



## بررسی غلظت فلزات سنگین شاخص در رواناب شهری (مطالعه موردی: حوضه شمال و شرق تهران)

علی قدیری<sup>۱</sup>، سید حسین هاشمی<sup>۱\*</sup>، تورج نصرآبادی<sup>۲</sup>

۱- پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
۲- دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۸  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۲۷  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۷  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱

### کلمات کلیدی:

آلودگی آب  
فلزات سنگین  
رواناب شهری  
رخداد سیلابی  
شاخص آلودگی  
تهران

**خلاصه:** رواناب‌های شهری به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انتشار فلزات سنگین به محیط‌های پذیرنده، مخاطرات بالقوه محیط زیستی و بهداشتی در پی دارند. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی محتوای ده فلز سنگین در رواناب حوضه سرخه حصار تهران بود. برای این منظور نمونه‌برداری از رواناب خروجی حوضه سرخه حصار تهران طی سه رخداد سیلابی در سال‌های ۹۸-۱۳۹۷ برداشته شده و غلظت فلزات سنگین آرسنیک، آهن، سرب، روی، کادمیم، کروم، مس، منگنز، مولیبدن و نیکل به وسیله دستگاه ICP-MS اندازه‌گیری گردید. عناصر آهن، منگنز، روی، سرب، مس، کروم، نیکل، آرسنیک، مولیبدن و کادمیم به ترتیب بیش‌ترین فراوانی را در کل نمونه‌ها داشتند. نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن مبنی بر همبستگی قوی (۰/۷۱ - ۰/۹۸) بین اغلب فلزات به ویژه آهن، منگنز، روی، سرب، نیکل، کادمیم و مس، بیانگر منابع انتشار مشترک و رفتار ژئوشیمیایی مشابه این عناصر در رواناب بود. هم‌چنین میانگین مقادیر شاخص آلودگی، شاخص ارزیابی شاخص ارزیابی فلزات سنگین و شاخص آلودگی فلزات سنگین به ترتیب برابر با ۲۴/۷، ۳۰/۱ و ۱۳۰/۲ بود که نشان داد از نظر این شاخص‌ها بیش‌تر نمونه‌ها در سطح بسیار آلوده و آلوده قرار داشتند، که دلیل آن غلظت بالای سه عنصر آهن، منگنز و سرب در مقایسه با حد مجاز استاندارد بود.

### ۱- مقدمه

ویژه‌های برخوردار است [۳ و ۲]. به طور معمول در ارزیابی کیفیت جریان‌های آبی، همواره دو رویکرد اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب و مکانیسم انتقال آلودگی مدنظر قرار می‌گیرد [۴]. هم‌چنین برای مطالعه پارامترهای کیفی از روش‌های اندازه‌گیری میدانی و شبیه سازی عددی استفاده می‌شود [۵]. رواناب‌های شهری نیز نوعی از جریان‌های سطحی با حجم قابل توجهی از آب شیرین هستند که در سال‌های اخیر مطالعه کیفیت آن‌ها با هدف استفاده‌های مجدد افزایش یافته است [۷]. افزایش سطح فعالیت‌های انسانی و سطوح نفوذناپذیر در طی توسعه نواحی شهری موجب افزایش نرخ بارگذاری طیف وسیعی از آلاینده‌ها در این نواحی می‌شود که با وقوع رخداد بارشی و شست و شوی سطوح آلوده، بخش عمده‌ای از آب بارش به

آب‌های سطحی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب برای کاربری‌های مختلف از جمله کشاورزی، صنعت و آشامیدنی به شمار می‌روند. بنابراین، دانش در مورد کیفیت آب برای مدیریت مؤثر و پایدار و برنامه‌ریزی استراتژیک کلی منابع آب از اهمیت اساسی برخوردار است [۱]. از بین محیط‌های آبی مختلف، رودخانه‌ها و جریان‌های سطحی به دلیل عبور و یا تاثیرپذیری از محیط‌هایی مانند شهرها، مراکز صنعتی و اراضی کشاورزی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آسیب‌پذیر در مقابل آلودگی به شمار می‌روند و مطالعه کیفیت آن‌ها با توجه به نقش مؤثر در انتقال و سرنوشت آلاینده‌ها از اهمیت

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Hashemi2052@gmail.com

صورت رواناب در آمده و به وسیله کانال‌های جمع‌آوری رواناب‌های سطحی به خارج از حوضه هدایت می‌شود. از همین رو این آب‌ها از نظر کمیت و کیفیت به عنوان یکی از معضلات بزرگ در محیط‌های شهری به شمار می‌روند [۸]. رواناب شهری به عنوان یکی از منابع آلودگی غیرنقطه‌ای، به دلیل تنوع و حجم بالای فعالیت‌های انسانی حاوی طیف وسیعی از آلاینده‌ها شامل رسوبات، مواد مغذی (فسفر و نیتروژن)، کلراید، فلزات سنگین، هیدروکربن‌ها، آلاینده‌های میکروبی، ترکیبات آلی و غیره می‌باشد [۹ و ۱۰]. توزیع گسترده مکانی و زمانی منابع انتشار، مسیرهای آلودگی متنوع و تصادفی و هم‌چنین تنوع و پیچیدگی در ترکیب مهم‌ترین ویژگی‌های آلاینده‌های موجود در این جریان‌ها است [۱۱ و ۱۲]. تاکنون بیش از ۶۰۰ آلاینده محتمل در رواناب‌های شهری شناسایی شده است که اغلب غلظت و ترکیب آن‌ها بسته به عوامل اثرگذار بر آن، متفاوت است [۱۳-۱۵]. کیفیت پایین این آب‌ها باعث کاهش کیفیت آب‌های پذیرنده و اثرات جبران‌ناپذیر محیط زیستی و بهداشتی بر اکوسیستم‌ها و ارگانسیم‌های متأثر آن به ویژه انسان می‌شود [۱۶]. اثرات آلاینده‌های مرتبط با این آب‌ها در اکوسیستم‌های آبی پذیرنده در مطالعات متعددی به اثبات رسیده است [۱۷ و ۱۸].

از میان آلاینده‌های مختلف، فلزات سنگین به دلیل ویژگی‌هایی مانند پایداری، سمیت، پتانسیل بالای سرطان‌زایی و جهش‌زایی و هم‌چنین ویژگی تجمع‌پذیری بالا در سطوح مختلف زنجیره غذایی اهمیت ویژه‌ای دارند [۱۹]. مواجهه طولانی مدت انسان با این عناصر منجر در بروز اختلالات رفتاری، یادگیری، تمرکز، رشد، ناتوانی‌های ذهنی، اختلال در عملکرد بینایی، شنوایی و حرکتی، جهش‌های ژنتیکی و سرطان‌های مختلف می‌شود [۲۰]. به طور معمول فلزات سنگین از طریق فرآیندهای طبیعی مانند فرسایش و هوازدگی خاک و سنگ‌ها، آتش‌سوزی جنگل‌ها و فوران آتشفشان‌ها [۲۱] و منابع انسانی هم‌چون پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، پسماندهای صنعتی و کشاورزی، معدن‌کاری، رواناب‌های شهری و غیره در محیط انتشار می‌یابند [۲۲]. از مهم‌ترین منابع انتشار این عناصر در محیط‌های شهری می‌توان به ترافیک خودروها، واحدهای کارگاهی و صنعتی، فرسودگی و خوردگی سطوح فلزی، ته‌نشست‌های اتمسفری، فرسایش سطوح خیابان‌ها، پیاده‌روها و غیره اشاره کرد [۲۳]. اما غلظت فلزات در رواناب نواحی مختلف، متغیر است و بیش‌تر

به نوع کاربری زمین، ویژگی‌های بارش و میزان آلودگی محیط بستگی دارد [۲۴]. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی با اهداف مختلف مانند ارزیابی غلظت [۲۶ و ۲۵]، رفتار [۲۸ و ۲۷]، تعیین منشا و ارزیابی سهم منابع آلاینده [۲۹]، ارزیابی مخاطرات بهداشتی [۳۰]، سرنوشت و انتقال آلاینده‌ها [۳۱] در رواناب‌های شهری نواحی مختلف انجام شده است. بنابراین سنجش این عناصر در رواناب‌های شهری به عنوان یکی از منابع اصلی انتشار و انتقال، منجر به درک بهتر حدود غلظت و رفتار این آلاینده‌ها می‌شود و یک ابزار مهم برای ارزیابی سلامت این آب‌ها و اکوسیستم‌های پذیرنده به حساب می‌آید و در راهبردهای مدیریت، کنترل و هم‌چنین طراحی نوع فرآیند تصفیه کارآمد این آلاینده‌ها مفید خواهد بود. از طرفی در بسیاری از کشورها رواناب سطحی به عنوان یکی از منابع در دسترس برای آبیاری فضای سبز، کشاورزی و حتی شرب شناخته می‌شود که با گذشت زمان و کمبود منابع آب شیرین، به ویژه در کشورهایی با اقلیم خشک و نیمه خشک بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی استفاده از شاخص‌های توسعه داده شده در زمینه کیفیت منابع آب به لحاظ وجود فلزات سنگین، از جمله شاخص ارزیابی فلزات سنگین، شاخص آلودگی فلزات سنگین [۳۲] و شاخص آلودگی [۳۳] برای ارزیابی کیفیت بدنه‌های آبی مختلف از جمله رودخانه‌ها [۳۵ و ۳۴]، آب زیرزمینی [۳۶]، آب شرب [۳۷]، رواناب معدن [۳۸] انجام شده است، که برای ارزیابی کیفیت رواناب‌های شهری و سطح مخاطرات آن نیز مفید خواهد بود.

در تهران، رواناب تولیدی به وسیله مسیل‌ها و کانال‌های موجود جمع‌آوری و به اراضی جنوب شهر منتقل می‌شود و با توجه به شرایط اقلیمی و کمبود آب و سهولت دسترسی، بخش عمده‌ای از این آب‌ها به صورت خام و بدون تصفیه برای آبیاری محصولات زراعی استفاده می‌شود. مرور منابع نشان می‌دهد، با وجود اهمیت بهداشتی و زیست محیطی فلزات سنگین، مطالعات اندکی در زمینه ارزیابی رواناب‌های شهر تهران به لحاظ محتوای این عناصر انجام شده است. هدف از انجام پژوهش حاضر، بررسی محتوای فلزات سنگین منتخب در رواناب سطحی حوضه سرخه حصار شهر تهران و ارزیابی وضعیت آلودگی این آب‌ها، به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انتشار و انتقال این عناصر در محیط زیست، با استفاده از شاخص‌های معمول انجام شده است.

## ۲- مواد و ورش

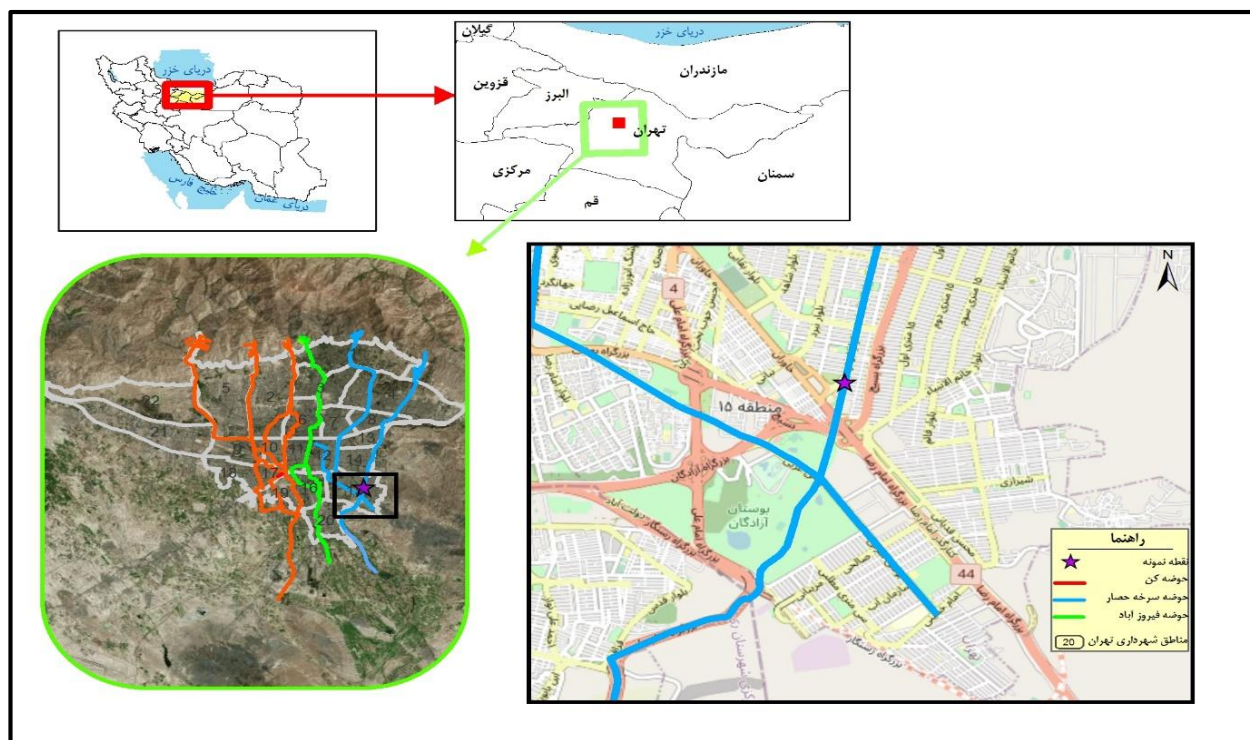
### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

سپس به ابوذر متصل و به مسیل باروت کوبی در جنوب تهران منتهی می‌شود. این مسیل به همراه شاخه‌های فرعی آن با طول حدود ۱۴۰ کیلومتر، عمده رواناب حوضه شمال شرق و شرق تهران با مساحت حدود ۵۲۰ کیلومتر مربع را به سمت جنوب شهر تهران زهکشی می‌کند [۴۱]. بخشی از آب این مسیل برای آبیاری اراضی کشاورزی و فضای سبز در نواحی جنوبی تهران استفاده می‌شود و سپس به تالاب بندعلیخان می‌ریزد. سه حوضه اصلی تهران با شاخه‌های اصلی شبکه رواناب سطحی و نقطه نمونه‌برداری در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به وسعت حوضه بالادست، سهولت دسترسی و امنیت، انتهای مسیل ابوذر به عنوان نقطه خروجی حوضه سرخه حصار برای نمونه‌برداری از رخدادهای سیلابی انتخاب شد.

### ۲-۲- نمونه‌برداری و سنجش فلزات سنگین

نمونه‌برداری، آماده‌سازی نمونه، سنجش غلظت فلزات سنگین بر اساس بر اساس استاندارد ۲۰۰۸ سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده آمریکا [۴۲] انجام شد. نمونه‌برداری از ۳ رخداد سیلابی با دوره خشکی بیش از ده روز طی سال‌های ۹۸-۱۳۹۷ انجام و به طور متوسط در هر رخداد بارشی تعداد ۱۰ (مجموع ۳۰

تهران به عنوان پایتخت ایران با مساحت ۷۳۰ کیلومترمربع و جمعیتی بیش از ۸۷۹۱۰۰۰ نفر و تراکم حدود ۱۱۰۰۰ نفر بر کیلومتر مربع به عنوان پرجمعیت‌ترین شهر ایران می‌باشد. این شهر در دامنه جنوبی رشته کوه البرز واقع شده است و دارای اقلیم نیمه خشک با متوسط دمای سالانه ۷/۴-۳۸/۷ درجه سلسیوس و با متوسط بارش سالانه ۳۱۶-۲۴۵ میلی‌متر است [۳۹ و ۴۰]. برنامه‌ریزی شهری گسترده و توسعه ناهمگن ساخت و سازها در دهه‌های اخیر باعث شکل‌گیری شبکه پیچیده جمع‌آوری آب‌های سطحی در این شهر شده است که تخلیه آن‌ها بیش‌تر از طریق کانال‌ها و مسیل‌های طبیعی انجام می‌شود. به طور کلی، تهران به لحاظ مطالعات مدیریت سیلاب به سه زیرحوضه با خروجی‌های مجزا شامل حوضه غرب و شمال غرب، حوضه مرکزی و حوضه شرق و جنوب شرق تقسیم می‌شود. مسیل سرخه حصار به عنوان کانال اصلی حوضه شرق و جنوب شرق تهران، از به هم پیوستن سه رودخانه سعدآباد، دربند و گلابدره پدید آمده و در مسیر شمالی- جنوبی امتداد یافته به کانال‌های باختر، منوچهری و



شکل ۱. شبکه جمع‌آوری رواناب در محدوده حوضه سرخه حصار تهران و موقعیت ایستگاه نمونه برداری

Fig. 1. The runoff drainage network in of Sorkheh Hesar catchment in Tehran and the location of sampling station

[۴۳]. در این پژوهش به منظور ارزیابی وضعیت آلودگی فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه از شاخص ارزیابی فلزات سنگین<sup>۱</sup>، شاخص آلودگی<sup>۲</sup>، و شاخص آلودگی فلزات سنگین<sup>۳</sup> استفاده شد. شاخص  $HEI$  رتبه‌بندی کلی کیفیت آب از نظر آلودگی به فلزات سنگین را به دست می‌دهد و به صورت معادله ۱ بیان می‌شود.

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{Hc}{Hmax} \quad (1)$$

که در آن  $H_c$  بیانگر مقدار اندازه‌گیری شده و  $H_{max}$  بیشینه غلظت مجاز عنصر مورد نظر است. معیار رده‌بندی این شاخص به گونه‌ای است که مقادیر کم‌تر از ۱۰ نشان دهنده سطح آلودگی کم، بین ۱۰ تا ۲۰ سطح آلودگی متوسط و مقادیر بیش از ۲۰ نشان دهنده آلودگی زیاد است. شاخص  $C_d$ ، ابزار دیگری برای ارزیابی درجه آلودگی آب به لحاظ حضور فلزات سنگین است که آلودگی نسبی عناصر مختلف را جداگانه محاسبه و در برگیرنده اثرات ترکیبی چند عنصر است. در این شاخص، مقادیر کم‌تر از ۱، بین ۱ و ۳، و بیش از ۳ به ترتیب بیانگر سطح آلودگی کم، متوسط و زیاد است [۳۳]. معادله‌های ۲ و ۳ چگونگی محاسبه این شاخص را نشان می‌دهد:

$$Cd = \sum_{i=1}^n Cfi \quad (2)$$

$$Cfi = \frac{C_{Ai}}{C_{Ni}} - 1 \quad (3)$$

که در آن  $C_{fi}$  نشان دهنده فاکتور آلودگی برای عنصر مورد نظر،  $C_{Ni}$  و  $C_{Ai}$  به ترتیب بیانگر غلظت اندازه‌گیری شده و غلظت مجاز عنصر مورد بررسی است.

شاخص  $HPI$  نیز به عنوان ابزاری برای رتبه‌بندی کیفیت آب بر اساس فلزات سنگین استفاده شده است و مقدار آن با استفاده از معادله‌های ۴ و ۵ محاسبه می‌شود. مقدار عددی ۱۰۰ به عنوان حد بحرانی برای این شاخص معرفی شده است [۴۴]. وزن اختصاص داده شده به هر عنصر ( $Wi$ )، به صورت نسبت معکوس حد مجاز برای هر عنصر ( $Si$ ) می‌باشد.

نمونه برداشت شد. به گونه‌ای که با شروع بارش (بیش از ۱۰ میلی‌متر) و تشکیل رواناب، نمونه‌برداری شروع، و فواصل زمانی برداشت نمونه‌ها در طول بروز سیلاب به گونه‌ای انتخاب شد تا تغییرات هیدروگرافیک (حالت پایه تا اوج اولیه) را پوشش دهد. نمونه رواناب از ۲۰ سانتی‌متری سطح جریان با استفاده از یک سطل ۵ لیتری برداشت و به ظروف پلی‌اتیلن با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر منتقل و بلافاصله در یخدان نگهداری شد. پس از پایان نمونه‌برداری، نمونه‌ها در کم‌ترین زمان ممکن به آزمایشگاه منتقل شد. به منظور اطمینان از تثبیت نمونه‌های برداشت شده، به هر کدام از نمونه‌های برداشتی اسید نیتریک غلیظ (۶۵ درصد) اضافه شد تا pH آن به ۲ برسد. سپس تا زمان انجام آزمایش‌ها در یخچال در دمای کم‌تر از ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. تمام ظروف نمونه پیش از نمونه‌برداری، به ترتیب با محلول ۱۰٪ اسید نیتریک و آب مقطر شسته و در محل نمونه‌برداری نیز سه بار به وسیله نمونه آبکشی شدند. آماده‌سازی نمونه برای سنجش محتوای کل فلزات در کم‌ترین زمان ممکن پس از نمونه‌برداری انجام شد. فرآیند آماده‌سازی و آنالیز عناصر در کمتر از یک هفته پس از نمونه برداری انجام شد. به منظور آماده‌سازی، پس از هم دما شدن نمونه با محیط و همگن‌سازی کامل، ۱۰۰ میلی‌لیتر از نمونه به بشر ۲۵۰ میلی‌لیتری منتقل و پس از اضافه کردن ۳ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۶۵٪ و اسید کلریدریک ۳۷٪ (مرک آلمان) به نسبت ۲ به ۱، فرآیند هضم بر روی هیتر در دمای ۹۰ درجه سلسیوس به مدت ۱۵۰ دقیقه تا کاهش حجم نمونه به ۲۰ میلی‌لیتر، انجام شد. پس از به حجم رساندن نمونه در فالكون ۵۰ میلی‌لیتری، جامدات معلق با استفاده از سانتریفیوژ جداسازی، و پس از انتقال بخش مایع به ظروف پلی‌اتیلن ۱۰۰ میلی‌لیتری، به منظور حفاظت از نمونه سه قطره اسید نیتریک ۶۵٪ به آن اضافه شد. محتوای کل فلزات آرسنیک، آهن، سرب، روی، کادمیم، کروم، مس، منگنز، مولیبدن و نیکل در نمونه‌ها با استفاده از طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) تعیین شد.

### ۳-۲- شاخص‌های ارزیابی آلودگی

به منظور ارزیابی کیفیت آب، غلظت عناصر با حدود مجاز آن‌ها در آب مقایسه می‌شود. علاوه بر این، شاخص‌های مختلفی نیز توسعه داده شده است که به عنوان ابزاری مفید برای مدیران و تصمیم‌گیران برای انجام اقدامات مدیریتی و کنترلی در این زمینه استفاده می‌شوند

1 Heavy Metal Evaluation Index (HEI)  
2 Contamination Index (Cd)  
3 Heavy Metal Pollution Index (HPI)

نشان می‌دهند. به دلیل متفاوت بودن محدوده غلظت عناصر، در نمودار مذکور از لگاریتم مقادیر غلظت استفاده شد. نتایج غلظت‌ها نشان دهنده وجود اغلب فلزات سنگین در رواناب حوضه است که از مهم‌ترین فاکتورهای موثر می‌توان به گستردگی حوضه و همچنین تنوع منابع انتشار اشاره نمود [۴۷]. به طور کلی کانال اصلی حوضه مورد مطالعه بخشی از رواناب ناشی از ارتفاعات شمال و شمال شرق و نواحی شرق و بخش از مرکز شهر تهران را زهکش می‌نماید با توجه به وجود واحدهای خدمات رفاهی، کارگاه‌ها، واحدهای تعمیرات خودرو، کارواش‌ها و همچنین نواحی مسکونی در داخل حوضه، تخلیه‌های غیرمجاز به داخل کانال اصلی و شعبه‌های فرعی آن صورت می‌گیرد. بنابراین تاثیرپذیری رواناب حوضه از نواحی بالادست با پوشش طبیعی و دست نخورده‌تر و همچنین تخلیه غیرمجاز فاضلاب شهری و پساب‌های صنعتی و کارگاهی از مهم‌ترین دلایل محتمل نوسان بالای غلظت عناصر در طول رخدادهای سیلابی است. از طرفی غلظت عناصر مورد بررسی در هر رخداد بارشی دارای نوسان قابل توجهی بود که دلیل اصلی آن به برداشت نمونه در فواصل زمانی در طول هر رخداد بارشی بر می‌گردد. به گونه‌ای که با وقوع بارش و تشکیل رواناب غلظت‌ها به تدریج افزایش یافته و در پدیده اوج اولیه به دلیل تاثیر شست و شوی عمده سطوح حوضه به حداکثر خود رسیده و پس از عبور اوج اولیه غلظت‌ها مجددا کاهش می‌یابد [۴۸]. نتایج نشان داد که آهن به عنوان فراوان‌ترین عنصر در گستره ۹/۰۵ - ۱۰۳/۹ میلی‌گرم بر لیتر با میانگین ۳۹/۶۷ میلی‌گرم بر لیتر و کادمیم در گستره ۰/۲۵ - ۲/۹۵ میکروگرم بر لیتر و میانگین ۱/۲۳ میکروگرم بر لیتر، کم‌ترین فراوانی را در بین عناصر مورد بررسی داشت. به طور کلی آهن، منگنز، روی، سرب، مس، کروم، نیکل، آرسنیک، مولیبدن و کادمیم به ترتیب بیش‌ترین فراوانی را در کل نمونه‌ها داشتند. به گونه‌ای که بیش از ۹۰٪ میانگین غلظت کل فلزات در نمونه‌ها مربوط به عنصر آهن و سهم منگنز و روی به ترتیب بیش از ۳/۸٪ و ۱/۴٪ و سهم سایر عناصر کم‌تر از ۱٪ بود. مقادیر میانگین غلظت‌های ثبت شده برای رواناب حوضه مورد مطالعه با نتایج مطالعات مشابه داخلی و خارجی بر روی رواناب شهری و یا آب‌های متأثر از رواناب شهری در جدول ۲ آورده شده است. داده‌های موجود در جدول ۲ نشان می‌دهد که غلظت اغلب فلزات سنگین در رواناب نواحی با سطح ترافیک بالا مانند بزرگراه‌ها در مقایسه با نواحی مسکونی بالاتر است. همچنین

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n WiQi}{\sum_{i=1}^n Wi} \quad (4)$$

$$Q = \frac{\{Mi(-)Ii\}}{Si - Ii} * 100 \quad (5)$$

که در آن  $Qi$  بیانگر زیرشاخص،  $Wi$  وزن عنصر،  $n$  تعداد عناصر مورد بررسی،  $Mi$  غلظت اندازه‌گیری شده عنصر،  $Ii$  بیانگر غلظت ایده‌آل عنصر مورد ارزیابی و  $Si$  نیز نشان دهنده حد مجاز برای عنصر مورد ارزیابی بر حسب میکروگرم بر لیتر در مطالعه حاضر است. حد غلظت مجاز برای هر عنصر بر اساس استاندارد کیفیت آب‌های ایران [۴۵]، گروه ۲ کاربری شرب برای عناصر سرب، آرسنیک، کادمیم، کروم، مس، منگنز، مولیبدن، نیکل، آهن و روی به ترتیب برابر با ۵۰، ۵۰، ۵، ۵۰، ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۷۰، ۷۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ و حد غلظت ایده‌آل هر عنصر ( $Ii$ ) بر اساس گروه ۱ کاربری شرب در این استاندارد تعریف شدند. لازم به ذکر است که به دلیل عدم وجود حد غلظت مجاز برای عناصر مولیبدن و نیکل در استاندارد کیفیت آب‌های ایران، از حدود مجاز موجود در استاندارد آب آشامیدنی موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (نشریه ۱۰۵۳) [۴۶] استفاده شد.

## ۲-۴- تحلیل‌های آماری

برای انجام تحلیل‌های آماری و همچنین نمایش آمارهای توصیفی و استنباطی از نرم افزار SPSS نسخه ۲۲ استفاده شد. ابتدا به منظور بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپروویلیک<sup>۱</sup> استفاده شد. با توجه به غیر نرمال بودن داده‌ها برای بررسی رابطه بین متغیرهای مورد نظر، از آزمون ضریب همبستگی اسپیرمن و برای مقایسه میانگین غلظت عناصر مورد بررسی با استاندارد کیفیت آب‌های ایران از آزمون ویلکاکسن استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- توزیع غلظت فلزات سنگین در رواناب حوضه

جدول ۱ خلاصه‌ای از آمار توصیفی غلظت‌های اندازه‌گیری شده عناصر مورد بررسی و شکل ۲ گستره غلظت عناصر در کل نمونه‌های مورد بررسی از حوضه را با استفاده از نمودار ویسکر باکس

1 Shapiro-Wilk

زاده و همکاران که در سال ۱۳۸۴ انجام شده است [۵۱]، بیشتر است. با توجه به اینکه ترافیک شهری، آسفالته خیابان‌ها، سایش لنت ترمز و لاستیک خودروها عمده‌ترین منابع سرب، نیکل و روی عنوان شده است، افزایش سطح ترافیک نسبت به سال‌های قبل سطح غلظت این عناصر نیز در رواناب حوضه افزایش یافته است.

به طور کلی بیشینه غلظت‌های مشاهده شده مربوط به اوج اولیه رواناب رخدادهایی با دوره خشکی و شدت بارش بالاتر و کمینه غلظت‌ها در نمونه‌های مربوط به جریان پس از اوج اولیه بود. با توجه به این که بخش عمده فلزات سنگین در محیط رواناب به صورت هم پیوند با ذرات معلق وجود دارد [۵۲]، بنابراین بروز پدیده اوج اولیه به دلیل شست و شوی اولیه سطح آلوده و هم‌چنین معلق‌سازی مجدد رسوبات آلوده موجود در کف و دیواره کانال باعث افزایش قابل توجه غلظت فلزات در محیط رواناب می‌شود. از آنجا که برای منابع آلاینده غیرنقطه‌ای تعیین دقیق نوع و سهم منابع انتشار فلزات به محیط رواناب بسیار دشوار و خارج از بحث این مطالعه است. بنابراین بر اساس نتایج مطالعات مشابه غلظت‌های بسیار بالای آهن بیش‌تر ناشی از تاثیرپذیری جریان از فاضلاب‌های شهری، کارگاهی و صنعتی [۵۳] است، اما محتمل‌ترین دلیل آن تاثیرپذیری رواناب از سازندهای زمین شناسی و کانی‌های آهن‌دار به ویژه در نواحی کوهستانی بالادست حوضه است. هم‌چنین ثابت شده است که ترکیبات استفاده شده در

غلظت اغلب عناصر از جمله سرب، کروم، مس و روی در مطالعه حاضر در مقایسه با رواناب سایر نقاط شهری بالاتر بوده است که نشان دهنده سطح قابل توجه منابع انتشار این عناصر در شهر تهران است. مقادیر اندازه‌گیری عناصر سرب، کادمیم، مس، نیکل و روی در رواناب برخی بزرگراه‌های تهران در مقایسه با متوسط غلظت‌های مشاهده شده در این مطالعه بالاتر بود که دلیل اصلی کمتر بودن غلظت‌ها در مطالعه حاضر نسبت به مطالعه نامرده، ترقیق ناشی از تاثیرپذیری رواناب از کاربری‌های مختلف به ویژه کاربری‌های طبیعی و کوهستانی نواحی بالادست حوضه است. هم‌چنین غلظت‌های بالای عناصر روی، سرب و نیکل در بزرگراه‌های شلوغ در مقایسه با بزرگراه‌های خلوت، نشان دهنده تاثیر مستقیم و قابل توجه حجم ترافیک بر انتشار این عناصر به محیط رواناب در تهران است [۴۹]. هم‌چنین نتایج برخی مطالعات مشابه بر روی رواناب نقاط شهری دیگر [۵۰] نشان دهنده بالا بودن غلظت عناصر روی و سرب در مقایسه با عناصر دیگر مانند مس، کادمیم و نیکل است. نتایج مطالعه‌ای مبنی بر بررسی محتوای فلزات سرب، روی، کادمیم، مس و نیکل بر روی سه حوضه مهم شهر تهران نیز تایید دیگری بر غالبیت منگنز و سرب در مقایسه با عناصر مس، کادمیم و نیکل در رواناب حوضه‌های شهر تهران از جمله حوضه سرخه حصار است [۵۱]. هم‌چنین میانگین غلظت عناصر سرب، نیکل، مس و روی در مطالعه حاضر در مقایسه با مطالعه نبی

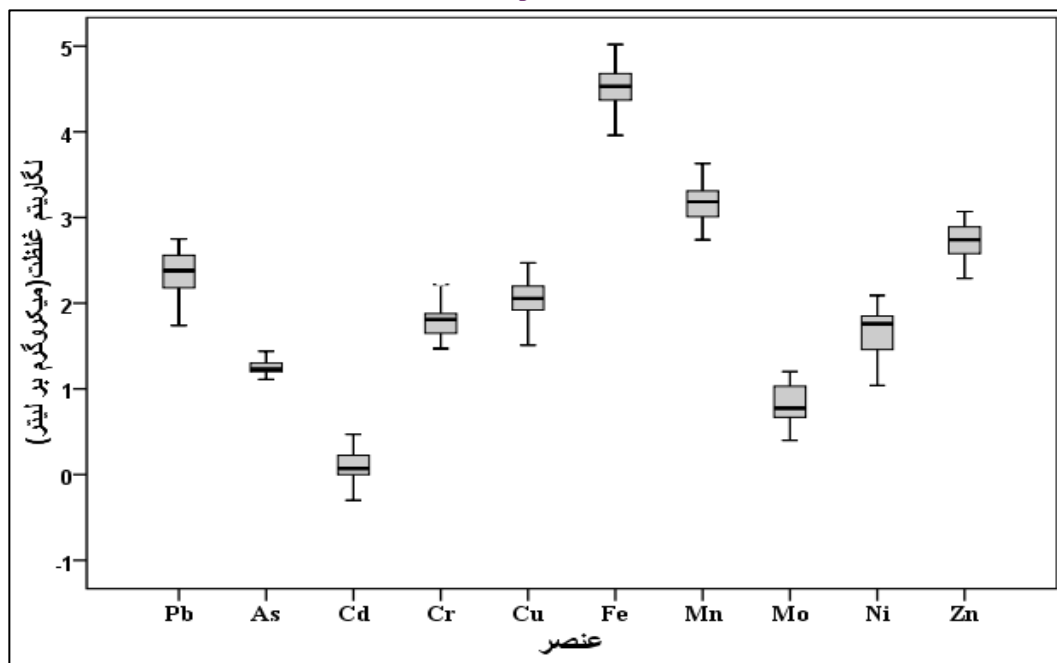
جدول ۱. گستره غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های رواناب حوضه سرخه حصار تهران (میکروگرم بر لیتر)

Table 1. The runoff drainage network in of Sorkkeh Hesar catchment in Tehran and the location of sampling station

عناصر	حد تشخیص (میکروگرم بر لیتر)	کمینه	بیشینه	میانگین	میانگین	استاندارد کیفیت آب‌های ایران برای کاربری شرب	استاندارد سازمان محیط زیست برای تخلیه پساب به آب‌های سطحی	استاندارد سازمان محیط زیست برای تخلیه پساب برای آبیاری	استاندارد سازمان محیط زیست برای تخلیه پساب به آب‌های سطحی
Pb	۰/۱	۵۵	۵۵۸/۷۵	۲۶۹/۲	۲۴۰/۲	۵۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
As	۰/۱	۱۰/۸	۲۷/۵	۱۷/۵	۱۶/۹	۵۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
Cd	۱	۰/۲۵	۲/۹	۱/۳	۲/۱	۵	۵۰	۵۰	۱۰۰
Cr	۱	۱۶/۳	۲۲۳/۴	۷۷/۲	۶۴/۹	۵۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰
Cu	۱	۲۶/۵	۲۹۴	۱۱۸	۱۱۳/۶	۲۰۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۰۰
Fe	۱۰	۹۰۵۰	۱۰۳۹۰۰	۳۹۶۷۶	۳۳۹۳۵	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰
Mn	۱۰	۳۳۵	۴۲۳۵	۱۶۴۱/۶	۱۵۲۲/۵	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
Mo	۱	۰/۲۵	۱۵/۹	۷/۷	۵/۹	۷۰	۱۰	۱۰	۱۰
Ni	۰/۱	۱۱	۱۲۴/۳	۵۵/۲	۵۷/۳	۷۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰
Zn	۱۰	۱۹۵	۱۱۸۵	۶۰۳	۵۵۰	۵۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰

شکل ۲. پراکندگی غلظت عناصر در کل نمونه‌های برداشت شده از خروجی حوضه سرخه حصار تهران

Fig. 2. The distribution of elements in the collected samples from the outlet of Sorkkeh Hesar catchment in Tehran



جدول ۲. مقایسه میانگین غلظت عناصر مورد بررسی در رواناب حوضه سرخه حصار تهران با غلظت‌های گزارش شده در سایر حوضه‌های شهری

Table 2. Comparison of the mean concentration of elements in the runoff of Sorkkeh Hesar catchment in Tehran with the reported concentrations in other urban catchments

مرجع	Zn	Ni	Mo	Mn	Fe	Cu	Cr	Cd	As	Pb	محیط
مطالعه حاضر	۶۰۳	۵۵/۲	۷/۷	۱۶۴/۱۶	۳۹۶۷۶	۱۱۸	۷۷/۲	۱/۳	۱۷/۵	۲۶۹/۲	رواناب - خروجی حوضه سرخه حصار- تهران
[۴۹]	۳۲۹۴	۱۲۷	-	-	-	۲۱۰	-	۵۸	-	۳۰۶۰	رواناب- بزرگراه چمران - تهران
[۴۹]	۱۸۶۲	۱۱۵	-	-	-	۱۵۷	-	۴۸	-	۲۰۷۵	رواناب- بزرگراه یادگار امام - تهران
[۵۱]	۶۲۴	۵۱	-	-	-	۷۱	-	۷۰	-	۱۰۹	رواناب- خروجی حوضه سرخه حصار - تهران
[۵۱]	۹۸۱	۳۰	-	-	-	۲۰	-	۶۰	-	۱۱۴	رواناب - خروجی حوضه عماد آورد- تهران
[۵۱]	۷۷۷	۴۳	-	-	-	۵۰	-	۲۷	-	۱۱۶	رواناب - خروجی حوضه کن- تهران
[۲۷]	۴۳۶/۴	۸/۸۸	-	۱۴/۷	۸۴۸/۱	۴۴/۷	۱۸۵/۷	۱/۸۲	۶/۲	۵۱/۳	رواناب منطقه مسکونی- سنگاپور
[۵۹]	۴۷۰	۴۰	-	-	-	۳۹	۶۰	۰/۲۲	-	۷۹	رواناب منطقه پرترافیک- پکن- چین
[۵۶]	۱۹/۶۳	-	-	-	-	۳/۰۸	۱۴/۶۷	۰/۰۷	-	۲/۱۵	استخر ذهیره رواناب شهری، کوالالمپور، مالزی
[۶۰]	۵۰۶	۲۰	-	-	-	۹۳/۱	۱۰/۱	۱/۸	-	۳۳	رواناب شهری، لس آنجلس
[۶۱]	۳۲۰	-	-	-	-	۳۶	-	۱/۳	-	۵۷	رواناب، منطقه شهری، فرانسه

لاستیک، تخلیه فاضلاب شهری یا روکش‌های گالوانیزه از مهم‌ترین منابع محتمل عنصر روی موجود در رواناب‌های شهری است [۵۴]. سازندهای زمین‌شناسی و جنس خاک حوضه از مهم‌ترین منابع انتشار منگنز به محیط رواناب به حساب می‌آید، اما ثابت شده است که غالبیت منابع انتشار انسانی از جمله فاضلاب صنعتی و کارگاهی محتمل‌تر است [۵۵]. مقادیر بالای فلزات سرب و مس نیز نشان دهنده غالبیت عوامل انتشار انسانی از جمله ترافیک، سیستم ترمز خودروها و خوردگی و فرسایش مواد ساختمانی مرتبط است [۵۶]. فرسودگی آسفالت، لنت ترمز و لاستیک خودروها علاوه بر سرب و روی، مقادیر قابل توجهی نیکل به محیط رواناب انتشار می‌دهند [۴۹]. هم‌چنین مطالعات مشابه بر روی رواناب‌های شهری نشان دهنده غلظت‌های کم کادمیم در مقایسه با سایر فلزات بوده است که علت آن غلظت‌های بسیار اندک این عنصر در گرد و غبار شهری و ته نشین‌های اتمسفری به عنوان یکی از مهم‌ترین انتقال‌دهنده‌های اصلی آلاینده به محیط رواناب ذکر شده است [۵۰ و ۲۹]. غلظت مولیبدن مانند کادمیم از سایر فلزات پایین‌تر بود که از مهم‌ترین منابع محتمل آن می‌توان به احتراق سوخت‌های فسیلی، تخلیه فاضلاب شهری و پسماندهای شهری اشاره کرد [۵۷]. کروم نیز در ۲۰٪ نمونه‌ها بیش از ۱۰۰ میکروگرم بر لیتر مشاهده شد که از محتمل‌ترین منبع انتشار این عنصر به جریان رواناب می‌توان به تخلیه فاضلاب‌های صنعتی اشاره کرد [۵۸]. با توجه به اینکه صنایع بزرگ، احتراق نفت خام و ذغال سنگ از عمده‌ترین منابع انتشار آرسنیک به شمار می‌روند، غلظت‌های مشاهده شده این عنصر نیز در رواناب اندک بود.

### ۳-۲- ارزیابی کیفیت رواناب برای کاربری کشاورزی

با توجه به این که بخشی از رواناب در جنوب تهران به منظور آبیاری زمین‌های کشاورزی برداشت و بخشی از آن نیز پس از پیوستن به رواناب‌های حوضه‌های مرکز و غرب تهران به تالاب بندعلیخان به عنوان اکوسیستم آبی پذیرنده می‌ریزد، غلظت‌های بالای فلزات به صورت مستقیم و غیرمستقیم خاک، آبخوان و محصولات زراعی و اکوسیستم‌ها تالاب را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از همین رو در جدول ۱ کیفیت رواناب به لحاظ آلودگی به فلزات سنگین، با حدود مجاز تعیین شده در استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست برای کاربرد پساب برای آبیاری و تخلیه به آب‌های سطحی مقایسه شد. نتایج

آزمون ویلکاکسن نشان داد که مقادیر اندازه‌گیری شده تمام فلزات با حدود تعیین شده استاندارد برای آبیاری و تخلیه به آب‌های سطحی اختلاف معنی‌دار دارد ( $P < 0.05$ ). به صورت جزئی‌تر مقایسه میانگین عناصر با حدود تعیین شده در استانداردهای مربوط نشان داد که غلظت آهن در تمام نمونه‌ها، ۳۴-۳ برابر حدود مجاز تعیین شده برای آبیاری و تخلیه به آب‌های سطحی بود. غلظت عناصر منگنز و مولیبدن نیز به ترتیب در بیش از ۸۰٪ و ۲۰٪ نمونه‌ها بالاتر و مقادیر اندازه‌گیری شده عناصر آرسنیک، کادمیم، کروم، مس (به استثنای یک نمونه)، و نیکل و روی در تمام نمونه‌ها نسبت به حدود مجاز در استانداردهای مورد نظر پایین‌تر بود. نتایج مطالعه مردانی و همکاران نیز در بررسی محتوای پنج فلز سنگین سرب، کادمیم، روی، مس و نیکل، در خاک اراضی جنوب تهران نیز نشان داد که غلظت عناصر به ویژه روی در نواحی که با رواناب آبیاری می‌شوند، نسبت به سایر نقاط بالاتر است که تنها دلیل این امر کاربرد وسیع رواناب‌ها به ویژه رواناب حوضه سرخه حصار در آبیاری عنوان شده است [۶۲]. بنابراین در راستای اقدامات کاهش ریسک محیط زیستی و بهداشتی این آب‌ها در اراضی کشاورزی بایستی توجه ویژه‌ای به عناصر آهن، منگنز و مولیبدن شود.

### ۳-۳- ضریب همبستگی فلزات سنگین

نتایج آزمون شاپروویلیک نشان داد که داده‌های مربوط به غلظت عناصر توزیع غیر نرمال دارند. بنابراین به منظور بررسی ارتباط بین عناصر از آزمون همبستگی اسپیرمن در دو سطح معنادار ( $P < 0.01$ ) و ( $P < 0.05$ ) استفاده شد. به طور کلی ضریب همبستگی ( $r$ ) بزرگ‌تر از ۰/۷ همبستگی قوی، بین ۰/۵ تا ۰/۷ همبستگی متوسط و کم‌تر از ۰/۵ همبستگی ضعیف را نشان می‌دهد [۶۳]. به طور کلی وجود همبستگی مثبت بین عناصر مشخص کننده منابع ورودی مشابه یا رفتار ژئوشیمیایی مشابه آن‌ها [۶۴] و همبستگی قوی بین دو فلز ممکن است نشان دهنده وابستگی شدید دو عنصر به یک عامل خارجی باشد [۶۵]. جدول ۳ ضرایب همبستگی محاسبه شده بین عناصر مورد مطالعه در کل نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بین اغلب عناصر موجود در محیط رواناب به ویژه آهن، منگنز، روی، سرب، نیکل، کادمیم و مس همبستگی مثبت و قوی وجود دارد که نشان دهنده نقش قابل توجه منابع انتشار انسانی این ترکیبات به محیط است



جدول ۳. نتایج آزمون همبستگی اسپیرمن بین فلزات سنگین در رواناب حوضه سرخه حصار تهران

Table 3. The results of Spearman correlation between heavy metals in the runoff of Sorkheh Hesar catchment in Tehran

سرب	آرسنیک	کادمیم	کروم	مس	آهن	منگنز	مولیبدن	نیکل	روی
سرب	۱								
آرسنیک	۰/۵۷**								
کادمیم	۰/۷۴**	۰/۳۳**							
کروم	۰/۶۴**	۰/۴۸**	۰/۵۷**						
مس	۰/۹**	۰/۴۸**	۰/۷۲*	۱					
آهن	۰/۸۴**	۰/۶۷**	۰/۶۵**	۰/۸۷**	۱				
منگنز	۰/۸**	۰/۷**	۰/۶۲**	۰/۸۸**	۰/۹۸**	۱			
مولیبدن	۰/۵۳**	-۰/۰۷	۰/۳۳	۰/۴۱*	۰/۶۲**	۰/۳۹*	۱		
نیکل	۰/۸**	۰/۵۱**	۱/۵۸*	۰/۸۶**	۰/۸۵**	۰/۹۱**	۰/۶۷*	۱	
روی	۰/۹**	۰/۶۵**	۰/۷۳**	۰/۷۳**	۰/۹۴**	۰/۸۸**	۰/۴۳*	۰/۸۲**	۱

\*\*- معنی داری همبستگی در سطح ۰/۰۱ (دوره)

\*- معنی داری همبستگی در سطح ۰/۰۵ (دو راه)

مانند مولیبدن با سایر فلزات به استثنای منگنز همبستگی ضعیف و گاهی متوسط داشته است. همبستگی بسیار قوی آهن و یا منگنز با برخی عناصر مانند کروم، نیکل و روی می تواند به دلیل جذب این عناصر به هیدروکسید آهن و منگنز در محیط رواناب باشد [۵۵].

### ۳-۴- شاخص های ارزیابی آلودگی

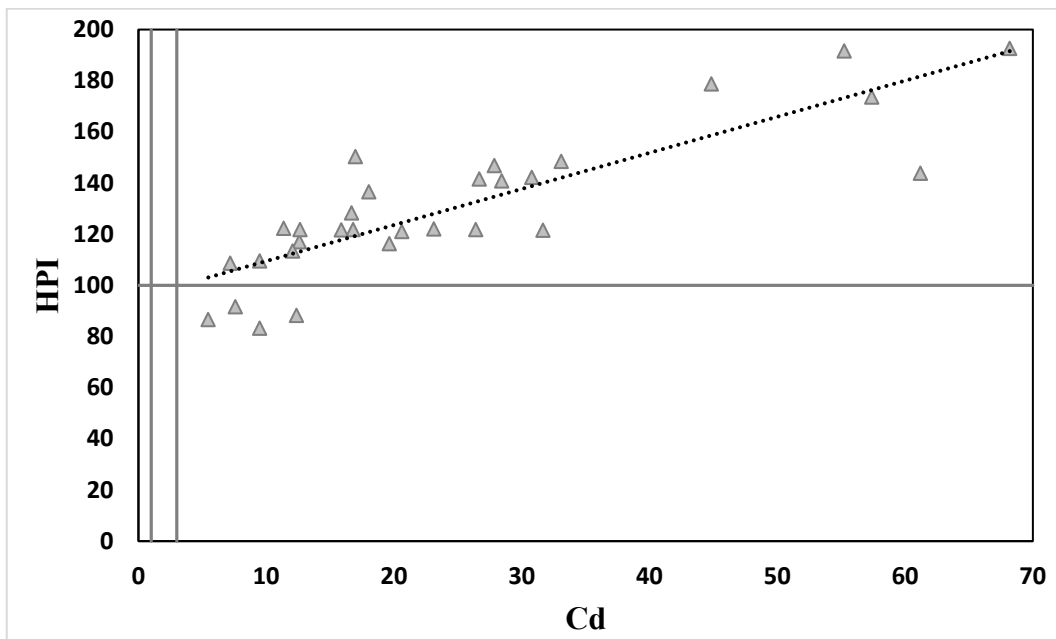
مقایسه غلظت عناصر با حدود استاندارد کیفیت آب های ایران برای کاربری شرب نشان دهنده پایین تر بودن محتوای فلزات آرسنیک، کادمیم، مس، مولیبدن و روی در تمام نمونه ها از حدود مجاز تعیین شده بود، در حالی که غلظت های اندازه گیری شده آهن و سرب در تمام نمونه ها از حدود مجاز بالاتر بود، به گونه ای که گستره غلظت های آهن ۱۹/۸-۴/۵ برابر حد مجاز (۲۰۰۰ میکروگرم بر لیتر) و غلظت های عنصر سرب نسبت به حدود مجاز تعیین شده (۵۰ میکروگرم بر لیتر) حداقل ۱/۱ برابر و در برخی نمونه ها تا ۱۱/۱ برابر بود. هم چنین غلظت اندازه گیری شده منگنز و کروم در بیش از ۷۵٪ نمونه ها بالاتر از حدود استاندارد بود و غلظت این عناصر در برخی نمونه ها به ترتیب ۴/۲ و ۴/۴ برابر حدود مجاز تعیین شده بود. غلظت نیکل نیز در بیش از ۲۵٪ نمونه ها بالاتر از حد مجاز تعیین شده در استاندارد بود. شاخص های گفته شده نیز برای ارزیابی کلی وضعیت آلودگی رواناب به لحاظ حضور فلزات سنگین مورد بررسی، محاسبه شد. وضعیت پراکندگی مقادیر محاسبه شده سه شاخص مورد نظر

[۶۶]. بالاترین ضریب همبستگی بین آهن و منگنز مشاهده شد که نشان دهنده شدت بالای منابع انتشار و رفتار آن ها در محیط رواناب است. هم چنین بین سرب، مس و روی و هم چنین بین نیکل، آهن و منگنز همبستگی بالایی (بیش از ۰/۹) وجود دارد که نشان دهنده غالبیت منابع انتشار انسانی در مقایسه با منابع انتشار طبیعی است. نتایج مطالعه کامرانی و همکاران در بررسی فلزات سنگین در رواناب نواحی مرکزی تهران نیز نشان دهنده این بود که آهن و کروم بیش تر از منابع زمینی انتشار یافته و فلزات روی، کادمیم، نیکل، سرب و مس منشا انسانی دارند [۶۷].

علاوه بر تاثیر پذیری رواناب حوضه از کاربری های مختلف شهری و طبیعی، تخلیه غیرمجاز فاضلاب ها به مسیل ها و نهرها از مهم ترین دلایل غلظت بالای عناصر و هم چنین همبستگی بالای آن ها با یکدیگر است. نتایج مطالعات مشابه بر روی محتوای فلزات سنگین در رودخانه های متاثر از رواناب و فاضلاب شهری نشان داده است که بین تمام عناصر مورد بررسی همبستگی مثبت و قوی وجود دارد که دلیل محتمل آن وجود منابع انتشار یکسانی مانند فاضلاب مناطق مسکونی عنوان شده است [۶۸ و ۵۵]. اما در بین عناصر، مولیبدن تنها عنصری است که رفتار متمایزی نشان داده است. همبستگی ضعیف و متوسط آن با تمام عناصر مورد بررسی نشان دهنده متفاوت بودن عوامل توزیع و انتشار آن به محیط رواناب است. آرسنیک نیز

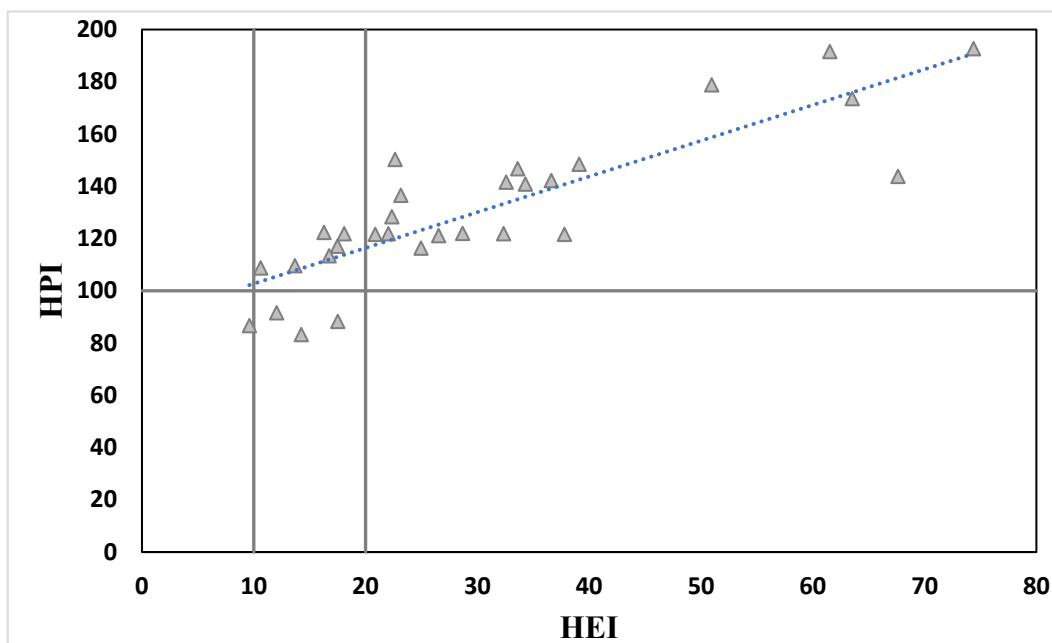
روند مشابهی هستند [۶۹]. شاخص  $Cd$  به عنوان مرجع برآورد میزان آلودگی فلزات، در گستره ۵/۵-۶۸/۲ با میانگین ۲۴/۷ قرار داشت که از نظر طبقه بندی گفته شده، تمام نمونه‌ها در طبقه بسیار آلوده قرار می‌گیرند. مقادیر شاخص HEI نیز در محدوده ۹/۶-۷۴/۴ با میانگین ۳۰/۱ بود. بنابراین شاخص HEI نشان داد که بیش از ۶۶٪

برای ۳۰ نمونه مورد بررسی و همبستگی بین آن‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ آورده شده است. همچنین نتایج مربوط به همبستگی بین این شاخص‌ها برای نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۲ شرح داده شده است که نشان می‌دهد هر سه شاخص دارای همبستگی معنادار و قوی بوده که نشان می‌دهد هر سه شاخص به لحاظ توصیفی دارای



شکل ۳. پراکندگی و همبستگی مقادیر شاخص‌های HPI و Cd در حوضه سرخه حصار تهران

Fig. 3. The dispersion and correlation of HPI and Cd indices for runoff of Sorkheh Hesar catchment in Tehran



شکل ۴. پراکندگی و همبستگی مقادیر شاخص‌های HPI و HEI در حوضه سرخه حصار تهران

Fig. 4. The dispersion and correlation of HPI and HEI indices for runoff of Sorkheh Hesar catchment in Tehran

جدول ۴. نتایج همبستگی بین شاخص‌های ارزیابی آلودگی در حوضه سرخه حصار تهران

Table 4. The results of correlation between pollution evaluation indices for runoff of Sorkheh Hesar catchment in Tehran

		Cd	HEI	HPI
Cd	ضریب همبستگی	۱	۰/۹۹۹**	۰/۸۳۵**
	معنی داری (دو طرفه)	.	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
	تعداد	۳۰	۳۰	۳۰
همبستگی اسپیرمن HEi	ضریب همبستگی	۰/۹۹۹**	۱	۰/۸۳۲**
	معنی داری (دو طرفه)	۰/۰۰۰	.	۰/۰۰۰
	تعداد	۳۰	۳۰	۳۰
HPI	ضریب همبستگی	۰/۸۳۵**	۰/۸۳۲**	۱
	معنی داری (دو طرفه)	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	.
	تعداد	۳۰	۳۰	۳۰

\*\*همبستگی معنی دار در سطح ۰/۰۱ (دو طرفه)

وجود غلظت‌های قابل توجه اغلب فلزات سنگین در رواناب حوضه سرخه حصار به گستردگی و تنوع منابع انتشار در حوضه بر می‌گردد. هم‌چنین نوسان بالای غلظت‌ها در طول هر رخداد بارشی نشان داد بیشترین غلظت‌ها در زمان عبور اوج اولیه و کم‌ترین در نمونه‌های مربوط به پس از عبور اوج اولیه مشاهده شد. وجود همبستگی قوی بین عناصری مانند سرب، آهن، مس، منگنز، نیکل و روی نشان دهنده رفتار ژئوشیمیایی مشابه و منابع انتشار مشترک آن‌ها است. که از مهم‌ترین منابع انتشار آن می‌توان به ترافیک شهری، سطوح ساختمانی و هم‌چنین تخلیه‌های غیرمجاز فاضلاب شهری و صنعتی به کانال‌های انتقال رواناب اشاره کرد. مقادیر محاسبه شده برای ارزیابی آلودگی به فلزات سنگین نیز نشان داد که بیش‌تر نمونه‌ها سطح آلودگی بالا و بخش کم‌تری از آن در رده آلودگی متوسط قرار می‌گیرند. با توجه به کیفیت پایین این آب‌ها و از طرفی استفاده از آن در آبیاری اراضی کشاورزی و هم‌چنین راهیابی بخشی از آن به تالاب بندعلیخان، به عنوان یک اکوسیستم آسیب پذیر، غلظت بالای برخی عناصر به ویژه آهن، منگنز، سرب، کروم و نیکل در این آب‌ها می‌تواند موجب تحمیل اثرات مخرب بر اکوسیستم‌های آب سطحی و زیرزمینی، خاک اراضی زراعی، یا محصولات زراعی تولیدی در نواحی جنوبی تهران شود. بنابراین با به کارگیری روش‌ها و تکنیک‌های جلوگیری از تخلیه غیر مجاز فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کارگاهی به داخل مسیر اصلی و شعب فرعی رواناب حوضه، بخش

نمونه‌ها در طبقه بسیار آلوده ( $HEI > 20$ ) قرار دارد. اما با در نظر گرفتن طبقه آلودگی متوسط ( $HEI > 10$ ) به عنوان طبقه آلوده، بیش از ۹۷٪ نمونه‌ها آلوده به حساب می‌آیند. هم‌چنین مقادیر HPI نیز در محدوده ۱۹۲/۷-۸۳/۲ با میانگین ۱۳۰/۲ قرار داشت که بر اساس آن ۸۷٪ نمونه‌ها (۲۶ نمونه) در طبقه آلوده قرار داشت. از طرفی مقدار این شاخص برای ۱۳٪ نمونه‌ها (۴ نمونه) پایین‌تر از حد بحرانی ۱۰۰ بود که مقادیر شاخص HEI برای این نمونه‌ها بیانگر آلودگی متوسط بود. بررسی‌ها نشان داد که علت پایین بودن این دو شاخص برای این نمونه‌ها پایین بودن غلظت‌های آهن، منگنز و سرب در مقایسه با غلظت این عناصر در سایر نمونه‌ها بود. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت نتایج هر سه شاخص نشان دهنده این است که بخش عمده رواناب‌های سیلابی در حوضه به لحاظ حضور فلزات سنگین مورد بررسی در سطح بسیار آلوده قرار دارند. اما سطوح بالای شاخص‌های مورد بررسی در نمونه‌ها بیش‌تر به دلیل غلظت‌های بسیار بالای آهن، منگنز و سرب است که عمدتاً از منابع انسانی (به ویژه به محیط رواناب انتشار می‌یابند. بنابراین اقدامات کاهش‌ی با هدف کاهش این سه عنصر در رواناب حوضه، منجر به ارتقای کیفیت و کاهش ریسک بهداشتی و زیست محیطی جوامع و اکوسیستم‌های تحت تاثیر این آب‌ها می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

- land uses to in-stream stormwater quality, *Journal of Environmental Quality*, 28(3) (1999) 836-844.
- [11] J.Y. Lee, H. Kim, Y. Kim, M.Y. Han, Characteristics of the event mean concentration (EMC) from rainfall runoff on an urban highway, *Environmental Pollution*, 159(4) (2011) 884-888.
- [12] J. Xie, Z. Hu, T. Xu, H. Han, D. Yin, Water quality characteristics of rainfall runoff in Hefei City, China *Environmental Science*, 32(6) (2012) 1018-1025.
- [13] C. Sakulthaew, S. Comfort, C. Chokejaroenrat, C. Harris, X. Li, A combined chemical and biological approach to transforming and mineralizing PAHs in runoff water, *Chemosphere*, 117 (2014) 1-9.
- [14] E. Eriksson, A. Baun, P.S. Mikkelsen, A. Ledin, Chemical hazard identification and assessment tool for evaluation of stormwater priority pollutants, *Water Science and Technology*, 51(2) (2005) 47-55.
- [15] F. Chen, Q. Zhou, Toxic effects of galaxolide and cadmium on *Daphnia magna* under polluting flow conditions containing soil-water interfaces from urban areas, *China Environmental Science*, 29(1) (2009) 58-62.
- [16] A.D. Steinman, E.S. Isely, K. Thompson, Stormwater runoff to an impaired lake: impacts and solutions, *Environmental monitoring and assessment*, 187(9) (2015) 549.
- [17] G.F. Birch, S.E. Taylor, Assessment of possible sediment toxicity of contaminated sediments in Port Jackson, Sydney, Australia, *Hydrobiologia*, 472 (1-3) (2002) 19-27.
- [18] U.E.P. Agency, Results of the nationwide urban runoff program, Final Rep., 1 (1983).
- [19] Z. Wu, M. He, C. Lin, Y. Fan, Distribution and speciation of four heavy metals (Cd, Cr, Mn and Ni) in the surficial sediments from estuary in daliiao river and yingkou bay, *Environmental Earth Sciences*, 63(1) (2011) 163-175.
- [20] B. Sarkar, Heavy metals in the environment, CRC Press, (2002).
- [21] X. Yang, J. Duan, L. Wang, W. Li, J. Guan, S. عمده‌ای از بار آلودگی رواناب کاسته خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه بخش عمده فلزات سنگین به صورت هم پیوند با ذرات معلق و رسوبات موجود در آب به محیط‌های پذیرنده انتقال می‌یابند، بنابراین با طراحی و استفاده از حوضچه‌های ته‌نشینی رسوب و یا تاسیسات تصفیه اولیه در خروجی حوضه، می‌توان به حد قابل قبولی از بار آلودگی فلزات سنگین در رواناب به محیط‌های پذیرنده کاست.
- مراجع**
- [1] R. Barzegar, A.A. Moghaddam, S. Soltani, N. Baomid, E. Tziritis, J. Adamowski, A. Inam, Natural and anthropogenic origins of selected trace elements in the surface waters of Tabriz area, Iran, *Environmental earth sciences*, 78(8) (2019) 254.
- [2] A. Qishlaqi, S. Kordian, A. Parsaie, Hydrochemical evaluation of river water quality—a case study, *Applied Water Science*, 7(5) (2017) 2337-2342.
- [3] A. Parsaie, A.H. Haghiabi, Computational modeling of pollution transmission in rivers, *Applied water science*, 7(3) (2017) 1213-1222
- [4] A.H. Haghiabi, A.H. Nasrolahi, A. Parsaie, Water quality prediction using machine learning methods, *Water Quality Research Journal*, 53(1) (2018) 3-13.
- [5] A. Parsaie, A.H. Haghiabi, Numerical modeling of effect of dead zones on concentration profile of pollution in rivers, *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(3) (2016) 825-834.
- [6] S.D.P. Division, World urbanization prospects: The 2001 revision, United Nations Publications, 2002.
- [7] T.D. Fletcher, A. Deletic, V.G. Mitchell, B.E. Hatt, Reuse of urban runoff in Australia: a review of recent advances and remaining challenges, *Journal of Environmental Quality*, 37(5\_Supplement) (2008) S-116-S-127.
- [8] M. Scholz, Wetland systems to control urban runoff, Elsevier, (2015).
- [9] C.C. Obropta, J.S. Kardos, Review of Urban Stormwater Quality Models: Deterministic, Stochastic, and Hybrid Approaches 1, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 43(6) (2007) 1508-1523.
- [10] A. McFarland, L.M. Hauck, Relating agricultural

- Environment, 557 (2016) 764-772.
- [31] Z. He, M. Zhang, D. Calvert, P. Stoffella, X. Yang, S. Yu, Transport of heavy metals in surface runoff from vegetable and citrus fields, *Soil Science Society of America Journal*, 68(5) (2004) 1662-1669.
- [32] B. Parsad, J. Bose, Evaluation of heavy metal pollution index for surface and spring water near a limestone mining area of the lower Himalayas, *Environmental Geology*, 41 (2001) 183-188.
- [33] B. Backman, D. Bodiš, P. Lahermo, S. Rapant, T. Tarvainen, Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia, *Environmental Geology*, 36(1-2) (1998) 55-64.
- [34] A.M. Abdel-Satar, M.H. Ali, M.E. Goher, Indices of water quality and metal pollution of Nile River, Egypt, *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 43(1) (2017) 21-29.
- [35] M.A.H. Bhuiyan, S.B. Dampare, M. Islam, S. Suzuki, Source apportionment and pollution evaluation of heavy metals in water and sediments of Buriganga River, Bangladesh, using multivariate analysis and pollution evaluation indices, *Environmental monitoring and assessment*, 187(1) (2015) 4075.
- [36] C. Singaraja, S. Chidambaram, K. Srinivasamoorthy, P. Anandhan, S. Selvam, A study on assessment of credible sources of heavy metal pollution vulnerability in groundwater of Thoothukudi districts, Tamilnadu, India, *Water Quality, Exposure and Health*, 7(4) (2015) 459-467.
- [37] M. Ghaderpoori, Heavy metals analysis and quality assessment in drinking water–Khorramabad city, Iran, *Data in brief*. 16 (2018) 685-692
- [38] A.K. Tiwari, M. De Maio, P.K. Singh, M.K. Mahato, Evaluation of surface water quality by using GIS and a heavy metal pollution index (HPI) model in a coal mining area, India, *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 95(3) (2015) 304-310.
- [39] M. Saeedi, L.Y. Li, M. Salmanzadeh, Heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons: pollution and ecological risk assessment in street dust of Tehran, Beecham, D. Mulcahy, Heavy metal pollution and health risk assessment in the Wei River in China, *Environmental monitoring and assessment*, 187(3) (2015) 111.
- [22] Z. Shang, J. Ren, L. Tao, X. Wang, Assessment of heavy metals in surface sediments from Gansu section of Yellow River, China, *Environmental monitoring and assessment*, 187(3) (2015) 79.
- [23] J.D. Sartor, G.B. Boyd, *Water pollution aspects of street surface contaminants*, US Government Printing Office (1972).
- [24] L.L. Tiefenthaler, E.D. Stein, K.C. Schiff, Watershed and land use–based sources of trace metals in urban storm water, *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 27(2) (2008) 277-287.
- [25] B. Helmreich, R. Hilliges, A. Schriewer, H. Horn, Runoff pollutants of a highly trafficked urban road–Correlation analysis and seasonal influences, *Chemosphere*, 80(9) (2010) 991-997.
- [26] G. Ignatavicius, V. Valskys, I. Bulskaya, D. Paliulis, A. Zigmontiene, J. Satkunas, Heavy metal contamination in surface runoff sediments of the urban area of Vilnius, Lithuania, *Estonian journal of earth sciences*, 66(1) (2017) 13.
- [27] U. Joshi, R. Balasubramanian, Characteristics and environmental mobility of trace elements in urban runoff, *Chemosphere*, 80(3) (2010) 310-318.
- [28] L. Hengren, A. Goonetilleke, G.A. Ayoko, Understanding heavy metal and suspended solids relationships in urban stormwater using simulated rainfall, *Journal of environmental management*, 76(2) (2005) 149-158.
- [29] A.P. Davis, M. Shokouhian, S. Ni, Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources, *Chemosphere*, 44(5) (2001) 997-1009.
- [30] Y. Ma, P. Egodawatta, J. McGree, A. Liu, A. Goonetilleke, Human health risk assessment of heavy metals in urban stormwater, *Science of the Total*

- study of heavy metals in runoff of highways of Tehran, Iranian Journal of Public Health, (2002) 1-8.
- [50] C. Ukabiala, O. Nwinyi, A. Abayomi, B. Alo, Assessment of heavy metals in urban highway runoff from Ikorodu expressway Lagos, Nigeria, Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, 2(3) (2010) 34-37.
- [51] R. Nabizadeh, A. Mahvi, G. Mardani, M. Yunesian, Study of heavy metals in urban runoff, International Journal of Environmental Science & Technology, 1(4) (2005) 325-333.
- [52] D. Lee, Heavy Metals and Stormwater: An Investigation of Hobart, Tasmania, Australia, (2002).
- [53] D. Kar, P. Sur, S. Mandai, T. Saha, R. Kole, Assessment of heavy metal pollution in surface water, International Journal of Environmental Science & Technology, 5(1) (2008) 119-124.
- [54] F. Charters, T. Cochrane, A. O'Sullivan, Predicting event-based stormwater contaminant loads from individual urban surfaces, in: Zaprezentowano na 11th South Pacific Stormwater Conference, New Zealand, (2016).
- [55] Z. Khoshnam, R. Sarikhani, A. Ghassemi Dehnavi, Z. Ahmadnejad, Evaluation of water quality using heavy metal index and multivariate statistical analysis in Lorestan province, Iran, Journal of Advances in Environmental Health Research, 5(1) (2017) 29-37.
- [56] N.A. Alrabie, F. Mohamat-Yusuff, R. Hashim, Z. Zulkeflee, A. Arshad, M.N.A. Amal, Heavy Metals Concentrations in Stormwater and Tilapia Fish (*Oreochromis Niloticus*) in Kuala Lumpur Holding and Storage SMART Ponds, Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science, 42(1) (2019).
- [57] A. Pasieczna, I. Bojakowska, W. Nadłonek, The impact of anthropogenic factors on the occurrence of molybdenum in stream and river sediments of central Upper Silesia (Southern Poland), Ochrona Srodowiska i Zasobów Naturalnych, 28(4) (2017) 16-26.
- [58] A. Zhitkovich, Chromium in drinking water: sources, Journal of hazardous materials, 227 (2012) 9-17.
- [40] S. Faryadi, S. Taheri, Interconnections of urban green spaces and environmental quality of Tehran, (2009).
- [41] M.G. Tali, M. Nezammahalleh, Urban flooding management using the natural drainage system case study: Tehran, capital of Iran, Floods: From Risk to Opportunity (IAHS Publ. 357, (2013) 174-180.
- [42] J. Creed, C. Brockhoff, T. Martin, Method 200.8: Determination of trace elements in waters and wastes by inductively coupled plasma-mass spectrometry, Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, Rev, 5 (1994).
- [43] S. Mishra, A. Kumar, S. Yadav, M. Singhal, Assessment of heavy metal contamination in water of Kali River using principle component and cluster analysis, India, Sustainable Water Resources Management, 4(3) (2018) 573-581.
- [44] S.V. Mohan, P. Nithila, S.J. Reddy, Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index, Journal of Environmental Science & Health Part A, 31(2) (1996) 283 - 289. National
- [45] Iranian Water Quality Standard, Department of Environment, Assistance of human environment- Soil and Water office ,(2016). (in persian)
- [46] Iranian Standard No. 1053, Institute of Standards and Industrial Research of Iran Drinking Water – Physical and Chemical Specifications. 5th Revision,(2009) (in Persian)
- [47] M. Huber, A. Welker, B. Helmreich, Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning, Science of the Total Environment, 541 (2016) 895-919.
- [48] K.R. Flint, A.P. Davis, Pollutant mass flushing characterization of highway stormwater runoff from an ultra-urban area, Journal of Environmental Engineering, 133(6) (2007) 616-626.
- [49] J. Nouri, K. Naghipour, Qualitative and quantitative

- analytical chemistry, Pearson education, (2018).
- [65] M. Ashraf, M. Maah, I. Yusoff, Chemical speciation and potential mobility of heavy metals in the soil of former tin mining catchment, *The Scientific World Journal*, (2012).
- [66] X. Lu, L. Wang, L.Y. Li, K. Lei, L. Huang, D. Kang, Multivariate statistical analysis of heavy metals in street dust of Baoji, NW China, *Journal of hazardous materials*, 173(1-3) (2010) 744-749.
- [67] H. Kamani, M. Hoseini, G. Safari, A. Mahvi, H. Zarei, Factors affecting the concentrations of heavy metals in precipitation of Tehran using factor analysis method, *Iranian Journal of Health and Environment*, 8(4) (2016) 401-410.
- [68] R. Pal, R. Dubey, S. Dubey, A. Singh, Assessment of heavy metal pollution through index analysis for Yamuna water in Agra region, India, *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, 6(12) (2017) 1491-1498.
- [69] A. Seifi, H. Riahi, Evaluation of Heavy Metal Pollution Indices for Surface Water of the Sarcheshmeh Copper Mine using Multivariate Statistical Methods and GIS, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(1) (2019) 161-176.(in pesian)
- metabolism, and cancer risks, *Chemical research in toxicology*, 24(10) (2011) 1617-1629.
- [59] H. Zhao, X. Li, X. Wang, D. Tian, Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China, *Journal of Hazardous Materials*, 183 (2010).
- [60] S.L. Lau, Y. Han, J.H. Kang, M. Kayhanian, M.K. Stenstrom, Characteristics of highway stormwater runoff in Los Angeles: metals and polycyclic aromatic hydrocarbons, *Water Environment Research*, 81(3) (2009) 308-318.
- [61] C. Pagotto, M. Legret, P. Le Cloirec, Comparison of the hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement, *Water Research*, 34(18) (2000) 4446-4454.
- [62] G. Mardani, M. Sadeghi, M. Ahankoob, Soil Pollution along the surface runoff in southern Tehran, *J. Water and Wastewater*, 75 (2010) 108-113.
- [63] J.D. Oinam, A. Ramanathan, G. Singh, Geochemical and statistical evaluation of groundwater in Imphal and Thoubal district of Manipur, India, *Journal of Asian Earth Sciences*, 48 (2012)136-149
- [64] J. Miller, J.C. Miller, *Statistics and chemometrics for*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Ghadiri, S. H. Hashemi, T. Nasrabadi, *Investigation of major heavy metal concentration in urban runoff (case study: North and east catchment of Tehran city)*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4489-4504.

DOI: [10.22060/ceej.2020.18384.6859](https://doi.org/10.22060/ceej.2020.18384.6859)



