مدل‌سازی توازن جرمی عناصر کادمیوم و سرب در زمین‌های زراعی منطقه اصفهان

منوچهر امینی، مجید افیونی و حسین خادمی[۱]

چکیده

عناصر سنگین از جمله کادمیوم و سرب از مسیرهای مختلف و عمدتاً تحت تأثیر فعالیت‌های انسان وارد زمین‌های کشاورزی شده و به دلیل تحرک کم در طول زمان در خاک انباشته می‌شوند. انباشت کادمیوم و سرب در خاک در نهایت باعث ورود آنها به چرخه غذایی و تهدید سلامت انسان و سایر حیوانات می‌شود. بنابراین بررسی روند انباشت عناصر سنگین برای پیشگیری از آلودگی خاک و حفظ کیفیت محیط زیست ضروری بوده و باید مد نظر محققین و برنامه ریزان در سطوح مختلف مدیریتی قرار گیرد. این مطالعه به منظور مدل‌سازی روند انباشت کادمیوم و سرب در زمین‌های زراعی شهرستان‌های اصفهان، برخوار، خمینی شهر، لنجان، فلاورجان، مبارکه و نجف آباد صورت گرفت. روند انباشت عناصر در زمین‌های زراعی منطقه به کمک روش تصادفی مبتنی بر توازن جرمی و با استفاده از ترکیب روش لاتین هایپر کیوب و شبیه سازی مونت کارلو محاسبه گردید. به این منظور از اطلاعات زراعی (نوع، سطح زیر کشت و عملکرد محصولات)، اطلاعات مرتبط با احشام (انواع و تعداد)، آمار مربوط به میزان مصرف کودهای شیمیایی، کمپوست و لجن فاضلاب و همین‌طور اطلاعات مرتبط با غلظت عناصر در گیاهان و مواد اصلاح کننده خاک استفاده شد. نتایج حاکی از انباشت مقادیر قابل توجهی از عناصر کادمیوم و سرب در زمین‌های کشاورزی شهرستان‌های مورد مطالعه می‌باشد. بیشترین نرخ انباشت کادمیوم و سرب به ترتیب، ($۱۸\ g\ ha^{-1}yr^{-1}$) و ($۲۶۰\ g\ ha^{-1}yr^{-1}$) در شهرستان اصفهان و کمترین نرخ انباشت کادمیوم و سرب به ترتیب، ($۳\ g\ ha^{-1}yr^{-1}$) و ($۱۰\ g\ ha^{-1}yr^{-1}$) در شهرستان لنجان و مبارکه دیده شد. صرف‌نظر از ریزش‌های جوی، مهم‌ترین مسیر ورود کادمیوم به زمین‌های کشاورزی در مقیاس شهرستان کودهای فسفره است. در صورتی‌که در مورد سرب کودهای حیوانی نقش مهم‌تری را در شهرستان‌های مورد مطالعه به جز اصفهان دارند. ورود سرب از طریق کودهای حیوانی به طور عمده ناشی از ریزش جوی سرب روی سطح گیاهان و انتقال آن به زنجیره غذایی حیوانات می‌باشد. در شهرستان اصفهان کمپوست مهم‌ترین مسیر ورود سرب به زمین‌های کشاورزی است زیرا بیشترین مقدار کمپوست در این شهرستان استفاده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: توازن جرمی، مدل‌سازی تصادفی، روند انباشت، سرب، کادمیوم

مقدمه

عناصر سنگین از مسیرهای مختلف مانند ریزش‌های جوی، استفاده از کودهای شیمیایی و حیوانی، کمپوست، لجن فاضلاب و آفت‌کش‌ها به خاک وارد می‌شوند. در مقابل جذب توسط

۱. به ترتیب دانشجوی سابق دکتری و دانشیاران خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

گیاهان و آبشویی عناصر از منطقه ریشه میزان خروج آنها از سیستم را تعیین می‌نماید. صرف‌نظر از ریزش‌های جوی، میزان ورود عناصر به زمین کشاورزی به مدیریت زراعی وابسته است، در صورتی‌که خروج عناصر از اکوسیستم بیشتر توسط خصوصیات خاک کنترل می‌شود.

علی‌رغم تفاوت‌هایی که در رفتار عناصر سنگین از لحاظ تحرک و قابلیت جذب آنها در خاک وجود دارد، در اغلب موارد میزان خروج آنها از طریق آبشویی و یا جذب به وسیله گیاهان نسبت به میزان ورود آنها به خاک بسیار کمتر است (۷). این امر منجر به انباشته شدن تدریجی عناصر در خاک می‌شود. روند انباشت عناصر سنگین در خاک بسیار کند بوده و اثرات آن پس از ده‌ها سال قابل تشخیص است (۶). ولی به دلیل این که فرایند انباشت عناصر تقریباً یک فرایند برگشت ناپذیر است در درازمدت موجب کاهش کیفیت خاک و در نهایت تخریب زمین‌های کشاورزی می‌شود. به عنوان مثال، انباشت بیش از حد عناصر در خاک باعث بروز سمیت برای گیاهان، اختلال در فعالیت‌های میکروبی در خاک و انتقال عناصر به زنجیره غذایی انسان از طریق جذب زیاد توسط گیاهان و یا حتی بلع خاک توسط احشام می‌شود (۱۰). ورود عناصر سنگین بخصوص کادمیوم و سرب به زنجیره غذایی منجر به بروز مشکلات جدی برای سلامت انسان می‌شود. مناسب‌ترین روش برای جلوگیری از انباشت عناصر سنگین در زمین‌های کشاورزی کاهش میزان ورود آنها به خاک می‌باشد (۴).

با توجه به بطئی بودن فرایند انباشت عناصر در زمین‌های کشاورزی مطالعه اثرات نامطلوب آن از طریق روش‌های معمول قابل بررسی نیست. توازن جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی عناصر یکی از راه‌هایی است که برای مطالعه روند انباشت آنها در زمین‌های کشاورزی پیشنهاد شده است (۹) روش توازن جرمی به عنوان یک ابزار مفید برای دست‌یابی به روش‌های مدیریتی مناسب وپایدار مورد توجه قرار گرفته است (۵). برای بررسی توازن جرمی عناصر سنگین مسیرهای ورود و خروج این عناصر به خاک، شناسایی و اهمیت نسبی تعیین می‌گردد (۹). پس از کمّی شدن مسیرهای ورود عناصر به سیستم می‌توان با اتخاذ تدابیر مدیریتی مناسب میزان ورود آنها به اکوسیستم را کاهش داد. این روش برای ارزیابی توازن عناصر سنگین و همین‌طور فسفر در مقیاس مزرعه (کوچکتر از 10^3 متر مربع) (۵) و در مقیاس منطقه‌ای(بزرگ‌تر از 10^7 متر مربع) و ملی (۵) به کار گرفته شده است. مقیاس مناسب برای مدل‌سازی روند انباشت عناصر بر اساس توازن جرمی معمولاً منطقه‌ای می‌باشد. زیرا علاوه بر این که در این مقیاس داده‌های مورد نیاز بیشتر در دسترس می‌باشند، این مقیاس معمولاً هم‌آهنگ با سطوح تقسیمات جغرافیایی، اجتماعی و اقتصادی جامعه می‌باشد (۴ و ۶). در صورتی‌که در مقیاس‌های کوچک‌تر (مزرعه) مدل‌سازی انجام گیرد نه تنها به داده‌های بسیار زیادی نیاز است بلکه به دلیل ناهمگونی شدید داده‌ها هم آهنگ کردن آنها بسیار دشوار می‌باشد.

در مدل‌سازی لازم است اطلاعات با مکان نامشخص نظیر اطلاعات زراعی مانند نوع محصولات، سطح زیر کشت و عملکرد آنها، تعداد و انواع احشام و مدیریت کوددهی با اطلاعات با مکان مشخص (خصوصیات خاک) هم‌آهنگ شود. هم‌آهنگ نمودن این اطلاعات به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل برخی از مدل‌های پیشنهاد شده در این زمینه میانگین اطلاعات زراعی را در فرایند مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌دهند (۱۱). فوناشتیگر و اوبریست (۱۲) مدلی با نام PROTERRA برای بررسی توازن جرمی فسفر، کادمیوم، روی، مس و سرب در مقیاس منطقه ارائه نمودند. این مدل سپس توسط کلر و همکاران (۶) بسط داده شد (PROTERRA-S) به نحوی‌که بتواند به صورت تصادفی ترکیب‌های مختلف اطلاعات زراعی و خصوصیات خاک را در نظر بگیرد. در مطالعه حاضر این مدل با اعمال تغییراتی برای شرایط مدیریتی منطقه بازنویسی و مورد استفاده قرار گرفت.

منطقه اصفهان به لحاظ شرایط اقلیمی و وجود رودخانه زاینده‌رود در آن شرایط مناسبی را برای کشاورزی دارا می‌باشد. با توجه به کشت و کار متمرکز، وجود صنایع آلاینده، تولید

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

حجم زیادی کمپوست و لجن فاضلاب در این منطقه انتظار می‌رود سالانه مقادیر زیادی از عناصر سنگین به زمین‌های کشاورزی وارد شود. با این وجود هیچ‌گونه مطالعه‌ای در ارتباط با میزان انباشت عناصر، مهم‌ترین مسیرهای ورود و خروج عناصر در زمین‌های کشاورزی صورت نگرفته است این مطالعه به منظور تعیین روند انباشت عناصر سنگین در مقیاس منطقه، کمّی نمودن ورود و خروج عناصر از مسیرهای مختلف مرتبط با فعالیت‌های کشاورزی و تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر در انباشت عناصر در زمین‌های زراعی شهرستان‌های اصفهان، برخوار و میمه، خمینی‌شهر، لنجان، فلاورجان، مبارکه و نجف‌آباد صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

این مطالعه در زمین‌های زراعی شهرستانهای اصفهان، برخوار و میمه، خمینی‌شهر، نجف‌آباد، لنجان، فلاورجان و مبارکه در استان اصفهان صورت گرفت. در بین شهرستان‌های مورد مطالعه از نظر زمین‌های کشاورزی، شهرستان اصفهان بیشترین و شهرستان لنجان کمترین وسعت را دارند. محصولات غالب منطقه شامل گندم، جو، یونجه، ذرت علوفه‌ای، برنج، شبدر، سیب زمینی و پیاز می‌باشد.

ساختار مدل

مدل مورد استفاده در این مطالعه بر اساس مدل PROTERRA-S (۶) طراحی شده است. این مدل براساس متغیرهای تصادفی (Random variable) با توزیع مشخص پایه‌ریزی شده است. به منظور در نظر گرفتن حداکثر احتمالات ممکن در ترکیب متغیرهای مختلف در مدل از روش نمونه برداری لاتین هایپرکیوب (Latin hypercube sampling) استفاده شد. ساختار مدل و فرضیات آن در مراجع شماره ۶ و ۷ تشریح شده است بنابراین در ادامه به طور مختصر این مدل ارائه خواهد شد.

مسیرهایی که این مدل در مقیاس منطقه‌ای برای ورود عناصر سنگین در نظر می‌گیرد شامل فعالیت‌های کشاورزی مانند استفاده از کودهای شیمیایی و حیوانی، لجن فاضلاب، کمپوست و آفت‌کش‌هاست. مسیرهای خروج عناصر سنگین در این مدل شامل برداشت محصولات و خروج از طریق آبشویی می‌باشند. با توجه به مسیرهای مذکور مدل، داده‌های زیادی را برای محاسبه توازن جرمی عناصر نیاز دارد. در این مدل تغییر در میزان یک عنصر سنگین، M ($g\ ha^{-1}$)، در طول دوره زمانی Δt (yr) در لایه شخم زمین‌های زراعی و در هر واحد مدیریتی (LUS_i) به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\frac{\Delta M_i}{\Delta t} = \langle I_{Atm} \rangle + I_{Agri} - \langle O_L \rangle \qquad [۱]$$

در این معادله $\langle I_{Atm} \rangle$، I_{Agri} و $\langle O_L \rangle$ بر حسب $g\ ha^{-1}\ yr^{-1}$ به ترتیب میزان ورود عناصر از طریق ریزش‌های اتمسفری در سطح منطقه، میزان ورود عناصر توسط فعالیت‌های کشاورزی و میزان خروج عناصر از طریق آبشویی می‌باشند.

میزان ورود یک عنصر سنگین دراثر فعالیت‌های کشاورزی برای تولید محصول در هر LUS_i را می‌توان به شکل زیر تعریف نمود:

$$I_{Agri} = I_{Man,i} + I_{Min,i} + I_{Se,i} + I_{Pes,i} + I_{Comp,i} - O_{Crop,i} \qquad [۲]$$

در این معادله میزان ورود عنصر از طریق استفاده از کودهای حیوانی با I_{Man}، کودهای شیمیایی با I_{Min}، لجن فاضلاب با I_{Se}، کمپوست با I_{Comp} و آفت کشها با I_{Pes} نشان داده شده است. و O_{Crop} میزان خروج عنصر در اثر برداشت گیاه و خارج نمودن آن از مزرعه است. تمام جریان‌های فوق برحسب گرم بر هکتار بر سال می‌باشند.

کلیه مراحل مدل‌سازی توازن جرمی عناصر در این مطالعه شامل ورود اطلاعات مختلف به مدل، همگن کردن داده‌ها، شبیه‌سازی‌های لازم، پردازش خروجی‌های مدل و تهیه نمودارها در محیط مطلب (۸) برنامه‌نویسی و اجرا شده است.

داده‌های مورد استفاده

اطلاعات زراعی مورد نیاز شامل نوع محصول، سطح زیر کشت

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

و عملکرد برای یک دوره ۱۰ ساله از آمارنامه‌های کشاورزی استان و برحسب شهرستان استخراج گردید. به‌طور کلی حدود ۲۷ محصول مختلف زراعی در منطقه کشت می‌شود که بر اساس سطح زیر کشت گندم، جو، برنج، ذرت علوفه‌ای، یونجه، شبدر، سیب زمینی و پیاز مهم‌ترین محصولات منطقه می‌باشند. با توجه به در دسترس بودن اطلاعات برای سطح زیر کشت و عملکرد، توزیع نرمال با میانگین و انحراف معیار مشخص برای آنها در نظر گرفته شد. لیست کامل داده‌های مورد استفاده در مرجع شماره ۱ ارائه شده است.

داده‌های مورد نیاز در مورد نوع و تعداد احشام در شهرستان‌ها بر اساس آمار موجود در بخش امور دام سازمان جهاد کشاورزی تهیه گردید. احشام غالب منطقه عبارت‌اند از گاو و گوساله، گوسفند، بز و طیور. اطلاعات مورد نیاز در مورد کودهای شیمیایی بر اساس آمارهای موجود در آمارنامه کشاورزی به‌دست آمده است. علی‌رغم تغییرات بسیار زیاد در نحوه مصرف کودهای فسفره در هر شهرستان در این مطالعه فرض بر این است که کل کودهای فسفره ورودی به هر شهرستان مشخص و مطابق داده‌های ارائه شده در آمارنامه‌های کشاورزی است. علاوه بر کودهای شیمیایی، استفاده نامناسب از لجن فاضلاب، کمپوست و کودهای حیوانی نیز می‌تواند بسته به منبع آنها مقادیر متنابهی از عناصر سنگین را وارد زمین‌های کشاورزی نماید. در مورد میزان لجن فاضلاب از اطلاعات موجود در سازمان آب و فاضلاب و همین‌طور تصفیه‌خانه‌های شاهین‌شهر، شمال و جنوب اصفهان استفاده شده است. قسمت عمده کمپوست تولیدی در کارخانه کمپوست اصفهان (سالانه حدود ۵۰ هزار تن) در شهرستان اصفهان مصرف می‌شود و بخش ناچیزی از آن (حدود یک درصد) وارد شهرستان‌های دیگر می‌شود.

برای تعیین غلظت عناصر در گیاهان، تعداد ۸۰ نمونه از محصولات غالب منطقه شامل گندم (۱۲ نمونه)، جو (۱۲ نمونه)، برنج (۱۲ نمونه)، یونجه (۱۲ نمونه)، ذرت علوفه‌ای (۱۰ نمونه)، شبدر (۶ نمونه)، سیب زمینی (۵ نمونه)، پیاز (۵ نمونه) و چغندر قند (۶ نمونه) به طور تصادفی جمع‌آوری گردید. نمونه‌برداری درمرحله برداشت و بر اساس نوع گیاه از بخش‌هایی که طی مرحله برداشت از مزرعه خارج می‌شود صورت گرفت. نمونه‌های گیاهی به روش سوزاندن تر با اسید نیتریک (۱۳) عصاره‌گیری شده و غلظت عناصر در آنها با استفاده از دستگاه جذب اتمی تعیین گردید. علاوه بر این، اطلاعات مرتبط با غلظت عناصر در گیاهان موجود در سایر تحقیقات انجام گرفته در منطقه استخراج شده است. غلظت سرب و کادمیوم در گیاهان مختلف به ترتیب ۰/۵ تا ۱/۶ و ۰/۱ تا ۰/۵ میلی گرم بر کیلوگرم می‌باشد .

خاک‌های منطقه اصفهان اغلب آهکی و دارای pH>۷ می‌باشند و بنابراین آبشویی فلزات سنگین در آنها بسیار کم بوده و در مقایسه با سایر ورودی‌ها و خروجی‌ها قابل اغماض است. بنابراین خروج عناصر از طریق آبشویی در این مطالعه لحاظ نشده است. اغلب آفت‌کش‌های که در منطقه استفاده می‌شود از نوع آلی بوده و بنابراین غلظت کادمیوم و سرب در آنها بسیار ناچیز است (۶). بنابراین این مسیر ورودی در محاسبه روند انباشت این فلزات در خاک لحاظ نشد.

به طور کلی با احتساب تمام داده‌های قابل دسترس برای مسیرهای ورود و خروج سرب و کادمیوم بسته به شهرستان و نوع عنصر بین ۱۱۰ تا ۱۲۰ متغیر تصادفی با توزیع مشخص ترکیب شد. نوع توزیع‌ها در صورت در دسترس بودن اطلاعات و امکان محاسبه میانگین و انحراف استاندارد توزیع نرمال، در صورت وجود حداقل و حداکثر توزیع یک‌نواخت و در مورد غلظت عناصر در گیاه، کودهای حیوانی، کمپوست و لجن فاضلاب توزیع نرمال لگاریتمی در نظر گرفته شد (لیست کامل متغیرها و نوع توزیع آنها در مرجع شماره ۱ ذکر شده است). با استفاده از داده‌های تشریح شده در این بخش میزان انباشت عناصر کادمیوم وسرب در منطقه شبیه‌سازی گردید. به این منظور با استفاده از روش لاتین هایپرکیوب ۲۵۰۰ ترکیب مختلف از داده‌ها در نظر گرفته شد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

جدول ۱. میانگین (انحراف استاندارد) ورود، خروج و نرخ انباشت کادمیوم از مسیرهای مختلف به تفکیک شهرستان

شهرستان	خروجی	ورودی				نرخ انباشت*
	گیاه[1]	احشام	کودهای فسفره	کمپوست	لجن فاضلاب	
	($g\ ha^{-1}yr^{-1}$)					
مبارکه	۱/۹۵(۰/۴۳)	۱/۲۴ (۰/۳۶)	۳/۸۸ (۱/۸۱)	–	–	۳/۱۸ (۱/۸۸)
فلاورجان	(۰/۵۴)۲/۱۴	۱/۹۸(۰/۵۶)	۶/۱۶ (۲/۸۶)	–	–	۲/۹۵ (۴/۱۰)
نجف‌آباد	۲/۰۲(۰/۵۵)	۳/۵۵(۱/۰۰)	۲/۲۳ (۰/۹۶)	–	۰/۳۳ (۰/۱۲)	۴/۱۰ (۱/۴۸)
لنجان	۱/۶۰ (۰/۵۱)	۲/۸۸ (۱/۰۵)	۱/۴۰ (۰/۶۷)	–	۰/۱۲ (۰/۰۴)	۲/۸۰ (۱/۳۵)
خمینی‌شهر	۱/۲۰ (۰/۳۱)	۲/۸۶ (۰/۷۹)	۱/۵۶ (۰/۶۷)	–	۶۰/۵ (۰/۲۰)	۳/۷۷ (۱/۰۸)
اصفهان	۲/۰۷ (۰/۶۷)	۱/۲۶ (۰/۳۰)	۱۵/۲۰ (۶/۹۴)	۲/۱ (۰/۷۲)	۱/۳۵ (۰/۵۱)	۱۷/۸۹ (۷/۰۱)
برخوار	۱/۴۴ (۰/۴۷)	۱/۸۰ (۰/۴۳)	۳/۹۱ (۱/۶۷)	–	۰/۲۷ (۰/۱۰)	۴/۵۴ (۱/۷۸)

۱. میزان خروج توسط برداشت گیاه.

* : نرخ انباشت برابر اختلاف میزان ورودی و میزان خروجی است. اعداد داخل پرانتز معرف انحراف استاندارد می‌باشند.

نتایج و بحث

مقیاس شهرستان

الف) کادمیوم

نتایج حاصل از مدل‌سازی نرخ انباشت کادمیوم به تفکیک شهرستان در جدول ۱ خلاصه شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده شهرستان اصفهان با میانگین حدود ۱۸ $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ بیشترین نرخ انباشت و لنجان بامیانگین حدود ۳ $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ کمترین نرخ انباشت کادمیوم را در خاک‌های کشاورزی و در اثر فعالیت‌های کشاورزی دارا می‌باشند. سایر شهرستان‌ها دارای میانگین نرخ انباشت کادمیوم حد واسط ولی نزدیکتر به نرخ انباشت شهرستان لنجان می‌باشند. مقادیر گزارش شده در جدول ۱ در واقع میانگین همگن شده میزان انباشت کادمیوم در کل زمین‌های کشاورزی هر شهرستان می‌باشد. با در نظر گرفتن این واقعیت که کودهای حیوانی، لجن فاضلاب و کمپوست فقط توسط برخی از کشاورزان استفاده می‌شود و هم‌چنین ناهمگن بودن استفاده از کودهای فسفره در زمین‌های کشاورزی می‌توان انتظار داشت که میزان انباشت کادمیوم در برخی از زمین‌های کشاورزی بسیار بیشتر از مقادیر محاسبه شده باشد. این موضوع در صورتی‌که توزیع محاسبه شده برای نرخ انباشت سالیانه ترسیم گردد و یا ضریب تغییرات نرخ انباشت محاسبه گردد محسوس‌تر می‌شود.

ضریب تغییرات میزان انباشت سالیانه کادمیوم در زمین‌های کشاورزی در مناطق مورد مطالعه بین ۳۰ تا ۶۰ درصد متفاوت است. بیشترین ضریب تغییرات مربوط به شهرستان مبارکه و کمترین آن در شهرستان خمینی‌شهر است. علت تفاوت در ضریب تغییرات مقدار انباشت در شهرستان‌های مختلف ناشی از

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

ساختار متفاوت داده‌های به کار رفته در فرایند مدل‌سازی است.

بر اساس نتایج به دست آمده میانگین ورود کادمیوم به زمین‌های کشاورزی در شهرستان‌های مورد مطالعه به مراتب بیشتر از میانگین گزارش شده برای زمین‌های کشاورزی در کشورهای اروپایی (۳-۰/۲ گرم در هکتار در سال) می‌باشد (۱۰). میانگین‌های محاسبه شده با مقادیر گزارش شده به وسیله کلر و همکاران (۶) برای مقیاس مزرعه (۱- ۱۷/۸ گرم بر هکتار در سال) قابل مقایسه است. بنابراین از مقدار گزارش شده به وسیله همین محققین در مقیاس منطقه (۱/۴ گرم بر هکتار در سال) بزرگ‌تر می‌باشد. با توجه به وجود منابع آلایند در منطقه انتظار می‌رود لحاظ نمودن ریزش‌های جوی مقادیر انباشت محاسبه شده به‌طور چشم‌گیری افزایش یابد. اختلاف زیاد نتایج این مطالعه با مطالعات صورت گرفته در اروپا می‌تواند ناشی از مدیریت زراعی متفاوت مانند استفاده از کودهای حیوانی به عنوان منبع اصلی عناصر غذایی و استفاده از کودهای فسفره با کیفیت بالاتر و بر حسب نیاز گیاه در کشورهای اروپایی باشد.

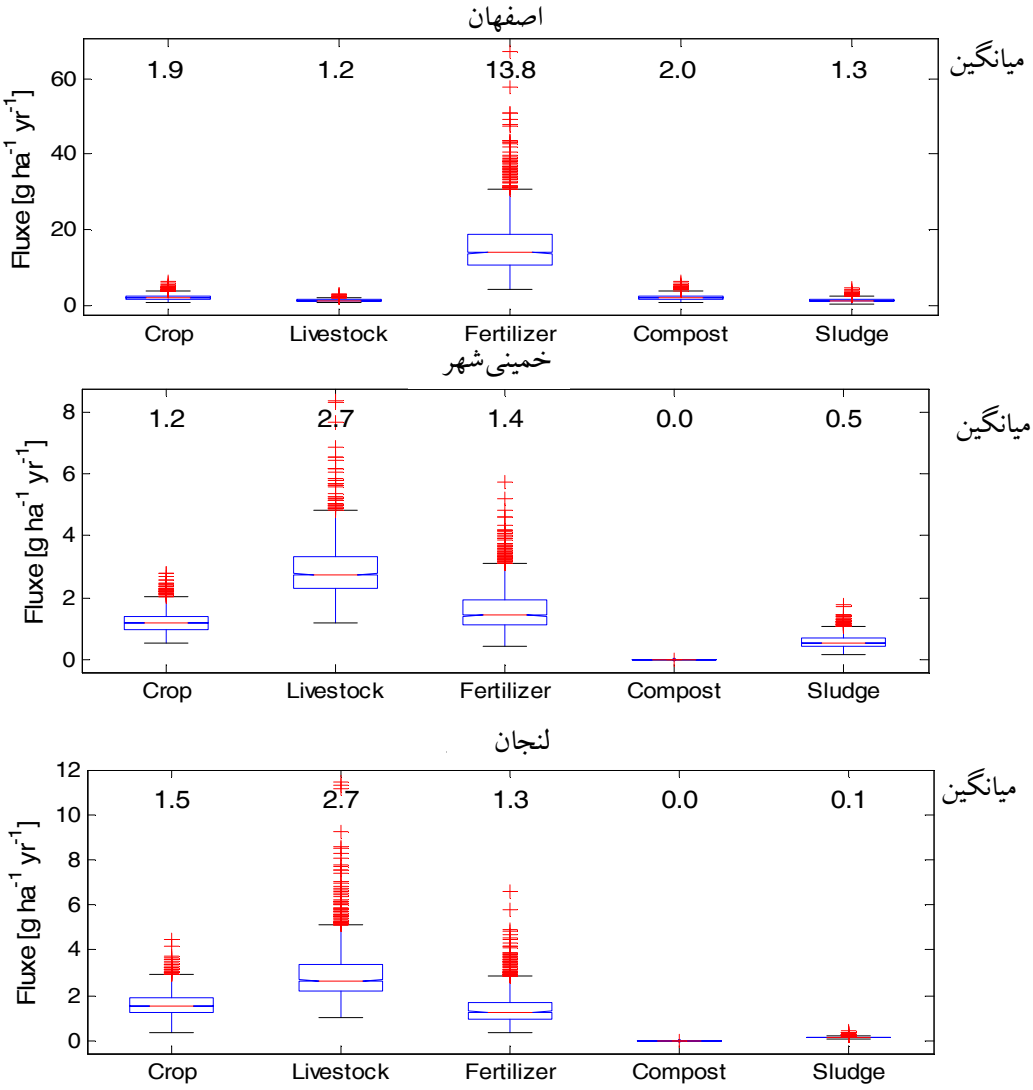
مقادیر نرخ انباشت در برخی از شهرستان‌ها بخصوص اصفهان در مقایسه با مقدار بحرانی پیشنهاد شده توسط کلر و همکاران (۶) $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۴/۹ بسیار زیاد است. این مقدار بحرانی پیشنهاد شده بیانگر نرخ انباشتی است که در مدت ۲۰۰ سال باعث افزایش غلظت کادمیوم در عمق لایه شخم از مقدار فعلی به غلظت بحرانی $mg\ kg^{-1}$ ۰/۸شود. این غلظت بحرانی برای کشور سوئیس و برای خاک‌های با میانگین غلظت کادمیوم حدود $mg\ kg^{-1}$ ۰/۵ پیشنهاد شده است (۶). با توجه به شرایط خاک های منطقه، نظیر pH بالا (pH >۷)، شرایط اقلیمی خشک و وجود مقدار زیادی آهک در خاک‌ها ، این مقدار بحرانی می‌تواند بزرگ‌تر از $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۴/۹ در نظر گرفته شود. بنابراین بر اساس مطالعات صورت گرفته میانگین غلظت کادمیوم در خاک‌های منطقه اصفهان حدود $mg\ kg^{-1}$ ۱/۸ است که بیش از دو برابر غلظت بحرانی فوق می‌باشد (۲ و ۳). علاوه بر آن چنانچه ریزش‌های جوی نیز به مقادیر محاسبه شده برای انباشت کادمیوم اضافه شود و توجه به این نکته که میزان خروج کادمیوم از لایه شخم از طریق آبشویی بسیار کم بوده و تأثیر چندانی بر توازن کادمیوم ندارد می‌توان نتیجه گرفت که انباشت کادمیوم در زمین‌های کشاورزی شرایط بسیار بحرانی دارد. بنابراین باید اقدامات مؤثری از طریق کنترل مصرف کودهای شیمیایی، کمپوست و لجن فاضلاب برای کاهش ورود کادمیوم به زمین‌های کشاورزی صورت گیرد.

میانگین و انحراف استاندارد میزان ورود و یا خروج کادمیوم از مسیرهای مختلف در جدول ۱ نشان داده شده است. میانگین خروج سالیانه کادمیوم از طریق برداشت گیاهان از حدود ۱/۲ تا حدود ۲ ($g\ ha^{-1}yr^{-1}$) به‌ترتیب برای خمینی‌شهر و فلاورجان متفاوت می‌باشد. توزیع غلظت عناصر در گیاهان مختلف برای تمام شهرستان‌ها در فرایند مدل‌سازی یکسان در نظر گرفته شد و علت تغییر در نرخ خروج کادمیوم از طریق برداشت گیاهان در شهرستان‌های مختلف مربوط به نوع و سطح زیر کشت گیاهان غالب در هر شهرستان می‌باشد. میانگین ورود سالیانه کادمیوم به زمین‌های کشاورزی از طریق کودهای حیوانی از حدود $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۱/۲ برای مبارکه تا حدود $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۳/۵ برای نجف‌آباد متغیر می‌باشد. علت این امر تفاوت در نوع و تعداد احشام غالب هر شهرستان است. ورود کادمیوم از طریق استفاده از کودهای فسفره از حدود $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۱/۴ تا حدود $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۱۵ به ترتیب برای لنجان و اصفهان متفاوت می‌باشد. میزان ورود کودهای فسفره به هر شهرستان را می‌توان به عنوان عامل اصلی این تغییرات ذکر نمود. ورود کادمیوم از طریق کمپوست تنها در شهرستان اصفهان قابل توجه است. میانگین نرخ ورود کادمیوم از طریق کاربرد لجن فاضلاب از حدود $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۰/۱۲ در لنجان تا $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۱/۳۵ در اصفهان متفاوت است. توزیع میزان ورود و خروج کادمیوم مدل‌سازی شده در شهرستان‌های اصفهان، خمینی‌شهر و لنجان در شکل۱ نمایش داده شده است.

به منظور تعیین نقش هرکدام از مسیرهای ورود، میزان ورود از هر مسیر به صورت درصدی از کل میزان ورود سالیانه کادمیوم محاسبه گردید. نتایج در جدول ۲ خلاصه شده است. بر این اساس کودهای حیوانی و فسفره مهم‌ترین مسیرهای

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]



شکل ۱. توزیع مقادیر شبیه‌سازی شده ورود و خروج کادمیوم ($g\ ha^{-1}yr^{-1}$) در شهرستان‌های اصفهان، خمینی‌شهر و لنجان

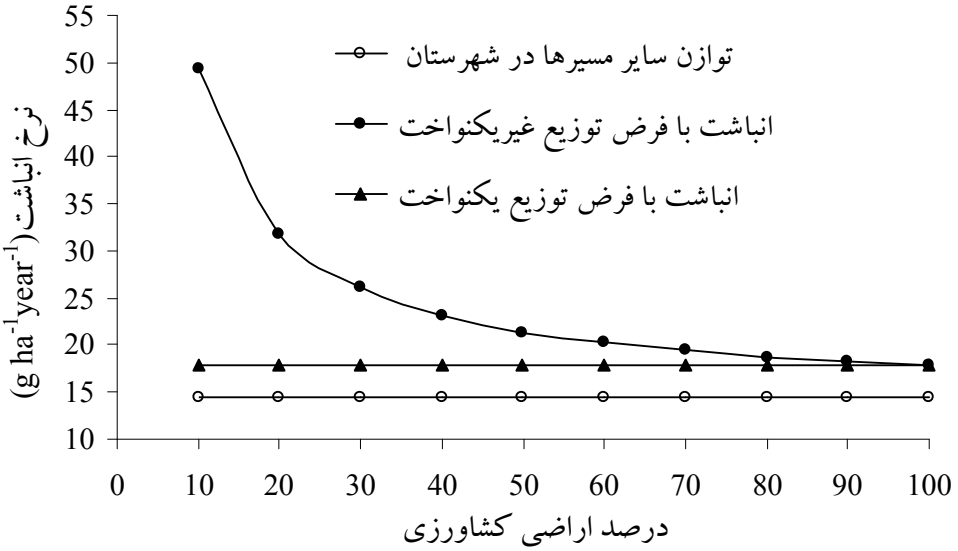
ورود کادمیوم به زمین‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. سهم ورود کادمیوم از طریق کاربرد کودهای حیوانی از حدود ۶ تا ۶۵ درصد و در مورد کودهای فسفره از ۳۱ تا ۷۵ درصد متفاوت است. سهم ورود کادمیوم از طریق کمپوست و لجن فاضلاب در مقیاس شهرستان نسبت به سایر ورودی‌ها ناچیز است. لازم به ذکر است که این نتیجه‌گیری به معنی بی‌اهمیت بودن ورود کادمیوم از طریق کمپوست و لجن فاضلاب نیست. بلکه به این مفهوم است که در مقیاس شهرستان این ورودی‌ها نسبت به سایر ورودی‌ها اهمیت کمتری دارند ولی در مقیاس‌های کوچک‌تر مانند مقیاس مزرعه می‌توانند از اهمیت بیشتری برخوردار باشند. علاوه بر آن باید این نکته در نظر گرفته شود که کمپوست و لجن فاضلاب وارد شده به هر شهرستان تنها در بخشی از زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تأثیر توزیع غیریک‌نواخت لجن فاضلاب و کمپوست را می‌توان برحسب درصدی از زمین‌های کشاورزی که در هر شهرستان کمپوست و لجن فاضلاب دریافت نموده شبیه‌سازی نمود. در این مطالعه ۱۰ سناریو در مورد توزیع کمپوست و لجن فاضلاب در شهرستان اصفهان شبیه‌سازی

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

جدول ۲ . ورود کادمیوم از مسیرهای مختلف نسبت به کل ورود کادمیوم

شهرستان	احشام	کودهای فسفره	کمپوست	لجن فاضلاب
	نسبت ورود از هر مسیر به کل ورود کادمیوم (٪)			
مبارکه	۲۴/۲۱	۷۵/۷۴	۰/۰۱	۰/۰۴
فلاورجان	۲۴/۳۲	۷۵/۶۷	۰/۰۱	۰/۰۱
نجف‌آباد	۵۸/۰۵	۳۶/۴۷	۰/۰۱	۵/۴۷
لنجان	۶۵/۳۸	۳۱/۷۸	۰/۰۲	۲/۸۱
خمینی‌شهر	۵۷/۴۳	۳۱/۳۲	۰/۰۲	۱۱/۲۳
اصفهان	۶/۳۱	۷۶/۱۷	۱۰/۶۷	۶/۸۵
برخوار	۳۰/۰۹	۶۵/۳۶	۰/۰۰	۴/۵۵



شکل ۲. تأثیر توزیع لجن فاضلاب و کمپوست در نرخ انباشت کادمیوم در زمین‌های کشاورزی شهرستان اصفهان

گردید. در این سناریوها فرض شد که تمام کمپوست و لجن فاضلاب وارد شده به شهرستان اصفهان به ترتیب در۱۰، ۲۰، ۳۰، ...و۱۰۰ درصد از زمین‌های کشاورزی این شهرستان مورد استفاده قرار گرفته است. نرخ انباشت کادمیوم محاسبه شده برای این سناریوها در شکل ۲ نمایش داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود تأثیر کمپوست و لجن فاضلاب در مقیاس‌های کوچک‌تر (کمتر از ۴۰ درصد زمین‌ها) به مراتب بیشتر از سایر ورودی‌ها است. علاوه بر کمپوست و لجن فاضلاب توزیع ناهمگن در مورد سایر ورودی‌ها مانند کودهای حیوانی و شیمیایی نیز می‌تواند صادق باشد. توزیع ناهمگن ورودی‌های کادمیوم باعث می‌شود که نرخ انباشت این عنصر در برخی از زمین‌های کشاورزی هر شهرستان بسیار بیشتر از مقادیر میانگین محاسبه شده باشد.

ب) سرب

میانگین و انحراف استاندارد نرخ انباشت محاسبه شده برای سرب به تفکیک شهرستان در جدول ۳ خلاصه شده است. براساس اطلاعات موجود در این جدول نرخ انباشت سرب

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

جدول ۳ . میانگین (انحراف استاندارد) نرخ انباشت سرب در شهرستان‌های مورد مطالعه

شهرستان	خروجی	ورودی				نرخ
	گیاه[1]	کودهای				انباشت[*]
		احشام[2]	فسفره	کمپوست	لجن فاضلاب	
	$g\ ha^{-1}yr^{-1}$					
مبارکه	۴/۳۰(۱/۳۵)	۱۱/۷۰(۲/۸۱)	۴/۷۱(۲/۳۸)	۰/۰۴ (۰/۰۱)	۰/۱۱ (۰/۰۱)	۱۲/۲۶(۳/۸۸)
فلاورجان	۴/۲۵(۱/۲۸)	۱۹/۷۵(۴/۶۴)	۷/۴۷(۳/۷۸)	۰/۰۴(۰/۰۱)	۰/۰۳ (۰/۰۰)	۲۳/۰۴(۶/۰۸)
نجف‌آباد	۴/۹۸(۱/۴۸)	۲۸/۴۳(۷/۸۶)	۲/۷۱ (۱/۲۵)	۰/۰۶(۰/۰۱)	۱۶/۸۰(۰/۷۸)	۴۳/۰۱(۸/۰۴)
لنجان	۲/۶۶(۱/۵۵)	۳۰/۸۴(۸/۴۷)	۱/۶۸(۰/۸۸)	۰/۰۹(۰/۰۲)	۶/۲۱(۰/۲۹)	۳۶/۱۸(۸/۶۹)
خمینی‌شهر	۲/۷۷(۰/۸۵)	۲۸/۱۵(۶/۲۸)	۱/۸۹(۰/۸۸)	۰/۰۹(۰/۰۱)	۲۸/۰۵(۱/۳۴)	۵۵/۴۱(۶/۵۲)
اصفهان	۵/۸۴(۱/۹۰)	۱۱/۶۶(۲/۵۳)	۱۸/۴۴(۹/۱۹)	۱۸۰/۵۶(۱۴/۶۰)	۶۸/۵۳(۳/۲۵)	۲۷۳/۳۹(۱۸/۰۹)
برخوار	۳/۴۸(۱/۲۳)	۱۶/۲۱(۳/۶۶)	۴/۷۴(۲/۱۹)	۰/۰۲(۱۰/۰)	۱۳/۶(۰/۶۵)	۳۱/۱۵(۴/۴۶)

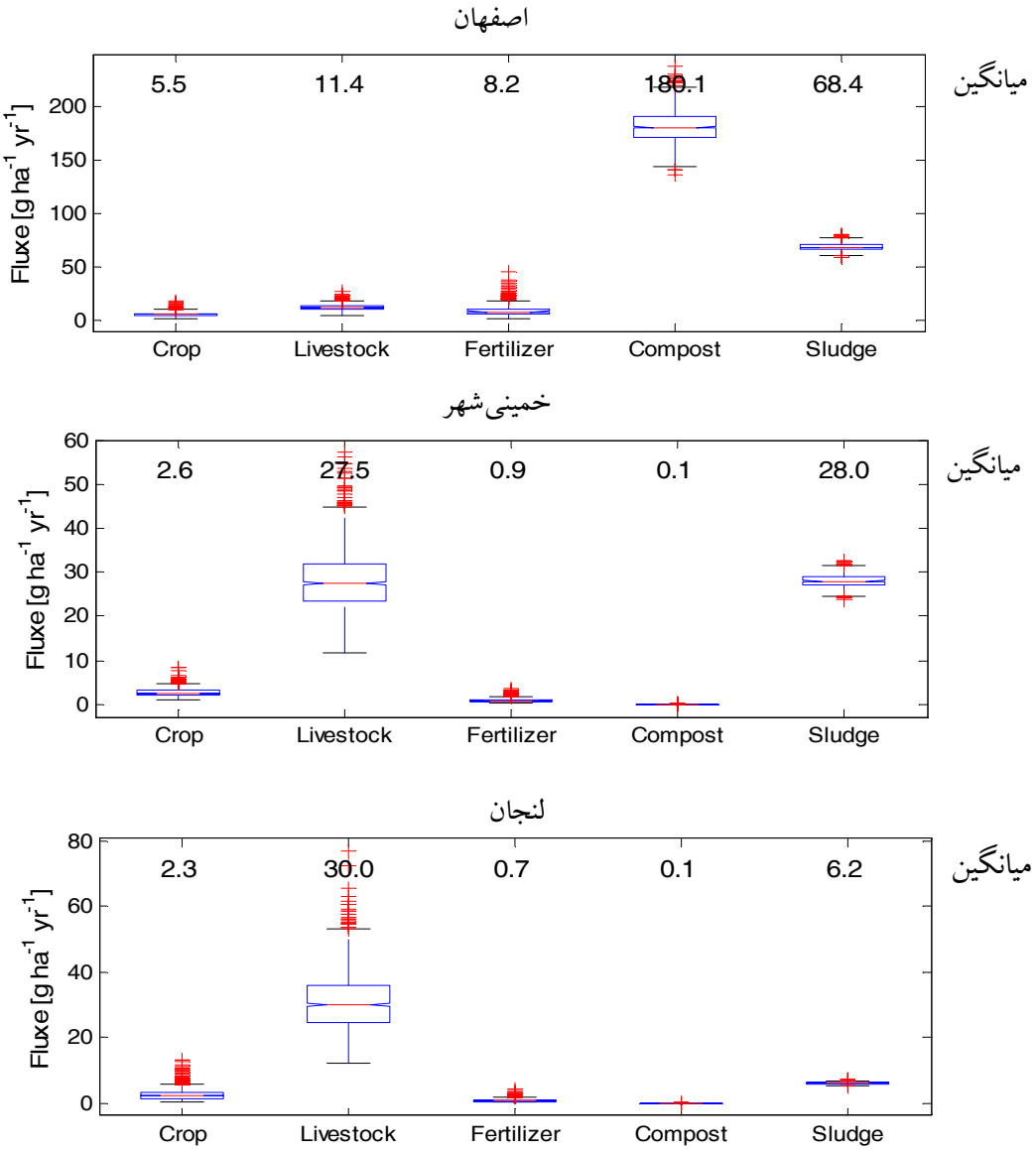
۱ : منظور از گیاه میزان خروج عنصر از طریق برداشت گیاه می باشد. ۲. منظور از احشام ورود عنصر از طریق استفاده از کودهای حیوانی است. * : نرخ انباشت برابر اختلاف میزان ورودی و میزان خروجی است. اعداد داخل پرانتز معرف انحراف استاندارد می‌باشند.

بدون احتساب ریزش‌های جوی در شهرستان‌های مورد مطالعه از حدود ۱۰ تا حدود ۲۷۰ ($g\ ha^{-1}yr^{-1}$) متغیر می‌باشد. در بین شهرستان‌ها، مبارکه دارای کمترین و اصفهان دارای بیشترین نرخ انباشت می‌باشند. انباشت سرب در زمین‌های کشاورزی اصفهان با سایر شهرستانها تفاوت بسیار زیادی دارد. علت این امر ورود مقدار زیادی سرب از طریق کمپوست و لجن فاضلاب می‌باشد. استفاده از کمپوست در اصفهان باعث ورود حدود ۱۸۰ $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ سرب به زمین‌های کشاورزی می‌گردد.

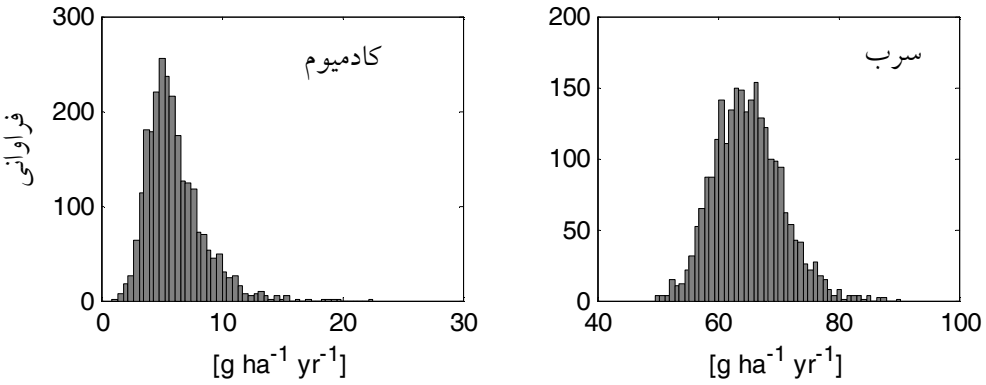
انحراف استاندارد محاسبه شده در مورد نرخ انباشت و یا میزان ورود و یا خروج از سایر مسیرها ناشی از تغییرات زیاد داده‌های مورد استفاده است. ضریب تغییرات نرخ انباشت در شهرستان‌ها بین ۳۰ درصد در نجف‌آباد تا ۶۰ درصد در لنجان متغیر است. علت وجود تغییرات بیشتر در مورد نرخ انباشت سرب در شهرستان لنجان ناشی از ساختار متفاوت داده‌های مورد استفاده بخصوص اطلاعات مربوط به نوع و تعداد احشام است. توزیع فراوانی نرخ انباشت سرب در شهرستان‌های اصفهان و لنجان در شکل ۴ نمایش داده شده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته در منطقه میانگین غلظت سرب در خاک حدود ۲۵ $mg\ kg^{-1}$ است (۲ و ۳). چنانچه فرض شود که نرخ انباشت در طول زمان و برای سال‌های متمادی ثابت خواهد ماند. مقدار بحرانی نرخ انباشت سرب برای خاکی با جرم مخصوص ظاهری ۱۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و تا عمق ۲۰ سانتی‌متری به نحوی که پس از ۲۰۰ سال منجر به افزایش غلظت سرب به میزان ۵۰$mg\ kg^{-1}$ گردد حدود ۳۲۰ $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ است. غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به عنوان غلظت بحرانی برای کشور سوئیس پیشنهاد شده است (۶). میانگین نرخ انباشت محاسبه شده برای شهرستان‌های مختلف از این غلظت بحرانی کمتر می‌باشند. با توجه به این که در محاسبه نرخ

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]



شکل ۳ . توزیع نرخ ورود و خروج سرب از مسیرهای مختلف به شهرستان‌های اصفهان، خمینی‌شهر و لنجان



شکل ۴ . نرخ انباشت سرب و کادمیوم در مقیاس منطقه

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

جدول ۴. سهم ورود سرب از مسیرهای مختلف نسبت به کل سرب ورودی در شهرستان‌های مختلف

	احشام*	کودهای فسفره	کمپوست	لجن فاضلاب
	نسبت ورود از هر مسیر به کل ورود سرب (٪)			
مبارکه	۷۰/۶۵	۲۸/۴۴	۰/۲۴	۰/۶۶
فلاورجان	۷۲/۳۷	۲۷/۳۷	۰/۱۵	۰/۱۱
نجف‌آباد	۵۹/۲۳	۵/۶۵	۰/۱۳	۳۵/۰۰
لنجان	۷۹/۴۲	۴/۳۵	۰/۲۳	۱۵/۹۹
خمینی‌شهر	۴۸/۳۸	۳/۲۵	۰/۱۵	۴۸/۲۱
اصفهان	۴/۱۸	۶/۶۰	۶۴/۶۸	۲۴/۵۴
برخوار	۴۶/۸۱	۱۳/۶۹	۰/۰۶	۳۹/۴۵

* : منظور از احشام ورود عنصر از طریق استفاده از کودهای حیوانی است.

انباشت در این مطالعه ریزش‌های جوی لحاظ نشده و همچنین با در نظر گرفتن این نکته که حدود ۷۰ درصد سرب ورودی به زمین‌های کشاورزی در مقیاس منطقه از طریق ریزش‌های جوی است (۶)، لذا نمی‌توان نتیجه‌گیری نمود که نرخ انباشت واقعی از حد بحرانی کمتر است. علاوه بر این، نرخ انباشت بحرانی فوق برای خاکی با غلظت اولیه سرب بسیار کم صادق است. با توجه به این که غلظت سرب در برخی از نواحی بیشتر از ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌رسد (۲ و ۳) لذا نرخ بحرانی انباشت محاسبه شده (۳۲۰ $g\ ha^{-1}yr^{-1}$) برای منطقه مطالعاتی زیاد می‌باشد.

میانگین نرخ خروج سرب از طریق برداشت گیاه از حدود ۲/۵ $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ برای شهرستان لنجان تا حدود ۶ $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ برای شهرستان اصفهان متغیر می‌باشد. تفاوت در نوع و سطح زیر کشت گیاهان موجب این تغییرات می‌شود. میزان ورود سرب به زمین‌های کشاورزی از طریق استفاده از کودهای حیوانی در شهرستان‌های مختلف بین ۱۰ تا ۳۰ ($g\ ha^{-1}yr^{-1}$) متفاوت است. در این مورد شهرستان لنجان بیشترین میزان ورود از طریق کودهای حیوانی را دارا می‌باشد. این امر می‌تواند ناشی از تراکم بیشتر احشام در این شهرستان نسبت به سایر شهرستان‌ها باشد. در ارتباط با کمپوست و لجن فاضلاب میزان ورود سرب تنها در شهرستان اصفهان قابل ملاحظه است. توزیع نرخ ورود و خروج سرب از مسیرهای مختلف برای شهرستان‌های اصفهان، خمینی‌شهر و لنجان در شکل ۳ نمایش داده شده است.

به منظور تعیین اهمیت نسبی مسیرهای مختلف سهم ورود سرب از مسیرهای مختلف نسبت به کل سرب ورودی محاسبه و به صورت درصد در جدول ۴ ارائه شده است. صرف‌نظر از ریزش‌های جوی مهم‌ترین مسیر ورود سرب به زمین‌های کشاورزی برای اغلب شهرستان‌های مورد مطالعه به غیر از اصفهان استفاده از کودهای حیوانی است. نتایج مشابهی توسط نیکلسون و همکاران (۱۰) برای کشور انگلستان گزارش شده است. در لنجان حدود ۸۰ درصد سرب وارد شده به زمین‌های کشاورزی از طریق کاربرد کودهای حیوانی است. سهم کودهای فسفره در ورود سرب در مقایسه با کادمیوم بسیار کمتر است و از حدود ۳ درصد در خمینی‌شهر تا حدود ۳۰ درصد در شهرستان مبارکه متفاوت می‌باشد.

در شهرستان‌های مورد مطالعه، به‌جز مبارکه و فلاورجان، لجن فاضلاب دومین مسیر مهم ورود سرب به زمین‌های کشاورزی محسوب می‌گردد. ورود سرب از طریق استفاده از کمپوست تنها در اصفهان اهمیت دارد به طوری که مهم‌ترین مسیر ورود سرب به زمین‌های کشاورزی این شهرستان می‌باشد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

مقیاس منطقه

نرخ انباشت کادمیوم و سرب در مقیاس منطقه (کل شهرستان‌های مورد مطالعه) در شکل ۴ نمایش داده شده است. میانگین و انحراف استاندارد نرخ انباشت کادمیوم در مقیاس منطقه به ترتیب برابر ۶/۰۸ و ۲/۳۵ گرم در هکتار در سال می‌باشد. میانگین نرخ انباشت کادمیوم در کل منطقه از نرخ انباشت بحرانی $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۴/۶ (۶) به مراتب بیشتر است. در مورد سرب میانگین نرخ انباشت در مقیاس منطقه $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۶۵ و انحراف استاندارد آن برابر $g\ ha^{-1}yr^{-1}$ ۵/۶ می‌باشد. در مقیاس منطقه‌ای بدون احتساب ریزش‌های جوی کودهای فسفره و کودهای حیوانی به ترتیب حدود ۵۶ و ۳۸ درصد کل کادمیوم وارد شده به زمین‌های کشاورزی را تشکیل می‌دهند. در مورد سرب کودهای حیوانی و لجن فاضلاب مهم‌ترین مسیرهای ورود سرب به زمین‌های کشاورزی هستند. به طوری که مجموعاً بیش از ۷۰ درصد از کل سرب وارد شده مربوط به این دو مسیر است.

نتیجه‌گیری

در بین شهرستان‌های مورد مطالعه، بیشترین نرخ انباشت کادمیوم و سرب در شهرستان اصفهان دیده شد. کودهای فسفره مهم‌ترین مسیر ورود کادمیوم به زمین‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شوند. به طور مثال در شهرستان اصفهان حدود ۸۰ درصد از کل کادمیوم وارد شده به زمین‌های کشاورزی، بدون در نظر گرفتن ریزش‌های جوی، ناشی از مصرف کودهای فسفره است. لجن فاضلاب و کمپوست در مقیاس شهرستان و با فرض یکنواخت بودن استفاده آنها از اهمیت کمتری نسبت به کودهای فسفره در ورود کادمیوم به زمین‌های کشاورزی برخوردارند. لیکن در بخشی از زمین‌ها که لجن فاضلاب و کمپوست دریافت نموده‌اند اهمیت آنها می‌تواند حتی بیشتر از سایر مسیرها باشد. با توجه به توزیع ناهمگن کمپوست و لجن فاضلاب تولید شده در بین شهرستان‌ها، میزان ورود کادمیوم از این طریق در شهرستان اصفهان تفاوت زیادی با سایر شهرستان‌ها دارد. میانگین خروج کادمیوم توسط برداشت گیاه در مقایسه با ورودی‌های کادمیوم کم می‌باشد. ولی با توجه به این که ارتباط بین غلظت عناصر در گیاه و غلظت آن در خاک خطی نیست، با افزایش تدریجی غلظت کادمیوم در خاک جذب کادمیوم و ورود این عنصر به زنجیره غذایی در آینده به شدت افزایش خواهد یافت. صرف‌نظر از ریزش‌های جوی، کودهای حیوانی و لجن فاضلاب مهم‌ترین مسیرهای ورود سرب به زمین‌های کشاورزی اغلب شهرستان‌های مورد بررسی است. در شهرستان اصفهان مهم‌ترین مسیر ورود سرب به زمین‌های کشاورزی استفاده از کمپوست می‌باشد. هرچند نرخ انباشت برای سرب در شهرستان‌های مورد مطالعه کمتر از نرخ انباشت بحرانی است بنابراین با توجه به اهمیت ریزش‌های جوی سرب و همین‌طور غلظت نسبتاً بالای سرب در منطقه مورد مطالعه انتظار آلودگی خاک‌های به سرب در آینده وجود دارد.

منابع مورد استفاده

۱. امینی، م. ۱۳۸۳. مدل‌سازی روند تجمع عناصر سنگین در اکوسیستم‌های زراعی و ارزیابی عدم قطعیت آن در منطقه اصفهان. پایان نامه دکتری خاک‌شناسی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

2. Amini, M., M. Afyuni, H. Khademi, K.C. Abbaspour and R. Schulin. 2005. Mapping risk of cadmium and lead contamination to human health in soils of Central Iran. Sci. of the Total Environ. 374:64-77.
3. Amini, M., M. Afyuni, N. Fathianpour, H. Khademi and H. Fluhler. 2005. Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation. Geoderma 124: 223–233.
4. Chambers, B. J., F. A. Nicholson, D. R. Soloman and R. Urwin. 1998. Heavy metal loadings from animal manures to agricultural land in England and Wales. PP. 475-483. *In:* J. Martinez (Ed.), Proceeding of the FAO Network on

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]

recycling agricultural, municipal and industrial residue in agriculture. FAO, Rome.
5. Fresco, L. O. 1995. Agro-ecological knowledge at different scales. PP. 133-141. *In*: Bouma et al. (Ed.), Eco-regional approaches for sustainable land use and food production. Kluwer Academic Pub., The Netherlands.
6. Keller, A. and R. Schulin. 2003. Modelling regional-scale mass balances of phosphorus, cadmium and zinc fluxes on arable and dairy farms. Europ. J. Agron. 20: 181-198.
7. Keller, A., B. Von Steiger, S. E. A. T. M. Van der Zee and R. Schulin. 2001. A stochastic empirical model for regional heavy-metal balances in agroecosystems. J. Environ. Qual. 30: 1976-1989.
8. Matlab, The language of technical computing. Version 6.5 (R13), USA. The Mathworks Inc.
9. Moolenaar, S. W., S. E. A. T. M. Van der Zee and T. M. Lexmond. 1997. Indicators of the sustainability of heavy metal management in agro-ecosystems. Sci. of the Total Environ. 201: 155-169.
10. Nicholson, F. A., S. R. Smith, B. J. Alloway, C. Carlton-Smith and B. J. Chambers. 2003. An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. Sci. of the Total Environ. 311: 205-219.
11. Tiktak, A., R. Alkemade, H. Van Grinsven and K. Makaske. 1998. Modelling cadmium accumulation on regional scale in the Netherlands. Nutr. Cycl. Agroecosys. 50: 209-222
12. Von Steiger, B. and J. Obrist. 1993. Available databases for regional mass balances in agricultural land. PP. 35-46. *In*: R. Schulin et al. (Eds.), Soil monitoring –early detection and surveying of soil contamination and degradation. Birkhauser Verlag, Basel, Switzerland.
13. Westerman, R. L. 1990. Soil Testing and Plant Analysis. SSSA. No. 3, Madison, Wisconsin, USA.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-23]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.6.2]