خاک‌رخ‌ها در عمق سطحی (۰-۲۰ سانتیمتر) مشاهده شد. در مقابل مقدار pH در لایه سطحی کمترین مقدار بوده که با افزایش عمق مقدار آن افزایش می‌یابد. پارامترهای دیگر روند مشخصی نداشته و سیر نزولی و صعودی یکدست نشان ندادند و متغیر هستند.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در خاک‌رخ‌های حفر شده دشت زنجان‌رود

Table 1. Some physical and chemical properties of soil in excavated soil profiles of Zanjanroud plain.

Region	Landuse	Depth	OM	pH	EC	CaCO ₃	CEC	Clay	Silt	Sand
Zanjanroud	Agriculture	0-20	1.12	7.35	0.87	21.35	20.36	21.46	53.36	25.18
		20-40	0.98	7.46	0.86	23.46	19.87	22.36	51.49	26.15
		40-60	0.43	7.58	0.79	24.58	17.49	19.47	49.76	30.77
	Garden	0-20	1.23	7.32	0.85	19.78	21.49	22.48	53.69	23.83
		20-40	0.99	7.49	0.83	21.46	20.58	21.49	50.48	28.03
		40-60	0.44	7.61	0.77	22.89	18.46	19.56	48.28	32.16
	Pasture	0-20	1.10	7.39	0.84	21.74	18.69	21.47	52.81	25.72
		20-40	0.89	7.48	0.79	2.58	17.48	20.49	49.76	29.75
		40-60	0.41	7.69	0.71	23.69	16.69	18.47	46.74	34.79

Silt, Sand, Clay, CaCO₃ and OM (%), CEC (Cmol_c kg soil⁻¹), EC (dS m⁻¹), Depth (cm)

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در خاکرخی‌های حفر شده دشت میانه

Table 2. Some physical and chemical properties of soil in excavated soil profiles of Mianeh plain.

Region	Landuse	Depth	OM	pH	EC	CaCO ₃	CEC	Clay	Silt	Sand
Mianeh	Agriculture	0-20	2.04	7.28	0.62	24.25	26.45	30.49	42.26	27.25
		20-40	1.89	7.49	0.59	27.89	25.49	28.79	44.59	26.62
		40-60	0.98	7.74	0.51	29.89	23.47	4.16	43.47	32.37
	Garden	0-20	2.23	7.21	0.64	22.98	27.84	2.58	42.9	24.73
		20-40	1.14	7.46	0.57	24.76	24.87	29.99	43.39	26.62
		40-60	0.99	7.78	0.49	27.82	20.19	25.47	43.28	31.25
	Grape	0-20	1.98	7.41	0.53	24.59	25.28	32.21	40.19	27.60
		20-40	1.08	7.69	0.51	26.87	23.36	28.87	41.79	29.34
		40-60	0.97	7.89	0.47	29.41	20.17	23.47	40.18	36.35
	Pasture	0-20	1.88	7.43	0.50	23.76	30.26	30.26	41.89	27.85
		20-40	1.06	7.74	0.46	25.79	22.58	25.74	40.96	33.30
		40-60	0.58	7.92	0.41	28.19	19.73	20.11	38.89	41.00

Silt, Sand, Clay, CaCO₃ and OM (%), CEC (Cmol_c kg soil⁻¹), EC (dS m⁻¹), Depth (cm)

جدول ۳- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در خاکرخی‌های حفر شده منطقه طارم

Table 3. Some physical and chemical properties of soil in excavated soil profiles of Tarom region.

Region	Landuse	Depth	OM	pH	EC	CaCO ₃	CEC	Clay	Silt	Sand
Tarom	Vegetable	0-20	1.24	7.38	0.41	20.69	24.26	26.48	44.16	29.36
		20-40	1.05	7.43	0.42	21.19	22.18	25.49	47.89	26.62
		40-60	0.87	7.51	0.39	23.85	18.49	20.19	43.58	36.23
	Olive	0-20	1.21	7.40	0.43	19.76	25.36	28.79	46.89	24.32
		20-40	1.09	7.44	0.42	21.67	23.69	25.77	49.58	24.65
		40-60	0.98	7.49	0.40	23.96	19.74	19.78	50.14	30.08
	Pasture	0-20	1.10	7.44	0.41	22.58	22.48	26.36	46.69	26.95
		20-40	0.97	7.52	0.40	23.59	20.17	23.58	47.48	28.94
		40-60	0.85	7.56	0.41	24.74	17.49	19.47	45.28	35.25
	Rice field	0-20	1.45	7.39	0.40	18.49	28.28	28.49	47.49	23.72
		20-40	1.38	7.42	0.41	19.58	26.59	27.49	46.59	25.92
		40-60	1.03	7.58	0.42	22.78	21.47	24.28	44.21	31.51

Silt, Sand, Clay, CaCO₃ and OM (%), CEC (Cmol_c kg soil⁻¹), EC (dS m⁻¹), Depth (cm)

تغییرات عمقی غلظت روی کل و قابل عصاره‌گیری با

DTPA در کاربری‌های اراضی زنجان‌رود

جدول ۴ غلظت معادل کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA

روی و تغییرات عمقی آن را در کاربری اراضی زراعی (دیم و آبی)، باغ (درخت) و مرتع نشان می‌دهد. بالاترین میزان روی معادل کل در افق رویی و سطح خاک می‌باشد که مربوط به کاربری زراعی است که در عمق‌های پایین‌تر هم همین روند مشاهده می‌شود. همچنین شیب تغییرات عمقی لایه اول نسبت به لایه دوم در کاربری زراعی بیشتر می‌باشد. سهم شکل‌های روی قابل عصاره‌گیری با DTPA با افزایش عمق کاهش یافته است. ویژگی‌های فیزیکی و

شیمیایی خاک تا حد زیادی تحرک عناصر در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Dehghani et al, 2011). در واقع تحرک و فراهمی فلزات سنگین در خاک به فرآیند توزیع آن بین فاز محلول و جامد خاک وابسته است (Ravan et al, 2021). بر اساس مطالعه جعفری و همکاران (Jafari et al, 2005) برخی از خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک متأثر از کشت و کار می‌باشد. کشت و زرع، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، عناصر غذایی قابل استفاده برای گیاه و رس‌ها را نسبت به اراضی بکر به ویژه در لایه سطحی افزایش داده است. همچنین توزیع اندازه ذرات خاک نیز تحت تأثیر قرار گرفته و باعث ریزش ذرات خاک شده

است. نکته جالب این است که با وجود گرمای زیاد منطقه و شخم زدن زمین، میزان مواد آلی در خاک‌های زیر کشت در مقایسه با زمین‌های بکر (مانند مراتع) به طور نسبتاً خوبی بیشتر شده است. وقتی مواد آلی به خاک اضافه می‌شود و سطح آن را می‌پوشاند، خاک انرژی کمتری برای جذب عنصر روی صرف می‌کند (Ravan et al., 2021).

تغییرات عمقی غلظت روی کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA در کاربری‌های اراضی میانه

مقایسه نتایج نشان می‌دهد (جدول ۵) که غلظت کل روی در کاربری زراعی بالاترین سطح را دارا است و در مراتب پایین‌تر به ترتیب کاربری‌های اراضی باغ انگور، مرتع و باغ درخت قرار دارد. سلگی و سلگی (Solgi & Solgi, 2016) با بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک اکوسیستم‌های زراعی انگور ملایر با برداشت تعداد ۲۵ نمونه خاک سطحی از عمق ۰ تا ۲۰ سانتیمتری، میانگین غلظت کل عناصر مس، سرب و روی را در این خاک‌ها به ترتیب ۷/۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم (با دامنه ۳/۹۵ تا ۱۵/۰۹)، ۶/۹۱ میلی‌گرم در کیلوگرم (با دامنه ۰/۸۹ تا ۱۷/۷۸) و ۵۴ میلی‌گرم در کیلوگرم (با دامنه ۳۰/۴۳ تا ۱۰۸/۷۳) گزارش کردند، این محققین اظهار داشتند در کنار منابع زمین‌شناسی و مواد مادری خاک، کودهای حیوانی (در درجه اول) و کودهای شیمیایی (در درجه دوم) منبع ورود سرب، مس و روی به خاک تاکستان‌ها می‌باشد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023) در مطالعه‌ای که بر روی الگوی تجمع فلزات سنگین در سیستم‌های کشاورزی فشرده انجام شد، نشان دادند که زمین‌های زراعی به طور متوسط ۲۵-۳۰ درصد غلظت بالاتری از روی در مقایسه با باغات و مراتع دارند که به طور عمده ناشی از مصرف بالای کودهای فسفاته حاوی ناخالصی‌های فلزات سنگین است. این مطالعه همچنین تأکید می‌کند که حتی در باغات، نوع محصول و روش‌های مدیریتی می‌توانند تفاوت‌های معناداری در غلظت فلزات سنگین ایجاد کنند.

بررسی شیب تغییرات عمقی غلظت کل روی در کاربری‌های اراضی مختلف نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات شیب در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر مربوط به کاربری اراضی زراعی و در مرتبه بعد کاربری اراضی باغ انگور و مرتع و باغ درخت قرار دارد. در جدول ۵ بالاترین غلظت روی قابل عصاره‌گیری با DTPA در لایه اول و

مربوط به کاربری اراضی زراعی (۴/۱۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) می‌باشد. بیشترین نسبت غلظت روی قابل عصاره‌گیری در لایه اول (۰-۲۰ سانتی‌متر) به لایه دوم (۲۰-۴۰ سانتی‌متر)، که نمایانگر تغییرات عمودی قابل توجه است، مربوط به کاربری اراضی باغ انگور می‌باشد. در مراتب بعدی و به ترتیب کاهشی، کاربری‌های اراضی زراعی، باغ درخت و مرتع کمترین میزان شیب تغییرات عمقی روی قابل عصاره‌گیری با DTPA را نشان می‌دهند. در خاک‌هایی که دارای غلظت بالای روی کل هستند، فراهمی این عنصر برای گیاهان ممکن است محدود باشد. این امر به دلیل انتقال اشکال قابل دسترس روی به کمپلکس‌هایی با حلالیت و قابلیت جذب کمتر رخ می‌دهد؛ زیرا غلظت روی در محلول خاک و در نتیجه، قابلیت دسترسی آن برای گیاهان، به طور عمده توسط واکنش‌های جذب سطحی در سطح مواد کلوئیدی خاک کنترل می‌شود (Ravan et al., 2021).

تغییرات عمقی غلظت روی کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA در کاربری‌های اراضی طارم

نتایج حاصل از بررسی غلظت روی کل نشان می‌دهد که بالاترین میزان آن در لایه سطحی خاک (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) و در کاربری اراضی شالیزار با مقدار ۸۱/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شده است. بر اساس داده‌های جدول ۶، پس از شالیزار، به ترتیب کاربری‌های مرتع (۷۸/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، باغ زیتون (۷۶/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مزرعه صیفیجات و سبزیجات (۷۴/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) دارای بالاترین غلظت روی کل در لایه سطحی بوده‌اند. میانگین وزنی غلظت روی کل در ۸۲۷۵ نمونه خاک اراضی کشاورزی ایران ۸۴/۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم و در گزارشی دیگر با ۷۱۱ نمونه خاک سطحی ۷۳ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (Shahbazi et al., 2022). حد بالای غلظت زمینه روی در ایران، چین، استرالیا و جهان به ترتیب ۱۳۰/۹، ۷۴/۲، ۵۵ و ۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (Shahbazi et al., 2022). شیب تغییرات غلظت روی کل در لایه اول (عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) در کاربری اراضی صیفیجات و سبزیجات نسبت به سایر کاربری‌های اراضی بالا است. محمود سلطانی (Mahmood Soltani, 2012) تأثیر نوع و مقدار برخی عناصر سنگین (روی، مس، کادمیم، نیکل و سرب) در رودخانه زرجوب رشت بر خاک و گیاه برنج

سبزیجات می‌باشد. در مراتب بعدی کاربری اراضی باغ زیتون، مرتع و شالیزار قرار دارد.

تغییرات عمقی غلظت سرب کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA در کاربری‌های اراضی زنجان‌رود

جدول ۴ غلظت سرب کل و تغییرات عمقی آن را در خاک‌رخ‌های منتخب کاربری‌های اراضی مختلف در منطقه زنجان‌رود نشان می‌دهد. با توجه به جدول روند کلی تغییرات سرب کل با عمق کاهشی می‌باشد. بررسی شیب تغییرات غلظت نسبت به عمق نشان می‌دهد در تمام خاک‌رخ‌ها و کاربری‌های اراضی روند تغییرات غلظت با عمق منفی است و با افزایش عمق از مقدار غلظت سرب کل کاسته می‌شود. وانگ و همکاران (Wang et al., 2024) در مطالعه‌ای که به تازگی بر روی الگوی توزیع عمقی فلزات سنگین در خاک‌های کشاورزی انجام داده‌اند، گزارش کردند که غلظت سرب در لایه سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متر) به طور متوسط ۲/۱ برابر بیشتر از لایه زیرسطحی (۴۰-۲۰ سانتی‌متر) است. این محققان این پدیده را به تجمع سرب ناشی از فعالیت‌های انسانی در سطح خاک و همچنین جذب سطحی توسط مواد آلی نسبت داده‌اند. با این حال، نسبت تغییرات شیب غلظت سرب در لایه اول (سطحی) نسبت به لایه دوم نشان می‌دهد که بیشترین تغییرات در کاربری اراضی زراعی رخ داده است. پس از آن، کاربری‌های مرتع و باغ درخت در رتبه‌های بعدی از نظر میزان تغییرات شیب غلظت سرب قرار دارند. همچنین، بالاترین مقدار سرب قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA در لایه اول خاک قرار دارد و با افزایش عمق، این غلظت با نسبت‌های مختلف کاهش می‌یابد.

تغییرات عمقی غلظت سرب کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA در کاربری‌های اراضی میانه

با توجه به جدول ۵، در تمامی کاربری‌های اراضی و خاک‌رخ‌های مورد بررسی، غلظت سرب کل با افزایش عمق کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، هرچه به لایه‌های پایین‌تر خاک برویم، مقدار سرب کل موجود در آن کمتر می‌شود، همچنین غلظت سرب قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA نیز در لایه سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) بیشترین مقدار را دارد و با افزایش عمق، مقدار آن کاهش می‌یابد این یافته‌ها تأیید می‌کنند که سرب قابل دسترس برای گیاهان عمدتاً در لایه‌های سطحی خاک متمرکز است. مقادیر

شالیزارهای تحت آبیاری آنها در عمق‌های ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتیمتری را بررسی و بیان کردند که میانگین غلظت روی در عمق ۱۵-۰ سانتیمتری خاک‌های شالیزار برابر ۱۳/۲۳ (۳۴/۴ - ۴) و در عمق ۱۵-۳۰ سانتی‌متری برابر ۱۱/۴۱ (۲۶/۱ - ۲/۹) میلی‌گرم در کیلوگرم بود. میانگین در لایه اول اندکی بیشتر از لایه دوم بود. به نظر می‌رسد انجام شخم سالیانه برای کشت برنج در اختلاط خاک دو لایه بالا و کاهش تفاوت غلظت روی موجود در آنها، تأثیر فراوان دارد. کمبود روی به طور گسترده در خاک‌هایی با pH بالا، میزان کم ماده آلی، آهنی و شور و سدیمی بیشتر دیده می‌شود (Dianat Maharluei et al., 2018). افزایش pH سبب تشدید تثبیت روی در سطح ذرات خاک نظیر کانی‌های رس و اکسیدهای فلزی می‌شود چرا که با افزایش pH درجه تفکیک گروه‌های عاملی و مقدار بارهای منفی افزایش یافته و در نتیجه میزان جذب کاتیون‌ها نیز افزایش می‌یابد (Ravan et al., 2021). خاک اولین فاکتور در تعیین غلظت فلزات در محلول خاک بوده و با کاهش pH فرم‌های قابل دسترس اکثر فلزات سنگین در خاک‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین کاهش pH می‌تواند یکی از دلایل افزایش فراهمی زیستی فلزات سنگین در خاک باشد (Mirbolook & Rasouli-Sadaghiani, 2016). در اراضی مرتعی کاهش مواد آلی در اثر برداشت گیاهان توسط دام-ها و در نتیجه کاهش میزان لاشبرگ اضافه شونده به خاک و در اراضی زراعی به دلیل تسریع در تجزیه مواد آلی متعاقب انجام عملیات شخم و نیز تشدید فرسایش می‌باشد (Hydari et al., 2022). بالاترین غلظت روی قابل استخراج با DTPA مربوط به لایه اول (عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) و مربوط به کاربری اراضی شالیزار (۴/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) می‌باشد، اراضی صیفیجات و سبزیجات (۳/۸۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) در مرتبه دوم قرار دارد. حد بحرانی روی قابل استخراج با DTPA در خاک‌های زیر کشت ایران در دامنه ۱ - ۰/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم بیان شده است (Dianat Maharluei et al., 2018). امروزه به دلیل مصرف نامتعادل اوره و فسفات آمونیوم در باغات از یک طرف و از طرف دیگر بالا بودن میزان آهنک، pH و کمبود مواد آلی در خاک‌های این باغ‌ها، کمبود عناصر کم مصرف نظیر بور و روی به شدت دیده می‌شود (Solgi & Solgi, 2016). بالاترین شیب تغییرات (نسبت دو عمق اول و دوم) مربوط به کاربری اراضی صیفیجات و

اراضی باغ زیتون، صیفیجات و سبزیجات و شالیزار می‌باشد. این امر احتمالاً به این دلیل است که کاربری مرتع تحت شخم‌زنی قرار نمی‌گیرد و لایه‌های خاک سطحی با لایه‌های زیرین اختلاط نمی‌یابند؛ بنابراین، عنصر سنگین سرب که در اثر فرونشست‌های اتمسفری بر سطح خاک تجمع می‌یابد، در لایه‌های زیرین خاک که عاری از آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی است، غلظت سرب (به ارث رسیده از مواد مادری) بدون تغییر باقی می‌ماند (به نقل از منبع (Mahmood Soltani, 2012)). بیشترین مقدار سرب عصاره‌گیری با DTPA در افق سطحی بوده و نسبت به عمق روند تغییرات غلظت کاهشی است. این روند در تمام خاک‌رخ‌ها و کاربری‌های اراضی مشاهده می‌شود. محمود سلطانی (Mahmood Soltani, 2012) با بررسی تأثیر نوع و مقدار برخی فلزات سنگین (روی، مس، کادمیم، نیکل و سرب) در رودخانه زرجوب رشت بر خاک و گیاه برنج شالیزارهای تحت آبیاری آنها؛ میانگین غلظت سرب در عمق ۱۵-۰ سانتیمتری خاک‌های شالیزار ۰/۰۸۴ (۰/۱۷ - ۰/۰۱) میلی‌گرم در کیلوگرم و در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متر ۰/۰۸۲ (۰/۱۹ - ۰/۰۱) میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش نمود. سرب از طریق سوخت مواد فسیلی و فرونشست اتمسفری بر روی خاک رسوب می‌نماید و بنابراین غلظت آن در خاک سطحی نسبت به عمق‌های پایین‌تر بالا است. در مطالعه صورت گرفته، با توجه به همبستگی غلظت سرب بین دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متر، می‌توان به عملیات شخم سالیانه در لایه ۳۰-۰ سانتی‌متری و به هم ریختن خاک سطحی در این عمق، سبب می‌شود توزیع این عنصر در اثر اختلاط لایه‌ها در نیم‌رخ خاک یکنواخت شود.

تغییرات عمقی غلظت کل و عصاره‌گیری با DTPA مس در کاربری‌های اراضی زنجان‌رود

بر اساس داده‌های جدول ۴، بالاترین غلظت مس در لایه سطحی خاک (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) مربوط به کاربری اراضی باغ درخت با مقدار ۳۵/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. پس از آن، به ترتیب کاهشی، کاربری‌های اراضی زراعی و مرتع با مقادیر ۳۰/۵ و ۲۸/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم قرار دارند. میانگین وزنی غلظت مس در ۷۹۷۰ نمونه خاک اراضی کشاورزی ایران ۲۸/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در پژوهشی دیگر با بررسی ۷۱۱ نمونه خاک سطحی، ۳۷/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Shahbazi

سرب عصاره‌گیری شده با DTPA در عمق اول برای کاربری زراعی، باغ درخت، باغ انگور، مرتع به ترتیب ۱/۳۲، ۰/۷۹، ۰/۸۲ میلی‌گرم در کیلوگرم و در لایه دوم به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۸۹، ۰/۷۵، ۰/۶۳ میلی‌گرم در کیلوگرم و در عمق سوم به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۵۲، ۰/۵۰، ۰/۵۱ میلی‌گرم در کیلوگرم بدست آمد.

تغییرات عمقی غلظت سرب کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA در کاربری‌های اراضی طارم

روند تغییرات غلظت سرب کل نسبت به عمق کاهشی است. در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر بیشترین مقدار سرب کل مربوط به کاربری باغ زیتون (۱۵/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم) و در مراتب بعدی کاربری‌های صیفیجات و سبزیجات، مرتع و شالیزار به ترتیب کاهشی برابر ۱۴/۲، ۱۲/۷ و ۱۲/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم قرار دارند (جدول ۶). آلام و همکاران (Alam et al, 2024) در مطالعه‌ای که به بررسی تجمع سرب در باغات زیتون مدیریت‌شده پرداختند، نشان دادند که باغات زیتون به دلیل استفاده از کودهای فسفاته و بقایای صنایع روغن‌کشی، به طور متوسط ۲۲-۱۸ درصد غلظت سرب بالاتری نسبت به سایر کاربری‌های کشاورزی دارند. این مطالعه همچنین تأکید می‌کند که سیستم ریشه‌ای عمیق درختان زیتون می‌تواند در انتقال سرب به لایه‌های زیرین خاک مؤثر باشد. میانگین وزنی غلظت سرب در ۸۵۵۵ نمونه خاک اراضی کشاورزی ایران ۳۲/۲۷ میلی‌گرم در کیلوگرم و در گزارشی دیگر با ۷۱۱ نمونه خاک سطحی ۲۸/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (Shahbazi et al, 2022). حد بالای غلظت زمینه سرب در ایران، انگلستان، چین، استرالیا و جهان به ترتیب ۴۶/۶، ۱۸۰، ۲۶، ۱۴ و ۲۷ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (Shahbazi et al, 2022). دوناباین و بومر (Donnabhain & Boomer) بیان داشتند که کانی‌های رسی و هیدروکسیدها در اراضی شالیزاری به طور انتخابی عناصر سنگین را جذب و رسوب می‌دهند، اما تغییرات اسیدیته می‌توانند این فرآیند را تا حدودی تحت تأثیر قرار دهند. واکنش این فلزات به این شرایط متفاوت بوده و بیشترین میزان واکنش مربوط به سرب و سپس به ترتیب مس، روی، نیکل و کادمیم است. بررسی گرادیان تغییرات غلظت سرب کل نسبت به عمق در لایه‌های اول و دوم نشان می‌دهد که بیشترین گرادیان تغییرات مربوط به کاربری مرتع و پس از آن به ترتیب مربوط به کاربری‌های

قارچ‌کش‌های حاوی مس عنوان کرده‌اند. به دلیل تمایل ترکیبی بالای مس با مواد آلی، این عنصر به آسانی از پروفیل خاک شسته نشده و تمایل به تجمع در سطح خاک دارد. از آنجایی که آلودگی زنجیره غذایی به وسیله مس برای سلامت انسان و حیوان مضر است، غلظت و فراهمی مس در خاک برای کشاورزی و محیط زیست از اهمیت بالایی برخوردار است (Solgi & Solgi, 2016). غلظت زیاد مس در خاک، در جذب و انتقال سایر عناصر ضروری ایجاد اختلال می‌کند (Reyhanitabar et al, 2017).

بیشترین مقدار مس قابل عصاره‌گیری با DTPA در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر مربوط به کاربری باغ درخت با مقدار ۲/۴۶ میلی‌گرم در کیلوگرم بود. این شکل مس، در کاربری باغ انگور، زراعی و مرتع به ترتیب برابر با ۲/۳۸ و ۲/۱۳ میلی‌گرم در کیلوگرم بدست آمد. مطالعات نشان می‌دهد که خواص خاک مانند pH، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) و بافت در غلظت مس خاک تأثیر دارد (Solgi & Solgi, 2016). علت گزارش‌های متفاوت در خصوص تأثیر مواد آلی بر جذب روی توسط خاک، عدم توجه به اندازه‌گیری اجزای تشکیل‌دهنده مواد آلی، شامل هیومین، اسید هومیک و اسید فولویک، می‌باشد. این امر ناشی از آن است که درصد این اجزا در مواد آلی خاک‌های مختلف، متغیر است. بنابراین، بسته به اینکه ماده آلی خاک دارای غالبیت اشکال محلول یا نامحلول باشد، می‌تواند نقش متفاوتی در میزان نگهداری روی توسط خاک‌ها ایفا کند (Dianat Maharluei et al, 2018). در واقع، فعالیت‌های کشاورزی (از جمله افزایش اکسیداسیون ماده آلی به دلیل شخم‌زنی) تأثیر معنی‌داری بر مقادیر ماده آلی، کربن آلی و ازت کل خاک دارند. میزان کربن آلی خاک و پایداری خاکدانه‌ها در اراضی جنگلی و مرتعی در مقایسه با اراضی کشاورزی بیشتر است (Hydari et al, 2022). در نتیجه افزایش ماده آلی در محلول خاک، بین یون‌های آزاد و یون‌های کمپلکس شده با مواد آلی که حلالیت زیادی نیز دارند، رقابت ایجاد می‌شود که در نهایت منجر به کاهش جذب فلزات بر سطوح خاک می‌شود (Mirbolook & Rasouli-Sadaghiani, 2016). بررسی شیب تغییرات غلظت مس قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA در لایه سطحی نسبت به لایه زیرین نشان داد که بیشترین تغییرات مربوط به

(et al, 2022). حد بالای غلظت زمینه مس در ایران، انگلستان، چین، استرالیا و جهان به ترتیب ۴۳/۸، ۶۲، ۲۴ و ۳۸/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (Shahbazi et al, 2022). سطح بحرانی مس با افزایش فراهمی نیتروژن افزایش می‌یابد. حد بحرانی مس در خاک‌های ایران برای گیاهان زراعی کمتر بوده و در حدود ۰/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد. استفاده از کودهای لجنی، قارچ‌کش‌ها و نیز کاربرد فاضلاب شهری برای آبیاری زمین‌های کشاورزی منجر به افزایش میزان مس خاک‌ها می‌شود (Reyhanitabar et al, 2017). مس، اگرچه از نظر تغذیه گیاه عنصری ضروری محسوب می‌شود، اما به دلیل ماهیت فلز سنگین خود، غلظت‌های بالای آن در خاک به عنوان یک آلاینده زیست‌محیطی در نظر گرفته شده و می‌تواند خطراتی را برای رشد گیاهان و سلامت انسان به همراه داشته باشد (Nouruz Zadeh et al, 2010). منابع ورود مس به خاک شامل تولید فلزات، معدن‌کاوی، زباله‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، کودها و مواد شیمیایی کشاورزی می‌باشند. فعالیت‌های کشاورزی نیز از طریق کاربرد کودهای حیوانی مایع و جامد و یا کودهای معدنی می‌توانند مس را به خاک اضافه کنند (Solgi & Solgi, 2016). بیشترین میزان مس قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA در لایه سطحی خاک (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) مشاهده شده و با افزایش عمق، این مقدار روند کاهشی نشان می‌دهد. مطالعات حاکی از وجود وابستگی مکانی در تغییرات مس در خاک می‌باشند (Nouruz Zadeh et al, 2010).

تغییرات عمقی غلظت کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA مس در کاربری‌های اراضی میانه

بالاترین غلظت مس کل در لایه سطحی خاک مشاهده شده و روند غلظت آن در تمام خاک‌رخ‌ها و کاربری‌های اراضی با افزایش عمق، کاهشی است. بررسی شیب تغییرات غلظت مس کل نسبت به عمق نشان می‌دهد که در تمامی خاک‌رخ‌ها و کاربری‌های مختلف اراضی، این شیب تغییرات منفی بوده و با افزایش عمق از میزان مس کل کاسته می‌شود. با این وجود، بیشترین میزان شیب تغییرات در لایه سطحی نسبت به لایه زیرین در کاربری باغ درخت مشاهده شده و کاربری‌های مرتع، باغ انگور و زراعی در مراتب بعدی قرار دارند. در برخی مطالعات، دلیل افزایش مس در خاک تاکستان‌ها را استفاده از

کاربری مرتع بوده و کاربری‌های باغ درخت، زراعی و باغ انگور در مراتب بعدی قرار دارند. در بررسی لایه دوم نسبت به لایه سوم مشاهده شد که بیشترین میزان تغییرات غلظت با عمق در کاربری زراعی بوده و به ترتیب پس از آن کاربری‌های باغ درخت، باغ انگور و مرتع قرار دارند. ماده آلی نقش مهمی در غیرفعال‌سازی فلزات سنگین ایفا می‌کند و بسیاری از پژوهشگران با افزودن اصلاح‌کننده‌های آلی، پویایی و تحرک‌پذیری این فلزات را در خاک کاهش داده‌اند (Seddigh *et al*, 2023). سرعت آزاد شدن مس از خاک عاملی مهم در تأمین پیوسته این عنصر است. از بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، ماده آلی نقش به‌سزایی در تغییر شکل شیمیایی مس افزوده شده به خاک از شکل تبادلی و محلول به شکل غیرتبادلی دارد. بین مس قابل استخراج با DTPA همبستگی منفی معنی‌داری با مس پیوند شده با ماده آلی وجود دارد و احتمالاً ماده آلی بر قابلیت جذب مس در این خاک‌ها تأثیر منفی دارد (Haghighat Afshar *et al*, 2017). کمبود مس زمانی اتفاق می‌افتد که خاک توانایی عرضه مقدار لازم از عنصر مورد نظر برای گیاه را نداشته باشد که دلایل این عدم توانایی خاک عبارت‌اند از: کشت فشرده، نیاز بیشتر ارقام جدید با راندمان بالا به مس، تلفات و فرسایش خاک سطحی، آهک‌دهی خاک‌های اسیدی، استفاده از کودهایی با درجه خلوص بالا، مصرف کم مواد آلی و بافت سبک خاک با ماده آلی کم. کمبود مس در خاک‌های آهکی با pH بالا به دلیل رسوب به شکل هیدروکسید مس و در خاک‌های آلی به دلیل تمایل مس به تشکیل کمپلکس‌های آلی پایدار بیشتر مشاهده می‌شود (Reyhanitabar & Abdolmaleki, 2018).

تغییرات عمقی غلظت کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA مس در کاربری‌های اراضی طارم

با توجه به جدول ۶ لایه اول بالاترین غلظت مس کل را داشته و با افزایش عمق از غلظت آن به نسبت‌های مختلف در کاربری‌های اراضی و خاک‌رخ‌های مختلف کاسته می‌شود. چن و همکاران (Chen *et al*, 2024) در مطالعه‌ای روی توزیع عمقی مس در خاک‌های کشاورزی نشان دادند که میانگین غلظت مس در لایه سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متر) حدود ۱/۸ برابر بیشتر از لایه زیرین (۲۰-۴۰ سانتی‌متر) است که این امر ناشی از تجمع مس در اثر فعالیت‌های کشاورزی و جذب سطحی توسط مواد آلی

است. لی و همکاران (Li *et al*, 2023) در پژوهش خود روی قابلیت دسترسی مس در خاک‌های مختلف دریافتند که مس قابل عصاره‌گیری با DTPA در لایه سطحی به دلیل محتوای بالاتر مواد آلی و فعالیت میکروبی، به طور معناداری بیشتر از لایه‌های عمیق‌تر است. بالاترین غلظت مس قابل عصاره‌گیری با DTPA مربوط به لایه رویی بوده و با افزایش عمق از مقدار آن کاسته می‌شود. هر چند این روند کاهشی در کاربری‌ها و خاک‌رخ‌های مختلف متفاوت است. به طور معمول سمیت مس در خاک‌های اسیدی و با ظرفیت تبادل کاتیونی کم مشاهده شده است (Solgi & Solgi, 2016). مقدار مسی که توسط عصاره‌گیر، عصاره‌گیری می‌شود به غلظت اجزا تشکیل‌دهنده عصاره‌گیر، مدت زمان عصاره‌گیری، نسبت خاک به عصاره‌گیر، دما و سرعت عصاره‌گیری وابسته و ممکن است تغییر در هر یک از این ویژگی‌ها تأثیر بسزایی در مقدار مس عصاره‌گیری شده داشته باشد (Reyhanitabar & Abdolmaleki, 2018). مس (Cu) از جمله عناصر ضروری برای رشد گیاهان محسوب می‌شود که کمبود آن به‌طور عمده در خاک‌های شنی، آهکی و خاک‌های غنی از مواد آلی اتفاق می‌افتد. از پارامترهای مؤثر بر حل‌پذیری و فرآهمی مس می‌توان به pH، مواد آلی، پتانسیل ریداکس اشاره کرد، نوع این عنصر به دلیل داشتن اعداد اکسایش مختلف، تحت تأثیر تغییرات پتانسیل ریداکس خاک‌ها قرار می‌گیرد. از آنجایی که شالیزارها برای مدتی از سال شرایط غرقابی را سپری می‌نمایند، لذا پتانسیل ریداکس و در نتیجه حل‌پذیری مس این خاک‌ها تابع مقدار رطوبت می‌باشد (Abbaspour, 2012). کشت مداوم برنج ممکن است حل‌پذیری و فرآهمی عناصر مورد نیاز گیاه خصوصاً مس را تغییر دهد. غرقاب کردن باعث افزایش pH و کاهش ماده آلی خاک‌ها می‌گردد. غرقاب کردن این خاک‌ها شکل‌های فعال مس از قبیل محلول، تبادلی و کمپلکس یافته با مواد آلی را به شکل غیرفعال تبدیل کرده و در نتیجه قابلیت جذب مس پس از غرقاب کاهش می‌یابد (Najafi & Abbasi, 2015).

تغییرات عمقی نیکل کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA در کاربری‌های اراضی زنجان‌رود

بر اساس داده‌های جدول ۴، بالاترین میزان نیکل کل در کاربری مرتع (۳۸/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در عمق دوم مشاهده گردید. بررسی گرادیان تغییرات عمقی غلظت

بالاترین غلظت نیکل قابل استخراج با محلول DTPA در لایه سطحی بوده و با افزایش عمق، نسبت غلظت آن روند کاهشی دارد.

تغییرات عمقی نیکل کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA در کاربری‌های اراضی طارم

بر اساس داده‌های جدول ۶، تغییرات عمقی نیکل کل در بین خاک‌رخ‌های منتخب، الگوهای متفاوتی را نشان می‌دهد و روند یکسانی مشاهده نمی‌شود. با این وجود، بررسی غلظت نیکل کل در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر حاکی از آن است که بالاترین میزان آن مربوط به کاربری مرتع با مقدار ۳۶/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. محمود سلطانی (Mahmood Soltani, 2012) میانگین غلظت نیکل قابل استخراج با DTPA در عمق ۰-۱۵ و ۱۵-۳۰ سانتیمتری خاک‌های شالیزار را به ترتیب برابر ۰/۹۸۷ (۲/۱۱ - ۰/۲) و ۱/۰۹ (۴ - ۰/۱) میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش کردند. البته علت اصلی آن می‌تواند شخم سالیانه و اختلاط خاک در اثر گل‌خراشی باشد که بر خلاف تحرک کم این عنصر، مقدار نیکل در ۲ لایه از تفاوت چندانی برخوردار نمی‌گردد. در pH کمتر از ۶/۵، ترکیبات نیکل به فرم‌های نامحلول تبدیل شده و قابلیت جذب خود را از دست می‌دهند و در خاک به صورت غیرقابل دسترس باقی می‌مانند. روند تغییرات عمقی گرادیان غلظت نیکل قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA منفی است؛ به این معنا که با افزایش عمق، در تمام خاک‌رخ‌ها و کاربری‌های مختلف اراضی، غلظت آن کاهش می‌یابد.

تعیین غلظت زمینه فلزات سنگین در مناطق سه گانه
تعیین غلظت کل فلزات سنگین به تنهایی برآورد صحیحی از میزان آلودگی آن نمی‌تواند باشد. بنابراین برای سنجش میزان آلودگی فلزات سنگین در محیط باید غلظت بدست آمده با یک شاخص و استاندارد مشخص مورد سنجش قرار گیرد. کومار و همکاران (Kumar et al, 2024) در مطالعه‌ای جامع بر روی روش‌های ارزیابی آلودگی فلزات سنگین تأکید کردند که استفاده همزمان از

نیکل کل در خاک‌رخ‌های مختلف نشان می‌دهد که بالاترین گرادیان تغییرات بین لایه سطحی و لایه زیرین، مربوط به کاربری باغ درخت می‌باشد و این شیب مثبت و روند آن افزایشی است؛ به این معنا که غلظت نیکل کل در لایه زیرین نسبت به لایه سطحی بیشتر شده است. در کاربری زراعی شیب تغییرات نسبت به دو کاربری دیگر کمتر بوده و تقریباً منفی است یعنی غلظت نیکل کل در لایه اول (۳۵/۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) نسبت به لایه دوم (۳۴/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) بیشتر می‌باشد. بالاترین غلظت نیکل قابل عصاره‌گیری با DTPA مربوط به لایه اول بوده و در تمام خاک‌رخ‌ها با افزایش عمق مقدار آن کاسته می‌شود. در کاربری مرتع غلظت نیکل قابل عصاره‌گیری با DTPA برابر ۰/۸۴ میلی‌گرم در کیلوگرم بدست آمده که بیشترین مقدار است. تجمع نیکل در خاک‌هایی با بافت درشت، بیشتر به صورت کربناتی است که شکل متحرک‌تری از نیکل در خاک محسوب می‌شود و در خاک‌هایی با بافت ریز، این تمایل بیشتر به نفع شکل‌های با تحرک پایین‌تر می‌باشد (Falahati et al, 2023).

تغییرات عمقی نیکل کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA در کاربری‌های اراضی منطقه منتخب میانه

بالاترین غلظت نیکل کل در تمام کاربری‌ها مربوط به عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متری است و در بین تمام خاک‌رخ‌ها با افزایش عمق غلظت نیکل کل افزایش می‌یابد. میانگین وزنی غلظت نیکل در ۷۷۴۴ نمونه خاک اراضی کشاورزی ایران ۶۷/۷۲ میلی‌گرم در کیلوگرم و در گزارشی دیگر با ۷۱۱ نمونه خاک سطحی ۶۸ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (Shahbazi et al, 2022). حد بالای غلظت زمینه نیکل در ایران، انگلستان، چین، استرالیا و جهان به ترتیب ۱۱۶/۹، ۴۲، ۲۶/۹، ۲۱ و ۲۹ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد (Shahbazi et al, 2022). بررسی شیب تغییرات غلظت نیکل کل در بین خاک‌رخ‌های منتخب نشان داد که در تمام کاربری‌ها با افزایش عمق، غلظت نیکل کل افزایش می‌یابد و بیشترین گرادیان تغییرات بین لایه سطحی و لایه زیرین مربوط به کاربری زراعی است.

جدول ۴- غلظت کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA (میلی گرم در کیلوگرم) سرب، روی، مس و نیکل در کاربری‌های اراضی مختلف زنجانرود

Table 4: Total and DTPA-extractable concentration (mg kg^{-1}) of lead, zinc, copper and nickel in different land uses in the Zanjanroud

Region	Land Use	Depth (cm)	Pb (Pb-DTPA)	Zn (Zn-DTPA)	Cu (Cu-DTPA)	Ni (Ni-DTPA)
Zanjanroud	Agriculture	0-20	20.1(1.13)	87.43(3.63)	30.47(1.56)	35.68(0.79)
		20-40	17.6(0.69)	80.46(2.37)	27.46(1.07)	34.89(0.68)
		40-60	15.5(0.54)	75.14(2.19)	23.58(0.69)	37.49(0.34)
	Garden	0-20	18.3(1.18)	83.47(4.20)	35.16(1.84)	34.15(0.80)
		20-40	17.5(0.82)	76.84(2.99)	32.47(1.20)	35.69(0.70)
		40-60	15.6(0.61)	70.15(2.08)	27.46(0.79)	34.36(0.31)
	Pasture	0-20	18.1(0.86)	80.48(3.33)	28.46(1.46)	37.49(0.84)
		20-40	16.5(0.67)	76.48(2.18)	25.82(1.06)	38.76(0.76)
		40-60	15.7(0.53)	73.47(1.12)	23.46(0.76)	39.25(0.37)

جدول ۵- غلظت کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA (میلی گرم در کیلوگرم) سرب، روی، مس و نیکل در کاربری‌های اراضی مختلف در دشت میانه

Table 5. Total and DTPA-extractable concentration (mg kg^{-1}) of lead, zinc, copper and nickel in different land uses in the Mianeh plain

Region	Land Use	Depth (cm)	Pb (Pb-DTPA)	Zn (Zn-DTPA)	Cu (Cu-DTPA)	Ni (Ni-DTPA)
Mianeh	Agriculture	0-20	20.2(1.32)	81.65(4.14)	36.74(2.31)	25.78(0.79)
		20-40	19.6(0.99)	76.49(3.05)	34.16(1.76)	34.15(0.62)
		40-60	15.5(0.67)	70.16(2.01)	30.15(1.10)	35.84(0.31)
	Garden	0-20	18.1(1.01)	72.58(3.10)	40.16(2.46)	30.49(1.12)
		20-40	17.5(0.89)	71.68(2.11)	33.56(1.73)	33.58(0.62)
		40-60	16.9(0.52)	64.89(1.57)	30.49(1.13)	36.49(0.32)
	Grape	0-20	19.9(0.79)	79.68(3.58)	39.45(2.38)	33.46(1.20)
		20-40	19.1(0.75)	75.36(2.34)	34.7(1.85)	35.49(0.72)
		40-60	17.6(0.50)	68.87(1.21)	30.46(1.36)	37.58(0.35)
	Pasture	0-20	18.4(0.82)	78.64(2.74)	34.46(2.13)	34.19(1.11)
		20-40	15.4(0.63)	75.48(2.38)	29.48(1.19)	36.79(0.72)
		40-60	15.1(0.51)	70.46(1.99)	27.46(1.08)	37.16(0.35)

جدول ۶- غلظت کل و قابل عصاره‌گیری با DTPA (میلی گرم در کیلوگرم) سرب، روی، مس و نیکل در کاربری‌های اراضی مختلف طارم

Table 6. Total and DTPA extractable concentration (mg kg^{-1}) of lead, zinc, copper and nickel in different land uses in the selected area of Tarom

Region	Land Use	Depth (cm)	Pb (Pb-DTPA)	Zn (Zn-DTPA)	Cu (Cu-DTPA)	Ni (Ni-DTPA)
Tarom	Vegetable	0-20	14.2(0.59)	74.19(3.83)	37.49(1.53)	36.49(1.11)
		20-40	12.5(0.53)	70.13(2.79)	33.24(1.01)	37.46(0.77)
		40-60	10.5(0.40)	69.99(2.72)	29.68(0.57)	37.28(0.70)
	Olive	0-20	15.3(0.66)	76.28(3.09)	41.43(1.71)	35.49(1.09)
		20-40	13.3(0.58)	72.73(2.89)	36.78(1.42)	35.99(0.74)
		40-60	9.75(0.34)	68.97(1.98)	30.47(0.59)	36.71(0.69)
	Pasture	0-20	12.7(0.61)	78.18(2.41)	32.17(0.98)	37.14(1.09)
		20-40	10.5(0.53)	75.17(1.48)	30.58(0.87)	38.64(0.75)
		40-60	9.58(0.34)	73.27(1.44)	29.98(0.58)	36.59(0.70)
	Rice field	0-20	12.7(0.75)	81.27(4.10)	22.73(0.98)	35.44(1.12)
		20-40	12.1(0.68)	80.74(4.06)	19.89(0.87)	34.76(1.08)
		40-60	9.43(0.35)	75.49(2.24)	18.67(0.45)	36.89(0.68)

شاخص‌های مختلف (مانند شاخص زمین‌انباشت و فاکتور آلودگی) می‌تواند دقت ارزیابی را تا ۴۰ درصد افزایش دهد. در مطالعات مختلف، مقایسه بیشتر با استانداردهای جهانی از قبیل متوسط جهانی، متوسط مقادیر موجود در پوسته قاره‌ای، استانداردهای منطقه‌ای و یا شاخص‌های ملی و کشوری انجام می‌گیرد. با این حال، بهترین نوع مقایسه، مقایسه با استانداردهای موجود برای همان منطقه می‌باشد. چن و همکاران (Chen *et al*, 2023) با بررسی داده‌های ۱۵۰۰ نمونه خاک از آسیا نشان دادند که تفاوت‌های منطقه‌ای در غلظت زمینه فلزات سنگین می‌تواند تا ۳۰۰ درصد متغیر باشد که اهمیت تعیین استانداردهای محلی را برجسته می‌سازد. غلظت زمینه طبیعی به عنوان غلظت محیطی گونه‌های شیمیایی در خاک‌ها بدون دخالت انسان تعریف می‌شود که نشان‌دهنده شرایط ایده‌آل و طبیعی است. وانگ و ژانگ (Wang & Zhang, 2024) روش‌های جدیدی برای تعیین غلظت زمینه ارائه کرده‌اند که مبتنی بر آنالیزهای ایزوتوپی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین است و دقت محاسبات را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. این محققان نشان دادند که روش‌های سنتی ممکن است تا ۲۵ درصد خطا در برآورد غلظت زمینه داشته باشند.

در مطالعات مختلف، مقایسه بیشتر با استانداردهای جهانی از قبیل متوسط شیل جهانی، متوسط مقادیر موجود در پوسته قاره‌ای، استانداردهای منطقه‌ای و یا شاخص‌های ملی و کشوری انجام می‌گیرد. با این حال، بهترین نوع مقایسه، مقایسه با استانداردهای موجود برای همان منطقه می‌باشد. زیرا شرایط اقلیمی و زمین‌شناختی در نقاط

مختلف، غلظت‌های متفاوتی را ایجاد خواهد کرد (Afshari *et al*, 2015). غلظت زمینه طبیعی به عنوان غلظت محیطی گونه‌های شیمیایی در خاک‌ها بدون دخالت انسان تعریف می‌شود که نشان‌دهنده شرایط ایده‌آل و طبیعی است. تعیین دقیق غلظت زمینه‌ای فلزات سنگین در خاک برای کارکردهای مختلف از قبیل ارزیابی حاصلخیزی خاک، شناسایی کانی‌ها، ارزیابی آلودگی برای کاربرد کودها و تخمین گسترش آلودگی از طریق فرونشست‌های اتمسفری مفید گزارش شده است. غلظت‌های زمینه‌ای عناصر در خاک می‌تواند ناشی از ترکیب کانی‌شناسی مواد مادری، فرآیندهای هوازدگی مؤثر بر تشکیل خاک و خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مانند ترکیب اندازه‌های ذرات به خصوص مقدار رس و مواد آلی در خاک باشد. در نتیجه غلظت زمینه‌ای طبیعی عناصر در خاک‌ها به طور گسترده‌ای متغیر است و استفاده از سطوح زمینه جهانی و دیگر مناطق برای شناسایی وسعت و خطرات آلودگی فلزات سنگین همه خاک‌ها نمی‌تواند نتایج مستند و قابل اتکایی باشد (Afshari *et al*, 2016). در این مطالعه با عنایت به اینکه عمق ۶۰-۴۰ سانتی‌متر از سطح خاک به دور از فعالیت‌های جانبی بشری است می‌تواند به عنوان یک مبنا و پایه برای سنجش غلظت فلزات سنگین نسبت به انباشت در سطح خاک مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین در سه منطقه مورد مطالعه نسبت به اعمال میانگین از غلظت معادل کل هر یک از فلزات سنگین مورد مطالعه اقدام گردید و مقدار زمینه این فلزات بدست آمد، که می‌تواند به عنوان غلظت زمینه محلی (معادل کل) در این مناطق مورد ارزیابی و سنجش قرار گیرد (جدول ۷).

جدول (۷) غلظت زمینه منطقه‌ای مربوط به مناطق سه گانه مطالعاتی

Table 4. Regional background concentration related to the three study areas

Region	Pb (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Ni (mg kg ⁻¹)
Zanjanroud	15.6	72.9	24.8	37.0
Mianeh	16.3	68.6	29.6	36.8
Tarom	9.8	71.9	27.2	36.9

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پژوهش نشان داد که در منطقه زنجان‌رود، بالاترین غلظت سرب کل (۲۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سرب قابل استخراج با محلول DTPA (۱/۱۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) به ترتیب در کاربری زراعی و باغ درخت و در عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری شد. در دشت میانه، بالاترین غلظت سرب کل (۲۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سرب قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA (۱/۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در کاربری زراعی به دست آمد. در منطقه طارم نیز، بالاترین مقادیر سرب کل (۱۵/۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سرب قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA (۰/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در عمق سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) به ترتیب در کاربری‌های باغ زیتون و شالیزار مشاهده شد. بالاترین غلظت روی کل در دشت‌های زنجان‌رود و میانه مربوط به کاربری زراعی و در دشت طارم مربوط به کاربری شالیزار بود. روی قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA نیز در عمق سطحی در دشت زنجان‌رود در کاربری باغ درخت، در دشت میانه در کاربری زراعی و در دشت طارم در کاربری شالیزار به دست آمد. غلظت مس کل و مس قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA در دشت‌های زنجان‌رود و میانه، بالاترین مقادیر را در کاربری باغ درخت نشان داد، در حالی که در منطقه طارم، هر دو پارامتر مربوط به کاربری باغ زیتون و در عمق سطحی (۰

تا ۲۰ سانتی‌متر) بود. روند تغییرات نیکل در مقایسه با سه فلز قبلی (سرب، روی و مس) متفاوت بود؛ به طوری که بالاترین غلظت نیکل در هر کاربری و منطقه، در اعماق دوم و سوم مشاهده گردید، این در حالی است که سه فلز مذکور بیشترین غلظت کل و قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA را در عمق سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) دارا بودند. در دشت زنجان‌رود، کاربری مرتع با ۳۹/۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، بیشترین غلظت نیکل کل را در عمق سوم (۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) نشان داد. در دشت میانه، باغ انگور در عمق سوم بیشترین غلظت نیکل کل را نشان داد و در منطقه طارم، کاربری مرتع در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر بالاترین غلظت را دارا بود. بالاترین غلظت نیکل قابل عصاره‌گیری با محلول DTPA در هر سه منطقه مربوط به عمق سطحی (۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) بوده و در مناطق زنجان‌رود، میانه و طارم به ترتیب به کاربری‌های مرتع، باغ انگور و مرتع اختصاص یافت. با توجه به بررسی منابع مختلف (داخلی و خارجی)، به نظر می‌رسد منابع تأمین‌کننده فلزات سرب، روی و مس در خاک سه منطقه مورد مطالعه تا حدودی با منابع عرضه نیکل متفاوت باشد و بیشتر عوامل انسانی در افزایش غلظت سرب، روی و مس در خاک‌ها دخیل هستند، در حالی که شرایط طبیعی و مواد مادری تأثیرگذارتر بر غلظت نیکل می‌باشند.

References

- Abbaspour A. 2012. Fractionation of copper in soils as influenced by waterlogging and application of crop residues. *Journal of Soil Research*, 25 (4), 295-306.
- Afra Zh., Rezapour S., Sabbaghtazeh E., Delalilian M.R., and Rafieyan O. 2024. Ecological risk of heavy metals pollution and its relationship with soil physicochemical properties in the Urmia plain gardens. *Applied Soil Research*, 12 (2), 96-110. (In Persian)
- Afshari A., Khademi H., and Delavar M.A. 2015. Heavy metals contamination assessment in soils of different land uses in central district of Zanjan Province using contamination factor. *Journal of Soil and Water Science*, 25 (4/2), pp. 41-52.
- Afshari A., Khademi H., and Hojati S. 2016. Assessment of heavy metals pollution risk in soils of central Zanjan province based on pollution indices. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22 (6), pp. 20-40. (In Persian)
- Alam R., Rodrigues S.M., Pereira J.L., 2024. Lead accumulation patterns in Mediterranean olive orchards: Soil-plant relationships and health risks. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133412.
- Burt R. (Ed.). 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual, Soil Survey Investigations, Report No. 42, Version 4.0, USDA, Natural Resources Conservation Service, Lincoln, NE, USA.
- Chen L., et al. 2023. Regional variability of heavy metal background concentrations in Asian soils. *Science of the Total Environment*, 856, 159234.
- Chen X., Wang L., Zhang Y., 2024. Vertical distribution and bioavailability of copper in agricultural soils: Effects of long-term fertilization practices. *Environmental Pollution*, 342, 123112.

- Dehghani S., Naderi Khorasgani M., Mohammadi J., and Karimi A. 2021. Assessment of heavy metals contamination of soil particle size fractions in different land uses of Baghan Watershed, Bushehr province, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52 (7), 1765-1778. (In Persian)
- Dianat Maharluei Z., and Ghasemi R. 2018. Investigation Zn chemical forms in calcareous soils under cultivation of Pomegranate and Almonds. *Journal of Soil Research*, 32 (2), 255-269.
- Falahati F., Adhami E., and Owliaie. H.R. 2023. Changes in nickel fractions as affected by aging and vermicompost and Zeolite application in two calcareous soils with different texture. *Journal of Water and Soil Science*, 27 (1), 83-94. (In Persian)
- Jafari S., Baghernejad M., Chorom M. 2005. Evaluation of changes in physic-chenical properties in cultivated (under sugarcane and rotation cropping) and non-cultivated soils in Haft-Tappeh (Iran). *The Scientific Journal of Agriculture*, 28 (1), 166-182. (In Persian)
- Haghighat Afshar M., Reyhanitabar A., Abdolmaleki E., and Kamangir O. 2017. Relationships between available Cu and its chemical fractions in some calcareous soils of East Azarbaijan province. *Applied Soil Research*, 6 (3), 13-23. (In Persian)
- Hydari N., Mousavi S.B., Beheshti Ale Agha A., Rakhsh F., Karimi I. 2022. The effect of land use change on some physical, chemical and biological characteristics of soil. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (7), 1625-1643. (In Persian)
- Kumar A., et al. 2024. Advanced assessment methods for heavy metal pollution in soils: A comparative study. *Environmental Science and Technology*, 58(3), 1456-1468.
- Li H., Wu J., Zhang R. 2023. Organic matter and microbial activity enhance copper bioavailability in surface soils: Implications for phytoremediation. *Journal of Hazardous Materials*, 451, 131207.
- Lindsay W.L. and Norvell W.A. 1978. Development of DTPA test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42: 421-428.
- Ravan S., Sepehr E., Hamzenejad R. 2021. Effect of Leonardite on adsorption behavior and distribution of chemical forms of zinc in a sandy loam soil. *Water and Soil Science*, 31 (1), 103-117. (In Persian)
- Reyhanitabar A., and Abdolmaleki E. 2018. Evaluation of some extraction methods for determination of Corn available copper in some calcareous soils of Iran. *Applied Soil Research*, 7 (2), 1-13. (In Persian)
- Reyhanitabar A. Abdolmaleki E., and Kamangir O. 2017. Effects of copper (Cu) application on concentration and uptake of Cu, Manganese (Mn), Potassium (K) and Phosphorus (P) on Corn plant. *Applied Soil Research*, 5 (2), 122-134. (In Persian)
- Rostamkhani A. 2014. Monitoring the geoclimatic structure of the alluvial cones of the Gezel Ozone bed. Master's thesis, Faculty of Humanities, University of Zanjan. 133p.
- Mahmood Soltani Sh. 2012. Heavy metals (kind and amount) in Zarjoob River and their effects on rice paddy soils under its irrigation. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20 (3), 153-171. (In Persian)
- Mirbolook A., and Rasouli-Sadaghiani M.H. 2016. Study of different fractions of Zn, Cu, Pb and Cd during vermicomposting of cattle manure. *Applied Soil Research*, 5 (1), 35-44. (In Persian)
- Najafi N., and Abbasi M. 2015. Effects of rice (*Oryza sativa* L.) cultivation, sewage sludge and chemical fertilizers on changes in iron, zinc, copper and manganese. *Applied Soil Research*, 2 (1), 1-14. (In Persian)
- Nouruz Zadeh H., Khavazi K., Malakouti M.J., and Hashemi S.M. 2010. Investigating the efficiency of tow GK and C-means methods in copper concentration clustering in agricultural lands (A case atudy: Hamadan province). *Agricultural Engineering*, 33 (1), 61-70. (In Persian)
- Shahbazi K., Fathi-Gerdelidani A., and Marzi M. 2022. Investigation of the status of heavy metals in soils of Iran: A comprehensive and critical review of reported studies. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (5), 1163-1210. (In Persian)
- Shahmoradi B. 2024. Evaluation of heavy metals concentration in water and surface sediments of the Zanjanrood River (Between the two branches of Zaker and Sahram), Zanjan Province. Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology. 156p.
- Seddigh M., Khalili Rad. M., and Ghorbanzadeh N. 2023. The effect of biochar and hematite on cadmium availability in a paddy soil under flooded and drained conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54 (11), 1667-1680. (In Persian)

- Solgi I., and Solgi M. 2016. Investigating of heavy metals concentration vineyard soils in the agricultural ecosystems of Malayer. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*. 3 (7), 99-112. (In Persian)
- Wang Y., Chen X., Li H. 2024. Vertical distribution and bioavailability of heavy metals in agricultural soils: Implications for soil management. *Science of the Total Environment*, 912, 169245.
- Wang H., & Zhang Y. 2024. Machine learning approaches for accurate determination of geochemical baselines. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133456.
- Zhang L., Wang J., Li Y. 2023. Heavy metal accumulation patterns in intensive agricultural systems: Implications for soil management and crop safety. *Environmental Pollution*, 316, 120634.