مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۹۱، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 91, No 1, 2020

تأثیر پرتوتابی لجن فاضلاب بر جذب عناصر غذایی پرمصرف و سدیم در گیاه دارویی ریحان در شرایط گلخانه‌ای

بهنام عسگری لجایر[۱]، نصرت‌اله نجفی[۱]، ابراهیم مقیسه*[۲]، محمد مسافری[۳]، جواد هادیان[۴]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، صندوق پستی: ۵۱۶۶۶۱۶۴۲۲، تبریز ـ ایران
۲. پژوهشکده‌ی کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۹۸-۳۱۴۸۵، کرج- ایران
۳. مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، صندوق پستی: ۵۱۶۵۶۶۵۹۳۱، تبریز ـ ایران
۴. پژوهشکده‌ی گیاهان و مواد اولیه دارویی، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۴۸۳۹۶۳۱۱۳، تهران ـ ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۷/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۴/۱۵

چکیده

اثر لجن فاضلاب در سطوح صفر، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم بر کیلوگرم خاک که در معرض پرتو گاما با دزهای صفر، ۵، ۱۰ و ۲۰ kGy قرار گرفته بودند، بر جذب عناصر غذایی پرمصرف و سدیم در ریشه و شاخساره گیاه ریحان بررسی شد. نتایج نشان داد که کاربرد لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده در سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم خاک سبب افزایش جذب فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم ریشه و شاخساره و نیتروژن شاخساره گردید. کاربرد ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده با دزهای پرتوتابی مورد استفاده در این پژوهش بر جذب فسفر، پتاسیم، منیزیم و سدیم شاخساره و ریشه، نیتروژن شاخساره و کلسیم ریشه تأثیر معناداری نداشت اما باعث کاهش معنادار جذب کلسیم شاخساره نسبت به شاهد گردید. بیش‌ترین جذب فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم شاخساره و ریشه و نیتروژن شاخساره از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده با دز ۲۰ kGy حاصل گردید. بیش‌ترین جذب سدیم ریشه و شاخساره نیز از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی شده با ۱۰ kGy مشاهده شد. با به کارگیری لجن پرتوتابی شده نسبت به پرتوتابی نشده در هر سطح، مقدار جذب تمام عناصر مورد مطالعه در ریشه و شاخساره افزایش یافت.

کلیدواژه‌ها: پسماندهای آلی، پرتوهای یون‌ساز، عناصر غذایی پرمصرف، گیاه دارویی

Effects of sewage sludge irradiation on uptake of macronutrients and sodium in basil plant under greenhouse conditions

B. Asgari Lajayer[1], N. Najafi[1], E. Moghiseh*[2], M. Mosaferi[3], J. Hadian[4]

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, P.O.Box: 5166616422, Tabriz– Iran
2. Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 31465-1498, Karaj - Iran
3. Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, P.O.Box: 5165665931, Tabriz – Iran
4. Medicinal Plants and Drugs Research Institute, Shahid Beheshti University, P.O.Box: 1483963113, Tehran - Iran

Abstract

Effects of 0, 15, 30 and 60 g per kg of sewage sludge exposed to gamma irradiation at doses of 0, 5, 10 and 20 kGy were investigated on macronutrients and sodium uptakes in the basil root and shoot. The results showed that using 15 and 30 g sewage sludge per kg soil increases the uptake of phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and sodium in the root and shoot, as well as the nitrogen of the shoot. The application of 60 g irradiated and non-irradiated sewage sludge with the irradiation doses used in this study per kg of soil did not cause significant effects on phosphorus, potassium, magnesium, and sodium absorption in the shoot and root, nitrogen in the shoot, and calcium in the root. However, it significantly decreased the calcium absorption of shoots. The maximum uptake of phosphorus, potassium, calcium and magnesium in the root and shoot and nitrogen in the shoot was obtained in 30 g per kg sewage sludge irradiated with 20 kGy absorbed dose. The maximum uptake of sodium was revealed in 30 g per kg sewage sludge irradiated with 10 kGy absorbed dose. With application of irradiated sewage sludge relative to non-irradiated in each level, the absorption of all studied elements increased in the basil root and shoot.

Keywords: Organic wastes, Ionizing radiation, Macronutrients, Medicinal plants

*Email: emoghiseh@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

تصفیه فاضلاب‌ها همواره با تولید دو بخش مجزای پساب و لجن همراه بوده است. طبق تعریف، لجن مواد جامدی است که در روش‌های مختلف تصفیه برای حذف آلاینده‌های معلق و محلول از فاضلاب از طریق جداسازی مواد جامد از مایع، یا ترکیب شیمیایی و یا فعالیت‌های زیستی در تصفیه‌خانه فاضلاب به‌دست می‌آید [۱]. فرایندهای تثبیت لجن شامل هضم هوازی و بی‌هوازی، تثبیت قلیایی، کمپوست کردن و خشک کردن از طریق هوا یا حرارت می‌باشد [۲]. روش‌های به‌کار برده شده برای تصفیه و تثبیت لجن به اندازه، نوع و موقعیت تصفیه‌خانه، عملیات واحدهای موجود در آن، ویژگی‌ها، مقدار جامدات و بالاخره به روش دفع نهایی لجن بستگی دارد [۳]. برای دفع لجن روش‌های مختلفی وجود داشته که استفاده مجدد یکی از آن‌ها است [۲]. استفاده از لجن در زمین یکی از مهم‌ترین روش‌های استفاده مجدد بوده که شامل کاربرد در زمین‌های کشاورزی، جنگل‌ها و مراتع، محل‌های احیای اراضی، مکان‌های عمومی مانند پارک‌ها، چمن‌زارها، نوارهای سبز بزرگراه‌ها، علفزارها و باغچه خانه‌ها می‌باشد [۴]. اگرچه لجن فاضلاب دارای مواد غذایی مفید برای گیاه بوده و اصلاح‌کننده خاک است، با این حال به دلیل ناتوانی روش‌های متداول استفاده‌شده در تثبیت لجن، لجن حاوی انواع باکتری‌ها، ویروس‌ها، پروتوزوآها، انگل‌ها و سایر ریزجانداران مولد بیماری و یا فلزات سنگین، آلاینده‌های آلی سمی و غیره بوده و استفاده از این لجن‌ها می‌تواند بالقوه برای محصولات کشاورزی، انسان و دام خطرناک باشد و می‌بایست قبل از استفاده‌های کشاورزی و یا دفع در محیط‌زیست گندزدایی[1] شوند [۵]. گندزدایی لجن ممکن است به روش نگه‌داری درازمدت، آهک‌زنی، تثبیت هوازی در شرایط ترموفیلیک[2]، پاستوریزه کردن[3] و پرتوتابی انجام شود [۱]. گزارش شده است که از بین روش‌های مختلف گندزدایی لجن فاضلاب، بهترین روش برای حذف ریزجانداران بیماری‌زا، استفاده از پرتوهای یونیزان می‌باشد. از بین پرتوهای یونیزان، فقط گاما و الکترون توانایی استفاده برای اهداف گندزدایی لجن را دارند. مزایای پرتو گاما نسبت به بیم الکترون از جمله قدرت نفوذ عالی (حدود ۳۰۰ mm) به مواد با خروجی و ورودی پرتو برابر و امکان پرتودهی سطح‌مقطع ضخیم‌تر از لجن (به‌صورت فله) باعث شده که پرتو گاما در گندزدایی لجن فاضلاب نسبت به پرتو الکترون استفاده گسترده‌تری داشته باشد [۱، ۶]. اگرچه گزارش جامعی در مورد اثر پرتوهای یونیزان بر روند تغییرات ویژگی‌های شیمیایی لجن وجود ندارد، با این حال گزارش‌های ضد و نقیضی در مورد تغییر برخی ویژگی‌های شیمیایی مانند غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف و فلزات سنگین در دزهای پرتوتابی استفاده‌شده برای گندزدایی لجن وجود دارد [۷-۹]. لذا تغییر ویژگی‌های زیستی و شیمیایی لجن پس از پرتوتابی می‌تواند اثرهای متفاوتی بر رشد و عملکرد گیاهان نسبت به لجن پرتوتابی‌نشده داشته باشد [۱۰، ۱۱].

با توجه به توصیه‌های وزارت جهاد کشاورزی مبنی بر مصرف کم‌تر کودهای شیمیایی برای پیشگیری از آلودگی محیط‌زیست و با توجه به کمبود مواد آلی در اغلب خاک‌های ایران، بررسی کاربرد پسماندهای آلی مانند لجن فاضلاب به‌عنوان کود با در نظر گرفتن استانداردهای مربوط به آن‌ها، در مورد اکثر محصولات کشاورزی اهمیت زیادی دارد. از طرف دیگر، مصرف لجن فاضلاب در خاک یک راه ایمن برای دفع این مواد زاید است. در بین محصولات کشاورزی، کشت گیاهان دارویی در خاک‌های آلوده به فلزهای سنگین یا تیمارشده با کودهای آلی آلوده از قبیل کمپوست، لجن فاضلاب و غیره اولاً به‌دلیل تولیدات نهایی (متابولیت‌های ثانویه) عاری از فلزها، اقتصادی بودن تولیدات ثانویه آن‌ها و عدم مشکل وارد شدن این فلزها به زنجیره غذایی در صورت مصرف متابولیت‌های ثانویه و ثانیاً به‌دلیل مقاومت بالای این گیاهان به تنش فلزهای سنگین به‌دلیل دارا بودن متابولیت‌های ثانویه و نقش این متابولیت‌ها در تحمل به تنش، بر سایر گیاهان دارای زیست‌توده بالا مانند گیاهان خوراکی، گونه‌های درختی و درختچه‌ای ترجیح داده می‌شود [۱۲]. گیاه ریحان[4] از جمله گیاهان دارویی است که به‌واسطه اثرهای دارویی از دیرباز توجه پژوهشگران را به خود معطوف داشته است. مصرف این گیاه به شکل‌های مختلف دارویی، غذایی و بهداشتی موجب برتری این گیاه نسبت به سایر گیاهان دارویی شده است [۱۳]. جنس Ocimum شامل ۳۰ گونه است که در میان آن‌ها گونه

1. Disinfection
2. Thermophylic
3. Pasteurization
4. Ocimum Basilicum L.

O. basilicum مهم‌ترین گونه اقتصادی بوده و در بیش‌تر مناطق کشور ایران برای مصرف تازه و ندرتاً به‌صورت خشک و تولید اسانس کشت می‌شود [۱۴]. از اسانس این گیاه به‌طور گسترده‌ای در مواد غذایی به‌عنوان طعم‌دهنده و تهیه لوازم بهداشتی استفاده می‌شود [۱۵]. اگرچه در مورد اثر دزهای مختلف پرتوتابی گاما و سطوح لجن فاضلاب در گیاهان زراعی و سبزی‌ها تحقیقاتی انجام شده [۷، ۱۱، ۱۶، ۱۷]، اما رفتار گیاهان دارویی در چنین شرایطی به خوبی مطالعه نشده است. هم‌چنین، تاکنون در خصوص جذب عناصر غذایی پرمصرف و سدیم توسط گیاه ریحان بر اثر مصرف لجن فاضلاب پرتوتابی شده و نشده در سطح ملی و بین‌المللی تحقیقاتی انجام نشده است. لذا، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب و دزهای مختلف پرتوتابی گاما با بر جذب عناصر غذایی پرمصرف و سدیم در ریشه و شاخساره[1] گیاه دارویی ریحان در شرایط گلخانه‌ای انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ تهیه خاک برای کشت گلخانه‌ای و تعیین ویژگی‌های آن

خاک مورد نظر برای کشت گلخانه‌ای از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری مزرعه پژوهشی پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای واقع در روستای رَمنده، 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[2] [۱۸]، درصد کربن آلی به روش اکسایش تر [۱۹]، رطوبت خاک اشباع، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتر کردن با سود [۲۰]، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور [۲۱]، pH و EC در عصاره گل اشباع [۲۲]، نیتروژن کل خاک به روش هضم کجلدال[3] [۲۳]، فسفر قابل‌استخراج با بی‌کربنات سدیم ۰/۵ مولار به روش اولسن [۲۴]، پتاسیم قابل‌جذب به روش استات آمونیم[4] نرمال [۲۲] و مقدار روی، مس، آهن، منگنز و کادمیم قابل‌جذب به روش DTPA [۲۵] تعیین گردید (جدول ۱).

1. Shoot
2. Hydrometry
3. Kjeldahl
4. Acetate Ammonium

۲.۲ تهیه لجن فاضلاب برای کشت گلخانه‌ای

لجن فاضلاب مورد استفاده از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری جنوب تهران، پس از مرحله آبگیری با دستگاه بلت فیلتر پرس[5]، تهیه شد. با توجه به بررسی منابع، حذف ریزجانداران شاخص بیماری‌زای باکتریایی از لجن فاضلاب نیازمند اعمال دزهای بالا نمی‌باشد (≤۵ kGy) [۲۶-۲۸]. لذا، بررسی روند تغییرات آن‌ها در دزهای کم امکان‌پذیر بوده و در دزهای بالا ریزجانداران شاخص باکتریایی برای بررسی روند تغییرات وجود نخواهد داشت. هم‌چنین بررسی تغییرات ویژگی‌های شیمیایی در دزهای بالا مقدور بوده (<۵ kGy) و مشاهده روند تغییرات آن‌ها نیازمند اعمال دزهای بالا می‌باشد [۲۹-۳۲]. با توجه به مطالب بیان شده، تیمارهای مربوط به اعمال دزهای مختلف براساس مقادیر توصیه‌شده سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا [۲۷] و با در نظر گرفتن مشاهده روند تغییرات ویژگی‌های زیستی و شیمیایی لجن پس از پرتوتابی گاما بود. بنابراین، لجن با دزهای یک‌دوم مقدار توصیه‌شده، مقدار توصیه‌شده و دو برابر مقدار توصیه‌شده سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا (به‌ترتیب ۵، ۱۰ و ۲۰ kGy) پرتوتابی شد. پرتوتابی با دستگاه گاماسل با فعالیت ویژه ۸۶۷۷ Ci و با آهنگ دز ۱۲۴ $Gy.min^{-1}$، کالیبره‌شده با دزیمتر فریک[6] در پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران واقع در تهران انجام شد.

بعد از پرتوتابی، نمونه‌های آزمایش زیستی لجن در ظروف شیشه‌ای در سمباده‌ای استریل و در شرایط درجه حرارت کم‌تر از ۴°C به آزمایشگاه انتقال داده شدند. شمارش کلی کلیفرم‌ها[7] و کلیفرم‌های گرماپای[8] در لجن فاضلاب به روش تخمیر چندلوله‌ای[9] مطابق با روش ۱۶۸۰ سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا انجام گردید [۳۳]. هم‌چنین، باقی نمونه‌های لجن فاضلاب، پس از هوا خشک شدن، کوبیدن، و عبور یافتن از الک ۲ میلی‌متری، برای انجام تجزیه‌های شیمیایی و استفاده از آن‌ها در کشت گلخانه‌ای در ظروف پلی‌اتیلنی نگه‌داری شدند.

5. Belt Filter Press
6. Fricke
7. Total Coliforms
8. Fecal Coliforms
9. Multiple-Tube Fermentation

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

ویژگی خاک	مقدار	ویژگی خاک	مقدار
رس (٪)	۲۸٫۳	ظرفیت تبادل کاتیونی ($cmol_c\ kg^{-1}$)	۱۱٫۷
سیلت (٪)	۱۸٫۰	نیتروژن کل ($mg.kg^{-1}$)	۳۵۰
شن (٪)	۵۳٫۷	فسفر قابل‌جذب ($mg.kg^{-1}$)	۳٫۴
کلاس بافت خاک	لوم رسی شنی	پتاسیم قابل‌جذب ($mg.kg^{-1}$)	۲۶۱
طبقه‌بندی خاک	Typic Haploxerepts	آهن قابل‌جذب ($mg.kg^{-1}$)	۱۲٫۳
pH	۷٫۲	منگنز قابل‌جذب ($mg.kg^{-1}$)	۲٫۸
قابلیت هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	۰٫۹۸	مس قابل‌جذب ($mg.kg^{-1}$)	۰٫۸
کربنات کلسیم (٪)	۶٫۵۳	روی قابل‌جذب ($mg.kg^{-1}$)	۰٫۴
کربن آلی (٪)	۰٫۳۷	کادمیم قابل‌جذب ($mg.kg^{-1}$)	۰٫۲۲
رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (٪)	۱۸٫۱		

۳.۲ کشت گلخانه‌ای

این آزمایش به صورت گلدانی در گلخانه تحقیقاتی پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، در گلدان‌های پلاستیکی با قطر دهانه ۱۵٫۵ cm و ارتفاع ۱۸ cm و گنجایش ۴ kg خاک اجرا گردید. آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و ۱۳ تیمار جمعاً ۳۹ گلدان در پاییز و زمستان ۱۳۹۵ در خاکی با بافت لوم رس شنی[1] انجام شد. برای کشت گلخانه‌ای، خاک تهیه‌شده تهیه‌شده ابتدا از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شد. لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده با دزهای ۵، ۱۰ و ۲۰ kGy و پرتوتابی‌نشده، به میزان صفر، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم بر کیلوگرم (معادل حدود ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ تن در هکتار) قبل از کشت به خاک هر گلدان به‌صورت 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، به هم زدن خاک هر گلدان به‌طور متناوب انجام گردید تا فرایند مخلوط لجن با خاک و رسیدن به تعادل نسبی بهتر انجام شود. انتخاب سطوح لجن فاضلاب براساس نتایج محمودی و همکاران [۳۴] 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 به روش وزنی 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 آن‌ها برداشت شد. سپس ریشه‌ها به‌دقت از خاک خارج گردید. برای جلوگیری از هدررفت ریشه‌های مویین، 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 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، به‌مدت ۷۲ ساعت در آون تهویه‌دار در دمای ۷۰°C قرار داده شدند تا خشک شده و وزن آن‌ها به مقدار ثابتی برسد. نمونه‌های خشک پس از توزین، با استفاده از آسیاب دارای تیغه استیل پودرشده، از الک ۰٫۵ میلی‌متری عبور داده شده و در ظروف پلی‌اتیلنی برای تجزیه‌های شیمیایی نگه‌داری شدند.

۴.۲ اندازه‌گیری ویژگی‌های شیمیایی لجن فاضلاب و گیاه

برای اندازه‌گیری غلظت فسفر، پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم در لجن فاضلاب و نمونه‌های گیاهی و غلظت مس، روی، آهن، منگنز، سرب، کادمیم و نیکل در لجن فاضلاب، هضم آن‌ها با روش خشک‌سوزانی[2] انجام شد. برای این کار، ۲٫۵ g از نمونه‌های لجن فاضلاب و شاخساره گیاه ریحان و ۱ g از نمونه‌های ریشه گیاه ریحان با ترازوی (±۰٫۰۰۱ g) توزین و در

1. Sandy Clay Loam

2. Dry Ashing

بوته‌های چینی ریخته شد. بوته‌ها در کوره الکتریکی قرار داده شدند و دمای کوره در مدت پنج ساعت به تدریج به ۴۹۰°C رسانده شد. نمونه‌ها به‌مدت ۲۴ ساعت در این دما نگه‌داری شدند تا کاملاً خاکستر شده و به رنگ سفید درآیند. پس از خارج کردن نمونه‌ها از کوره، ۱۰ mL از محلول اسید کلریدریک و اسید نیتریک (۳۰۰ mL از HCl غلیظ و ۱۰۰ mL از HNO_3 غلیظ که مجموعاً با آب مقطر به حجم یک لیتر رسانده شد) به آن اضافه شد و در دمای ۱۰۰°C به‌مدت 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 [۳۵]. تعیین نیتروژن شاخساره و لجن فاضلاب با روش کجلدال و pH و EC لجن فاضلاب در نسبت ۱:۵ آب به لجن فاضلاب انجام شد [۳۶]. در عصاره‌های تهیه شده خاک، لجن فاضلاب 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 وانادومولیبدوفسفریک[1] اسید با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل SU6100 ساخت شرکت Philler Scientific آمریکا و سدیم و پتاسیم با دستگاه فیلم فتومتر مدل ۴۱۰ ساخت شرکت Corning انگلستان تعیین گردید. بررسی غلظت عناصر به‌دلیل به‌وجود آمدن اثر رقت، گاهی متناقض به نظر می‌رسد؛ بنابراین، جذب عناصر برحسب میکروگرم در گلدان از حاصلضرب ماده خشک ریشه یا شاخساره (گرم در گلدان) و غلظت عنصر (میلی‌گرم در گرم) تعیین شد.

۵.۲ تحلیل آماری داده‌ها

تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار SAS نسخه ۹٫۱ و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

۳. نتایج و بحث

۱.۳ ویژگی‌های خاک و لجن فاضلاب

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و برخی ویژگی‌های زیستی و شیمیایی لجن فاضلاب مورد استفاده در آزمایش گلخانه‌ای به‌ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارایه شده است. خاک مورد استفاده دارای بافت لوم رس شنی با pH خنثی و غیرشور بود. نتایج حاصل از شمارش کلی کلیفرم‌ها و کلیفرم‌های گرماپای لجن و مقایسه آن با استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا نشان می‌دهد که فقط در دز ۲۰ kGy پرتو گاما، لجن فاضلاب از نظر ویژگی‌های زیستی در کلاس A قرار گرفت ولی در بقیه موارد، مقادیر موجود بالاتر از استاندارد کلاس A سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا بود. کاهش عوامل بیماری‌زای شاخص مانند شمارش کلی کلیفرم‌ها و کلیفرم‌های گرماپای به‌عنوان شاخص عوامل بیماری‌زای باکتریایی پس از پرتوتابی گاما در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش گردیده است [۵، ۱۱]. پایش زیستی و بررسی وجود همه ریزجاندارانی که پتانسیل بیماری‌زایی در انسان دارند، در لجن فاضلاب مورد استفاده برای اهداف کشاورزی اهمیت زیادی دارد، ولی به‌دلیل مشکلات تعیین نوع و تعداد عوامل بیماری‌زا مانند هزینه‌های زیاد تجهیزات آزمایشگاهی، پرسنل و غیره، تعدادی از ریزجاندارن با منشأ روده‌ای مانند شمارش کلی کلیفرم‌ها و کلیفرم‌های گرماپای به‌عنوان شاخصی برای برآورد و تعیین سرنوشت ریزجاندارن بیماری‌زای روده‌ای بررسی می‌شوند [۳۷]. سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا ویژگی‌های یک جاندار شاخص ایده‌آل برای پایش زیستی در جامدات زیستی را مرتبط بودن با منبع عوامل بیماری‌زا، بالا بودن تعداد آن‌ها به اندازه کافی برای اطمینان از تجزیه کمی دقیق، قابلیت اندازه‌گیری با روش‌های ساده، قابل اطمینان، دقیق و ارزان و توانایی مقاومت در برابر مواد گندزدایی‌کننده و تنش‌های محیطی به اندازه مقاوم‌ترین جاندار بیماری‌زای حاضر ذکر کرده است. هم‌چنین سازمان مذکور پیشنهاد داده است که برای کاربرد لجن فاضلاب در زمین باید شمارش کلی کلیفرم‌ها، کلیفرم‌های گرماپای، استرپتوکوک گرماپای[2]، کلستریدیوم پیرفرینگنس[3] و برخی دیگر از باکتریوفاژها به‌عنوان جاندار

1. Vanado-Molybdo Phosphoric Acid

2. Fecal Streptococci
3. Clostridium Perfringens

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

ویژگی لجن	دز جذبی (کیلوگری)				بیشینه غلظت مجاز*
	صفر	۵	۱۰	۲۰	
شمارش کلی کلیفرم (MPN. g^{-1}.dw)	$۲٫۴\times۱۰^{۶}\pm۳٫۵\times۱۰^{۴}$ a	$۲٫۱\times۱۰^{۴}\pm۶٫۹\times۱۰^{۲}$ b	$۵٫۲\times۱۰^{۳}\pm۲٫۳\times۱۰^{۲}$ c	$۸٫۸\times۱۰^{۲}\pm۱٫۳\times۱۰^{۱}$ d	
کلیفرم گرماپای (MPN. g^{-1}.dw)	$۱٫۹\times۱۰^{۵}\pm۳٫۰\times۱۰^{۴}$a	$۶٫۹\times۱۰^{۳}\pm۲٫۰\times۱۰^{۲}$ b	$۲٫۰\times۱۰^{۳}\pm۱٫۰\times۱۰^{۲}$ c	$۵٫۳\times۱۰^{۲}\pm۵٫۱\times۱۰^{۱}$ d	$\geq۱٫۰\times۱۰^{۳}$† $\geq۲٫۰\times۱۰^{۶}$††
نیکل ($mg.kg^{-1}$)	۳۶٫۸±۰٫۷۵a	۳۶٫۳۵±۰٫۲a	۳۵±۱٫۱a	۳۴٫۸±۱٫۶a	۴۲۰
روی ($mg.kg^{-1}$)	۱۴۹۵±۳٫۸a	۱۴۹۱±۷٫۹a	۱۴۸۳±۴٫۴a	۱۴۷۲±۱۳٫۱a	۷۵۰۰
مس ($mg.kg^{-1}$)	۱۶۴٫۲±۱a	۱۶۱٫۸±۱٫۱ab	۱۵۷٫۳±۱٫۹۵bc	۱۵۴٫۷±۲٫۷c	۴۳۰۰
سرب ($mg.kg^{-1}$)	۱۱۷٫۳±۱٫۳a	۱۱۵٫۴±۱٫۸a	۱۱۱٫۳±۳٫۳a	۱۰۸٫۹±۶٫۳a	۸۴۰
کادمیم ($mg.kg^{-1}$)	۳٫۰۳±۰٫۱۸a	۲٫۷۶±۰٫۱۱a	۲٫۶۸±۰٫۱۳a	۲٫۶۲±۰٫۱۲a	۸۵
آهن ($mg.kg^{-1}$)	۵۷۵۰±۱۴٫۴a	۵۷۲۵±۲۸٫۹a	۵۶۸۳±۷۴٫۱a	۵۵۸۳±۵۸٫۳a	
منگنز ($mg.kg^{-1}$)	۱۴۹±۲٫۱a	۱۴۹٫۱۶±۰٫۱۶a	۱۴۵٫۲±۲٫۸۵a	۱۴۵٫۸±۲٫۲a	
منیزیم ($mg.kg^{-1}$)	۴٫۵±۰٫۱۲a	۴٫۶±۰٫۱۳a	۴٫۶±۰٫۲۶a	۴٫۴±۰٫۲۲a	
کلسیم ($mg.kg^{-1}$)	۳۳٫۹±۰٫۸a	۳۴٫۲±۲٫۲a	۳۷٫۸±۱٫۶a	۳۷٫۲±۱٫۴a	
سدیم ($mg.kg^{-1}$)	۱٫۱۳±۰٫۰۸a	۱٫۰۳±۰٫۰۶a	۱٫۱۰±۰٫۰۵a	۱٫۱۶±۰٫۰۶a	
پتاسیم ($mg.kg^{-1}$)	۲٫۰۳±۰٫۰۶a	۲٫۰۷±۰٫۰۸a	۱٫۹۰±۰٫۱۱a	۱٫۹۰±۰٫۱۱a	
فسفر ($mg.kg^{-1}$)	۲٫۴۲±۰٫۰۱a	۲٫۵۳±۰٫۰۴a	۲٫۴۵±۰٫۰۲a	۲٫۵۱±۰٫۰۵a	
نیتروژن ($mg.kg^{-1}$)	۲۶٫۷±۰٫۹۸b	۲۸٫۷±۰٫۴۹ab	۳۰٫۶±۱٫۶۵ab	۳۱±۱٫۵۹a	
pH (۵:۱)	۶٫۹۱±۰٫۰۲a	۶٫۷۵±۰٫۰۶ab	۶٫۶۸±۰٫۰۸ab	۶٫۶۶±۰٫۱۲b	
EC (۵:۱) ($ds.m^{-1}$)	۲٫۹۷±۰٫۰۴a	۲٫۷۵±۰٫۱۲ab	۲٫۷±۰٫۰۸ab	۲٫۶۲±۰٫۱۲b	

در هر سطر، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک در سطح احتمال پنج درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت معنادار ندارند.

*حدود مجاز آلاینده در جامدات زیستی برای کاربرد در زمین [۳۹]

† و †† به‌ترتیب بدون محدودیت استفاده از لحاظ بیماری‌زاها (کلاس A) و محدودیت در برخی موارد (کلاس B)

شاخص در نظر گرفته شود [۳۸]. به‌طورکلی، بر اساس قوانین بخش ۵۰۳ سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا، ریزجانداران شاخص برای بررسی عوامل بیماری‌زای باکتریایی، کلیفرم‌های گرماپای و سالمونلا[1] و شاخص آلودگی انگلی، تخم آسکاریس لومبریکوئید[2] می‌باشد [۳۹]. هنوز برخی پژوهشگران با جانداران شاخص مشخص‌شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا به‌ویژه کلیفرم گرماپای و استرپتوکوک گرماپای به‌عنوان جانداران شاخص پایش گندزدایی جامدات زیستی مخالف بوده و عقیده بر التزام پایش بیماری‌زاهای انتروویروس[3]، رئوویروس[4]، آدنوویروس[5]، گونه‌های سالمونلا، گونه‌های شیگلا[6]، گونه‌های سودوموناس[7]، کاندیدا آلبیکانس[8]، آسپرژیلوس فومیگاتوس[9]، انتاموبا هیستولیتیکا[10]، آسکاریس لومبریکوئید، گونه‌های کرم کدو یا تنیا[11] و گونه شیستوزوما[12] دارند و مسلماً اندازه‌گیری آن‌ها مستلزم تجهیزات پیچیده و پرهزینه می‌باشد [۳۸]. هم‌چنین، مقاومت در داخل هر گروه جاندار هم متفاوت بوده و به گونه و نژاد جاندار بستگی دارد؛ به‌عنوان مثال در داخل باکتری‌ها کلیفرم‌های گرماپای نسبت به گونه‌های سالمونلا و استرپتوکوک گرماپای مقاومت کم‌تری به پرتودهی نشان می‌دهند [۴۰]. واتانیبل و تاکاهیسا [۴۱] با بررسی گندزدایی کیک لجن (لجن آبگیری‌شده) با پرتو گاما گزارش کردند که مقاومت کل باکتری‌ها به پرتوتابی نسبت به کلیفرم‌ها در کیک لجن بیش‌تر بود، به‌طوری‌که برای کاهش تعداد کل باکتری‌ها به زیر حد تشخیص به دز پرتوتابی ۳۰ تا ۵۰ kGy مورد نیاز بود. با استناد به مطالب ذکرشده می‌توان

1. Salmonella
2. Ascaris Lumbricoides
3. Enterovirus
4. Reovirus
5. Adenovirus
6. Shigella
7. Pseudomonas
8. Candida Albicans
9. Aspergillus Fumigatus
10. Entamoeba Histolytica
11. Taenia
12. Schistosoma

بیان نمود که لازم است در پژوهش‌های آتی آلودگی مواد خام سبزی‌ها یا سایر گیاهان کشت‌شده در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده و نشده به انواع بیماری‌زاها و یا اثر پرتوتابی بر سایر ریزجاندارن مانند ویروس‌ها انجام شود، زیرا آلوده بودن احتمالی گیاه کشت‌شده در خاک‌های تیمارشده با لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده به برخی بیماری‌زاها مانند ویروس‌ها، ممکن است سلامت و بهداشت عمومی مردم را در معرض خطر قرار دهد.

لجن فاضلاب مورد استفاده دارای pH=۶٫۹ بوده و با افزایش دز پرتوتابی، pH آن کم‌تر شد. این کاهش pH می‌تواند فراهمی فلزها را افزایش دهد. pH اسیدی برای لجن فاضلاب در پژوهش‌های کاظم‌علیلو و همکاران [۴۲] و کاهش آن با افزایش دز پرتوتابی به‌وسیله گو و همکاران [۴۳] و پروین و همکاران [۳۲] نیز گزارش شده است. مقادیر فلزات سنگین در لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده و نشده از حدود مجاز اعلام شده به‌وسیله سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا کم‌تر بود [۳۹]. غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزهای سنگین (نیکل، روی، سرب، کادمیم، آهن و منگنز) لجن فاضلاب پس از پرتوتابی گاما (در تمام سطوح) تغییر معناداری نکرد اما غلظت مس با افزایش دز پرتوتابی نسبت به لجن پرتوتابی‌نشده به‌طور معناداری کاهش یافت، که نشان‌دهنده پتانسیل آلودگی کم لجن پرتوتابی‌شده در مقایسه با پرتوتابی‌نشده و جنبه مثبت لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده در استفاده از آن در کشاورزی می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان داد که لجن پرتوتابی‌شده و نشده مقادیر منیزیم، کلسیم، سدیم، پتاسیم و فسفر تقریباً برابری داشتند، درحالی‌که مقدار نیتروژن در لجن پرتوتابی‌شده به‌طور معناداری بالاتر از پرتوتابی‌نشده بود (جدول ۲). به‌طور کلی، گزارش جامعی در مورد اثر پرتوتابی بر روند تغییرات ویژگی‌های شیمیایی لجن وجود ندارد. نتایج پاندیا و همکاران [۴۴] نشان داد که پرتوتابی لجن فاضلاب علاوه بر حذف ریزجانداران بیماری‌زا ممکن است منجر به تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لجن شود؛ بنابراین، لجن پرتوتابی‌شده از لحاظ کیفیت با لجن حاصل از روش‌های تصفیه معمولی متفاوت بود. مگناواکا و گراینو [۴۵] مزایای لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده را برای کاربرد کشاورزی بررسی و گزارش کردند که پرتوتابی باعث تجزیه آفت‌کش‌های موجود در لجن، غیرفعال کردن بذر علف‌های هرز (در غیرفعال‌سازی بذور معمولاً پایین‌تر از دز کاربردی برای گندزدایی است)، تولید شکل‌های معدنی نیتروژن و به تبع آن افزایش فراهمی نیتروژن برای گیاهان می‌شود. مگناواکا [۱۰] گزارش کرد که پرتوتابی لجن خشک و مایع باعث آزاد شدن آمونیم و به تبع آن افزایش غلظت نیترات در خاک به‌دلیل نیترات‌سازی، با کاربرد مقادیر کم لجن پرتوتابی‌شده در مقایسه با پرتوتابی‌نشده گردید. پیریدارشینی و همکاران [۹] گزارش کردند که پرتوتابی نه‌تنها بر ارزش غذایی لجن اثر منفی نداشت، بلکه سبب افزایش غلظت عناصر غذایی فسفر، آهن و نیتروژن و کاهش غلظت فلز سنگین سرب شد. چو و همکاران [۴۶] تأثیر پرتو گاما با دز صفر، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ kGy را بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی لجن فاضلاب تهیه‌شده از مخزن هوازی بررسی و گزارش کردند که پرتوتابی منجر به متلاشی کردن توده لجن و آزادسازی پروتئین‌ها، پلی‌ساکاریدها و آنزیم‌های برون‌سلولی به داخل توده محلول شد؛ به‌طوری‌که پروتئین آزادشده از توده لجن بسیار بیش‌تر از پلی‌ساکاریدها بوده و در نتیجه غلظت کربن آلی، فسفر و نیتروژن کل بعد از پرتوتابی افزایش یافت. بعد از پرتوتابی بر اثر تبدیل نیترات به گاز N_2 یا N_2O از طریق واکنش‌های کاهشی با الکترون هیدراته غلظت نیترات به‌سرعت کاهش یافت. غلظت آمونیم تا دز ۹ kGy افزایش و بعد از آن اندکی کاهش داشت، به‌طوری‌که آمونیم شکل عمده نیتروژن معدنی بود. علت احتمالی افزایش غلظت آمونیم، تغییر شکل کم‌تر نیتروژن آلی (بخش پروتئین سلولی) از سلول‌های تجزیه‌شده و کاهش آن نیز، اکسایش آمونیم با الکترون هیدراته در دزهای بالای پرتوتابی عنوان شد. راتد و همکاران [۷] لجن فاضلاب به‌صورت مایع و پرتوتابی‌شده با دز ۳ تا ۴ kGy و نشده را پس از تهیه از مرکز پرتوتابی لجن فاضلاب گایسبلاچ[1] هند، در مزرعه آفتاب خشک و ویژگی‌های شیمیایی آن‌ها در لجن خشک را تعیین کردند. نتایج نشان‌دهنده تفاوت اندک بین ویژگی‌های شیمیایی لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده و نشده بود. مقدار نیتروژن در لجن پرتوتابی‌شده بیش‌تر از پرتوتابی‌نشده بوده، درحالی‌که مقدار پتاسیم و فسفر در پرتوتابی‌نشده بیش‌تر بود. راتد و همکاران [۸] در تحقیقی دیگر، لجن فاضلاب مایع و پرتوتابی‌شده با دز بین ۳ تا ۴ kGy و نشده را پس از تهیه از مرکز پرتوتابی لجن فاضلاب وادودارا هند، در مزرعه محل کشت خشک، خرد و از الک عبور دادند.

1. Geiselbullach

لجن خشک با مخلوط دو اسید، اسید نیتریک و پرکلریک با نسبت ۲:۱ هضم‌شده و در عصاره حاصل، غلظت عناصر غذایی پرمصرف فسفر و پتاسیم و عناصر غذایی کم‌مصرف (آهن، روی، منگنز و مس) و فلزهای سنگین (سرب، کادمیم، نیکل و کبالت) تعیین شد. نتایج آنان نشان داد که لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده و نشده مقدار نیتروژن و فسفر تقریباً برابری داشتند. اکثر ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی لجن به‌جز برخی عناصر غذایی کم‌مصرف و فلزات سنگین بعد از پرتوتابی بدون تغییر باقی ماندند. مس، روی، منگنز و سرب در لجن پرتوتابی‌شده بسیار بیش‌تر از پرتوتابی‌نشده بود. آنان دلیل آن را افزایش شکل‌های قابل‌جذب فلزات ناشی از تخریب کمپلکس‌های آلی محلول پس از پرتوتابی گاما دانستند. ال-موتایم [۵] گزارش کرده است که فلزات سنگین شکل‌های مختلفی (مانند محلول، تبادلی، کربناتی، کمپلکس‌شده با مواد آلی، کمپلکس‌شده با اکسیدهای آهن و منگنز، باقی‌مانده و غیره) دارند که در پویایی آن‌ها در خاک و قابلیت استخراج به‌وسیله گیاهان مختلف تأثیر دارد. با استناد به مطالب ذکرشده می‌توان بیان نمود دلیل کاهش غلظت مس و یا افزایش غلظت نیتروژن ممکن است تأثیر پرتوتابی بر توده لجن، آزاد شدن شکل‌های معدنی نیتروژن، تغییر شکل‌های مختلف مس از قابل‌جذب به غیرقابل‌جذب و به‌تبع آن کاهش قابلیت استخراج آن‌ها با عصاره‌گیر مورد استفاده باشد. از طرف دیگر، در مورد عدم تغییر اکثر ویژگی‌های شیمیایی لجن فاضلاب تحت تأثیر پرتو گاما می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به اینکه لجن فاضلاب ساختار شیمیایی پیچیده از نظر آلاینده‌های مختلف آلی، معدنی و زیستی دارد، این امر می‌تواند به رقابت بین رادیکال‌های آزاد تولیدشده با رادیولیز آب شامل رادیکال هیدروکسیل، هیدروژن، الکترون هیدراته و غیره برای واکنش با مولکول‌های آلی و معدنی موجود در لجن، کاهش دسترسی رادیکال‌های آزاد حاصل از رادیولیز آب به مولکول‌های مختلف موجود در لجن با واکنش‌های بازترکیبی رادیکال- رادیکال و رقابت بین مولکول‌های مختلف و محصولات فرعی حاصل از آن‌ها برای واکنش با رادیکال‌ها نسبت داده شود [۴۷].

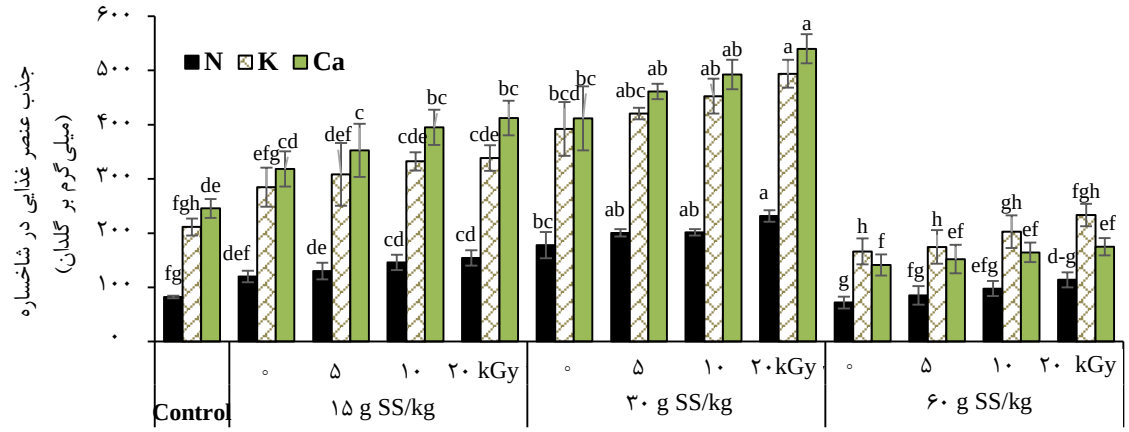
۲.۳ جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم شاخساره

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، نشانگر معنادار شدن اثر تیمارها بر جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم شاخساره در سطح احتمال یک‌دهم درصد می‌باشد ($P\leq$ ۰/۰۰۱). نتایج مقایسه میانگین‌های مربوط به اثر تیمارها بر جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم شاخساره در شکل‌های ۱ و ۲ گزارش شده است. کاربرد لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده و نشده در سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم سبب افزایش جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم شاخساره گردیده است، هرچند که این افزایش در برخی تیمارها نسبت به شاهد معنادار نبوده است. به نظر می‌رسد علت افزایش جذب عناصر مذکور در شرایط مصرف ۱۵ و g ۳۰ لجن فاضلاب به‌دلیل فراهم آوردن سطوح مناسبی از آن‌ها و افزایش ماده خشک گیاه از یک طرف و افزایش فعالیت‌های متابولیسمی گیاه و تأمین انرژی مورد نیاز برای جذب فعال عناصر به تبع آن افزایش غلظت عناصر از طرف دیگر باشد. هم‌چنین کاربرد ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن پرتوتابی‌شده و نشده با هر دز مورد آزمایش، بر جذب فسفر، منیزیم، سدیم، نیتروژن و پتاسیم تأثیر معناداری نداشتند ولی باعث کاهش معنادار جذب کلسیم نسبت به شاهد گردید.

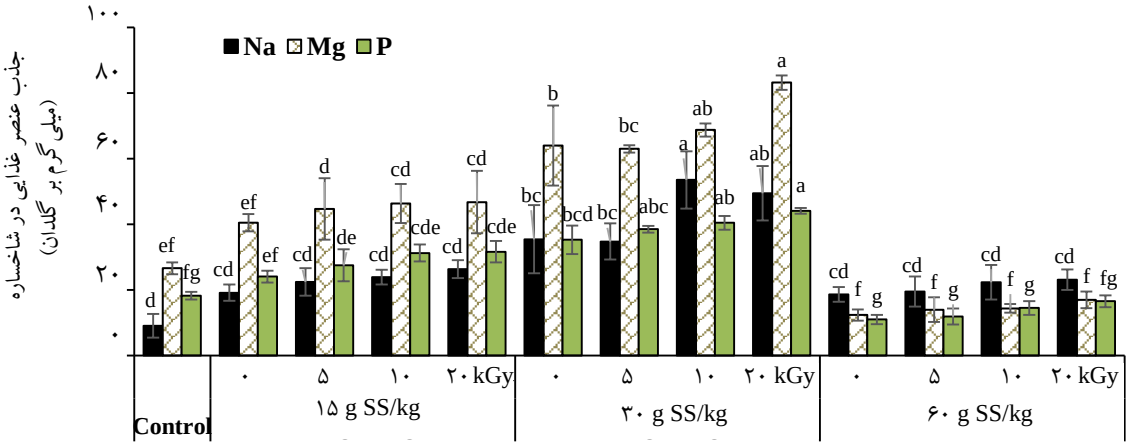
جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر جذب عناصر غذایی پرمصرف و سدیم در شاخساره گیاه ریحان.

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات					
		نیتروژن	پتاسیم	سدیم	کلسیم	منیزیم	فسفر
تیمار	۱۲	۷۸۴۳/۹۱***	۳۵۳۰۱/۰۱***	۴۷۸/۲۲**	۵۷۹۲۶/۹۷***	۱۶۶۸/۹۱***	۳۸۶/۴۵***
خطا	۲۶	۵۳۶/۶۲	۲۹۶۷/۴۴	۹۱/۴۲	۲۹۱۷/۵۸	۹۳/۹۵	۲۰/۰۴
ضریب تغییرات (٪)		۱۶/۶۰	۱۷/۶۵	۳۴/۷۳	۱۶/۴۷	۲۳/۲۷	۱۶/۸۶

** و *** به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال ۱ و ۰/۱ درصد



شکل ۱. اثر دزهای مختلف پرتوتابی گاما و سطوح لجن فاضلاب بر جذب نیتروژن، پتاسیم و کلسیم در شاخساره گیاه ریحان (در هر عنصر غذایی، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک در سطح احتمال پنج درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت معنادار ندارند).



شکل ۲. اثر دزهای مختلف پرتوتابی گاما و سطوح لجن فاضلاب بر جذب فسفر، منیزیم و سدیم در شاخساره گیاه ریحان (در هر عنصر غذایی، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک در سطح احتمال پنج درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت معنادار ندارند).

در همین راستا محمودی و همکاران [۳۴] طی پژوهشی به این نتیجه رسیدند مصرف ۳۰ و g ۶۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک در شرایط کمبود متوسط و شدید آب در خاک (۰٫۵۶-۰٫۷۵ و ۰٫۳۴-۰٫۵۰ ظرفیت مزرعه‌ای) منجر به افزایش معنادار غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم علوفه یونجه نسبت به سطح شاهد شد. هم‌چنین، چو و همکاران [۴۸] در یک آزمایش گلدانی، با گیاه Mangifera persiciforma کشت شده تحت تیمار لجن فاضلاب به مقادیر صفر، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰ درصد وزنی خاک گزارش کردند که بیش‌ترین ارتفاع گیاه، عملکرد زیست‌توده و جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم با کاربرد ۳۰ درصد وزنی لجن فاضلاب (نسبت معقول کاربرد لجن) حاصل شد. نجفی و همکاران [۴۹] نیز گزارش نمودند با کاربرد کود دامی و لجن فاضلاب (صفر، ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم خاک) و افزایش سطح مصرفی آن‌ها، جذب و غلظت فسفر در ریشه و شاخساره، جذب کلسیم در ریشه و شاخساره و جذب و غلظت سدیم شاخساره افزایش یافت. جذب و غلظت کلسیم در شاخساره با کاربرد کود دامی و افزایش سطح مصرفی آن افزایش یافت ولی با مصرف لجن فاضلاب کاهش یافت. آساگی و یوئنو [۵۰]، تأثیر کاربرد لجن فاضلاب بر شاخص‌های رشد، عملکرد و جذب عناصر غذایی گیاه کلزا[1] را با استفاده از روش غیرمستقیم ^{15}N بررسی و با تیمارهای کود شیمیایی (کلرید آمونیوم) و شاهد مقایسه و گزارش کردند که غلظت فسفر، کلسیم و منیزیم در برگ‌های گیاهان رشد کرده در تیمار لجن فاضلاب نسبت به

1. Brassica Campestris

کود شیمیایی و شاهد، افزایش معناداری داشت. در پژوهشی دیگر، بزگورت و یاریلقاچ [۵۱] تأثیر کاربرد مقادیر مختلف لجن فاضلاب (صفر، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ کیلوگرم بر هر درخت) و کود دامی (۲۵ کیلوگرم بر درخت) بر عملکرد میوه، رشد تغذیه و تجمع فلزهای سنگین در درختان سیب را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مصرف لجن فاضلاب در یک خاک آهکی، موجب افزایش معنادار عملکرد میوه، رشد بخش هوایی و غلظت نیتروژن، منیزیم، آهن، منگنز و روی شد. مقادیر افزایش در پارامترهای مذکور برای تیمار کود دامی کم‌تر از لجن فاضلاب بود. کاربرد لجن فاضلاب و کود دامی، نتوانست تغییر معناداری در قطر تنه درختان و غلظت فسفر، پتاسیم، کلسیم، نیکل، کروم و کادمیم در برگ گیاهان، ایجاد کند. چنگ و همکاران [۵۲] نیز در یک آزمایش گلخانه‌ای تأثیر مقادیر مختلف کمپوست لجن فاضلاب را روی گیاه چاودار چندساله بررسی و اعلام کردند که مقادیر ۵ تا ۲۰ درصد جرمی کمپوست لجن فاضلاب منجر به تولید بیش‌ترین عملکرد علوفه و حداکثر جذب عناصر غذایی در هر سه چین، در مقایسه با تیمار شاهد شد. به‌طور کلی، در مورد تغییرات جذب عناصر غذایی در شاخساره گیاه ریحان می‌توان بیان نمود که با توجه به محاسبه جذب از حاصلضرب غلظت و ماده خشک، افزایش جذب در سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب ناشی از افزایش غلظت عناصر و افزایش ماده خشک گیاه با مصرف لجن فاضلاب به‌دلیل 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 عناصر در شاخساره با وجود کاهش ماده خشک آن می‌باشد. در مورد افزایش غلظت عناصر در شاخساره تحت تیمار لجن فاضلاب می‌توان گفت که این امر ناشی از افزایش فراهمی این عناصر در خاک می‌باشد. در گزارش‌های مختلفی به افزایش فراهمی عناصر غذایی تحت تأثیر لجن فاضلاب در خاک اشاره شده است [۵۳-۵۶]. در واقع لجن فاضلاب به‌عنوان یک کود آلی کندرها عمل کرده و به تدریج تجزیه شده و عناصر غذایی را به گیاه عرضه می‌کند. دهقان منشادی و همکاران [۵۷] گزارش کردند که تغییرهای شیمیایی و زیستی در خاک به‌دنبال استفاده از لجن فاضلاب فرایندهای مهمی بوده که بر معدنی شدن و فراهمی عناصر غذایی برای گیاه نقش مهمی دارند. طبق این گزارش، کاربرد لجن فاضلاب در سطوح ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار و ۲۰ و ۴۰ تن +۵۰ درصد کود شیمیایی باعث افزایش میزان کربن آلی، تنفس میکروبی و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی و اسیدی نسبت به شاهد گردید ولی میزان افزایش فعالیت آنزیمی و تنفس خاک در در مقادیر بالای مصرف لجن فاضلاب روند کاهشی داشت. تنفس میکروبی خاک نشان‌دهنده میزان در دسترس بودن مواد آلی خاک و فعالیت بیش‌تر آنزیم‌ها نشان‌دهنده بالا بودن فعالیت ریزجانداران و افزایش سرعت فرایند معدنی شدن عناصر و به‌تبع آن افزایش جذب توسط گیاه می‌باشد. سینگ و آگراوال [۵۶] 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 ـ وِلا و همکاران [۵۳] 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 فلفل[1]، بیان کردند که کاربرد کمپوست لجن فاضلاب، EC و ماده آلی خاک را افزایش و pH آن را کاهش داد. سطوح نیتروژن کل و نیترات، یک روند افزایشی متناسب با مقادیر کمپوست، نشان دادند. سینگ و آگراوال [۵۸] برای مطالعه اثر اصلاح‌گر لجن فاضلاب بر گیاه چغندر[2]، 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 درحالی‌که قابلیت هدایت الکتریکی، کربن آلی، نیتروژن کل، فسفر قابل‌جذب، سدیم، پتاسیم و کلسیم تبادلی در خاک اصلاح شده با لجن فاضلاب در مقایسه با خاک شاهد، افزایش یافتند. شواهد موجود نشان می‌دهد که کاهش ماده خشک گیاه در سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب و به‌تبع آن کاهش جذب عناصر غذایی می‌تواند ناشی از افزایش شوری محلول خاک باشد [۳۴]. تأثیر منفی سطوح بالای لجن

1. Capsicum Annuum Var. Annuum
2. Beta Vulgaris L.

فاضلاب بر رشد گیاه در مطالعات لَخدار و همکاران [۵۹] در گیاه گندم[1] و محمودی و همکاران [۳۴] در گیاه یونجه نیز گزارش شده است.

بیش‌ترین جذب نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، فسفر و منیزیم از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده با دز ۲۰ kGy و بیش‌ترین جذب سدیم از کاربرد همان سطح لجن با دز پرتوتابی ۱۰ kGy حاصل شد. در تیمارهای مذکور جذب نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، فسفر، منیزیم و سدیم نسبت به شاهد به‌ترتیب ۱۸۱، ۱۳۴، ۱۲۰، ۱۴۱، ۲۱۳، ۴۸۹ درصد افزایش یافت. هم‌چنین از نتایج به‌دست آمده مشهود است که با کاربرد لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده در هر سطح نسبت به پرتوتابی‌نشده جذب نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، فسفر، منیزیم و سدیم افزایش یافته است، هرچند که این اثر مثبت در اکثر تیمارها معنادار نبوده است. به‌طوری‌که نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، سدیم، منیزیم و فسفر به‌ترتیب افزایش ۲۸٫۶، ۱۹، ۲۹٫۴، ۳۷٫۵، ۱۵٫۴ و ۳۱٫۵ درصد در سطح g ۱۵، ۳۰٫۲، ۲۶، ۳۱٫۱، ۳۹٫۵، ۳۰ و ۲۵ درصد در سطح g ۳۰ و ۵۸٫۲، ۴۰٫۲، ۲۴، ۲۴٫۳، ۳۷٫۳، ۵۰٫۳ درصد در سطح g ۶۰ لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده با دز ۲۰ kGy نسبت به پرتوتابی‌نشده نشان دادند. در مورد تأثیر مثبت (هرچند غیرمعنادار) لجن پرتوتابی‌شده نسبت به نشده بر جذب عناصر می‌توان گفت که اگرچه تغییرات بارزی در غلظت اکثر عناصر خود لجن فاضلاب ایجاد نشده است ولی با غیرفعال‌سازی ریزجانداران بیماری‌زای خطرناک (کاهش شمارش کلی کلیفرم‌ها و کلیفرم‌های گرماپای به‌عنوان ریزجانداران شاخص باکتریایی به شرایط کلاس A از نظر ویژگی‌های زیستی لجن فاضلاب در دز پرتوتابی ۲۰ kGy) و بازدارنده‌های رشد و به‌تبع آن افزایش ماده خشک می‌تواند جذب عناصر به‌وسیله گیاه در تیمارهای دارای لجن پرتوتابی‌شده افزایش دهد. بنابراین، این نتایج با یافته‌های مگناواکا و گراینو [۴۵]، احمد و همکاران [۱۷] و لیمام و همکاران [۱۱] هم‌خوانی دارد. پاندیا و همکاران [۶۰] نشان دادند که لجن پرتوتابی نشده باعث کاهش معنادار طول ریشه و وزن‌تر و خشک گیاه نخود در مقایسه با شاهد شد، ولی با کاربرد لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده، مواد سمی بازدارنده‌ی رشد در لجن حذف گردید. زو و همکاران [۶۱] بیان کردند که مقدار نیتروژن معدنی‌شده در خاک‌های تیمار شده با لجن پرتوتابی‌شده با دز ۵ kGy در مقایسه با پرتوتابی‌نشده مخصوصاً در پنج هفته اول بعد از کاربرد بیش‌تر بود، زیرا پرتوتابی با تغییر شکل و احتمالاً به‌دلیل تخریب کمپلکس‌های پایدار ترکیب‌های نیتروژن آلی، باعث افزایش معدنی شدن و زیست فراهمی عناصر غذایی و افزایش عملکرد محصولات می‌گردد. عملکرد گندم و برنج با مصرف لجن پرتوتابی‌شده به‌طور معناداری بیش‌تر از لجن پرتوتابی‌نشده (افزایش عملکرد ۱۰ تا ۳۰ درصد در گندم و کم‌تر از ۱۰ درصد در برنج) و کم‌تر از کودهای معدنی بود. آنان افزایش عملکرد با لجن پرتوتابی‌شده را به افزایش معدنی شدن نیتروژن آلی، تشکیل مقادیر بیش‌تری از مواد آلی محلول بر اثر شکستن بخش‌های با وزن مولکولی زیاد مواد آلی محلول و افزایش فراهمی عناصر غذایی نسبت دادند.

ال ـ موتایم و همکاران [۶۲] نیز با بررسی قابلیت جذب نیتروژن از منابع کود سولفات آمونیم، لجن فاضلاب و خاک نشان‌دارشده با ^{15}N در گیاه گوجه‌فرنگی بیان کردند که افزایش ماده خشک، عملکرد و بازیابی نیتروژن با کاربرد لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده بیش‌تر از لجن فاضلاب پرتوتابی‌نشده بود. مقدار بازیابی نیتروژن توسط گوجه‌فرنگی در عدم حضور لجن فاضلاب تنها ۱۴ درصد، درحالی‌که در حضور لجن پرتوتابی‌نشده ۱۷ تا ۳۴ درصد و پرتوتابی‌شده ۲۱ تا ۳۹ درصد بود. لیمام و همکاران [۱۱] با کاربرد حجم‌های مختلف (۱ تا ۵ mL بر ۳۰ g خاک) از لجن بی‌هوازی پرتوتابی‌شده با دزهای ۰٫۵ تا ۴٫۵ kGy گاما گزارش نمودند که به‌کارگیری ۱ تا ۳ mL لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده با دزهای ۳٫۵ و ۴٫۵ kGy رشد گیاه باقلا را نسبت به شاهد (عدم کاربرد لجن و یا کاربرد لجن پرتوتابی‌نشده) افزایش داد، درحالی‌که استفاده از ۵ mL لجن پرتوتابی‌شده تفاوت معناداری با شاهد نداشت. مگناواکا [۱۰] با بررسی کارایی مصرف نیتروژن و فسفر به کمک رادیوایزوتوپ ^{15}N و ^{32}P در لجن پرتوتابی‌شده و نشده بیان داشتند که فراهمی نیتروژن برای گیاه علف چاودار در لجن پرتوتابی‌شده، حدود ۶۰ درصد بیش‌تر از لجن پرتوتابی‌نشده بود، ولی پرتوتابی تأثیری بر فراهمی فسفر نداشت. در گیاه نیشکر نیز لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده در مقداری معادل با نیتروژن توصیه‌شده، باعث افزایش عملکرد گیاه شد، درحالی‌که لجن پرتوتابی‌نشده

1. Triticum Durum L.

هیچ اثری نداشت. آنان دلیل آن را به تأثیر پرتوتابی بر مقدار نیتروژن لجن نسبت دادند. به‌طور کلی، کاربرد ۷ تن بر هکتار لجن پرتوتابی‌نشده اثری مشابه با ۳٫۵ تن بر هکتار لجن پرتوتابی‌شده داشت.

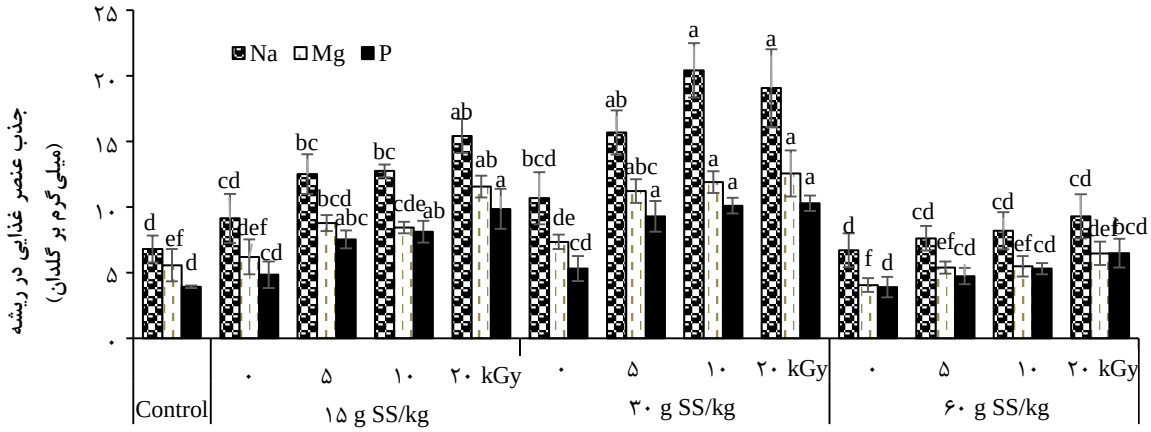
۳.۳ جذب فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم ریشه

تجزیه واریانس اثر تیمارها بر جذب فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم نشان داد که تأثیر تیمارها بر جذب فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم در ریشه در سطح احتمال یک‌دهم درصد معنادار بود ($P\leq$ ۰٫۰۰۱) (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با کاربرد سطوح ۱۵ و ۳۰ g لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده و نشده بر kg خاک در این پژوهش، جذب فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم ریشه نسبت به شاهد افزایش داشت (شکل‌های ۳ و ۴)، هرچند این افزایش در برخی تیمارها نسبت به شاهد معنادار نبود.

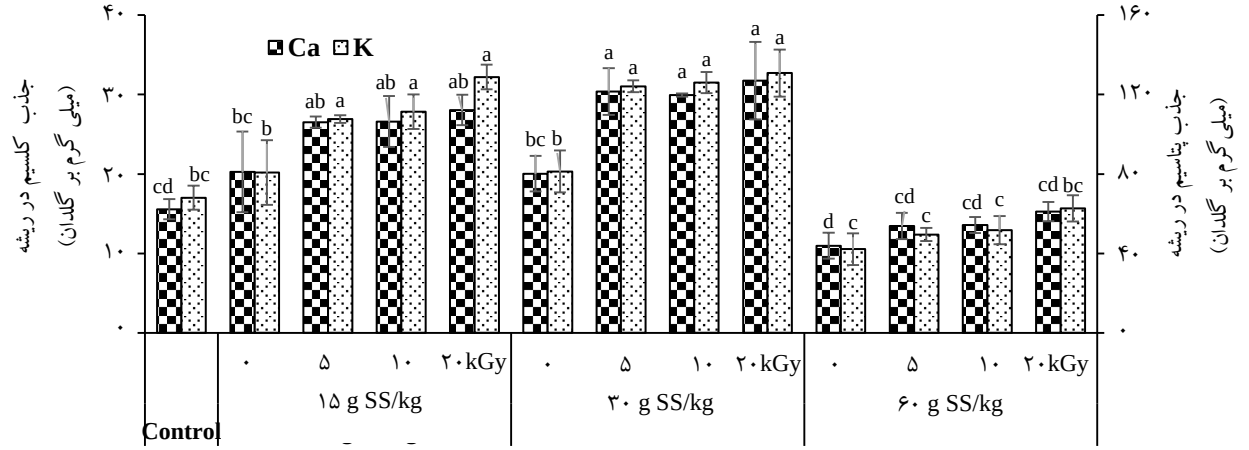
جدول ۴. تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر جذب عناصر غذایی پرمصرف و سدیم در ریشه گیاه ریحان.

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		پتاسیم	سدیم	کلسیم	منیزیم	فسفر
تیمار	۱۲	۳۲۹۹٫۶۵***	۶۳٫۱۳***	۱۶۶٫۵۵***	۲۵٫۱۳***	۱۷٫۵۳***
خطا	۲۶	۲۰۲٫۱۳	۸٫۲۹	۲۰٫۱۴	۲٫۶۱	۲٫۲۸
ضریب تغییرات (٪)		۱۵٫۸۶	۲۴٫۲۶	۲۰٫۶۵	۲۰٫۰۰	۲۱٫۸۸

*** معنادار در سطح احتمال ۰٫۱ درصد



شکل ۳. اثر دزهای مختلف پرتوتابی گاما و سطوح لجن فاضلاب بر جذب فسفر، منیزیم و سدیم در ریشه گیاه ریحان (در هر عنصر غذایی، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک در سطح احتمال پنج درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت معنادار ندارند).



شکل ۴. اثر دزهای مختلف پرتوتابی گاما و سطوح لجن فاضلاب بر جذب کلسیم و پتاسیم در ریشه گیاه ریحان (در هر عنصر غذایی، میانگین‌های دارای یک حرف لاتین مشترک در سطح احتمال پنج درصد با آزمون چنددامنه‌ای دانکن تفاوت معنادار ندارند).

بررسی‌ها نشان داده است اثر مثبت لجن فاضلاب بر جذب عناصر غذایی پرمصرف در ریشه ناشی از آزاد شدن تدریجی عناصر در خاک و جذب آن توسط گیاه می‌باشد. با جذب عناصر نه تنها غلظت آن بلکه رشد گیاه نیز افزایش می‌یابد. لذا با محاسبه جذب از طریق حاصلضرب غلظت و وزن ماده خشک، مقادیر آن افزایش یافت. نتایج مشابهی توسط نجفی و همکاران [۴۹] گزارش شده است که با مصرف ۱۵ و ۳۰ g لجن فاضلاب و کود دامی بر کیلوگرم خاک جذب فسفر و کلسیم ریشه افزایش یافت. بیش‌ترین میزان جذب عناصر مذکور در ریشه از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن پرتوتابی‌شده با دز ۲۰ kGy حاصل شد؛ به‌طوری‌که افزایش جذب در تیمار مذکور برای عناصر فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم به‌ترتیب ۱۶۲، ۹۲، ۱۰۵، ۱۲۶ و ۱۸۰ درصد می‌باشد. در این رابطه می‌توان گفت که لجن فاضلاب علاوه بر دارا بودن عناصر ضروری رشد گیاه (جدول ۲) و نقش حیاتی این عناصر در ساختار و راه‌اندازی بسیاری از فرایندهای متابولیکی گیاه [۶۳]، دارای غلظت بالایی از بازدارنده‌های رشد گیاه مانند ترکیبات آلی و معدنی سمّی از قبیل فلزات سنگین، هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی، هیدروکربن‌های کلره، ترکیبات فنلی، دیوکسین، فتالات و سورفکتانت، به‌دلیل مقاوم بودن و عدم‌تجزیه در فرایندهای متداول تصفیه فاضلاب و لجن آن از قبیل لجن فعال، هضم بی‌هوازی و غیره می‌باشد [۵]. هرچند گزارش جامعی در مورد اثر پرتوتابی بر روند تغییرات ویژگی‌های شیمیایی لجن وجود ندارد، ولی به هرحال گزارش‌های ضد و نقیضی در مورد تغییر برخی ویژگی‌های شیمیایی مانند غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و پرمصرف و فلزات سنگین در دزهای پرتوتابی استفاده‌شده برای گندزدایی لجن وجود دارد [۳۷] که پیش از این در قسمت جذب عناصر غذایی در شاخساره و ویژگی‌های لجن فاضلاب مورد استفاده در این پژوهش ذکر گردید. علاوه بر این، ال- موتایم و همکاران [۶۲] اثرهای پرتو گاما با دزهای ۱ تا ۱۰ kGy را با افزایش ۱ kGy بر تخریب آلاینده‌های آلی لجن مرطوب و خشک بررسی و گزارش کردند که غلظت بالایی از هیدروکربن‌های آروماتیک حلقوی در لجن مرطوب در مقایسه با لجن خشک وجود داشت. این ترکیبات با پرتوتابی حتی در دزهای پایین تخریب‌شده، به‌طوری‌که در ۲ تا ۱۰ kGy، غلظت کل ترکیبات مذکور را از ۵۳ تا ۷۵ درصد در لجن مرطوب و از ۲۶ تا ۶۳ درصد در لجن خشک کاهش داد. هم‌چنین، لجن فاضلاب شامل عوامل بیماری‌زای مختلف گیاهی مانند ویروس‌ها، قارچ‌ها، باکتری‌ها بوده که با پرتوتابی این ریزجاندارن بازدارنده رشد حذف و رشد و عملکرد گیاه بهبود می‌یابد [۳۷، ۴۴]. بنابراین، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که به‌دست آمدن بیش‌ترین جذب عناصر غذایی در سطح ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده با دز ۲۰ kGy می‌تواند به‌دلایل حذف انواع مختلف بازدارنده‌های رشد گیاه باشد. هم‌چنین کاربرد سطح بالای لجن فاضلاب (۶۰ گرم بر کیلوگرم خاک) اعم از پرتوتابی‌شده و نشده سبب کاهش جذب عناصر کلسیم و پتاسیم در ریشه نسبت به شاهد گردیده است. در مورد سایر عناصر مورد بررسی نیز مانند فسفر و سدیم فقط با کاربرد سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن پرتوتابی‌نشده و منیزیم در دزهای ≥ ۱۰ kGy لجن پرتوتابی‌شده و پرتوتابی‌نشده کاهش جذب نسبت به شاهد مشاهده گردید. بیش‌ترین بازدارندگی در جذب عناصر فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم ریشه با کاربرد سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن پرتوتابی‌نشده مشاهده شد؛ به‌طوری که تیمار مذکور باعث کاهش ۲۹٫۴، ۳۸٫۱، ۲۷٫۱، ۱٫۵ و ۰٫۵ درصد به‌ترتیب در جذب کلسیم، پتاسیم، منیزیم، سدیم و فسفر شدند. با توجه به نتایج می‌توان بیان نمود که کاربرد لجن پرتوتابی‌شده نسبت به نشده در سطح بالا، اثرهای بازدارندگی در این سطح را تعدیل نموده است. در مورد اثر کاهشی سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب می‌توان بیان نمود که این اثر به‌دلیل افزایش شوری محلول خاک می‌باشد که باعث کاهش رشد و توسعه گیاه و وزن ریشه خشک شده است. در تأیید نتایج حاضر، کاهش وزن ریشه خشک با مصرف سطوح بالای لجن فاضلاب در مطالعات محمودی و همکاران [۳۴] نیز گزارش گردیده است.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج، مشهود است که کاربرد لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده و نشده در سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم بر کیلوگرم خاک سبب افزایش جذب فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم ریشه و شاخساره و نیتروژن شاخساره گردید. بیش‌ترین جذب

نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم شاخساره و فسفر، پتاسیم، منیزیم و کلسیم ریشه از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده با دز ۲۰ kGy حاصل گردید. بیش‌ترین مقدار جذب سدیم ریشه و شاخساره نیز از کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده با ۱۰ kGy مشاهده شد. هم‌چنین کاربرد ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده و نشده با هر یک از دزهای مورد مطالعه در این بررسی بر جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم و سدیم شاخساره و فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و سدیم ریشه تأثیر معناداری نداشت ولی باعث کاهش معنادار جذب کلسیم شاخساره نسبت به شاهد گردید. بیش‌ترین بازدارندگی در جذب عناصر در ریشه و شاخساره با کاربرد سطح ۶۰ گرم بر کیلوگرم لجن پرتوتابی‌نشده مشاهده شد. با کاربرد لجن پرتوتابی‌شده نسبت به پرتوتابی‌نشده در هر سطح، مقدار جذب تمام عناصر مذکور در ریشه و شاخساره افزایش یافت، هرچند که این اثر مثبت در اکثر تیمارها معنادار نبود. می‌توان جمع‌بندی نمود که اگرچه بدون در نظر گرفتن هزینه پرتوتابی، کاربرد ۳۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب پرتوتابی‌شده با دز ۲۰ kGy می‌تواند به‌عنوان تیمار مناسب برای جذب بهینه عناصر غذایی در گیاه دارویی ریحان پیشنهاد شود. اما با توجه به این‌که افزایش دز پرتوتابی بر جذب عناصر غذایی تأثیر معناداری نداشت و از طرف دیگر هزینه پرتودهی لجن فاضلاب خیلی زیاد می‌باشد، لذا دز پرتودهی ۵ kGy به‌عنوان دز بهینه پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

1. *Study of the mechanisms of gamma rays in purification and disinfection of sewage sludge*, J. Radiat. Nucl. Technol. **2**(1), 9 (2015a). (In Persian).
2. I.S. Turovskiy, P. Mathai, *Wastewater sludge processing*, (Wiley Interscience, New Jersey, 2006).
3. B. Bina, H. Movahedian, A. Amini, *Evaluation of potentially harmful substances in dried sludge of Isfahan Wastewater Treatment Plants*, J. Water. Wastewater **15**(1), 34 (2004). (In Persian).
4. Sh. Shafieepour, B. Ayati, H. Ganjidoust, *Reuse of Sewage Sludge for Agricultural Soil Improvement (Case Study: Kish Island)*, J. Water. Wastewater **22**(2), 85 (2011). (In Persian).
5. R. El-Motaium, in: Proceedings of the 2nd Environmental Physics Conference, Application of nuclear techniques in environmental studies and pollution control, (Alexandria, Egypt, 2006), 169-182 (2006).
6. A. Chmielewski, *Practical applications of radiation chemistry*, Russ. J. Phys. Chem. A., **81**, 1488 (2007).
7. P.H. Rathod et al. *Recycling gamma irradiated sewage sludge as fertilizer: A case study using onion (Alium cepa).* Appl. Soil. Ecol. **41** (2), 223 (2009).
8. P.H. Rathod, J.C. Patel, A.J. Jhala, *Potential of gamma irradiated sewage sludge as fertilizer in radish: evaluating heavy-metal accumulation in sandy loam soil. Commun. Soil*. Sci. Plant. Anal. **42** (3), 263 (2011).
9. J. Priyadarshini, P. Roy, A. Mazumdar, *Qualitative and Quantitative Assessment of Sewage Sludge by Gamma Irradiation with Pasteurization as a Tool for Hygienization*. J. Institut. Engine. (India): Series A **95** (1), 49 (2014).
10. C. Magnavacca, in: *Irradiated sewage sludge for application to cropland*, (International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2002).
11. R.D. Limam et al. *Assessment of the toxicity and the fertilizing power from application of gamma irradiated anaerobic sludge as fertilizer: Effect on Vicia faba growth.* Radiat. Phys. Chem. **150**, 163 (2018).
12. B. Asgari Lajayer, M. Ghorbanpour, S. Nikabadi, *Heavy metals in contaminated environment: Destiny of secondary metabolite biosynthesis, oxidative status and phytoextraction in medicinal plants*. Ecotoxicol. Environ. Saf. **145**, 377 (2017).
13. M. Ziaei et al. *A Review on Ocimum basilicum L. Medicinal Plant with a Focus on the most Important Secondary Compounds and its Medicinal and Agronomic Properties*, J. Med. Plant. 4 (52), 26 (2014).

14. M. Hamzezadeh et al. *The effect of different irrigation water levels on Water Use Efficiency in Basil Plant (Ocimum Basilicum var. Keshkeny Levelu) Using Marginal Analysis Theory*, J. Water. Soil. **25** (5), 953 (2011).
15. M. Dadvand Sarab et al. *Changes in Essential Oil Content and Yield of Basil in Response to Different Levels of Nitrogen and Plant Density*. J. Med. Plant. **3** (27), 60 (2008).
16. G.A. Pandya et al. *Effect of gamma-irradiated sludge on the growth and yield of rice (Oryza sativa L. var. GR-3). Environ.* Pollut. **51**, 63 (1988).
17. S. Ahmed, M. Hossain, S. Rahman, *Irradiated sewage sludge for application to cropland*, (International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2002).
18. G.J. Bouyoucos, *Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils*. Agronomy. J. **54**, 464 (1962).
19. A. Walkley, I.A. Black, *An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil. Sci. **37** (1), 29 (1934).
20. P.K. Gupta, Soil, Plant. *Water and Fertilizer Analysis*, (Agrobios, New Delhi, India 2000).
21. C.A. Bower, R.F. Reitmeir, M. Fireman, Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil. Sci. **73**, 251 (1952).
22. A.L. Page, R.H. Miller, D.R. Keeney, *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* (American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, 1982).
23. J. Bremner, C. Mulvaney, *Nitrogen total. Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties.* (American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, 1982)
24. S.R. Olsen, L.E. Sommers, *Phsphorus. P 403-430, In: A.L. Page (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Methods*, 2nd ed. (American Society of Agronomy. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, 1982).
25. W.L. Lindsay, W.A. Norvell, *Development of DTPA Soil test for Zinc, Iron, Mangnese and Copper*. Soil. Sci. Soc. Am. J. **42**, 421 (1987).
26. J. Etzel et al. *BaneySewage sludge conditioning and disinfection by gamma irradiation*. Am. J. Public. Health. Nations. Health **59** (11), 2067 (1969).
27. G.B. Wickramanayake, O.J. Sproul, *Decontamination technologies for release from bioprocessing facilities. Part V. decontamination of sludge.* Critical .Rev. Environ. Sci. Technol. **19** (6), 515 (1990).
28. M. Al-Bachir, M. Al-Adawi, M. Shamma, *Synergetic effect of gamma irradiation and moisture content on decontamination of sewage sludge*. Bioresour. Technol. **90** (2), 139 (2003).
29. M. Chaychian et al. *The mechanisms of removal of heavy metals from water by ionizing radiation.* Radiat. Phys. Chem. **53** (2), 145 (1998), 145-150.
30. A. Basfar, F.A. Rehim, *Disinfection of wastewater from a Riyadh Wastewater Treatment Plant with ionizing radiation*. Radiat. Phys. Chem. **65** (4), 527 (2002).
31. L. Tahri et al. *Wastewater treatment using gamma irradiation: Tétouan pilot station, Morocco*. Radiat. Phys. Chem. **79** (4), 424 (2010).
32. F. Parvin et al. *Effect of gamma-irradiated textile effluent on plant growth.* Int. J. Recycl. Organic. Waste. Agric, **4** (1), 23 (2015).
33. USEPA, Method 1680: *Fecal Coliforms in Sewage Sludge (Biosolids) by Multiple-Tube Fermentation Using Lauryl Tryptose Broth (Ltb) and Ec Medium*, (United States Environmental Protection Agency, Washington DC, USA, 2010).
34. Sh. Mahmoudi, N. Najafi, A. Reyhanitabar, *Effect of soil moisture and sewage-sludge compost on some soil chemical properties and alfalfa forage macronutrients concentrations in greenhouse conditions.* J. Sci. Technol. Greenhouse. Culture **6** (22), 37 (2015). (In Persian).
35. R.L. Westerman, *Soil Testing and Plant Analysis. 3rd Edition*, Book Series No. 3, (Soil Science Society of America, Washington DC, USA,1990)
36. J. Peters, *Recommended Methods of Manure Analysis.* (University of Wisconsin Cooperative Extension Publication, Washington DC, USA, 2003).
37. H. Asgari Lajayer, N. Najafi, M. Moghiseh, *Application of ionizing radiation effects on physical, chemical and biological properties of effluent wastewater*. J. Land. Manage. **4** (1), 79 (2016). (In Persian).
38. S. Dumontet, H. Dinel, S. Baloda, *Pathogen reduction in sewage sludge by composting and other biological treatments: A review*. Biol. Agric. Hortic. **16**, 409 (1999).
39. USEPA, *The standards for the use or disposal of sewage sludge. Code of Federal Regulation-Part 503 Rule, Federal Register Nomber-9248–9415*, (United States Environmental Protection Agency Press, Washington DC, USA, 1993).
40. S. Borrely et al. *Radiation processing of sewage and sludge, a review.* Prog. Nucl. Energ. **33**, 3 (1998).
41. H. Watanabe, M. Takehisa, *Disinfection of sewage sludge cake by gamma-irradiation*. Radiat. Phys. Chem. **24**, 41 (1984).

42. S. Kazemalilou et al. *Effects of integrated application of phosphorus fertilizer and sewage sludge on leaf chlorophyll index and some growth characteristics of sunflower under water deficit conditions.* J. Soil Manage. Sustain. Prod. **7** (4), 1 (2018). (In Persian).
43. Z. Guo et al. *Gamma irradiation-induced Cd^{2+} and Pb^{2+} removal from different kinds of water*. Radiat. Phys. Chem. **77** (9), 1021 (2008).
44. G.A. Pandya et al., *Inactivation of bacteria in sewage sludge by gamma radiation*. Environ. Pollut. **43** (4), 281 (1987).
45. C. Magnavacca, J. Graino, *Additional advantages of irradiation treatment of sewage sludge for agriculture re-use.* (International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2000).
46. L. Chu, J. Wang, B. Wang, *Effect of gamma irradiation on activities and physicochemical characteristics of sewage sludge.* Biochem. Engin. J., **54** (1), 34 (2011).
47. M. Sánchez-Polo et al., Gamma irradiation of pharmaceutical compounds, nitroimidazoles, as a new alternative for water treatment. Water. Res **43**, 4028 (2009).
48. S. Chu et al. *Municipal sewage sludge compost promotes Mangifera persiciforma tree growth with no risk of heavy metal contamination of soil*. Sci. Rep. **7**, 13408 (2017).
49. N. Najafi, S. Mardomi, Sh. Oustan, *The effect of waterlogging, sewage sludge and manure on selected macronutrients and sodium uptake in sunflower plant in a loamy sand soil.* J. Water. Soil. **26**(3), 619 (2012). (In Persian).
50. N. Asagi, H. Ueno. *Determination of application effects of sewage sludge on growth, soil properties, and N uptake in komatsuna by using the indirect ^{15}N isotope method.* Commun. Soil. Sci. Plant. Anal. **39**, 1928 (2008).
51. M.A. Bozkurt, T. Yarilgac, *The effect of sewage sludge application on the yield, growth, nutrition and heavy metal accumulation in apple trees growing in dry conditions.* Turkish. J. Agric. Forest. **27**, 285 (2003).
52. H. Chenget al. *Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth.* Ecol. Engin, **29**, 96 (2007).
53. J. Casado-Vela et al., *Effect of composted sewage sludge application to soil on sweet pepper crop (Capsicum annuum var. annuum) grown under two exploitation regimes*. Waste. Manage. **27**, 1509 (2007).
54. Pascual et al. *Effect of water deficit on microbial characteristics in soil amended with sewage sludge or inorganic fertilizer under laboratory conditions*. Bioresour. Technol. **98**, 29 (2007).
55. A.H.A. Hussein, *Impact of sewage sludge as organic manure on some soil properties, growth, yield and nutrient contents of cucumber crop*. J. Appl. Sci. **9**, 1401 (2009).
56. R.P. Singh, M. Agrawal, *Effect of different sewage sludge applications on growth and yield of Vigna radiata L. field crop: Metal uptake by plant*. Ecol. Engin. **36**, 969 (2010).
57. H. Dehghan Manshadi et al., *Effect application of sewage sludge and sewage sludge enriched with chemical fertilizer on the rate of organic carbon, respiration and enzyme activity of soil under basil cultivation*. J. Water. Soil. **26**(3), 554 (2012).
58. R.P. Singh, M. Agrawal, *Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and consequent responses of Beta vulgaris plants*. Chemosphere **67**, 2229 (2007).
59. A. Lakhdar et al. *Effect of municipal solid waste compost and sewage sludge use on wheat (Triticum durum): growth, heavy metal accumulation, and antioxidant activity*, J. Sci. Food. Agric. **90**, 965 (2010).
60. G.A. Pandya, S. Sachidanand, V.V. Modi, *Potential of recycling gamma-irradiated sewage sludge for use as a fertilizer: a study on chickpea (Cicer arietinum L.).* Environ. Pollut. **56**, 101 (1989).
61. L. Zhou et al. *Irradiated sewage sludge for application to cropland*, (International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2002).
62. R. El-Motaium, S. Badawy, *Irradiated sewage sludge for application to cropland*, (International Atomic Energy Agency, Vienna Austria, 2002).
63. H. Marschner, *Mineral Nutrition of Higher Plants*, (Academic Press, New York, 2011).