

ارزیابی ریسک اکولوژیک پسماندهای حفاری تونل آزادراه تهران- شمال بر رودخانه چالوس

زهرا قربانپورا^۱، عزیز عابسی^{۱*} و فاطمه کاردل^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۳)

چکیده

مواد حفاری شده از تونل آزادراه تهران- شمال که طبق برآورد مهندسان پروژه بالغ بر ۲/۵ میلیون متر مکعب است، متأسفانه از ابتدا در فضای باز در کنار رودخانه و بدون در نظر گرفتن ضوابط زیست محیطی دپو شده است. طی سال‌های اخیر عواملی همچون هوازدگی و شسته شدن مواد حفاری شده توسط بارش و تخلیه زه آب تونل به محیط، باعث آلودگی و کاهش کیفیت آب رودخانه چالوس شده است. در تحقیق حاضر ریسک اکولوژیک ورود آلاینده‌های معدنی از مواد حفاری شده به این رودخانه مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق از مواد حفاری شده و رسوبات ۵ نقطه رودخانه و حاشیه آن در طول یک سال نمونه برداری شده است. از میان آلاینده‌های موجود نیکل، کادمیوم و مس مورد بررسی قرار گرفته است. قرائت نمونه‌ها نشان می‌دهد که تقریباً ۱۵ درصد از نمونه‌ها دارای آلودگی زیاد، ۶۰ درصد فاقد آلودگی و ۲۵ درصد از نمونه‌ها دارای آلودگی متوسط هستند. همچنین تمامی نمونه‌ها دارای ریسک اکولوژیکی با خطر کم تا متوسط برآورد شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: تونل، آزادراه تهران- شمال، فلزات سنگین، ریسک محیط زیستی.

۱. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، ایران

۲. گروه علوم محیط زیست، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، بابل، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: oabessi@nit.ac.ir

مقدمه

در تعاریف قدیمی تونل‌ها راهروهای طویل زیرزمینی تعریف شده‌اند که از یک یا هر دو طرف به هوای آزاد مرتبط هستند و برای رسیدن به اهداف متفاوتی حفر می‌شوند. تونل‌ها معمولاً از زیر شهرها، رودخانه‌ها و از میان کوه‌ها عبور می‌کنند. تونل‌ها را به‌طور کلی می‌توان به سه دسته تونل‌های حمل‌ونقل، تونل‌های معدنی و تونل‌های انتقال آب و فاضلاب دسته‌بندی کرد (۱۲). براساس مطالعات انجام شده، اولین تونل‌ها در عصر حجر با وسایل حفاری بسیار ابتدایی ساخته شده‌اند. در ایران نیز حفر تونل از چند هزار سال قبل، زمانی که اولین قنات‌ها برای استحصال آب زیرزمینی حفر شد، آغاز شده‌اند. جاده‌ها مهم‌ترین زیرساخت‌های اصلی توسعه یک کشور محسوب می‌شوند و نقش مهمی در رونق اقتصادی کشورها بر عهده دارند. جاده‌کشی برای حمل‌ونقل و تردد و نیز عبور دکل‌های برق و لوله‌های نفت و گاز، احداث کانال‌های آب، سدسازی و ... تقریباً تمام مناطق کوهستانی کشور را تحت تأثیر قرار داده است و کمتر کوهی را در کشور می‌توان یافت که در آن جاده‌ای احداث نشده باشد. احداث راه، عامل توسعه محسوب شده و به خودی خود مخرب نیست. اما احداث جاده‌ها بدون توجه به دستورالعمل‌های نگهداری مناطق حفاظت شده و منابع طبیعی و عدم رعایت نکات فنی، ممکن است به یک عامل جدی در تخریب محیط‌های طبیعی تبدیل شود. در احداث جاده‌های کوهستانی ابتدا لازم است ضرورت آن از دیدگاه اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و امنیتی تبیین و حساسیت‌های اکولوژیکی و محیط زیستی منطقه، مورد بررسی قرار گیرد، آنگاه جاده‌کشی همراه با مسیریابی مناسب و رعایت کامل نکات فنی صورت گیرد. متأسفانه بسیاری از طرح‌های راه‌سازی بدون در نظر گرفتن ملاحظات محیط زیستی انجام شده و این موضوع تخریب جبران ناپذیر خاک و آسیب به منابع آب و حیات گیاهی و جانوری را سبب می‌شود.

خواجوی و سلحشور (۱۱) با مطالعه تأثیرات منفی پروژه‌های تونل‌سازی بر محیط‌زیست راهکارهایی برای کاهش

تأثیرات منفی پروژه‌های تونل‌سازی بر محیط زیست ارائه داده‌اند. با توجه به گسترش احداث پروژه‌های تونل‌سازی و آثار مخربی که این نوع پروژه‌ها بر محیط پیرامون خود برجا می‌گذارند، آنها تأکید کردند که ارزیابی و پایش محیط زیستی پروژه‌های تونل‌سازی در تمام مراحل طراحی، ساخت و بهره‌برداری، ضرورتی اجتناب ناپذیر است (۱۱). ریتر و همکاران در سال ۲۰۱۳ مطالعات جامعی برای برنامه‌ریزی و سازماندهی مصالح خارج شده از تونل انجام داده‌اند. در این مطالعه احداث تونلی پایدار و رضایت‌بخش عنوان شده که در طراحی آن مسائل اجتماعی و اقتصادی در کنار مسائل محیط زیستی در نظر گرفته شود (۲۰). برنامه‌ریزی برای سازماندهی مواد حفاری شده در حین ساخت تونل، از تلمبار زیاله جلوگیری کرده، منابع معدنی و انرژی را حفظ می‌کند و برخی از هزینه‌های پروژه را کاهش می‌دهد (۱۸). استفاده مجدد از مواد حفاری شده تونل به‌عنوان مثال در ساخت خاکریزها یا سنگدانه بتن و شات کریت می‌تواند باعث حفظ منابع تجدیدنپذیر شده و از انباشت مواد زائد جلوگیری کند. این موضوع، محدوده اثرات منفی در مجاورت پروژه را کاهش داده و باعث کاهش مصرف انرژی، تردد و حمل‌ونقل و نیز کاهش هزینه ذخیره‌سازی می‌شود (۴). در تونل تونل گوتهارد و لچبرگ در کوه‌های آلپ برای اولین بار در مقیاس بزرگ، از مواد حفاری شده به‌عنوان سنگدانه در بتن و شات کریت استفاده شده است (۱۸). در قوانین اتحادیه اروپا تأکید شده است که در شرایطی که استفاده از این مواد ممکن نباشد، لازم است ابتدا مصالح حفاری شده توسط زمین‌شناسان مورد ارزیابی قرار گرفته و ویژگی‌های آن مشخص شود تا در نهایت بر اساس مشخصات، این مواد طبقه‌بندی شده و برای دفع ایمن آن در محیط برنامه‌ریزی شود (۱۸).

بسیاری از شهرها و مراکز صنعتی و کشاورزی دنیا برای بهره‌بردن از منابع آب معمولاً در نزدیکی رودخانه‌ها برپا شده‌اند. رودخانه‌ها همواره به‌عنوان یک مجرای طبیعی برای دفع پساب‌های ناشی از فعالیتهای انسانی مورد استفاده قرار می‌گیرند

(Inductively Coupled Plasma) (ICP) بیانگر حضور انواع فلزات سنگین با غلظتی افزون بر غلظت میانگین پوسته زمین و سنگ شیل در این مواد است. فلزات سنگین نظیر کادمیوم، کروم، روی، نیکل، مس، منگنز، آهن، وانادیوم و جیوه و ... با توجه به پایداریشان در محیط، سمیت و خاصیت سرطان‌زایی از جمله آلاینده‌های خطرناک محیط زیست تلقی می‌شوند. از این رو پایش کیفی منابع آب ناشی از فعالیت‌های انسانی بیشتر منوط به مطالعه نحوه و نوع آلودگی محیط‌های طبیعی به این گونه مواد است. در ایران تاکنون مطالعات بسیاری به‌منظور ارزیابی وضعیت کیفی آب‌های سطحی ناشی از فعالیت‌های توسعه‌ای در امتداد حوزه آبریز انجام گرفته است. پساب صنایع، زه‌آب فعالیت‌های معدنی و شیرابه اماکن دفن زباله‌های شهری اصلی‌ترین منابع ورود آلاینده‌های سمی بالاخص فلزات سنگین به آب‌های سطحی ارزیابی شده‌اند.

میرزایی و همکاران (۱۵) غلظت فلزات سنگین (کادمیوم، مس، منگنز، نیکل، سرب و روی) در رسوبات رودخانه زاینده رود را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق حاکی از میزان بالای غلظت کادمیوم، بیشتر از استانداردهای جهانی در رسوبات این رودخانه است که ناشی از صنایع آبکاری و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در مناطق بالادست آن است. قروه و همکاران (۶) با بررسی فراوانی حضور فلزات سنگین در رسوبات رودخانه زاینده‌رود به این نتیجه رسیدند که میزان حضور کادمیوم در رسوبات این رودخانه نگران‌کننده و فراتر از استاندارد است. ناصحی و همکاران (۱۷) به بررسی میزان تجمع فلزات سنگین از جمله جیوه در رودخانه ارس پرداختند. طبق نتایج به‌دست آمده بازه‌هایی از این رودخانه به سه گروه با آلودگی بالا، آلودگی متوسط، آلودگی کم تقسیم شده‌اند (۱۷). حسینی زارع و همکاران (۹) کیفیت آب رودخانه کارون را از نظر حضور فلزات سنگین کروم، سرب، کادمیوم، مس، روی، منگنز و آهن بررسی کردند. با توجه به اینکه ۹۰ درصد آب شرب مردم استان خوزستان از منشأ رودخانه کارون است، نتایج به‌دست آمده با استانداردهای آب شرب مقایسه شد. نتایج نشان

(۳). در سال‌های دور به‌دلیل جمعیت پایین و محدود بودن آلاینده‌های ورودی، رودخانه‌ها توانایی خودپالایی خوبی داشته و می‌توانستند اثرات آلودگی‌ها را به‌تدریج از بین ببرند (۲۲). امروزه اما به‌دلیل تخلیه انواع فاضلاب‌ها و مواد زائد جامد شهری، صنعتی و معدنی به رودخانه‌ها (۱۶) و همچنین ورود شیرابه مکان‌های تلمبار زباله‌های شهری و باطله‌های صنعتی و معدنی، آلودگی منابع آب از همیشه گسترده‌تر و استفاده از آنها محدودتر شده است. در بسیاری از جوامع صنعتی و کشورهای محدودتر شده، اثرات زیان‌بخش آلودگی آب‌های سطحی سال‌هاست که نمایان شده و حالت جدی‌تری به‌خود گرفته است (۱۵ و ۲۱). آزادراه تهران - شمال نیز که در بخش زیادی از مسیر خود در مجاورت رودخانه چالوس در حال احداث و بهره‌برداری است، از جمله فعالیت‌هایی است که تشدید ورود آلودگی به آب‌های سطحی این حوزه را به‌دنبال داشته است. حفاری تونل‌های آزادراه با وجود تمام مزایای خود به‌دلیل عدم رعایت نکات محیط زیستی بالاخص در ارتباط با دفع مصالح حفاری شده، باعث کدورت شدید آب رودخانه چالوس و کاهش کیفیت ظاهری آن شده است. در پروژه تونل‌های آزادراه مواد حفاری شده که طبق برآورد مهندسان بالغ بر ۲/۵ میلیون متر مکعب است، از سال‌های ابتدایی آغاز این پروژه در فضای باز، مسیل‌ها و دره‌های اطراف و بدون درنظر گرفتن ضوابط فنی تلمبار شده‌اند. هوازگی و شسته شدن مواد حفاری شده بر اثر فعال شدن مسیل‌ها حین بارش باران و برف و تلمبار مواد در حاشیه رود و تخلیه زه‌آب‌های تونل به آن، درنهایت باعث ورود انواع آلاینده‌ها با منشأ مواد حفاری شده به رودخانه چالوس شده است. به این ترتیب تونل‌سازی در میانه حوزه آبریز در کنار سایر عوامل، باعث شده که آب رودخانه چالوس بعد از هر بارش در منطقه تیره شده و کیفیت آن به‌شدت افت کند. بررسی‌های اولیه، بیانگر حضور ناچیز موادی با منشأ آلی در مواد حفاری شده است (۷)، این در حالی است که اندازه‌گیری عناصر در بافت مواد حفاری شده به روش طیف سنجی پلاسما جفت شده القایی

مجموعه‌ای از شاخص‌های مرتبط مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رود چالوس رودخانه‌ای دائمی در غرب استان مازندران است که از دامنه شمالی ارتفاعات کندوان و طالقان سرچشمه گرفته و پس از طی بیش از ۷۲ کیلومتر در کنار چالوس در نزدیکی ده فرج‌آباد به دریای خزر می‌ریزد. این رود با دو شاخه اصلی زانوس و میخ‌ساز و شاخه‌های فرعی خود، دارای یک حوضه آبریز جنگلی و کوهستانی و در مناطقی با رژیم یخچالی است. مسیر این رود کوهستانی بوده و بستر رود باریک و جریانش تند و سیلابی است. منطقه مورد بررسی از پل زنگوله به سمت شمال و دربرگیرنده مناطق حاشیه تونل آزادراه تهران-شمال است. طی فرایند ساخت آزادراه تهران شمال، طولی بالغ بر ۱۰ کیلومتر تونل حفاری شده و تقریباً بیش از ۲/۵ میلیون مترمکعب مواد سنگی از کوه برداشت و در مناطق مجاور به صورت موقت و دائمی انباشت شده است. رودخانه چالوس، رودخانه به نسبت پر آبی با حوزه آبریز وسیع در حدود ۱۶۸۳/۵۵ کیلومتر مربع است. مسیر اصلی رودخانه شرقی-شمالی و طول آن ۷۴/۲۲ کیلومتر تا پایاب است. میانگین حداقل آبدهی این رودخانه ۶-۷ متر مکعب بر ثانیه مربوط به ماه دی و بهمن است و حداکثر آبدهی آن ۲۶ مترمکعب بر ثانیه در ایستگاه پل زغال اندازه‌گیری شده است. همچنین دبی متوسط این رودخانه ۱۳/۵ متر مکعب بر ثانیه است (۲۶). این رودخانه یکی از مهم‌ترین رودخانه استان مازندران از نظر شیلاتی بود و از نظر زیست‌محیطی یکی از پنج رودخانه تحت عنوان رودخانه‌های حفاظت شده در شورای عالی محیط زیست محسوب می‌شود. از نظر زمین شناسی رودخانه چالوس در مسیر عبور خود بیشتر از سنگ‌های آهکی، دولومیتی و ماسه‌سنگ عبور می‌کند. کیفیت آب رودخانه‌هایی که حوزه آبریز آنها عمدتاً سازندهای آهکی

می‌دهند که غلظت تعدادی از این فلزات زیر حد استاندارد و مطلوب بوده و برای سایرین غلظت عناصر بالا و سطح خطر بسیار جدی است. تیموری و همکاران (۲۷) به ارزیابی غلظت عناصر بالقوه سمی در رسوبات رودخانه گرگان‌رود در محدوده شهر گنبد پرداختند. در این مطالعه آلودگی کادمیوم، روی، نیکل، مس، منگنز، روی و آرسنیک با نمونه‌برداری از رسوبات بستر گرگان‌رود و توسعه دو معیار ضریب غنی‌شدگی و درجه آلودگی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این رودخانه آرسنیک با غنی‌شدگی به نسبت شدید و بقیه عناصر با میزان غنی‌شدگی اندک ارزیابی شده‌اند. همچنین مشاهده شده است که درجه آلودگی از بالادست رودخانه به سمت پایین دست افزایش یافته که بیشترین آن مربوط به رسوبات محدوده شهر گنبد است. مغزی و همکاران (۱۳) به ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در رسوبات رودخانه بابل‌رود پرداختند. در این تحقیق به منظور ارزیابی کیفیت رسوبات، از شاخص‌های انباشت ژئوشیمیایی، غنی‌سازی و درجه آلودگی اصلاح شده برای فلزات سرب، کادمیوم، مس، نیکل، روی، قلع و کبالت استفاده شد. در نتیجه کبالت و سرب در محدوده غیرآلوده تا آلودگی متوسط و کادمیوم در محدوده آلودگی شدید تشخیص داده شده‌اند.

برای ارزیابی تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد در آلودگی محیط‌های آبی، با توجه به خاصیت آبریزی ترکیبات آلاینده و تمایل آنها به جذب سطحی، نمونه برداری معمولاً از رسوبات انجام شده و در کنار آن از انواع شاخص‌های انباشت ژئوشیمیایی، غنی‌سازی و درجه آلودگی برای تعیین ریسک اکولوژیک استفاده می‌شود (۲۱). این شاخص‌ها با تعیین پراکندگی آلاینده‌ها و ارزیابی تأثیرات ترکیبی آنها و مقایسه غلظت عناصر مشاهده شده با غلظت‌های زمینه‌ای و گزارش شده از سایر مناطق دنیا، امکان مناسبی برای ارزیابی وضعیت آلودگی، خطرپذیری و ریسک اکولوژیک ترکیبات مشاهده شده فراهم می‌سازند. در تحقیق حاضر، با توجه به حجم بالای مواد حفاری شده در تونل‌های آزادراه تهران-شمال و ماهیت این مواد، پتانسیل آلاینده‌های آن از طریق نمونه‌برداری و قرائت ترکیبات و توسعه



شکل ۱. پلان هندسی مسیر آزادراه تهران-شمال

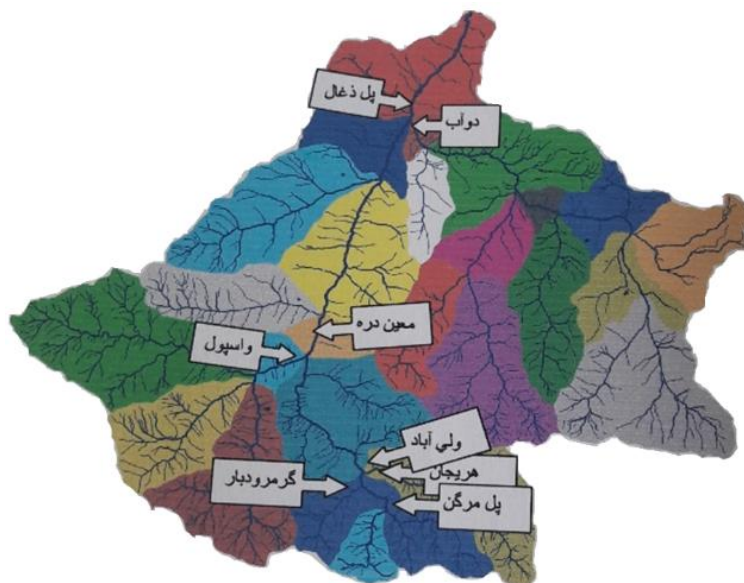
پلان مسیر آزادراه تهران-شمال نشان داده شده است. مسیر منطقه ۱ آزادراه تهران-شمال، ۶۰ کیلومتر از طول کل مسیر را کوتاه می‌کند. منطقه ۱ دارای ۱۷ جفت تونل است که بخش عمده‌ای از وزن کل پروژه را شامل می‌شود (۲۶). آزادراه تهران شمال یکی از بزرگ‌ترین و قدیمی‌ترین پروژه‌های عمرانی در زمینه حمل‌ونقل جاده‌ای در ایران است که به علل مختلف سال‌های زیادی است ساخت، افتتاح و بهره‌برداری آن با تأخیر مواجه شده است (۲۶).

شرایط اقلیمی و وضعیت رودخانه چالوس

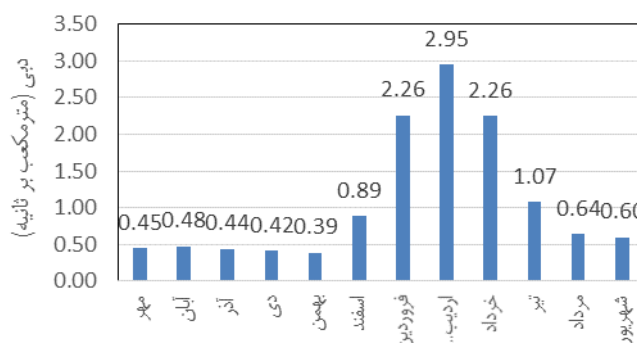
میزان بارندگی سالانه در امتداد رودخانه چالوس از کوه تا دریا از ۷۰۰ تا ۱۶۰۰ میلی‌متر متغیر بوده و حوزه آبریز اساساً حوزه معتدل و مرطوب با رژیم برفی در بالادست و بارش زیاد باران در پایین‌دست است. طی سالیان گذشته وضعیت کیفی رودخانه چالوس توسط ارگان‌های مختلف اعم از سازمان حفاظت از محیط زیست، اداره آب منطقه‌ای و منابع طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. هر کدام از این سازمان‌ها در دوره‌های مشخص و در ایستگاه‌های معین به بررسی پارامترهای کمی و کیفی رودخانه پرداختند. طبق اطلاعات دریافت شده از اداره آب منطقه‌ای مازندران مشخصات رودخانه اعم از دبی، بارندگی، میزان تبخیر، دما، EC، TDS، PH و غلظت کاتیون‌ها

است به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر کیفیت آب چشمه‌های آهکی است. رودخانه چالوس به‌عنوان یکی از منابع اساسی تأمین آب برای مصارف کشاورزی، شرب و صنعت منطقه مطرح است، از این‌رو حفظ کیفیت آن به یکی از دغدغه‌های اصلی مسئولین در سطح ملی و منطقه‌ای بدل شده است.

آزادراه تهران-شمال بخشی از آزادراه سراسری شمال-جنوب است که کوتاه‌ترین مسیر ارتباطی دریای خزر به خلیج فارس را ایجاد کرده و قرار است در ترانزیت منطقه‌ای نقش عمده‌ای برعهده گیرد. مسیر ۱۲۱ کیلومتری آزادراه تهران-شمال با ۱۷۸ رشته تونل دوقلو جمعاً به‌طول تقریبی ۹۶ کیلومتر از تقاطع غیرهمسطح با بزرگراه همت و بزرگراه آزادگان شروع و در امتداد دره کن پس از گذشت از حاشیه روستای سولقان به‌تدریج از منطقه کوهستانی توچال عبور کرده و سپس توسط تونل‌های بلند تالون به طول ۴/۹ کیلومتر این رشته کوه را قطع کرده و در دامنه‌های شمال منطقه دوآب شهرستانک قرار می‌گیرد. سپس از آن مسیر به موازات جاده قدیم کرج-چالوس امتداد می‌یابد و در دره سرهنگ وارد تونل بلند البرز به طول ۶/۴ کیلومتر شده و در پل زنگوله خارج می‌شود. با عبور از ارتفاعات البرز به موازات جاده فعلی چالوس، بزرگراه با گذر از کنار شهر مرزن‌آباد در نهایت به شهر چالوس متصل می‌شود. در شکل ۱



(الف)



(ب)

شکل ۲. الف) محل ایستگاه‌های هیدرومتری حوزه آبریز و ب) میانگین دبی ماهیانه رودخانه چالوس در ایستگاه پل مرکن

نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی

مواد حفاری شده از تونل ترکیبی از سنگ آرژلیت و ماسه سنگ است. برای اندازه‌گیری آلاینده‌گی این مواد، نمونه‌برداری از داخل تونل و ایستگاه‌های متعددی خارج تونل در امتداد مناطق تلمبار مواد حفاری شده در کنار رودخانه انجام گرفته است. نمونه‌گیری از مواد حفاری شده در فاصله ۳۵۰ متری از تونل و از نقاط مختلف مقطع آن صورت گرفته است. سایر نمونه‌ها از رسوبات رودخانه در بالادست و پایین‌دست دهانه تونل برداشت شده است. زمان نمونه‌برداری اولین ماه هر فصل طی سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ بوده و نمونه‌ها در ۶ ایستگاه به شرح جدول ۱ برداشت شده‌اند. در ابتدا مطالعه، نمونه‌ای مواد حفاری شده از تونل برای

و آنیون‌های Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} از سال ۱۳۷۰ در چندین ایستگاه در امتداد رودخانه چالوس به صورت سالانه و ماهانه اندازه‌گیری می‌شود. اطلاعات کمی رودخانه نیز از سال ۱۳۶۰ تاکنون در ۸ ایستگاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. در این تحقیق، از اطلاعات ایستگاه پل مرکن در محدوده پل زنگوله استفاده شده است. میزان دبی میانگین ماهانه رودخانه در این نقطه در نمودار شکل ۲ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، بیشترین میزان دبی در فصل بهار و در اردیبهشت‌ماه اتفاق می‌افتد و کمترین دبی در بهمن‌ماه مشاهده می‌شود. به‌طور کلی در فصل پاییز و زمستان دبی رودخانه کمتر بوده و بارندگی‌های حوزه آبریز بیشتر بهاره است.

جدول ۱. مختصات ایستگاه‌های نمونه برداری

موقعیت هر ایستگاه	محل نمونه برداری	شماره ایستگاه
36°11'51.9"N 51°20'17.8"E	۵۰۰ متر پایین دست رودخانه	۱
36°11'39.6"N 51°20'33.5"E	۵۰۰ متر بالادست رودخانه	۲
36°11'42.0"N 51°20'26.0"E	ورودی تونل به رودخانه	۳
36°11'36.3"N 51°20'28.7"E	خروجی حوض ته‌نشینی	۴
36°11'46.7"N 51°21'54.7"E	خیلی بالادست رودخانه (رودخانه دنا)	۵
36°11'30.0"N 51°20'29.3"E	مواد حفاری شده از تونل	۶

با تعیین محتوی عناصر موجود در مواد حفاری شده، در این تحقیق تعدادی از فلزات سنگین با سمیت و فراوانی بیشتر به منظور ارزیابی وضعیت آلودگی انتخاب و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر آماده‌سازی و هضم رسوبات برای اندازه‌گیری فلزات منتخب بر اساس دستورالعمل مویام (۱۹) و استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست (برگرفته از استاندارد مویام) انجام گرفته است. از این رو در آماده‌سازی مواد حفاری شده و رسوبات از روش هضم نمونه‌ها با حمام شنی یا هیتر استفاده شده است. در این تحقیق ابتدا نمونه‌های رسوب خشک شده و سپس از الک ۶۳ میکرون عبور داده می‌شوند. مواد حفاری شده نیز در هاون کوبانده و با عبور از الک برای هضم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نمونه مواد حفاری مورد پردازش و هضم قرار گرفته و میزان عناصر آن در نهایت با دستگاه جذب اتمی مدل NOV AA400P ساخت شرکت Analytik jena کشور آلمان، در آزمایشگاه شیمی دانشگاه مازندران مورد قرائت قرار گرفته است. دامنه قابل اندازه‌گیری این دستگاه با تکنیک شعله (Flame) در حد ppm و با تکنیک کوره گرافیتی (Furnace) در حد ppb است. برای مشاهده جزئیات بیشتر به مرجع (۷) مراجعه شود.

ارزیابی سطح آلودگی

ارزیابی وضعیت آلودگی خاک و رسوبات به فلزات سنگین در ادبیات فنی این موضوع به دو روش متفاوت انجام می‌گیرد:
 ۱- مقایسه غلظت مشاهده شده فلز با غلظت میانگین آن در

اندازه‌گیری نوع و محتوی عناصر موجود به آزمایشگاه سازمان زمین‌شناسی ایران ارسال و با کمک روش ICP مورد آنالیز قرار گرفته است. روش طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES: Inductively Coupled Plasma- Optical Emission Spectroscopy) یکی از مهم‌ترین روش‌های تجزیه عنصری است که به‌طور گسترده‌ای برای اندازه‌گیری محتوی عناصر بافت‌های مختلف نمونه‌های سنگ، خاک و رسوبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش اتمی شدن عناصر به کمک پلاسمای تولید شده توسط یک گاز بی اثر که در بیشتر موارد آرگون است، صورت می‌پذیرد. در دستگاه فوق از دو روش ذوب لوله‌ای و ذوب تفلونی برای اندازه‌گیری محتوی ۴۸ عنصر بالاخص فلزات سنگین در نمونه مواد حفاری شده استفاده شده است. در روش ذوب تفلونی ۵/۰ گرم از نمونه پودر و خشک شده و با عبور از الک ۲۰۰ در داخل ظروف تفلونی، تحت مجموعه‌ای از فرایندهای هضم قرار می‌گیرد. دستگاه ICP ابتدا به کمک استانداردهای مخصوص نمونه‌های جام CRM (Certified Receipt Material) کالیبره شده و سپس نمونه در دستگاه قرار داده شد و غلظت عناصر در آن مشخص می‌شود. به‌طور کلی برای کالیبره کردن این دستگاه از استانداردهای GSO 1-4, NC DC 73309, NC SDC 73316, NC SDC 73302 و نمونه Blank استفاده شده است. در روش ذوب لوله‌ای نیز ۵/۰ گرم از هر نمونه خشک و پودر شده و پس از آماده‌سازی به دستگاه ICP-OES (مدل Varian 735 ES, ساخت کشور استرالیا) که بیشتر کالیبره شده است، تزریق می‌شود.

جدول ۲ بازه شاخص‌های غنی‌شدگی، فاکتور آلودگی، درجه آلودگی اصلاح شده و شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی

بازه شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی		بازه درجه آلودگی اصلاح شده		بازه شاخص فاکتور آلودگی		بازه شاخص غنی‌شدگی	
$E_r^i < 40$	ریسک کم	$mCd < 1.5$	ناچیز تا کم	$C_f \leq 1$	آلودگی کم	$EF \leq 2$	کم
$40 \leq E_r^i < 80$	متوسط	$1.5 \leq mCd < 2$	کم	$320 \leq E_r^i$	متوسط	$2 \leq EF \leq 5$	متوسط
$80 \leq E_r^i < 160$	قابل توجه	$2 \leq mCd < 4$	متوسط	$3 \leq C_f \leq 6$	قابل توجه	$5 \leq EF \leq 20$	قابل توجه
$160 \leq E_r^i < 320$	ریسک زیاد	$4 \leq mCd < 8$	زیاد	$6 \leq C_f$	خیلی بالا	$20 \leq EF \leq 40$	زیاد
$320 \leq E_r^i$	بسیار زیاد	$8 \leq mCd < 16$	خیلی زیاد			$40 \leq EF$	خیلی زیاد
		$16 \leq mCd < 32$	بسیار زیاد				
		$1.5 \leq mCd$	شدیدا آلوده				

غلظت زمینه بوده و برای به حداقل رساندن تأثیر نوسانات احتمالی در مقدار زمینه ارائه شده است. این ضریب با تفکیک نوسانات طبیعی موجود در غلظت یک ماده معین در محیط، تغییرات حتی اندک ناشی از اثرات فعالیت‌های انسانی را نمایان می‌سازد. بازه تعریف شده این شاخص برای تعیین وضعیت آلودگی در جدول ۲ آورده شده است.

فاکتور غنی‌شدگی (EF: Enrichment Factor)

فاکتور غنی‌شدگی توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$EF = \frac{(C_M/C_S)_X}{(C_M/C_S)_C} \quad (2)$$

که در آن: C_M غلظت فلز سنگین مورد نظر و C_S غلظت عنصر مرجع (آهن، اسکاندیم یا آلومینیوم) است.

X و C نیز به ترتیب نشان‌دهنده غلظت‌های مورد نظر در رسوب و پوسته زمین است (۲۳). این شاخص معیاری دیگر برای برآورد تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد بر آلودگی رسوبات است. ضریب EF معیاری متداول برای ارزیابی وضعیت آلودگی رسوبات به انواع فلزات سنگین است. در این شاخص از نسبت غلظت فلز سنگین مورد بررسی به غلظت فلز مرجع (اسکاندیم،

سنگ‌های آذرین، رسوبی، شیل، میانگین پوسته زمین (Continental Cruste) یا میانگین مشاهده شده در رسوبات (Global Sediment) که روشی ساده و نه الزاماً فراگیر برای به دست آوردن تصویری کلی از سطح آلودگی منطقه است. ۲- بررسی میزان تجمع و غنی‌شدن رسوبات و توسعه شاخص‌های درجه و سطح آلودگی با مقایسه غلظت مشاهده شده با غلظت زمینه‌ای فلزات در رسوبات عمقی منطقه یا غلظت متوسط پوسته که روشی جامع‌تر برای ارزیابی سطح آلودگی خاک و رسوبات یک منطقه به فلزات سنگین محسوب می‌شود. این شاخص‌ها عبارتند از:

شاخص زمین انباشت (I_{geo})

شاخص زمین انباشت روشی برای بررسی آلودگی محیط و همچنین تعیین میزان تأثیر فعالیت‌های انسان‌زاد در آلودگی محیط زیست است و می‌توان آن را به کمک رابطه ۱ محاسبه کرد (۲).

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (1)$$

C_n غلظت عنصر مورد نظر و B_n غلظت زمینه آن عنصر در مرجع زمین شناسی.

ضریب ۱/۵ ضریب تصحیح تأثیر لیتوژنیکی مقدار

از فلزات سنگین را بدون محدودیت مورد بررسی قرار دهد. طبق رابطه عمومی این شاخص به دلیل فرایند میانگین‌گیری، تأثیرات منفرد مقادیر انباشتگی آلاینده‌ها در نتیجه نهایی را مستهلک و الگوی عمومی آلودگی را نشان خواهد داد. طبقه بندی ارزیابی وضعیت آلودگی رسوب بر اساس درجه آلودگی اصلاح شده در جدول ۲ ارائه شده است (۱).

شاخص ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی (PERI: The potential ecological risk index)

شاخص ریسک اکولوژیکی برای ارزیابی درجه آلودگی فلزات سنگین و ارزیابی همه‌جانبه پتانسیل ریسک اکولوژیکی هر یک از عناصر در رسوبات به کار می‌رود (۸). پتانسیل ریسک اکولوژیکی از حاصل ضرب فاکتور آلودگی در فاکتور سمیت بیولوژیکی برای هر فلز (رابطه ۵) به دست می‌آید.

$$E_r^i = C_f \times T_r^i \quad (5)$$

C_f فاکتور آلودگی، T_r^i فاکتور سمیت بیولوژیکی برای هر عنصر و E_r^i ریسک اکولوژیک هر عنصر است. T_r^i ضریب واکنش سمیت فلز است که براساس گزارش هاگانسون (۸) مقادیر آن برای فلز Cd برابر ۳۰ و Cr, Cu, Ni, Pb برابر ۵ و برای Zn برابر ۱ است. شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی بر این اساس به پنج رده مشابه آنچه در جدول ۲ آمده است، تقسیم می‌شود.

شاخص خطر (RI: risk index)

برای محاسبه ریسک اکولوژیکی کل از شاخص خطر استفاده می‌شود. این شاخص از حاصل جمع شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی هر عنصر در یک نمونه به دست می‌آید (۸):

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (6)$$

E_r^i شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی برای هر عنصر است. شاخص خطر در چهار رده با خطر کم ($RI < 150$)، خطر متوسط ($150 \leq RI \leq 300$)، خطر قابل توجه ($300 \leq RI \leq 600$) و خطر زیاد ($RI \geq 600$) طبقه‌بندی می‌شود (۲۴).

آلومینیم یا آهن) در رسوبات مورد مطالعه کمیته نرمال به دست می‌آید که از آن برای تفسیر روند ژئوشیمیایی تغییر غلظت فلزات در منطقه و نیز میزان تجمع آن در هر نقطه استفاده می‌شود (۲۸). در این پژوهش از عنصر اسکاندیم به عنوان عنصر مرجع برای محاسبه فاکتور غنی‌شدگی استفاده شده است. براساس تقسیم بندی ژانگ و لیو، مقادیر فاکتور غنی‌شدگی کمتر از ۱/۵ نشانگر منشأ زمین‌زاد و مقادیر بالاتر از ۱/۵ نشانگر منشأ مشترک انسان-زاد و زمین‌زاد و مقادیر بالاتر EF نشانگر شدت بالای آلودگی انسان‌زاد است (۲۸). ساترلند (۲۵) نیز فاکتور غنی‌شدگی را به پنج رده از غنی‌شدگی کم تا خیلی زیاد تقسیم کرد (جدول ۲). مقادیر بالاتر این شاخص، نشان‌دهنده منشأ انسان‌زاد است.

فاکتور آلودگی (Cr: Contamination factor)

فاکتور آلودگی به منظور بررسی میزان آلودگی رسوبات در یک منطقه بزرگ به کار می‌رود و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_f = \frac{C_x}{C_b} \quad (3)$$

C_x غلظت عنصر مورد نظر در نمونه و C_b غلظت استاندارد عنصر و یا غلظت زمینه عنصر مورد نظر است (۸).

فاکتور آلودگی توسط هاگانسون به چهار رده مشابه جدول ۲ تقسیم شده است؛

درجه آلودگی اصلاح شده (mCa: modified Contamination index)

شاخص درجه آلودگی از حاصل جمع فاکتور آلودگی عناصر در هر نمونه به دست می‌آید که اولین بار توسط هاگانسون در سال ۱۹۸۰ ارائه شد. ابراهیم در سال ۲۰۰۵ درجه آلودگی اصلاح شده را به جای درجه آلودگی مطرح کرد (۱). درجه آلودگی اصلاح شده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_f^i}{n} \quad (4)$$

در اینجا C_f فاکتور آلودگی برای آلاینده i ام و n تعداد پارامترهای مورد مطالعه است. رابطه بالا می‌تواند تعداد متنوعی

جدول ۳. نتایج حاصل از ICP نمونه سنگ (mg/kg)

عنصر	غلظت	عنصر	غلظت	عنصر	غلظت	عنصر	غلظت
Ta	۱/۷	Nd	۲۶/۴	Eu	۱/۰	Ag	<۰/۵
Tb	۰/۵	Ni	۴۹/۳	Ga	۱۸/۸	As	۴/۹
Te	۰/۶۹	P	۵۶۹	Gd	۴/۷	Ba	۴۰۱
Th	۲۲/۹	Pb	۱۱/۸	Ge	۱/۳	Be	۲/۵
Ti	۵۴۴۱	Pr	۷/۴	Hf	۵/۲	Bi	<۱
Tl	<۰/۵	Rb	۱۱۴	Ho	۰/۷	Cd	۰/۴
Tm	۰/۳	S	۳۶۲	La	۳۹/۵	Ce	۷۶/۶
V	۱۰۰	Sb	<۰/۵	Li	۱۹/۲	Co	۹/۴
Y	۲۳/۲	Sc	۱۱/۸	Lu	۰/۳	Cr	۱۰۳
Yb	۲/۰	Sm	۴/۹	Mn	۵۱۶	Cu	۱۹
Zn	۴۵/۷	Sn	۲/۰	Mo	<۰/۵	Dy	۳/۲
Zr	۲۱۵	Sr	۱۰۳	Nb	۱۲/۰	Er	۲/۷

نتایج

غلظت عناصر موجود در نمونه مواد حفاری شده از تونل البرز به روش ICP-OES در قالب میلی گرم در کیلوگرم غلظت وزن خشک در جدول ۳ آورده شده است. از میان عناصر مشاهده شده، فراوانی نسبی تعدادی از فلزات سنگین با توجه به اهمیت بیشتر آنها مورد بررسی مقایسه‌ای قرار گرفته است. غلظت‌های مشاهداتی با غلظت متوسط گزارش شده از فلزات سنگین در انواع سنگ‌ها و خاک مقایسه شده است. در نمونه مواد حفاری شده، کادمیوم و کروم با غلظت ۰/۴ و mg/kg ۱۰۳ دارای غلظتی بیشتر از غلظت گزارش شده از آنها در سنگ شیل، ۰/۲۲ و mg/kg ۹۰ هستند. غلظت کروم علاوه بر بالاتر بودن از سنگ شیل، از حد زمینه خاک یعنی mg/kg ۱۰۰ نیز بیشتر است. برای فلز نیکل نیز غلظت مشاهده شده در نمونه mg/kg ۴۹/۳ بالاتر از محدوده میانگین جهانی پوسته mg/kg ۱۲-۳۲ است. غلظت مس نیز با مقدار mg/kg ۱۹ از متوسط مقدار گزارش شده در خاک و رسوبات بالاتر است (۱۰). سایر فلزات سنگین اما در محدوده نزدیک‌تری به غلظت‌های میانگین پوسته بوده‌اند. به این ترتیب از میان

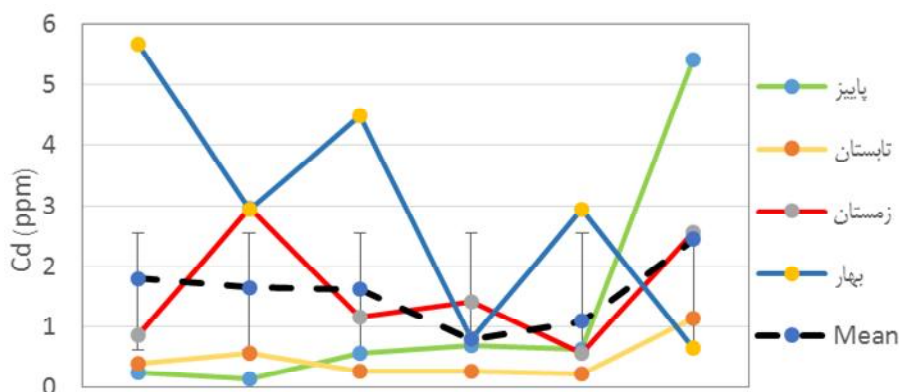
فلزات سنگین با اهمیت بیشتر، سه عنصر کادمیوم، نیکل و مس برای اندازه‌گیری میزان آلودگی رسوبات مورد بررسی قرار گرفته است.

فلزات منتخب (کادمیوم، نیکل و مس) در نهایت طبق روش (دستورالعمل مویام) هضم شده و قرائت شدند. نمونه رسوبات از ۵ سانتی متری سطح برداشت شده است که با توجه به دینامیک بالای رودخانه و روند فرسایش و رسوبگذاری شدید آن به‌عنوان وضعیت جاری آلودگی در سیستم در نظر گرفته شده است. نتایج اندازه‌گیری فلزات سنگین فوق در شش ایستگاه نمونه‌برداری در جدول ۴ آمده است. همچنین غلظت این عناصر به‌طور مجزا در هر ایستگاه در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ آورده شده است.

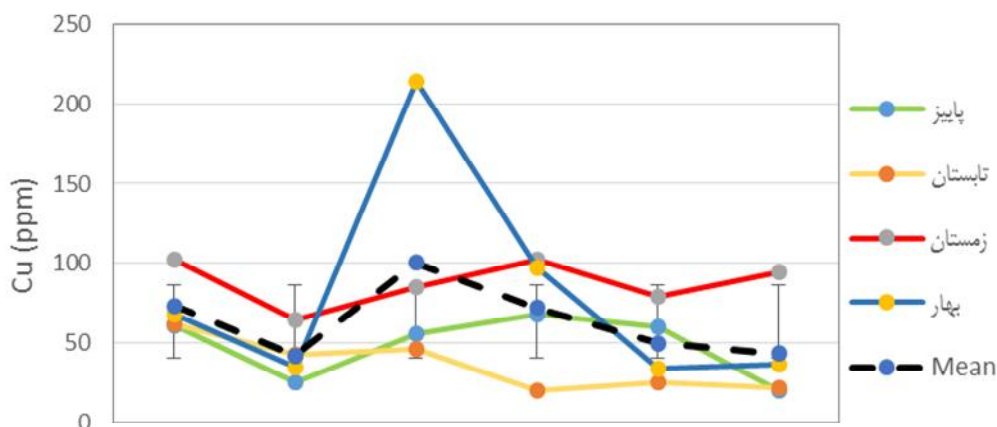
در شکل ۳ غلظت کادمیوم برای ۴ فصل و در ۶ ایستگاه نمونه‌برداری آورده شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. همان گونه که مشاهده می‌شود نمونه رسوب فصل زمستان و بهار دارای بالاترین غلظت کادمیوم بوده است. نمونه‌برداری فصل بهار در فروردین‌ماه صورت گرفته است. در رودخانه چالوس دبی رودخانه طی زمستان و ابتدای بهار پایین‌ترین مقدار خود را

جدول ۴. غلظت فلزات سنگین (میلی گرم بر لیتر) در نمونه‌های رسوب برداشت شده از شش ایستگاه

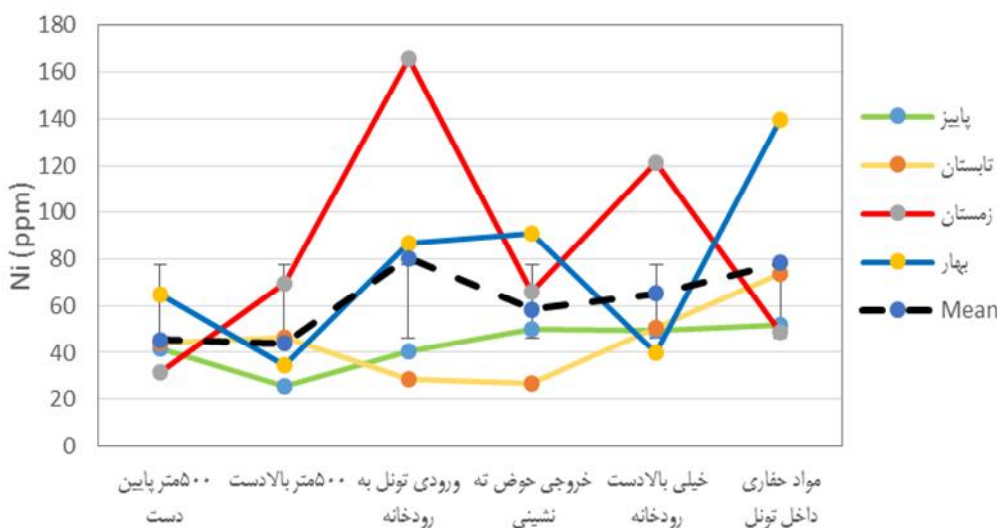
تابستان			نمونه پاییز			ایستگاه
Ni	Cu	Cd	Ni	Cu	Cd	
۴۳/۹۵	۶۲/۰۵	۰/۴۱	۴۱/۷۷	۶۰/۷۵	۰/۲۶	۵۰۰ متر پایین دست رودخانه
۴۶/۴۲	۴۲/۵	۰/۵۸	۲۵/۷۷	۲۵/۷۳	۰/۱۶	۵۰۰ متر بالادست رودخانه
۲۸/۶۷	۴۶/۵۸	۰/۲۷	۴۰/۴۷	۵۶/۱۲	۰/۵۷	ورودی تونل به رودخانه
۲۷/۰۷	۲۰/۱	۰/۲۷	۵۰/۲۵	۶۷/۹۷	۰/۷	خروجی حوض ته نشینی
۵۰/۵	۲۵/۹۳	۰/۲۲	۴۹/۲۵	۶۰/۴	۰/۶۴	خیلی بالادست رودخانه
۷۳/۵۲	۲۲/۲۸	۱/۱۴	۵۱/۶۵	۲۰/۰۱	۵/۴۱	مواد حفاری شده داخل تونل
بهار			زمستان			ایستگاه
Ni	Cu	Cd	Ni	Cu	Cd	
۶۴/۸۷	۶۷/۸۷	۵/۶۶	۳۱/۵۲	۱۰۲/۴۵	۰/۸۷	۵۰۰ متر پایین دست رودخانه
۳۴/۶	۳۵/۰۵	۲/۹	۶۹/۵	۶۴/۸۵	۲/۹۶	۵۰۰ متر بالادست رودخانه
۸۶/۷	۲۱۳/۶۵	۴/۴۸	۱۶۵/۹۷	۸۵/۶	۱/۱۶	ورودی تونل به رودخانه
۹۰/۸۷	۹۷	۰/۸	۶۶/۱۵	۱۰۲/۵۵	۱/۴۱	خروجی حوض ته نشینی
۴۰/۱۷	۳۴/۰۵	۲/۹	۱۲۱/۰۲	۷۸/۸۵	۰/۵۷	خیلی بالادست رودخانه
۱۳۹/۴۵	۳۶/۹	۰/۶۶	۴۸/۸۲	۹۴/۶۵	۲/۵۷	مواد حفاری شده داخل تونل



شکل ۳. غلظت کادمیوم در ۴ فصل و ۶ ایستگاه (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. غلظت مس در ۴ فصل و ۶ ایستگاه (رنگی در نسخه الکترونیکی) مواد حفاری خیلی بالادست خروجی حوض ورودی تونل به ۵۰۰ متر بالادست ۵۰۰ متر پایین دست رودخانه ته نشینی رودخانه خروجی حوض داخل تونل



شکل ۵. غلظت نیکل در ۴ فصل و ۶ ایستگاه (رنگی در نسخه الکترونیکی) مواد حفاری داخل تونل خیلی بالادست خروجی حوض ته ورودی تونل به ۵۰۰ متر بالادست ۵۰۰ متر پایین دست

ته نشینی نیز غلظت کادمیوم در زمستان بیشتر از بهار بوده و بعد از آن پاییز و تابستان قرار دارد. در فاصله زیاد بالادست تونل غلظت کادمیوم در بهار بیشتر و در پاییز و زمستان برابر و در تابستان کمترین مقدار را داشته است. در نمونه برداشت شده از مواد حفاری شده از تونل نیز غلظت کادمیوم در فصول مختلف در بازه ۰/۶۶ ppm تا ۵/۴۱ ppm تغییر یافته است.

غلظت بیشتر مس نیز مانند کادمیوم در فصل بهار و زمستان مشاهده شده است. غلظت مس در محل ورود زه آب تونل در

دارد از این رو در فصل بهار بالاترین غلظت کادمیوم در رسوبات سطحی ۵۰۰ متری پایین دست تونل مشاهده شده است. در این ایستگاه در فصل زمستان و بعد تابستان و پاییز به ترتیب بالاترین غلظت کادمیوم مشاهده شده است. در ۵۰۰ متری بالادست تونل غلظت کادمیوم در فصل بهار و زمستان یکسان بوده و در تابستان و پاییز غلظت کاهش یافته است. در رسوبات ورودی تونل به رودخانه غلظت‌ها به ترتیب در بهار، زمستان، پاییز و تابستان کاهش یافته است. در محل حوض

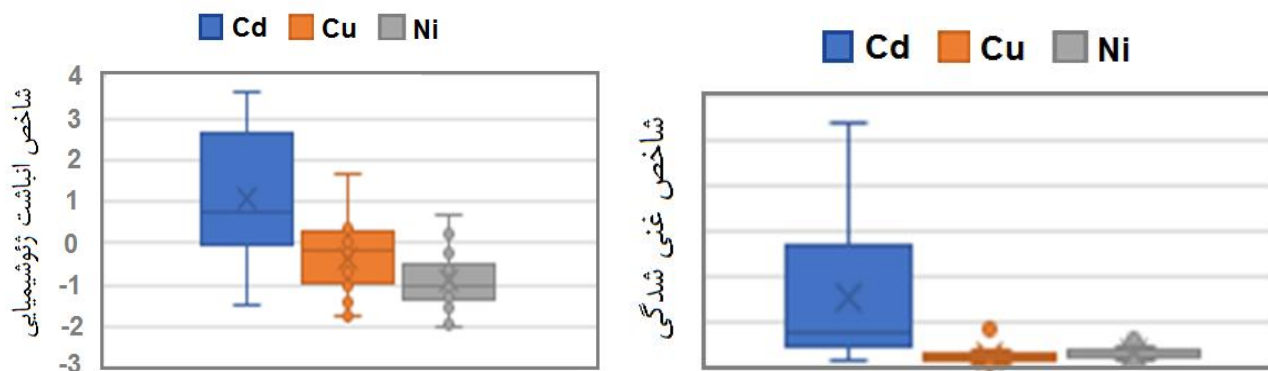
در رسوبات حوض ته‌نشینی در بهار بالاترین غلظت نیکل مشاهده شده و بعد از آن در زمستان و بعد پاییز و در نهایت تابستان کمترین غلظت‌ها مشاهده شده است. در بالادست رودخانه مشابه ایستگاه ۲ و ۳ بیشترین غلظت نیکل متعلق به فصل زمستان است و بعد از آن غلظت نیکل در فصل تابستان بیشتر از فصل پاییز بوده و در نهایت کمترین غلظت متعلق به فصل بهار است. در نمونه مواد برداشت شده از داخل تونل نیز غلظت نیکل در بازه ۴۸/۸۲ تا ۱۳۹/۴۵ ppm متغیر بوده است. غلظت نیکل در رسوبات سواحل دریای خزر در مجاورت استان مازندران ۳۴ تا ۶۷ ppm گزارش شده است (۲۱). در حالی که این میزان در سواحل عسلویه در خلیج فارس ۵/۴ تا ۸۰ ppm گزارش شده است (۵). در مطالعات مجزا غلظت نیکل در سواحل ایرانی دریای خزر ۳۳-۵۱ ppm (۵) و سواحل محدوده خزر جنوبی ۱۸-۶۹ ppm (۵) گزارش شده است.

لازم است برای حصول اطمینان از آلوده بودن یا عدم آلودگی رسوبات به فلز سنگین، مقادیر مشاهده شده با استانداردهای موجود مقایسه شود. برای این کار می‌توان غلظت میانگین فلزات سنگین در رسوبات را با غلظت فلزات سنگین در پوسته زمین، سنگ شیل و رسوبات مناطق مختلف دنیا مقایسه کرد (جدول ۳). حد مجاز غلظت کادمیوم، مس و نیکل در رسوب، شیل و خاک‌های آرژیلیتی به ترتیب ۱/۱-۰/۰۶ ppm، ۶۰-۴۰ ppm و ۴۰-۹۰ ppm است (۱۰). به این ترتیب غلظت کادمیوم در همه ایستگاه‌ها به غیر مواد حفاری در فصل پاییز، در محدوده مجاز قرار گرفته است. غلظت کادمیوم در فصل زمستان در ۵۰۰ متری بالادست، ورودی تونل و محل حوض ته‌نشینی بیشتر از مقدار مجاز در رسوبات است. غلظت کادمیوم در بهار در رسوبات ۵۰۰ متری بالا و پایین دست رودخانه و محل ورودی تونل نیز بیشتر از مقدار استاندارد است. در فصل تابستان به طور کلی تمامی ایستگاه‌ها دارای غلظت مجاز هستند. با توجه به آنکه غلظت میانگین کادمیوم در پوسته زمین ۰/۱-۰/۲ ppm است (۱۴)،

بهار بیشترین مقدار را نشان داده است. به طور کلی در ۵۰۰ متری پایین دست محل تونل غلظت نمونه در زمستان بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده و به ترتیب در بهار بیشتر از تابستان و در نهایت کمترین مقدار در پاییز مشاهده شده است. در ۵۰۰ متری بالادست محل تونل غلظت مس در زمستان همچنان بیشتر از مابقی فصول بوده و تابستان، بهار و پاییز در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در محل ورودی تونل به رودخانه غلظت مس در فصل بهار بیشترین مقدار را داشته و بعد از آن زمستان قرار می‌گیرد و در نهایت پاییز و تابستان کمترین غلظت را دارا هستند. در خروجی حوض ته‌نشینی غلظت در زمستان بیشترین مقدار و بعد از آن بهار، پاییز و تابستان قرار می‌گیرد. در فاصله زیاد بالادست رودخانه غلظت مس در زمستان بالاترین مقدار را داشته و بعد از آن پاییز و در نهایت بهار و تابستان قرار می‌گیرند. در نمونه مواد داخل تونل نیز غلظت مس در محدوده ۲۰/۰۱ تا ۹۴/۶۵ ppm مشاهده شده است.

سعیدی و همکاران (۲۱) بیشترین میزان غلظت مس در رسوبات سواحل جنوبی خزر در محدوده استان مازندران را در بازه ۱۲-۵۱ ppm گزارش کرده‌اند. در سایر مطالعات مقدار این فلز در رسوبات سواحل ایرانی دریای خزر ۱۳-۲۹ ppm و در رسوبات خزر جنوبی در محدوده ۵/۹-۲۶/۴ ppm گزارش شده است (۲۱). دلشاد و همکاران (۵) نیز غلظت مس رسوبات سواحل عسلویه در خلیج فارس را در بازه ۱/۹-۳۰۴ ppm گزارش کرده‌اند.

بالاترین غلظت نیکل مربوط به نمونه برداشت شده از ورودی تونل به رودخانه در فصل زمستان است. به طور کلی در ۵۰۰ متری پایین دست غلظت نیکل در بهار بالاترین مقدار را داشته و بعد از آن در تابستان و پاییز غلظت بالاتری داشته و کمترین غلظت را نیز در زمستان مشاهده شده است. در ۵۰۰ متری بالادست غلظت نیکل در زمستان بیشترین مقدار بوده و به ترتیب در تابستان، بهار و پاییز نیز کاهش می‌یابد. در محل ورودی تونل بیشترین غلظت نیکل متعلق به فصل زمستان بوده و بعد از آن در بهار، پاییز و تابستان غلظت نیکل کاهش می‌یابد.



شکل ۶. تغییرات شاخص زمین انباشت و فاکتور غنی شدگی فلزات سنگین در نمونه‌های مورد بررسی (رنگی در نسخه الکترونیکی)

در تمامی نمونه‌های برداشت شده غلظت بیشتر از غلظت میانگین پوسته زمین است. غلظت مس در فصل پاییز در ۵۰۰ متری پایین دست، محل حوض ته‌نشینی و خیلی بالادست رودخانه بالاتر از محدوده مجاز است اما در فصل تابستان غلظت مس تنها در ۵۰۰ متری پایین دست بالاتر از این محدوده قرار دارد. در فصل زمستان غلظت مس در تمامی ایستگاه‌ها بالاتر از حد مجاز واقع شده است. در فصل بهار در ۵۰۰ متری پایین دست، محل ورودی تونل و حوض ته‌نشینی غلظتی بالاتر از مقدار استاندارد مشاهده شده است. مقدار میانگین غلظت مس در پوسته زمین ۲۷-۲۵ ppm است (۱۴). غلظت در نمونه‌ها در محدوده ۲۰ و ۲۱۳ ppm متغیر بوده و در اغلب آنها بیشتر از میانگین پوسته زمین است. غلظت نیکل در رسوبات در فصل تابستان و پاییز در محدوده مجاز واقع شده است و بیشتر از مقدار مجاز در هیچ ایستگاهی مشاهده نشده است. غلظت این فلز اما در فصل بهار در محل حوض ته‌نشینی و در فصل زمستان در محل ورودی تونل و بالادست رودخانه بیشتر از مقدار مجاز مشاهده شده است. مقدار میانگین غلظت نیکل در پوسته زمین ۲۰ ppm بوده است که این مقدار در نمونه‌های مواد حفاری داخل تونل از ۴۸ تا ۱۳۹ ppm متغیر بوده است.

شاخص غنی شدگی (EF)

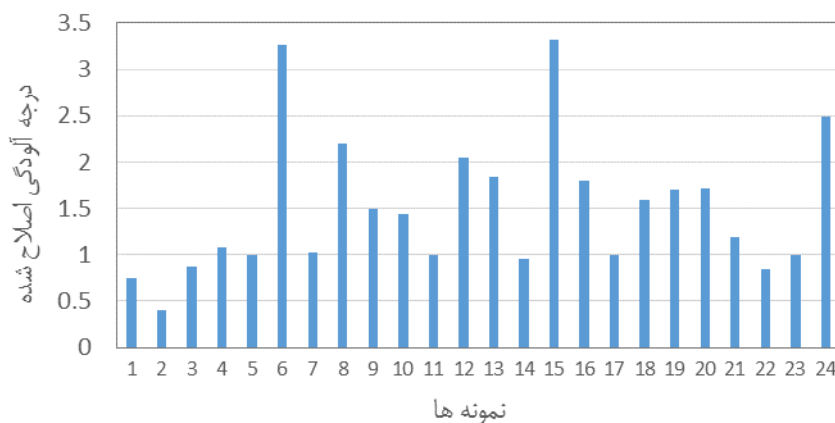
میزان شاخص غنی شدگی برای نیکل در محدوده ۱/۲ تا ۷/۷۴، برای مس در بازه ۰/۷۴ تا ۷/۹۴ و برای کادمیوم در محدوده ۱/۴۸ تا ۵۳/۸۳ برآورد شده است. بازه تغییرات این فاکتور در نمونه‌های مورد بررسی در شکل ۶ نشان داده شده است. به این ترتیب نیکل و مس نیز در نمونه‌های مورد بررسی دارای میزان غنی شدگی کم تا متوسط بود اما در مقابل کادمیوم در بسیاری از نمونه‌های برداشت شده دارای غنی شدگی زیاد و قابل توجه بوده است که بیانگر حضور مداوم و تجمع کادمیوم در رسوبات منطقه است. پیش تر مقدار ضریب غنی شدگی در رسوبات جنوبی دریای خزر در محدوده استان مازندران برای مس در بازه ۰/۳۹-۰/۹۹ و نیکل ۰/۵۸-۰/۸۳ گزارش شده است (۲۱).

شاخص زمین انباشت (I_{geo})

نتایج محاسبه شاخص زمین انباشت در شکل ۶ ارائه شده است.

جدول ۵. فاکتور آلودگی فلزات سنگین در نمونه‌ها (برحسب درصد)

Cf (%)			نمونه
Ni	Cu	Cd	
۶۶	۴۱	۴۱	آلودگی کم
۲۹	۵۴	۴۱	آلودگی متوسط
۵	۰	۱۳	آلودگی قابل توجه
۰	۵	۵	آلودگی زیاد



شکل ۷. نمودار درجه آلودگی اصلاح شده در نمونه‌های مورد بررسی

فاکتور آلودگی

نتایج فاکتور آلودگی بر حسب درصد در جدول ۵ ارائه شده است. مقدار فاکتور آلودگی در نمونه‌های برداشت شده برای مس از کمتر از ۱ تا ۲/۵ و برای نیکل از کمتر از ۱ تا حدود ۵ متغیر بوده است. مقدار این در سواحل دریای خزر در استان مازندران برای مس ۰/۹۷-۰/۳۴ و برای نیکل ۰/۸۱-۰/۴۶ گزارش شده است (۲۱). به این ترتیب کادمیوم و مس در ۴۱ درصد از نمونه‌ها آلودگی کم و در ۵ درصد از نمونه‌ها دارای آلودگی زیاد بودند. ۱۸ درصد از نمونه‌ها نیز دارای حد خطرناک آلودگی به کادمیوم تشخیص داده شده‌اند. نیکل اما در مقایسه دارای سطح آلودگی کمتری بوده و تنها ۵ درصد از نمونه دارای آلودگی قابل توجه هستند.

درجه آلودگی اصلاح شده

نحوه تغییرات شاخص درجه آلودگی اصلاح شده در نمونه‌های

مورد بررسی در قالب شکل ۷ آورده شده است. شماره ۱ تا ۶ به ترتیبی که در جدول ۱ آمده مربوط به نمونه‌های فصل پاییز (شروع سال آبی و دوره نمونه‌برداری) و به همین ترتیب نمونه‌های ۱۸ تا ۲۴ مربوط به فصل تابستان هستند. میزان تغییرات درجه آلودگی اصلاح شده در نمونه‌های مورد بررسی در بازه ۰/۴ تا ۳/۳ متغیر است که در مقایسه با مقدار گزارش شده از این ضریب توسط سعیدی و همکاران (۲۱) در سواحل مازندران (۰/۶۸-۱/۰۸) بیشتر است. در شکل زیر، در نمونه‌های ۶، ۱۵ و ۲۴ که متعلق به مواد حفاری شده، ورودی تونل به رودخانه در فصل بهار و مواد حفاری شده در تابستان است، در محدوده آلودگی متوسط تا قابل توجه بود و بیشترین میزان از درجه آلودگی را نشان داده‌اند. در نمونه برداشت شده از ۵۰۰ متر بالادست رودخانه در پاییز نیز کمترین میزان از درجه آلودگی در بین تمامی نمونه‌ها مشاهده شده است.

شاخص ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی (PERI)

بر اساس نتایج حاصل از توسعه شاخص ارزیابی پتانسیل ریسک اکولوژیکی این عناصر مقدار شاخص فوق برای نیکل در محدوده ۱/۳ تا ۱۷/۳، مس ۱/۶ تا ۳۱/۳ و برای کادمیوم در بازه ۶/۷ تا ۲۵۲/۳ متغیر بوده است. به این ترتیب پتانسیل ریسک اکولوژیکی نیکل و مس در نمونه‌های برداشت شده کم برآورده شده، در حالی که برای فلز کادمیوم بیش از ۵۰ درصد از نمونه‌ها دارای ریسک اکولوژیکی متوسط تا قابل توجه هستند. مقدار شاخص ریسک اکولوژیکی در سواحل عسلویه در خلیج فارس برای مس ۰/۶۶-۲۳ و برای نیکل ۱/۴۵-۲۱/۵ گزارش شده (۵) که ریسک اکولوژیکی پایین از آلودگی به این عناصر را در این منطقه نشان می‌دهد.

شاخص خطر (RI)

شاخص خطر که حاصل جمع شاخص پتانسیل ریسک اکولوژیکی هر عنصر در نمونه‌های قرائت شده است در بازه ۱۲ تا ۲۵۹ متغیر است. به این ترتیب در ۸۳ درصد از نمونه‌ها میزان خطر اکولوژیکی پایین بوده و تنها در ۱۷ درصد از نمونه‌ها که بیشتر مرتبط با مواد حفاری شده بوده‌اند میزان خطر در حد متوسط برآورد شده است. شاخص خطر در مطالعات دلشاب و همکاران (۵) در منطقه عسلویه در بازه ۲۷۴-۳۲ گزارش شده است که ریسک خطر کم تا متوسط این ناحیه را نشان داده است.

نتیجه‌گیری

آزادراه تهران-شمال یکی از قدیمی‌ترین و بزرگ‌ترین پروژه‌های عمرانی کشور است که همواره از منظر پیامدهای زیست‌محیطی آن مورد توجه خاص قرار داشته است. حفاری و ساخت تونل‌های متعدد در این بزرگراه با استخراج میلیون‌ها تن از مواد حفاری شده از دل کوه همراه بوده است که متأسفانه بدون ملاحظات زیست‌محیطی و فقط در حاشیه محل پروژه در مسیله‌ها و سیلاب‌دشت رودخانه رها شده‌اند. در طول سال‌های

گذشته هوازدگی و بارش برف و باران روی آن، باعث ورود این مواد به آب رودخانه و افزایش کدورت و آلودگی رودخانه به انواعی از آلاینده‌های معدنی شده است. در این تحقیق با نمونه‌برداری و آزمایش مواد حفاری شده و رسوبات رودخانه‌ای در حاشیه تونل بزرگ البرز در چهار فصل مختلف یک سال آبی، وضعیت آلودگی رودخانه به تعدادی از فلزات سنگین با فراوانی بیشتر در مواد حفاری شده مورد بررسی و آزمون قرار گرفته است. در نتیجه غلظت فلز کادمیوم در مواد حفاری شده و رسوبات رودخانه چالوس بیشتر از مقادیر میانگین پوسته زمین و رسوبات غیرآلوده مشاهده شده است. توسعه شاخص انباشت ژئوشیمیایی نشان می‌دهد که ۶۰ درصد از نمونه‌ها فاقد هرگونه آلودگی بوده و ۲۵ درصد از نمونه‌ها غیرآلوده بوده یا دارای آلودگی متوسط هستند. در نهایت ۱۵ درصد از نمونه‌ها دارای آلودگی زیاد تشخیص داده شده‌اند. در ارتباط با فاکتور غنی‌شدگی ۳۰ درصد از نمونه‌ها دچار غنی‌شدگی قابل توجه تا خیلی زیاد (منشأ انسان‌ساز) بوده و مابقی نمونه‌ها دارای غنی‌شدگی کم تا متوسط هستند. با توسعه این دو شاخص خطرناک‌ترین عنصر در نمونه‌های مورد بررسی کادمیوم و کم‌خطرترین نیکل تشخیص داده شده است. شاخص فاکتور آلودگی نیز بیشترین آلودگی در منطقه را مرتبط با کادمیوم و کمترین آلودگی به نیکل را به اثبات رسانیده است. براساس نتایج به دست آمده بیش از ۹۱ درصد نمونه‌ها دارای آلودگی کم تا متوسط بوده و ۹ درصد نمونه‌ها دارای آلودگی قابل توجه و بالا است. شاخص ریسک اکولوژیکی در ۷ درصد نمونه‌ها دارای ریسک قابل توجه و زیاد بوده و در مابقی نمونه‌ها در بازه ریسک کم تا متوسط قرار داشته است. با مقایسه این شاخص‌ها و بررسی غلظت کادمیوم در تمامی فصول می‌توان دریافت که بیشترین غلظت این فلز سمی متعلق به مواد حفاری شده و رسوباتی است که در پایین دست خروجی تونل برداشت شده‌اند. این موضوع با توجه به عدم وجود صنایع و مناطق مسکونی عمده در بالادست محل نمونه‌برداری، نقش احتمالی مواد حفاری شده در آلوده‌سازی رودخانه به کادمیوم را

استفاده از روش‌های پیشرفته تصفیه آب برای حذف این دست از آلاینده‌ها در نتیجه این مطالعات قابل برنامه‌ریزی خواهد بود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/۳۹۰۰۳۵/۹۹ اعلام می‌دارند.

نشان می‌دهد. با توجه به اینکه استفاده از آب این رودخانه برای مصارف کشاورزی و شرب در پایین دست دشت پرتراکم نوشهر و چالوس برنامه‌ریزی شده است، پیشنهاد می‌شود مطالعات جامع و تکمیلی در ارتباط با آلودگی آب و رسوبات رودخانه چالوس به فلز کادمیوم و پتانسیل آلاینده‌گی ناشی از دپوی مواد حفاری شده از تونل البرز مورد بحث و بررسی قرار گیرد. استفاده از منابع آب جایگزین برای تأمین آب شرب و یا

منابع مورد استفاده

1. Abraham, G. M. S., 2005. Holocene sediments of Tamaki Estuary, characterization and impact of recent hum an activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand. Ph.D, Thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
2. Abraham, G. M. S. and R. J. Parker. 2008. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment* 136: 227-238.
3. Abessi, O. 2018. Brine Disposal and Management-Planning, Design, and Implementation. In Sustainable Desalination Handbook, Butterworth-Heinemann.
4. Bellopede, R. and P. Marini. 2011. Aggregates from tunnel muck treatments. *Properties and uses. Physicochemical Problems of Mineral Processing* 47: 259-266.
5. Delshab, H., P. Farshchi and B. Keshavarzi. 2017. Geochemical distribution, fractionation and contamination assessment of heavy metals in marine sediments of the Asaluyeh port, Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin* 115(1-2): 401-411.
6. Ghorveh, A., M. Solhi, H. G. Mohammadi and S. Vazan. 2015. Investigation the concentration of heavy metals in the sediment of Zayandehrood river bed. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 3(1): 75-81.
7. Ghorbanpour, R. 2019. Environmental risk assessment of drilled materials on the catchment surface water resources for Tehran-North highway's tunnel, Master Thesis, Babol Noshirvani University of Technology, Iran.
8. Hakanson, L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research* 14(8): 975-1001.
9. Hoseini Zare, N., N. Saadati, P. Barati and M. Ahmadi. 2008. Investigation of heavy metals of Karun river in the entrance areas to Ahwaz and suburban drinking water treatment plants, Second Conference on Environmental Engineering, Tehran, University of Tehran, Faculty of Environment.
10. Kabata-Pendias, A. and A. B. Mukherjee. 2007. Trace Elements from Soil to Human. Springer Science and Business Media.
11. Khajavi S. and J. Selahshor. 2014. Investigating the importance of environmental considerations in tunneling projects, National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Second Volume.
12. Kumari, N. A. and P. Subhajit. 2013. Impact of Tunnels in Environment. *International Journal of Engineering Trends and Technology* 4(8): 3429-3433.
13. Maghzi, A., M. Saeedi and S. Jamshidi. 2010. Evaluation of heavy metal pollution in Babolrood river sediments using sediment pollution indicators, 6th National Congress of Civil Engineering.
14. Miller, W. 2007. Trace Fossils - Concepts, Problems, Prospects. Elsevier; Amsterdam.
15. Mirzaei, M. and E. Solgi. 2016. Evaluation of heavy metals concentration (cadmium, copper, manganese, nickel, lead and zinc) in sediments of Zayandehrood River. *Journal of Research in Environmental Health* 1(4): 251-265.
16. Moghadam Yari, N., M. Cheraghi, A. H. Hasani and A. H. Javid. 2013. Evaluation of heavy metals (Cu, Zn, Pb and Cd) in Hamadan Abshine River. *Journal of Health and Development* 2(4): 296-304.
17. Nasehi, F., A. Hassani, M. Monavvari, A. Karbassi, N. Khorasani and A. Imani. 2012. Heavy metal distributions in water of the Aras River. *Journal of Water Resource and Protection* 4: 73-78.
18. Resch, D., K. Lassnig, R. Galler and F. Ebner. 2009. Tunnel excavation material- high value raw material.

- Geomechanics and Tunnelling* 2(5): 612-618.
19. Moopam, R., 1999. Manual of oceanographic observations and pollutant analysis methods. ROPME. Kuwait 1.
 20. Ritter, S., H. H. Einstein and R. Galler. 2013. Planning the handling of tunnel excavation material- A process of decision making under uncertainty. *Tunnelling and Underground Space Technology* 33: 193-201.
 21. Saeedi, M., A. Abessi and A. Jamshidi. 2010. Assessment of heavy metal and oil pollution of sediments of south eastern Caspian Sea using indices. *Journal of Environmental Studies* 21-38.
 22. Sánchez, E., M. F. Colmenarejo, J. Vicente, A. Rubio, M. G. García, L. Travieso and R. Borja. 2007. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Ecological Indicators* 7(2): 315-328.
 23. Sinex, S. and D. Wright. 1988. Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay. *Marine Pollution Bulletin* 19: 425-431.
 24. Sharifi Fard, M., A. Shakeri and B. Mehrabi. 2018. Investigation of Hydrogeochemistry and quality of Groundwater in the Aquifer of Bukan Plain, West Azerbaijan Provinc. *Journal of Advanced Applied Geology* 7(4): 89-99.
 25. Sutherland, R. A. 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environ Geol* 39: 611-627.
 26. Tehran-Shomal Freeway, 2020, <https://www.tsfc.ir/>.
 27. Teymori, A., Farghani and H. Jafari. 2001. Evaluation of the concentration of potentially toxic elements in Gorganrood river sediments within Gonbad city, Thirteenth Earth Sciences Conference.
 28. Zhang, J. and C. L. Liu. 2000. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes, Estua. *Coastal and Shelf Science* 54: 1051-1070.

Evaluation of the Ecological Risk for the Tunnel Drilling Waste of Tehran-Shomal Highway on Chaloos River

Z. Ghorbanpour¹, O. Abessi^{1*} and F. Kardeh²

(Received: March 19-2020; Accepted: July 1-2020)

Abstract

Drilling material from the tunnel of the Tehran-Shomal highway was estimated to be about 2.5 Million Cubic Meters by the project authorities. Sadly, from the beginning, the drilling materials had been deposited on the open space in the floodplain of the Chaloos river with slightest environmental considerations. During the previous years, weathering and leaching from the drilled materials besides the discharge of drain water from the tunnel had led to serious contaminations and the deterioration of the water quality of the Chaloos river. In this paper, the ecological risk of nonorganic pollutants due to drilled materials was investigated. The sampling was done from the excavated materials and river sediment in five different locations throughout a complete year. From the many pollutants, Nickel, Cadmium and Copper were chosen to be investigated. The results showed that almost 15 percent of the samples had a high degree of pollution, while 60 percent of them were clean and the other 25 percent included the highly contaminated ones. All samples were also estimated to have a low to high ecological risk.

Keywords: Tunnel, Tehran-Shomal highway, Heavy metals, Environmental Risk.

1. Department of Environmental Engineering, School of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

2. Department of Environmental Sciences, School of Basic Sciences, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

Corresponding author, Email: Oabessi@nit.ac.ir