

## تأثیر لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده با گاما بر جذب عناصر غذایی کم مصرف و فلزهای سنگین در ریحان

بهنام عسگری لجایر\*<sup>۱</sup>، نصرت اله نجفی<sup>۱</sup>، ابراهیم مقیسه<sup>۲</sup>، محمد مسافری<sup>۳</sup>، جواد هادیان<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۷/۷/۸ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۷

- ۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
- ۲- پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، ایران
- ۳- مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران
- ۴- پژوهشکده گیاهان و مواد اولیه دارویی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

\*مسئول مکاتبه: Email: h-asgari@tabrizu.ac.ir

### چکیده

برای بررسی تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب پرتوتابی نشده و شده، بر جذب عناصر غذایی کم مصرف (مس، روی، آهن، نیکل و منگنز) و فلزهای سنگین (سرب و کادمیم) در ریشه و شاخساره ریحان، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه اجرا شد. تیمارها شامل کاربرد لجن فاضلاب در سطوح صفر، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم بر کیلوگرم خاک بود که در معرض پرتوتابی گاما با دوزهای صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ کیلوگری قرار گرفته بودند. نتایج نشان داد افزودن ۱۵ و ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم با هر دز پرتوتابی باعث افزایش وزن ریشه و شاخساره خشک و در سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم باعث کاهش آنها گردید. با کاربرد تمام سطوح لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده، جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز و آهن ریشه و شاخساره نسبت به شاهد افزایش یافت. بیشترین مقدار جذب فلزهای مس، روی، آهن، منگنز، سرب، کادمیم و نیکل ریشه و مس، روی، سرب و کادمیم شاخساره از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده با دوز ۲۰ کیلوگری حاصل گردید. بیشترین مقدار جذب آهن، منگنز و نیکل شاخساره نیز از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده به ترتیب با دوز ۵، ۵ و ۱۰ کیلوگری مشاهده شد. نتایج نشان داد که گیاه دارویی ریحان توان بالایی در جذب فلزهای سنگین از خاک و انتقال آنها به شاخساره دارد. لذا، مصرف گیاهان ریحان تیمار شده با لجن فاضلاب به صورت تازه خوری و ادویه‌ای باید با احتیاط انجام شود.

واژه‌های کلیدی: آلاینده، پرتو گاما، جذب، لجن فاضلاب، گیاه دارویی

## Effects of Gamma Irradiated and Non-Irradiated Sewage Sludge on Uptake of Micronutrients and Heavy Metals in Basil

Behnam Asgari Lajayer<sup>1\*</sup>, Nosratollah Najafi<sup>1</sup>, Ebrahim Moghiseh<sup>2</sup>, Mohammad Mosaferi<sup>3</sup>, Javad Hadian<sup>4</sup>

Received: September 30, 2018 Accepted: February 16, 2019

<sup>1</sup>Dept. of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

<sup>2</sup> Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran.

<sup>3</sup> Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran.

<sup>4</sup> Medicinal Plants and Drugs Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

\*Corresponding Author Email: h-asgari@tabrizu.ac.ir

### Abstract

To evaluate the effects of different levels of gamma irradiated and non-irradiated sewage sludge on uptake of micronutrients (copper, zinc, iron, nickel and manganese) and heavy metals (cadmium and lead) in root and shoot of basil, a greenhouse experiment was conducted in a completely randomized design with three replications. The treatments consisted of 0, 15, 30 and 60 g.kg<sup>-1</sup> of sewage sludge exposed to gamma radiation at doses of 0, 5, 10 and 20 kGy. The results showed that addition of 15 and 30 g sewage sludge kg<sup>-1</sup> soil with each irradiation dose increased root and shoot dry weights and reduced their at 60 g.kg<sup>-1</sup>. The application all levels of irradiated and non-irradiated sewage sludge increased the uptake of copper, nickel, lead, zinc, manganese and iron in root and shoot compared to the control. The maximum uptake of copper, zinc, iron, manganese, lead, cadmium and nickel in root and copper, zinc, lead and cadmium in shoot was obtained in 30 g. kg<sup>-1</sup> sewage sludge irradiated with 20 kGy absorbed dose. The maximum uptake of iron, manganese and nickel in shoot was revealed in 30 g.kg<sup>-1</sup> sewage sludge irradiated with 5, 5 and 10 kGy, respectively. The results showed that the basil herb has the high ability to absorb and transfer of metals to shoot. Therefore, the use of basil plants treated with sewage sludge in human nutrition as fresh and spicy should be done with caution.

**Keywords:** Contaminant, Gamma Irradiation, Medicinal Plants, Sewage Sludge, Uptake

شیمیایی، زیستی و حاصلخیزی خاک، بین دو تا سه درصد گزارش شده است (سماوات و همکاران ۲۰۱۱). تمرکز مراکز جمعیتی و صنعتی در نقاط مختلف باعث شکل‌گیری حجم زیادی از فاضلاب شده که تصفیه آن‌ها منجر به تولید لجن زیادی شده است، به طوری که عدم توجه به یافتن بهترین شیوه‌های دفع آن‌ها، دشواری‌های

### مقدمه

در بیش از ۶۰ درصد اراضی زیر کشت ایران، میزان مواد آلی کمتر از یک درصد و در بخش قابل توجهی کمتر از ۰/۵ درصد می‌باشد (نجفی و همکاران ۲۰۱۲). این در حالی است که مقدار بهینه مواد آلی با توجه به نقش آن در بهبود ویژگی‌های فیزیکی،

که پرتو گاما در گندزدایی لجن فاضلاب نسبت به باریکه الکترون استفاده گسترده‌تری داشته باشد (چمیلوسکی ۲۰۰۷). سازوکار کلی پرتوهای یونیزان بر اساس رادیولیز یا یونیزه شدن مولکول‌های آب مواد در معرض پرتوتابی و تشکیل مجموعه‌ای از رادیکال‌های آزاد اکسنده [رادیکال هیدروکسیل ( $\text{OH}\cdot$ ) و پراکسید هیدروژن ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )] و کاهنده [هیدروژن ( $\text{H}\cdot$ ) و الکترون هیدراته  $(e_{aq}^-)$ ] بر اثر جذب انرژی پرتو می‌باشد (وانگ و چو ۲۰۱۶).

در بین محصولات کشاورزی، کشت گیاهان دارویی در خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین یا تیمار شده با کودهای آلی آلوده از قبیل کمپوست، لجن فاضلاب و غیره بر سایر گیاهان دارای زیست‌توده بالا مانند گیاهان خوراکی، گونه‌های درختی و درختچه‌ای ترجیح داده می‌شود. دلایل این ترجیح، اولاً تولید متابولیت‌های ثانویه عاری از فلزها، عدم مشکل وارد شدن این فلزها به زنجیره غذایی در صورت مصرف متابولیت‌های ثانویه و اقتصادی بودن بازار خرید و فروش متابولیت‌های ثانویه و ثانیاً مقاومت بالای این گیاهان به تنش فلزهای سنگین به دلیل دارا بودن متابولیت‌های ثانویه و نقش این متابولیت‌ها در تحمل به تنش ذکر گردیده است (عسگری لجایر و همکاران ۲۰۱۷). در ایران لجن فاضلاب عمدتاً به دلیل ارزانی قیمت این فراورده در کشت گیاهان دارای خام‌خوری به‌ویژه سبزی‌ها استفاده می‌شود (بوستانی و همکاران ۲۰۱۱). ریحان (*Ocimum basilicum* L.) از سبزی‌های برگ‌ی و گیاهی دارویی از خانواده نعناعیان بوده، در چند چین برداشت و استفاده می‌شود (ازکان و همکاران ۲۰۰۵). این گیاه علفی، یک‌ساله، معطر و مهمترین گونه اقتصادی از جنس *Ocimum* بوده که در بیشتر مناطق کشور برای تولید اسانس، مصرف تازه و خشک کشت می‌شود (حمزه‌زاده و همکاران ۲۰۱۱). بررسی منابع نشان داد که

زیست محیطی زیادی را ایجاد کرده است (پارسافر و همکاران ۲۰۱۵). منابع تأمین مواد آلی برای خاک‌های زیر کشت ایران محدود بوده و جوابگوی نیاز روزافزون بخش کشاورزی به کودهای آلی نیست. بنابراین، در سال‌های اخیر کاربرد لجن فاضلاب در خاک‌های کشاورزی به دلایل غنی بودن آن‌ها از مواد آلی و عناصر غذایی مورد توجه قرار گرفته است (نجفی و همکاران ۲۰۱۲؛ عسگری لجایر و همکاران ۲۰۱۶).

روش‌های متداول تصفیه فاضلاب یا تثبیت لجن مانند لجن فعال، هضم هوازی و بی‌هوازی، تثبیت قلیایی، کمپوست کردن، خشک کردن از طریق هوا یا حرارت و غیره، قادر به حذف کامل عوامل بیماری‌زا، مواد شیمیایی آلی پیچیده و دیگر آلاینده‌ها نیست. لیکن به دلیل ناتوانی روش‌های متداول استفاده شده در تثبیت لجن، لجن حاوی انواع باکتری‌ها، ویروس‌ها، پروتوزوآها، انگل‌ها و سایر ریزجانداران بیماری‌زا و یا فلزهای سنگین، آلاینده‌های آلی سمی و غیره بوده و استفاده از این‌ها می‌تواند برای محصولات کشاورزی، انسان و دام خطرناک باشد و می‌بایست قبل از استفاده‌های کشاورزی و یا دفع در محیط زیست گندزدایی شوند (عسگری لجایر و همکاران ۲۰۱۵). در حال حاضر، با توجه به معایب روش‌های متداول گندزدایی لجن فاضلاب از قبیل عدم گندزدایی کامل، رشد مجدد بیماری‌زها و غیره، برای تصفیه و گندزدایی بهتر این مواد، فناوری گندزدایی با پرتوهای یون‌ساز پیشنهاد شده است (واتانیل و تاکاهیسا ۱۹۸۴؛ پاندا و همکاران ۱۹۸۷؛ ال-موتایم ۲۰۰۶). گزارش شده است که از پرتوهای یون‌ساز، پرتوهای گاما و باریکه الکترون<sup>۱</sup> می‌توانند برای اهداف گندزدایی لجن فاضلاب استفاده شوند (ترووسکی و ماتای ۲۰۰۶؛ ال-موتایم ۲۰۰۶). مزایای پرتو گاما نسبت به باریکه الکترون مانند قدرت نفوذ عالی به مواد (حدود ۳۰۰ میلی‌متر)، امکان پرتودهی سطح مقطع ضخیم‌تر از لجن (به صورت فله) باعث شده

ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (باور ۱۹۵۲)، pH و EC در عصاره گل اشباع (بیج و همکاران ۱۹۸۲)، نیتروژن کل خاک به روش هضم کجدال (بریمنر و مولوانی ۱۹۸۲)، فسفر قابل استخراج با بیکربنات سدیم ۰/۵ مولار به روش اولسن (اولسن و همکاران ۱۹۸۲)، پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم نرمال (بیج و همکاران ۱۹۸۲) و مقدار روی، مس، آهن، منگنز و کادمیم قابل جذب به روش DTPA (لیندزی و نورول ۱۹۸۷) تعیین گردید (جدول ۱).

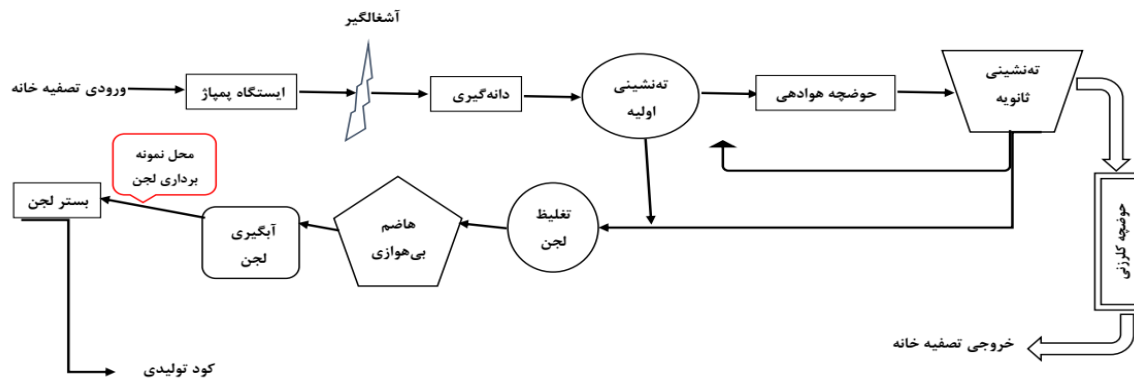
لجن فاضلاب مورد استفاده از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری جنوب تهران، پس از مرحله آبیگری با دستگاه بلت فیلتر پرس، تهیه شد (شکل ۱). با توجه به بررسی منابع، ریزجانداران شاخص بیماری‌زا در لجن فاضلاب در دوزهای پرتوتابی کم حذف می‌شوند (اتزل و همکاران ۱۹۶۹؛ ویکرامایاکا و اسپرول ۱۹۹۰؛ ال بشیر و همکاران ۲۰۰۳). لذا، بررسی روند تغییرات آنها در دوزهای کم امکان‌پذیر بوده و در دوزهای بالا ریزجانداران شاخص برای بررسی روند تغییرات وجود نخواهد داشت. همچنین، بررسی تغییرات ویژگی‌های شیمیایی در دوزهای بالا مقدور بوده و مشاهده روند تغییرات آنها نیازمند اعمال دوزهای بالا می‌باشد (چایچیان و همکاران ۱۹۹۸؛ باسفر و رحیم ۲۰۰۲؛ طاهری و همکاران ۲۰۱۰؛ پروین و همکاران ۲۰۱۵). با توجه به مطالب مذکور، تیمارهای مربوط به اعمال دوزهای مختلف بر اساس مقادیر توصیه شده سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (ویکرامایاکا و اسپرول ۱۹۹۰) و با در نظر گرفتن مشاهده روند تغییرات ویژگی‌های زیستی و شیمیایی لجن پس از پرتوتابی گاما بود. لذا، لجن با دوزهای یک دوم مقدار توصیه شده، مقدار توصیه شده و دو برابر مقدار توصیه شده سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (به ترتیب ۵، ۱۰ و ۲۰ کیلوگری) پرتوتابی شد. پرتوتابی با دستگاه گاماسل با فعالیت ویژه ۸۶۷۷ کوری و با آهنگ دوز ۱۲۴ گری بر دقیقه، کالیبره شده با دوزیتر فریک در پژوهشکده

اگرچه مطالعاتی در مورد تأثیر لجن فاضلاب پرتوتابی شده بر ویژگی‌های رشد و جذب عناصر غذایی توسط غلات، لگوم‌ها و سایر گیاهان انجام شده است (راتد و همکاران ۲۰۰۹، ۲۰۱۱؛ لیمام و همکاران ۲۰۱۸)، اما چنین مطالعه‌ای در داخل کشور در مورد تأثیر لجن پرتوتابی شده بر رشد گیاهان و جذب عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین توسط آنها انجام نشده است. لذا، با توجه به افزایش سطح زیر کشت گیاهان دارویی در راستای تأمین نیاز روزافزون دنیا از یک طرف و عدم مستندات علمی کافی در زمینه تأثیر لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بر جذب عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین در گیاه دارویی ریحان از طرف دیگر، این پژوهش در شرایط گلخانه‌ای بر روی گیاه دارویی ریحان اجرا گردید.

#### مواد و روش‌ها

برای بررسی اثر سطوح مختلف لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بر جذب عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین در ریشه و شاخساره ریحان، آزمایشی به صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و ۱۳ تیمار جمعاً ۳۹ گلدان در پاییز و زمستان ۱۳۹۵ در خاکی با بافت لوم رسی شنی در پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای انجام شد. برای کشت از گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۱۵/۵ و ارتفاع ۱۸ سانتی‌متر و گنجایش ۴ کیلوگرم خاک استفاده گردید. خاک مورد نظر برای کشت گلخانه‌ای از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه تحقیقاتی پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای واقع در روستای رمنده، ساوجبلاغ با طول جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی و ۵۰ درجه و ۴۴ دقیقه شرقی برداشته شد. پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، بعضی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری (بویوکوس ۱۹۶۲)، درصد کربن آلی به روش اکسایش تر (والکی بلک ۱۹۳۴)، رطوبت اشباع خاک، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراژ کردن با سود (گوپتا ۲۰۰۰)،

کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران واقع در تهران انجام شد.



شکل ۱- تصویر محل نمونه‌برداری لجن از تصفیه‌خانه فاضلاب جنوب شهر تهران

صورت جداگانه افزوده شده و خوب مخلوط گردید. پس از اعمال تیمارهای لجن فاضلاب، خاک گلدان برای مدت دو هفته برای رسیدن به تعادل نسبی، در رطوبت نزدیک به ظرفیت مزرعه‌ای (از طریق توزین روزانه) نگهداری شدند. در طول دو هفته، برهم زدن خاک هر گلدان پیوسته انجام گردید تا فرآیند تعادل لجن با خاک بهتر انجام شود. انتخاب سطوح لجن فاضلاب بر اساس نتایج محمودی و همکاران (۱۳۹۴) انجام شد. بذره‌ای ریحان پس از تهیه از شرکت پاکان بذر اصفهان، در داخل سینی نشاء کشت شد و در مرحله سه برگی، تعداد ۴ گیاهچه یکنواخت به هر گلدان منتقل شد. تا پایان آزمایش، آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر پس از رسیدن به ۷۰ تا ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای به‌روش توزین روزانه و افزودن آب انجام شد. گلدان‌ها هر هفته به‌طور تصادفی بر روی میز گلخانه جابه‌جا شدند. در مرحله گل‌دهی کامل (۱۲ هفته پس از کاشت)، گیاهان از محل طوقه قطع و شاخساره برداشت شد. سپس ریشه‌ها به‌دقت از خاک خارج گردید. برای جلوگیری از هدررفت ریشه‌های موئین، شستشوی ریشه‌ها روی الک انجام شد. نصف گیاهان در هر گلدان برای اسانس‌گیری جدا و برای حفظ کمیت و کیفیت اسانس، در سایه و دمای محیط خشک شدند. نصف دیگر

بعد از پرتوتابی، نمونه‌های آزمایش زیستی لجن در ظروف شیشه‌ای درسمباده‌ای استریل و در شرایط درجه حرارت کمتر از ۴ درجه سلسیوس به آزمایشگاه انتقال داده شدند. شمارش کلیفرم کل و گرماپای در لجن فاضلاب به روش تخمیر چند لوله‌ای مطابق با روش ۱۶۸۰ سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا انجام گردید (سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا ۲۰۱۰). همچنین، باقی نمونه‌های لجن فاضلاب، پس از هوا خشک شدن، کوبیدن، عبور یافتن از الک ۲ میلی‌متری، برای انجام تجزیه‌های شیمیایی و استفاده از آنها در کشت گلخانه‌ای در ظروف پلی‌اتیلنی نگهداری شدند. تعیین برخی ویژگی‌های شیمیایی لجن فاضلاب مانند pH و EC و نیتروژن کل بر اساس روش پیترز (۲۰۰۳) انجام شد.

برای کشت گلخانه‌ای، خاک تهیه شده ابتدا از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شد. در این آزمایش از گلدان‌های پلاستیکی ۴ کیلوگرمی از جنس پلی‌اتیلن استفاده گردید. لجن فاضلاب پرتوتابی شده با دوزهای ۵، ۱۰ و ۲۰ کیلوگرمی و پرتوتابی نشده، به میزان صفر، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم بر کیلوگرم (معادل حدود ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ تن در هکتار) قبل از کشت به خاک هرگلدان به

فیلم فتومتر مدل ۴۱۰ ساخت شرکت Corning انگلستان تعیین گردید. بررسی غلظت عناصر به دلیل به وجود آمدن اثر رقت، گاهی متناقض به نظر می‌رسد؛ لذا، جذب عناصر بر حسب میکروگرم در بوته از حاصل ضرب ماده خشک ریشه یا شاخساره (گرم در بوته) و غلظت عنصر (میکروگرم در گرم) تعیین شد. تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

## نتایج و بحث

### ویژگی‌های خاک و لجن فاضلاب

خاک مورد استفاده در این پژوهش، از نظر بافت متوسط (لوم رسی شنی)، دارای طبقه‌بندی خاک Typic Haploxerepts، فاقد مشکل شوری یا قلیائیت با مواد آلی کم بود (جدول ۱). برخی ویژگی‌های شیمیایی و زیستی لجن فاضلاب مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج حاصل از شمارش باکتری‌های کلیفرم کل و گرمپای و مقایسه آن با استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا نشان می‌دهد که فقط در دوز ۲۰ کیلوگرمی پرتو گاما، لجن فاضلاب حائز شرایط کلاس A از نظر ویژگی‌های زیستی گردید ولی در بقیه موارد، مقادیر موجود در کلاس B طبقه‌بندی سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا بوده است. چون مقادیر آنها بیشتر از ۱۰۰۰ و کمتر از ۲ میلیون MPN بر گرم وزن خشک جامدات کل لجن بود. کاهش عوامل بیماری‌زای شاخص مانند کلیفرم کل و گرمپای به‌عنوان شاخص عوامل بیماری‌زای باکتریایی در لجن پس از پرتوتابی گاما در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش گردیده است (ال-موتایم ۲۰۰۶؛ لیمام و همکاران ۲۰۱۸). لجن فاضلاب مورد استفاده دارای  $\text{pH}=6/9$  بوده و با افزایش دوز پرتوتابی،  $\text{pH}$  آن کمتر شد. این کاهش  $\text{pH}$  می‌تواند فراهمی فلزها را افزایش دهد.  $\text{pH}$  اسیدی برای لجن در پژوهش‌های کاظم‌علیلو و همکاران (۲۰۱۸) و کاهش آن با افزایش دوز پرتوتابی به‌وسیله گو و همکاران (۲۰۰۸) و پروین و

شاخساره نیز پس از ثبت وزن تر با آب مقطر شستشو داده شد و همراه ریشه‌ها هوا خشک گردید. نمونه‌ها پس از قرار گرفتن در پاکت کاغذی، به مدت ۷۲ ساعت در آون تهویه‌دار در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند تا وزن آنها به مقدار ثابتی برسد. نمونه‌ها پس از توزین، با استفاده از آسیاب دارای تیغه استیل پودر شده، از الک ۰/۵ میلی‌متری عبور داده شده و در ظروف پلی‌اتیلنی برای تجزیه‌های شیمیایی نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری غلظت فسفر، پتاسیم، سدیم، کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز، روی، مس، نیکل، سرب و کادمیم در لجن فاضلاب و نمونه‌های گیاهی، هضم آنها با روش خشک‌سوزانی انجام شد. برای این کار، ۲/۵ گرم از نمونه‌های لجن فاضلاب و شاخساره گیاه ریحان و ۱ گرم از نمونه‌های ریشه گیاه ریحان با ترازوی ( $\pm 0/001 \text{ g}$ ) توزین و در بوته‌های چینی ریخته شد. بوته‌ها در کوره الکتریکی قرار داده شدند و دمای کوره در مدت پنج ساعت به تدریج به ۴۹۰ درجه سلسیوس رسانده شد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در این دما نگهداری شدند تا کاملاً خاکستر شده و به رنگ سفید درآیند. پس از خارج کردن نمونه‌ها از کوره، ۱۰ میلی‌لیتر از محلول اسید کلریدریک و اسید نیتریک (۳۰۰ میلی‌لیتر  $\text{HCl}$  غلیظ و ۱۰۰ میلی‌لیتر  $\text{HNO}_3$  غلیظ که مجموعاً با آب مقطر به حجم یک لیتر رسانده شد) به آن اضافه شد و در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده شد و از خشک شدن آن جلوگیری شد. پس از سرد شدن، محتویات بوته چینی با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۲ به داخل بالن ۲۵ میلی‌لیتری صاف و با آب مقطر به حجم رسانده شد (وسترمن ۱۹۹۰). در عصاره‌های تهیه شده خاک، لجن و گیاه، غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل AA-6300 ساخت شرکت Shimadzu ژاپن، غلظت فسفر به روش وانادومولیبدو فسفریک اسید با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل SU6100 ساخت شرکت Philler Scientific آمریکا و سدیم و پتاسیم با دستگاه

سطوح) تغییر معناداری نکرد اما غلظت مس با افزایش دوز پرتوتابی نسبت به لجن پرتوتابی نشده به‌طور معناداری کاهش یافت، که نشان دهنده پتانسیل آلودگی کم لجن پرتوتابی شده در مقایسه با پرتوتابی نشده و جنبه مثبت لجن فاضلاب پرتوتابی شده در استفاده از آن در کشاورزی می‌باشد.

همکاران (۲۰۱۵) نیز گزارش شده است. مقادیر نیکل، مس، روی، سرب و کادمیم لجن فاضلاب از حدود مجاز اعلام شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا کمتر و از نظر مصرف در خاک‌های کشاورزی مناسب بود (سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا ۱۹۹۳). غلظت عناصر غذایی نیکل، روی، سرب، کادمیم، آهن و منگنز لجن فاضلاب پس از پرتوتابی گاما (در تمام

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در کشت گلخانه‌ای

| مقدار | ویژگی خاک                              | مقدار | ویژگی خاک   |
|-------|--|-------|---|
| ۳۵۰   | نیتروژن کل (mg.kg <sup>-1</sup> )      | ۲۸/۳  | رس (%)  |
| ۳/۴   | فسفر قابل جذب (mg.kg <sup>-1</sup> )   | ۱۸/۰  | سیلت (%)  |
| ۲۶۱   | پتاسیم قابل جذب (mg.kg <sup>-1</sup> ) | ۵۳/۷  | شن (%)  |
| ۱۲/۳  | آهن قابل جذب (mg.kg <sup>-1</sup> )    | ۷/۲   | pH  |
| ۲/۸   | منگنز قابل جذب (mg.kg <sup>-1</sup> )  | ۰/۹۸  | قابلیت هدایت الکتریکی (dS. m <sup>-1</sup> )                |
| ۰/۸   | مس قابل جذب (mg.kg <sup>-1</sup> )     | ۶/۵۳  | کربنات کلسیم (%)  |
| ۰/۴   | روی قابل جذب (mg.kg <sup>-1</sup> )    | ۰/۳۷  | کربن آلی (%)  |
| ۰/۲۲  | کادمیم قابل جذب (mg.kg <sup>-1</sup> ) | ۱۸/۱  | رطوبت وزنی ظرفیت مزرع‌ای (%)                                |
|       |  | ۱۱/۷  | ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol <sub>c</sub> . kg <sup>-1</sup> ) |

جدول ۲- اثر پرتوتابی بر ویژگی‌های زیستی و شیمیایی لجن فاضلاب

| حداکثر غلظت مجاز*       | دوز جذبی (کیلوگری)                         |  |  |  | ویژگی لجن                               |
|-------------------------|--|--|--|--|---|
|                         | ۲۰   | ۱۰   | ۵  | صفر  |   |
|                         | ۸/۸×۱۰ <sup>۲</sup> ±۱/۳×۱۰ <sup>۱</sup> d | ۵/۲×۱۰ <sup>۲</sup> ±۲/۳×۱۰ <sup>۲</sup> c | ۲/۱×۱۰ <sup>۴</sup> ±۶/۹×۱۰ <sup>۲</sup> b | ۲/۴×۱۰ <sup>۶</sup> ±۳/۵×۱۰ <sup>۴</sup> a | کلیفرم کل (MPN g <sup>-1</sup> dw)      |
| ≥۱/۰×۱۰ <sup>۲</sup> †  | ۵/۳×۱۰ <sup>۲</sup> ±۵/۱×۱۰ <sup>۱</sup> d | ۲/۰×۱۰ <sup>۲</sup> ±۱/۰×۱۰ <sup>۲</sup> c | ۶/۹×۱۰ <sup>۲</sup> ±۲/۰×۱۰ <sup>۲</sup> b | ۱/۹×۱۰ <sup>۰</sup> ±۳/۰×۱۰ <sup>۴</sup> a | کلیفرم گرماپای (MPN g <sup>-1</sup> dw) |
| ≥۲/۰×۱۰ <sup>۶</sup> †† |  |  |  |  | نیکل (mg kg <sup>-1</sup> )             |
| ۴۲۰                     | ۳۴/۸±۱/۶a                                  | ۳۵±۱/۱a                                    | ۳۶/۳±۰/۲a                                  | ۳۶/۸±۰/۷۵a                                 | روی (mg kg <sup>-1</sup> )              |
| ۷۵۰۰                    | ۱۴۷۲±۱۳/۱a                                 | ۱۴۸۳±۴/۴a                                  | ۱۴۹۱±۷/۹a                                  | ۱۴۹۵±۳/۸a                                  | مس (mg kg <sup>-1</sup> )               |
| ۴۳۰۰                    | ۱۵۴/۷±۲/۷c                                 | ۱۵۷/۳±۱/۹۵bc                               | ۱۶۱/۸±۱/۱ab                                | ۱۶۴/۲±۱a                                   | سرب (mg kg <sup>-1</sup> )              |
| ۸۴۰                     | ۱۰۸/۹±۶/۳a                                 | ۱۱۱/۳±۳/۳a                                 | ۱۱۵/۴±۱/۸a                                 | ۱۱۷/۳±۱/۳a                                 | کادمیم (mg kg <sup>-1</sup> )           |
| ۸۵                      | ۲/۶۲±۰/۱۲a                                 | ۲/۶۸±۰/۱۳a                                 | ۲/۷۶±۰/۱۱a                                 | ۳/۰۳±۰/۱۸a                                 | آهن (mg kg <sup>-1</sup> )              |
|                         | ۵۵۸۳±۵۸/۳a                                 | ۵۶۸۳±۷۴/۱a                                 | ۵۷۲۵±۲۸/۹a                                 | ۵۷۵۰±۱۴/۴a                                 | منگنز (mg kg <sup>-1</sup> )            |
|                         | ۱۴۵۵/۸±۲/۲a                                | ۱۴۵/۲±۲/۸۵a                                | ۱۴۹/۱۶±۰/۱۶a                               | ۱۴۹±۲/۱a                                   | pH (۵:۱)                                |
|                         | ۶/۶۶±۰/۱۲b                                 | ۶/۶۸±۰/۰۸ab                                | ۶/۷۵±۰/۰۶ab                                | ۶/۹۱±۰/۰۲a                                 | EC (۵:۱) (dS.m <sup>-1</sup> )          |
|                         | ۲/۶۲±۰/۱۲b                                 | ۲/۷±۰/۰۸ab                                 | ۲/۷۵±۰/۱۲ab                                | ۲/۹۷±۰/۰۴a                                 |   |

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک در هر سطر در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند

\* حدود مجاز آلاینده در جامدات زیستی برای کاربرد در زمین (USEPA, 1993)

† و †† به ترتیب بدون محدودیت استفاده از لحاظ بیماری‌زها (کلاس A) و محدودیت در برخی موارد (کلاس B)

عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن و فسفر نسبت دادند. در همین راستا چو و همکاران (۲۰۱۷) طی پژوهشی به این نتیجه رسیدند کاربرد لجن فاضلاب سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند مواد آلی، تخلخل، غلظت کل و قابل‌جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم، مس و روی شده و باعث بهبود رشد رویشی گیاه *Mangifera persiciforma* شد. سینگ و آگراوال (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای با هدف ارزیابی اثر کاربرد لجن فاضلاب بر رشد، پاسخ‌های عملکرد، کیفیت تغذیه‌ای در لوبیا، مشاهده کردند که کاربرد مقادیر مختلف لجن فاضلاب، منجر به کاهش pH و افزایش EC خاک شد. کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل‌جذب و غلظت آهن کل خاک در تمام تیمارهای دارای لجن فاضلاب افزایش یافت. کاسادو-ولا و همکاران (۲۰۰۷) در بررسی تأثیر کاربرد سه مقدار مختلف کمپوست لجن فاضلاب (۳، ۶ و ۹ کیلوگرم کمپوست بر مترمربع) همزمان در دو شرایط گلخانه‌ای و مزرعه‌ای بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک آهکی زیر کشت گیاه لفل (*Capsicum annuum* var. *annuum*)، بیان کردند که کاربرد کمپوست لجن فاضلاب، EC و ماده آلی خاک را افزایش و pH آن را کاهش داد. سطوح نیتروژن کل و نترات، یک روند افزایشی متناسب با مقادیر کمپوست، نشان دادند. سینگ و آگراوال (۲۰۰۷) برای مطالعه اثر اصلاح‌گر لجن فاضلاب بر گیاه چغندر (*Beta vulgaris* L.)، یک آزمایش گلدانی با مصرف لجن فاضلاب در مقادیر ۲۰ و ۴۰ درصد (w/w) در خاک انجام دادند. نتایج نشان داد که pH خاک کاهش یافت در حالی که قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل‌جذب، سدیم، پتاسیم و کلسیم تبدلی در خاک اصلاح شده با لجن فاضلاب در مقایسه با خاک شاهد، افزایش یافتند. همچنین، کاربرد ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب با هر دوز پرتوتابی، بر وزن ریشه و شاخساره خشک نسبت به شاهد اثر بازدارنده داشت. کاهش وزن ریشه و شاخساره خشک

گزارش جامعی در مورد اثر پرتوتابی بر روند تغییرات غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین وجود ندارد، ولی به هر حال گزارش‌های ضد و نقیضی در مورد تغییر برخی از آنها در دوزهای پرتوتابی استفاده شده برای گندزدایی لجن وجود دارد. پیریدارشین و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که غلظت فلز سنگین سرب پس از پرتوتابی گاما به‌طور معنادار کاهش یافت. راتد و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی دیگر، با بررسی اثر پرتو گاما با دوز ۳ تا ۴ کیلوگری بر غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین گزارش نمودند که مس، روی، منگنز و سرب در لجن پرتوتابی شده بسیار بیشتر از لجن پرتوتابی نشده بود. آنان دلیل آن را افزایش شکل‌های قابل‌جذب فلزها بر اثر تخریب کمپلکس‌های آلی محلول تحت تأثیر پرتو گاما دانستند.

### وزن ریشه و شاخساره خشک

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمارها بر وزن ریشه و شاخساره خشک در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جداول ۳ و ۴). مقایسه میانگین‌های وزن ریشه و شاخساره خشک برای اثر تیمارها در شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزودن ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب با هر دوز پرتوتابی باعث افزایش وزن ریشه و شاخساره خشک گردیده است، هرچند که این افزایش در برخی تیمارها نسبت به شاهد معنادار نبوده است. افزایش وزن ریشه و شاخساره خشک با کاربرد لجن فاضلاب می‌تواند به علت آزادسازی عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف در طول دوره رشد گیاه و بهبود وضعیت تغذیه معدنی باشد. در واقع لجن فاضلاب به‌عنوان یک کود آلی کندرها عمل کرده و به تدریج تجزیه شده و عناصر غذایی را به گیاه عرضه می‌کند (محمودی و همکاران ۲۰۱۵). محمد و همکاران (۲۰۱۸) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند و علت افزایش ماده خشک گیاه آفتابگردان را فراهمی



دوز ۵ کیلوگرمی اشعه گاما به دلیل غیرفعال سازی ریزجانداران بیماری زای خطرناک و بازدارنده های رشد، عملکرد گیاه گندم را به طور میانگین ۷ تا ۲۰ درصد نسبت به لجن پرتوتابی نشده افزایش داد. پاندا و همکاران (۱۹۸۸) اثر لجن فاضلاب شهری مرطوب پرتوتابی شده با دوز ۵ کیلوگرمی اشعه گاما را بر رشد و عملکرد گیاه برنج در یک آزمایش گلدانی بررسی و گزارش کردند که وزن شاخساره خشک گیاه برنج با کاربرد لجن پرتوتابی شده نسبت به پرتوتابی نشده، به طور معناداری افزایش یافت. مگناواکا (۲۰۰۲) نیز گزارش نمودند که در گیاه نیشکر لجن فاضلاب پرتوتابی شده در مقداری معادل با نیتروژن توصیه شده، باعث افزایش عملکرد گیاه شد، در حالی که لجن پرتوتابی نشده هیچ اثری نداشت. آنان دلیل آن را به تأثیر پرتوتابی بر مقدار نیتروژن لجن نسبت دادند. به طور کلی، کاربرد ۷ تن بر هکتار لجن پرتوتابی نشده اثری مشابه ۳/۵ تن بر هکتار لجن پرتوتابی شده داشت.

همچنین، عدم معنادار شدن تغییرات وزن ریشه و شاخساره خشک در هر سطح لجن فاضلاب می تواند به دلیل عدم تغییرات ویژگی های شیمیایی لجن تحت دوزهای پرتوتابی باشد (جدول ۲). بنابراین، این نتایج می تواند با یافته های راتد و همکاران (۲۰۰۹ و ۲۰۱۱) همخوانی داشته باشد. راتد و همکاران (۲۰۰۹) لجن فاضلاب به صورت مایع و پرتوتابی شده با دز ۳-۴ کیلوگرمی و نشده پس از تهیه از مرکز پرتوتابی لجن فاضلاب گایسبلاچ هند، در مزرعه آفتاب خشک و ویژگی های شیمیایی آن ها در لجن خشک تعیین شد. نتایج نشان دهنده تفاوت اندک بین ویژگی های شیمیایی لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بود. مقدار نیتروژن در لجن پرتوتابی شده بیشتر از پرتوتابی نشده بوده، در حالی که مقدار پتاسیم و فسفر در پرتوتابی نشده بیشتر بود. راتد و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی دیگر، لجن فاضلاب به صورت مایع و پرتوتابی شده با دز ۳ تا ۴ کیلوگرمی و نشده پس از تهیه از مرکز پرتوتابی لجن

در تیمار ۶۰ گرم بر کیلوگرم احتمالاً ناشی از افزایش شوری محلول خاک است (محمودی و همکاران ۲۰۱۵). تأثیر منفی سطوح بالای لجن فاضلاب بر رشد گیاه در مطالعات آخدار و همکاران (۲۰۱۰) در گیاه گندم (*Triticum durum* L.) و محمودی و همکاران (۲۰۱۵) در گیاه یونجه نیز گزارش شده است. بیشترین وزن ریشه و شاخساره خشک از سطح ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب با دوز پرتوتابی ۲۰ کیلوگرمی (به ترتیب ۵۹ و ۷۲/۵ درصد افزایش در وزن ریشه و شاخساره) و کمترین میزان صفات مذکور از کاربرد سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب بدون پرتوتابی (به ترتیب ۴۸/۳ و ۴۲/۵ درصد کاهش در وزن ریشه و شاخساره نسبت به شاهد) حاصل شد. از طرف دیگر در این پژوهش مشخص گردید که کاربرد ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده با هر دوز نسبت به پرتوتابی نشده، بر وزن شاخساره خشک اثر معناداری نداشت، هر چند که در این سطوح با کاربرد لجن پرتوتابی شده، وزن ریشه خشک افزایش معناداری داشت؛ ولی در مورد کاربرد سطوح بالای لجن (۶۰ گرم بر کیلوگرم)، وزن ریشه و شاخساره خشک با کاربرد لجن پرتوتابی شده تغییر معناداری نداشت. در مورد تأثیر مثبت لجن پرتوتابی شده نسبت به پرتوتابی نشده بر وزن ریشه و شاخساره خشک می توان بیان نمود که نتایج این پژوهش با مطالعات الموتایم و ابوالسعید (۲۰۰۷) در گیاه رازیانه، احمد و همکاران (۲۰۰۲) در گیاه گندم، پاندا و همکاران (۱۹۸۸) در گیاه برنج همخوانی داشت. الموتایم و ابوالسعید (۲۰۰۷) اثر سطوح صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ تن بر هکتار لجن فاضلاب پرتوتابی شده با دوز ۶ کیلوگرمی گاما و پرتوتابی نشده را بر تولید گیاه دارویی رازیانه در دو مرحله رویشی و گلدهی در خاک شنی بررسی و گزارش کردند که وزن شاخساره خشک و عملکرد دانه با کاربرد لجن پرتوتابی شده نسبت به پرتوتابی نشده به طور معناداری افزایش یافت. احمد و همکاران (۲۰۰۲) گزارش کردند که کاربرد لجن فاضلاب پرتوتابی شده با

داد که لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده مقدار نیتروژن و فسفر تقریباً برابری داشتند. اکثر ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی لجن به جزء برخی عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین بعد از پرتوتابی بدون تغییر باقی ماندند.

فاضلاب وادوداراهند، در مزرعه محل کشت خشک، خرد و از الک عبور گردید. لجن خشک با مخلوط دو اسید، اسید نیتریک و پرکلریک با نسبت ۲:۱ هضم شده و در عصاره هضم، عناصر فسفر، پتاسیم، عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) و فلزهای سنگین (سرب، کادمیم، نیکل و کبالت) تعیین شد. نتایج آنان نشان

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر ماده خشک و جذب فلزهای سنگین و عناصر غذایی کم‌مصرف در شاخساره ریحان

| منبع تغییر       | درجه آزادی | میانگین مربعات |         |         |         |         |        |        |         |
|------------------|------------|----------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|
|                  |            | ماده خشک       | مس      | روی     | آهن     | نیکل    | سرب    | کادمیم | منگنز   |
| تیمار            | ۱۲         | ۰/۸۸**         | ۱۸۷/۲** | ۸۳۷/۲** | ۲۱۱۰۳** | ۲۲۳/۵** | ۱۴/۷** | ۰/۰۲** | ۹۱۹/۵** |
| خطا              | ۲۶         | ۰/۰۷           | ۳۰/۷    | ۱۰۱۳/۱  | ۳۵۴۵/۹  | ۱۹/۷    | ۲/۹    | ۰/۰۰۵  | ۱۸۲/۰۱  |
| ضریب تغییرات (%) |            | ۱۶/۷۹          | ۲۴/۲۶   | ۱۹/۶۹   | ۲۲/۷۷   | ۲۱/۷۳   | ۳۱/۷۱  | ۲۷/۱۱  | ۲۹/۵۰   |

\*\* معنادار در سطح احتمال ۱ درصد می باشد.

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر ماده خشک و جذب فلزهای سنگین و عناصر غذایی کم‌مصرف در ریشه ریحان

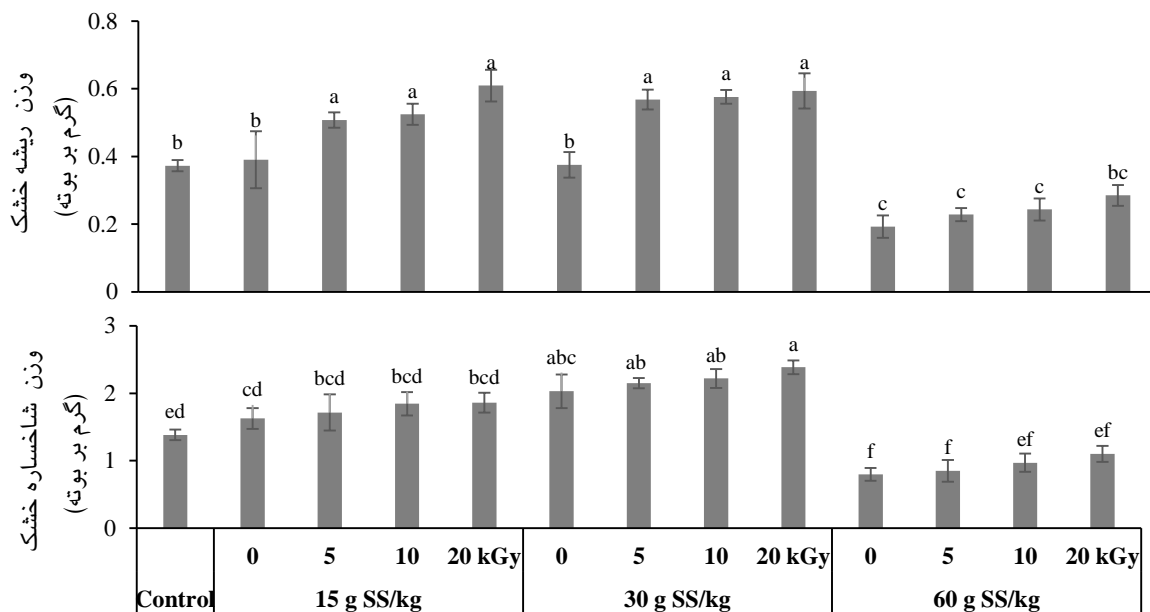
| منبع تغییر       | درجه آزادی | میانگین مربعات |         |           |            |          |         |        |         |
|------------------|------------|----------------|---------|-----------|------------|----------|---------|--------|---------|
|                  |            | وزن خشک        | مس      | روی       | آهن        | نیکل     | سرب     | کادمیم | منگنز   |
| تیمار            | ۱۲         | ۰/۰۷**         | ۱۰۴/۷** | ۲۳۰۹/۰۴** | ۱۴۷۳۳۳/۷** | ۱۲۳/۲۲** | ۱۱۰/۳** | ۰/۰۷** | ۴۲۷/۱** |
| خطا              | ۲۶         | ۰/۰۰۴          | ۸/۹     | ۲۹۷/۴۱    | ۱۵۴۲۴/۸    | ۹/۰      | ۶/۳     | ۰/۰۱   | ۲۸۸/۵   |
| ضریب تغییرات (%) |            | ۱۶/۱۵          | ۱۷/۶۹   | ۲۱/۱۵     | ۱۸/۲۷      | ۱۸/۰۱    | ۱۶/۸۵   | ۲۶/۱۵  | ۱۵      |

\*\* معنادار در سطح احتمال ۱ درصد می باشد.

میانگین‌ها نشان داد که مصرف لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده، مقدار جذب مس، نیکل، سرب (شکل ۳)، روی، منگنز (شکل ۴) و آهن (شکل ۵) را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد؛ به‌طوری‌که افزایش جذب فلزهای مذکور در شاخساره با کاربرد سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده

مقدار جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و کادمیم در شاخساره

تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارها بر جذب مس، منگنز، نیکل، سرب، روی، آهن و کادمیم در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۳). مقایسه



شکل ۲- اثر لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بر وزن ریشه و شاخساره خشک گیاه ریحان

در هر اندام گیاه، میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

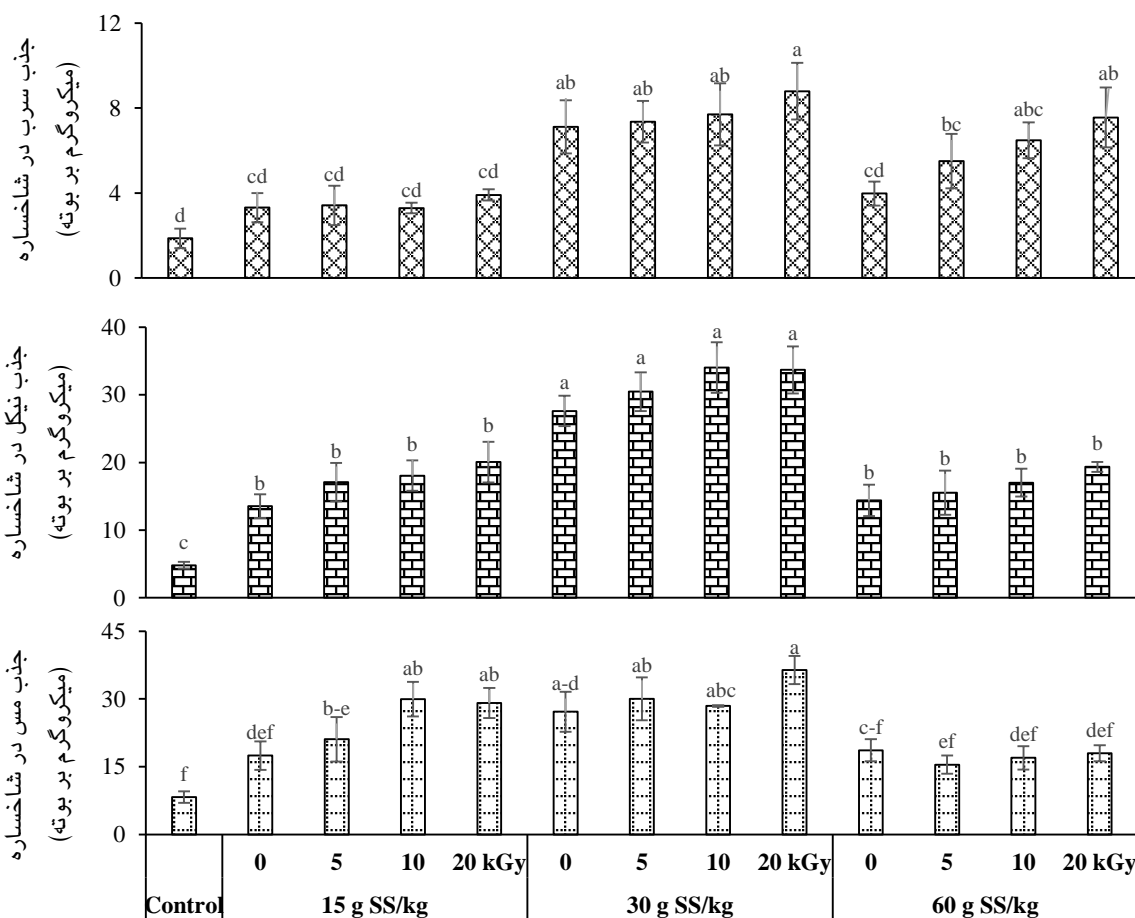
فراهمی فلزها در خاک و جابه‌جایی آنها از ریشه به شاخساره، افزایش می‌یابد (سینگ و آگراوال ۲۰۰۷؛ غفوری و همکاران ۲۰۱۱؛ هائولان و زیولان ۲۰۱۲). مطابق نتایج پژوهش حاضر، در مطالعه آخدار و همکاران (۲۰۱۰) نیز غلظت فلزهای سنگین نیکل، سرب، مس و روی در شاخساره گیاه گندم با کاربرد لجن فاضلاب (صفر، ۴۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ تن در هکتار) افزایش یافت. در مورد عوامل مؤثر بر جذب، انتقال و توزیع عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین در قسمت‌های مختلف گیاه گزارش‌های زیادی وجود دارد (لیاو و همکاران ۲۰۰۰؛ کاباتا-پندیاس، ۲۰۰۱؛ عسگری لجایر و همکاران ۲۰۱۵). جذب بیشتر عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین در گیاه با دو سازوکار فعال و غیرفعال انجام می‌شود. جذب غیرفعال از طریق جذب الکترواستاتیکی یون‌های فلزها بر دیواره سلول‌های ریشه گیاه انجام می‌شود و فعالیت‌های متابولیکی گیاه بر آن تأثیری ندارند. شواهد موجود نشان می‌دهد که جذب مس، روی، منگنز، آهن، نیکل و غیره عمدتاً فعال و از طریق فعالیت‌های متابولیکی گیاه کنترل می‌گردد. با این حال، در

نسبت به ۶۰ گرم بر کیلوگرم بیشتر بود. به عبارت دیگر، با کاربرد سطح بالاتر لجن فاضلاب (۶۰ گرم بر کیلوگرم) روند تغییرات جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز و آهن نسبت به سطوح دیگر نزولی گردید، ولی جذب همچنان نسبت به شاهد بیشتر بود. این در حالی است که کاربرد لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده در سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم بر جذب کادمیم شاخساره اثر مثبت و در سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم اثر منفی داشت (شکل ۵). با توجه به محاسبه جذب از حاصلضرب غلظت و ماده خشک می‌توان نتیجه‌گیری نمود که افزایش جذب در سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب ناشی از افزایش غلظت فلزها و افزایش ماده خشک گیاه با مصرف لجن فاضلاب به دلیل فراهم آوردن شرایط بهتر برای رشد از لحاظ عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف است. همچنین افزایش جذب در سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم ناشی از افزایش غلظت این فلزها در شاخساره با وجود کاهش ماده خشک آن می‌باشد. گزارش‌هایی وجود دارد که با کاربرد لجن فاضلاب در خاک، غلظت فلزهای سنگین و عناصر غذایی کم‌مصرف در شاخساره بر اثر افزایش

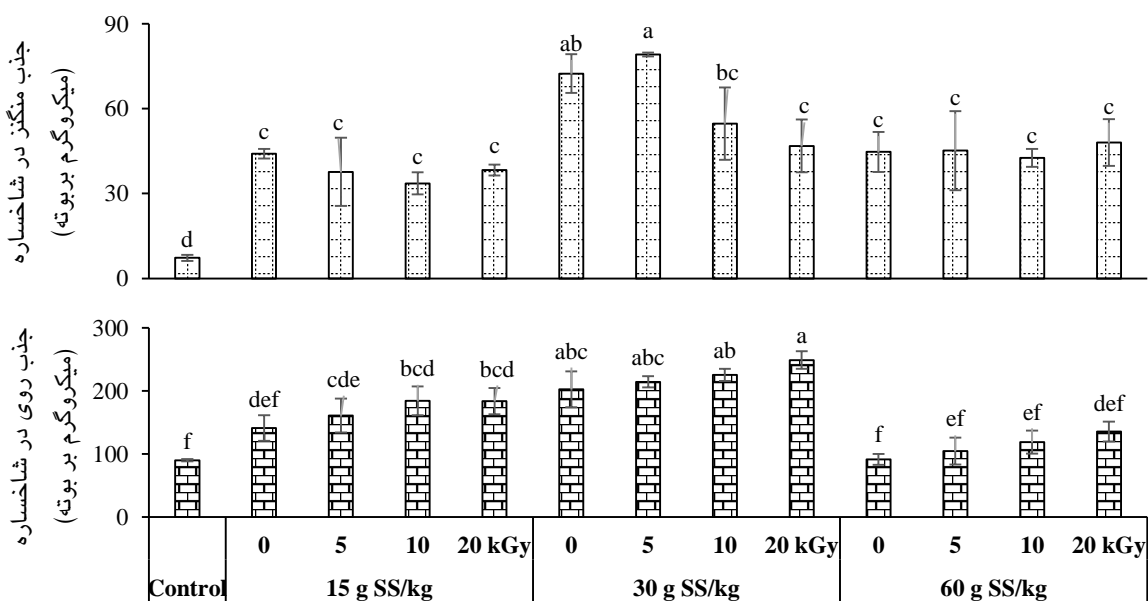
با دوز ۲۰ کیلوگرمی، آهن و منگنز از سطح ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده با دوز ۵ کیلوگرمی و نیکل نیز از کاربرد همان سطح لجن با دوز پرتوتابی ۱۰ کیلوگرمی حاصل گردید. در تیمارهای مذکور جذب مس، سرب، روی، کادمیم، آهن، منگنز و نیکل افزایش ۳۳۹، ۳۷۱، ۱۷۶/۹، ۸۲/۶، ۱۵۹/۵، ۹۹۱/۶ و ۶۰۶ درصدی نسبت به شاهد داشتند. همچنین، از نتایج به دست آمده مشهود است که با کاربرد لجن پرتوتابی شده در هر سطح نسبت به پرتوتابی نشده جذب فلزهای مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و کادمیم افزایش یافته است، هرچند که این اثر مثبت در اکثر تیمارها معنادار نبوده است. در مورد تأثیر سطوح ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب بر جذب فلزها می‌توان بیان نمود که به دلیل فراهم آوردن سطوح مناسبی از عناصر غذایی، گیاه دارویی ریحان هم عناصر غذایی بیشتری را جذب کرده و هم انرژی خود را صرف تولید ماده خشک بیشتر نموده و لذا مقدار فلزهای شاخساره در این تیمارهای آزمایشی بیشترین افزایش را داشته است. از طرف دیگر، ذکر نکته مهمی حائز اهمیت است و آن اینکه علاوه بر مطلب فوق، باید توجه داشت که با پرتوتابی لجن فاضلاب اگرچه تغییرات بارزی در غلظت فلزهای لجن ایجاد نشده است ولی با غیرفعال‌سازی ریزجانداران بیماری‌زای خطرناک (کاهش کلفیرم کل و گرم‌پای به عنوان ریزجاندار شاخص باکتریایی به شرایط کلاس A از نظر ویژگی‌های زیستی لجن فاضلاب در دوز پرتوتابی ۲۰ کیلوگرمی) و بازدارنده‌های رشد و به تبع آن افزایش ماده خشک می‌تواند یکی از دلایل به دست آمدن بالاترین جذب فلزها در لجن پرتوتابی شده باشد. بنابراین، این نتایج با یافته‌های احمد و همکاران (۲۰۰۲)، زو و همکاران (۲۰۰۲) و الموتایم و ابوالسعید (۲۰۰۷) همخوانی دارد.

غلظت‌های زیاد این عناصر در خاک ممکن است به صورت غیرفعال و بدون مصرف مستقیم انرژی، از طریق سازوکار پخشیدگی و تماس ریشه‌ای توسط گیاهان انجام می‌شود (کاباتا-پندیاس ۲۰۰۱). بنابراین، با توضیحات اشاره شده از یک طرف و وابستگی جذب فعال به فعالیت‌های متابولیکی گیاه (فتوسنتز و تنفس) و بهبود فعالیت‌های متابولیکی با کاربرد لجن فاضلاب به دلیل افزایش غلظت و فراهمی عناصر غذایی، می‌توان قضاوت نمود که هر دو فرآیند جذب فعال و غیرفعال در فرآیند جذب دخیل بوده، اگرچه سازوکار جذب فعال تأمین کننده عمده فلزهای مورد مطالعه می‌باشد. این جذب در خلاف جهت شیب غلظت و با مصرف مستقیم یا غیرمستقیم انرژی همراه است. بنابراین، همه عوامل موثر بر سوخت و ساز و انرژی در دسترس گیاه بر جذب این فلزها تأثیر می‌گذارد (مارشنر ۲۰۱۱). عوامل زیادی در قابلیت جذب عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین توسط گیاهان دخالت دارند. عوامل خاکی مختلفی از جمله میزان کربنات کلسیم، pH، درصد رس و مواد آلی، درصد رطوبت و درصد اکسیدهای آهن و آلومینیم و عوامل گیاهی از جمله ویژگی‌های ریشه گیاه مانند سرعت رشد ریشه، سرعت جذب عنصر توسط ریشه، طول کل ریشه و سطح جذب ریشه در جذب عناصر غیرممتحرک در خاک دخالت دارند (پانده و همکاران ۲۰۰۷؛ کاکماک ۲۰۰۸؛ ایشیمارو و همکاران ۲۰۱۱). پس می‌توان متوسط بودن بافت خاک، داشتن ماده آلی کمتر و داشتن ظرفیت تبادل کاتیونی کمتر، تثبیت کمتر این عناصر در خاک و به طبع آن جذب و انتقال این عنصر به شاخساره را دلیل دیگری بر جذب بیشتر این فلزها عنوان کرد.

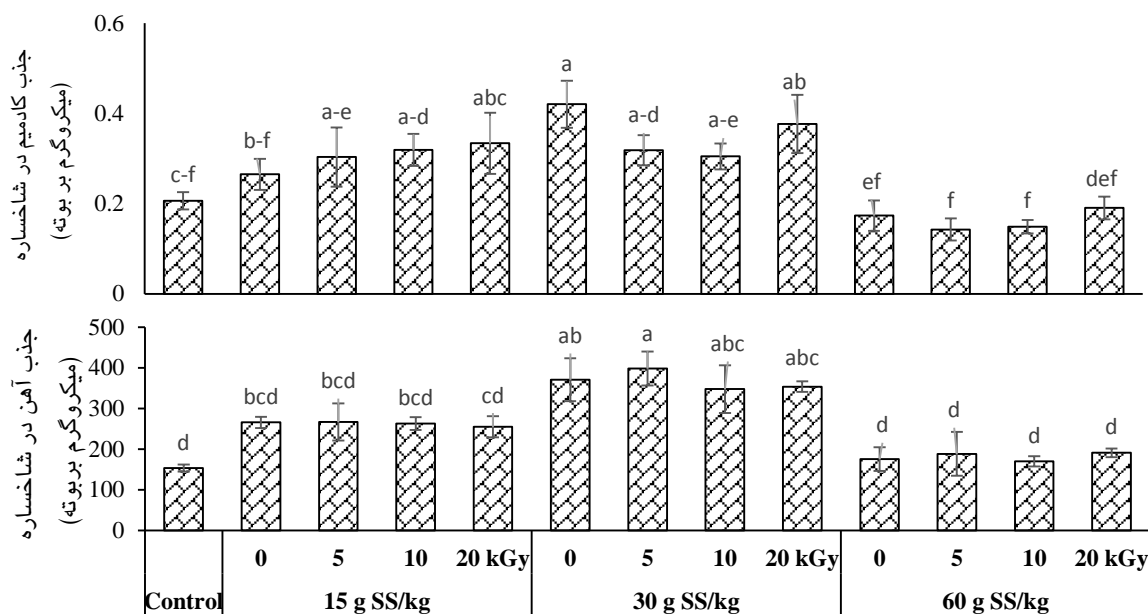
بیشترین جذب مس، سرب، روی و کادمیم از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده



شکل ۳- اثر لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بر جذب مس، نیکل و سرب در شاخساره گیاه ریحان در هر فلز، میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.



شکل ۴- اثر لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بر جذب روی و منگنز در شاخساره گیاه ریحان در هر فلز، میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.



شکل ۵- اثر لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بر جذب آهن و کادمیم در شاخساره گیاه ریحان

در هر فلز، میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

افزایش غلظت فلزهای مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و کادمیم در ریشه به افزایش جذب و در سطوح بالا (۶۰ گرم بر کیلوگرم) از طریق تأثیر منفی بر ماده خشک به کاهش جذب فلزهای مذکور در ریشه منجر گردید. بر اساس گزارش‌ها، مقادیر بالای لجن فاضلاب به سبب افزایش شوری محلول خاک، باعث مهار بسیاری از فعالیت‌های متابولیکی و نیز اثر بر ماده خشک ریشه می‌گردد (محمودی و همکاران ۲۰۱۵). همچنین تأثیر مثبت لجن پرتوتابی شده نسبت به نشده بر جذب عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین در ریشه به دلایلی مربوط است که پیش از این در قسمت جذب آنها در شاخساره ذکر گردید.

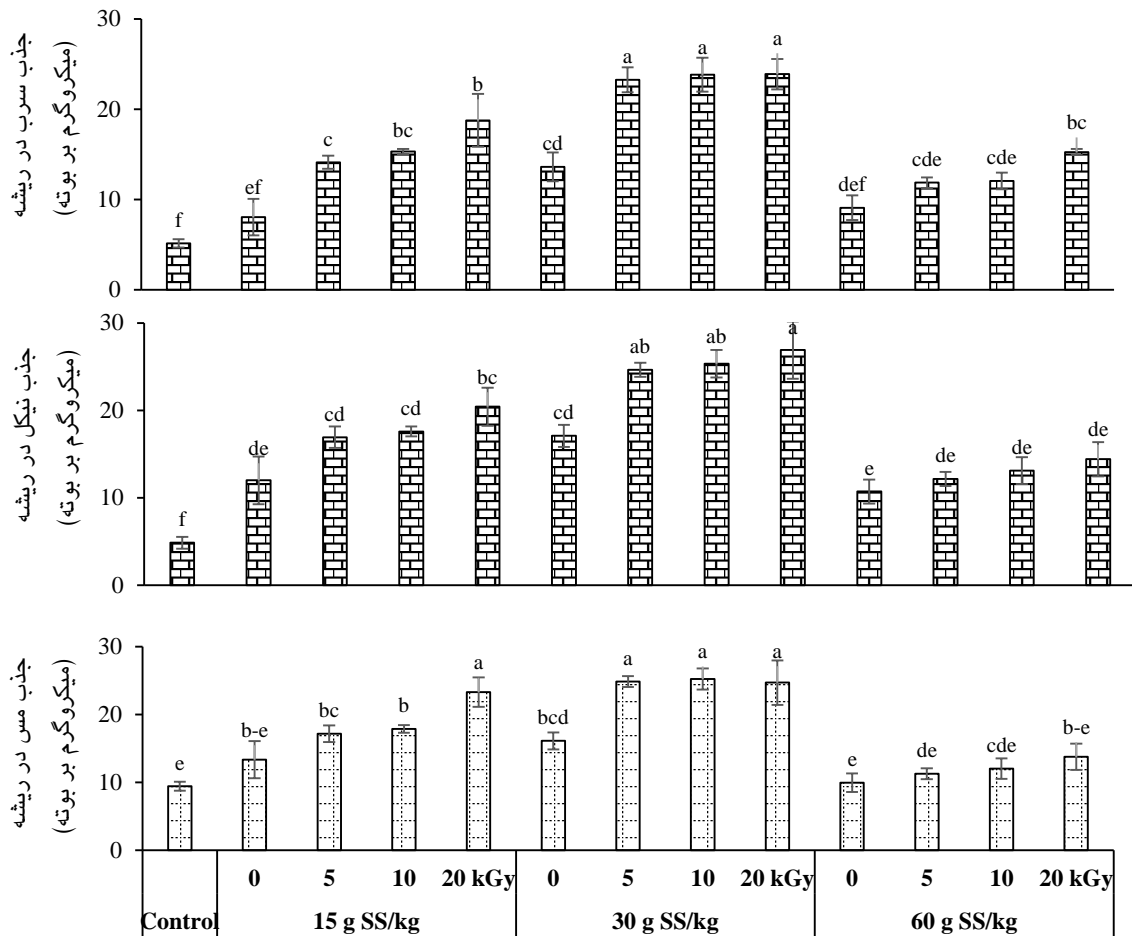
به‌طور کلی، با توجه به نتایج این آزمایش مشاهده می‌شود که در تمام تیمارهای مورد بررسی مقدار جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز و آهن شاخساره بیشتر از ریشه بود ولی در مورد کادمیم به غیر از تیمارهای شاهد و کاربرد ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی نشده، مقدار جذب ریشه بیشتر از شاخساره بود. همچنین نتایج نشان داد که قسمت عمده فلزهای مذکور در ریشه تجمع یافته و انتقال

جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و کادمیم در ریشه

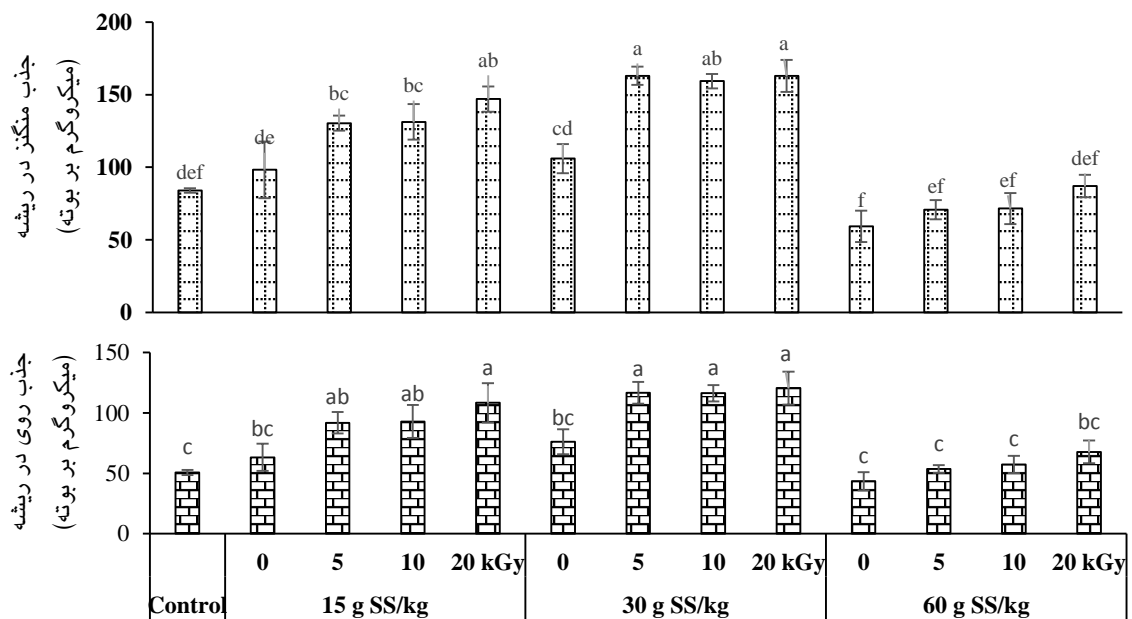
تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارها بر جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و کادمیم در سطح احتمال یک درصد معنادار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاربرد تمام سطوح لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده در این پژوهش، جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و کادمیم ریشه نسبت به شاهد افزایش داشت (شکل‌های ۶ تا ۸). بیشترین میزان جذب فلزهای مذکور در ریشه از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن پرتوتابی شده با دز ۲۰ کیلوگرمی حاصل گردید. به‌طوری‌که، افزایش جذب در تیمار مذکور برای فلزهای مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و کادمیم به ترتیب ۱۶۸، ۴۵۳، ۳۶۶، ۱۳۷/۶، ۹۳/۸، ۱۷۳/۳ و ۳۳۲/۸ درصد می‌باشد. نتایج این آزمایش نشان داد که لجن فاضلاب در سطوح (۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم) اثر افزایشی و در سطح بالا (۶۰ گرم بر کیلوگرم) اثر کاهش‌ی بر جذب فلزهای مذکور در ریشه داشت. در این مورد می‌توان اظهار داشت که کاربرد سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن از طریق تأثیر مثبت بر ماده خشک و

بخش‌های خوراکی چغندر رشد کرده در مقادیر مختلف اصلاح کننده لجن فاضلاب از حدود مجاز استاندارد هند تجاوز کرده بود. همچنین در مورد غلظت بیشتر فلزها در ریشه نسبت به شاخساره می‌توان بیان نمود که این نتیجه تایید کننده این فرضیه می‌باشد که گیاه دارویی ریحان از طریق کاهش انتقال فلزها از ریشه به شاخساره می‌تواند میزان سمیت آنها را در بخش هوایی کاهش دهد. در گزارش‌های زیادی دلیل تجمع بیشتر فلزها در ریشه نسبت به شاخساره، پیوند قوی این فلزها با دیواره سلول‌های ریشه، ظرفیت انتقال کم از طریق آوند چوبی به شاخساره، رقابت در محل‌های جذب ریشه و انتقال عناصر به شاخساره، غیرفعال شدن در دیواره سلول‌های ریشه به عنوان سامانه دفاعی را ذکر نموده‌اند (کاباتا-پندیاس ۲۰۰۱؛ هال ۲۰۰۲؛ مارشنر ۲۰۱۱؛ عسگری لجایر و همکاران، ۲۰۱۵). از آنجا که تنها برگ و ساقه‌های گیاه دارویی ریحان به عنوان یک گیاه دارویی و تازه‌خوری استفاده می‌شود، لذا انباشت بیشتر فلزهای مورد مطالعه در ریشه به عنوان خطر جدی برای سلامتی انسان مطرح نیست.

آنها به شاخساره به مقدار زیادی محدود گشته است (داده‌ها آورده نشده است). لذا، علیرغم وجود بیشترین غلظت فلزها در ریشه، شاخساره بیشترین جذب این عنصر را داشت، علت این امر ماده خشک کمتر ریشه در مقایسه با شاخساره می‌باشد چون جذب از حاصلضرب غلظت در ماده خشک محاسبه شده است. مشابه نتایج پژوهش حاضر، زلجازکوف و همکاران (۲۰۰۶) نیز غلظت مس در ریشه گیاه عنعنای فلفلی و ریحان با افزایش کاربرد مس، کادمیم و سرب (به ترتیب غلظت‌های ۱۰۰، ۱۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) افزایش یافت در حالی که قسمت عمده مس، کادمیم و سرب در ریشه تجمع یافته و انتقال مس به قسمت هوایی به مقدار زیادی محدود شده بود. سینگ و آگراوال (۲۰۰۷) نیز بیان داشت کاربرد لجن فاضلاب در مقادیر ۲۰ و ۴۰ درصد (w/w) در خاک، سبب افزایش معنادار غلظت سرب، کروم، کادمیم، مس، روی و نیکل در خاک شد که به تبع آن جذب و غلظت نیکل، کادمیم، مس، کروم، سرب و روی در بخش هوایی و ریشه گیاه چغندر قند، نسبت به گیاهان رشد کرده در خاک شاهد، افزایش یافت. تجمع اغلب فلزهای سنگین در ریشه بیشتر از بخش هوایی بود. غلظت کادمیم، نیکل و روی در

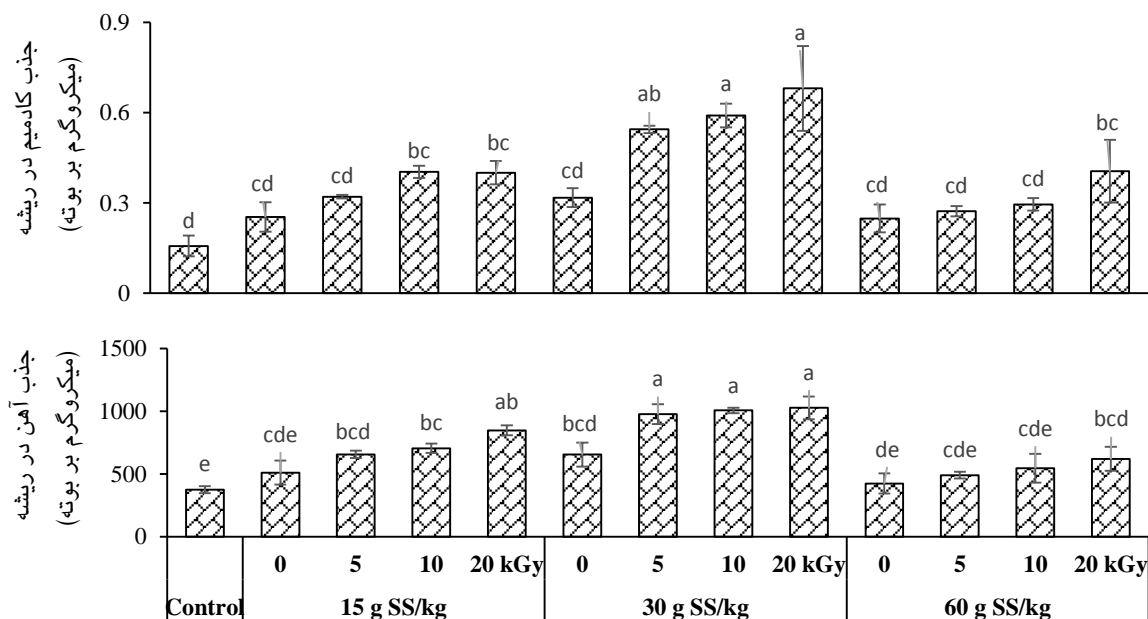


شکل ۶- اثر لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بر جذب مس، نیکل و سرب در ریشه گیاه ریحان در هر فلز، میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.



شکل ۷- اثر لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بر جذب روی و منگنز در ریشه گیاه ریحان در هر فلز میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.





شکل ۸- اثر لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده بر جذب آهن در ریشه گیاه ریحان

در هر فلز، میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنادار ندارند.

### نتیجه گیری کلی

سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم کاهش یافت، ولی جذب همچنان نسبت به شاهد بیشتر بود. کاربرد لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده در سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم بر جذب کادمیم شاخساره اثر مثبت و در سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم اثر منفی داشت. در تمام تیمارهای مورد بررسی مقدار جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن شاخساره بیشتر از ریشه بود. در مورد کادمیم به غیر از تیمارهای شاهد و کاربرد ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی نشده، مقدار جذب ریشه بیشتر از شاخساره بود. نتایج این بررسی نشان داد که گیاه دارویی ریحان در جذب و انتقال فلزهای مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و کادمیم از ریشه به شاخساره توان زیادی دارد. با توجه به این‌که گیاه دارویی ریحان علاوه بر کاربرد دارویی، جنبه تازه‌خوری و ادویه‌ای نیز دارد، لذا مصرف ریحان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با لجن فاضلاب به‌علت جذب و انتقال این فلزات به شاخساره باید با احتیاط لازم انجام شود.

به‌طور کلی نتایج نشان داد که افزودن لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده به میزان ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم خاک باعث افزایش وزن ریشه و شاخساره خشک نسبت به شاهد گردید، هرچند که در این سطوح لجن، کاربرد لجن پرتوتابی شده با هر دوز نسبت به پرتوتابی نشده، اثر معناداری بر وزن شاخساره خشک نداشت ولی وزن ریشه خشک را به‌طور معناداری افزایش داد. با کاربرد تمام سطوح لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده در این پژوهش، جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز، آهن و کادمیم ریشه نسبت به شاهد افزایش داشت. بیشترین میزان جذب فلزهای مذکور در ریشه از کاربرد لجن پرتوتابی شده با دوز ۲۰ کیلوگرم به میزان ۳۰ گرم بر کیلوگرم خاک حاصل شد. جذب مس، نیکل، سرب، روی، منگنز و آهن شاخساره با کاربرد لجن فاضلاب به میزان ۶۰ گرم بر کیلوگرم خاک نسبت به

## منابع مورد استفاده

- Ahmed S, Hossain M and Rahman S. 2002. Isotope-aided studies on the effects of radiation processed sewage sludge on crop yields and bioavailability of heavy metals. Irradiated sewage sludge for application to cropland, Results of a coordinated research project. (Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture), International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria).
- Al-Bachir M, Al-Adawi M and Shamma, M. 2003. Synergetic effect of gamma irradiation and moisture content on decontamination of sewage sludge. *Bioresource Technology*, 90 (2): 139-143.
- Asgari Lajayer B, Ghorbanpour M and Nikabadi S. 2017. Heavy metals in contaminated environment: Destiny of secondary metabolite biosynthesis, oxidative status and phytoextraction in medicinal plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145: 377-390.
- Asgari Lajayer H, Najafi N and Moghiseh E. 2015. Study of the mechanisms of gamma rays in purification and disinfection of sewage sludge. *Journal of Radiation and Nuclear Technology*, 2(1): 9-23. (In Persian).
- Asgari Lajayer H, Najafi N and Moghiseh E. 2016. Application of ionizing radiation effects on physical, chemical and biological properties of effluent wastewater. *Journal of Land Management*, 4(1): 79-97. (In Persian).
- Asgari Lajayer H, Savaghebi Firoozabadi GR, Motesharezadeh B and Hadian J. 2015. Change in uptake of micronutrient and macronutrient in pennyroyal (*Mentha pulegium* L.) at greenhouse condition under copper and zinc application. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(2):197-210. (In Persian).
- Basfar A and Rehim, FA. 2002. Disinfection of wastewater from a Riyadh wastewater Treatment Plant with ionizing radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 65(4): 527-532.
- Boostani HR and Ronaghi A. 2011. Comparison of sewage sludge and chemical fertilizer application on yield and concentration of some nutrients in spinach (*Spinosa olerace* L.) in three textural classes of a calcareous soil. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 2(6): 65-73. (In Persian).
- Bouyoucos GJ, 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54: 464-465.
- Bower CA, Reitmeir RF and Fireman M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73: 251-261
- Bremner J and Mulvaney C. 1982. Nitrogen total. *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. 595-624.
- Cakmak I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil*, 302:1-17.
- Casado-Vela J, Sells S, Diaz-Crespo C, Navarro-Pedreno J, Mataix-Beneyto J and Gomez I. 2007. Effect of composted sewage sludge application to soil on sweet pepper crop (*Capsicum annuum* var. annuum) grown under two exploitation regimes. *Waste Management*, 27: 1509-1518.
- Chaychian M, Al-Sheikhly M, Silverman J and McLaughlin WL. 1998. The mechanisms of removal of heavy metals from water by ionizing radiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 53 (2): 145-150.
- Chmielewski A, 2007. Practical applications of radiation chemistry. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 81(9): 1488-1492.
- Chu S, Wu D, Liang LL, Zhong F, Hu Y, Hu X, Lai C and Zeng S. 2017. Municipal sewage sludge compost promotes *Mangifera persiciforma* tree growth with no risk of heavy metal contamination of soil. *Scientific Reports*, 7: 13408.
- El-Motaium R and El-Seoud MA. 2007. Irradiated sewage sludge for production of fennel plants in sandy soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 78: 133-142.

- El-Motaium R. 2006. Application of nuclear techniques in environmental studies and pollution control. In Proceedings of the 2nd Environmental Physics Conference. Alexandria, Egypt, 169-182.
- Etzel J, Born G, Stein J, Helbing T and Baney G. 1969. Sewage sludge conditioning and disinfection by gamma irradiation. American Journal of Public Health and the Nations Health, 59 (11): 2067-2076.
- Ghafoori M, Majid NM, Islam MM and Luhath S. 2011. Bioaccumulation of heavy metals by *Dyera costulata* cultivated in sewage sludge contaminated soil. African Journal of Biotechnology, 10:10674-10682.
- Guo Z, Tang D, Liu X and Zheng Z. 2008. Gamma irradiation-induced Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> removal from different kinds of water. Radiation Physics and Chemistry, 77 (9): 1021-1026.
- Gupta PK. 2000. Soil, Plant Water, and Fertilizer Analysis. Agrobios, New Delhi, India.
- Hall JL, 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. Journal of Experimental Botany, 53: 1-11.
- Hamzezadeh M, Fathi P, Javadi T and Hassani A. 2011. The effect of different irrigation water levels on water use efficiency in basil plant (*Ocimum basilicum* var. keshkeny levelu) using marginal analysis theory. Journal of Water and Soil, 25(5): 953-960. (In Persian).
- Hualan Z and Xiulan Z. 2012. Effects of lime stabilized sewage sludge compost on soil physicochemical properties and heavy metal uptake by ryegrass. Advanced Materials Research, 414:306-311.
- Ishimaru Y, Bashir K and Nishizawa NK. 2011. Zn uptake and translocation in rice plants. Rice. 4: 21-27.
- Kabata-Pendias A. 2001. Trace elements in soils and plants, CRC press, New York. 331p.
- Kazemalilou S, Najafi N, Reyhanitabar A and Ghaffari M. 2018. Effects of integrated application of phosphorus fertilizer and sewage sludge on leaf chlorophyll index and some growth characteristics of sunflower under water deficit conditions. Journal of Soil Management and Sustainable Production, 7(4):1-18. (In Persian).
- Lakhdar A, Iannelli MA, Debez A, Massacci A, Jedidi N and Abdelly C. 2010. Effect of municipal solid waste compost and sewage sludge use on wheat (*Triticum durum*): growth, heavy metal accumulation, and antioxidant activity. Journal of the Science of Food and Agriculture, 90: 965-971.
- Liao M, Hedley M, Woolley D, Brooks R and Nichols M. 2000. Copper uptake and translocation in chicory (*Cichorium intybus* L.cv Grasslands Puna) and tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill. CvRondy) plants grown in NFT system. II. The role of nicotianamine and histidine in xylem sap copper transport. Plant and Soil, 223: 245-254.
- Limam RD, Limam I, Clérandeau C, Khouatmia M, Djebali W, Cachot J and Chouari R. 2018. Assessment of the toxicity and the fertilizing power from application of gamma irradiated anaerobic sludge as fertilizer: Effect on *Vicia faba* growth. Radiation Physics and Chemistry, 150: 163-168.
- Magnavacca C. 2002. Evaluation of irradiated sewage sludge as an industrial crop fertilizer using nuclear techniques. Irradiated sewage sludge for application to cropland, Results of a co-ordinated research project. (Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture), International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria).
- Mahmoudi Sh, Najafi N and Reyhanitabar A. 2015. Effect of soil moisture and sewage-sludge compost on some soil chemical properties and alfalfa forage macronutrients concentrations in greenhouse conditions. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture, 6(22): 37-54. (In Persian).
- Marschner H, 2011. Mineral nutrition of higher plants, Academic Press, New Yurk. 899p.
- Mohamed B, Mounia K, Aziz A, Ahmed H, Rachid B and Lotfi A. 2018. Sewage sludge used as organic manure in Moroccan sunflower culture: Effects on certain soil properties, growth and yield components. Science of the Total Environment, 627: 681-688.
- Najafi N, Mardomi S and Oustan Sh. 2012. The effect of waterlogging, sewage sludge and manure on selected macronutrients and sodium uptake in sunflower plant in a loamy sand soil. Journal of Water and Soil,

26(3): 619-636. (In Persian).

- Olsen SR and Sommers LE. 1982. Phosphorus. P 403-430, In: A.L. Page (Ed.), Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological methods, 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, USA.
- Özcan M, Arslan D and Ünver A. 2005. Effect of drying methods on the mineral content of basil (*Ocimum basilicum* L.). Journal of Food Engineering, 69: 375-379.
- Page AL, Miller RH and Keeney DR. 1982. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. ASA-CSSA-SSSA Publisher, Madison, Wisconsin, USA Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1987. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of American Journal, 42: 421-428.
- Pande P, Anwar M, Chand S, Yadav VK and Patra D. 2007. Optimal level of iron and zinc in relation to its influence on herb yield and production of essential oil in menthol mint. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 38: 561-578.
- Pandya GA, Kapila S, Kelkar VB, Negi S and Modi VV. 1987. Inactivation of bacteria in sewage sludge by gamma radiation. Environmental Pollution, 43 (4): 281-290.
- Pandya GA, Prakash L, Devasia P and Modi VV. 1988. Effect of gamma-irradiated sludge on the growth and yield of rice ( L. var. GR-3). Environmental Pollution, 51: 63-73.
- Parsafar N, Marofi S, Rahimi G and Marofi H. 2015. Assessment of Pollution Index (PI) of Cd, Zn, Cu and Pb in the soil irrigated with municipal wastewater. Water and Soil Science, 25(1):1-12. (In Persian).
- Parvin F, Ferdaus Z, Tareq SM, Choudhury TR, Islam JM and Khan MA. 2015. Effect of gamma-irradiated textile effluent on plant growth. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 4(1): 23-30.
- Peters J. 2003. Recommended methods of manure analysis. University of Wisconsin Cooperative Extension Publication, WI.
- Priyadarshini J, Roy P and Mazumdar A. 2014. Qualitative and quantitative assessment of sewage sludge by gamma irradiation with pasteurization as a tool for hygienization. Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 95 (1): 49-54.
- Rathod PH, Patel J C and Jhala AJ. 2011. Potential of gamma irradiated sewage sludge as fertilizer in radish: evaluating heavy-metal accumulation in sandy loam soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 42 (3): 263-282.
- Rathod PH, Patel JC, Shah M and Jhala AJ. 2009. Recycling gamma irradiated sewage sludge as fertilizer: A case study using onion (*Allium cepa*). Applied Soil Ecology, 41 (2): 223-233.
- Samavat S, Tehrani MM, Bazargan K and Basirat M. 2011. Instructions checking of organic Matter. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran. (In Persian).
- Singh RP and Agrawal M. 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of *Beta vulgaris* plants. Chemosphere, 67: 2229-2240.
- Singh RP and Agrawal M. 2010. Effect of different sewage sludge applications on growth and yield of *Vigna radiata* L. field crop: Metal uptake by plant. Ecological Engineering. 36: 969-972.
- Tahri L, Elgarrouj D, Zantar S, Mouhib M, Azmani A and Sayah F. 2010. Wastewater treatment using gamma irradiation: Tétouan pilot station, Morocco. Radiation Physics and Chemistry, 79 (4): 424-428.
- Turovskiy IS and Mathai P. 2006. Wastewater sludge processing: John Wiley & Sons.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1993. The standards for the use or disposal of sewage sludge, Code of Federal Regulation-Part 503 Rule, Federal Register Number-9248-9415, Environmental Protection Agency Press.

- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2010. Method 1680: Fecal coliforms in sewage sludge (biosolids) by multiple-tube fermentation using lauryl tryptose broth (Ltb) and Ec medium, Washington, DC, US EPA.
- Walkley A and Black IA. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29-38.
- Wang J and Chu L. 2016. Irradiation treatment of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in water and wastewater: an overview. *Radiation Physics and Chemistry*, 125: 56-64.
- Watanabe H and Takehisa M. 1984. Disinfection of sewage sludge cake by gamma-irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 24 (1): 41-54.
- Wickramanayake GB and Sproul OJ. 1990. Decontamination technologies for release from bioprocessing facilities. Part V. decontamination of sludge. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 19 (6): 515-537.
- Zheljazkov VD, Craker, LE and Xing B. 2006. Effects of Cd, Pb, and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil. *Environmental and Experimental Botany*, 58(1): 9-16.
- Zhou L, Xu Y, Jiang T, Zheng S and Wu H. 2002. Characterization of irradiated sewage sludge and its effects on soil fertility, crop yields and nutrient bioavailability. Irradiated sewage sludge for application to cropland, Results of a co-ordinated research project. (Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture), International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria).