اثر رطوبت خاک و کاربرد کمپوست لجن فاضلاب بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و غلظت عناصر پرمصرف علوفه یونجه در شرایط گلخانه‌ای

شهاب محمودی[۱]، نصرت‌اله نجفی[۱*] و عادل ریحانی‌تبار[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۱۵)

چکیده

بهبود تغذیه گیاهان، یکی از راه‌های افزایش تحمل تنش خشکی در گیاهان به‌شمار می‌رود. با توجه به کمبود مواد آلی در اغلب خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، مصرف کمپوست پس‌ماندهای آلی می‌تواند ظرفیت نگهداری آب در خاک را افزایش داده و تغذیه گیاهان را بهبود بخشد. لذا، در این پژوهش، اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب شهری بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم علوفه یونجه (*Medicago sativa* L.) رقم قره‌یونجه، در شرایط گلخانه‌ای بررسی گردید. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار شامل رطوبت خاک در سه سطح (0.34FC-0.50FC، 0.56FC-0.75FC و 0.81FC-FC) و کمپوست لجن فاضلاب در چهار سطح (صفر، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم بر کیلوگرم خاک) انجام شد. نتایج نشان داد که اثرهای اصلی کمپوست لجن فاضلاب و رطوبت خاک و اثر متقابل آنها بر غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم علوفه یونجه و قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، pH و غلظت پتاسیم محلول خاک معنی‌دار بود. با کاهش رطوبت خاک، غلظت نیتروژن، پتاسیم، کلسیم و منیزیم بخش هوایی علوفه یونجه و EC و غلظت پتاسیم محلول خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت؛ در حالی که غلظت فسفر علوفه یونجه و pH محلول خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. با مصرف کمپوست لجن فاضلاب، غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم علوفه یونجه و EC و غلظت پتاسیم محلول خاک به‌طور معنی‌داری افزایش یافت؛ ولی pH خاک به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. در هر سه سطح رطوبت خاک مورد مطالعه در این آزمایش، مصرف ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک نسبت به سطح ۳۰ گرم آن، بر اثر افزایش شوری محلول خاک، رشد یونجه را به‌طور معنی‌داری کاهش داد. مصرف ۳۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک سبب بهبود تغذیه گیاه یونجه و افزایش کیفیت علوفه آن در شرایط با و بدون تنش کمبود آب شد.

واژه‌های کلیدی: پس‌ماندهای آلی، تنش خشکی، شوری

مقدمه

نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم از عناصر پرمصرف ضروری برای تغذیه گیاه می‌باشند. لذا، وجود غلظتی مناسب از ااین عناصر در گیاهان نه‌تنها برای رشد مطلوب آن‌ها بلکه در زنجیره غذایی برای سلامتی انسان و دام اهمیت زیادی دارد (۱۷ و ۵۴). عوامل مختلفی از قبیل pH، مواد آلی، شور و غرقاب شدن خاک بر فراهمی این عناصر غذایی در خاک و غلظت آن‌ها در گیاهان اثر دارند (۳۹). در این راستا، مصرف کمپوست لجن فاضلاب شهری، به‌عنوان یک ماده آلی زاید، در خاک برای دستیابی به غلظت مناسب عناصر غذایی در گیاهان، افزایش تولید محصولات کشاورزی و بهداشت محیط زیست اهمیت دارد. لجن فاضلاب حاوی ماده آلی زیاد و عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است. بنابراین، پتانسیل خوبی در ارتقای حاصلخیزی خاک دارد (۱۶). همچنین، با توجه به اینکه میزان

[۱]. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: n-najafi@tabrizu.ac.ir

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

مواد آلی در بیش از ۶۰٪ خاک‌های ایران کمتر ۱٪ و در بخش قابل توجهی از آن‌ها، کمتر از ۰/۵ درصد است (۵)، مصرف کمپوست لجن فاضلاب شهری برای افزایش مواد آلی خاک اهمیت زیادی دارد. مصرف لجن فاضلاب در خاک‌هایی با کیفیت نامناسب، پوشش گیاهی ضعیف و ماده آلی کم، به‌ویژه در مناطق مدیترانه‌ای، در مساحت‌های وسیع مرسوم است (۳۳).

مطالعات بسیاری تأثیر مثبت مصرف لجن فاضلاب یا کمپوست آن را بر عملکرد گیاهان علوفه‌ای به اثبات رسانده است (۲۱، ۲۴ و ۵۶). با این حال، در برخی موارد بر اثر نسبت C/N بزرگ، زیادی فلزات سنگین و نمک‌های محلول یا کاربرد مقادیر خیلی زیاد که موجب بروز اثرهای منفی در خاک‌ها و کاهش عملکرد گیاهان می‌شود، در ارتباط با مصرف این پس‌ماندهای آلی مشاهده شده است (۸۱).

نیتروژن از عناصر غذایی اصلی گیاه است که به مقدار زیاد در لجن فاضلاب وجود دارد. همچنین، لجن فاضلاب حاوی مقادیر قابل توجهی از عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف است (۷۵ و ۸۲). عوامل اصلی اثرگذار بر فراهمی عناصر غذایی لجن فاضلاب شامل مقدار نیتروژن معدنی موجود در آن و ویژگی‌های خاک (۴۴)، نوع فرایند هضم لجن (هوازی یا بی‌هوازی) (۷۲)، نسبت C/N (۷۶) ، pH، روش و زمان مصرف (۲۳) می‌باشد. تجزیه کودهای آلی در خاک منجر به تولید برخی اسیدهای آلی مانند فلوویک، هومیک و کربنیک می‌شود که pH خاک را کاهش داده و موجب افزایش فراهمی عناصر غذایی و جذب آنها توسط گیاهان می‌شود (۴۳).

گیاهان در طبیعت در معرض شرایط نامساعد محیطی مختلفی قرار می‌گیرند که بر رشد، عملکرد و بقای آنها اثر منفی دارند. کمبود آب در بسیاری از مناطق به‌عنوان یکی از مهمترین تنش‌های غیر زیستی محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان مطرح است (۴۷). تنش کمبود آب بسته به شدت و مدت آن، جذب عناصر غذایی و رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۳۲). ارلاندسون (۲۷) گزارش کرد که کمبود آب، جذب عناصر غذایی را در چندین گونه گیاهی کاهش داد. تنش کمبود آب، وضعیت تغذیه‌ای گیاهان مانند غلظت عناصر غذایی پرمصرف را در بافت‌های گیاهی تحت تأثیر قرار می‌دهد. فراهمی آب یک متغیر مهم کنترل کننده جذب عناصر غذایی توسط گیاه است. کمبود آب جذب عناصر غذایی توسط ریشه و انتقال آن‌ها را از ریشه به ساقه از طریق کاهش سرعت تعرق و نفوذپذیری غشا، کاهش می‌دهد (۴۲). کودویاروا و همکاران (۴۸) گزارش کردند که در گیاهان تحت کمبود آب، غلظت پتاسیم افزایش یافت و سبب بازشدن روزنه‌ها و افزایش جذب آب شد. رضایی و همکاران (۶۹) گزارش کردند که با بروز کمبود آب، غلظت فسفر دانه رقم‌های گندم افزایش ولی غلظت پتاسیم دانه آنها کاهش یافت. همچنین، غلظت نیتروژن و فسفر در کاه و کلش گندم با محدود شدن آب قابل استفاده گیاه در خاک کاهش، ولی غلظت پتاسیم افزایش یافت. وانگ و همکاران (۷۹) گزارش کردند که کمبود آب، مقدار نیتروژن و فسفر را در گندم زمستانه به‌طور معنی‌داری کاهش داد. پژوهش‌های گونش و همکاران (۳۷) نشان داد که کمبود آب، جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم را در رقم‌های مختلف عدس کاهش می‌دهد. مهدی‌زاده نادری و همکاران (۵۲) نیز کاهش معنی‌دار مقدار عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه سورگوم را بر اثر اعمال کمبود آب، گزارش کردند.

کمبود آب در خاک ممکن است از طریق اثر بر رشد ریشه و تحرک عناصر غذایی در خاک در جذب عناصر معدنی توسط گیاهان نقش داشته باشد (۲۸). کاهش فراهمی آب بر اثر خشکی، عموماً منجر به کاهش مقدار جذب عناصر غذایی و تغییر غلظت عناصر غذایی در محصولات کشاورزی می‌شود (۳۷) و میزان تغییرات غلظت عناصر غذایی به نوع عنصر، رقم و اندام گیاه بستگی دارد (۴۱). جذب عناصر غذایی توسط گیاهان در شرایط تنش خشکی ممکن است نقش مهمی در تحمل تنش خشکی داشته باشد (۷۱).

یونجه (*Medicago sativa* L.)، در میان گیاهان علوفه‌ای، به‌دلیل سطح زیر کشت وسیع و از طرفی وجود اقلیم مساعد در اکثر مناطق ایران، از اهمیت خاصی برخوردار است. اطلاعات

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

بافت	شن (٪)	رس (٪)	کربنات کلسیم معادل (٪)	کربن آلی (٪)	SP (٪)	$pH_{(1:1)}$	$EC_{(1:1)}$ (dS/m)
لوم رسی	۳۹	۲۲/۵	۱۵/۳	۰/۵۹	۴۴/۴	۸	۰/۴۷

جدول ۲. نیتروژن کل و غلظت عناصر قابل جذب در خاک مورد استفاده

N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Pb
(٪)	(mg/kg)										
۰/۰۲	۸/۷	۵۵۶/۴	۷۲۳۴/۷	۷۹۷/۸	۳۲۵/۷	۳/۹۸	۷/۰۱	۰/۵۲	۲/۲	۰/۰۴	ناچیز

به‌دست آمده نشان می‌دهد که در سال زراعی ۸۸–۱۳۸۷ از کل سطح زیرکشت نباتات علوفه‌ای کشور، ۶۳٪ زیر کشت یونجه بوده که بیش از ۷۰٪ کل تولیدات گیاهان علوفه‌ای را شامل می‌شد (۱). غلظت مطلوب عناصر غذایی پرمصرف در علوفه یونجه از عوامل مهم در کیفیت آن محسوب می‌شود. با توجه به اثرهای کمبود آب بر غلظت عناصر غذایی در گیاهان، نقش عناصر غذایی در تحمل کمبود آب و نقش مثبت کمپوست لجن فاضلاب در تأمین عناصر غذایی گیاه و تأثیر آن بر ویژگی‌های خاک، این پژوهش با هدف بررسی اثر کمپوست لجن فاضلاب شهری به‌عنوان پس‌ماند آلی و سطوح رطوبت خاک بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و غلظت عناصر غذایی پرمصرف در گیاه یونجه در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. با توجه به وجود فلزات سنگین در کمپوست لجن فاضلاب، در صورت مصرف زیاد و طولانی‌مدت آن ممکن است سبب آلودگی خاک به فلزات سنگین شود (۷۸). لذا، لازم است با انجام مطالعاتی، مقدار و دفعات مصرف آن تعیین شود. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد لجن فاضلاب هر شهر و با توجه به اینکه در مورد اثر متقابل کمپوست و رطوبت خاک بر ویژگی‌های شیمیایی خاک و غلظت عناصر غذایی پرمصرف در گیاه یونجه مطالعه‌ای در ایران انجام نشده بود، انجام این پژوهش ضروری به‌نظر رسید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با کشت گیاه یونجه (*Medicago sativa* L.) رقم قره‌یونجه در شرایط گلخانه‌ای و با استفاده از گلدان‌های پلاستیکی حاوی ۳ کیلوگرم خاک با بافت لوم رسی انجام گردید. علت انتخاب خاکی با این بافت این بود که گیاه یونجه در خاک‌هایی با بافت متوسط تا سنگین با pH خنثی تا قلیایی و کلسیم فراوان به خوبی رشد می‌کند (۴). خاک مذکور از عمق ۳۰–۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری شد و بعد از هواخشک کردن، کوبیده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. سپس، فسفر قابل جذب گیاه در خاک با روش اولسن (٦۴)، پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم قابل‌جذب با عصاره‌گیر استات آمونیم (۴٦)، آهن، روی، مس و منگنز قابل‌جذب با عصاره‌گیر DTPA (۵۰)، pH خاک در سوسپانسیون ۱:۱ آب به خاک (۵۷)، EC در عصاره اشباع (۳۸)، بافت خاک به‌روش هیدرومتر (۳۵)، کربن آلی خاک به‌روش اکسایش تر (٦۳) و کربنات کلسیم معادل خاک به‌روش خنثی‌سازی با اسید و تیتر کردن با سود (۷۰) اندازه‌گیری شد. تعیین غلظت کل عناصر، pH و EC کمپوست لجن فاضلاب بر اساس روش پیترز (۶۶) و تجزیه شیمیایی آب آبیاری بر اساس روش گوپتا (۳۸) انجام گردید، که نتایج آن در جدول‌های ۱ تا ۲ ارائه شده است. در یک آزمایش دیگر، پس از دو هفته انکوباسیون خاک با سطوح مختلف کمپوست لجن فاضلاب در گلدان‌ها، از خاک هر گلدان نمونه دست نخورده تهیه و رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای آن‌ها به‌وسیله دستگاه صفحات فشار در مکش ۰/۳– بار تعیین شد (۴۵) که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. آزمایش به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و فاکتورهای رطوبت خاک در سه سطح (0.34FC-0.50FC، 0.56FC-0.75FC و 0.81FC-FC) و

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

جدول ۳. برخی ویژگی‌های شیمیایی کمپوست لجن فاضلاب شهری مورد استفاده

ماده آلی (٪)	کربن آلی (٪)	نیتروژن کل (٪)	C/N	pH (۱:۵) (w/v)	pH (۱:۲) (v/v)	EC (۱:۵) (dS/m)(w/v)	EC (۱:۲) (dS/m)(v/v)
۳۷/۴۹	۲۱/۷۵	۲	۱۰/۸۸	۶/۶۳	۶/۲۶	۳/۲۵	۵/۵۸

جدول ۴. غلظت کل عناصر در کمپوست لجن فاضلاب شهری مورد استفاده

P	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cd	Pb
(mg/g)					(mg/kg)					
۱۱/۶	۲/۹	۰/۷۹	۲۶/۷	۵/۲	۷۱۲۴/۴	۸۰۸	۲۷۲۳	۱۸۶/۵	۱۲/۱	۵۱/۴

جدول ۵. نتایج تجزیه شیمیایی آب شهری مورد استفاده

عنصر	K	P	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Cl^-	HCO_3^-	pH	EC (dS/m)
غلظت (mg/L)	۴/۳	۰/۰۵	۳۵	۴۲	۱۱	۰/۱	۰	۰/۶	۰	۲۰	۸۷	۷/۷	۰/۴۹

کمپوست لجن فاضلاب در چهار سطح (شاهد، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم بر کیلوگرم خاک) انجام شد. انتخاب سطوح رطوبت خاک بر اساس نتایج بررسی مطلبی‌فرد و همکاران (۶۲) انجام شد و هدف این بود که گیاه در شرایط بدون تنش کمبود آب (0.81FC-FC)، تنش ملایم کمبود آب (0.56FC-0.75FC) و تنش شدید کمبود آب (0.34FC-0.50FC) رشد نماید. قبل از کشت گیاه، ابتدا کمپوست لجن فاضلاب به خاک افزوده شد و خاک به مدت دو هفته در داخل کیسه‌های پلاستیکی برای رسیدن به تعادل نسبی، در رطوبت نزدیک به ظرفیت مزرعه‌ای (از طریق توزین روزانه) نگه داشته شد.

تعداد ۲۰ عدد بذر یونجه انتخاب و در عمق پنج سانتی‌متری خاک هر گلدان کاشته شد. قطر داخلی و ارتفاع هر گلدان ۲۰ سانتی‌متر بود. بعد از اطمینان از استقرار گیاهچه‌ها (زمانی که به مرحله ۳ برگی رسیدند)، گیاهان به تعداد ۱۰ عدد در هر گلدان تنک شدند و سطوح مختلف رطوبت خاک در مرحله ۸ برگی اعمال شد. سطوح مختلف رطوبت خاک با توزین روزانه گلدان‌ها و افزودن آب (یک تا دو بار در روز) ایجاد شد. برای آبیاری گلدان‌ها تماماً از آب شهری استفاده شد. دمای گلخانه بین ۲۰- ۳۱/۵ درجه سلسیوس در طول شب و روز نوسان داشت. پس از اینکه حدود ۱۰٪ گیاهان گل دادند، گیاهان از محل طوقه برداشت شدند. سپس، با آب مقطر شسته شده و در دستگاه خشک‌کن نمونه‌های گیاهی با دمای ۷۰ درجه سلسیوس تا زمان خشک شدن کامل و رسیدن به وزن ثابت، نگهداری شدند. نمونه‌ها پس از توزین با استفاده از آسیاب دارای تیغه استیل پودر شده و از الک ۰/۵ میلی‌متری عبور داده شدند. در آب آبیاری و عصاره‌های خاک و گیاه، غلظت فسفر به‌روش وانادومولیبدوفسفریک اسید و با دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل PD-303 ساخت شرکت Apel ژاپن)، پتاسیم و سدیم با دستگاه فلیم فتومتر (مدل ۴۱۰ ساخت شرکت Corning انگلستان) و کلسیم، منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز با دستگاه طیف سنج جذب اتمی (مدل AA-6300 ساخت شرکت Shimadzu ژاپن) تعیین شد. پس از برداشت گیاهان، pH و EC محلول خاک گلدان‌ها اندازه‌گیری شد. pH در سوسپانسیون (۱:۲) و EC در عصاره سوسپانسیون (۱:۲) اندازه‌گیری شد (۴۵). تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C و مقایسه میانگین‌ها با آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ انجام شد. نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم گردید.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

جدول ۶. مقادیر رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC) در سطوح مختلف کمپوست لجن فاضلاب مورد استفاده

سطح کمپوست لجن فاضلاب (g/kg)	صفر	۱۵	۳۰	۶۰
رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (٪)	۱۸/۵	۱۸/۹	۱۹/۵	۲۰/۲

جدول ۷. تجزیه واریانس تأثیر رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت عناصر پرمصرف گیاه یونجه و pH، EC و K محلول خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات							
		N	P	K	Ca	Mg	pH	EC	K محلول
بلوک	۲	۰/۰۲۶^{ns}	۰/۰۰۴^{ns}	۱/۷۵^{ns}	۵/۱۱^{ns}	۰/۰۰۱^{ns}	۰/۰۰۲^{ns}	۰/۰۱۷^{ns}	۱/۲*
رطوبت	۲	۴/۶۴**	۰/۵۹**	۶۲/۷**	۹/۴۴**	۰/۱۷**	۰/۰۴۷**	۰/۷۲**	۵/۹۶**
کمپوست	۳	۱۴/۰۰**	۱/۹۹**	۶۹/۵**	۲۱/۷**	۰/۶۱**	۰/۶۰**	۱۲/۲**	۳۶۰/۹**
رطوبت × کمپوست	۶	۱/۵۲**	۰/۰۶۳**	۱۳/۶**	۲۱/۷**	۰/۲۶۲**	۰/۰۱۳**	۰/۰۶۵**	۷/۸۳**
خطا	۲۲	۰/۱۳۱	۰/۰۰۹	۲/۴۴۶	۰/۶۱۶	۰/۰۲۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۲۸۴
ضریب تغییرات (٪)		۲/۵۹	۲/۸۶	۳/۹۳	۱/۸۲	۳/۳۸	۰/۴۲	۳/۲۶	۳/۶۴

**، * و ns به‌ترتیب معنی‌دار در سطوح احتمال ۱٪ و ۵٪ و بدون اختلاف معنی‌دار

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، برخی ویژگی‌های شیمیایی کمپوست لجن فاضلاب، نتایج تجزیه شیمیایی آب شهری مورد استفاده در آزمایش گلخانه‌ای و مقادیر رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در سطوح مختلف کمپوست لجن فاضلاب به‌ترتیب در جدول‌های ۱ تا ۶ ارائه شده است. مقادیر فلزات سنگین در کمپوست از حدود مجاز اعلام شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا کمتر و از نظر مصرف در خاک‌های کشاورزی مناسب بود (۱۵). بر اساس سطح مجاز ارائه شده توسط اتحادیه اروپا که ۳ mg Cd/kg soil می‌باشد (۱۴)، حتی با مصرف ۶۰ گرم کمپوست در هر کیلوگرم خاک، غلظت کادمیم خاک به ۰/۷۶ mg Cd/kg می‌رسد که از سطح مجاز کمتر است. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب مصرفی، مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای خاک مورد مطالعه افزایش یافت. تحلیل رگرسیون نشان داد که میان سطح کمپوست لجن فاضلاب مصرفی بر حسب گرم بر کیلوگرم (S) و مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای خاک بر حسب درصد (FC) رابطه FC=34.37(S)-636.24 با r=0.994** وجود داشت. بنابراین، با استفاده از این رابطه می‌توان مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای خاک را با مصرف مقادیر مختلف کمپوست لجن فاضلاب با دقت خوبی پیش‌بینی کرد.

اثر رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر pH خاک

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی و متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر pH خاک پس از برداشت گیاه یونجه معنی‌دار بودند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های pH خاک برای اثر اصلی رطوبت خاک نشان داد که هر سه سطح رطوبت خاک از لحاظ pH سوسپانسیون تفاوت معنی‌داری با هم داشتند. بیشترین pH در سطح رطوبت 0.81FC-FC و کمترین آن در سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC مشاهده شد که نسبت به سطح رطوبت 0.81FC-FC، ۱/۵۱ درصد کاهش یافت. به‌نظر می‌رسد که با افزایش رطوبت خاک، محلول خاک رقیق‌تر شده و غلظت پروتون کاهش می‌یابد

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

جدول ۸. مقایسه میانگین‌های غلظت عناصر پرمصرف و pH و EC خاک گلدان‌ها برای اثر اصلی رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب

عامل	سطح	N	P	K	Ca	Mg	pH	EC (dS/m)	K محلول خاک (mg/L)
		(mg/g DW)							
رطوبت خاک	۰/۸۱ FC–FC	۱۳/۵ b	۳/۶ a	۳۷/۳ c	۴۲/۳ c	۴/۵۶ b	۸/۰۳ a	۱/۹۰ c	۱۳/۹ c
	۰/۵۶ FC–۰/۷۵FC	۱۳/۸ b	۳/۴ b	۴۰/۲ b	۴۳/۱ b	۴/۷۷ a	۷/۹۷ b	۲/۰۸ b	۱۴/۸ b
	۰/۳۴ FC–۰/۵۰FC	۱۴/۷ a	۳/۲ c	۴۱/۸ a	۴۴/۱ a	۴/۷۲ a	۷/۹۱ c	۲/۳۸ a	۱۵/۳ a
کمپوست (g/kg)	۰	۱۲/۳ c	۲/۹ c	۳۷/۰ c	۴۱/۰ c	۴/۵۰ c	۸/۲۱ a	۰/۹۵ d	۸/۸ d
	۱۵	۱۴/۱ b	۳/۵ b	۳۹/۰ b	۴۳/۵ b	۴/۳۲ c	۸/۰۹ b	۱/۴۷ c	۱۱/۱ c
	۳۰	۱۴/۲ b	۳/۵ b	۴۰/۷ b	۴۴/۵ a	۵/۱۲ a	۷/۹۶ c	۲/۴۹ b	۱۵/۴ b
	۶۰	۱۵/۳ a	۳/۶ a	۴۳/۶ a	۴۳/۸ ab	۴/۲۸ b	۷/۶۱ d	۳/۵۷ a	۲۳/۲ a

در هر ستون و در هر عامل، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، در سطح احتمال ۵٪ با آزمون LSD تفاوت معنی‌داری ندارند.

(۱۸). همچنین، کاتیون‌های با ظرفیت زیادتر مثل Al^{+3} و Fe^{+3} جذب سطوح ذرات جامد خاک (جایگاه‌های تبادلی) می‌شوند. در نتیجه، تعادل‌های زیر در جهت چپ پیش می‌روند و فعالیت H^+ در محلول خاک کاهش یافته و pH محلول خاک افزایش می‌یابد. این پدیده به اثر رقت- ظرفیت معروف است (۱۸ و ۲۹).

$$Al^{3+} + 3H_2O \leftrightarrow Al(OH)_3 + 3H^+ \quad [۱]$$

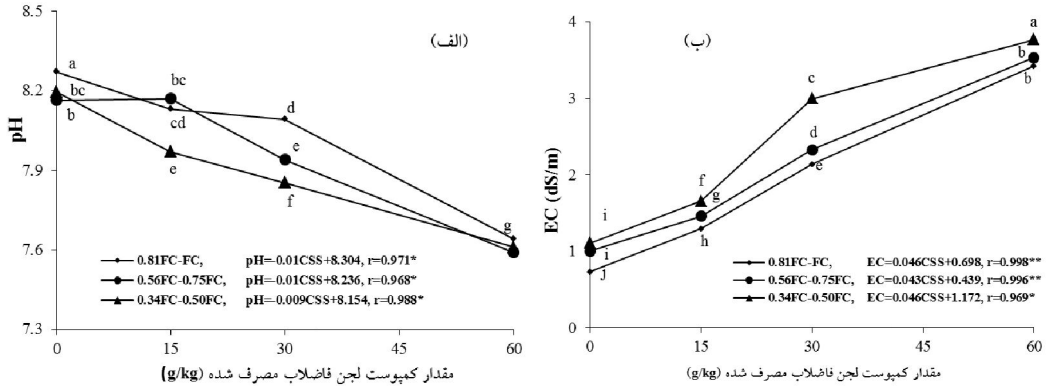
$$Fe^{3+} + 3H_2O \leftrightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ \quad [۲]$$

مقایسه میانگین‌های pH خاک برای اثر اصلی کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که سطوح ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک با تیمار بدون کمپوست لجن فاضلاب، تفاوت معنی‌داری داشتند. با افزایش مقدار کمپوست لجن فاضلاب، pH به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین میزان pH در تیمار بدون کمپوست لجن فاضلاب و کمترین آن در سطح ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم مشاهده شد که نسبت به سطح شاهد ۷/۹ درصد کاهش یافت (جدول ۶). شیرعلیپور و همکاران (۷۴) و رکاسی و فیلپ (۶۸) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند.

مقایسه میانگین‌های pH خاک برای اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب، pH در هر سه سطح رطوبت خاک کاهش یافت؛ ولی کاهش در سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC با شدت بیشتری اتفاق افتاد. بیشترین مقدار pH در سطح بدون کمپوست لجن فاضلاب و سطح رطوبت 0.81FC-FC مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با سطوح رطوبت 0.34FC-0.50FC و 0.56FC-0.75FC داشت. کمترین مقدار pH در تیمار ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و سطح رطوبت 0.56FC-0.75FC مشاهده شد که تفاوت غیرمعنی‌داری با تیمارهای ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب و سطوح رطوبتی 0.81FC-FC و0.34FC-0.50FC داشت (شکل ۱). با توجه به شکل ۱، میان سطوح کمپوست لجن فاضلاب و pH خاک روابط رگرسیونی معنی‌داری وجود داشت که با استفاده از آنها می‌توان pH خاک را در سطوح مختلف کمپوست لجن فاضلاب با دقت خوبی پیش‌بینی کرد.

به‌نظر می‌رسد که کاهش pH خاک بر اثر مصرف کمپوست لجن فاضلاب به چند دلیل می‌باشد (۲۹ و ۶۰): ۱) با مصرف کمپوست لجن فاضلاب در خاک، جمعیت میکروبی و رشد ریشه‌ها افزایش یافته و بر اثر افزایش شدت تنفس ریشه‌ها و ریزجانداران در خاک، فشار جزئی گاز دی‌اکسید کربن افزایش می‌یابد که طبق واکنش‌های زیر فعالیت پروتون در محلول خاک

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]



شکل ۱. اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر pH (الف) و EC خاک (ب) گلدان‌ها پس از برداشت گیاه یونجه

افزایش و pH خاک کاهش می‌یابد:

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \quad [۳]$$

$$H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+ \quad [۴]$$

۲) تولید اسیدهای آلی مختلف در خاک که تفکیک شده و پروتون آزاد می‌کنند و pH خاک را کاهش می‌دهند. مقایسه pH خاک و کمپوست لجن فاضلاب (جدول‌های ۱ و ۳) نیز نشان می‌دهد که pH کمپوست لجن فاضلاب کمتر از خاک بوده و اسیدی می‌باشد که با توجه به قدرت بافری بیشتر آن نسبت به خاک می‌تواند pH خاک را کاهش دهد. البته میزان تغییر pH به قدرت بافری خود خاک که تابعی از درصد رس و مواد آلی آن است، نیز بستگی دارد (۳۹).

اثر رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر EC محلول خاک

تجزیه واریانس نشان داد که اثرهای اصلی و اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر قابلیت هدایت الکتریکی (EC) محلول خاک پس از برداشت یونجه معنی‌دار بودند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های EC محلول خاک برای اثر اصلی رطوبت خاک نشان داد که EC محلول خاک در سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC بیشترین مقدار را داشت و نسبت به سطح 0.81FC-FC، ۲۵/۶ درصد افزایش یافت. کمترین میزان EC محلول خاک در سطح رطوبتی 0.81FC-FC مشاهده شد. با کاهش رطوبت خاک، محلول خاک غلیظ شده و EC آن افزایش می‌یابد (۱۸).

مقایسه میانگین‌های EC محلول خاک برای اثر اصلی کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب، EC روند افزایشی داشت و کمترین آن در سطح بدون کمپوست لجن فاضلاب و بیشترین آن در سطح ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که با گزارش فرانکو- اوترو و همکاران (۳۱) مطابقت داشت. میانگین EC محلول خاک در سطح ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، برابر ۳/۵۷ dS/m بود که افزایش ۲۷۷ درصدی را نسبت به سطح شاهد کمپوست لجن فاضلاب نشان داد (جدول ۶). به‌نظر می‌رسد سطوح ۱۵ و ۳۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، از لحاظ شوری محدودیتی برای رشد گیاه یونجه ایجاد نکردند (جدول ۸). در حالی که سطح ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، EC محلول خاک گلدان‌ها را به‌طور قابل توجهی افزایش و رشد گیاه یونجه را کاهش داد (۶). کاسادو- ولا و همکاران (۲۱) و چنگ و همکاران (۲۲) نیز نتایج مشابهی گزارش کردند. فرانسوا و مَس (۳۰) بیان کردند که آستانه شوری برای کاهش عملکرد گیاه یونجه (*Medicago sativa* L.) حدود ۲ dS/m است. به‌نظر می‌رسد که افزایش EC محلول خاک بر اثر مصرف کمپوست لجن فاضلاب به چند دلیل می‌باشد (۹ و ۱۱): ۱) کاهش pH محلول خاک (شکل ۱) که سبب افزایش فعالیت پروتون در محلول خاک شده و با توجه به اینکه پروتون بیشترین هدایت

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

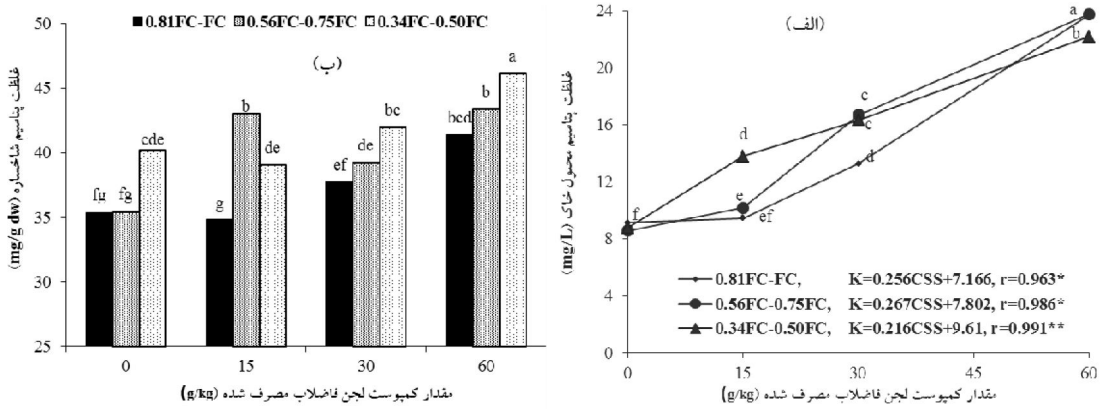
اکی‌والانی را دارد (۲). EC محلول خاک افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، با کاهش pH محلول خاک، حل‌پذیری برخی ترکیبات در خاک افزایش یافته و کاتیون‌ها و آنیون‌های مختلفی تولید و سبب افزایش EC محلول خاک می‌شود و ۲) بر اثر معدنی شدن مواد آلی کمپوست لجن فاضلاب یون‌های مختلفی به محلول خاک آزاد و سبب افزایش EC محلول خاک می‌شود (۳۰). میان pH و EC محلول خاک همبستگی منفی معنی‌داری (r= −۰/۹۶۵**) مشاهده شد که نشان می‌دهد احتمالا کاهش pH محلول خاک منجر به افزایش EC محلول خاک شده است.

مقایسه میانگین‌های EC محلول خاک برای اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب، EC محلول خاک در هر سه سطح رطوبت خاک عموماً افزایش یافت (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، کاهش رطوبت خاک، سبب افزایش EC محلول خاک در تمامی سطوح کمپوست لجن فاضلاب شد. با این حال، شکل ۱ نشان می‌دهد که اثر رژیم رطوبتی خاک بر EC محلول خاک به سطح کمپوست لجن فاضلاب مصرفی بستگی دارد؛ به‌طوری که در سطح بدون کمپوست لجن فاضلاب EC محلول خاک در دو سطح رطوبتی0.34FC-0.50FC و 0.56FC-0.75FC تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. در سطح ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، EC محلول خاک در سطوح رطوبتی 0.56FC-0.75FC و 0.81FC-FC تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند. در سایر سطوح کمپوست لجن فاضلاب، هر سه سطح رژیم رطوبتی خاک با هم تفاوت معنی‌داری داشتند. به‌نظر می‌رسد که در سطوح مختلف کمپوست لجن فاضلاب، جمعیت و فعالیت میکروبی و در نتیجه سرعت معدنی شدن مواد آلی، ظرفیت نگهداری آب در خاک تغییر نموده و می‌تواند بر EC محلول خاک مؤثر باشد (۳۹). با توجه به شکل ۱، میان سطوح کمپوست لجن فاضلاب و EC محلول خاک روابط رگرسیونی معنی‌داری وجود داشت که با استفاده از آنها می‌توان EC محلول خاک را در سطوح مختلف کمپوست لجن فاضلاب با دقت خوبی پیش‌بینی کرد. این روابط نشان می‌دهند که با افزایش سطح کمپوست، EC محلول خاک نیز زیاد می‌شود که با نتایج نجفی و همکاران (۹ و ۱۱) مطابقت دارد. با توجه به شور شدن خاک در سطح ۶۰ گرم کمپوست بر کیلوگرم خاک، بهتر است در شرایط گلخانه‌ای مشابه شرایط این آزمایش که گلدان‌ها فاقد زهکش بودند، از مقادیر کمتر کمپوست لجن فاضلاب شهری استفاده شود. با این حال، اگر کمپوست لجن فاضلاب مورد مطالعه در شرایط مزرعه مصرف شود که دارای زهکشی مناسب باشد و آبشویی نیز انجام شود، مصرف کمپوست تا ۶۰ گرم بر کیلوگرم خاک نیز می‌تواند توصیه شود.

اثر رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر پتاسیم محلول خاک

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی و اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر پتاسیم محلول خاک پس از برداشت گیاه یونجه معنی‌دار بودند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های غلظت پتاسیم محلول خاک برای اثر اصلی رطوبت خاک نشان داد که بیشترین میزان پتاسیم محلول خاک در سطح رطوبتی 0.34FC-0.50FC مشاهده گردید که نسبت به سطوح 0.81FC-FC و 0.56FC-0.75FC به‌ترتیب ۱۰/۱ و ۳/۴ درصد افزایش یافت. این پدیده ممکن است بر اثر جذب کمتر پتاسیم توسط گیاهانی که در معرض کمبود آب قرار گرفتند، باشد؛ زیرا گیاهان در این تیمار رشد کمتری داشتند (۶). دلیل دیگر افزایش غلظت پتاسیم محلول بر اثر کمبود آب، کاهش حجم محلول خاک و به‌دنبال آن افزایش غلظت پتاسیم است (۱۸). میان غلظت پتاسیم و EC محلول خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد (r=۰/۹۶۲**). کمترین غلظت پتاسیم محلول خاک در سطح بدون کمپوست لجن فاضلاب و بیشترین آن در سطح ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد ۱۶۳٪ افزایش نشان داد (جدول ۶). کمپوست لجن فاضلاب نسبت به خاک دارای پتاسیم کل و قابل‌جذب بیشتری می‌باشد که بعد از تجزیه وارد محلول خاک شده و باعث افزایش غلظت پتاسیم محلول خاک می‌شود. چنگ و همکاران

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]



شکل ۲. اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت پتاسیم محلول خاک (الف) گلدان‌ها و غلظت پتاسیم علوفه یونجه (ب)

(۲۲) و شیرعلیپور و همکاران (۷۴) نتایج مشابهی گزارش کردند. مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نشان داد که با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب، غلظت پتاسیم محلول در هر سه سطح رطوبت خاک افزایش یافت. بیشترین پتاسیم محلول در دو تیمار ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب و سطوح رطوبت 0.81FC-FC و 0.56FC-0.75FC و کمترین آن در تیمارهای شاهد کمپوست لجن فاضلاب و هر سه رژیم رطوبتی ظرفیت مزرعه‌ای مشاهده شد (شکل ۲-الف). با توجه به شکل ۲، میان سطوح کمپوست لجن فاضلاب و غلظت پتاسیم محلول خاک روابط رگرسیونی معنی‌داری وجود داشت که با استفاده از آنها می‌توان پتاسیم محلول خاک را در سطوح مختلف کمپوست لجن فاضلاب با دقت خوبی پیش‌بینی کرد. این روابط نشان می‌دهند که با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب، پتاسیم محلول خاک نیز زیاد می‌شود که با نتایج نجفی و همکاران (۱۱) مطابقت دارد.

غلظت پتاسیم بخش هوایی یونجه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی و اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت پتاسیم علوفه یونجه معنی‌دار بودند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های غلظت پتاسیم بخش هوایی برای اثر اصلی رطوبت خاک نشان داد که غلظت پتاسیم علوفه یونجه با کاهش رطوبت خاک (اعمال تنش کمبود آب) افزایش یافت. کمترین غلظت پتاسیم در سطح رطوبت 0.81FC-FC مشاهده شد. بیشترین غلظت پتاسیم علوفه یونجه در سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد ۱۲/۱ درصد افزایش یافت. وانگ و همکاران (۷۹) گزارش کردند که غلظت پتاسیم بخش هوایی گندم زمستانه با اعمال کمبود آب در مراحل ساقه‌دهی و پرشدن دانه نسبت به مرحله جوانه‌زنی کاهش یافت. آنان این کاهش را به محدود شدن انتقال پتاسیم به بخش هوایی نسبت دادند. انجی و همکاران (۲۶) و رضایی و همکاران (۶۹) نیز نتایج مشابهی گزارش کردند. وانگ و همکاران (۷۹) گزارش کردند که کمبود آب فقط منجر به کاهش تولید زیست‌توده نمی‌شود، بلکه ممکن است از توزیع عناصر غذایی و دیگر مواد همگون‌سازی شده از بخش‌های رویشی به بخش‌های زایشی جلوگیری کند.

مقایسه میانگین‌های غلظت پتاسیم بخش هوایی برای اثر اصلی کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که کمترین غلظت پتاسیم بخش هوایی در تیمار بدون کمپوست لجن فاضلاب و بیشترین آن در تیمار ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد، ۱۷/۸ درصد افزایش یافت (جدول ۸). عباسی و همکاران (۳) در گیاه برنج، چنگ و همکاران (۲۲) در گیاه چمن و محمد و آدامنه (۶۰) در گیاه کاهو نتایج مشابهی گزارش کردند. نجفی و

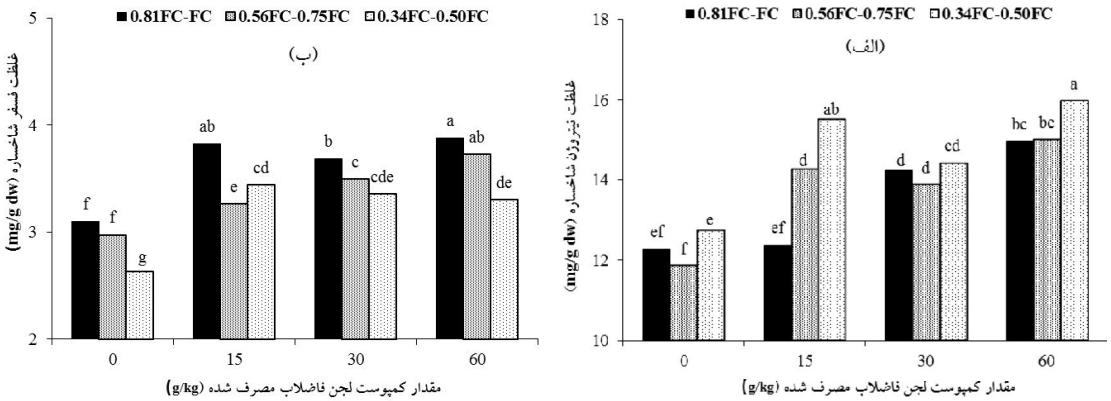
[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

همکاران (۱۰) افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم بخش هوایی آفتابگردان را با مصرف لجن فاضلاب گزارش کردند. لوبو و فیلهو (۵۱) عدم تأثیر معنی‌دار کاربرد لجن فاضلاب بر غلظت پتاسیم برگ آفتابگردان را گزارش کردند. مقایسه میانگین‌های غلظت پتاسیم بخش هوایی برای اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب، غلظت پتاسیم بخش هوایی در هر سه سطح رطوبت نسبت به شاهد افزایش یافت. بیشترین غلظت پتاسیم بخش هوایی در تیمار ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با سطوح 0.56FC-0.75FC و -0.81FC FC داشت و کمترین آن در تیمار ۱۵ گرم کمپوست لجن فاضلاب و سطح 0.81FC-FC مشاهده شد (شکل ۲-ب). با توجه به نقش پتاسیم در فعالیت روزنه‌ای و روابط آبی گیاهان (۲۰ و ۵۹)، از افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم در تیمارهای شاهد، ۳۰ و ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC، می‌توان چنین نتیجه گرفت که با جذب بیشتر پتاسیم در تیمارهای کمپوست، تنظیم اسمزی و تبادلات روزنه‌ای گیاهان یونجه تحت تنش کمبود آب بهبود یافته است. کمپوست لجن فاضلاب حاوی مقادیر قابل توجهی از عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است که از طریق بهبود تغذیه معدنی به فرایند تنظیم اسمزی کمک کرد. به‌طور کلی، غلظت پتاسیم در سطح ریشه‌ها بسیار کمتر از توده خاک است که این پدیده ایجاد یک شیب غلظت می‌کند که موجب انتشار پتاسیم به سمت ریشه می‌شود. غلظت پتاسیم محلول که بخشی از پتاسیم انتشار یافته به سطح ریشه است، با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب و کاهش رطوبت خاک افزایش یافت (شکل ۲)، که نتیجه آن افزایش سرعت انتشار پتاسیم به سطح ریشه و افزایش جذب آن توسط گیاه است. انتشار، سازوکار اصلی حرکت پتاسیم به سطح ریشه‌ها است (۵۵). با توجه به دامنه مطلوب (۲۰-۳۵ میلی‌گرم در گرم ماده خشک) گزارش شده توسط ملکوتی و غیبی (۷)، غلظت پتاسیم بخش هوایی بیشتر از دامنه مطلوب بود. دلیل این پدیده را می‌توان به مقدار زیاد پتاسیم قابل جذب خاک و افزایش آن با مصرف کمپوست لجن فاضلاب نسبت داد. همچنین، تجمع پتاسیم در واکوئل و سلول‌های نگهبان روزنه در شرایط کمبود آب ممکن است رویکردی از نقش پتاسیم در تحمل کمبود آب باشد (۴۰). بین غلظت پتاسیم بخش هوایی با غلظت پتاسیم محلول خاک همبستگی مثبت ($r=۰/۷۶۷^{**}$) وجود داشت. همچنین، بین غلظت پتاسیم بخش هوایی و EC محلول خاک همبستگی مثبت ($r=۰/۷۶۷^{**}$) وجود داشت. به‌نظر می‌رسد این همبستگی مثبت میان غلظت پتاسیم بخش هوایی و EC محلول خاک ناشی از رابطه مثبت میان غلظت پتاسیم محلول خاک و EC محلول خاک ($r=۰/۹۶۲^{**}$) باشد. به‌عبارت دیگر، اثر غیرمستقیم رابطه اخیر سبب افزایش غلظت پتاسیم بخش هوایی بر اثر افزایش EC محلول خاک شده است.

غلظت نیتروژن بخش هوایی یونجه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی و اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت نیتروژن علوفه یونجه معنی‌دار بودند (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های غلظت نیتروژن علوفه یونجه برای اثر اصلی رطوبت خاک نشان داد که غلظت نیتروژن علوفه یونجه با افزایش کمبود آب افزایش یافت. بیشترین غلظت نیتروژن بخش هوایی در سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC مشاهده گردید. چکیر و چبی (۱۹) نتایج مشابهی برای گیاه تنباکو گزارش کردند. کوساکا و همکاران (۴۹) نیز افزایش نیتروژن کل و نیترات را در یک رقم متحمل به خشکی ارزن گزارش کردند و آن را یکی از سازوکارهای تحمل خشکی معرفی کردند. اعلم (۱۳) بیان کرد که غلظت زیاد نیتروژن در گیاهان قرار گرفته در معرض کمبود آب، به‌دلیل تجمع سریع آمینواسیدهای آزادی است که به پروتئین تبدیل نشده‌اند. گیروسی و همکاران (۳۶) در بررسی تغییرات ترکیب آمینو اسید عصاره بافت یونجه (Sap) (*Medicago sativa* L.)، افزایش معنی‌داری در غلظت کل

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]



شکل ۳. اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت نیتروژن (الف) و فسفر (ب) علوفه یونجه

آمینو اسیدهای پرولین، والین، ایزولوسین، لوسین، گلوتامیک اسید، آسپارتیک اسید و ترئونین با کاهش پتانسیل آب برگ، در پاسخ به کمبود آب، مشاهده کردند. همچنین، رشد کند گیاهان در شرایط کمبود آب، از بروز اثر رقت عناصر غذایی در گیاهان جلوگیری می‌کند (۱۳). این در حالی است که برخی محققین کاهش غلظت نیتروژن را با افزایش کمبود آب گزارش کردند (۴۱، ۵۳ و ۷۳). مصرف کمپوست لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار غلظت نیتروژن بخش هوایی شد. کمترین غلظت نیتروژن بخش هوایی در سطح بدون کمپوست لجن فاضلاب و بیشترین آن در تیمار ٦٠ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که نسبت به سطح شاهد، ۲۴/۴ درصد افزایش یافت (جدول ۶). حسین (۴۳) و سینگ و آگراوال (۷۷) نتایج مشابهی را گزارش کردند. مقایسه میانگین‌های غلظت نیتروژن بخش هوایی برای اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که بیشترین غلظت نیتروژن بخش هوایی در تیمار ٦٠ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با سطوح 0.81FC-FC و 0.56FC-0.75FC داشت. کمترین غلظت نیتروژن بخش هوایی در تیمار بدون کمپوست لجن فاضلاب و سطح رطوبت 0.81FC-FC مشاهده شد (شکل ۳-الف). با توجه به دامنه مطلوب (۴۵-۵۰ میلی‌گرم در گرم ماده خشک) گزارش شده توسط ملکوتی و غیبی (۷)، مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت نیتروژن بخش هوایی کمتر از دامنه بهینه بود که ممکن است به‌دلیل کمی مقدار نیتروژن بومی خاک، کارایی کم تثبیت نیتروژن توسط ریزوبیوم‌های ریشه، تصعید و نیترات‌زدایی نیتروژن افزوده شده به خاک باشد (۵۴). کمبود نیتروژن در خاک‌هایی با مقدار ماده آلی کم (کمتر از ۰/۵ درصد)، خاک‌های اسیدی با بافت درشت و خاک‌های قلیایی و آهکی با ماده آلی کم و پتانسیل زیاد هدرروی نیتروژن به صورت گاز آمونیاک مشاهده می‌شود (۲۵). علت دیگر برای کاهش غلظت نیتروژن ممکن است اثر رقت باشد. با مصرف لجن فاضلاب و افزایش سطوح آن سرعت رشد گیاه افزایش می‌یابد. به‌طوری که ممکن است سرعت رشد بیشتر از سرعت جذب نیتروژن به‌وسیله گیاه باشد و سبب کاهش غلظت آن در بخش هوایی شود (۵۴). میان غلظت نیتروژن علوفه یونجه و EC محلول خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت ($r= ۰/۷۹۷^{**}$). علت این همبستگی ممکن است تولید ترکیبات آلی نیتروژن‌دار با افزایش شوری محلول خاک باشد (۴۰).

غلظت فسفر بخش هوایی یونجه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی و اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت فسفر علوفه یونجه معنی‌دار بودند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های غلظت فسفر بخش هوایی برای اثر اصلی رطوبت خاک نشان داد که غلظت فسفر علوفه یونجه با افزایش کمبود آب کاهش یافت.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

به‌طوری که در سطوح رطوبت 0.56FC-0.75FC و 0.34FC-0.50FC، تفاوت معنی‌داری با سطح رطوبت 0.81FC-FC داشتند و به‌ترتیب ۵/۹ و ۱۲/۵ درصد نسبت به آن کاهش یافتند. وانگ و همکاران (۷۹) و رضایی و همکاران (۶۹) در گیاه گندم و گی و همکاران (۳۴) نتایج مشابهی برای گیاه ذرت گزارش کردند. دلایل عمده کاهش غلظت فسفر گیاه در شرایط رطوبت کم خاک که ناشی از اثر متقابل رطوبت خاک× گیاه× فسفر است، عبارتند از: ۱) با کاهش رطوبت خاک، سرعت پخشیدگی فسفر در خاک کاهش یافته و انتقال فسفر به ریشه‌ها و جذب آن کاهش می‌یابد و ۲) رشد ریشه‌های گیاه و به دنبال آن جذب عناصر، به سبب کاهش تولید زیست‌توده بخش هوایی، محدود می‌شود (۳۴).

مقایسه میانگین‌های غلظت فسفر برای اثر اصلی کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که مصرف کمپوست لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار غلظت فسفر بخش هوایی شد. کمترین غلظت فسفر بخش هوایی در سطح بدون کمپوست لجن فاضلاب و بیشترین آن در سطح ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که نسبت به تیمار شاهد کمپوست لجن فاضلاب، ۲۴/۱ درصد افزایش یافت (جدول ۸). عباسی و همکاران (۳) در گیاه برنج، نجفی و همکاران (۱۰) در گیاه آفتابگردان، محمد و آدامنه (۶۰) در گیاه کاهو و چنگ و همکاران (۲۲) در گیاه چمن نتایج مشابهی گزارش کردند. مورل و همکاران (۶۱) نتایج مشابهی گزارش و بیان کردند که برداشت فسفر توسط گیاهان معمولاً توسط غلظت HPO_4^{2-} و $H_2PO_4^-$ در محلول خاک، کنترل می‌شود که تحت تأثیر مصرف کمپوست لجن فاضلاب قرار می‌گیرد. دلیل دیگر افزایش غلظت فسفر بخش هوایی ممکن است افزایش حل‌پذیری فسفات‌های کلسیم به‌دلیل کاهش pH ناشی از تولید اسیدهای هیومیک و فلوویک حاصل از معدنی‌شدن کمپوست لجن فاضلاب باشد (۸). مقایسه میانگین‌های غلظت فسفر بخش هوایی برای اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب از صفر به ۱۵ گرم بر کیلوگرم خاک، غلظت فسفر بخش هوایی در هر سه رژیم رطوبتی مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بیشترین غلظت فسفر بخش هوایی در تیمار ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و سطح رطوبت 0.81FC-FC مشاهده شد (شکل ۳-ب). در شرایط کمبود آب، با مصرف کمپوست لجن فاضلاب غلظت فسفر بخش هوایی نسبت به سطح شاهد کمپوست لجن فاضلاب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. به‌نظر می‌رسد بروز پدیده اثر تغلیظ بر اثر کمتر بودن سرعت رشد بخش هوایی نسبت به سرعت جذب فسفر (۵۴) باعث افزایش معنی‌دار غلظت فسفر در تیمارهای ۱۵ گرم کمپوست لجن فاضلاب و سطح رطوبت 0.81FC-FC، ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب و سطح رطوبت 0.81FC-FC و ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب و سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC شد. نتایج نشان داد که در شرایط کمبود آب، غلظت فسفر بخش هوایی کاهش یافت؛ ولی کمپوست لجن فاضلاب موجب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر در شرایط کمبود آب نسبت به تیمار شاهد شد. با توجه به دامنه مطلوب (۷-۲/۶ میلی‌گرم در گرم ماده خشک) گزارش شده توسط ملکوتی و غیبی (۷)، غلظت فسفر بخش هوایی در همه تیمارها، به استثنای تیمار شاهد کمپوست لجن فاضلاب و سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC، در دامنه مطلوب بود. محدود شدن رشد ریشه، کاهش شیب غلظت فسفر در سطح تماس و کاهش ضریب پخشیدگی مؤثر در شرایط کمبود آب می‌تواند از دلایل این پدیده باشد (۳۹).

غلظت کلسیم بخش هوایی یونجه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی و اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت کلسیم علوفه یونجه معنی‌دار بودند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های غلظت کلسیم بخش هوایی برای اثر اصلی رطوبت خاک نشان داد که غلظت کلسیم علوفه یونجه با کاهش رطوبت خاک (افزایش تنش کمبود آب) به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. غلظت کلسیم

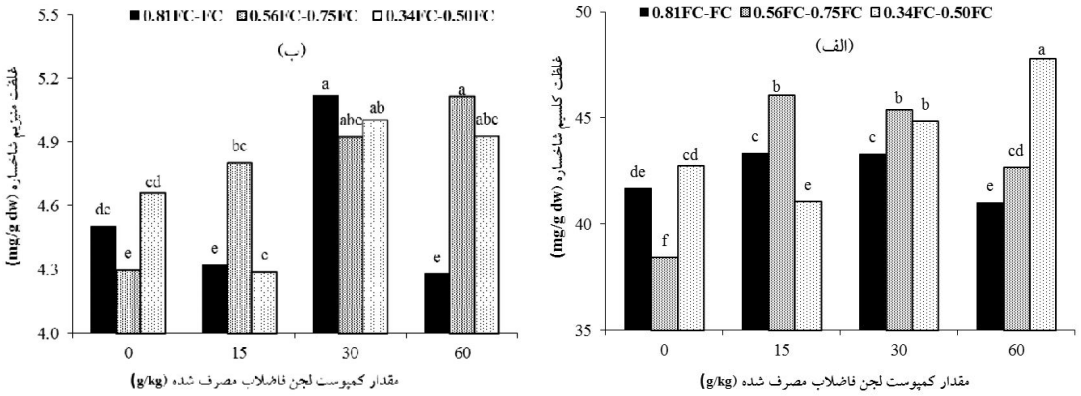
[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

علوفه یونجه در سطح رطوبتی 0.34FC-0.50FC نسبت به سطح رطوبتی 0.81FC-FC، ۴/۲۵ درصد افزایش یافت. هوانگ (۴۱) و رضایی و همکاران (۶۹) افزایش معنی‌دار غلظت کلسیم گیاه را با اعمال کمبود آب در خاک گزارش کردند. افزایش غلظت کلسیم در شرایط کمبود آب، تحمل گیاه را در برابر کم‌آبی افزایش می‌دهد (۸۰). کلسیم قبلاً فقط به‌عنوان جزء مهمی از ساختار دیواره سلولی مطرح بود. ولی از زمان کشف کالمودولین (Calmodulin)، به‌وضوح مشخص شده که کلسیم فقط یک عنصر غذایی پرمصرف نیست، بلکه کنترل‌کننده اصلی سوخت‌وساز و توسعه گیاه است (۶۷). کالمودولین از پروتئین‌های سیتوپلاسمی سلول‌های یوکاریوتی است که اتصال کلسیم به کالمودولین موجب ایجاد تغییرات کنفورماسیونی مولکول آنها می‌شود. این تغییرات باعث می‌شود آنها بتوانند با پروتئین‌های هدف برهمکنش داشته باشند و عملکرد آنها را تنظیم کنند (۵۸). به‌عنوان مثال، فعال‌کننده‌های رونویسی متصل به CaM (کالمودولین) که بیان ژن را کنترل می‌کنند، از پروتئین‌های هدف محسوب می‌شوند. این عملکرد کالمودولین وابسته به سیگنال‌های کلسیم سیتوپلاسمی است که توسط عوامل نامساعد مانند سرما، خشکی، شوری، آسیب فیزیکی یا کمبود عناصر غذایی القا می‌شوند. کالمودولین در شروع فرایندهای مختلف رشد و نمو وابسته به کلسیم، سازگاری نسبت به برخی از شرایط نامساعد محیطی و پاسخ به پاتوژن‌های مختلف نقش دارد (۴۰). کلسیم برای بازیابی گیاه در شرایط تنش خشکی از طریق ترمیم و فعال کردن آنزیم ATPase غشای پلاسمایی لازم است (۶۵). ماهواچی (۵۳) افزایش غلظت کلسیم برگ‌های موز را با کمبود آب گزارش کرد و دلیل آن را به نقش کلسیم در فرایند بسته شدن روزنه‌ها از طریق شرکت در مسیر هدایت سیگنال اسید آبسیزیک مرتبط دانست.

مقایسه میانگین‌های غلظت کلسیم بخش هوایی برای اثر اصلی کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که مصرف کمپوست لجن فاضلاب باعث افزایش معنی‌دار غلظت کلسیم بخش هوایی شد. غلظت کلسیم بخش هوایی در سطوح ۱۵، ۳۰ و ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک به‌طور معنی‌داری از سطح بدون کمپوست لجن فاضلاب بیشتر بود. کمترین غلظت کلسیم بخش هوایی در سطح بدون کمپوست لجن فاضلاب و بیشترین آن در سطح ۳۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که نسبت به سطح شاهد، ۸/۵ درصد افزایش یافت (جدول ۸). عباسی و همکاران (۳)، نجفی و همکاران (۱۱) و سینگ و آگراوال (۷۷) نتایج مشابهی گزارش کردند. لوبو و فیلهو (۵۱) عدم تأثیر معنی‌دار لجن فاضلاب بر غلظت کلسیم برگ آفتابگردان و حسین (۴۳) افزایش معنی‌دار غلظت کلسیم گیاه خیار را بر اثر کاربرد لجن فاضلاب گزارش کردند.

مقایسه میانگین‌های غلظت کلسیم بخش هوایی برای اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب، غلظت کلسیم بخش هوایی در سطوح رطوبت 0.81FC-FC، 0.56FC-0.75FC و 0.34FC-0.50FC افزایش یافت. بیشترین و کمترین غلظت کلسیم به‌ترتیب در تیمارهای شاهد کمپوست لجن فاضلاب و سطح رطوبت 0.56FC-0.75FC و ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و سطح رطوبت 0.34FC-0.50FC مشاهده شد (شکل ۴-الف). نتایج حاکی از آن است که مصرف مقادیر ۳۰ و ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک در شرایط کمبود شدید آب، منجر به افزایش جذب کلسیم نسبت به تیمار شاهد کمپوست لجن فاضلاب شد. با توجه به دامنه مطلوب (۱۸-۳۰ میلی‌گرم در گرم ماده خشک) گزارش شده توسط ملکوتی و غیبی (۷)، غلظت کلسیم بخش هوایی بیشتر از دامنه مطلوب بود. غلظت کلسیم در گیاه می‌تواند به‌طور قابل توجهی زیاد باشد. حتی ممکن است غلظت آن در برگ‌های بالغ گیاهان آهک‌دوست به بیش از ۱۰٪ وزن خشک برسد، بدون اینکه نشانه‌ای از مسمومیت یا توقف رشد در گیاه مشاهده شود (۵۴).

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]



شکل ۴. اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت کلسیم (الف) و منیزیم (ب) علوفه یونجه

غلظت منیزیم بخش هوایی یونجه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرهای اصلی و اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت منیزیم علوفه یونجه معنی‌دار بودند (جدول ۷). مقایسه میانگین‌های غلظت منیزیم علوفه یونجه برای اثر اصلی رطوبت خاک نشان داد که غلظت منیزیم بخش هوایی با اعمال تنش کمبود آب در خاک تغییر یافت. به‌طوری که غلظت منیزیم بخش هوایی در سطوح رطوبتی 0.56FC-0.75FC و 0.34FC-0.50FC به‌طور معنی‌داری از سطح 0.81FC-FC بیشتر بود. عباسپور و همکاران (۱۲) گزارش کردند که کمبود آب، موجب افزایش غیرمعنی‌دار غلظت منیزیم بخش هوایی نشاهای پسته شد. هوانگ (۴۱) کاهش غلظت منیزیم بخش هوایی چهار رقم مختلف گیاه فستوک بلند را گزارش کرد و علت آن را کاهش تعرق و توانایی جذب عناصر توسط گیاه در شرایط خشکی بیان کرد.

مقایسه میانگین‌های غلظت منیزیم بخش هوایی برای اثر اصلی کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که مصرف کمپوست لجن فاضلاب باعث افزایش غلظت منیزیم علوفه یونجه شد. غلظت منیزیم بخش هوایی در سطوح شاهد و ۱۵ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، با سطوح ۳۰ و ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک تفاوت معنی‌دار داشت. کمترین غلظت منیزیم بخش هوایی در سطوح شاهد و ۱۵ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک و بیشترین آن در سطح ۳۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک مشاهده شد که نسبت به سطوح شاهد و ۱۵ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، به‌ترتیب ۱۳/۸ و ۱۸/۵ درصد افزایش داشت (جدول ۷). عباسی و همکاران (۳) افزایش معنی‌دار غلظت منیزیم بخش هوایی برنج، نجفی و همکاران (۱۱) افزایش معنی‌دار غلظت منیزیم بخش هوایی آفتابگردان، حسین (۴۳) افزایش معنی‌دار غلظت منیزیم میوه خیار و لوبو و فیلهو (۵۱) افزایش غیرمعنی‌دار غلظت منیزیم برگ و دانه آفتابگردان را با افزایش سطح لجن فاضلاب گزارش کردند.

مقایسه میانگین‌های غلظت منیزیم بخش هوایی برای اثر متقابل رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب نشان داد که با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب، غلظت منیزیم در هر سه رژیم رطوبتی در خاک، روند افزایشی نشان داد. مصرف ۱۵ گرم کمپوست لجن فاضلاب در سطوح رطوبت 0.81FC-FC و 0.34FC-0.50FC موجب کاهش غلظت منیزیم بخش هوایی شد. مصرف ۳۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک در هر سه سطح رطوبت خاک منجر به افزایش معنی‌دار غلظت منیزیم نسبت به سطح بدون کمپوست لجن فاضلاب شد. نتایج نشان داد که اثر سطوح مختلف کمپوست لجن فاضلاب بر غلظت منیزیم علوفه یونجه به مقدار رطوبت خاک بستگی داشت (شکل ۴-ب). شکل ۴ نشان می‌دهد که تغییرات غلظت منیزیم علوفه یونجه با افزایش سطح کمپوست لجن فاضلاب در سطوح رطوبت 0.81FC-FC و 0.34FC-0.50FC روند غیرخطی، ولی در سطح رطوبت 0.56FC-0.75FC روند خطی

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

($r = ۰/۹۰۴^{**}$) داشت. علت این پدیده را می‌توان چنین توجیه کرد که غلظت منیزیم در علوفه یونجه با توجه به رقابت کلسیم و پتاسیم با منیزیم برای جذب، در رطوبت‌های زیاد و کم تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همچنین، فراهمی منیزیم حاصل از معدنی‌شدن کمپوست لجن فاضلاب و سطوح مختلف رطوبت خاک که بر فراهمی منیزیم از طریق سازوکار جریان توده‌ای و پخشیدگی اثر می‌گذارد، غلظت منیزیم علوفه یونجه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. غلظت منیزیم بخش هوایی با توجه به دامنه مطلوب (۳-۱۰ میلی‌گرم در گرم ماده خشک) گزارش شده توسط ملکوتی و غیبی (۷)، در دامنه مطلوب بود. غلظت بهینه منیزیم در گیاه یونجه، کیفیت تغذیه‌ای علوفه یونجه را افزایش می‌دهد. به‌عنوان مثال، کزاز چمنی که بر اثر غلظت کم منیزیم در علوفه ایجاد می‌شود، یک اختلال جدی در نشخوارکنندگان است (۴۰). وجود همبستگی مثبت ($r= ۰/۶۵۱^{**}$) بین غلظت منیزیم و کلسیم بخش هوایی، شاید به‌دلیل مشارکت همزمان منیزیم و کلسیم در تنظیم اسمزی و روابط آبی باشد.

نتیجه‌گیری

طبق نتایج حاصل از این پژوهش، مصرف کمپوست لجن فاضلاب می‌تواند عناصر غذایی پرمصرف گیاه یونجه را تأمین کند. پاسخ غلظت عناصر غذایی پرمصرف در علوفه یونجه به مصرف کمپوست لجن فاضلاب بستگی به سطح رطوبت خاک داشت. مصرف ۳۰ و ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک در شرایط کمبود متوسط و شدید آب در خاک (0.56FC-0.75FC و 0.34FC-0.50FC) منجر به افزایش معنی‌دار غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم علوفه یونجه نسبت به سطح شاهد کمپوست لجن فاضلاب شد. لذا، با توجه به خطر آلودگی خاک و گیاه و افزایش شوری خاک و کاهش عملکرد گیاه در سطح ۶۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، مصرف ۳۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، برای بهبود وضعیت تغذیه‌ای و رشد گیاه و افزایش تحمل آن در برابر تنش خشکی در شرایط گلخانه‌ای می‌تواند توصیه شود. باتوجه به نقش کمپوست لجن فاضلاب و سایر کودهای آلی در افزایش حاصلخیزی خاک و فراهمی عناصر غذایی در خاک‌های کشاورزی، استفاده از کمپوست لجن فاضلاب به جای کودهای شیمیایی با توجه به هزینه و پیامدهای سوء زیست‌محیطی کمتری که نسبت به کودهای شیمیایی دارد، به‌عنوان ابزاری برای تحقق کشاورزی پایدار اهمیت پیدا می‌کند. البته در مورد مصرف درازمدت لجن فاضلاب در اراضی کشاورزی باید افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک، غلظت فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها را در خاک و گیاه مد نظر قرار داد تا منجر به آلودگی خاک و زنجیره غذایی نشود.

منابع مورد استفاده

۱. بی‌نام. ۱۳۸۹. آمارنامه کشاورزی، جلد اول- محصولات زراعی سال ۸۸-۱۳۸۷. دفتر آمار و فناوری اطلاعات، وزارت جهاد کشاورزی، تهران.

۲. پازنده، ح. ۱۳۷۱. الکتروشیمی برای مهندسین. چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.

۳. عباسی، م.، ن. نجفی، ن. علی‌اصغرزاد و ش. اوستان. ۱۳۹۱. اثر شرایط آب خاک، لجن فاضلاب و کود شیمیایی بر غلظت عناصر پرمصرف در برنج در یک خاک آهکی. مجله مدیریت خاک و تولید پایدار ۲(۱): ۱-۲۶.

۴. کریمی، ه. ۱۳۶۹. یونجه. مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

۵. کلباسی م، ۱۳۷۵. وضعیت مواد آلی در خاک‌های ایران و نقش کود کمپوست. خلاصه مقالات پنجمین کنگره علوم خاک ایران، ۱۰ تا ۱۳ شهریور، آموزشکده کشاورزی کرج.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]

[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]

[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

۶. محمودی، ش.، ن. نجفی و ع. ریحانی‌تبار. ۱۳۹۳. تأثیر رطوبت خاک و کمپوست لجن فاضلاب بر شاخص کلروفیل برگ و برخی ویژگی‌های رشد گیاه یونجه در شرایط گلخانه‌ای. مجله علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، سال ۵(۲۰): ۲۲۱-۲۰۷.

۷. ملکوتی، م. ج. و م. ن. غیبی. ۱۳۷۶. تعیین حد بحرانی عناصر غذایی محصولات استراتژیک و توصیه صحیح کودی در کشور. نشر آموزش کشاورزی، کرج.

۸. نجفی، ن. و ح. توفیقی. ۱۳۸۶. تغییرات فسفر قابل جذب و شکل‌های فسفر معدنی پس از غرقاب در خاک‌های شالیزاری شمال ایران. مجموعه مقالات دهمین کنگره علوم خاک ایران، ۴ تا ۶ شهریور، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.

۹. نجفی، ن. و س. مردمی. ۱۳۹۲. اثر کشت آفتابگردان، کود دامی و لجن فاضلاب بر فراهمی عناصر، pH و EC یک خاک قلیایی. مجله تحقیقات کاربردی خاک ۱(۱): ۱-۲۳.

۱۰. نجفی، ن.، س. مردمی و ش. اوستان. ۱۳۹۱. اثر غرقاب، لجن فاضلاب و کود دامی بر جذب برخی عناصر پرمصرف و سدیم در گیاه آفتابگردان در یک خاک شن لومی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۶(۳): ۶۱۹-۶۳۶.

۱۱. نجفی، ن.، م. عباسی، ن. علی‌اصغرزاد و ش. اوستان. ۱۳۹۲. اثر کشت برنج، غرقاب، لجن فاضلاب و کودهای شیمیایی بر pH ، EC، پتاسیم و سدیم محلول خاک. مجله دانش آب و خاک ۲۳(۳): ۱۰۵-۱۲۱.

12. Abbaspour, H., S. Saeidi-Sar, H. Afshari and M.A. Abdel-Wahhab. 2012. Tolerance of mycorrhiza infected pistachio (*Pistacia vera* L.) seedlings to drought stress under glasshouse conditions. J. Plant Physiol. 169: 704-709.
13. Alam, S.M. 1999. Nutrient uptake by plants under stress conditions. PP. 285-313. *In:* Pessarakli, M. (Ed.), Handbook of Plant and Crop Stress, 2nd ed., Marcel Dekker Inc., New York.
14. Alloway, B.J. 1995. Heavy Metals in Soils. 2nd ed., Blackie Academic and Professional Publishers, London, UK.
15. Anonymous. 1994. A guide for land appliers on the requirements of the federal standards for the use or disposal of sewage sludge. 40 CFR Part 503, Office of Enforcement of Environmental and Compliance Assurance, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
16. Banerjee, M.R., D.L. Burton and S. Depoe. 1997. Impact of sewage sludge application on soil biological characteristics. Agric. Ecosys. Environ. 66: 241-249.
17. Berdanier, C.D. and T.K. Atkins. 1998. Advanced Nutrition, Vol. 2: Micronutrients. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
18. Bohn, H.L., B.L. McNeal and G.A. O'Connor. 2001. Soil Chemistry. Third ed., John Wiley and Sons, Inc., USA.
19. Çakir, R. and U. Çebi. 2010. The effect of irrigation scheduling and water stress on the maturity and chemical composition of *Virginia tobacco* leaf. Field Crops Res. 119: 269-276.
20. Cakmak, I. 2005. Role of mineral nutrients in tolerance of crop plants to environmental stress factors. Proceedings from the International Symposium on Fertigation: Optimizing the Uilization of Water and Nutrients, 20-24 September, Beijing, China, pp. 35-48.
21. Casado-Vela, J., S. Sells, C. Diaz-Crespo, J. Navarro-Pedreno, J. Mataix-Beneyto and I. Gomez. 2007. Effect of composted sewage sludge application to soil on sweet pepper crop (*Capsicum annuum* var. Annuum) grown under two exploitation regimes. Waste Manage. 27: 1509-1518.
22. Cheng, H., W. Xu, J. Liu, Q. Zhao, Y. He and G. Chen. 2007. Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth. Ecol. Eng. 29: 96-104.
23. Cripps, R.W., S.K. Winfree and J.L. Reagan. 1992. Effects of sewage sludge application method on corn production. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 23: 1705-1715.
24. De Macedo, F.G., W.J. De Melo, L.C.S. Merlino, M.H. Ribeiro, M.A. Camacho and G.M.P. De Melo. 2012. Agronomic traits of corn fertilized with sewage sludge. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 43: 1790-1799.
25. Dobermann, A. and T.H. Fairhurst. 2000. Rice: Nutrient Disorders & Nutrient Management. PPI/PPIC, Singapore and IRRI, Philippines Handbook Series.
26. Eneji, A.E., S. Inanaga, S. Muranaka, J. Li, T. Hattori, P. An and W. Tsuji. 2008. Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers. J. Plant Nutr. 31: 355-365.
27. Erlandsson, G. 1975. Rapid effects on ion and water uptake induced by changes of water potential in young wheat plants. Physiol. Plant. 35: 256-262.
28. Fageria, N.K., V.C. Baligar and R.B. Clark. 2002. Micronutrients in crop production. PP. 185-268. *In:* Sparks, D.L. (Ed.), Advances in Agronomy, Vol. 77, Academic Press.
29. Foth, H.D. 1990. Fundamentals of Soil Science. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

30. Francois, L. and E.V. Maas. 1999. Crop response and management of salt-affected soils. PP. 169-201. *In:* Pessarakli, M. (Ed.), Handbook of Plant and Crop Stress, 2nd ed., Marcel Dekker Inc., New York.
31. Franco-Otero, V.G., P. Soler-Rovira, D. Hernández, E.G. López-de-Sá and C. Plaza. 2012. Short-term effects of organic municipal wastes on wheat yield, microbial biomass, microbial activity, and chemical properties of soil. Biol. Fert. Soils 48: 205-216.
32. García, I., R. Mendoza and M. Pomar. 2008. Deficit and excess of soil water impact on plant growth of *Lotus tenuis* by affecting nutrient uptake and arbuscular mycorrhizal symbiosis. Plant Soil 304: 117-131.
33. García, C., T. Hernández, J.A. Pascual, J.L. Moreno, and M. Ros. 2000. Microbial activity in soils of SE Spain exposed to degradation and desertification processes: Strategies for their rehabilitation. PP. 93-143. *In:* García, C. and T. Hernández (Eds.), Research and Perspectives of Soil Enzymology in Spain, CEBAS, CSIC, Murcia.
34. Ge, T.D., N.B. Sun, L.P. Bai, C.L. Tong and F.G. Sui. 2012. Effects of drought stress on phosphorus and potassium uptake dynamics in summer maize (*Zea mays* L.) throughout the growth cycle. Acta Physiol. Plant. 34: 2179-2186.
35. Gee, G.W. and D. Or. 2002. Particle-size analysis. PP. 255-295. *In:* Warren, A.D. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods, SSSA Inc., Madison, WI, USA.
36. Girousse, C., R. Bournoville and J.L. Bonnemai. 1996. Water deficit-induced changes in concentrations in proline and some other amino acids in the phloem sap of alfalfa. Plant Physiol. 11: 109-113.
37. Gunes, A., N. Cicek, A. Inal, M. Alpaslan, F. Eraslan, E. Guneri and T. Guzelordu. 2006. Genotypic response of chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars to drought stress implemented at pre- and post-anthesis stages and its relations with nutrient uptake and efficiency. Plant Soil Environ. 52: 368-376.
38. Gupta, P.K. 2000. Soil, Plant Water, and Fertilizer Analysis. Agrobios, New Delhi, India.
39. Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale and W.L. Nelson. 2006. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management. 7th ed., Prentice Hall of India, New Delhi, India.
40. Hawkesford, M., W. Horst, T. Kichey, H. Lambers, J. Schjoerring, I.S. Møller and P. White. 2012. Functions of Macronutrients. PP. 135-189. *In:* Marschner, P. (Ed.), Mineral Nutrition of Higher Plants, Third Edition, Academic Press, San Diego.
41. Huang, B. 2001. Nutrient accumulation and associated root characteristics in response to drought stress in tall fescue cultivars. HortSci. 36: 148-152.
42. Huang, M.L., X.P. Deng, Y.Z. Zhao, S.L. Zhou, S. Inanaga, S. Yamada and K. Tanaka. 2007. Water and nutrient use efficiency in diploid, tetraploid and hexaploid wheats. J. Integ. Plant Biol. 49: 706-715.
43. Hussein, A.H.A. 2009. Impact of sewage sludge as organic manure on some soil properties, growth, yield and nutrient contents of cucumber crop. J. Appl. Sci. 9: 1401-1411.
44. Hutchings, N.J. 1984. The availability of nitrogen in liquid sewage sludges applied to grassland. J. Agric. Sci. 102: 703-709.
45. Kalra, Y.P. and D.G. Maynard. 1991. Methods Manual for Forest Soil and Plant Analysis. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta, Canada.
46. Knudsen, D., G.A. Peterson and P.F. Pratt. 1982. Lithium, sodium, and potassium. PP. 225-246. *In:* Page, et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, ASA and SSSA Inc., Madison, WI.
47. Kramer, P.J. and J.S. Boyer 1995. Water Relations of Plants and Soils. Academic Press, San Diego, California.
48. Kudoyarova, G.R., D.S. Veselov, R.G. Faizov, S.V. Veselova, E.A. Ivanov and R.G. Farkhutdinov. 2007. Stomata response to changes in temperature and humidity in wheat cultivars grown under contrasting climatic conditions. Russ. J. Plant Physiol. 54: 46-49.
49. Kusaka, M., M. Ohta and T. Fujimura. 2005. Contribution of inorganic components to osmotic adjustment and leaf folding for drought tolerance in pearl millet. Physiol. Plant. 125: 474-489.
50. Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
51. Lobo, T.F. and H.G. Filho. 2009. Sewage sludge levels on the development and nutrition of sunflower plants. J. Soil Sci. Plant Nutr. 9: 245-255.
52. Mahdizadeh Naderi, N., O. Alizadeh and A.H. Nasr. 2010. Some macro nutrients uptake optimizing by effect of mycorrhizae fungi in water stress conditions in sorghum plant. Proceedings of International Conference on Environmental Engineering and Applications (ICEEA), Biejing, China, pp. 165-168.
53. Mahouachi, J. 2009. Changes in nutrient concentrations and leaf gas exchange parameters in banana plantlets under gradual soil moisture depletion. Sci. Hort. 120: 460-466.
54. Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London, UK.
55. Marschner, P. and Z. Rengel. 2012. Nutrient availability in soils. PP. 315-330. *In:* Marschner, P. (Ed.), Mineral Nutrition of Higher Plants, Third Edition, Academic Press, San Diego.
56. Mbarki, S., N. Labidi, H. Mahmoudi, N. Jedidi and C. Abdelly. 2008. Contrasting effects of municipal compost on

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]

alfalfa growth in clay and in sandy soils: N, P, K, content and heavy metal toxicity. Bioresour. Technol. 99: 6745-6750.
57. McLean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. PP. 199-224. *In:* Page et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, ASA and SSSA Inc., Madison, WI, USA.
58. Medvedev, S.S. 2005. Calcium signaling system in plants. Russ. J. Plant Physiol. 52: 249-270.
59. Mengel, K. 2007. Potassium. PP. 91-120. *In:* Barker, A.V. and D.J. Pilbeam (Eds.), Handbook of Plant Nutrition, CRC Press, Boca Raton, FL.
60. Mohammad, M.J. and B.M. Athamneh. 2004. Changes in soil fertility and plant uptake of nutrient and heavy metals in response to sewage sludge application to calcareous soils. J. Agron. 2: 229-236.
61. Morel, C., H. Tiessen, J.O. Moir and J.W.B. Stewart. 1994. Phosphorus transformations and availability under cropping and fertilization assessed by isotopic exchange. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1439-1445.
62. Motalebifard, R., N. Najafi, S. Oustan, M.R. Neyshabouri and M. Valizadeh. 2013. The combined effects of phosphorus and zinc on evapotranspiration, leaf water potential, water use efficiency and tuber attributes of potato under water deficit conditions. Sci. Hort. 162: 31-38.
63. Nelson, D.W. and L.E. Sommers. 1982. Total carbon and organic matter. PP. 539-579. *In:* Page et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, ASA and SSSA Inc., Madison, WI, USA.
64. Olsen, S.R. and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. PP. 403-430. *In:* Page et al. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, 2nd ed., ASA and SSSA Inc., Madison, WI, USA.
65. Palta, J.P. 2000. Stress interactions at the cellular and membrane levels. HortSci. 25: 1377-1381.
66. Peters, J. 2003. Recommended Methods of Manure Analysis. University of Wisconsin Cooperative Extension Publication, WI.
67. Poovaiah, B.W., A.S.N. Reddy and A.C. Leopold. 2000. Calcium messenger system in plants. CRC Crit. Rev. Plant Sci. 6:47-103.
68. Rékási, M. and T. Filep. 2009. Effect of communal sewage sludge treatment on the Cu, Zn, Mn, Ni and Co fractions of the soil and on plant uptake in a pot experiment. Agrokem Talajtan 58: 105-120.
69. Rezaei, M., S. Zehtab-Salmasi, N. Najafi, K. Ghassemi-Golezani and M. Jalali Kamali. 2010. Effects of water deficit on nutrient content and grain protein of bread wheat genotypes. J. Food, Agric. Environ. 8: 535-539.
70. Richards, L.A. 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. United States Salinity Laboratory Staff, Agriculture Handbook No. 60, USDA.
71. Samarah, N., R. Mullen and S. Cianzio. 2004. Size distribution and mineral nutrients of soybean seeds in response to drought stress. J. Plant Nutr. 27: 815-835.
72. Serna, M.D. and F. Pomares. 1992. Nitrogen mineralization of sludge-amended soil. Bioresour. Technol. 39: 285-290.
73. Shangguan, Z.P., M.A. Shaoa and J. Dyckmans. 2000. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat. Environ. Exp. Bot. 44: 141-149.
74. Shiralipour, A., D.B. Mcconnell and W.H. Smith. 1992. Physical and chemical properties of soils as affected by municipal solid waste compost application. Biomass Bioenergy 3: 261-266.
75. Shober, A.L., R.C. Stehouwer and K.E. Macneal. 2003. On-farm assessment of biosolids effects on soil and crop tissue quality. J. Environ. Qual. 32: 1873-1880.
76. Sims, J.T. 1990. Nitrogen mineralization and elemental availability in soils amended with composted sewage sludge. J. Environ. Qual. 19: 669-675.
77. Singh, R.P. and M. Agrawal. 2010a. Biochemical and physiological responses of rice (*Oryza sativa* L.) grown on different sewage sludge amendments rates. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 84: 606-612.
78. Singh, R.P. and M. Agrawal. 2010b. Effect of different sewage sludge applications on growth and yield of *Vigna radiata* L. field crop: Metal uptake by plant. Ecol. Eng. 36: 969-972.
79. Wang, Z., S. Li, C.L. Vera and S.S. Malhi. 2005. Effects of water deficit and supplemental irrigation on winter wheat growth, grain yield and quality, nutrient uptake, and residual mineral nitrogen in soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 36: 1405-1419.
80. Waraich, E.A., R. Ahmad and M.Y. Ashraf. 2011. Role of mineral nutrition in alleviation of drought stress in plants. Aust. J. Crop Sci. 5: 764-777.
81. Warman, P.R. and W.C. Termeer. 2005. Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: Yields and N, P and K content of crops and soils. Bioresour. Technol. 96: 955-961.
82. Zebarth, B.J., R. McDougall, G. Neilsen and D. Neilsen. 2000. Availability of nitrogen from municipal biosolids for dryland forage grass. Can. J. Plant Sci. 80: 575-582.

[Downloaded from jspi.iut.ac.ir on 2025-01-30]
[DOR: 20.1001.1.20089082.1394.6.2.4.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.ejgcst.6.2.37]