

ارزیابی آلاینده‌گی فلزات سنگین در ارتباط با عوامل فیزیکوشیمیایی رسوبات گلی در مغزه رسوبی از پلایای گاوخونی

حمیدرضا پاکزاد^{۱*}، مهرداد پسندی^۱، محمد نعمتی ورنوسفادرائی^۲، فرشته خدابنده‌لو^۱

^۱گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
^۲گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

چکیده

پلایای گاوخونی واقع در ۱۳۰ کیلومتری جنوب شرق اصفهان شامل سه پهنه گلی، ماسه‌ای و نمکی می‌باشد. پهنه گلی عمدتاً در بخش شمالی پلایا (دلتای زاینده‌رود) گسترش دارد. یک مغزه رسوبی برای مطالعه وضعیت آلودگی رسوبات گلی دلتای زاینده‌رود به فلزات سنگین از طریق حفاری در رسوبات تهیه گردید. از طریق مطالعه این مغزه، ۷ رخساره شامل گل توده‌ای سیاه، گل توده‌ای قهوه‌ای، گل ماسه‌ای توده‌ای سیاه، گل ماسه‌ای قهوه‌ای، گل توده‌ای سبز روشن، گل ماسه‌ای سبز روشن و گل قهوه‌ای ژپس‌دار و ۵ زیر محیط کانال‌های انشعابی، حاشیه کانال، دریاچه و پلایا شناسایی گردید. برای تعیین نقش عوامل فیزیکوشیمیایی در تغییرات غلظت و آلودگی عناصر سنگین در رخساره‌ها، دانه‌بندی رسوبات به روش الک تر و هیدرومتری و اندازه‌گیری میزان pH و Eh، درصد کربنات کلسیم، ماده آلی کل (TOC) و غلظت فلزات سنگین در رسوبات انجام شد. نتایج حاصل از آنالیز نمونه‌های رسوب نشان داد که میانگین غلظت فلزات سنگین مورد بررسی (بر حسب ppm) به ترتیب میزان به صورت منگنز (۵۷۶/۴۶)، روی (۷۹/۷۳)، کروم (۵۰/۸۴)، مس (۴۶/۳۲)، نیکل (۳۷/۴۰)، سرب (۱۰/۹۹)، کبالت (۹/۰۹) و کادمیوم (۰/۰۹۲) می‌باشد. بر اساس همبستگی بین غلظت فلزات سنگین و عوامل فیزیکوشیمیایی مورد بررسی و همچنین تحلیل خوشه‌ای، جذب عناصر منگنز، کبالت، نیکل و کروم تحت تأثیر میزان رس، اکسید آهن و Eh بوده و کلسیم کربنات و مواد آلی بر جذب عناصر کادمیوم، روی، سرب و مس تأثیرگذار بوده‌اند. نتایج حاصل از محاسبه شاخص‌های آلودگی رسوبات به فلزات سنگین شامل شاخص غنی‌شدگی (EF)، شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) و شاخص انباشت آلودگی (PLI) نشان داد که رسوبات مغزه برداشت شده از دلتای تالاب بین‌المللی گاوخونی علی‌رغم نشان دادن تغییرات شرایط محیط رسوب‌گذاری به صورت غیر آلوده هستند. نمونه‌های رسوبات تنها بر اساس شاخص زمین‌انباشتگی به سه عنصر روی، مس و کادمیوم آلودگی نشان می‌دهند.

کلید واژگان: رسوب‌شناسی، آلودگی فلزات سنگین، دلتای زاینده‌رود، مغزه رسوبی، پلایای گاوخونی

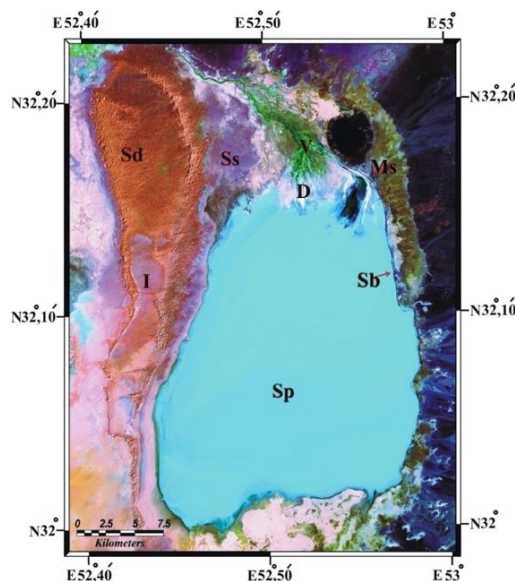
مقدمه

دریاچه‌های مناطق خشک (پالایاها) بوم‌سازگان‌های دریاچه‌ای موقتی با سیستم پیچیده‌ای از رسوب‌گذاری‌ها می‌باشند (Decima *et al.*, 1988; Cupper, 2006). تغییر و تحولات فیزیکی و شیمیایی دیرینه پالایا تغییرات چشمگیری در نوع رسوبات ایجاد می‌کند که از آن‌ها برای تشخیص محیط‌های رسوبی دیرینه و فرآیندهای رسوبی مؤثر بر آن‌ها و همچنین آب و هوای دیرینه می‌توان استفاده نمود (Blazevic *et al.*, 2009). رسوبات متنوعی اعم از ماسه‌ای، گلی، تبخیری و ترکیبی از این نوع نهشته‌ها در پالایاها یافت می‌شود. در دهه‌های اخیر با توسعه سریع صنعت و شهرنشینی، آلودگی انسان‌زاد دریاچه‌های پالایایی تشدید شده است. رسوبات مقصد نهایی آلاینده‌های وارد شده به محیط‌های پالایایی هستند و رسوب‌گذاری در پالایاها می‌تواند آلاینده‌های حاصل از منابع طبیعی و انسانی را متمرکز نماید (Costa *et al.*, 2012). در نتیجه وجود رسوبات فرسایش‌پذیر روی سطوح خشک پالایاها و همچنین کمبود پوشش گیاهی و وزش بادهای شدید، این محیط‌ها را تبدیل به یکی از عمده‌ترین منابع ذرات معلق گرد و غبار نموده که منجر به بروز نگرانی‌هایی در خصوص اثرات بالقوه محیط زیستی آلاینده‌های موجود در گرد و غبارهای حاصل شده است. از میان آلاینده‌های متنوع محیط زیستی، فلزات سنگین به دلیل سمی بودن و پایداری، تهدید بالقوه‌ای برای سلامت انسان و موجودات زنده محسوب می‌شوند (He *et al.*, 2012). فرآیندهای طبیعی مانند هوازدگی و فرسایش خاک/رسوب و همچنین ورود پسماندها و پساب‌های صنعتی و معدنی، کودهای شیمیایی و سموم مورد استفاده در زمین‌های زراعی به این دریاچه‌های بسته منجر به افزایش تمرکز فلزات سنگین در رسوبات این بوم‌سازگان‌ها شده است (Nakayama *et al.*, 2010). نگهداشت و تحرک‌پذیری فلزات سنگین در رسوبات به شکل شیمیایی این عناصر و خصوصیات فیزیکوشیمیایی رسوبات نظیر شرایط pH، Eh و بافت رسوب بستگی دارد. اکسی-هیدروکسیدهای آهن و

منگنز، کربنات‌ها و مواد آلی موجود در رسوبات نیز در جذب و نگهداشت فلزات سنگین تاثیرگذار است (Sultan, 2010). پالایای گاوخونی به دلیل شرایط حاکم بر حوضه آبریز رودخانه زاینده‌رود و عوامل فیزیکوشیمیایی موجود مؤثر بر ته‌نشست رسوبات، مکان مناسبی برای تمرکز فلزات سنگین با منشأ انسان‌زاد می‌باشند (Rahimi *et al.*, 2012). از سویی دیگر رودخانه زاینده‌رود حجم زیادی از فلزات سنگین با منشأ طبیعی را از ذخایر سرب/روی موجود در شیل‌های ژوراسیک و سنگ‌های کربناته کرتاسه واقع در حوضه آبخیز را به پالایای گاوخونی منتقل می‌کند. بنابراین هدف از این پژوهش، بررسی ارتباط غلظت فلزات سنگین با عوامل فیزیکوشیمیایی رسوبات زیرسطحی دلتای زاینده‌رود می‌باشد.

مواد و روش‌ها

جغرافیا و زمین‌شناسی منطقه: پالایای گاوخونی با وسعتی حدود ۴۷۶ کیلومتر مربع در ۱۳۰ کیلومتری جنوب شرق اصفهان واقع شده است. دلتای زاینده‌رود در بخش شمالی این پالایا قرار دارد (شکل ۱). رسوب‌گذاری در این منطقه در یک حوضه گرابنی تا نیمه‌گرابنی انجام شده است. این حوضه تکتونیکی نتیجه حرکات کوهزایی و فوران‌های آتشفشانی در انتهای کرتاسه و اوائل ائوسن و گسل‌خوردگی پس از ولکانیسم در بعضی از بخش‌های مرکزی ایران از جمله در منطقه مورد مطالعه می‌باشد (Alavi, 1994). این حوضه در طول دوران چهارم جایگاه نهشت رسوبات از منابع متنوع سنگ‌شناختی بوده و توسط رسوبات مخروط افکنه‌ای در شمال، جنوب و شرق و همچنین تپه‌های ماسه‌ای در غرب احاطه گردیده است. رودخانه دائمی زاینده‌رود تغذیه کننده عمده پالایای گاوخونی بوده و از سمت شمال وارد این پالایا می‌گردد. در حوضه آبریز پالایای گاوخونی انواع سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین رخمون دارند. در پالایای گاوخونی ۵ رخساره گراول ماسه‌ای، ماسه‌ای، گلی، گلی-نمکی و نمکی (شکل ۱) شناسایی گردیده است



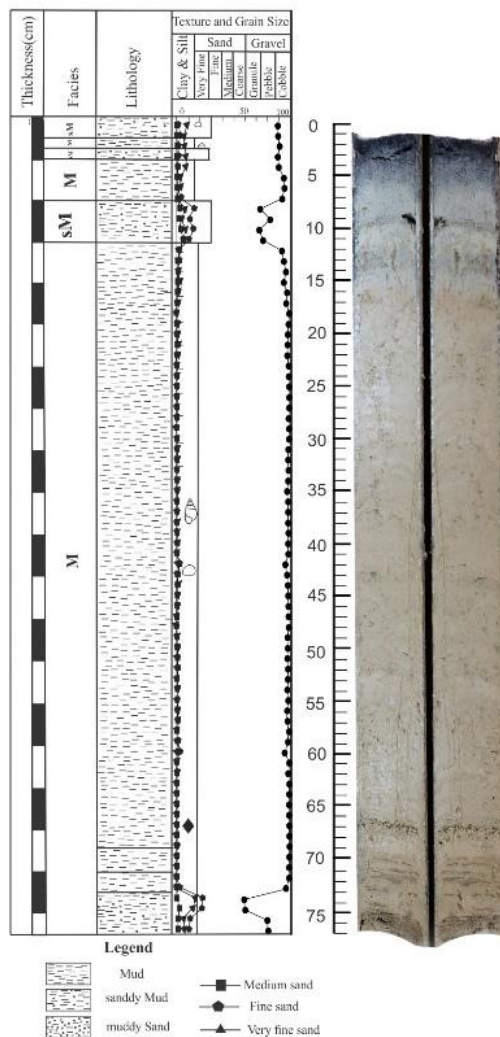
شکل ۱- تصویر ماهواره‌ای لندست TM از پلاپای گاوخونی: پهنه گلی (Ms)، پهنه ماسه‌ای (Ss)، تپه‌های ماسه‌ای (Sd)، بین تپه‌های ماسه‌ای (I)، پوشش گیاهی (V)، دلتا (D)، نوار ماسه‌ای (Sb)، Sp (پهنه نمکی) (Rahimi et al., 2012)



شکل ۲- تصاویری از بکارگیری آگر بنزینی با سیستم مغزه‌گیری چرخشی در زیرمحیط کانال منشعب در دلتای رودخانه زاینده‌رود

در زیرمحیط کانال منشعب در دلتا برداشت گردید (شکل ۲). به وسیله کاردک پلاستیکی مغزه برداشت شده (شکل ۳) به ضخامت‌های یک سانتی‌متری برش داده شد. برای آزمایش دانه‌بندی به روش الک، کل نمونه‌های جداسازی شده از مغزه (۷۸ نمونه) و برای سایر آزمایش‌ها (تعیین درصد کربنات کلسیم، ماده آلی کل (TOC)، pH و Eh و اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین)، تعداد ۱۵ نمونه بر اساس تغییر در رخساره‌ها (شکل ۳) انتخاب گردید. نمونه‌ها برای آزمایش‌های دانه‌بندی، تعیین درصد کربنات کلسیم و مواد آلی همگن و سپس در دمای آزمایشگاه خشک شدند. برای آزمایش‌های pH و Eh از نمونه اولیه مرطوب همگن استفاده شد. دانه‌بندی رسوبات به روش الک تر و هیدرومتری

(Rahimi et al., 2012). پلاپای گاوخونی به‌طور کلی متشکل از دو محیط رسوبی دلتایی و دریاچه‌ای غیر دائمی است. دلتای زاینده‌رود از تعدادی کانال‌های انشعابی کم عمق و بین کانالی تشکیل شده و شامل رخساره‌های گل خاکستری تا سیاه، گل قهوه‌ای تا زرد و ماسه است. دریاچه غیر دائمی گاوخونی از رخساره‌های ماسه‌ای، ماسه‌ای گلی، گل نمکی و نمکی تشکیل شده است (Pakzad and Fayazi, 2007). با استفاده از سری زمانی تصاویر گوگل ارث و Google Earth و GPS فعال‌ترین کانال دلتا که عمدتاً دارای آب سطحی می‌باشد به عنوان محل حفاری و نمونه‌برداری انتخاب شد. مغزه رسوبی به طول ۷۸ و قطر ۷۶ میلی‌متر به وسیله آگر بنزینی به طریق مغزه‌گیری چرخشی



شکل ۳- ستون چینه‌شناسی و مغزه رسوبی برداشت شده از دلتای زاینده‌رود

رسوبات صورت گرفت (Micó *et al.*, 2008). نمونه‌ها پس از سرد شدن با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ میکرون فیلتر گردید و سپس با استفاده از آب دو بار تقطیر به حجم ۵۰ میلی لیتر رسانده شد. اندازه‌گیری مقدار فلزات سنگین در محلول حاصل به روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت‌شده القایی طیفی (ICP-AES) انجام گرفت. دقت اندازه‌گیری این روش برای عناصر کروم، نیکل، روی، مس، کبالت، سرب و کادمیوم به میزان ۰/۱ ppm و برای عنصر منگنز ۱ ppm می‌باشد. تضمین کیفیت (QA) و کنترل کیفیت (QC) نتایج اندازه‌گیری مقدار فلزات سنگین با استفاده از نمونه استاندارد GSS-16 انجام شد. دقت آنالیز نمونه استاندارد برای عناصر Cd و Mn, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Co به

میزان کربنات کلسیم (Lindholm, 1987) انجام شد. رسوبات گلی به روش وزنی (Robinson, 1980) و درصد ماده آلی (TOC) به روش کوره الکتریکی (Dean, 1974) محاسبه گردید. pH و Eh رسوبات به روش الکتریکی (Gregorich and Carter, 2007; Humphries, 2010) تعیین گردید. ۱۵ نمونه انتخاب شده از رده گل رسوبات در هوای آزاد خشک گردید و برای به‌دست آوردن مخلوطی همگن با هاون چینی به صورت پودر درآمدند. سپس با اضافه کردن مخلوطی از اسید نیتریک و اسید هیدروکلریک غلیظ (با نسبت ۳:۱) به ۱ گرم از هر نمونه و ابتدا نگهداری به مدت ۱ ساعت در دمای آزمایشگاه و سپس به مدت ۳ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد روی هات پلیت، عمل هضم

ترتیب ۱۰۴، ۹۸، ۱۱۰، ۸۷، ۱۱۶، ۹۳، ۱۰۷ و ۸۰ درصد می باشد.

شاخص‌های آلودگی فاکتور غنی شدگی (EF)، شاخص زمین انباشتگی (Igeo) و شاخص انباشت آلودگی (PLI) جهت ارزیابی میزان آلودگی رسوبات مورد مطالعه به فلزات سنگین محاسبه شدند. با محاسبه فاکتور غنی شدگی فزونی هر یک از فلزات سنگین مورد بررسی در یک نمونه رسوب نسبت به آهن موجود در آن نمونه در مقایسه با نسبت غلظت آن فلز سنگین و آهن در پوسته زمین ارزیابی می‌شود. جهت محاسبه فاکتور غنی شدگی از رابطه زیر استفاده می‌گردد (Barbieri, 2016):

رابطه ۱

$$EF = (H_s/Fe_s)/(H_c/Fe_c)$$

در این رابطه، Hs و Hc به ترتیب غلظت فلز سنگین در نمونه و مرجع و Fes و Fec غلظت آهن در نمونه و مرجع می‌باشد. برای تصحیح اثرات دانه‌بندی و کانی‌شناسی رسوبات روی میزان فلزات سنگین، نرمال‌سازی نسبت به آهن صورت گرفته که عنصر پایدار و جزء اصلی رسوبات (مانند کانی‌های رسی، آهن و هیدرواکسیدهای منگنز و مواد آلی و غیره) است. شاخص زمین انباشتگی از دیگر شاخص‌های بررسی آلودگی محیط زیستی رسوبات طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Muller, 1969):

رابطه ۲

$$Igeo = \log_2(C_n/1.5B_n)$$

Cn غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در رسوب و Bn غلظت آن عنصر در زمینه می‌باشد. شاخص انباشت آلودگی بر اساس رابطه‌های ۳ و ۴ محاسبه می‌شود (Neyestani et al., 2016):

رابطه ۳

$$PLI = (Cf_1 * Cf_2 * Cf_3 * \dots * Cf_n)^{1/n}$$

رابطه ۴

$$Cf_{metals} = CH_{metal}/CH_{back}$$

که n تعداد فلزات مورد آنالیز و Cf نسبت غلظت هر فلز در نمونه (CHmetal) به غلظت آن فلز در زمینه (CHBack)

می‌باشد. این فاکتور با توجه به مقادیر فلزات سنگین در مرجع، میزان انباشت آلودگی را برای هر نمونه مشخص می‌کند. میانگین غلظت فلزات سنگین در پوسته قاره‌ای (Taylor, 1964) در محاسبه سه شاخص مذکور به عنوان غلظت زمینه‌ای عناصر مورد بررسی استفاده شده است.

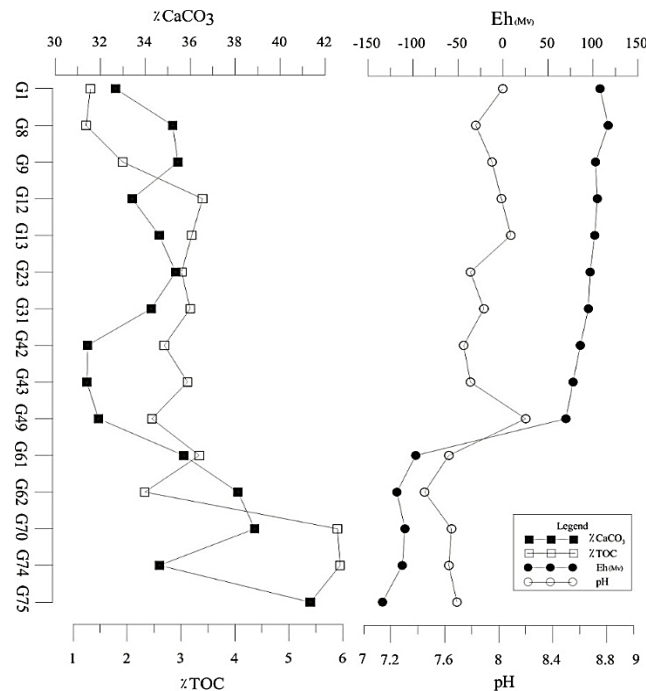
نتایج و بحث

رسوب‌شناسی: بر اساس طبقه‌بندی فولک (Folk, 1974) رسوبات تشکیل دهنده مغزه رسوبی به ترتیب فراوانی شامل گل، سیلت، سیلت ماسه‌ای و گل ماسه‌ای می باشند. رخساره‌های گل سیاه رنگ، گل ماسه‌ای سیاه رنگ، گل سبز تیره، گل سبز روشن، گل ماسه‌ای سبز روشن، گل قهوه‌ای، گل قهوه‌ای ژئوپس‌دار و گل ماسه ای قهوه‌ای بر اساس تغییرات بافتی، رنگ و کانی‌های تبخیری شناسایی شده‌اند که در زیر محیط‌های کانال انشعابی، حاشیه کانال، دریاچه و پلایا ته‌نشست شده‌اند. رخساره‌های گلی سیاه رنگ و سبز رنگ در زیر محیط حاشیه کانال، رخساره‌های گل ماسه‌ای و ماسه گلی در کانال انشعابی، رخساره‌های گل قهوه‌ای رنگ در دریاچه و رخساره گل قهوه‌ای ژئوپس‌دار در پلایا ته‌نشست شده‌اند (شکل ۳ و جدول ۱).

میزان pH در طول مغزه رسوبی روند خاصی را نشان نمی‌دهد (شکل ۴) و عمدتاً وابسته به میزان کربنات رسوبات می‌باشد. به‌طور کلی میزان Eh از سطح به عمق افزوده شده و شرایط اکسیدان تر می‌شود. کمترین مقدار Eh مربوط به عمق ۲-۰ (رخساره گل سیاه) بوده و بیشترین آن مربوط به عمق ۷۴-۷۳ (رخساره گل ماسه‌ای قهوه‌ای) می‌باشد (شکل ۴). کمترین مقدار کربن آلی مربوط به عمق ۷۴۷۳-۷۳ و بیشینه آن مربوط به عمق ۲-۰ است (شکل ۴). رخساره‌هایی که دارای مواد آلی فراوان می‌باشند درصد گل بیشتری دارند. رنگ رسوبات از عمق ۱۶ سانتی‌متری به پایین که شرایط اکسیدان است (به‌جز عمق ۷۴-۷۳ سانتی‌متری که بیشترین مقدار Eh را دارد و خاکستری است) از قهوه‌ای تا زرد رنگ تغییر می‌کند. مقدار کربنات کلسیم رسوبات تابع نوع رخساره است به‌طوری که رخساره گلی دارای بیشترین مقدار کربنات و رخساره ماسه‌ای دارای

جدول ۱- مقادیر پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های مغزہ رسوبی دلتای زاینده‌رود

عمق (cm)	شماره نمونه	رخساره	pH	Eh	TOC	CaCO ₃
۰-۱	G1	گل سیاه	۷/۶۹	-۱۳۴	۵/۴	۴۱/۳۳
۷-۸	G8	گل سبز روشن	۷/۶۳	-۱۱۲	۵/۹۵	۳۴/۶۳
۸-۹	G9	گل ماسه‌ای سبز روشن	۷/۶۵	-۱۰۹	۵/۹	۳۸/۸۷
۱۱-۱۲	G12	گل ماسه‌ای سبز روشن	۷/۴۵	-۱۱۸	۲/۳۳	۳۸/۱۲
۱۲-۱۳	G13	گل سبز روشن	۷/۶۳	-۹۷	۳/۳۴	۳۵/۷۱
۲۲-۲۳	G23	گل قهوه‌ای	۸/۲	۷۰	۲/۴۶	۳۱/۹۲
۳۰-۳۱	G31	گل قهوه‌ای	۷/۷۹	۷۸	۳/۱۲	۳۱/۴۰
۴۱-۴۲	G42	گل قهوه‌ای	۷/۷۴	۸۶	۲/۶۹	۳۱/۴۳
۴۲-۴۳	G43	گل قهوه‌ای	۷/۸۹	۹۵	۳/۱۷	۳۴/۲۶
۴۸-۴۹	G49	گل قهوه‌ای	۷/۷۹	۹۷	۳/۰۱	۳۵/۳۵
۶۰-۶۱	G61	گل قهوه‌ای ژئیس‌دار	۸/۰۹	۱۰۲	۳/۲	۳۴/۶۲
۶۱-۶۲	G62	گل قهوه‌ای ژئیس‌دار	۸،۰۲	۱۰۵	۳/۴	۳۳/۴۲
۶۹-۷۰	G70	گل قهوه‌ای ژئیس‌دار	۷/۹۵	۱۰۳	۱/۹۲	۳۵/۴۵
۷۳-۷۴	G74	گل ماسه‌ای قهوه‌ای	۷/۸۳	۱۱۷	۱/۲۴	۳۵/۲۲
۷۴-۷۵	G75	گل ماسه‌ای قهوه‌ای	۸/۰۳	۱۰۸	۱/۳۲	۳۲/۶۷
میانگین			۷/۸۳	۱۰۳/۴۲	۳/۳۳	۳۴/۹۶
انحراف معیار			۰/۲۰۵	۲۶/۱	۱/۴۷	۲/۸۰



شکل ۴- درصد کربنات کلسیم، ماده آلی کل (TOC) و میزان Eh و pH در نمونه‌های مغزہ رسوبی دلتای زاینده‌رود

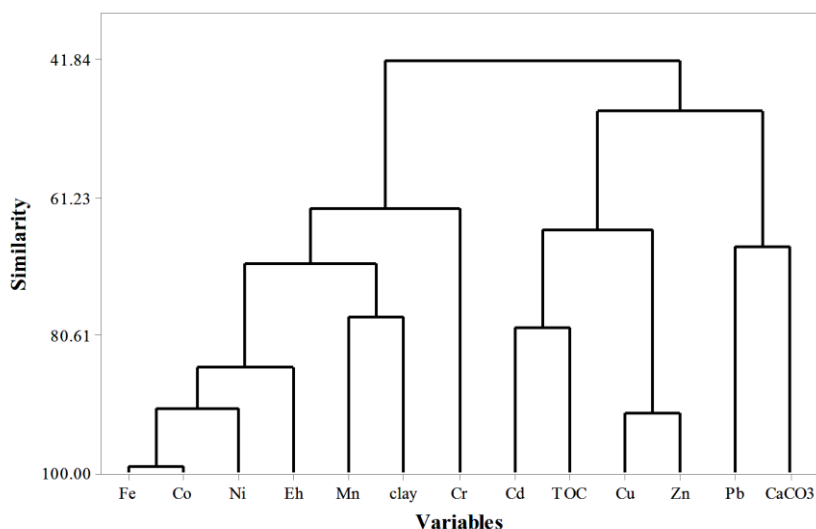
بین عناصر و این عوامل به روش پیرسون با استفاده از نرم‌افزار Minitab® 17.3.1 محاسبه شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که منگنز با درصد رس و آهن، کادمیوم با درصد مواد آلی، کبالت با درصد آهن و میزان Eh، کروم با درصد رس و میزان Eh و مس با درصد ماده آلی کل (TOC) دارای

کمترین مقدار می‌باشد (شکل ۴).
همبستگی بین عناصر و عوامل فیزیکوشیمیایی: برای تعیین نقش عوامل فیزیکوشیمیایی (Eh)، ماده آلی کل (TOC)، کربنات کلسیم، رس و آهن) در فراوانی غلظت عناصر در رسوبات گلی (سیلت و رس)، ضریب همبستگی

جدول ۲- ضریب همبستگی بین عناصر و عوامل فیزیکوشیمیایی

Eh	% مواد آلی	% کربنات کلسیم	% رس	Co	Fe2O3	Cu	Cd	Mn	Pb	Zn	Cr	Ni	
۱	-۰/۵۰*	-۰/۷۱*	۰/۲۳	۰/۷۵*	۰/۷۳*	-۰/۰۴	-۰/۴۷*	۰/۲۹	-۰/۶۶*	۰/۲۵	۰/۳۹*	۰/۶۰*	Eh
	۱	۰/۲۷	-۰/۲۳	-۰/۳۶*	-۰/۳۴*	۰/۴۵*	۰/۵۹*	-۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۱۵	۰/۱۰	۰/۲۳	% مواد آلی
		۱	۰/۰۳۴	-۰/۷۵*	-۰/۸۱*	-۰/۳۵*	۰/۱۲	-۰/۰۲	۰/۳۶*	-۰/۵۷*	-۰/۲۵	-۰/۵۶*	% کربنات کلسیم
			۱	۰/۲۶	-۰/۳۷	-۰/۱۹	-۰/۳۳	۰/۶۱*	-۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۲۷	۰/۵۷*	% رس
				۱	۰/۹۵*	۰/۰۳	-۰/۵۱*	۰/۰۶	-۰/۳۲*	۰/۴۶*	۰/۰۷	۰/۷۵*	Co
					۱	۰/۱۴	-۰/۳۷*	۰/۴۵*	-۰/۳۳*	۰/۵۶*	۰/۱۳	۰/۸۴*	Fe2O3
						۱	۰/۴۵*	-۰/۳۲*	۰/۰۱	۰/۸۳*	۰/۲۱	۰/۲۵	Cu
							۱	-۰/۴۷*	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۰۵	-۰/۲۷	Cd
								۱	۰/۲۲	-۰/۰۱	۰/۱۸	۰/۵۷*	Mn
									۱	-۰/۰۹	-۰/۰۷	-۰/۱۵	Pb
										۱	۰/۱۹	۰/۶۳*	Zn
											۱	۰/۴۳*	Cr
												۱	Ni

* معنی‌دار در سطح اطمینان ۰/۰۵٪.



شکل ۵- نمودار خوشه‌ای عناصر با پارامترهای فیزیکوشیمیایی

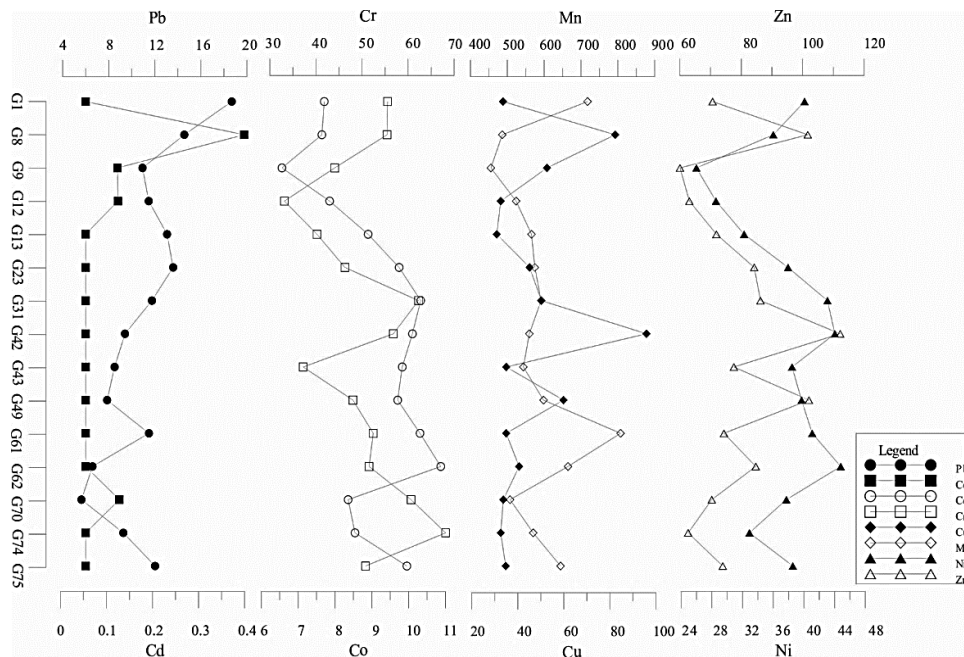
و نمودار خوشه‌ای (درختی) حاصل، عناصر مورد بررسی و عوامل فیزیکوشیمیایی مؤثر بر آن‌ها به دو شاخه اصلی تقسیم شدند (شکل ۵). در یک شاخه عناصر منگنز، کبالت، نیکل و کروم قرار دارند که غلظت آن‌ها در رسوبات وابسته به رس، اکسید آهن و Eh است. در شاخه دیگر کادمیوم، روی، سرب و مس جای دارند که حضور آن‌ها در رسوبات به کربنات کلسیم و مواد آلی (TOC) وابسته است (شکل ۵). این نمودار تأییدی بر همبستگی بین فلزات سنگین مورد

همبستگی بالا دارند. نیکل با کلیه عوامل فیزیکوشیمیایی بجز درصد کربنات کلسیم همبستگی مثبت دارد.

تحلیل خوشه‌بندی: تجزیه و تحلیل خوشه‌بندی سلسله مراتبی تراکمی (Agglomerative Hierarchical Clustering) برای تعیین گروه عناصری که با یک عامل فیزیکوشیمیایی خاص در ارتباط هستند و تمرکز و افزایش آن‌ها با یکدیگر ارتباط معنی‌دار دارد، در بستر نرم‌افزار Minitab® 17.3.1 انجام شد. بر اساس تحلیل خوشه‌بندی

جدول ۳- غلظت فلزات سنگین در رسوبات گلی دلتای زایندهرود (بر حسب ppm)

عمق	شماره نمونه	رخساره	Mn	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb	Co	Cd
۰-۱	G1	گل سیاه	۷۱۸	۷۱	۵۶	۳۴	۴۰	۱۹	۸	۰/۰۶
۷-۸	G8	گل سبز روشن	۴۸۶	۱۰۲	۵۵	۸۲	۳۶	۱۵	۸	۰/۴۰
۸-۹	G9	گل ماسه‌ای سبز روشن	۴۵۵	۶۰	۴۴	۵۳	۲۶	۱۱	۷	۰/۱۲
۱۱-۱۲	G12	گل ماسه‌ای سبز روشن	۵۲۴	۶۳	۳۳	۳۳	۲۹	۱۱	۸	۰/۱۳
۱۲-۱۳	G13	گل سبز روشن	۵۶۶	۷۲	۴۰	۳۱	۳۲	۱۳	۹	۰/۰۶
۲۲-۲۳	G23	گل قهوه ای	۵۷۵	۸۴	۴۶	۴۵	۳۸	۱۴	۱۰	۰/۰۶
۳۰-۳۱	G31	گل قهوه ای	۵۹۲	۸۶	۶۲	۵۰	۴۳	۱۲	۱۰	۰/۰۶
۴۱-۴۲	G42	گل قهوه ای	۵۶۰	۱۱	۵۷	۹۶	۴۴	۹	۱۰	۰/۰۶
۴۲-۴۳	G43	گل قهوه ای	۵۴۴	۷۸	۳۷	۳۵	۳۸	۹	۱۰	۰/۰۶
۴۸-۴۹	G49	گل قهوه ای	۵۹۸	۱۰۲	۴۸	۶۰	۴۰	۸	۱۰	۰/۰۶
۶۰-۶۱	G61	گل قهوه‌ای ژیبس‌دار	۸۰۷	۷۴	۵۲	۳۵	۴۱	۱۱	۱۰	۰/۰۶
۶۱-۶۲	G62	گل قهوه‌ای ژیبس‌دار	۶۶۵	۸۵	۵۲	۴۱	۴۵	۷	۱۱	۰/۰۶
۶۹-۷۰	G70	گل قهوه‌ای ژیبس‌دار	۵۰۷	۷۰	۶۱	۳۴	۳۸	۶	۸	۰/۱۳
۷۳-۷۴	G74	گل ماسه‌ای قهوه‌ای	۵۷۰	۶۳	۶۸	۳۳	۳۳	۹	۹	۰/۰۶
۷۴-۷۵	G75	گل ماسه‌ای قهوه‌ای	۶۴۵	۷۴	۵۱	۳۵	۳۹	۱۲	۱۰	۰/۰۶
میانگین			۵۸۷/۵	۷۹/۷۳	۵۰/۸۴	۴۶/۳	۳۷/۴	۱۰/۹۹	۹/۰۹	۰/۱۰
انحراف معیار			۹۱	۱۵/۵۲	۹/۶۱	۱۹/۵۴	۵/۴۶	۳/۳۳	۱/۲۶	۰/۰۹



شکل ۶- تغییرات غلظت عناصر سنگین (بر حسب ppm) در نمونه‌های مغزه رسوبی دلتای زایندهرود

نشان داد که رخساره‌ها و زیر محیط‌های رسوبی نقش مستقیمی در افزایش و یا کاهش غلظت عناصر ندارند و عوامل فیزیکوشیمیایی (مواد آلی، رس، کربنات کلسیم، رس، اکسید آهن و Eh) بر تغییر غلظت فلزات سنگین در رسوبات گلی موثر بوده‌اند که در زیر مورد بررسی قرار گرفتند. منگنز: بیشترین و کمترین غلظت عنصر منگنز در نمونه‌های

بررسی و عوامل فیزیکوشیمیایی می‌باشد.

غلظت و عوامل مؤثر بر میزان غلظت فلزات سنگین

در رسوبات: میانگین غلظت عناصر در نمونه‌ها بر حسب ppm به ترتیب فراوانی به صورت منگنز ۵۸۷، روی ۷۹/۷۳، کروم ۵۰/۸۴، مس ۴۶/۳۲، نیکل ۳۷/۴۰، سرب ۱۰/۹۹، کبالت ۹/۰۹ و کادمیوم ۰/۰۹۲ می‌باشد (جدول ۳). نتایج

داد (جدول ۲). نقش مواد آلی در افزایش میزان غلظت کادمیوم در نمونه‌های مورد مطالعه از کربنات کلسیم بیشتر است (جدول ۳).

کبالت: مقدار این عنصر در رسوبات مورد مطالعه بین ۷ تا ۱۱ ppm در تغییر بوده و کمترین مقدار کبالت در نمونه G9 (رخساره گل ماسه‌ای سبز روشن) و بیشترین مقدار در نمونه G62 (رخساره رخساره گل قهوه‌ای ژپیس‌دار) اندازه‌گیری شده است. میانگین و انحراف معیار میزان کبالت در رسوبات مورد بررسی به ترتیب ۹/۰۹ و ۱/۲۶ ppm به دست آمد (جدول ۳ و شکل ۶). نمودار pH و Eh کبالت (Brookins, 1988) نشان می‌دهد که این عنصر به گونه غالب Co^{2+} در رسوبات مورد بررسی وجود دارد. کبالت به دلیل جذب شیمیایی و رسوب با اکسید آهن که تابع pH می‌باشد (McBride, 1994) با آهن همبستگی مثبت نشان می‌دهد (جدول ۲). هیدروکسیدهای آهن در pH های بالاتر از ۶ می‌توانند کبالت را جذب نمایند (Bradl et al., 2005; pH در ۶ (در منطقه مورد مطالعه)، گوئیت با مساحت سطحی کم می‌تواند این عنصر را جذب نماید (Backes et al., 1995). کمپلکس کبالت با مواد آلی نسبتاً ناپایدار است. با افزایش مواد آلی در رسوبات مورد مطالعه کبالت به صورت محلول درآمده و از مقدار آن در رسوبات کاسته می‌شود (McBride, 1994; Miriam et al., 2012). کبالت با آهن و Eh همبستگی بالا و با رس همبستگی معنی‌دار مثبت و با مواد آلی همبستگی منفی نشان می‌دهد (جدول ۲). بنابراین آهن و Eh نقش زیادی در میزان غلظت کبالت در رسوبات دارند.

کروم: غلظت عنصر کروم در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۳۳ تا ۶۸ ppm متغیر بوده و بیشترین و کمترین مقدار این عنصر به ترتیب در نمونه‌های G74 (رخساره گل ماسه‌ای قهوه‌ای) و G12 (رخساره گل ماسه‌ای سبز روشن) اندازه‌گیری شده است. میانگین و انحراف معیار مقادیر این عنصر به ترتیب ۵۰/۸۴ و ۹/۶۱ ppm است (جدول ۳ و

مورد مطالعه به ترتیب مربوط به نمونه G62 (رخساره گل قهوه‌ای ژپیس‌دار) به میزان ۸۰۷ و نمونه G9 (رخساره‌ی گل ماسه‌ای سبز روشن) به مقدار ۴۵۵ ppm بوده و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده این عنصر ۵۸۷ ppm است (جدول ۳ و شکل ۶). بر اساس دیاگرام pH و Eh (Brookins, 1988) این عنصر در رسوبات مورد مطالعه به صورت Mn^{2+} وجود دارد. منگنز توسط سطوح اکسیدهای آهن آبدار جذب گردیده و بدین طریق رسوب می‌کند (Bradle et al., 2005). منگنز به واسطه وجود کانی رسی به ویژه مونت مورینیت در اغلب رسوبات حضور دارد (Kossoff et al., 2012). غلظت منگنز در شرایط احیاء بالا می‌رود و در محیط های طبیعی روی سطح رسوب تمرکز پیدا می‌کند (Langmuir et al., 2005). منگنز با رس و آهن همبستگی بالایی نشان می‌دهد و با Eh همبستگی مثبت دارد (جدول ۲). همبستگی این عنصر با رس و آهن بیانگر جذب منگنز به صورت Mn^{2+} روی رسوبات دانه‌ریز و هم رسوبی منگنز با اکسید و یا هیدروکسید آهن می‌باشد. بنابراین تمرکز منگنز در رسوبات مورد مطالعه به ترتیب متأثر از رس، هیدروکسید آهن و Eh است.

کادمیوم: میزان این عنصر در رسوبات مورد مطالعه از ۰/۱ تا ۰/۴ ppm متغیر است و بیشترین میزان مربوط به نمونه G8 (رخساره گل سبز روشن) می‌باشد. میانگین و انحراف معیار مقادیر اندازه‌گیری شده کادمیوم به ترتیب ۰/۱۰ و ۰/۰۹ ppm است (جدول ۳). کادمیوم در اکثر نمونه‌ها مقدار تقریباً مشابهی داشته و از سطح به عمق روند خاصی را نشان نمی‌دهد (شکل ۶). مطابق نمودار pH و Eh کادمیوم (Brookins, 1988)، این عنصر در نمونه‌های مورد مطالعه به فرم Cd^{2+} وجود دارد. میزان کادمیوم در رسوبات دارای مواد آلی بیشتر افزایش نشان می‌دهد (Forstner and Whittman, 1981). کادمیوم می‌تواند کمپلکس‌های کربناته باردار و خنثی نیز تشکیل دهد (Hirsch and Banin, 1990). این عنصر با میزان ماده آلی کل (TOC) همبستگی بالا و با کربنات کلسیم همبستگی معنی‌دار نشان

جدول ۴- غنی‌شدگی فلزات سنگین در نمونه‌های گلی مورد مطالعه دلتای زاینده‌رود

عمق (cm)	شماره نمونه	رخساره	Zn	Pb	Cu	Mn	Cr	Cd	Ni	Co
۱-۰	G1	گل سیاه	۱/۸۵	۲/۶۳	۱/۱۲	۱/۳۸	۱/۰۲	۰/۵۰	۰/۹۸	۰/۵۶
۸-۷	G8	گل سبز روشن	۱/۸۱	۱/۸۹	۲/۵۳	۰/۸۹	۰/۹۴	۳/۳۷	۰/۸۱	۰/۵۲
۹-۸	G9	گل ماسه‌ای سبز روشن	۱/۹۷	۱/۸۳	۲/۰۸	۱/۰۴	۰/۹۶	۱/۳۵	۰/۷۵	۰/۵۷
۱۲-۱۱	G12	گل ماسه‌ای سبز روشن	۱/۹۰	۱/۵۷	۱/۰۶	۰/۹۸	۰/۵۹	۱/۱۱	۰/۶۸	۰/۵۶
۱۳-۱۲	G13	گل سبز روشن	۱/۸۷	۱/۶۳	۰/۹۱	۰/۹۷	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۷۰	۰/۵۸
۲۳-۲۲	G23	گل قهوه‌ای	۱/۸۵	۱/۵۱	۱/۱۸	۰/۸۷	۰/۶۷	۰/۴۰	۰/۷۳	۰/۵۶
۳۱-۳۰	G31	گل قهوه‌ای	۱/۸۳	۱/۱۹	۱/۲۰	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۳۶	۰/۷۶	۰/۵۴
۴۲-۴۱	G42	گل قهوه‌ای	۱/۸۹	۰/۹۹	۲/۳۸	۰/۸۱	۰/۷۸	۰/۳۸	۰/۸۰	۰/۵۵
۴۳-۴۲	G43	گل قهوه‌ای	۱/۸۸	۰/۹۲	۰/۸۹	۰/۸۰	۰/۵۲	۰/۳۹	۰/۷۲	۰/۵۵
۴۹-۴۸	G49	گل قهوه‌ای	۱/۸۴	۰/۸۷	۰/۵۷	۰/۹۱	۰/۶۹	۰/۴۰	۰/۷۶	۰/۵۶
۶۱-۶۰	G61	گل قهوه‌ای ژئیس‌دار	۱/۸۶	۱/۲۳	۰/۸۸	۱/۱۸	۰/۷۳	۰/۳۸	۰/۷۶	۰/۵۷
۶۲-۶۱	G62	گل قهوه‌ای ژئیس‌دار	۱/۸۶	۰/۶۵	۰/۹۴	۰/۸۹	۰/۶۶	۰/۳۵	۰/۷۶	۰/۵۶
۷۰-۶۹	G70	گل قهوه‌ای ژئیس‌دار	۱/۹۱	۰/۷۲	۱/۰۲	۰/۸۹	۱/۰۱	۱/۰۶	۰/۸۳	۰/۵۵
۷۴-۷۳	G74	گل ماسه‌ای قهوه‌ای	۱/۸۲	۱/۲۲	۱/۰۲	۱/۰۳	۱/۱۷	۰/۴۷	۱/۷۵	۰/۵۹
۷۴-۷۵	G75	گل ماسه‌ای قهوه‌ای	۱/۸۹	۱/۳۲	۰/۹۰	۰/۹۷	۰/۷۳	۰/۳۹	۰/۲۳	۰/۵۷
میانگین			۱/۸۷	۰/۳۴	۱/۳۱	۰/۹۶	۰/۷۹	۰/۷۶	۰/۷۳	۰/۵۶

جدول ۵- طبقه‌بندی درجه آلودگی رسوبات بر مبنای فاکتور غنی‌شدگی

۴۰ < EF	۲۰ < EF < ۴۰	۵ < EF < ۲۰	۲ < EF < ۵	۲ > EF	فاکتور غنی‌شدگی
غنی‌شدگی فوق العاده زیاد	غنی‌شدگی بسیار زیاد	غنی‌شدگی زیاد	غنی‌شدگی متوسط	غنی‌شدگی کم	درجه غنی‌شدگی

مس: غلظت مس بین ۳۱ تا ۹۵/۹ ppm متغیر است و کمترین مقدار این عنصر در نمونه G13 (رخساره گل سبز روشن) و بیشترین مقدار در نمونه G42 (رخساره گل قهوه‌ای) اندازه‌گیری شده است. میانگین و انحراف معیار غلظت‌های این عنصر در رسوبات مورد مطالعه به ترتیب ۴۶/۳ و ۱۹/۵۴ ppm است (جدول ۳ و شکل ۶). نمودار پایداری مس بر اساس Eh و pH (Brookins, 2012) نشان می‌دهد که این عنصر در رسوبات مورد بررسی می‌تواند به سه گونه Cu، CuOH⁺ و Cu⁺ وجود داشته باشد. عنصر مس به صورت جذب سطحی به ماده آلی و رس می‌تواند در رسوبات تجمع پیدا کند (Bolt et al., 2000; Blaster et al., 2004; Algarsamy, 2009; Kosooff et al., 2012). اکسید منگنز و ماده آلی بیشترین احتمال پیوند با مس به شکل غیر تبادلی را دارند (Bradl et al., 2005). مس با ماده آلی کل (TOC) دارای همبستگی بالا و با سایر

شکل ۶). بر اساس نمودار pH و Eh کروم (Brookins, 1988)، این عنصر به صورت غالب Cr₂O₃ در رسوبات مورد بررسی وجود دارد. کروم به دلیل تشابه یونی با عنصر آهن به سهولت جانشین این عنصر می‌شود (Alloway, 2013). همچنین این عنصر به شدت جذب شیمیایی اکسیدها و هیدروکسیدها (منگنز و آهن) و کانی‌های رسی می‌گردد (Mcbride, 1994; Bradl et al., 2005; Hoseinzadeh et al., 2011). افزایش مقدار ماده آلی رسوبات و pH جذب کروم سه ظرفیتی را افزایش می‌دهد (Blaster et al., 2000; Bradl et al., 2005). کروم با رس و Eh همبستگی بالا و با ماده آلی کل (TOC)، آهن و منگنز همبستگی معنی‌دار مثبت و با کربنات کلسیم همبستگی منفی دارد (جدول ۲). در مقدار غلظت کرم در رسوبات به ترتیب رس، Eh، مواد آلی، اکسید و هیدراکسید آهن و منگنز نقش دارند.

پارامترها همبستگی خیلی کم و یا همبستگی منفی دارد (جدول ۲). بنابراین ماده‌ی آلی در جذب این عنصر نقش بیشتری نسبت به هیدرواکسید آهن دارد. **نیکل:** غلظت نیکل بین ۲۶ تا ۴۵ ppm متغیر است. کمترین و بیشترین مقدار این عنصر در رسوبات مورد مطالعه به ترتیب در نمونه‌های G9 (رخساره گل ماسه‌ای سبز روشن) و G62 (رخساره گل قهوه‌ای ژپس‌دار) اندازه‌گیری شده است و میانگین و انحراف معیار مقادیر این عنصر به ترتیب ۳۷/۴ و ۵/۴۶ ppm می‌باشد (جدول ۳ و شکل ۶). بر اساس نمودار Eh و pH نیکل (Brookins, 2012) این عنصر با گونه غالب Ni^{2+} (aq) در رسوبات مورد بررسی حضور دارد. نیکل با کانی‌های رسی و اکسیدهای آهن و منگنز هم‌رسوبی دارد (Alloway, 1994). نیکل در pH بالای ۶ جذب شیمیایی اکسیدها و رس‌های سیلیکاته‌ی لایه‌ای می‌گردد (Mcbride, 1994; Sartaj et al., 2005). این عنصر می‌تواند جذب سطحی مواد آلی شود (Refaey et al., 2017) و تحرک کمی دارد (Edeltrauda and Kyzioł, 1990) همچنین به راحتی در غلظت کم ($10 < \text{ppm}$) جذب رسوبات می‌گردد (Bradl et al., 2005). نیکل در رسوبات مورد مطالعه با عوامل فیزیکوشیمیایی به جز کربنات کلسیم همبستگی بالایی نشان می‌دهد (جدول ۲). بدین ترتیب هیدرواکسید آهن و منگنز، Eh، رس و مواد آلی در جذب عنصر نیکل در رسوبات مورد مطالعه نقش داشته‌اند.

روی: غلظت روی در نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده ۶۰ تا ۱۱۲ ppm در تغییر است. بیشترین مقدار این عنصر در نمونه G42 (رخساره گل قهوه‌ای) به میزان ۱۱۲ ppm و کمترین مقدار در نمونه G9 (رخساره گل ماسه‌ای سبز روشن) به مقدار ۶۰ ppm اندازه‌گیری شده است. میانگین و انحراف معیار مقادیر روی در رسوبات مورد بررسی به ترتیب ۷۹/۷۳ و ۱۵/۵۲ ppm می‌باشد (جدول ۳ و شکل ۶). براساس نمودار Eh و pH روی (Adeleye et al., 1995)، این عنصر به دو فرم Zn^{2+} و $ZnOH^+$ در رسوبات می‌تواند حضور داشته باشد. وجود روی در رسوبات قلیایی و کربناته به دلیل ته‌نشست هیدروکسید یا کربنات روی و یا تشکیل زینکات کلسیم نامحلول $ZnCa(OH)_4$ می‌باشد (Adriano, 2001). روی در pH بالا می‌تواند در حضور مواد آلی تشکیل کمپلکس‌های آلی دهد و یا جذب ذرات رسی شده و باعث کاهش انحلال این عنصر و افزایش آن در رسوبات شود (McBride et al., 1998; Refaey et al., 2017). روی، در نمونه‌های مورد مطالعه با ماده آلی کل (TOC) و Eh همبستگی مثبت کم، با کربنات کلسیم همبستگی منفی و با رس همبستگی نشان نمی‌دهد (جدول ۲). علی‌رغم تاثیر کربنات در تمرکز روی (Adriano, 2001)، همبستگی این عنصر با کربنات معنی‌دار نمی‌باشد.

محاسبه شاخص‌های آلودگی: نتایج محاسبه فاکتور غنی‌شدگی (EF) نمونه‌های رسوب مورد بررسی در جدول ۴ ارائه

شده است. **سرب:** کمترین مقدار این عنصر در نمونه G70 (رخساره گل قهوه‌ای ژپس‌دار) با مقدار ۶ ppm و بیشترین مقدار در نمونه G1 (رخساره گل سیاه) به میزان ۱۹ ppm است. میانگین و انحراف معیار مقادیر سرب در نمونه‌ها به ترتیب ۱۰/۹۹ و ۳/۳۳ ppm می‌باشد (جدول ۳ و شکل ۶). طبق نمودار Eh و pH سرب (Brookins, 2012)، این عنصر در رسوبات مورد بررسی به صورت گونه غالب $PbCO_3$ وجود دارد. در شرایط شیمیایی مناسب (pH بالاتر از ۶) و با افزایش میزان کربنات کلسیم این عنصر می‌تواند جانشین کلسیم موجود در شبکه کربنات‌ها گردد (Longmuir et al.,

جدول ۶- شاخص زمین انباشتگی عناصر در نمونه‌های مورد بررسی رسوبات گلی دلتای زاینده‌رود

عمق (cm)	شماره نمونه	رخساره	Zn	Pb	Cu	Mn	Cr	Ni	Cd	Co
۰-۱	G1	گل سیاه	-۰/۵۷	-۰/۰۶	-۱/۳۰	-۰/۹۹	-۱/۴۳	-۱/۴۹	-۲/۴۵	-۲/۲۸
۷-۸	G8	گل سبز روشن	-۰/۰۵	۰/۴۲	۰/۰۰	-۱/۵۵	-۱/۴۴	-۱/۶۴	۰/۴۱	۲/۲۹
۸-۹	G9	گل ماسه‌ای سبز روشن	-۰/۸۱	-۰/۸۳	-۰/۶۵	-۱/۶۵	-۱/۷۷	-۲/۱۱	-۱/۲۷	-۲/۵۱
۱۱-۱۲	G12	گل ماسه‌ای سبز روشن	-۰/۷۳	-۰/۷۷	-۱/۳۴	-۱/۴۴	-۲/۱۸	-۱/۹۸	-۱/۲۶	-۲/۲۶
۱۲-۱۳	G13	گل سبز روشن	-۰/۵۵	-۰/۵۸	-۱/۴۲	-۱/۳۱	-۱/۹۰	-۱/۸۰	-۲/۴۵	-۲/۰۸
۲۲-۲۳	G23	گل قهوه‌ای	-۰/۳۲	-۰/۵۲	-۰/۸۷	-۱/۳۱	-۱/۷۰	-۱/۵۷	-۲/۴۵	-۱/۹۴
۳۰-۳۱	G31	گل قهوه‌ای	-۰/۲۸	-۰/۷۳	-۰/۷۲	-۱/۲۷	-۱/۲۷	-۱/۳۹	-۲/۴۵	-۱/۸۶
۴۱-۴۲	G42	گل قهوه‌ای	۰/۱۰	-۱/۰۵	۰/۲۲	-۱/۳۵	-۱/۴۰	-۱/۳۵	-۲/۴۵	-۱/۸۹
۴۲-۴۳	G43	گل قهوه‌ای	-۰/۴۴	-۱/۲۰	-۱/۲۴	-۱/۳۹	-۲/۰۱	-۱/۵۵	-۲/۴۵	-۱/۹۳
۴۸-۴۹	G49	گل قهوه‌ای	-۰/۰۴	-۱/۳۱	-۰/۴۶	-۱/۲۵	-۱/۶۴	-۱/۵۰	-۲/۴۵	-۱/۹۵
۶۰-۶۱	G61	گل قهوه‌ای ژپیس‌دار	-۰/۵۰	-۰/۷۶	-۱/۲۴	-۰/۸۲	-۱/۵۲	-۱/۴۵	-۲/۴۵	-۱/۸۶
۶۱-۶۲	G62	گل قهوه‌ای ژپیس‌دار	-۰/۳۱	-۱/۵۷	-۱/۰۲	-۱/۱۰	-۱/۵۴	-۱/۳۳	-۲/۴۵	-۱/۷۹
۶۹-۷۰	G70	گل قهوه‌ای ژپیس‌دار	-۰/۵۸	-۱/۷۹	-۱/۲۹	-۱/۴۹	-۱/۳۱	-۱/۵۸	-۱/۲۳	-۲/۱۷
۷۳-۷۴	G74	گل ماسه‌ای قهوه‌ای	-۰/۷۴	-۱/۰۷	-۱/۳۴	-۱/۳۲	-۱/۱۴	-۱/۷۷	-۲/۴۵	-۲/۱۳
۷۴-۷۵	G75	گل ماسه‌ای قهوه‌ای	-۰/۵۰	-۰/۷۰	-۱/۲۵	-۱/۱۴	-۱/۵۶	-۱/۵۴	-۲/۴۵	-۱/۹۱
میانگین			۰/۴۲	-۰/۸۹	-۰/۹۳	-۱/۲۹	-۱/۵۹	-۱/۶۰	-۲/۰۲	-۲/۰۶

جدول ۷- طبقه‌بندی درجه آلودگی بر اساس شاخص زمین انباشتگی

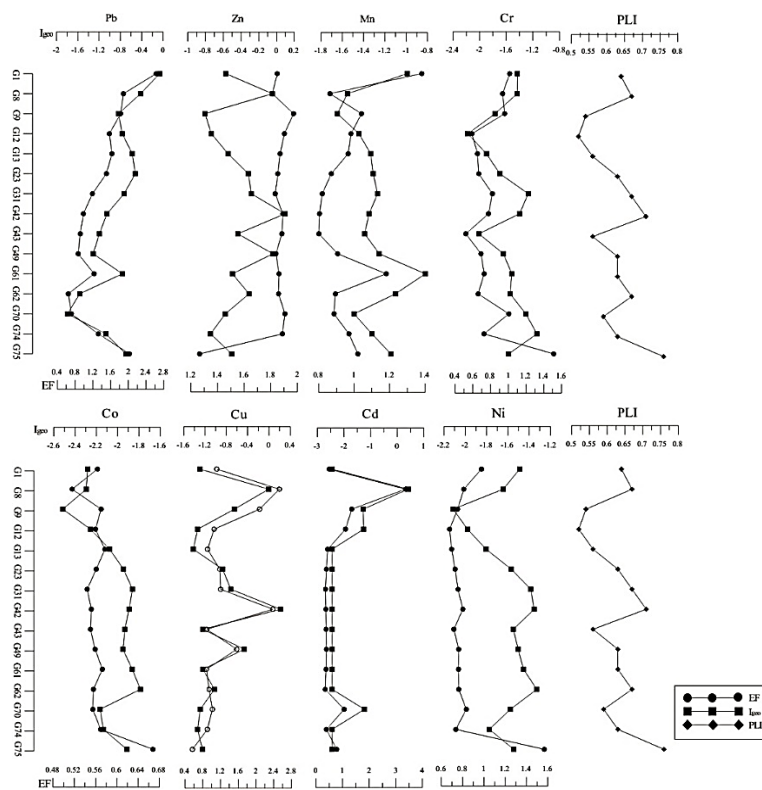
شاخص زمین انباشتگی	>	۱-۰	۲-۱	۳-۲	۴-۳	۵-۴	<۵
درجه آلودگی رسوب	غیر آلوده	غیر آلوده تا کمی آلوده	کمی آلوده	کمی آلوده تا خیلی آلوده	خیلی آلوده	خیلی آلوده تا شدیداً آلوده	شدیداً آلوده

بر اساس شاخص زمین انباشتگی عناصر روی، مس و کادمیوم در محدوده غیرآلوده تا کمی آلوده و سایر فلزات سنگین در محدوده غیرآلوده قرار می‌گیرند و به طور کلی میانگین شاخص زمین انباشتگی عناصر در رسوبات به ترتیب $Zn > Pb > Cu > Mn > Cr > Ni > Cd > Co$ می‌باشد (جدول ۶). از غلظت عناصر $Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Mn, Cd$ و Co جهت محاسبه شاخص انباشت آلودگی (PLI) فلزات سنگین در نمونه‌های مغزه رسوبی مورد مطالعه طبق رابطه‌های ۳ و ۴ استفاده شد (جدول ۸). نمونه‌های دارای مقادیر شاخص انباشتگی بیشتر از یک به عنوان آلوده در نظر گرفته شده و نمونه‌های دارای مقادیر کمتر از یک غیر آلوده محسوب می‌گردند (Bourliva et al., 2018). براساس محاسبه این

و طبقه‌بندی آلودگی بر اساس جدول ۵ (Barbieri, 2016) صورت گرفت. بر مبنای فاکتور غنی‌شدگی (EF) (Barbieri, 2016) عناصر در رده با غنی‌شدگی کم قرار می‌گیرند و فقط عنصر کادمیوم در نمونه G8 (۳/۳۷)، مس در نمونه‌های G9 (۲/۰۸) و G1 (۲/۵۳) و سرب در نمونه G1 (۲/۶۳) غنی‌شدگی متوسط دارند و میانگین میزان غنی‌شدگی برای عناصر مورد مطالعه در رسوبات به ترتیب $Zn > Pb > Cu > Mn > Cr > Cd > Ni > Co$ می‌باشد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص زمین انباشتگی (Igeo) رسوبات مورد مطالعه بر اساس رابطه ۲ در جدول ۶ ارائه شده و طبقه بندی درجه آلودگی طبق جدول ۷ (Bourliva et al., 2018) انجام شد.

جدول ۸- شاخص انباشت آلودگی در رسوبات گلی مورد بررسی

نام نمونه	G1	G8	G9	G12	G13
PLI	۰/۶۴	۰/۶۷	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۶
نام نمونه	G23	G31	G42	G43	G49
PLI	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۷۱	۰/۵۶	۰/۶۳
نام نمونه	G61	G62	G70	G74	G75
PLI	۰/۶۳	۰/۶۷	۰/۵۹	۰/۶۳	۰/۷۶



شکل ۷- مقایسه تغییرات شاخص‌های آلودگی در نمونه‌های رسوبات گلی دلتای زاینده‌رود

غنی‌شدگی همه عناصر مورد بررسی در نمونه عمقی افزایش نشان می‌دهد. تغییرات عمقی شاخص‌های غنی‌شدگی و زمین‌انباشتگی در مورد عناصر مس، کادمیوم، منگنز، سرب، کروم و تقریباً کبالت و نیکل هم‌روند می‌باشند. در تغییرات عمقی شاخص زمین‌انباشتگی روند خاصی مشاهده نمی‌شود.

مقادیر متوسط فلزات سنگین مورد بررسی در مغزه رسوبی دلتای پلایای گاوخونی با متوسط این عناصر در رسوبات گلی سطحی این پلایا و سایر پلایاهای ایران و جهان به‌منظور بررسی بیشتر صحت نتایج به‌دست آمده و به تبع آن تحلیل صورت گرفته مقایسه شده است (جدول ۹).

شاخص، نمونه‌های مورد بررسی در محدوده غیرآلوده قرار می‌گیرند و میانگین PLI نمونه‌ها ۰/۸۲ می‌باشد. بررسی تغییرات عمقی شاخص‌های آلاینده محاسبه شده (شکل ۷) نشان می‌دهد که غنی‌شدگی عناصر سرب، منگنز و کروم در نمونه‌ها از لایه‌های سطحی بیشتر بوده و با عمق کاهش می‌یابد و تنها در عمیق‌ترین نمونه مغزه افزایش نشان می‌دهد. غنی‌شدگی رسوبات نسبت به روی، کبالت و نیکل به استثنای عمقی‌ترین نمونه تقریباً در سطح و عمق یکسان است و تنها در عمیق‌ترین نمونه افزایش دارد. روند غنی‌شدگی مس و کادمیوم در نمونه سطحی کم بوده و با عمق افزایش و سپس کاهش یافته و ثابت می‌گردد.

جدول ۹- میانگین تمرکز فلزات سنگین در رسوبات پلایاهای مختلف کشور، منطقه مورد مطالعه و جهان (بر حسب ppm)

نام محل	Mn	Zn	Cr	Cu	Ni	Pb	Co	Cd	منبع
ایالات متحده Playa of Owens Lake, California	۵۵۱/۸۷	۷۲/۳۱	۲۹/۱۵	۲۳/۱۹	۱۳/۵۳	۳۱	-	-	Gill et al., 2002
ایالات متحده The Southern High Plains (SHP)	-	۵۵	۲۳/۵	۱۵/۸	۱۲/۵	۲۲/۶	-	۱/۱۰	Venne et al., 2006
پلایای دشت کرمان	-	۵۸	-	۳۲	-	۳۱/۵	-	۰/۲۹	Hamzeh et al., 2009
پلایای گاوخونی	۵۷۱/۰۱	۴۹/۹۶	-	۲۰/۱۹	۴۹/۴۷	۳۹/۲۵	۸/۱۴	۳/۵۳	Pakzad et al., 2014
مکزیک Playas de Rosarito	-	-	۶۵/۷	۲۵/۶	۷۷/۵	۱۲/۱	-	۰/۱	Pastrana-Corral et al., 2017
پلایای میقان	۴۲۴	-	-	-	-	۱۲۳	-	۶/۰	Safari Sinangani et al., 2018
پلایای نیریز	-	-	۱۵۱۷/۲	-	۳۷/۸	-	۴/۲	-	Salmanpour et al., 2018
پلایای میقان	-	۵۰	۵۳	۲۳	۳۵	۱۳	-	۰/۲۱	Ghadimi et al., 2021
شیلی Playa Las Petroleras	۵۶۸/۵۶	۱۵۹/۷۱	۲۸/۱۹	۱۱۹۱/۳۸	۳۹/۲۸	۸۶/۹۴	۱۵/۱۱	۲/۷۱	Lam et al., 2022
پلایای گاوخونی	۵۸۷/۵	۷۹/۷۳	۵۰/۸۴	۴۶/۳	۳۷/۴	۱۰/۹۹	۰/۰۹	۰/۰۹	مطالعه حاضر

لازم به ذکر است که مطالعات محدودی روی پلایاها در ایران و سایر کشورهای جهان به دلیل دشواری نمونه برداری از این مناطق صورت گرفته است. بر اساس مقایسه انجام شده، متوسط مقدار منگنز در رسوبات مغزه با بقیه پلایاها تقریباً یکسان است. میانگین میزان روی با پلایای Playa of Owens Lake of کالیفرنیا ایالات متحده تقریباً برابر بوده و از رسوبات سطحی پلایای گاوخونی و بقیه پلایاها به استثنای پلایای Playa Las Petroleras شیلی بیشتر است. مقدار متوسط کروم در رسوبات مورد بررسی با پلایای میقان و Playas de Rosarito کمزیک تقریباً برابر بوده و از بقیه پلایاها به استثنای پلایای نیریز تقریباً به اندازه بیش از دو برابر بیشتر است. میزان متوسط این عنصر در پلایای نیریز زیاد می باشد. مقدار متوسط مس از تمام پلایاها به جز پلایای Playa Las Petroleras شیلی بیشتر است که دلیل مقدار بسیار زیاد مس در این پلایا می تواند ناشی از گسترش معادن بزرگ این عنصر در کشور شیلی باشد. میزان متوسط نیکل با پلایاهای نیریز و میقان همخوانی دارد و از رسوبات سطحی پلایای گاوخونی و به میزان بسیار بیشتر از پلایای

Playas de Rosarito کمزیک کمتر است، ولی از مقدار متوسط این عنصر در بقیه پلایاها بیشتر می باشد. مقدار متوسط سرب با پلایاهای میقان و Playas de Rosarito کمزیک تقریباً برابر می باشد، ولی از میزان این عنصر در بقیه پلایاها کمتر است. مقدار متوسط کبالت در رسوبات زیرسطحی مورد بررسی پلایای گاوخونی فقیرشدگی نشان می دهد و از رسوبات سطحی این پلایا و بقیه پلایاهای بررسی شده بسیار کمتر می باشد. میزان متوسط کادمیوم با مقادیر این عنصر در پلایای Playas de Rosarito کمزیک و The Southern High Plains (SHP) ایالات متحده تقریباً برابر می باشد و به ترتیب از پلایاهای میقان، دشت کرمان، Playa Las Petroleras شیلی، رسوبات سطحی پلایای گاوخونی و پلایای میقان کمتر است.

نتیجه گیری

بر اساس ویژگی های رسوبات مغزه رسوبی مورد مطالعه، رخساره های گل سیاه رنگ و سبز رنگ در زیر محیط حاشیه کانال و در شرایط آب ساکن و احیاء، رخساره های گل

مؤثری در جذب و تبادل کاتیونی در رسوبات و رخساره‌ها ایفا نموده‌اند. بر اساس شاخص‌های آلودگی محاسبه شده شامل غنی‌شدگی (EF)، زمین‌انباشتگی (Igeo) و انباشت آلودگی (PLI)، رسوبات نسبت به عناصر مورد بررسی آلودگی نشان نمی‌دهند. بنابراین عوامل فیزیکوشیمیایی، وجود رخساره‌های گلی، زیرمحیط‌های رسوبی و گذشت زمان باعث افزایش تمرکز فلزات سنگین به میزان آلوده‌کنندگی رسوبات نشده است. از آنجایی که تغییرات آب و هوایی کنترل‌کننده فرسایش و انتقال رسوبات به محیط‌های پلایایی در طی زمان می‌باشند، بنابراین انجام مطالعات سن‌سنجی روی توالی رخساره‌های رسوبی جهت بازسازی آب و هوای دیرین منطقه پیشنهاد می‌گردد.

تقدیر و تشکر

از حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه اصفهان قدردانی می‌گردد.

ماسه‌ای و ماسه گلی در کانال انشعابی در شرایط آب جریانی و ساکن، رخساره‌های گل قهوه‌ای رنگ در دریاچه کم عمق و شرایط آب ساکن و اکسیدان و گل قهوه‌ای ژپس‌دار در شرایط آب ساکن کم عمق و اکسیدان و درجه اشباع بالای آب در پلایای گاوخونی ته‌نشست شده‌اند. تغییرات میزان pH عمدتاً وابسته به میزان کربنات رسوبات می‌باشد. رخساره‌های گلی تیره رنگ که دارای مقدار مواد آلی بیشتری نیز می‌باشند، Eh پایین‌تری دارند. رخساره‌هایی که دارای مواد آلی فراوان می‌باشند، درصد گل بیشتری نیز دارند. مقدار کربنات کلسیم رسوبات تابع نوع رخساره است به طوری که رخساره گلی دارای بیشترین مقدار کربنات و رخساره ماسه‌ای دارای کمترین مقدار می‌باشد. عوامل فیزیکوشیمیایی Eh، مواد آلی، کربنات کلسیم، رس و اکسید آهن در فراوانی غلظت عناصر در رسوبات گلی نقش دارند. رس، اکسید آهن و Eh با تمرکز عناصر منگنز، کبالت، نیکل و کروم و همچنین غلظت کادمیوم، روی، سرب و مس با میزان کربنات کلسیم و مواد آلی مرتبط می‌باشند. تغییر شرایط اکسیدان نقش

References

- Adeleye, S.A., Rautiu, R., White, D.A., Clay, P.G., 1995. Clay minerals as sorbents for nuclear reactor activation products. *Journal of Materials Science* 30(3), 583-586.
- Adriano, D.C., 2001. Trace elements in terrestrial environments: Berlin, Springer, 867 p.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229(3-4), 211-238.
- Algarsamy, R., 2009. Geochemical variability of copper and iron in Oman Margin sediments: *Microchemical Journal* Elsevier 91, 111-117.
- Alloway, B.J., 2013. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. Springer, 613 p.
- Barbieri, M., 2016. The importance of enrichment factor (EF) and geoaccumulation index (Igeo) to evaluate the soil contamination. *Journal of Geology & Geophysics* 5(237), 1-4.
- Blaster, P., Zimmermann, S., Luster, J., Shoty, W., 2000. Critical examination of trace element enrichment and depletion in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in Swiss forest soil, *Science Total Environment* 249, 257-280.
- Blazevic, M.A., Kirby, M.E., Woods, A.D., Browne, B.L., Bowman, D.D., 2009. A sedimentary facies model for glacial-age sediments in Baldwin Lake, Southern California. *Sedimentary Geology* 219(1-4), 151-168.
- Bolt, G.H., Bruggenwert, M.G.M., 1976. Soil chemistry: New York, Elsevier, 297 p.
- Bourliva, A., Kantiranis, N., Papadopoulou, L., Aidona, E., Christophoridis, C., Kollias, P., Fytianos, K., 2018. Seasonal and spatial variations of magnetic susceptibility and potentially toxic elements (PTEs) in road dusts of Thessaloniki city, Greece: A one-year monitoring period. *Science of the Total Environment* 639, 417-427.
- Bradl, H.B., Kim, C., Kramar, U., Stiiben, D., 2005. Interactions of heavy metals: in H. B. Bradl, *Metals in the environment: Germany*, Elsevier, v. 6, p. 28- 148.

- Brookins, D. G, 1988, Eh-pH diagrams for geochemistry: Berlin, Springer-Verlag, 176 p.
- Brookins, D.G., 2012. Eh-pH diagrams for geochemistry. Springer Science & Business Media, 176 p.
- Costa, C., Reis, A.P., Ferreira da Silva, E., Rocha, F., Patinha, C., Dias, A.C., Sequeira, C., Terroso, D., 2012. Assessing the control exerted by soil mineralogy in the fixation of potentially harmful elements in the urban soils of Lisbon, Portugal. *Environmental Earth Sciences* 65, 1133-1145.
- Copper, M.L., 2006. Luminescence and radiocarbon chronologies of playa sedimentation in the Murray Basin, southeastern Australia. *Quaternary Science Reviews* 25(19-20), 2594-2607.
- Decima, A., McKenzie, J.A., Schreiber, B.C., 1988. The origin of "evaporitive" limestones; an example from the Messinian of Sicily (Italy). *Journal of Sedimentary Research* 58(2), 256-272.
- Dean, W.E., 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology* 44(1), 242-248.
- Edeltrauda, H., Kyziol, J., 1990. Clays and clay minerals as the natural barriers for heavy metals in pollution mechanisms illustrated by polish rivers and soils. *Themenband Umweltgeologie* 83, 163-176.
- Folk, R.L., 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*: Hemphill Publishing Company, Austin, 182 p.
- Forstner, U. Wittmann, G.T., 1981. *Metal Pollution in Aquatic Environment*. 2nd Edition, Springer-Verlag, Berlin, 486 p.
- Ghadimi, F., Hajati, A., Sabzian, A., 2021. The role of Mineral Salts Company in pollution of Mighan playa sediments with heavy metals by contamination indices and multivariate analysis methods, Arak, Iran, *International Journal of Mining and Geo-Engineering* 55(2), 117-124.
- Gill, T.E., Gillette, D.A., Niemeyer, T., Winn, R.T., 2002. Elemental geochemistry of wind-erodible playa sediments, Owens Lake, California. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms* 189, 209-213.
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., 2007. Soil sampling and methods of analysis. *Earth Sciences, Environment and Agriculture*, 1264 p.
- Hamzeh, M., Mirzaee, M., Mozaffari, H., 2009. Concentrations of Pb, Zn, Cu and Cd and their distribution in the urban environment of Kerman, Iran. *Journal of Environmental Science and Technology* 11(3), 161-177. (In Persian)
- He, C., Bartholdy, J., Christiansen, C., 2012. Clay mineralogy, grain size distribution and their correlations with trace metals in the salt marsh sediments of the Skallingen barrier spit, Danish Wadden Sea. *Environmental Earth Sciences* 67, 759-769.
- Hirsch, D., Banin, A., 1990. Cadmium speciation in soil solutions. *Journal of Environmental Quality* 19, 366-372.
- Hoseinizadeh, G.R., Azarpour, E., Motamed, M.K., Ziaeidoustan, H., Moraditochae, M., Bozorgi, H.R., 2011. Heavy metals phytoremediation management via organs of aquatic plants of Anzali international lagoon (Iran). *World Applied Sciences Journal* 14(5), 711-715.
- Kossoff, D., Hudson-Edwards, A.K., Dubbin, W.E., 2012. Major and trace metal mobility during weathering of mine tailing: Implications for floodplain soils. *Applied Geochemistry* 27, 562-576.
- Lam, E.J., Urrutia, J., Bech, J., Herrera, C., Montofré, Í.L., Zetola, V., Álvarez, F.A., Cánovas, M., 2022. Heavy metal pollution index calculation in geochemistry assessment: a case study on Playa Las Petroleras. *Environmental geochemistry and health*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01272-2>
- Langmuir, D., Chrostowski, P., Vigneault, B., Chaney, R., 2005. Issue paper on the environmental chemistry of metals. U.S. Environmental Protection Agency, Researchreport 51(6), 106.
- Lindholm, C.R., 1987. *A practical approach to sedimentology*. Springer, 279 p.
- Liu, A., Gonzalez, R.D., 1999. Adsorption/desorption in a system consisting of humic acid, heavy metals, and clay minerals. *Journal of Colloid and Interface Science* 218(1), 225-232.
- McBride, G., 1994. Investigation of contaminated sheep dipping sites in the Waikato: Proceeding of Wasteminz, Annual Conference, 129-137.

- Micó, C., Recatala, L., Peris, M., Sanches, J., 2008. Discrimination of lithogenic and anthropogenic metals in calcareous agricultural soils. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 17, 467-485
- Miriam, I.N., Peter, O., Maria, E.N., Jon Petter, G., 2012. Metal speciation in rivers affected by enhanced soil erosion and acidity. *Applied Geochemistry Elsevier* 27, 906-916.
- Muller, G., 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal* 2, 108-118.
- Nakayama, M.M.S., Ikenaka, Y., Muzandu, K., Choongo, K., Oroszlany, B., Teraoka, H., Mizuno, N., Ishizuka, M., 2010. Heavy Metal Accumulation in Lake Sediments, Fish (*Oreochromis niloticus* and *Serranochromis thumbergi*), and Crayfish (*Cherax quadricarinatus*) in Lake Itzhitezhi and Lake Kariba, Zambia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 59(2), 291-300.
- Neyestani, M.R., Bastami, K.D., Esmaeilzadeh, M., Shemirani, F., Khazaali, A., Molamohyeddin, N., Firouzbakht, M., 2016. Geochemical speciation and ecological risk assessment of selected metals in the surface sediments of the northern Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin* 109(1), 603-611.
- Pakzad, H.R., Fayazi, F., 2007. Sedimentology and stratigraphic sequence of the Gavkhoni playa lake, SE Esfahan, Iran. *Carbonates and Evaporites* 22(2), 93-100.
- Pakzad, H.R., Pasandi, M., Rahimi, H., 2014. Distribution of heavy metals in the clastic fine-grained sediments of Gavkhuni playa lake (Southeast of Isfahan, Iran). *Environmental Earth Sciences* 71, 4683-4692.
- Pastrana-Corral, M.A., Wakida, F.T., Temores-Peña, J., Rodriguez-Mendivil, D.D., García-Flores, E., Piñon-Colin, T.D.J., Quiñonez-Plaza, A., 2017. Heavy metal pollution in the soil surrounding a thermal power plant in Playas de Rosarito, Mexico. *Environmental Earth Sciences* 76, 583.
- Rahimi, H., Pakzad, H.R., Pasandi, M., 2012. Studies on the total and exchangeable concentrations of Zn, Pb, Co and Cd in fine-grained sediments of Gavkhuni Playa Lake (southeast of Isfahan). *Environmental Sciences* 9(4), 45-58. (In Persian)
- Refaey, Y., Jansen, B., Parsons, J.R., de Voogt, P., Bagnis, S., Markus, A., Kalbitz, K., 2017. Effects of clay minerals, hydroxides, and timing of dissolved organic matter addition on the competitive sorption of copper, nickel, and zinc: A column experiment. *Journal of environmental management* 187, 273-285.
- Robinson, P., 1980. Determination of calcium, magnesium, manganese, strontium, sodium and iron in the carbonate fraction of limestones and dolomites. *Chemical Geology* 28, 135-146.
- Safari Sinegani, M., Safari Sinegani, A.A., Hadipour, M., 2018. Sources and spatial distribution of lead (Pb) and cadmium (Cd) in saline soils and sediments of Mighan Playa (Iran). *Lakes & Reservoir* 23(2), 117-129.
- Salmanpour, A., Salehi, M.H., Mohammadi, J., 2018. Distribution of Cr, Ni and Co in soils and rocks of Neyriz area (Iran): the influence of ophiolitic formations. *Archives of Agronomy and Soil Science* 64(8), 1106-1118.
- Sartaj, M., Fath Elahi F., Filizadeh, Y., 2005. An investigation of the evolution of distribution and accumulation of heavy metals (Cr, Ni, Cu, Cd, Zn and Pb) in Anzali Wetland's Sediments. *Iranian Journal of Natural Resources* 58(3), 623-634. (In Persian)
- Sultan, K., 2010. Clay mineralogy of central Victorian (Creswick) soils: clay mineral contents as a possible tool of environmental indicator. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 15, 339-356.
- Taylor, S.R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28(8), 1273-1285.
- Venne, L.S., Cobb, G.P., Coimbatore, G., Smith, L.M., McMurry, S.T., 2006. Influence of land use on metal concentrations in playa sediments and amphibians in the Southern High Plains. *Environmental Pollution* 144, 112-118.

The evaluation of heavy metals in relation to physicochemical parameters of mud sediments in a core sediment from the Gavkhuni playa lake

Hamid Reza Pakzad^{*1}, Mehrdad Pasandi¹, Mohammad Nemati Varnosfaderany²,
Fereshteh Khodabandelou¹

¹Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

²Department of Environment, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

*Corresponding author: hpakzad@sci.ui.ac.ir

Abstract

The Gavkhuni playa is located 130 km southeast of Isfahan. This playa consists of three mud, sand and salt flats. The mud flat mainly covers northern part of the playa (the Zayandehrud delta). A sediment core was drilled in order to study heavy metals pollution in the subsurface mud sediments of the Zayandehrud delta. Accordingly, 7 facies including black mass mud, brown mass mud, black mass sand mud, brown sand mud, light green mass mud, light green sand mud and brown gypsum bearing mud, and 5 sub-environments of branching canals, canal margin, lake and playa were identified. To determine role of the physicochemical factors in concentration changes and pollution of the heavy metals in the facies, granulometry of the sediments was carried out through wet sieving and hydrometric methods. Eh and pH, calcium carbonate and organic matter contents and heavy metals concentration in the sediments were measured as well. Average concentrations of the heavy metals (in ppm) in order of their abundances are Mn (576.46), Zn (79.73), Cr (50.84), Cu (46.32), Ni (37.40), Pb (10.99), Co (09.09) and Cd (0.092). According to the correlation between the heavy metals and physicochemical parameters and also cluster analysis, the retention of Mn, Co, Ni and Cr has been affected by clay, Fe oxi-hydroxides and Eh whereas the contents of calcium carbonate and organic matter have been effective in the adsorption of Cd, Zn, Pb and Cu. The indices of sediment pollution to heavy metals including the Enrichment Index (EF), Geoaccumulation Index (Igeo) and Pollution Accumulation Index (PLI) indicate that despite changes in the sedimentation condition, sediments of the drilled core show no pollution. Based only on the Igeo index, the sediment samples show little pollution to Zn, Cu and Cd.

Keywords: Sedimentology, Heavy metal contamination, Zayandehrud delta, Sedimentary core, Gavkhuni Playa Lake