نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۷، ص. ۲۹۸-۲۸۳

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 2, May.-Jan. 2018, p. 283-298

برآورد غلظت زمینه‌ای عناصر کمیاب سمی و اثر عملیات زراعی بر توزیع انباشت و بار آلودگی در خاک دشت بروجن- فرادمبه

حبیب الله بیگی هرچگانی*[۱]- سمیرا احمدزاده[۲]- سمیرا حشمتی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۰۵

چکیده

غلظت کل سرب، کبالت، نیکل، کادمیم، کروم و جیوه در خاک سطحی اراضی بایر، تحت کشاورزی مرسوم و تحت کاربرد پساب شهری اندازه‌گیری؛ و غلظت و حد زمینه‌ای، توزیع انباشت عناصر، و بار آلودگی تعیین شد. غلظت زمینه‌ای نیکل، کادمیم، کرومیم، جیوه، کبالت، سرب به ترتیب ۱/۱۳، ۰/۱۶، ۱/۵۶، ۰/۰۹، ۰/۸۰، و ۱/۵۲ و حد آن‌ها به ترتیب ۱/۳، ۰/۲۸، ۱/۶، ۰/۱۶، ۰/۹، و ۱/۷ میلی‌گرم بر گرم تعیین شد. کشاورزی مرسوم انباشت کادمیم و سرب در خاک را به ترتیب به ۱/۷ و ۱/۹ افزایش داده (p<۰/۵)، تمایل به افزایش کبالت، نیکل و جیوه‌ی از واحد به ۱/۲ خاک داشته ولی انباشت کروم را از واحد به ۰/۸ کاهش داده است (p>۰/۵). کاربرد پساب انباشت نیکل (از ۱/۲ به ۱/۶)، کروم (از ۰/۸ به ۱/۲) و به ویژه سرب (از ۱/۹ به ۳/۷) و کبالت (از ۱/۲ به ۱/۹) را افزایش ولی انباشت کادمیم را از ۱/۷ به ۱/۳) کاهش داده است. نرخ‌های انباشت تحت کاربرد پساب بزرگ‌تر است. بار آلودگی ۸ درصد دشت کم (بین ۰/۸۵ تا ۱؛ در بخش غربی) و ۹۲ درصد مساحت مانده در ابتدای محدوده‌ی آلودگی متوسط (بار آلودگی: ۱ تا ۲) قرار می‌گیرد. آلوده‌ترین بخش دشت بالغ بر ۱۵درصد (بار آلودگی: ۱/۵ تا ۲) در بخش شرقی دشت قرار گرفته است. این نتایج حاکی از اثر مضر کشاورزی و به ویژه کاربرد پساب بر خاک‌های این دشت است. با روال موجود کاربرد کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و پساب، و افزایش جمیت دشت، انباشت عناصر و بار آلودگی در آینده نامطلوب‌تر خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: کشاورزی مرسوم، کشاورزی با پساب، کود شیمیایی، آفت‌کش، نقشه، پهنه‌بندی

مقدمه

آلودگی خاک افزایش غلظت مواد آلی و معدنی نامطلوب از جمله غلظت عناصر کمیاب فرای غلظت زمینه‌ای طبیعی است که ممکن است به صورت سهوی و غیر مستقیم (از طریق فرو نشت جوی گازهای ناشی از حمل و نقل کارخانه‌ها و منازل) یا عمدی و مستقیم به دنبال فعالیت‌های انسان (از قبیل معدن‌کاری، صنعت و کشاورزی) صورت گیرد (۲۸). افزایش غلظت عناصر کمیاب در خاک به چند مشکل مهم و جدی منجر می‌شود (۱۷): (۱) جذب گیاهی و آلودگی بافت‌های خوراکی گیاهان؛ (۶) آلودگی جانوران و دام‌ها و فرآورده‌های دامی (مانند گوشت و مواد لبنی) به دنبال مصرف گیاهان علوفه‌ای؛ و (۵) آبشویی عناصر کمیاب به آب‌های زیرزمینی و آلودگی آب‌های آشامیدنی. بدین صورت، عناصر کمیاب غیرلازم و سمی وارد چرخه‌ی غذایی انسان شده و موجب مشکلات جدی بهداشتی و بیماری‌های فلج‌کننده‌ی جسمی و روانی و سرطان و مرگ می‌شوند (۱۷).

در شرایط طبیعی، معمولا یک رابطه‌ی ۱:۱ بین غلظت عنصر کمیاب در خاک و غلظت آن عنصر در مواد (سنگ) مادری و یا پوسته‌ی زمین وجود دارد (۲۱؛ و ۱۷: جدول ۳-۲ صفحه‌ی ۴۱). از آن‌جایی که نوع سنگ و ترکیب آن و تشکیلات زمین‌شناسی از یک ناحیه به ناحیه‌ی دیگر فرق می‌کند پس خاک‌های نواحی مختلف باید حاوی غلظت‌های متفاوتی از عناصر کمیاب باشند (۲۹). علاوه بر این، تنوع اقلیمی مناطق نیز با تأثر بر خاک‌سازی، آبشویی و پوشش گیاهی بر تفاوت‌ها می‌افزاید. بنابراین غلظت زمینه‌ای بایستی به تفکیک تشکیلات زمین‌شناسی و اقلیم در هر ناحیه تعیین شود. غلظت زمینه ای به غلظتی از عنصر گفته می‌شود که از سنگ مادر به خاک رسیده و طی مراحل خاک‌سازی تعدیل شده است. عموماً غلظت زمینه‌ای طبیعی عناصر کمیاب خاک بسیار پایین است (۲۱) اگرچه فرونشت گازهای صنعتی در دو قرن اخیر احتمالاً غلظت زمینه‌ای طبیعی را به

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استادیار و دانشجویان سابق کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد
(*- نویسنده مسئول: (Email: beigi.habib@gmail.com
DOI: 10.22067/jsw.v0i0.29534

غلظت زمینه‌ای انسانی افزایش داده است (۳۲). با این حال، غلظت زمینه‌ای انسانی (یا غلظت پایه) برای تشخیص شدت آلودگی خاک‌ها عملی و واقع بینانه است (۹).

غلظت زمینه‌ای معمولاً با یک شاخص مرکزی و یا به صورت حد بالایی بیان می‌شود. برای تعیین این دو از آماره‌های مختلفی استفاده می‌شود: برای شاخص مرکزی از مقدار میانه، میانگین حسابی یا میانگین هندسی استفاده می‌شود (۷ و ۹). انتخاب نوع شاخص مرکزی معمولا بستگی به توزیع داده‌ها دارد (۳۱). میانگین برای مقایسه‌ی اثر عوامل خارجی بر خاک و مقایسه‌ی خاک آلوده با خاک پاک مفید است. اما گاهی برای کارهای زیست‌محیطی حد بالایی غلظت زمینه‌ای مفیدتر و مهم‌تر است (۷). هر گونه فراروی از این حد به مفهوم آلوده بودن یک محل است. برای تعیین حد بالایی آماره‌های: حد بالای اطمینان ۹۵درصدی میانگین حسابی و یا میانگین هندسی، و صدک‌های ۹۰ و یا ۹۵ درصدی داده‌ها (۹)، و "مجموع سه برابر انحراف معیار داده‌ها با میانگین" پیشنهاد شده است (۷).

آلودگی غیرنقطه‌ای خاک کشاورزی به عناصر کمیاب علاوه بر فرونشت جوی، از طریق عملیات کشاورزی نیز صورت می‌گیرد (۲۸). عملیات کشاورزی شامل آبیاری، کاربرد کود شیمیایی، کود دامی، آفت‌کش، و گاهی کاربرد پساب است (۲۸). بدیهی است که برای ارزیابی اثر این عوامل خارجی بر غلظت عناصر کمیاب خاک، برآورد غلظت زمینه‌ای به منظور ایجاد استانداردهای زیست‌محیطی و تنظیم کاربرد مواد به خاک لازم است. کودهای شیمیایی و دامی و آفت‌کش‌ها عموما حاوی مقادیری از عناصر کمیاب (۱۷) بوده و غلظت عناصر کمیاب در خاک را افزایش می‌دهند. گرچه فعالیت‌های کشاورزی ممکن است با افزایش آبشویی (۱۵) و برداشت گیاهی غلظت عناصر کمیاب در خاک را کاهش دهند (۵). یکی دیگر از عملیات زراعی که احتمالاً منجر به افزایش غلظت عناصر کمیاب در خاک می‌شود، آبیاری با آب‌های نامتعارف است (۲۳). پساب‌های شهری حاوی مقادیری از عناصر کمیاب هستند که معمولاً در آب‌های تازه سطحی و زیرزمینی وجود ندارد. کاربرد پساب به منظور رفع کمبود آب صورت می‌گیرد. متأسفانه، کمبود آب در ایران مشکلی جدی است و از این رو، عموماً آبیاری با پساب توجیه می‌شود و گاهی تصفیه‌خانه‌ها با عقد قرارداد پساب را به کشاورزان می‌فروشند. در دشت بروجن، ۲۴ کشاورز با عقد قرارداد پساب شهری بروجن را در فصل زراعی به اراضی خود هدایت و به مصرف آبیاری می‌رسانند.

پژوهشگران در مطالعات مختلفی به برآورد غلظت زمینه‌ای و با اثر عوامل خارجی مانند فرونشت نیواری و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی بر غلظت عناصر کمیاب پرداخته‌اند (۹، ۱۱، ۲۰ و ۳۲). چن و همکاران (۸) با برداشت ۱۲۴۰۰ نمونه از لایه‌های سطحی، میانی و عمقی حدود ۱۴۰۰ نقطه از سراسر کشور چین، غلظت زمینه‌ای ۱۳ عنصر کمیاب را برای این کشور تعیین کردند. در ایران هم چندین پژوهش در زمینه‌ی اثر عوامل خارجی از جمله کشاورزی با کود شیمیایی بر اراضی زراعی (۶) صورت گرفته است. اما به نظر می‌رسد که تعیین غلظت زمینه‌ای و پهنه‌بندی انباشت عناصر فلزی در خاک و بار آلودگی در ایران محدود به کار اخیر عظیم‌زاده و خادمی (۴) باشد. این دو پژوهشگر با برداشت ۲۵۶ نمونه‌ی خاک ا اراضی مرتعی، زراعی و نیز برداشت نمونه‌هایی از سنگ‌های مادری خاک در منطقه ی مازندران به برآورد غلظت زمینه‌ای مس، روی، نیکل، سرب و کادمیم؛ پهنه‌بندی انباشت و بار آلودگی کل ناشی از آن‌ها پرداختند. آن‌ها غلظت زمینه‌ای طبیعی ۴۵/۷، ۳۴/۲ و ۰/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم را به ترتیب برای نیکل، سرب و کادمیم در منطقه پیشنهاد کردند. بار آلودگی کل در این منطقه از صفر تا ۳/۵ متغیر، عمدتا زیر ۱ و فقط در ناحیه‌ی بسیار کوچکی بین ۲/۵ تا ۳/۵ بود.

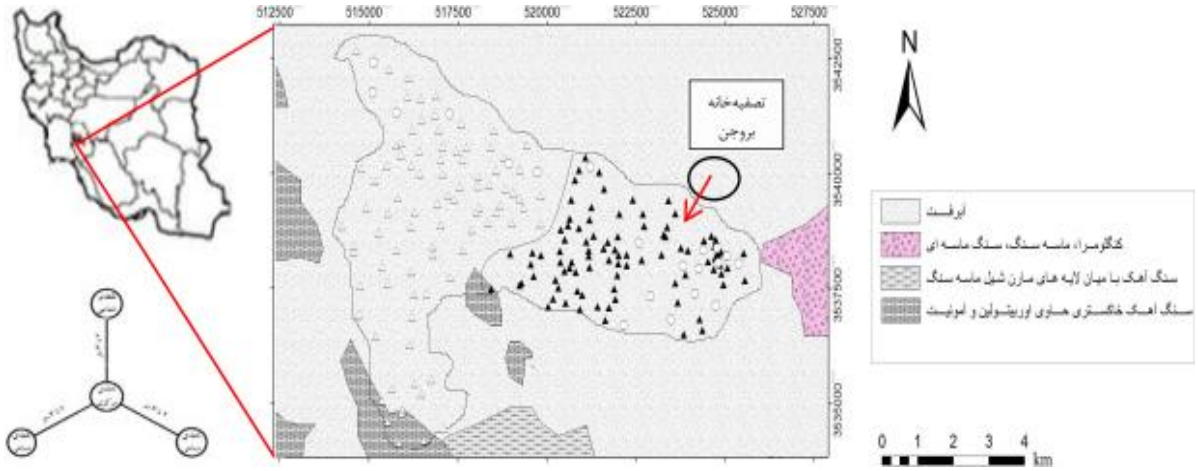
به منظور مدیریت اراضی زارعی و کاهش خطرات بهداشتی محصولات تولیدی (۵)، ارزیابی اثر عملیات زراعی مرسوم و کاربرد پساب بر عناصر کمیاب خاک مفید بلکه لازم است. هدف از این پژوهش: [۱] برآورد غلظت میانگین و حد بالای غلظت زمینه‌ای کادمیم، کروم، نیکل، سرب، کبالت و جیوه در خاک سطحی دشت بروجن فرادنبه؛ [۲] برآورد اثر عملیات زراعی مرسوم و برآورد اثر زراعت با آب نامتعارف بر غلظت زمینه‌ای و بر توزیع انباشت و بار آلودگی در خاک این دشت است.

مواد و روش‌ها

دشت بروجن با ۲۳۴۰ هکتار اراضی قابل آبیاری در ناحیه شرقی استان چهارمحال و بختیاری بین طول‌های ′۳ °۵۱ تا ′۲۵ °۵۱ شرقی و عرض‌های ′۵۰ °۳۱ تا ′۵۸ °۳۲ شمالی واقع است. بارش سالانه حدود ۲۵۵ میلی‌متر و درجه حرارت سالانه ۱۰/۷ ^{o}C است. بخش مرکزی بروجن دارای ۷۰۰۰۰ نفر جمعیت است. از محصولات کشاورزی عمده‌ی این دشت گندم، جو و سیب‌زمینی است. اگر چه زراعت از زمان‌های نامعلوم دور گذشته در این دشت شروع شده، کاربرد کود شیمیایی و آب چاه فقط در پنج دهه‌ی اخیر رواج یافته است. پساب شهری تصفیه‌خانه‌ی بروجن در فصل زراعی به مصرف آبیاری مزارع بخش شرقی دشت می‌رسد. کاربرد پساب در مزارع مجاور تصفیه‌خانه از ۱۵ سال پیش شروع شده است. در موقع نمونه‌برداری (پائیز ۱۳۹۰) مزارع مذکور دارای سابقه‌ی کاربرد پساب بین۷ تا ۱۴ سال بودند. در فصل غیرزراعی پساب صرف تغذیه‌ی آب زیرزمینی در خارج دشت می‌شود (۱). شکل ۱ موقعیت دشت بروجن را به همراه نقاط نمونه‌برداری نشان می‌دهد.

زمین‌شناسی دشت بروجن- فرادنبه

در این دشت سازندهای زمین‌شناسی تقریباً یکسان است (شکل ۱) و انتطار آلایندگی عناصر کمیاب ناشی از سنگ مادری در این دشت وجود ندارد (۳۳). دو واحد اصلی زمین‌شناسی در دشت بروجن- فرادنبه وجو دارد: واحد کواترنری ۲Qt که بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهد و بر مبنای نقشه بروجن شامل آبرفت‌های کناره دشت و تراس‌های جوان و مخروط افکنه‌ها و عمدتاً در مناطق مرتفع‌تر دشت بروجن- فرادنبه و بالای خط تراز ۲۲۰۰ متر قرار دارند (۲۴). واحد ۳Qt که شامل پهنه‌های رسی- سیلتی و آبرفت‌های دشت بوده و با خاک کشاورزی پوشیده شده است. این واحد مناطق مرکزی و پست‌تر دشت را تشکیل می‌دهد و عموماً در ارتفاع کمتر از ۲۲۰۰ متر مشاهده می‌شود.



شکل ۱- موقعیت دشت بروجن-فرادنبه. نقاط نمونه‌برداری از کشاورزی مرسوم با آب چاه (بخش غربی دشت) با مثلث‌های توخالی، نقاط نمونه‌برداری از کشاورزی با پساب (بخش شرقی دشت) با مثلث‌های توپر نشان داده شده و دایره‌های توخالی در دو بخش دشت نقاط مرتعی و بایر هستند. الگوی نمونه‌برداری مرکب از خاک در سمت چپ نشان داده شده است

Figure 1- Position of Boroujen-Faradonbeh plain. Sampling points of irrigation with well water (west part of the plain) has been shown with hollow triangles, sampling points of irrigation with wastewater (east part of the plain) has been shown with filled triangles. Hollow circles in both parts of the plain represent grassland and rangeland points

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری

تعداد ۲۰۰ نمونه‌ی خاک به‌صورت تصادفی از عمق ۰ تا ۲۵ سانتی‌متری برداشت و موقعیت نقاط با جی‌پی‌اس ثبت شد (شکل ۱). هر نمونه خاک از یک نقطه مرکزی و ۳ نقطه در شعاع ۲ تا ۳ متری آن برداشت (شکل ۱) و پس از اختلاط به آزمایشگاه منتقل شد. بیست نمونه از تنها اراضی بایر موجود داخل دشت، ۹۰ نمونه از اراضی تحت زراعت شرق دشت (بروجن- آبیاری با پساب) و ۹۰ نمونه از اراضی تحت زراعت غرب دشت (فرادنبه- آبیاری با آب چاه) بودند. در اراضی بایر دشت، بیشتر به خاطر سوارنشدن ثقلی آب آبیاری ، اثری از کشاورزی در گذشته دور یا نزدیک مشاهده نمی‌شود. پس از خشکاندن، کوبیدن و غربال نمونه‌های خاک با الک دو میلی‌متری، غلظت کل عناصر کمیاب نیکل (Ni)، کادمیم (Cd)، کرومیم (Cr)، جیوه (Hg)، کبالت (Co) و سرب (Pb) در هر نمونه‌ی پس از هضم در اسید نیتریک ۴ مولار و عصاره‌گیری، با استفاده از دستگاه جذب اتمی GBC ۹۳۲ Plus اندازه‌گیری شد. غلظت کل عناصر کمیاب (با استفاده از GBC ۹۳۲ Plus)، پی‌اچ، قابلیت هدایت الکتریکی، اکسیژن‌خواهی زیستی و شیمیایی چندین نمونه آب تازه‌ی چاه و پساب به روش انجمن بهداشت عمومی امریکا تعیین شد (۲). ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک شامل کربنات کلسیم معادل، کربن آلی خاک، بافت خاک، جرم ویژه‌ی ظاهری، جرم ویژه‌ی حقیقی، پی‌اچ (در عصاره‌ی اشباع) و قابلیت هدایت الکتریکی (در عصاره‌ی اشباع) به روش‌های مرسوم (۱۹ و ۲۵) تعیین شد.

محاسبات شاخص انباشت و شاخص بار آلودگی

از آن‌جایی که توزیع غلظت کل بعضی عناصر نرمال نبود میانگین هندسی هر متغیر به همراه خلاصه‌ی آماری از نرم‌افزار آماری استخراج شد. میانگین هندسی غلظت کل هر عنصردر ۲۰ نمونه خاک مرتعی میانگین غلظت زمینه‌ای آن عنصر فرض شد. شاخص انباشت هر عنصر (*AF*) از رابطه‌ی زیر محاسبه شد (۳۰):

$$AF = C_{soil} / C_{reference} \quad (۱)$$

که در آن، C_{soil} و $C_{reference}$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی میانگین هندسی غلظت کل یک عنصر کمیاب ($mg\ kg^{-1}$) در خاک تحت کشاورزی و یا تحت آبیاری با پساب به میانگین هندسی غلظت کل همان عنصر در خاک مرجع (یا غلظت زمینه‌ای) است. شاخص بار آلودگی کل تاملینسن (PLI) میانگین هندسی شاخص‌های انباشت تمام عنصر کمیاب سمی به کار رفته در محاسبه است و از رابطه‌ی زیر به دست آمد (۳۰):

$$PLI = \sqrt[6]{AF_{Ni} \cdot AF_{Cr} \cdot AF_{Cd} \cdot AF_{Pb} \cdot AF_{Co} \cdot AF_{Hg}} \quad (۲)$$

که در آن، AF شاخص انباشت مربوط به ۶ عنصر کمیاب زیرنویسی شده است. استفاده از PLI یک روش استاندارد برای تخمین آلودگی فلزی و ارزیابی کیفیت محیط زیست، و شروع عملیات اصلاحی در مکان آلوده است (۳). هکنسن (14) طبقه‌بندی زیر را برای انباشت آلودگی هر عنصر پیشنهاد کرده است (جدول زیر، سمت راست). از آن‌جایی که بار آلودگی تاملینسن خود میانگین هندسی شاخص انباشت چندین عنصر است می‌توان این طبقه‌بندی را برای بار آلودگی نیز به کار برد (جدول زیر، سمت چپ).

دامنه‌ی شاخص انباشت عنصر (AF) Range of accumulation factor		شدت انباشت عنصر Accumulation
کمتر از ۱	1>AF	کم Low
بین ۱ تا ۳	Between 1 &3	متوسط Medium
بیشتر از ۳ و کمتر از ۶	3<AF<6	زیاد High

دامنه‌ی شاخص بار آلودگی (PLI) Pollution load index		بار آلودگی کل Pollution load
کمتر از ۱	1>PLI	کم Low
بین ۱ تا ۳	between 1 &3	متوسط Medium
بیشتر از ۳ و کمتر از ۶	3<PLI<6	زیاد High

تهیه‌ی نقشه‌ها و محاسبات آماری

برای مقایسه‌ی اثر عملیات کشاورزی و کاربرد پساب بر آلودگی فلزی خاک از تجزیه‌ی واریانس استفاده شد. محاسبات آماری در محیط استاتیستیکا 12 انجام شد (۲۷). عملیات تهیه‌ی نقشه‌ی شاخص انباشت هر عنصر و نقشه‌ی بار آلودگی به روش کریجینگ و محاسبه‌ی همبستگی نقشه‌ها در محیط آرک‌جی‌آی‌اس ۹/۳ انجام شد (۱۲).

نتایج و بحث

غلظت عناصر در آب چاه‌ها و پساب مورد استفاده در دشت در جدول ۱ دیده می‌شود. غلظت همه عناصر در آب چاه و پساب، زیر حدود مجاز ایران و فائو بود. غلظت عناصر نیکل و سرب در پساب بیشتر از غلظت آن‌ها در آب چاه بود ($p<۰/۵$). غلظت کادمیم، کرومیم و کبالت در آب چاه و پساب یکسان و هر دو فاقد جیوه بودند. قابلیت هدایت الکتریکی پساب (۰/۱۷۴ $dS\ m^{-}$) اندکی بیشتر از آب چاه (۰/۱۶۸ $dS\ m^{-}$) ولی پهاش آن (pH=۷/۴۰) اندکی کمتر از آب چاه (pH=۷/۴۶) بود ($p<۰/۵$). پساب بر خلاف آب تازه حاوی مقداری کربن آلی ($BOD=۲۲\ mg\ L^{-۱}$ و ۳۲ $mg\ L^{-۱}$ تا COD=۹۵) بود که زیر حد مجاز ایران (به ترتیب ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) است.

جدول ۱- غلظت کل ($mg\ L^{-1}$) عناصر کمیاب آب چاه و پساب مورد استفاده در آبیاری دشت بروجن-فرادنبه و غلظت مجاز هر عنصر

Table 1- Total concentration ($mg\ L^{-1}$) of trace elements in well water and wastewater used for irrigation of Boroujen-Faradonbeh plain and allowable concentration for each element.

عنصر Trace Element		آب چاه Well freshwater		پساب Wastewater		غلظت مجاز ($mg\ L^{-1}$) استاندارد ایران (٦) Iranian limit	استاندارد فائو (13) FAO limit
نیکل	Ni	0.3	a	0.5	b	2	0.2
کادمیوم	Cd	0.1	a	0.1	a	.1	0.1
کرومیوم	Cr	0.2	a	0.3	b	2	0.1
جیوه	Hg	Negligible	a	Negligible	a	-	0.2
کبالت	Co	0.1	a	0.2	b	0.5	0.5
سرب	Pb	0.3	a	0.6	b	1	5

حروف انگلیسی متفاوت نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار میانگین غلظت عنصر در آب چاه و پساب است ($p < ۰/۵$)

a and b letters indicate a significant difference in the mean concentration between well freshwater and wastewater ($p<0.5$)

خلاصه‌ی آماری متغیرهای اساسی خاک (پهاش، قابلیت هدایت الکتریکی، ماده‌ی آلی، کربنات کلسیم، اجزای بافت) در جدول ۲ دیده می‌شود. به‌طورکلی ضریب تغییرات تمام ویژگی‌های اساسی خاک به‌ویژه آن‌هایی که عمدتا به سنگ مادر مرتبط هستند (شن، کربنات کلسیم معادل) کم بوده و حداکثر به ۱۶ می‌رسد. تغییرات کربن آلی نسبت به بقیه‌ی متغیرها زیادتر است که احتمالا به‌دلیل افزایش آن ناشی از کاربرد پساب در بخش شرقی دشت است. با این حال میانگین کربن آلی (۱/۱٪) حاکی از فقر ماده‌ی آلی در این دشت است. کربنات کلسیم خاک از ۱۵ تا ۲۵ متغیر است که نشان می‌دهد بخشی از خاک‌های دشت آهکی به‌شمار می‌آیند (۲۶). با توجه به وجود این تراکم کربنات کلسیم در خاک دشت طبیعی است که پ هاش خاک تنها در دامنه‌ی باریک بازی ۷/۵ تا ۷/۹ تغییر کند (۲۶). بافت خاک عمدتا درکلاس‌های رسی–سیلتی، و رسی گروه قرار می‌گیرد و سنگین به شمار می‌آیند.

جدول ۲- خلاصه آماری متغیرهای پایه‌ی مورد بررسی خاک در دشت بروجن- فرادمبه (n= ۲۰۰)

Table 2- Statistical summary of soil basic variables in Boroujen-Fradombeh plain (n=200)

متغیر Variable		واحد Unit	میانگین Mean	میانه Median	۵٪ اول 1st 5 Percentile	۵٪ آخر Last 5 Percentile	انحراف معیار std	ضریب تغییرات، cv ٪
رس	Clay	%	40.1	40.5	37	43	2.2	5
شن	Sand	%	13.8	13.5	10	17	2.2	16
سیلت	Silt	%	46.1	46.0	44	48	1.5	3
کربنات کلسیم معادل	Equivalent $CaCO_3$	%	19.7	19.5	15.5	24	2.8	14
پی‌اچ	pH	-	7.7	7.7	7.5	7.9	0.1	2
قابلیت هدایت الکتریکی	EC	$dS\ m^{-1}$	1.1	1.0	0.7	1.8	1.5	3
کربن آلی	Organic carbon	$g\ kg^{-1}$	10.9	9.9	5	18	0.4	35

خلاصه‌ی آماری غلظت کل و برآورد غلظت و حد زمینه‌ای عناصر کمیاب در اراضی بایر دشت در جدول ۳ دیده می‌شود. میانگین حسابی و هندسی غلظت‌ها همانند پژوهش سو و ینگ (۲۸) یکسان یا نزدیک بود. از این رو (۷) حد بالای اطمینان میانگین حسابی محاسبه شد (جدول ۳). به منظور مقایسه، در جدول ۴ میانگین و دامنه‌ی غلظت عناصر کمیاب مورد بررسی در خاک بعضی کشورها، در دنیا، و دامنه‌های حداکثر غلظت مجاز (MAC) و حد اقدام (TAV) در خاک‌های کشاورزی نقل شده است.

جدول ۳- خلاصه‌ی آماری غلظت کل عناصر کمیاب (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در اراضی بایر دشت بروجن- فرادمبه (n= ۲۰)

Table 3- Statistical summary of trace elements (mg/kg) in pristine lands of Boroujen-Fradombeh plain (n=200)

		نیکل Ni	کادمیم Cd	کروم Cr	جیوه Hg	کبالت Co	سرب Pb
آماره‌های پراکنش غلظت کل Total concentration variation							
کمینه	Minimum	0.6	0.04	1.3	0.01	0.5	1.1
بیشینه	Maximum	1.6	0.59	1.8	0.26	1.1	2.2
ضریب تغییرات	cv	35	72	9	62	21	20
آماره‌های میانگین غلظت زمینه‌ای انسانی Anthrogenic background mean concentration							
میانگین حسابی	Arithmetic mean	1.1	0.21	1.6	0.12	0.8	1.5
میانگین هندسی	Geometriv mean	1.1	0.16	1.6	0.09	0.8	1.5
آماره‌های حد بالای غلظت زمینه‌ای انسانی Anthrogenic background concentration upper limit							
حد ۹۵٪ بالایی میانگین حسابی	95% Upper limit of arithmetic mean	1.3	0.28	1.6	0.16	0.9	1.7
میانگین+ ۳ × انحراف‌معیار	Mean +3 times SD	2.3	0.68	1.9	0.35	1.4	2.4

غلظت زمینه‌ای سرب و نیکل در این دشت بسیار کمتر از مقدار تعیین شده برای منطقه‌ی مازندران (۴) بوده ولی غلظت زمینه‌ای کادمیم تقریبا برابر است. بدیهی است این تفاوت‌ها عمدتا مربوط به تفاوت درجنس سنگ‌های مادری خاک است (4 و ۳۴). غلظت زمینه‌ای کادمیم در این دشت دو برابر غلظت زمینه‌ای در چین است ولی نصف میانگین جهانی ($0/41$ mg kg^{-1}) است (جدول ۴). غلظت زمینه‌ای جیوه اندکی از میانگین جهانی بیشتر است ولی در حد پایین جهانی جای می‌گیرد (جدول ۴). غلظت زمینه‌ای عناصر کمیاب دیگر به مراتب از میانگین جهانی آن‌ها و از میانگین آن‌ها در کشورهای دیگر کمتر است (جدول ۴).

جدول ٤- میانگین و دامنه‌ی غلظت عناصر کمیاب مورد بررسی در خاک بعضی کشورها، در دنیا، و دامنه‌های حداکثر غلظت مجاز (MAC) و حد اقدام (TAV) در خاک‌های کشاورزی. تمام غلظت‌ها به mg kg^{-1} است

Table 4- Mean and range of trace elements in soils in iran, China and USA, and the ranges of maximum allowable concentration (MAC) and Trigger Action Value (TAV) in agricultural soils. All concentrations in mg kg^{-1}

ایران (مازندران) Iran-Mazandaran منبع (٤)		چین China منبع (۸)		آمریکا USA منبع (۸)		دنیا World منبع (۱۷: جدول ۲-۳)			
میانگین هندسی GM	عنصر Element	میانگین حسابی AM	میانگین هندسی GM	میانگین حسابی AM	میانگین هندسی GM	میانگین حسابی AM	دامنه R	MAC*	TAV*
45.7	Ni نیکل	27	23	19	13	29	44-22	60-20	75-150
0.23	Cd کادمیم	0.09	0.07			0.41	0.3-0.7	5-1	20-2
-	Cr کروم	61	54	54	37	60	5.5-100	200-50	450-50
-	Hg جیوه	0.07	0.04	0.09	0.06	0.07	0.58-1.8	0.5-5	1.5-10
-	Co کبالت	13	11	1.9	6.7	11.3	1100-2	50-20	100-30
34.2	Pb سرب	27	24	19	16	27	34-12	300-20	300-50

*MAC: Maximum Allowable Concentration; TAV: Trigger Action Value; GM: Geometric Mean; AM: Arithmetic Mean; R: Range. Values of MAC and TAV from reference (17): Table 2-9, page 24

مقادیر MAC و TAV به نقل ازمنبع ۱۷: جدول ۹-۲، صفحه‌ی ۲۴

تغییرات غلظت شش عنصر تحت کشاورزی مرسوم (با آب چاه) و کشاورزی با پساب در جدول ۵ با مقادیر نظیر زمینه‌ای مقایسه شده است. کشاورزی مرسوم (آب چاه+کود و آفت‌کش) غلظت زمینه‌ای نیکل، کادمیم، و به ویژه سرب را افزایش و غلظت زمینه‌ای کرومیم را کاهش داده است ولی تغییری در غلظت زمینه‌ای جیوه و کبالت ایجاد نکرده است. کشاورزی با پساب (+ کود و آفت‌کش) (در مقایسه با اراضی کشاورزی مرسوم) غلظت نیکل، کرومیم، کبالت و به ویژه سرب را افزایش و غلظت کادمیم را کاهش داده است ولی تغییر معنی‌داری در غلظت جیوه ایجاد نکرده است (این مقایسه با شرایط قبلی این اراضی یعنی موقعی که تحت کشاورزی با آب چاه بوده‌اند صورت گرفته است). بیشتر این تغییرات با کاربرد پساب به جای آب چاه در این اراضی توجیه‌پذیر است. جدول ۱ را ببینید که نشان می‌دهد پساب حاوی غلظت‌های بیشتری از این عناصر است.

شاخص انباشت آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های دشت به همراه درصدهای وقوع هر کلاس انباشت در جدول ۶ نشان داده شده است. درصدهای وقوع هر کلاس انباشت از روی مشاهدات و بر اساس تقسیم‌بندی هنکسن (۱۴) محاسبه شده‌اند. میانگین شاخص انباشت عناصر به غیر از کروم (که کمتر از واحد بود) بزرگ‌تر از ۱ بود و بین کمترین (جیوه: ۱/۲۲) تا بیشترین (سرب: ۲/۶۵) تغییر می‌کرد. بیشینه‌ی شاخص انباشت تمام عناصر از نزدیک ۲ تا بیش از ۶ تغییر داشت. خلاصه آماری میانگین شاخص انباشت در این پژوهش شباهت‌هایی را با کار عظیم‌زاده و خادمی (4) نشان می‌دهد. مثلا میانگین، بیشینه و ضریب تغییرات انباشت سرب در دو پژوهش بیشترین بین عناصر بوده اگر چه مقادیر میانگین، بیشینه و ضریب تغییرات در کار حاضر بزرگ‌تر هستند. در هر دو پژوهش، شاخص انباشت کمتر از واحد دیده می‌شود. در پژوهش حاضر، به طور مشخص، در ۶۵ درصد نقاط شاخص انباشت کروم کمتر از واحد است. از طرف دیگر، در دشت بروجن-فرادمبه، در ۳۵ درصد نقاط نمونه‌برداری شاخص انباشت سرب شدید (بین ۳ تا ۶) و در ۷ درصد موارد شاخص انباشت کادمیم و کبالت شدید است (جدول ۶) که علت آن را می‌توان به مصرف پساب در این اراضی نسبت داد.

جدول ۵- میانگین هندسی غلظت کل ($mg\ L^{-1}$) عناصر کمیاب در اراضی بایر مرتعی، اراضی زراعی آبیاری شده با آب چاه، و اراضی زراعی آبیاری شده با پساب، و تغییر آن تحت عملیات زراعی و کاربرد پساب در دشت بروجن- فرادمبه. n اندازه‌ی نمونه است

Table 5- Geometric mean of total concentration ($mg\ L^{-1}$) of trace elements in rabgelands (reference soils), irrigated soils with well water and irrigated soils with wastewater, and their change under agricultural operations and sewage application in Boroujen-Faradonbeh plain. n is samples number

خاک‌های آبیاری شده با پساب، Wastewater-irrigated soils (WS) n=90						خاک‌های آبیاری شده با آب چاه Freshwater-irrigated soils (FS) n=90				خاک‌های مرجع، Reference Soils (RS) N=20			
تغییر میانگین نسبت به خاک آبیاری شده با آب چاه Change of mean to FS		تغییر میانگین نسبت به خاک مرجع Change of mean to RS		میانگین هندسی غلظت GM		تغییر میانگین نسبت به خاک مرجع Change of mean to RS		میانگین هندسی غلظت GM		میانگین غلظت زمینه‌ای Mean baseline concentration		عنصر Element	
٪	مقدار	٪	مقدار			٪	مقدار						
+23	+0.3	+36	+0.5	1.63	c	+18	+0.2	1.3	b	1.13	a	Ni	نیکل
-18	-0.04	+13	+0.02	0.18	a	+38	+0.6	0.22	b	0.16	a	Cd	کادمیم
+44	+0.53	+9	+0.14	1.73	c	-25	-0.4	1.2	b	1.56	a	Cr	کروم
-30	-0.03	-22	-0.02	0.07	a	+25	+0.1	0.1	a	0.09	a	Hg	جیوه
+64	+0.58	+۸۵	+0.73	1.48	b	+13	+0.1	0.9	a	0.8	a	Co	کبالت
+115	+2.77	+270	+4.13	5.39	c	+67	+1.0	2.5	b	1.52	a	Pb	سرب

حروف انگلیسی متفاوت در هر سطر نشان‌دهنده‌ی تفاوت معنی‌دار میانگین غلظت عناصر در سه نوع اراضی است ($p<۰/۵$)

Differring English letters in each row indicate a significant difference in the mean concentration in three of landuse ($p<0.5$)
GM: geometric mean

اثر کشاورزی مرسوم (با آب چاه) و با پساب بر شاخص‌های انباشت عناصر مورد بررسی در شکل ۲ مقایسه شده است ($\alpha=۰/۵$). کشاورزی مرسوم (آب چاه+ کود و آفت‌کش) انباشت کادمیم و سرب در خاک را به ترتیب به ۱/۷ و ۱/۹ افزایش داده ($p<۰/۵$)، تمایل به افزایش کبالت، نیکل و جیوه‌ی از واحد به ۱/۲ خاک داشته ولی انباشت کروم را از واحد به ۰/۸ کاهش داده است ($p>۰/۵$). کاربرد پساب انباشت نیکل (از ۱/۲ به ۱/۶)، کروم (از ۰/۸ به ۱/۲) و به ویژه سرب (از ۱/۹ به ۳/۷) و کبالت (از ۱/۲ به ۱/۹) را افزایش ولی انباشت کادمیم را از ۱/۷ به ۱/۳) کاهش داده است (با توجه به این که اراضی زیر پساب فعلی قبلا تحت کشاورزی مرسوم بوده‌اند اثر پساب بر انباشت نسبت به اراضی تحت کشاورزی مرسوم مقایسه شده است). در مقایسه با کشاورزی مرسوم، اثر کاربرد پساب بر انباشت سرب بسیار شدید و بر انباشت کبالت و نیکل نسبتا شدید بوده است. کشاورزی با پساب اثری بر انباشت جیوه نداشته است.

جدول ٦- خلاصه‌ی آماری مشاهدات شاخص انباشت (AF) و درصدهای وقوع کلاس‌های انباشت عناصر کمیاب در دشت بروجن- فرادمبه

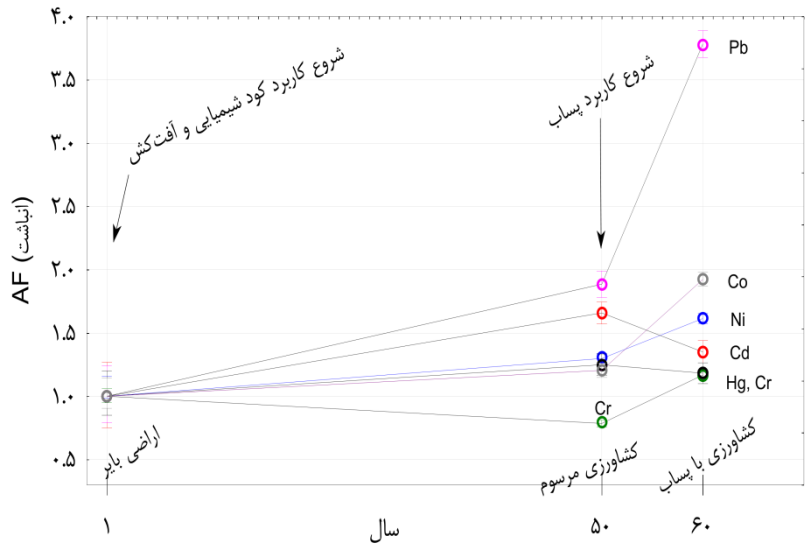
Table 6- Statistical Summary of observed Accumulation Factor (AF) for trace elements and their percentages of occurrence in Boroujen-Faradombeh plain

انباشت شدید High AF 6 > AF ≥ 3	انباشت متوسط Medium AF 3 > AF ≥1	انباشت کم Low AF AF <1	ضریب تغییرات، CV ٪	بیشینه Maximum	کمینه Minimum	میانگین Mean	عنصر Element	
	%							
__	85.5	14.5	30	2.73	0.53	1.42	Ni	نیکل
7.0	60.5	32.5	57	3.68	0.19	1.48	Cd	کادمیم
__	35.0	65.0	31	1.89	0.59	0.68	Cr	کروم
0.5	54.5	44.0	64	3.09	0.11	1.22	Hg	جیوه
6.5	80.0	13.5	43	3.44	0.21	1.51	Co	کبالت
35.0	47.5	17.5	55	6.63	0.48	2.65	Pb	سرب

Number of samples: 200 ; AF: accumulation factor — اندازه‌ی نمونه: ۲۰۰

تحت کشاورزی مرسوم در این دشت، تمام عناصر به غیر از کروم انباشتگی متوسطی را (شاخص بین ۱ تا ۳) نشان می‌دهند (۱۴). باید توجه داشت که مصرف کود شیمیایی و آفت‌کش در این دشت از حدود ۵ دهه‌ی پیش شروع شده است و تغییرات انباشتگی در این محدوده‌ی زمانی رخ داده است. جایگزینی پساب به جای آب تازه در این دشت از ۱۵ تا ۷ سال پیش شروع شده است و تغییرات در انباشت عناصر ناشی از آن در عرض ۱۰ سال (به طور متوسط) روی داده است. شیب خطوط در دو مقطع زمانی نشان‌دهنده‌ی نرخ افزایش یا کاهش شاخص انباشت عناصر تحت هر یک از این دو شرایط است (شکل ۲). شیب (یا نرخ) افزایش شاخص سرب، کبالت، نیکل، و کروم و نرخ کاهش شاخص کادمیم تحت آبیاری با پساب بزرگ‌تر از نرخ‌های نظیر تحت کشاورزی مرسوم است.

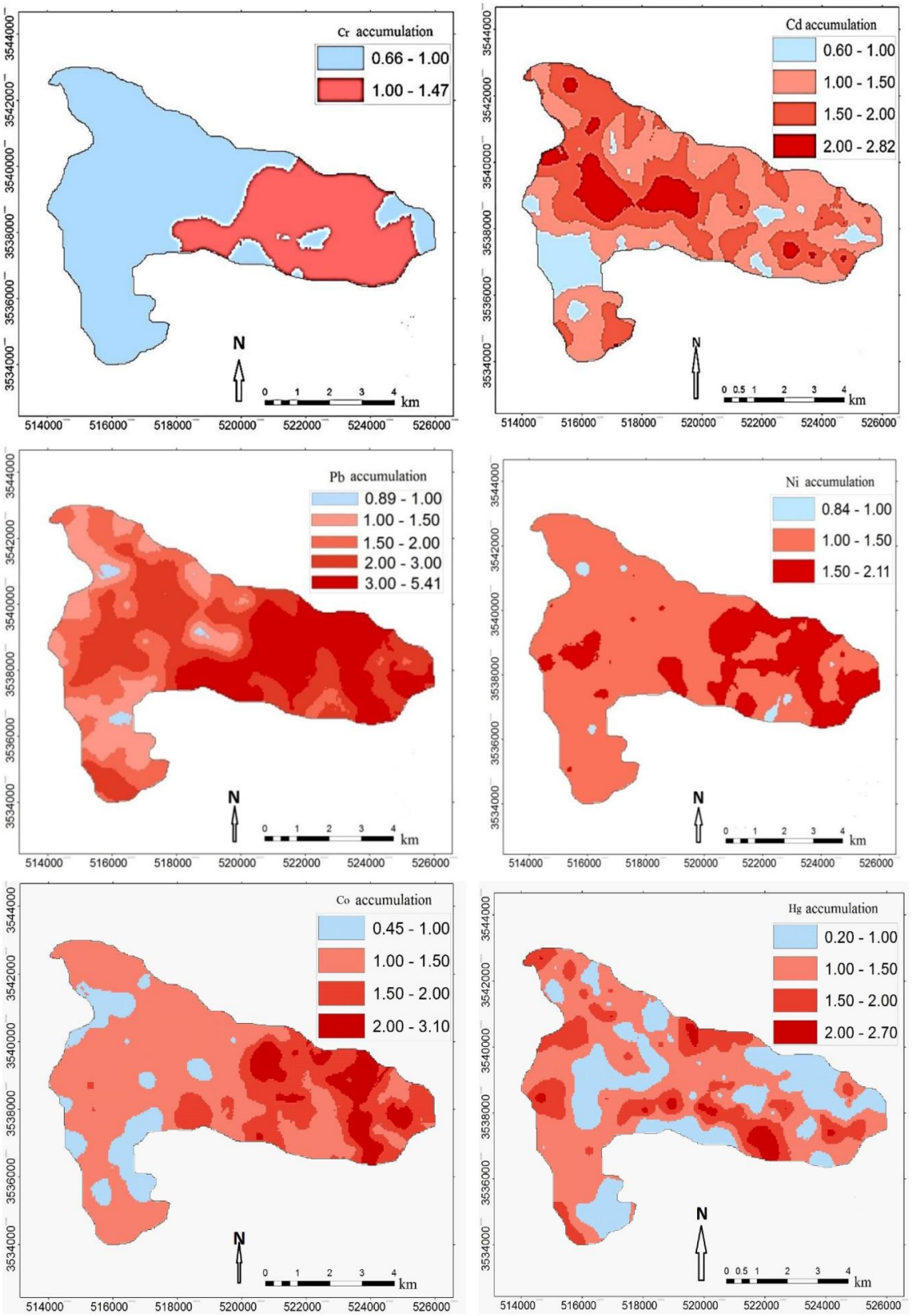
چن و همکاران (۱۰) انباشت متوسط کادمیم و سرب و انباشت بسیار زیاد (مقادیر بزرگتر از ۳) کرومیم و نیکل را در خاک، پس از ۵۰ سال گزارش کردند. طبق گزارش خان و همکاران (۱۸)، پس از ۵۰ سال آبیاری خاک با پساب شهری بیشترین و کمترین شاخص انباشت به‌ترتیب مربوط به کادمیم (۴/۸) و کرومیم (۳/۰) بود. انباشت آلاینده‌ها در خاک به فرآیندهایی نظیر جذب سطحی، آبشویی و اتصال به مواد آلی و برداشت توسط گیاه بستگی دارد (۱۵ و ۲۲). با این‌حال، غلظت پساب علت اصلی تغییرات مثبت یا منفی شاخص انباشت در گزارشات مختلف است. با توجه به این‌که که پساب حاوی غلظت بیشتری از سرب، کبالت، نیکل و کروم است، افزایش انباشت این فلزات بی‌جهت نیست. اما کاهش انباشت کادمیم و جیوه در خاک در حالی‌که آب تازه و پساب غلظت‌های یکسانی از این دو در بردارند ممکن است به برداشت گیاهی نسبت داده شود. اگرچه انباشت فلزات کمیاب در خاک مستقیماً خطری آن‌چنانی متوجه انسان نمی‌کند، اما آبشویی به آب زیرزمینی (۱۵)، وزش باد و غبارخیزی و مهم‌تر از همه جذب به بافت خوراکی گیاه (۲۲ و ۵) می‌تواند خطرناک باشد.



شکل ۲- اثر کشاورزی بر انباشت عناصر کمیاب سمی در دشت بروجن- فرادمبه. میله‌های خط ± یک خطای معیار را نشان می‌دهند
Figure 2- Effect of agriculture on accumulation of toxic trace elements in Borojen- Faradombeh plain. Vertical bars indicate one standard error

در حالی‌که تحلیل آماری فوق اثرات کشاورزی و یا پساب را بر غلظت زمینه‌ای عناصر نشان داد. بعضی جنبه های دیگر انباشت مانند محل رخداد و درصد پوشش در دشت را فقط می توان با پهنه‌بندی شاخص‌های انباشت نمایش داد. پهنه‌بندی شاخص انباشت شش عنصر در خاک دشت در شکل ۳ نمایش داده شده و درصد پوشش پهنه‌ها در جدول ۷ خلاصه شده است.

از شکل ۳ و جدول ۷ استنباط می‌شود: [۱] انباشت شدیدتر کروم، نیکل، سرب و کبالت در مقایسه با بخش غربی در شکل ۳ آشکار است که حاکی از نقش زیان‌بار پساب است؛ [۲] هر عنصر درصدی از دشت را با انباشت متوسط (کروم حدود یک سوم دشت تا نیکل ۹۹ درصد مساحت دشت) پوشانده است. انباشت متوسط عناصر عمدتا در محدوده‌ی ۱-۲ قرار می‌گیرد، پس همه‌ی عناصر کمیاب مورد بحث حداقل در انباشت آلودگی در یک‌سوم خاک زراعی دشت نقش داشته‌اند؛ [۳] تنها عنصر با انباشت شدید سرب است.



شکل ۳- توزیع شاخص انباشت عناصر کمیاب در دشت بروجن- فرادمبه

Figure 3- Distribution of accumulation index in Boroujen-Faradombeh plain

جدول ۷- درصد پوشش پهنه‌های شاخص انباشت عناصر کمیاب در دشت بروجن- فرادمبه

Table 7- The area coverage (%) of accumulation factor of trace elements in Boroujen-Faradombeh plain

عنصر کمیاب Trace element		عدم انباشت No accumulation	انباشت متوسط Medium accumulation		مجموع انباشت متوسط Medium accumulation	انباشت شدید High accumulation
		AF≤1	1<AF<2	2<AF≤3	1≤AF≤3	3≤AF≤5
نیکل	Ni	1.1	98.8	0.1	98.9	
کادمیم	Cd	10.1	80.1	9.8	89.9	
کروم	Cr	67.8	32.2	--	32.2	
جیوه	Hg	28.8	68.5	2.7	71.3	
کبالت	Co	10.9	80.2	8.9	89.1	
سرب	Pb	1.1	40.6	34.1	75.7	24.3

جدول ۸- هم‌بستگی داده‌های مشاهده‌ای انباشت و نقشه‌های شاخص انباشت عناصر کمیاب با یکدیگر در دشت بروجن- فرادمبه

Table 8- The correlation of observed accumulation factors and the correlation of accumulation factor maps of trace elements in Boroujen-Faradombeh plain

مشاهدات (n= ۲۰۰) Observations (n= 200)						نقشه‌ها Maps					
کادمیم	Cd	-0.60				کادمیم	Cd	-0.40			
کروم	Cr	**0.44***	-0.11			کروم	Cr	**0.54**	-0.15		
سرب	Pb	**0.61***	-0.12	**0.61***		سرب	Pb	**0.73**	-0.18	**0.79***	
جیوه	Hg	-0.30	-0.12	-0.30	-0.50	جیوه	Hg	-0.15	-0.17	0.11	-0.19
کبالت	Co	**0.60***	-0.9	**0.54***	**083***	کبالت	Co	**0.72**	-0.15	**0.75***	**0.90***
		Ni	Cd	Cr	Pb			Ni	Cd	Cr	Pb
		نیکل	کادمیم	کروم	سرب			نیکل	کادمیم	کروم	سرب

												-0.24
												Hg
												جیوه

*معنی‌دار در ۰/۰۵ =α. n اندازه‌ی نمونه است

*Significant at α= 0.05, n is sample size

این عنصر حدود سه‌چارم دشت را با انباشت متوسط پوشانده است، انباشت شدید سرب در بخش شرقی رخ داده که حدود یک‌چارم دشت را می‌پوشاند. پس احتمالا پساب در این انباشت شدید دخیل بوده است؛ [۴] در برخی نقاط دشت عدم انباشت عناصر مشاهده می شود. کمترین پوشش عدم انباشت مربوط به نیکل و سرب به اندازه‌ی ۱٪ بود. معلوم نیست این مقدار ناشی از خطای نقشه‌کشی نباشد ولی در هر صورت اهمیت عملی ندارد. بیشترین درصد پوشش عدم انباشت مربوط به کروم (۶۸٪) و جیوه (۲۹٪) است که هم در بخش شرقی و هم در بخش غربی دشت واقع است. عدم انباشت کروم به ویژه در بخش دشت غربی دشت کاملا مشخص است. این نتایج با نتایج ارائه شده در جدول ۶ که حاصل تحلیل اماری کلاسیک بود همخوانی دارد اگر چه تفاوت‌هایی هم دیده می‌شود که خود ناشی از تعدیل ارقام در اثر درون‌یابی و پهنه‌بندی است. در عین حال، نتایج این بخش نقش پهنه‌بندی را در مقایسه با نتایج محدودتر حاصل از امار کلاسیک آشکار می‌سازد. وجود هم‌بستگی معنی‌دار بین شاخص انباشت سرب، کبالت، نیکل و کروم (جدول ۸) نیز تاکیدی بر توزیع مشابه شاخص این عناصر در این دشت است. قوی‌ترین هم‌بستگی بین انباشت کبالت و سرب بوده و از طرف دیگر شاخص‌های انباشت کادمیم و جیوه با شاخص انباشت هیچ یک از عناصر دیگر هم‌بستگی ندارند.

در جدول ۹ خلاصه‌ی آماری مشاهدات بار آلودگی کل در دشت به تفکیک سه نوع اراضی آمده است. میانگین بار آلودگی همان‌طور که انتظار می‌رود برابر واحد بوده و در محدوده‌ی باریکی تغییر می‌کند. میانگین بار آلودگی تحت کشاورزی بزرگ‌تر از واحد بوده و تحت کشاورزی با پساب بزرگ‌ترین است. بار آلودگی در دشت از ۰/۶۹ تا ۲/۵ متغیر است. کمترین بار آلودگی (PLI=۰/۶۹) در اراضی بایر یا کشاورزی قرار داشته و بیشینه‌ی بار آلودگی (PLI=۲/۴۹) در اراضی تحت کاربرد پساب واقع است (جدول ۹). میانگین‌ها، کمینه‌ها، بیشینه‌ها، انحراف معیار و ضریب تغییرات بار آلودگی تحت کشاورزی با پساب بزرگ‌تر از مقادیر نظیر تحت کشاورزی مرسوم و تحت کشاورزی مرسوم بزرگ‌تر از مقادیر نظیر در اراضی بایر است (جدول ۹). چولگی مقادیر بار آلودگی در هر سه نوع اراضی مانند نتایج دیگران از جمله منبع (۳) مثبت است.

جدول ۹- خلاصه‌ی آماری بار آلودگی کل در دشت بروجن- فرادمبه

Table 9- Statistical summary of the total pollution load in Boroujen-Faradombeh plain

تیمار خاک Soil treatment	میانگین هندسی Heometric mean	انحراف معیار SD	کمینه Min	بیشینه Max	۵٪ اول 1st 5% percentile	۵٪ آخر Last 5% percentile	ضریب تغییرات، CV ٪	چولگی Skewness
خاک بایر- مرجع Uncultivated-referenc	1.00	0.20	0.70	1.38	0.73	1.36	19	0.8
خاک آبیاری شده با آب چاه Irrigated with freshwater	1.17	0.26	0.69	1.81	0.77	1.60	22	0.9
خاک آبیاری شده با پساب Irrigated with wastewater	1.46	0.36	0.80	2.49	0.98	2.29	24	0.6
خاک تمام دشت All plain	1.27	0.35	0.69	2.49	0.80	1.92	27	0.7

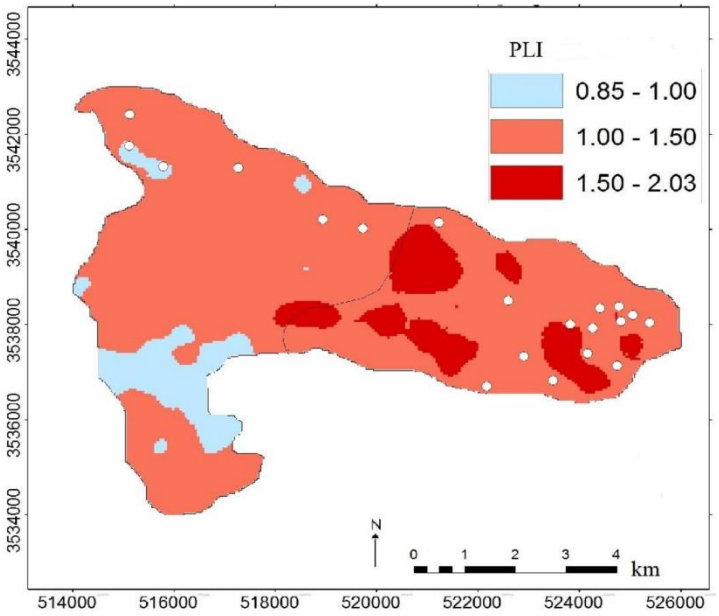
با پهنه‌بندی شاخص بار آلودگی کل عناصر در خاک دشت می‌توان به جنبه‌های دیگری از توزیع آلودگی عنصری پی برد. پهنه‌بندی شاخص بار آلودگی در شکل ۴ نمایش داده شده و در جدول ۱۰ خلاصه شده است. بار آلودگی کل عناصر کمیاب سمی در دشت از ۰/۸۵ تا حدود ۲ متغیر است (شکل ۴). حدود ۸ درصد مساحت دشت دارای آلودگی عنصری کم (بار آلودگی بین ۰/۸۵ تا ۱) است که در بخش غربی دشت واقع است. حدود ۹۲ درصد مساحت مانده در ابتدای محدوده‌ی آلودگی متوسط (بار آلودگی: ۱ تا ۲) قرار می‌گیرد. آلوده‌ترین اراضی (بار آلودگی: ۱/۵ تا ۲) تقریبا تماما در بخش شرقی دشت قرار گرفته و حدود ۱۵درصد مساحت را اشغال کرده است (جدول ۸). این نتایج هم حاکی از اثرات کاربرد پساب در آلودگی خاک‌های این دشت است. در مقایسه با منطقه‌ی مازندران (۴) درصد مساحت با بار آلودگی کم در این دشت بسیار بیشتر است که بی‌ربط به کاربرد پساب نیست ولی در عین حال حداکثر بار آلودگی در این دشت از حداکثر ۳/۵ در مازندران کمتر است. با توجه به نبود مراکز صنعتی در این دشت مقدار بار آلودگی در آن قابل توجیه است. ولی اگر کاربرد کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها که از چند دهه‌ی پیش آغاز شده و کاربرد پساب که در دو دهه‌ی اخیر شروع شده ادامه یابد باید انتظار داشت انباشت و بار آلودگی عناصر کمیاب از سطح حاضر فراتر رود، به ویژه آن که افزایش جمعیت با تولید پساب بیشتر و آلودگی گازی نیوار نرخ آلودگی را هم افزایش خواهد داد.

شاخص بار آلودگی می‌تواند عمدتا متأثر از یک یا چند فلز و نه همه‌ی فلزات باشد (۳) زیرا آلودگی در یک مکان معمولا به واسطه‌ی وجود تعداد کمی آلاینده در غلظت‌های بیشتر است. به منظور تشخیص مؤثرترین عنصر بر آلودگی عنصری (۳) دشت بروجن- فرادنبه هم‌بستگی مشاهدات و نقشه‌های شاخص‌های انباشت به ترتیب با مشاهدات و نقشه بار آلودگی کل در جدول ۱۱ آورده شده است. قدرت هم‌بستگی مشاهدات و نقشه ها با بار کل از روند کلی و تقریبا یکسانی پیروی می‌کنند و هم‌بستگی نقشه‌ها از هم‌بستگی مشاهدات مقداری بیشتر به نظر می‌رسد. قوی‌ترین هم‌بستگی بین سرب و بار کل دیده می‌شود و هم‌بستگی کبالت، نیکل و کروم با بار کل نسبتا قوی تا قوی است و در مقابل هم‌بستگی کادمیم و جیوه با بار کل ضعیف به نظر می‌رسد. بنابراین، مؤثرترین عناصر در آلودگی این دشت سرب، کبالت، نیکل و کروم هستند. کادمیم که عنصر جانبی بسیاری از کودهای فسفردار است (۱۷) و جیوه که به ویژه در قارچ‌کش‌ها دیده می‌شود (۱۷) در حال حاضر کمترین سهم را در آلودگی دشت دارند.

جدول ۱۰- درصد پوشش پهنه‌های شاخص بار آلودگی کل در دشت بروجن- فرادمبه

Table 10- The coverage (%)of total pollution load index in Boroujen-Faradombeh plain

شدت آلودگی Pollution load	PLI ≤1	1<PLI≤1.5	1.5<PLI≤2	2<PLI≤3	1<PLI≤3
	آلودگی کم Low	آلودگی متوسط medium	آلودگی متوسط medium	آلودگی متوسط medium	مجموع آلودگی متوسط Total medium
درصد Percentage	8.2	76.3	15.4	0.4	91.8



شکل ٤- توزیع شاخص بار آلودگی در دشت بروجن-فرادنبه. دایره‌های توخالی محل نمونه‌برداری از خاک‌های بایر را نشان می‌دهند

Figure 4- Distribution of pollution load index in Boroujen-Faradombeh plain. Hollow circles indicate sampling locations of rangeland soils

جدول ۱۱- هم‌بستگی بار آلودگی کل (PLI) با شاخص انباشت عناصر کمیاب در دشت بروجن- فرادنبه

Table 11- The correlation of total pollution load (PLI) with accumulation factor (AF) of trace elements in Boroujen-Faradombeh plain

جیوه Hg	کادمیم Cd	کروم Cr	نیکل Ni	کبالت Co	سرب Pb	عنصر Trace element
0.43	0.22	0.48	0.54	0.60	0.69	هم‌بستگی مشاهدات Correlation of observatons
0.19	0.26	0.63	0.67	0.76	0.78	هم‌بستگی نقشه‌ها Correlation of maps

نتیجه‌گیری

غلظت زمینه‌ای نیکل، کادمیوم، کرومیوم، جیوه، کبالت، سرب (به ترتیب ۱/۱۳، ۰/۱۶، ۱/۵۶، ۰/۰۹، ۰/۸۰، و ۱/۵۲ میلی‌گرم بر گرم) عموما از میانگین غلظت جهانی، امریکا و چین کمتر است.

کشاورزی مرسوم (آب چاه+ کود و آفت‌کش) و کشاورزی با پساب شهری (+کود و آفت‌کش) غلظت چندین عنصر در خاک را افزایش داده است. کشاورزی مرسوم انباشت کادمیم و سرب در خاک را افزایش داده، تمایل به افزایش کبالت، نیکل و جیوه داشته ولی انباشت کروم را کاهش داده است. کاربرد پساب شهری انباشت نیکل، کروم و به ویژه سرب و کبالت را افزایش ولی انباشت کادمیم را کاهش داده است.

در حال حاضر، عمده‌ی مساحت دشت (حدود ۹۲ درصد) در محدوده‌ی آلودگی متوسط (بار آلودگی: ۱ تا ۲) قرار می‌گیرد. این نتیجه حاکی از اثرات کشاورزی به طور کلی بر آلودگی خاک‌های این دشت است. آلوده‌ترین اراضی (بار آلودگی: ۱/۵ تا ۲) تقریبا تماما در بخش شرقی دشت قرار گرفته و حدود ۱۵درصد مساحت را اشغال کرده است. از طرف دیگر، حدود ۸ درصد مساحت دشت دارای آلودگی عنصری کم (بار آلودگی بین ۰/۸۵ تا ۱) است که در بخش غربی دشت واقع است. این دو نتیجه حاکی از اثر آلایندگی کشاورزی با پساب بر خاک‌های این دشت است.

کشاورزی به روال مرسوم حاضر و کاربرد پساب هر دو خاک‌های دشت را آلوده می‌سازد. نرخ انباشت عناصر و افزایش آلودگی تحت کشاورزی مرسوم بزرگ‌تر از نرخ انباشت عناصر و افزایش آلودگی تحت کشاورزی با پساب است.

این ارقام تا ابتدای سال ۱۳۹۱ اعتبار داشته و با توجه به روند موجود وضعیت آلودگی عنصری تشدید خواهد شد. زیرا، با ادامه‌ی کاربرد کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها که از چند دهه‌ی پیش آغاز شده و کاربرد پساب که در ۱۵ سال اخیر شروع شده باید انتظار داشت

انباشت و بار آلودگی عناصر کمیاب از سطح حاضر فراتر رود، به ویـژه آن که افزایش جمعیت بروجن با تولیـد پسـاب بیشـتر و آلـوده‌سـازی گازی نیوار نرخ آلودگی را هم افزایش خواهد داد. آلودگی خاک منجـر به آلودگی محصولات زراعی، گوشت، لبنیات تولید شده در دشت و نیز آلودگی آب‌های زیرزمینی خواهد شد. ضمنا، غبار ناشی از وزش باد در دشت محتوی عناصر سمی بیشتری خواهد بود.

منابع

1- Ahmadzadeh S. 2012. The concentration and distribution of some heavy metals in plain Borujen-Faradonbeh: The effect of usage the sewage on distribution in soil and tissue concentrations of some crops. Master's Thesis. Department of Soil Science, University of Shahrekord. 130 pp.
2- American Public Health Association. 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd edition.
3- Angulo E. 1996. The Tomlinson pollution load index applied to heavy metal, mussel-watch data: a useful index to assess coastal pollution. The Science of the Total Environment, 187:19-56.
4- Azimzadeh B., and Khademi H. 2013. Stimate of baceline concentration for assessment of some heavy metals pollution in surface soils in part of mazandaran province. Journal of Soil and Water of Mashhad. 27(3): 548-559.
5- Beigi H., and Banitalebi G. 2013. Effect of 23 years surface irrigation with urban sewage on accumulation Some of heavy metal in soil, Transfer to the wheat and corn beans and related health risks. Journal of Soil and Water of Mashhad, 27(3): 570-580.
6- Bahrampour T., Fallahnosratabad A., Shiri M., and Sarvimoghanlou V. 2013. Study of the status of heavy metals (lead, cadmium and nickel) in the moghan soils. Journal of Soil management and sustainable production, 3(1):243-249.
7- Breckenridge R.P., and Crockett A.B. 1998. Determination of inorganic in soils and sediments at hazardous waste sites. Environmental Monitoring & Assessment, 51:621-656.
8- Chen J., Wie F., Wu Y., and Adriano D. 1991. Background concentrations of elements in soils of China. Water air and Soil Pollution, 57-58:699-712.
9- Chen M., Lena Q., Ma C., Hoogeweg G., and Harris W.G. 2001. Arsenic Background concentrations in Florida, U.S.A. surface Soils: Determination and interpretation. Environmental Forensics, 2:117 – 126.
10- Chen Z-F., Zhao Y., Zhu Y., Yang X., Qiao J., Tianc Q., and Zhang Q. 2010. Health risks of heavy metals in sewage-irrigated soils and edible seeds in Langfang of Hebei province, China. Journal of Science Food and Agriculture, 90(2): 314-320.
11- De Temmerman L., Vanongeval L., Boon W., Hoenig M., and Geypens M. 2003. Heavy metal content of arable soils in northern Belgium. Water, Air and Soil pollution, 148:61-76.
12- ESRI Inc. 2008. ArcMapTM. Version 9.3. www.esri.com.
13- FAO/WHO.1984. List of contaminants and their maximum levels in foods. Codex Alimentarius Commission. Available at http://www.codexalimentarius.org. visited on 10 November 2012.
14- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. Water Research, 14:975-1001.
15- Huang P.M., and Iskandar I.K. 2000. Soils and groundwater pollution and remediation. Lewis Publishers. Washington DC 386 pages.
16- Iran Environmental Protection Organization. 1999. Privacy and environmental standards. environmental protection agency publications. 350 pp.
17- Kabata-Pendias A. 2011. Trace Elements in Soils and Plants. 4th edition. CRC Press.
18- Khan S., Cao Q., Zheng Y.M., Huang Y.Z., and Zhu Y.G. 2008. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. Environmental Pollution, 152:686-692.
19- Klute A. (Ed.). 1986. Methods of Soil Analysis, Part 1. 2nd edition. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI.
20- Maas S., Scheifler R., Benslama M., Crini N., Lucot E., Brahmia Z., Benyacoub S., and Giraudoux P. 2010. Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. Environmental Pollution, 158:2294-2301.
21- Mirsal I. 2004. Soil Pollution. Springer, 252 pages.
22- Moradmand M., and Beigi H. 2009. Treated municipal filtered wastewater irrigation effect on pb and Ni disribiution in the organ of green pepper. Journal of Iran Water Research, 3(5):63-70.
23- Moradmand M., and Beigi Harchegani H. 2011. Treated municipal wastewater irrigation effect on lead content and health risks of nickel in soil and pepper in Shahrekord, Iran. Desalination and Water Treatment, 28(1-3):42-45.
24- Sedaghat M. A. 1999. Geology map of Boroujen, scale 1:100000. Iran geology organization.
25- Sparks D.L. (Ed.). 1996. Methods of Soil Analysis, Part 3. American Society of Agronomy and Soil Science

Society of America, Madison, WI.
26- Sparks D.L. 2003. Environmental Soil Chemistry, 2nd edition. Academic Press.
27- StatSoft Inc. 2011. STATISTICA (data analysis software system). Version 12. www.statsoft.com.
28- Su Y., and Yang R. 2008. Background concentrations of elements in surface soils and their changes as affected by agriculture use in the desert-oasis Ecotone in the middle of Heihe River Basin, North-West China. Journal of Geochemical Exploration, 98:57–64.
29- Taghipour M., Khademi H., and Ayoubi S.H. 2010. Spatial variation of the concentration of Pb and Zn in surface soil and it s relation with parent material and use type in part of hamedan province. Journal of Soil and Water (Agriculture s Science and Industry), 24(1): 132-144.
30- Tomlinson D.L., Wilson J.G., Hariss C.R., and Jeffrey D.W. 1980. Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. Helgol. Meeresunters, 55:566-575.
31- Tume E., Bech J., Longan L., Tume L., Reverter F. and Sepulveda B. 2006. Trace elements in natural surface soils in Saint Climent (Catalonia, Spain). Ecological Engineering, 27:145–152.
32- Yan X., Zhang F., Gao D., Zeng C., Xiang W., and Zhang M. 2013. Accumulations of Heavy Metals in Roadside Soils Close to Zhaling, Eling and Nam Co Lakes in the Tibetan Plateau. International Journal of Environmental Research and Public Health, 10:2384-2400.
33- Zahedi M., and Samadanian M. 1976. Geology map of riz & lenjan, scale 1:100000. Iran geology organization.
34- Zhang X.P., Deng W., and Yang X.M. 2002. The background concentrations of 13 soil trace elements and their relationships to parent materials and vegetation in Xizang (Tibet), China. Journal of Asian Earth Sciences, 21:167–174.

Journal of Water and Soil
Vol. 32, No. 2, May.-Jan. 2018, p. 283-298

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۲، شماره ۲، خرداد – تیر ۱۳۹۷، ص. ۲۹۸-۲۸۳

Estimation of Baseline Concentration of Some Trace Elements and the Effect of Farming Practices on the Distribution of Accumulation and Pollution Loading Indices in the Soil of Boroujen-Faradonbeh Plain

H. Beigi Harchegani*[1]- S. Ahmadzadeh[2]- S. Heshmati[3]

Received: 25-12-2013
Accepted: 27-10-2014

Introduction: Soil pollution, i.e. elevated concentration of undesirable organic and inorganic matter such as trace elements higher than natural background concentration can be a consequence of indirect or intentional human activities. Evaluation of the effect of the agricultural operations and particularly using the wastewater on soil trace element concentrations is useful and required to manage the land and reduce the health risks of the food products. The aims of this study were: [1] The estimation of the mean concentration and max limit of the background concentration for Cd, Cr, Ni, Pb, Co and Hg in the surface soil samples of Boroujen-Faradonbeh plain; and [2] Evaluation of the effect of agricultural operation and farming by non-conventional water on background concentration and on accumulation, distribution and pollution load of the soil of this plain.

Materials and Methods: Boroujen-Faradonbeh is an agricultural plain loaced in the Chaharmahal and Bakhtiari mountainous province of Iran. Two hundered surface soil samples (0-20 cm) were taken from three types of land: never-uncultivated soil (20 samples), freshwater-irrigated (90 samples) and wastewater-irrigated (90 samples) soils. The total sampled area was about 2340 hectares. The exact position of the samples were recoded using a GPS device. The total concentrations of Pb, Co, Ni, Cd, Cr and Hg in the samples, and the background and upper limit concentrations were determined. In addition, pollution loading index (PLI) for the whole plain determined and delineated. To separate the affects of agricultural practices and wastewater application the analysis of variance of StatSoft Statistica 12 was used. Maping, and related operations were conducted inside ArcGIS 9.3.

Results and Discussion: Background concentrations of Ni, Cd, Cr, Hg, Co, and Pb, were determined as 1.13, 0.16, 1.56, 0.09, 0.80, and 1.52 mg/kg, respectively; while upper limit concentrations for the mentioned trace elements were respectively 1.3, 0.28, 1.6, 0.16, 0.9, 1.7 mg/kg. Conventional farming (application of fertilizer but not wastewater) increased the soil accumulation factor of Cd and Pb to 1.7 and 1.9 ($p<0.05$), respectively, but reduced the accumulation factor of Cr from the unit to 0.8 ($p<0.05$). Wastewater application increased the accumulation factor of Ni and Cr (from 1.2 to 1.6 and from 0.8 to 1.2, respectively), and especially Pb and Co accumulation factor from 1.9 to 3.7 and from 1.2 to 1.9, respectively, while the accumulation factor of Cd was reduced from 1.7 to 1.3. About 8% of plain's area, located in the western part where no wastewater is used, had a low pollution loading index between 0.85 and 1 while the remainder of the plain's area, mostly located in the eastern part of the plain where both fertilizer and wastewater is applied, had a moderate pollution loading index of 1 to 2. The most polluted part of the plain with a loading index from 1.5 to 2 that covered 15% of the plain's area was in the eastern part of the plain, where wastewater is most available. Overall, wastewater application in this area led to increase the accumulation factors and higher pollution loading indices. Howerver, the risks of conventional practices of fertilizer and pesticide use , though smaller, existed.

Conclusions: In this study, about 92% of this plain was placed in the moderate pollution class (pollution load: 1 to :2). Most polluted farms were in eastern part of the plain where wastewater was used for irrigation. It is expected that the accumulation and pollution load of trace elements in this plain will exceed the current level given that the practice of using wastewater on the farms will not stop.. Soil pollution leads to the polluted meat and dairy products produced in the plain and the pollution of groundwater. In addition, wind dust in this plain contains toxin elements which is another concern. This points to detrimental effect of farming and wastewater

1, 2 and 3- Assistant Professor and Former M.Sc. Students, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Shahrekord, Shahrekord, Respectively
(*- Corresponding Author Email: beigi.habib@gmail.com)

application on soils. Current farming practices including the use of chemical fertilizers, pesticides and wastewater, coupled with increased population, will lead to more unfavorable conditions of trace metal pollution in the Boroujen-Faradonbeh plain.

Keywords: Conventional farming, Fertilizers, Pollution, Trace elements, Wastewater application