

## تأثیر مصرف لجن فاضلاب و کادمیوم بر غلظت کادمیوم در شاهی، کاهو و اسفناج

\* مهران هودجی  
\*\* محمد جواد عابدی  
\*\*\* مجید افیونی  
\*\*\*\* سید فرهاد موسوی

### چکیده

استفاده از لجن فاضلاب به عنوان یک منبع تأمین‌کننده عناصر غذایی ارزان قیمت در اراضی کشاورزی سودمند است. لیکن به دلیل غلظت بالای فلزات سنگین در ترکیب لجن فاضلاب، مصرف مستقیم آن با مشکلاتی به همراه است. تجمع فلزات سنگین به ویژه کادمیوم در خاک و جذب این عناصر به وسیله گیاهان از اهمیت زیادی برخوردار است. اهداف این تحقیق بررسی تأثیر مصرف لجن فاضلاب و کادمیوم بر غلظت کادمیوم در شاهی، کاهو و اسفناج بوده است. در یک آزمایش مزرعه‌ای، طرح آماری کرت‌های خرد شده بر روی یک خاک آهکی اجرا گردید. غلظت‌هایی از کادمیوم معادل صفر، ۴۲/۵ و ۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم به خاک اضافه شد و خاک با لجن فاضلاب تیمار گردید (۵۰ تن در هکتار). پس از گذشت ۵۰ روز از زمان کاشت، گیاهان برداشت شدند و غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه آنها به طور جداگانه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مصرف ۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه گیاهان را به طوری معنی‌دار افزایش می‌دهد، و این افزایش، هم در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب و هم در خاک تیمار نشده مشاهده گردید. غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه هر گیاه تقریباً یکسان بود. همچنین اختلاف معنی‌داری بین غلظت کادمیوم در اندام‌های گیاهان مشاهده نشد. لیکن غلظت

\*\*\* - دانشجوی دوره دکتری خاکشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران (بخشی از پایان‌نامه دکتری).

\*\*\* - استاد گروه آبیاری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.

\*\*\* - دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

\*\*\* - استاد گروه آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

- تاریخ دریافت مقاله: ۸۰/۱۱/۲۱، تاریخ دریافت نسخه نهایی: ۸۱/۱۲/۱۹

عنصر کادمیوم در ریشه شاهی به طور معنی داری بیش از غلظت این عنصر در ریشه کاهو و اسفناج بود. غلظت کادمیوم در گیاهان در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب در سطوح مختلف کادمیوم به طور معنی داری بیش از غلظت کادمیوم در گیاهان در خاک تیمار نشده با لجن فاضلاب بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** لجن فاضلاب، کادمیوم، فاضلاب و کادمیوم، کادمیوم در شاهی، کاهو، اسفناج.

### مقدمه

برای جلوگیری از تجمع لجن فاضلاب تولیدی و کاهش خطر آلودگی محیط زیست استفاده از لجن تولید شده در شبکه‌ها و سیستم‌های فاضلاب شهری در اراضی کشاورزی بسیار متداول شده است. تقریباً یک سوم لجن فاضلاب تولید شده در کشور ایالات متحده آمریکا در اراضی کشاورزی مصرف می‌گردد (۵). لجن فاضلاب دارای مقادیر فراوانی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است و می‌تواند به عنوان یک کود آلی در کشاورزی مصرف گردد. کاربرد لجن فاضلاب سبب افزایش عملکرد محصولات زراعی می‌گردد به طوری که مصرف لجن فاضلاب عملکرد کاهو و اسفناج را به طور معنی داری افزایش داده است (۱). این افزایش بیش از هر عامل دیگری به میزان ازت و فسفر موجود در لجن فاضلاب ارتباط دارد. از طرفی وجود مقدار فراوانی ماده آلی در ترکیب لجن فاضلاب ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی، پایداری خاکدانه‌ها، تهویه و رطوبت خاک را برای رشد بهتر گیاهان بهبود می‌بخشد (۱، ۳ و ۲۴).

جذب فلزات سنگین به وسیله گیاه در اراضی کشاورزی که در آن لجن فاضلاب مصرف شده یکی از روش‌های عمده و غیرمستقیم ورود فلزات سنگین به ویژه کادمیوم به زنجیره غذایی انسان است (۷ و ۱۱). در رابطه با کادمیوم این واقعیت مطرح است که به سهولت به وسیله ریشه گیاهان جذب شده و در غلظت‌هایی که برای گیاهان سمی نیست در محصولات تولیدی تجمع می‌یابد. مصرف این محصولات اثرات زیان‌آوری بر سلامت انسان و دام به همراه دارد (۲ و ۱۱). مطالعات مزرعه‌ای و گلخانه‌ای نشان دهنده افزایش غلظت فلزات سنگین به خصوص عنصر کادمیوم در گیاهان در اثر مصرف مستقیم لجن فاضلاب و ترکیبات این فلزات است (۱۵). وجود کادمیوم در ترکیب لجن فاضلاب به جذب این عنصر در گیاهان کمک می‌نماید. مقدار ورود کادمیوم به خاک‌های کشاورزی عموماً بیش از میزان خروج این عنصر از طریق آبشویی است. کادمیوم در لایه‌های سطحی خاک تیمار شده با لجن فاضلاب تجمع یافته و به وسیله گیاهان جذب می‌شود (۱۰ و ۲۶). عوامل مختلفی بر غلظت کادمیوم در گیاه مؤثراند. از جمله این عوامل می‌توان از غلظت کادمیوم در خاک و لجن فاضلاب، واکنش خاک (pH)، نوع گیاه، شرایط آب و هوایی و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را نام برد (۱۶، ۱۸ و ۲۱).

تحقیقات نشان داده است که چنانچه غلظت کادمیوم خاک افزایش یابد، این افزایش به زنجیره غذایی

منتقل خواهد شد. کادمیوم در خاک ممکن است غیرمتحرک<sup>۱</sup> شده و با گذشت زمان قابلیت استفاده آن برای گیاهان کاهش یابد. گزارشهای متفاوتی در رابطه با تأثیر زمان بر قابلیت استفاده کادمیوم برای گیاهان وجود دارد (۶). نتایج مربوطه به کادمیوم جذب شده به وسیله محصولات در آزمایش‌های دراز مدت مزرعه‌ای در رابطه با کاهش قابلیت استفاده کادمیوم برای گیاهان با گذشت زمان قطعی نیست. در آزمایش‌هایی که بر روی چمن پارک در ناحیه روتام است<sup>۲</sup> کشور انگلستان انجام گرفت، مشخص گردید که مقدار کادمیوم بخش رویشی گیاه در کرت‌های آهک‌دهی نشده که کود فسفره به آنها اضافه شده بود از سال ۱۸۶۶ تا ۱۹۹۲ تقریباً به چهار برابر افزایش یافته است (۲۰).

در یک تحقیق که به وسیله کنی و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۸۰) انجام پذیرفت، گیاه ذرت با دو نوع لجن فاضلاب یکی با غلظت ۲ میلی مول در کیلوگرم کادمیوم و دیگری با غلظت ۱/۶ میلی مول در کیلوگرم کادمیوم تیمار گردید. نتایج نشان داد که میزان کادمیوم جذب شده به وسیله ذرت در لجن فاضلابی که غلظت کادمیوم بالاتری داشته است، بیشتر بوده است (۱۳). علت آن است که لجن فاضلاب با غلظت کادمیوم کمتر، دارای مقادیر بیشتری آهن، آلومینیم و فسفر است. وجود این عناصر از طریق تأثیر بر واکنش‌های رسوب و جذب کادمیوم منجر به جذب کمتر کادمیوم به وسیله گیاه ذرت می‌شود.

لوگان و فلتز<sup>۴</sup> (۱۹۸۴) در یک مطالعه گلخانه‌ای، گیاه چغندر قند را با نوعی لجن غیرهوازی که دارای غلظت کادمیوم بالایی بود تیمار نمودند. نتایج نشان داد میزان کادمیوم جذب شده در چغندر قند در لجن تیمار شده با منوکلسیم فسفات کمتر از سایر تیمارها بود. علت این پدیده احتمالاً فعالیت زیاد فسفر به دلیل وجود کلسیم فسفات و کمتر شدن فعالیت کادمیوم نسبت به سایر تیمارها بوده است.

جینگ و لوگان<sup>۵</sup> (۱۹۹۲) رابطه بین میزان کادمیوم جذب شده به وسیله گیاه با مقدار کادمیوم لجن فاضلاب را در مقادیر ثابت کادمیوم مورد مطالعه قرار دادند. این محققین گزارش نمودند که کادمیوم جذب شده به وسیله گیاه با کادمیوم کل لجن فاضلاب همبستگی مثبت دارد. نتایج این تحقیق این نظریه را که میزان جذب کادمیوم به وسیله گیاهان تا حدودی از طریق خصوصیات شیمیایی کادمیوم لجن فاضلاب، به خصوص غلظت کادمیوم در لجن کنترل می‌شود ثابت نموده و مشخص می‌نماید که در صورت مصرف میزان معینی لجن فاضلاب، لجن تمیز از نظر آلوده نمودن زنجیره غذایی پتانسیل آلاینده‌گی کمتری نسبت به لجن آلوده دارد. اخیراً عقیده بر آن است که فلزات سنگین اضافه شده از طریق مصرف لجن فاضلاب به خصوص کادمیوم، اساساً با مواد آلی لجن در خاک ارتباط دارند (۱۸). معدنی شدن مواد آلی لجن فاضلاب ممکن است فلزات را

1. Immobilize

2. Rothamsted

3. Keeney et al. (1980)

4. Logan &amp; Feltz (1984)

5. Jing &amp; Logan (1992)

به صورت گونه‌های قابل استفاده زیستی<sup>۱</sup> آزاد نماید که این گونه‌ها به وسیله ریشه گیاهان بهتر جذب می‌شوند. بنابراین مدت زمان مصرف لجن فاضلاب اهمیت فراوانی در جذب فلزات سنگین به وسیله گیاه دارد (۱۱).

اسلون و همکاران<sup>۲</sup> (۱۹۹۷) طی یک تحقیق در اراضی کشاورزی که به طور متوالی با لجن فاضلاب تیمار شده بودند، گزارش نمودند که غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی کاهو با مصرف لجن فاضلاب افزایش معنی‌دار داشته است.

همچنین غلظت کادمیوم در کاهو با غلظت این عنصر در خاک همبستگی نشان داده است. نتایج این تحقیق مشخص نمود که حتی ۱۵ سال پس از مصرف لجن فاضلاب، کادمیوم بالاترین میزان دستیابی زیستی را بین فلزات سنگین نشان داده است. همچنین داودی و همکاران<sup>۳</sup> (۱۹۹۴) گزارش نمودند که در طی شش سال پس از مصرف لجن فاضلاب، غلظت کادمیوم در کاه و دانه ذرت کاهش یافته است.

آزمایش‌های انجام شده مزرعه‌ای نشان داده است که لجن فاضلاب می‌تواند در برخی موارد از جذب بیش از حد فلزات سنگین توسط گیاهان زراعی جلوگیری نماید. این اثر به دلیل افزایش مواد آلی خاک در اثر مصرف لجن فاضلاب است (۱۸ و ۱۹). در برخی از خاک‌ها با فر شدن واکنش خاک (pH) در دامنه‌ای نزدیک به خنثی، جذب فلزات سنگین توسط گیاه را کاهش می‌دهد. به هر حال فلزات سنگین ناشی از مصرف لجن فاضلاب ممکن است با گذشت زمان و براساس شرایط بیولوژیکی و شیمیایی خاک مدت‌ها پس از مصرف لجن فاضلاب برای گیاه بیشتر از گذشته قابل جذب گردند (۱۵). مک برآید<sup>۴</sup> (۱۹۹۵) عقیده دارد که با گذشت زمان و تجزیه مواد آلی، قابلیت دستیابی و میزان آبشویی فلزات سنگین حاصل از مصرف لجن فاضلاب افزایش می‌یابد. مطالعات دراز مدت و متوالی نشان داده است که قابلیت دستیابی فلزات سنگین و آبشویی آنها یک یا دو سال بعد از مصرف لجن فاضلاب بیشتر از زمان مصرف لجن فاضلاب است و پس از آن کاهش می‌یابد (۱۸).

افزودن املاح فلزات سنگین به خاک نیز سبب افزایش غلظت این عناصر در گیاه می‌شود. بران و همکاران<sup>۵</sup> (۱۹۹۸) غلظت کادمیوم در گیاه کاهو را در خاک‌های تیمار شده با دو نوع لجن فاضلاب (دارای غلظت‌های کادمیوم برابر ۱۳/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و دیگری ۲۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم) با خاک تیمار شده با کلرور کادمیوم به میزان ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم مقایسه نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که غلظت کادمیوم در کاهو در خاک‌های تیمار شده با دو نوع لجن فاضلاب هیچ‌گونه اختلاف معنی‌داری با یکدیگر

1. Bioavailable Forms

2. Sloan et al. (1997)

3. Dowdy et al (1994)

4. McBride (1995)

5. Brown et al. (1998)

نداشته است لیکن غلظت کادمیوم در کاهو در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب به مراتب کمتر از غلظت کادمیوم در کاهو در خاک تیمار شده با کلرورکادمیوم بوده است. نتایج این تحقیقات مشخص می نماید که پتانسیل گزند مربوط به انتقال کادمیوم از لجن فاضلاب به زنجیره غذایی اصولاً از پتانسیل گزند انتقال این عنصر از طریق املاح کادمیوم کمتر می باشد و کادمیوم لجن فاضلاب نسبت به زمانی که به شکل ترکیب فلزی به خاک اضافه می شود کمتر قابل جذب گیاهان است. هر چه غلظت کادمیوم در لجن فاضلاب افزایش یابد ظرفیت جذب اختصاصی کادمیوم شروع به اشباع شدن نموده و قابلیت جذب کادمیوم لجن فاضلاب به قابلیت جذب ترکیب کادمیوم نزدیک تر می شود (۶).

کیلر و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۰) در یک تحقیق میزان جذب کادمیوم در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب را به وسیله لوبیا، ذرت، چغندر قند، سیب زمینی، کاهو و اسفناج ارزیابی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که در اندام های هوایی و ریشه گیاهان مورد آزمایش در اثر مصرف لجن فاضلاب غلظت کادمیوم نسبت به شاهد افزایش نشان داده، لیکن در هیچ کدام از گیاهان اثرات سمیت و کاهش بیوماس در نتیجه مسمومیت این عنصر مشاهده نشده است. این محققین گزارش نمودند که در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب غلظت کادمیوم در غلاف لوبیا کمتر از غلظت کادمیوم در ساقه گیاه بوده است.

بیدول و همکاران<sup>۲</sup> (۱۹۸۷) نیز گزارش نمودند که مصرف لجن فاضلاب همواره منجر به افزایش تجمع کادمیوم در ساقه و برگ گیاه نسبت به تیمار شاهد بوده است و این وضعیت در طول شش سال پس از مصرف لجن فاضلاب ادامه داشته است.

در ایران تاکنون هیچ گونه استاندارد مدونی برای کاربرد لجن فاضلاب در اراضی کشاورزی وجود ندارد. در استان اصفهان کشاورزان لجن فاضلاب را برای تولید محصولات زراعی طی ۳۰ سال اخیر بطور مستمر مصرف نموده اند. لجن فاضلاب به خصوص برای تولید سبزیجات بسیار مورد مصرف قرار می گیرد. بنابراین برای مردم استان اصفهان، مصرف سبزیجات احتمالاً منبع اصلی ورود فلزات سنگین به زنجیره غذایی است. در رابطه با جذب فلزات سنگین حاصل از کاربرد لجن فاضلاب به وسیله گیاه در خاک های آهکی در ایران اطلاعات منتشر شده کمی وجود دارد. به خصوص مطالعات مزرعه ای بسیار اندک است. هدف از این مطالعه بررسی و مقایسه اثر مصرف لجن فاضلاب و کادمیوم بر غلظت این عنصر در اندام های هوایی و ریشه شاهی<sup>۳</sup>، کاهو<sup>۴</sup> و اسفناج<sup>۵</sup> و مقایسه این سه گیاه از نظر میزان جذب عنصر کادمیوم بوده است.

1. Keller et al. (2000)

2. Bidwell et al. (1987)

3. *Lepidum sativum* L.4. *Lactuca sativa* L.5. *Spinacia oleracea* L.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در ایستگاه تحقیقاتی دانشگاه آزاد اسلامی خوراسگان واقع در استان اصفهان (۴۵' و ۵۱° طول شرقی و ۴۲' و ۳۲° عرض شمالی) در سال زراعی ۱۳۷۹ انجام گرفت. متوسط مقادیر بارندگی و درجه حرارت منطقه به ترتیب ۱۲۰ میلی‌متر و ۱۵/۷ درجه سانتیگراد است. خاک محل آزمایش جزء خاک‌های کرمیک هاپلوتوررتز، فاین، کربناتیک، ترمیک<sup>۱</sup> می‌باشد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در جدول (۱) ارائه شده است.

این تحقیق به روش آماری کرت‌های خرد شده<sup>۲</sup> با شش تیمار و در سه تکرار انجام گرفت. تیمار اصلی برای بررسی اثر مصرف لجن فاضلاب بر غلظت کادمیوم در گیاه دارای دو سطح بود.

سطح اول: بدون مصرف لجن فاضلاب که همان خاک مزرعه است.

سطح دوم: با مصرف لجن فاضلاب به میزان ۵۰ تن در هکتار براساس وزن خشک لجن فاضلاب.

لجن فاضلاب مصرفی فرآورده تصفیه‌خانه فاضلاب شاهین‌شهر اصفهان بود که نتایج تجزیه شیمیایی آن در جدول (۲) ارائه شده است.

برای بررسی اثر مصرف کادمیوم بر غلظت این عنصر در اندام‌های هوایی و ریشه شاهی، کاهو و اسفناج و مقایسه آن با کادمیوم موجود در لجن فاضلاب، از کلرور کادمیوم استفاده گردید. این تیمار دارای سه سطح مصرف کادمیوم به شرح زیر بوده است.

سطح اول: صفر که به عنوان شاهد در نظر گرفته شد.

سطح دوم: مصرف ۴۲/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم براساس وزن خشک لجن فاضلاب.

سطح سوم: مصرف ۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم براساس وزن خشک لجن فاضلاب.

حداکثر غلظت بحرانی کادمیوم مطابق استانداردهای آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا<sup>۳</sup> برابر ۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک لجن فاضلاب است (۹، ۱۲، ۲۲ و ۲۷).

برای اجرای طرح پژوهشی قطعه زمینی به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع آماده و با توجه به تعداد تیمارها در مجموع ۱۸ کرت آزمایشی هر یک به مساحت ۱۶ مترمربع با رعایت فواصل لازم برای عدم تداخل عوامل مورد آزمایش طراحی گردید. لجن فاضلاب به میزان ۵۰ تن در هکتار براساس مساحت هر کرت توزین و به وسیله شن‌کش تا عمق ۲۰ سانتیمتری به طور یکنواخت با خاک لایه سطحی مخلوط گردید. تیمارهای کلرور کادمیوم در غلظت‌های مورد نظر تهیه و به وسیله سم‌پاش دستی به طور یکنواخت به کرت‌های مورد نظر

1. Chromic Haplotorrerts, fine, carbonatic, thermic

2. Spilt Plots

3. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA)

جدول ۱ - برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Cr	Co	Cd	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Pb	CEC meq/100 gr soil	CaCO <sub>3</sub> (%)	O.M (%)	K (mg/kg)	P <sub>ava</sub> (mg/kg)	N <sub>T</sub> (%)	EC (1:2) (dS/m)	pH (1:2)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۲	۱/۷۸	۱/۷۷	۱/۷۲	۰/۵۰	۰/۵۳	۱/۳۷	۱/۸/۵	۴۱/۸	۱/۹۶	۷۸	۲۳	۰/۱۵	۰/۴	۸/۹	۳۷/۲	۲۲/۷	۴۰/۱
رس																			
بافت خاک																			

\* غلظت فلزات قابل استخراج با DTPA بر حسب mg/kg.

جدول ۲ - برخی ویژگی‌های شیمیایی لجن فاضلاب مورد آزمایش

Cr	Co	Cd	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni	Pb	K	P <sub>ava</sub> (mg/kg)	N	CEC meq/ 100-gr	O.M (%)	EC (dS/m)	pH
۳۲/۵	۱۳	۲/۳	۹۰۲۵	۲۱۲/۵	۱۶۲/۵	۹۷۵	۴۳/۸	۱۱۳	۳۵۵۰	۱۲۰۰	۳/۶۲	۶۴/۲	۳۰/۱	۱۰/۸۸	۶/۵۷

\* غلظت کل فلزات بر حسب mg/kg.

اضافه شد. در اوایل شهریورماه اقدام به کشت سه گیاه شاهی، کاهو و اسفناج گردید به این ترتیب که هر کرت به سه بخش مساوی تقسیم و با رعایت فواصل ۴۰ سانتیمتر بین دو بوته و فاصله ۲۵ سانتیمتر بین خطوط کاشت، بذرها در یک از گیاهان در ۴ خط کشت گردید. آبیاری هر تکرار به کمک جوی‌های مجزا صورت گرفت و به منظور جلوگیری از اختلاط آب مصرفی کرت‌ها از سیفون استفاده شد. میزان آب اضافه شده به هر کرت در طی هر نوبت آبیاری برابر ۸ سانتیمتر و تعداد دفعات آبیاری جمعاً ۱۴ نوبت بوده است. مبارزه با علف‌های هرز به صورت مکانیکی انجام گرفت و از مصرف هر گونه علف‌کش در طول دوره رشد گیاهان خودداری شد. پنجاه روز پس از کاشت گیاهان، اندام‌های هوایی و ریشه به صورت جداگانه و از دو خط کاشت میانی برداشت شد و پس از خشک نمودن در درجه حرارت ۷۵ درجه سانتیگراد، به وسیله آسیاب برقی پودر و برای اندازه‌گیری غلظت کادمیوم مورد استفاده قرار گرفت. برای این منظور یک گرم پودر گیاه مورد نظر را در یک بالن ۱۰۰ میلی‌لیتری ریخته سپس ۱۰ میلی‌لیتر اسیدنیتریک ۱:۱ به آن اضافه گردید. بالن بر روی صفحه داغ قرار گرفت و به مدت پانزده دقیقه در ۹۵ درجه سانتیگراد حرارت داده شد. پس از سرد شدن بالن، ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک ۱:۱ به آن اضافه نموده و مجدداً به مدت سی دقیقه در ۶۵ درجه سانتیگراد حرارت داده شد تا حجم محلول حاصل به ۵ میلی‌لیتر تقلیل یابد. سپس ۲ میلی‌لیتر آب مقطر و ۳ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۳۰ درصد به آن اضافه گردید. پس از پایان مراحل هضم، ۵ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک غلیظ به آن اضافه نموده و به مدت پانزده دقیقه بدون جوش حرارت داده شد. با سرد شدن بالن، عصاره حاصل را با کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف نموده و غلظت کادمیوم در عصاره صاف شده به وسیله دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی مدل پرکین المرا<sup>۱</sup> قرائت گردید (۲۵).

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS ویرایش (۱۹۹۷) و مقایسه بین میانگین‌ها از طریق آزمون جدید چند دامنه‌ای دانکن<sup>۲</sup> (DMRT) به انجام رسید.

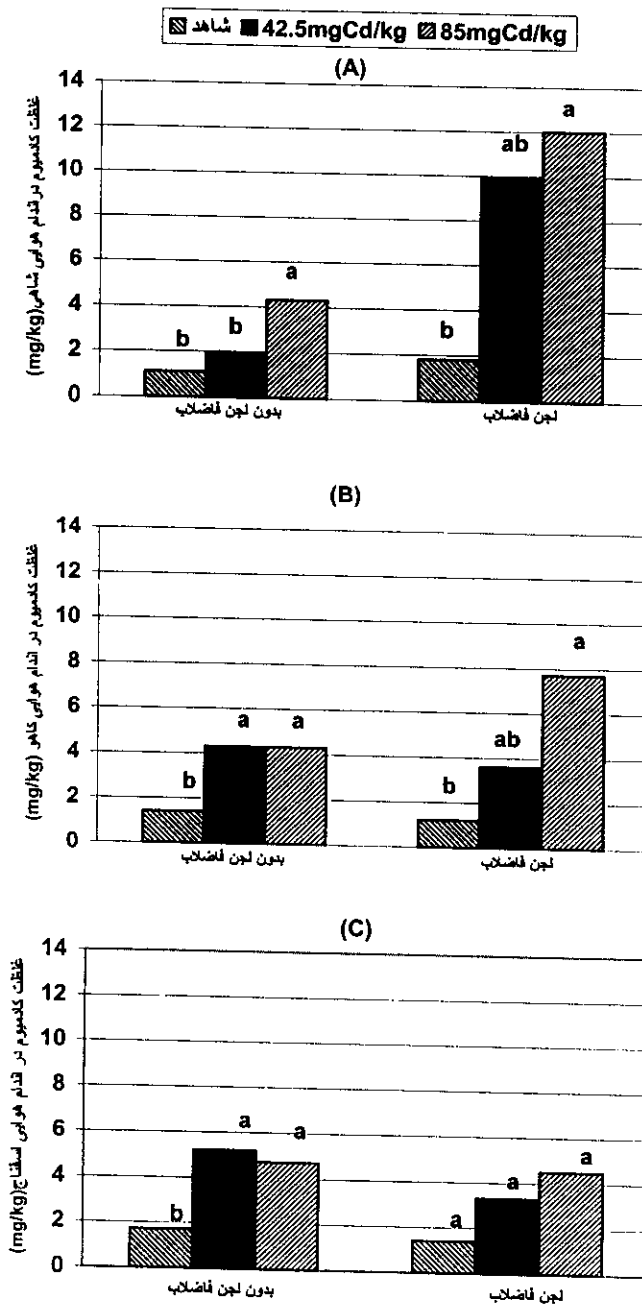
## نتایج و بحث

در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب و بدون آن غلظت عنصر کادمیوم در اندام‌های هوایی شاهی، کاهو و اسفناج با افزایش غلظت کادمیوم در خاک افزایش نشان داد (شکل ۱). در اثر مصرف ۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم در خاک بدون مصرف لجن فاضلاب، غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی شاهی، کاهو و اسفناج نسبت به شاهد به ترتیب ۳/۹، ۳/۱ و ۲/۸ برابر افزایش یافت. در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب و

1. Atomic Absorption Spectrophotometer - Perkin Elmer 3030

2. Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)





شکل ۱: مقایسه میانگین‌های اثر مصرف لجن فاضلاب در هر سطح کادمیوم بر غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی شاهی (A)، کاهو (B) و اسفناج (C)

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر غلظت کادمیوم در گیاهان مورد عمل

میانگین مربعات						درجه آزادی	منبع تغییرات
اسفناج		کاهو		شاهی			
ریشه	اندام‌های هوایی	ریشه	اندام‌های هوایی	ریشه	اندام‌های هوایی		
۰/۰۱	۴/۴۹۳	۰/۴۳۰	۲/۰۶۳	۷۶/۶۱۶	۸/۱۴۳	۲	تکرار
۰/۰۱ <sup>n.s</sup>	۱۱/۵۲۳ <sup>n.s</sup>	۰/۸۱ <sup>n.s</sup>	۱/۵۶۳ <sup>n.s</sup>	۱۰/۳۲۷ <sup>n.s</sup>	۷۱/۸۰۳ <sup>**</sup>	۲	کود
۱/۲۰۵	۵/۸۳۳	۱/۲۲۵	۲/۹۲۸	۱۷/۸	۰/۸۷۳	۴	خطا
۲۳/۷۹ <sup>**</sup>	۴۲/۵۴۳ <sup>**</sup>	۱۸/۳۹ <sup>**</sup>	۴۵/۳۶۳ <sup>**</sup>	۲۵۹/۱۴۶ <sup>*</sup>	۸۱/۴۲۳ <sup>**</sup>	۲	عنصر
۰/۵۵ <sup>n.s</sup>	۳/۰۸۳ <sup>n.s</sup>	۴/۲۹ <sup>*</sup>	۴/۲۱۳ <sup>n.s</sup>	۱۳/۲۲۱ <sup>n.s</sup>	۱۴/۲۵۸ <sup>n.s</sup>	۴	کود×عنصر
۱/۷۱۷	۲/۳۰۱	۰/۸۶۵	۳/۳۶۵	۴۶/۰۹۱	۶/۳۲۲	۱۲	خطا

\*\* : در سطح ۰.۱٪ معنی دار است.

\* : در سطح ۰.۵٪ معنی دار است.

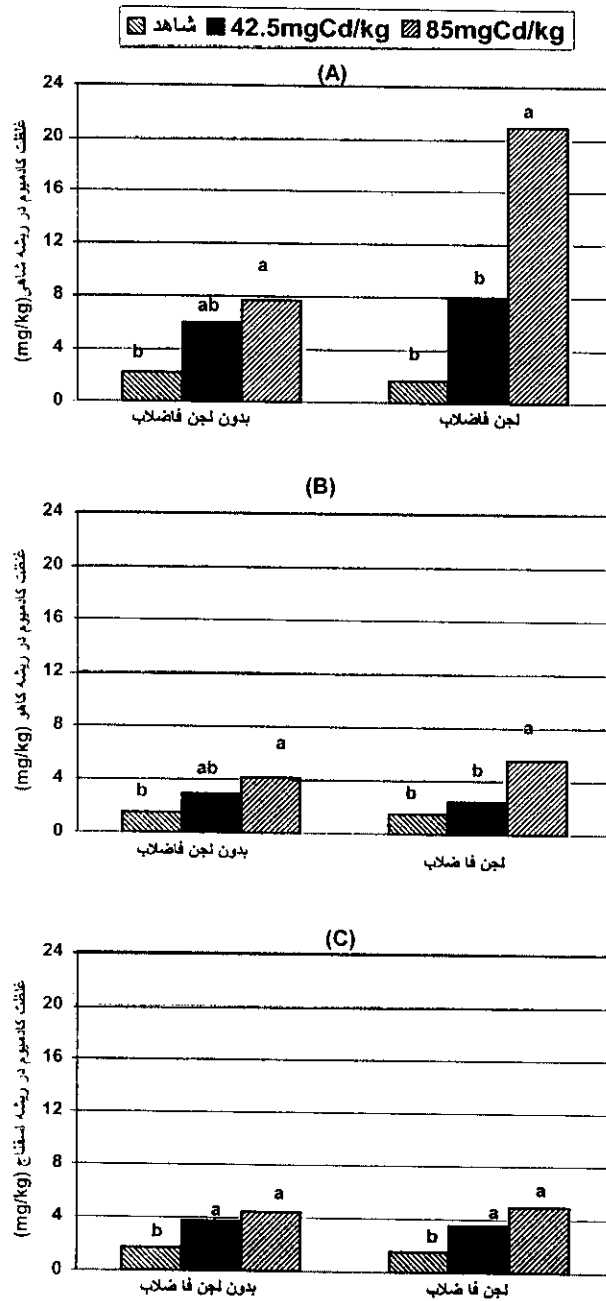
n.s : معنی دار نیست.

با مصرف ۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی شاهی، کاهو و اسفناج نسبت به شاهد به ترتیب ۶/۶، ۴/۶ و ۳/۲ برابر افزایش نشان داد.

در اثر مصرف لجن فاضلاب، میانگین غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی شاهی، نسبت به خاک بدون مصرف لجن فاضلاب افزایش معنی‌داری داشت (جدول ۳) به طوری که میانگین غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی شاهی در نتیجه مصرف لجن فاضلاب ۳/۲ برابر میانگین غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی شاهی در خاک بدون مصرف لجن فاضلاب بوده است.

در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب و بدون مصرف آن غلظت کادمیوم در ریشه شاهی، کاهو و اسفناج با افزایش غلظت نمک کادمیوم در خاک افزایش داشت (شکل ۲). در اثر مصرف ۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم در خاک بدون مصرف لجن فاضلاب، غلظت کادمیوم در ریشه شاهی، کاهو و اسفناج نسبت به شاهد به ترتیب ۳/۵، ۲/۷ و ۲/۶ برابر افزایش یافت. در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب با مصرف ۸۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کادمیوم، غلظت کادمیوم در ریشه شاهی، کاهو و اسفناج نسبت به شاهد به ترتیب ۱۲/۶، ۳/۷ و ۳/۳ برابر افزایش نشان داده است.

مطالعات مزرعه‌ای و گلخانه‌ای نیز افزایش غلظت کادمیوم را در ریشه گیاهان در اثر مصرف لجن فاضلاب و ترکیبات این عنصر نشان داده است (۱۵). جذب کادمیوم در هر سه گیاه مورد عمل در خاک تیمار شده با لجن



شکل ۲: مقایسه میانگین‌های اثر مصرف لجن فاضلاب در هر سطح کادمیوم بر غلظت کادمیوم در ریشه شاه‌ی (A)، کاهو (B) و اسفناج (C)

فاضلاب بیش از خاک تیمار نشده با لجن فاضلاب بود. این افزایش جذب در تیمار لجن فاضلاب احتمالاً به علت وجود کلات‌های آلی کادمیوم در لجن فاضلاب است که باعث افزایش جذب این عنصر به وسیله گیاهان شده است.

بران و همکاران (۱۹۹۸) نیز در یک تحقیق نشان داد که غلظت کادمیوم در کاهو در خاک تیمار شده با کلرور کادمیوم به مراتب بیش از خاک تیمار شده با لجن فاضلاب است. همچنین کنی و همکاران (۱۹۸۰) نشان دادند که با افزایش غلظت عنصر کادمیوم در لجن فاضلاب، جذب کادمیوم در ذرت را افزایش می‌دهد. جینگ و لوگان (۱۹۹۲) رابطه بین میزان کادمیوم جذب شده به وسیله گیاه را با مقدار کادمیوم موجود در لجن فاضلاب مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که غلظت کادمیوم جذب شده به وسیله گیاه با غلظت کادمیوم کل موجود در لجن فاضلاب همبستگی مثبت دارد. اسلون و همکاران (۱۹۹۷) نیز گزارش نمودند که غلظت کادمیوم در اندام هوایی کاهو، با مصرف لجن فاضلاب افزایش معنی‌دار داشته است.

غلظت کادمیوم در ریشه شاهی  $1/4$  برابر غلظت کادمیوم در اندام هوایی شاهی بود و غلظت کادمیوم در اندام هوایی کاهو  $1/2$  برابر غلظت کادمیوم در ریشه کاهو بوده است. همچنین غلظت کادمیوم در اندام هوایی اسفناج  $1/2$  برابر غلظت کادمیوم در ریشه اسفناج است. لیکن بین غلظت کادمیوم در اندام هوایی و ریشه‌های هیچ یک از گیاهان اختلاف معنی‌داری مشاهده نشده است (جدول ۴).

جدول ۴ - مقایسه میانگین‌های غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه هر کدام از گیاهان مورد عمل (آزمون t)

گیاه	سطح احتمال $P >  T $
شاهی	$0/1550^{n.s}$
کاهو	$0/2916^{n.s}$
اسفناج	$0/2041^{n.s}$

n.s: معنی‌دار نیست.

غلظت کادمیوم در اندام هوایی شاهی به ترتیب  $1/3$  و  $1/2$  برابر غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی کاهو و اسفناج بود که این اختلاف معنی‌دار نبوده است (جدول ۵). لیکن غلظت کادمیوم در ریشه شاهی به ترتیب  $2/3$  و  $2/2$  برابر غلظت کادمیوم در ریشه کاهو و اسفناج بوده است که این اختلاف نیز معنی‌دار نبوده است (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه گیاهان مورد عمل

غلظت کادمیوم (mg/kg)			
اسفناج	کاهو	شاهی	بافت گیاه
۴/۰۷ <sup>a</sup>	۳/۷۵ <sup>a</sup>	۴/۷۵ <sup>a</sup>	اندام‌های هوایی
۳/۳۱ <sup>b</sup>	۳/۱۳ <sup>b</sup>	۷/۳۵ <sup>b</sup>	ریشه

در هر ردیف اعداد دارای حروف یکسان تفاوت معنی‌دار ندارند (P=۰/۰۵)

### نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این تحقیق نتایج به صورت زیر خلاصه می‌گردد:  
 با مصرف لجن فاضلاب غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه شاهی، کاهو و اسفناج افزایش یافته است. همچنین مصرف کلرور کادمیوم سبب افزایش غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه شاهی، کاهو و اسفناج گردید که اثر مصرف لجن فاضلاب در افزایش غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه شاهی، کاهو و اسفناج در مقایسه با کلرور کادمیوم (در هر کدام از سطوح کادمیوم) معنی‌دار بوده است. بین غلظت کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه هر یک از گیاهان اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. لیکن غلظت کادمیوم در ریشه شاهی با غلظت کادمیوم در ریشه کاهو و اسفناج اختلاف معنی‌داری داشته است. بنابراین برای مصرف لجن فاضلاب به عنوان یک کود آلی ارزان قیمت، توجه به غلظت کادمیوم در ترکیب لجن فاضلاب، حائز اهمیت است و در صورت کشت سبزیجات در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب که دارای غلظت زیاد کادمیوم می‌باشد، امکان جذب و تجمع کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه سبزیجات و ورود این عنصر به زنجیره غذایی وجود دارد.

### منابع و مآخذ

- ۱- افیونی، م.، ی. رضایی نژاد و ب. خیامباشی. ۱۳۷۷. اثر لجن فاضلاب بر عملکرد و جذب فلزات سنگین به وسیله کاهو و اسفناج. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، جلد دوم، شماره اول، ص ۱۹-۳۰.
- 2- Adriano, D.C. 1986. Trace elements in the terrestrial environment. Springer - Verlag, New York.

- 3- Bauer, A., and A.L. Black. 1992. Organic carbon effect on available water capacity of three soil texture groups. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56: 248-254.
- 4- Bidwell, A.M., and R.H. Dowdy. 1987. Cadmium and zinc availability to corn following termination of sewage sludge applications. *J. Environ. Qual.* Vol. 16, no. 4:438-442.
- 5- Brady, N. 1990. *The nature and properties of soils.* Tenth edition. Mac Millan Publishing Company New York. Collier Mac Millan Publishes London.
- 6- Brown, S.L., R.L. Chaney, J. Scott. Angle, and J.A. Ryan. 1998. The phytoavailability of cadmium to lettuce in long - term biosolids - amended soils. *J. Environ. Qual.* 27: 1071 -1078.
- 7- Chaney, R.L. 1990. Public health and sludge utilization. Part2. *Biocycle* 31: 68-73.
- 8- Dowdy, R.H., C.E. Clapp, D.R. Linden, W.E. Larson, T.R. Halbach, and R.C. Polta. 1994. Twenty years of trace metal partitioning on the Rosemount sewage sludge watershed. pp. 149-155. In: C.E.Clapp et al.(ed.) *Sewage sludge: land utilization and the environment.* ASA, CSSA, and SSSA. Madison. WI.
- 9- Huang, P. M ., and I. K . Iskandar. 2000 . *Soils and ground water pollution and remediation : Asia, Africa, and Oceania.* Lewis Publishers. Boca Raton. London New York Washington, D.C.
- 10- Jensen, A., and F. Bro - Rasmussen. 1992. Environmental cadmium in Europe. *Rev. Environ. Contam, Toxicol.* 125: 101-181.
- 11- Jing, J., T.J. Logan. 1992. Effects of sewage sludge cadmium concentration on chemical extractability and plant uptake. *J. Environ. Qual.* 21: 73-81.
- 12- Kabata - Pendias, A., and H. Pendias. 1994. *Trace elements in soils and plants,* 2nd edition. CRC Press, Boca Raton, FL.
- 13- Keeney, D.R., R.B. Corey, P.A. Helmke, L.L. Hendrickson, R.L. Koreter, M.A. Turner, A.T. Shamma, K.D. Kunz, R. Fujii and P.H. Williams. 1980. Heavy metal bioavailability in sludge - amended soils. R8046140. Waste Recovery Environmental laboratory, USEPA, Cincinnati, OH.
- 14- Keller, C., A. Kayser, A. Keller, and R. Schulin. 2000. Heavy - metal uptake by

- agricultural crops from sewage - sludge treated soils of the upper swiss Rhine valley and the effect of time. pp. 273- 291. In: I.K. Iskandar (ed.) Environmental restoration of metals contaminated soils. lewis publishers.
- 15- Krebs. R., S.K. Gupta, G. Furrer, R. Schulin. 1998. Solubility and plant uptake of metals with and without liming of sludge amended soils. J. Environ. Qual. 27: 18-23.
- 16- Logan, T.J. and R.L. Chaney.1983. Utilization of municipal wastewater and sludge on land - metals .pp .235-326 .In: A . L . Page, T . L . Gleason, III, J.E. Smith, Jr. I . K . Iskandar , and L . E . Sommers (eds.). Proceeding of the 1983 workshop on utilization of municipal wastewater and sludge on land. University of California, Riverside.
- 17- Logan, T.J. and R.E. Feltz. 1984. Plant uptake of cadmium from acid - extracted anaerobically digested sewage sludge. J. Environ. Qual. 14: 495-500.
- 18- McBride, M. B. 1995. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: Are USEPA regulations protective? J. Environ. Qual. 24:5-18.
- 19- McGrath, S.P., A.M. Chaudri, and K.E. Giller. 1995. long - term effects of metals in sewage sludge on soils, microorganisms and plants. J. Indust. Microbiol. 14: 94-104.
- 20- Nicholson, F . A ., K . C . Jones, and A . E . Johnson. 1994. Effect of phosphate fertilizers and atmospheric deposition on long - term changes in the cadmium content of soils and crops. Environ. Sci Technol. 28,pp. 2170-2175.
- 21- Page, A.L., T. Logan, and J. Ryan (eds.). 1987.Land application of sludge. Lewis Publishers, Chelsea, MI.
- 22- Pais, I. J.,Jr.Benton Jones.1997. "The hand book of trace elements." Publishing by: St. Lucie Press Boca Raton Florida.
- 23- Sloan, J.J. ,R.H. Dowdy ,M.S. Dolan, and D.R. Linden. 1997. Long term effects of biosolids applications onheavy metal bioavailability in agricultural soils. J. Environ. Qual. 26: 966-974.
- 24- Smith, S.R. 1992. Sewage sludge and refuse composts as peat alternatives for conditioning improverished soils. J. Hort. Sci. 67: 703-716.

- 25- Soon , Y.K., S.Abboud.1993.Cadmium, chromium,lead and nickel.pp.103-107.In: M . R .Carter(ed.) Soil sampling and methods of analysis . Lewis Publishers.
- 26- Temmerman, L.O., M. Hoenig, and P.O. Scokart. 1984. Determination of "normal" levels and upper limit values of trace elements in soils. Z. Pflanzen. Bodenk, 147: 687-694.
- 27- U.S. Environmental Protection Agency. 1993. Standards for the use or disposal of sewage sludge. Fed. Reg. 58: 9248-9415.