

مقاله پژوهشی

اثر هیدروچار لجن فاضلاب و نیتروژن بر ویژگی‌های رشد گیاه برنج در یک خاک آلوده به مس در شرایط گلخانه‌ای

الناز عبدالملکی^۱، نصرت اله نجفی^{۲*}، عادل ریحانی تبار^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۸

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

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

چکیده

برای کاهش بار میکروبی و سرعت تجزیه لجن فاضلاب می‌توان این پسماند آلی را به هیدروچار تبدیل و در خاک مصرف کرد. برای بررسی تأثیر سطوح مختلف لجن فاضلاب و هیدروچار آن بر ویژگی‌های رشد گیاه برنج در یک خاک آلوده به مس، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در ۳ تکرار با ۳ عامل ماده آلی در سه سطح (شاهد، ۱۰ گرم لجن فاضلاب و ۱۰ گرم هیدروچار لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک)، نیتروژن (N) در دو سطح (صفر و ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع اوره)، مس در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع مس سولفات) در شرایط گلخانه انجام شد. نتایج نشان داد که با مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن، ماده خشک شاخساره و ریشه، تعداد پنجه، تعداد خوشه، تعداد برگ، طول برگ، عرض برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه در محل طوقه نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش یافت و میزان این افزایش در حضور لجن فاضلاب بیش‌تر از هیدروچار آن بود. همچنین، مصرف ۲۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک باعث افزایش معنادار صفات مذکور نسبت به شاهد گردید. آلودگی خاک با مس باعث کاهش معنادار تعداد پنجه، تعداد خوشه، تعداد برگ، وزن ماده خشک ریشه نسبت به شاهد شد. مصرف هیدروچار لجن فاضلاب و کود اوره با کاهش غلظت مس در شاخساره گیاه برنج اثر سمیت مس را کاهش و تحمل گیاه را در برابر سمیت مس افزایش داد. برای دستیابی به رشد مطلوب برنج در هر دو شرایط آلوده و غیرآلوده به مس، مصرف ۱۰ گرم لجن فاضلاب یا هیدروچار آن و ۲۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک می‌تواند در شرایط مشابه توصیه شود.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، اوره، برنج، لجن فاضلاب، مس، هیدروچار.

Effects of Sewage Sludge-Derived Hydrochar and Nitrogen on Growth Characteristics of Rice in a Cu-Spiked Soil under Greenhouse Conditions

E Abdolmaleki¹, N Najafi^{2*}, A Reyhanitabar³

Received: May 7, 2019

Accepted: July 30, 2019

¹M.Sc. Graduate, Soil Science Dept., Faculty of Agriculture, Univ. of Tabriz, Iran

²Prof., Soil Science Dept., Faculty of Agriculture, Univ. of Tabriz, Iran

³Assoc. Prof., Soil Science Dept., Faculty of Agriculture, Univ. of Tabriz, Iran

*Corresponding Author, Email: n-najafi@tabrizu.ac.ir

Abstract

In order to reduce the microbial load and the decomposition rate of sewage sludge this organic waste could be converted to hydrochar and be used in the soil. To evaluate the effects of different levels of sewage sludge and sewage sludge-derived hydrochar on growth characteristics of rice in a Cu-spiked soil a factorial experiment was performed based on a completely randomized design with three replications and three factors of organic matter at three levels (control, 10 g sewage sludge, and 10 g sewage sludge-derived hydrochar per kilogram soil), nitrogen (N) at two levels (0, and 250 mg per kilogram soil as urea), and copper (Cu) at three levels (0, 10, and 250 mg Cu per kilogram soil as copper sulfate) under greenhouse conditions. The results showed that by applications of sewage sludge and its hydrochar, leaf length, leaf width, plant height, stem diameter, shoot and root dry matter weights, and tillers, spikes, and leaves numbers were significantly increased as compared to the control and the amounts of these increases in the presence of the sewage sludge were greater than those of the hydrochar, respectively. Also, using 250 mg N per kilogram soil significantly increased the mentioned characteristics relative to the control. The soil Cu contamination significantly reduced the tillers, spikes, and leaves numbers, and root dry matter weight as compared to the control. The use of sewage sludge-derived hydrochar and N fertilizer reduced the Cu toxicity and increased the rice tolerance to Cu toxicity by reducing the Cu concentration in rice shoot. To achieve rice optimum growth in the both Cu contaminated and non-contaminated conditions, the use of 10 g sewage sludge or sewage sludge-derived hydrochar and 250 mg N per kilogram soil can be recommended at similar conditions.

Keywords: Contamination, Copper, Hydrochar, Rice, Sewage Sludge, Urea

مقدمه

مواد آلی، عنصرهای غذایی و زیست توده میکروبیهای خاک، سبب بهبود حاصلخیزی و فعالیت‌های آنزیمی خاک شده و شدت فتوسنتز گیاه، رشد و عملکرد آن را افزایش می‌دهد (اقبال و همکاران ۲۰۰۴). با این حال، در صورتی که لجن فاضلاب به‌طور مستقیم به خاک افزوده شود، به علت داشتن فلزهای سنگین، میکروبیهای بیماری‌زا، ترکیب‌های آلی سمی، ورود نیترات و فسفات به آب‌های سطحی و زیرزمینی و متصاعد کردن آمونیاک و گازهای گلخانه‌ای ممکن است مشکلات متعددی در محیط زیست و سلامتی انسان و دام به وجود آورد، اما با تبدیل این ماده به هیدروچار، خطرهای احتمالی آن‌ها از نظر بهداشتی،

برنج غذای اصلی نیمی از مردم جهان و اغلب مردم کشورهای در حال توسعه است. سطح زیر کشت این گیاه در جهان حدود ۱۴۷ میلیون هکتار و منبع اولیه غذا و کالری برای بشر است (خان و همکاران ۲۰۱۳). با توجه به کمبود مواد آلی در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک، مصرف ماده آلی سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک و تأمین عنصرهای غذایی مورد نیاز گیاه می‌شود (نجفی و همکاران ۲۰۱۹). لجن فاضلاب یک پسماند آلی است که با توجه به افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و صنایع مختلف، تولید آن رو به افزایش است. افزودن لجن فاضلاب به خاک یک راه ایمن برای دفن این پسماند بوده و با افزایش

معنادار نداشت اما تلفیق آن با کود سوپرفسفات تریپل سبب افزایش معنادار ماده خشک شاخساره و جذب فسفر نسبت به شاهد گردید.

مصرف کود نیتروژن باعث بهبود کمیت و کیفیت محصول‌های کشاورزی می‌شود (هاولین و همکاران ۲۰۱۷). محصول دانه برنج تا حد زیادی به شرایط خاک و فراهمی عنصرهای غذایی از جمله نیتروژن بستگی دارد. کمبود نیتروژن در هر مرحله از رشد برنج، باعث کاهش محصول دانه برنج می‌شود (موده‌ج و همکاران ۲۰۰۸). براتی و همکاران (۲۰۰۶) گزارش کردند که مصرف نیتروژن تا سطح ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار منجر به افزایش محصول دانه برنج شد. مصطفوی‌راد و همکاران (۲۰۰۶) مشاهده کردند که کود اوره بیش‌ترین محصول دانه، تعداد پنجه بارور، ارتفاع بوته، تعداد دانه در خوشه و درصد پروتئین دانه را در بین سایر منابع نیتروژن داشت. عباسی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که با مصرف ۲۰ و ۴۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک با و بدون ۵۰ درصد کود شیمیایی ماده خشک شاخساره برنج افزایش یافت. باتوجه‌به اینکه نیتروژن موجود در کودهای آلی مختلف برای رشد مطلوب گیاهان کافی نیست لازم است کودهای آلی مانند لجن فاضلاب و هیدروچار آن به همراه کود نیتروژن مصرف شوند (احمدی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۲، کاظم‌زاده و همکاران ۲۰۱۴، نجفی و همکاران ۲۰۱۹)،

آلودگی خاک به فلزهای سنگین یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیست در بسیاری از نقاط جهان است. فلزهای سنگین از طریق فعالیت‌های بشر از قبیل کشاورزی، سوخت‌های فسیلی، استخراج معادن، فرسایش طبیعی، فاضلاب‌های شهری، آفت‌کش‌ها، مواد رنگی و غیره می‌توانند به محیط‌زیست وارد شوند. مس در غلظت‌های کم برای رشد گیاهان به‌عنوان یک عنصر غذایی ضروری است، اما در غلظت‌های زیاد به‌عنوان یک فلز سنگین، فرایندهای مهم یاخته‌ها مثل فتوسنتز و تنفس را مختل کرده و باعث کاهش رشد گیاه می‌شود (تورهات ۲۰۰۴). باتوجه‌به اینکه عدم کشت برنج در خاک‌های آلوده به مس امکان‌پذیر نیست، باید از روش‌هایی استفاده کرد که جذب مس به‌وسیله گیاه را کاهش و تحمل گیاه را در برابر سمیت مس افزایش دهد (پینگ و همکاران ۲۰۰۸). انتظار این است که با تلفیق کود

کشاورزی و محیط‌زیست به حداقل می‌رسد (لیارد و همکاران ۲۰۱۰). همچنین، سرعت تجزیه لجن فاضلاب زیاد است اما با تبدیل آن به هیدروچار سرعت تجزیه آن کاهش می‌یابد. زمان پایداری هیدروچار در خاک حدود ۴ تا ۲۹ سال گزارش شده که بیش‌تر از زیست‌توده اولیه است (لعل ۲۰۰۰). همچنین، برای گندزایی لجن فاضلاب از پرتوتابی گاما استفاده شده است اما این روش در همه جا در دسترس نیست و در دوزهای پرتوتابی بالا، هزینه زیاد می‌شود (عسگری لجایر و همکاران ۲۰۱۹a).

برای تولید هیدروچار از فرایند کربونیزه شدن گرم‌آبی^۱ استفاده می‌شود. کربونیزه شدن گرم‌آبی یک روش گرم‌شیمی^۲ با تغییرات پیچیده فیزیکی و شیمیایی در ساختمان زیست‌توده می‌باشد که در طی آن، زیست‌توده در حضور حلال (آب یا غیرآب)، در دمای بالا (۱۶۰ تا ۲۵۰ °C) و فشار بالا (حدود ۲۰ اتمسفر)، در مدت ۱ تا ۱۲ ساعت به مواد جامدی به نام هیدروچار تبدیل می‌شود (لیبرا و همکاران ۲۰۱۱). پژوهشگران از مواد مختلف مانند کودهای دامی و انسانی، لجن فاضلاب، بقایای محصول‌های کشاورزی (سویلا و همکاران ۲۰۱۱)، مواد آلی (کروس و همکاران ۲۰۱۳)، بامبو (سان و همکاران ۲۰۱۴)، باگاس نیشکر، چوب درختان و پوست بادام‌زمینی (فانگ و همکاران ۲۰۱۵) برای تولید هیدروچار استفاده و در خاک مصرف کردند.

بررسی‌ها نشان داده است که مصرف هیدروچار در خاک سبب بهبود رشد، عملکرد و کیفیت محصول‌های کشاورزی می‌شود (عظیم‌زاده و همکاران ۲۰۲۱). با این حال، اثر آن بر رشد گیاه به سطح مصرفی آن بستگی دارد. برای مثال، توفیق‌رضا و همکاران (۲۰۱۴)، اثر هیدروچار چغندر قند با سطوح ۲، ۴، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۸۰ درصد (حجمی/حجمی) را بر عملکرد ریشه و ساقه گیاه قاصدک بررسی و مشاهده کردند که عملکرد ریشه و ساقه با مصرف سطوح ۲ و ۴ درصد هیدروچار تغییر معنادار نکرد اما با مصرف سطوح ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۸۰ درصد افزایش یافت. عظیم‌زاده و همکاران (۲۰۱۹b) گزارش دادند که مصرف هیدروچار به میزان یک درصد (جرمی/جرمی) بر ماده خشک شاخساره ذرت اثر

¹Hydrothermal carbonization

²Thermochemical

اوره و مس سولفات بر ویژگی‌های رشد گیاه برنج، یک آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ عامل ماده آلی در سه سطح (شاهد، ۱۰ گرم لجن فاضلاب و ۱۰ گرم هیدروچار لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک)، مس در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم مس در کیلوگرم خاک از منبع $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) و نیتروژن در دو سطح (صفر و ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع اوره) و در ۳ تکرار انجام شد. لجن فاضلاب و هیدروچار آن با خاک مخلوط و خوب به هم زده شد تا به طور یکنواخت توزیع شود. سپس سولفات مس در حجم معینی آب مقطر حل شده و به خاک افزوده و خوب به هم زده شد. کود اوره در طول دوره رشد و در پنج نوبت و هر نوبت ۵۰ میلی‌گرم نیتروژن به هر کیلوگرم خاک افزوده شد. برای افزایش اثربخشی نیتروژن، کود با سرنگ ۵۰ میلی‌لیتری و به صورت محلول به داخل خاک (عمق حدود پنج سانتی‌متر) در نقاط مختلف گلدان تزریق شد. دو کیلوگرم خاک داخل هر یک از گلدان‌ها ریخته شد. خاک داخل گلدان‌ها به مدت دو هفته برای رسیدن به تعادل نسبی به حالت غرقاب با حدود یک سانتی‌متر آب در سطح خاک نگهداری شد.

بذرهای برنج (*Oryza sativa* L.) رقم گوهر از مؤسسه تحقیقات برنج کشور در رشت تهیه شد. برای جداسازی بذرهای سالم از بذرهای ناسالم و ضد عفونی آن‌ها از محلول ۴ درصد نمک سدیم کلرید استفاده شد. پس از شستن محلول نمک از سطح بذرها، بذرهای سالم و یکنواخت برنج انتخاب و برای ضد عفونی سطحی، به مدت ۳۰ ثانیه در الکل اتیلیک ۹۷ درصد و سپس به مدت ۲ دقیقه در محلول سدیم هیپوکلریت ۵ درصد قرار داده شدند. بذرها با آب مقطر شسته شده و در انکوباتور در دمای ۲۴ تا ۲۶ °C نگهداری شدند تا جوانه بزنند. پس از رسیدن طول ریشه‌چه به ۱/۰ تا ۱/۵ سانتی‌متر، بذرهای جوانه‌دار شده به خاک داخل گلدان منتقل شدند. هشت عدد بذر جوانه‌دار شده برنج انتخاب و در خاک هر گلدان کاشته شد. بعد از اطمینان از استقرار گیاهچه‌ها، گیاهان به چهار عدد در هر گلدان تنک شدند.

پس از سه ماه رشد، قبل از برداشت گیاهان، ویژگی‌هایی از قبیل تعداد پنجه در بوته، تعداد خوشه در بوته، تعداد برگ سالم در بوته، تعداد برگ در بوته شمارش شدند. بلندترین ارتفاع گیاه در هر گلدان و طول برگ در هر بوته

نیتروژن با لجن فاضلاب یا هیدروچار آن، بتوان تحمل گیاه برنج را در برابر سمیت مس افزایش داد. با توجه به مطالب ذکر شده این پژوهش برای بررسی اثر لجن فاضلاب، هیدروچار لجن فاضلاب و نیتروژن بر ویژگی‌های رشد گیاه برنج در یک خاک آلوده به مس در شرایط گلخانه‌ای انجام شد.

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده در این پژوهش از ایستگاه تحقیقات کشاورزی خلعت‌پوشان دانشگاه تبریز انتخاب و از عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر نمونه برداری شد. بعد از هوا خشک شدن و عبور از الک دو میلی‌متری، ویژگی‌هایی مانند بافت خاک به روش هیدرومتری ۴ زمانه (گی و اور ۲۰۰۲)، pH و EC در عصاره اشباع خاک و درصد رطوبت اشباع خاک ۲۴ ساعت بعد از تهیه گل اشباع اندازه‌گیری شد. کربن آلی به روش اکسایش تر (نلسون و سامرز ۱۹۸۲)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراژ با سود (آلیسون و مودی ۱۹۶۵)، فسفر قابل جذب با روش اولسن (اولسن و سامرز ۱۹۸۲)، پتاسیم و سدیم قابل جذب با عصاره‌گیر استات آمونیوم یک مولار (نلسون و سامرز ۱۹۸۲)، نیتروژن کل به روش کج‌لال (جونز ۲۰۰۱) و مس، آهن، روی و منگنز قابل جذب به وسیله عصاره‌گیر DTPA (لیندزی و نورول ۱۹۷۸) اندازه‌گیری شدند و نتایج در جدول ۱ ارائه شد.

لجن فاضلاب مورد استفاده از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر میانه، استان آذربایجان شرقی تهیه شد. برای تولید هیدروچار، مقدار مشخصی از زیست‌توده (لجن فاضلاب) به همراه مقدار مشخصی آب مقطر به درون واکنش‌جای (رآکتور) دستگاه هیدروچار ریخته و درب آن محکم بسته شد. نمونه زیست‌توده در داخل دستگاه در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس و فشار ۲۱ اتمسفر به مدت ۱۲ ساعت حرارت داده شد. سپس بخش مایع و جامد هیدروچار توسط کاغذ صافی از هم جدا شد. در شکل ۱ دستگاه هیدروچار و هیدروچار تولید شده نشان داده شده است. در بخش جامد هیدروچار برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مهم نظیر عملکرد، درصد خاکستر، pH، EC و غلظت N، P، K، Na، Ca، Mg، Fe، Mn، Cu و Zn اندازه‌گیری و نتایج در جدول (۲) ارائه شد. برای بررسی اثر لجن فاضلاب، هیدروچار لجن فاضلاب،

و در آن به مدت ۷۲ ساعت در دمای 70°C قرار گرفتند و سپس وزن ریشه و شاخساره خشک اندازه‌گیری شد. در شکل ۱ گیاهان برنج در تیمارهای مختلف ۱۰۰ روز پس از کشت در گلخانه مشاهده می‌شود. تحلیل آماری داده‌ها با نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام و نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم شد.

به‌وسیله متر و عرض برگ و قطر ساقه در محل طوقه به ازای چهار بوته در هر گلدان به‌وسیله کولیس اندازه‌گیری شدند. شاخساره و ریشه برنج از محل طوقه بریده شده و ابتدا با آب شهری و سپس با آب مقطر شسته شده و با دستمال کاغذی تمیز آب اضافی آن‌ها گرفته شد و سپس با ترازوی دیجیتالی ($\pm 0.001\text{g}$) توزین شدند و وزن ریشه و شاخساره تر تعیین شد. پس از آن به پاکت‌های کاغذی منتقل



شکل ۱- نمای از گیاهان برنج در تیمارهای مختلف ۱۰۰ روز پس از کشت در گلخانه (راست)، هیدروچار لجن فاضلاب (وسط) و دستگاه هیدروچار مورد استفاده در این پژوهش (چپ)

نتایج و بحث

فاضلاب اولیه و اسیدی بود. pH هیدروچار به‌وسیله غلظت عنصرهای معدنی زیست‌توده کنترل می‌شود (پارشیتی و همکاران ۲۰۱۴). کاهش pH هیدروچار ممکن است به‌علت وجود برخی اسیدهای آلی در ساختار هیدروچار و یا خارج شدن بخشی از عنصرهای قلیایی (K و Na) و قلیایی خاکی (Ca و Mg) از ساختار آن باشد (عظیم‌زاده و همکاران ۲۰۱۹a). با تبدیل زیست‌توده مورد بررسی به هیدروچار، غلظت برخی از عناصر در آن افزایش و برخی دیگر کاهش یافت و برخی نیز تغییر قابل‌ملاحظه‌ای نکرد (جدول ۲). عامل‌هایی که بر غلظت عناصر در هیدروچار اثر دارند شامل حل‌شدن، تجزیه مواد آلی و آزادشدن عنصرهای موجود در آن‌ها و جذب شدن مجدد یونها به‌وسیله هیدروچار می‌باشد. اگر در مورد عنصری دو عامل اول بر عامل سوم غلبه کند، غلظت عنصر در هیدروچار نسبت به زیست‌توده اولیه کاهش می‌یابد اما اگر عامل سوم بر دو عامل اول غلبه کند، غلظت عنصر در هیدروچار افزایش می‌یابد (عظیم‌زاده و همکاران ۲۰۱۹a).

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. خاک آهکی و غیرشور و دارای بافت لوم شنی، ماده آلی کم و pH خنثی بود. غلظت فسفر، منگنز و روی قابل‌جذب خاک کم‌تر از سطح بحرانی، غلظت آهن در حد مطلوب و غلظت پتاسیم و مس بیش‌تر از سطح بحرانی برای گیاه برنج بود (دوبرمن و فیروهرست ۲۰۰۰). نتایج برخی ویژگی‌های لجن فاضلاب و هیدروچار آن در جدول ۲ ارائه شده است. عملکرد کم‌تر هیدروچار لجن فاضلاب نسبت به زیست‌توده اولیه، احتمالاً به‌علت حل‌پذیری بیش‌تر لجن فاضلاب در طی کربونیزه شدن گرمآبی و خارج شدن املاح معدنی و برخی ترکیب‌های آلی از آن می‌باشد (لیائو و همکاران ۲۰۱۳). درصد خاکستر هیدروچار به عملکرد آن و میزان حل‌پذیری و خارج شدن عنصرها از لجن فاضلاب بستگی دارد. بنابراین، می‌توان درصد خاکستر بیش‌تر هیدروچار لجن فاضلاب در مقایسه با زیست‌توده آن را به بیش‌تر بودن غلظت عنصرهای معدنی در آن مربوط دانست. pH هیدروچار تولید شده کم‌تر از لجن

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش گلخانه‌ای

کلاس بافت	کربن آلی (%)	کربنات کلسیم معادل (%)	pH (۱:۱)	EC (dS m ⁻¹)	غلظت عنصرها (mg kg ⁻¹)							
					نیتروژن فسفر	پتاسیم سدیم	آهن منگنز	مس	روی			
لوم شنی	۰/۷۹	۳۰/۷	۷/۵۹	۲/۵۷	۰/۰۵	۴/۸۰	۱۱۸۸	۱۹	۲/۱۳	۷/۳	۰/۵۶	۰/۶۵

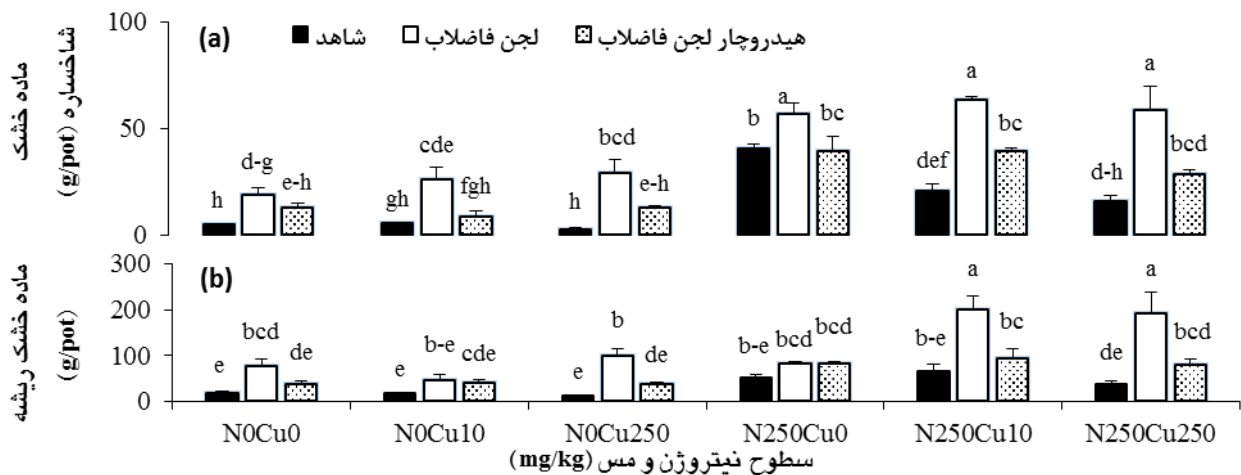
جدول ۲- ویژگی‌های لجن فاضلاب و هیدروچار حاصل از آن

نوع ماده آلی	عملکرد خاکستر (%)	pH (۱:۱)	EC _(1:5) (dS m ⁻¹)	غلظت عنصرها (g kg ⁻¹)									
				نیتروژن فسفر	پتاسیم کلسیم	منیزیم سدیم	آهن منگنز	مس	روی				
لجن فاضلاب	-	۶/۷	۱/۷۲	۴۲/۷	۲۲/۸	۲/۴۳	۱۶/۵	۱/۱	۲/۷۹	۲/۸۰	۰/۱۴	۰/۱۳	۰/۳۹
هیدروچار	۴۳/۲	۴۱/۶	۶/۵	۱/۰۹	۳۳/۴	۱۴/۶	۱/۵۲	۲۱/۴	۱/۸۰	۰/۹۳	۳/۵۱	۰/۲۰	۰/۲۷

ماده خشک شاخساره

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف لجن فاضلاب و کود نیتروژن، ماده خشک شاخساره برنج را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. با افزایش سطح مس، ماده خشک شاخساره برنج در شرایط مصرف نیتروژن و عدم مصرف ماده آلی کاهش یافت که با نتایج زو و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت داشت. آنان مشاهده کردند که ماده خشک شاخساره برنج در سطوح مس بیش‌تر از ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک کاهش یافت. مصرف کود اوره در شرایط آلودگی مس باعث افزایش ماده خشک شاخساره برنج گردید (شکل ۲). این نتایج نشان می‌دهد که کود نیتروژن تحمل گیاه را در برابر آلودگی مس افزایش می‌دهد. شاید این اثر نیتروژن به افزایش غلظت آنتی‌اکسیدان‌های آنزیمی و غیرآنزیمی مربوط باشد که نیتروژن برای تشکیل آن‌ها ضروری است. این آنتی‌اکسیدان‌ها در شرایط تنش سمیت مس، گونه‌های فعال اکسیژن را از یاخته‌ها حذف می‌کنند (مارشنر ۲۰۱۱). قانیم (۲۰۰۸) مشاهده کرد که ماده خشک شاخساره برنج با مصرف کودهای شیمیایی (NPK) و بقایای آلی پوسیده افزایش یافت. یزدانی مطلق و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که ماده خشک بخش هوایی گیاه برنج در سطح ۷۵ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک، ۴۵/۶ درصد و در سطح ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک ۶۳/۸ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. محمدنژاد و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که با مصرف ۱۵ یا ۳۰ گرم کمپوست

لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک، ماده خشک گیاه ذرت افزایش یافت. عسگری لجایر و همکاران (۲۰۱۹b) گزارش کردند که افزودن ۱۵ و ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک با و بدون پرتوتابی با گاما باعث افزایش ماده خشک شاخساره گیاه ریحان شد و دلیل آن را آزادسازی عنصرهای غذایی کم‌مصرف و پرمصرف در طول دوره رشد گیاه و بهبود تغذیه گیاه بیان کردند. عباسی و همکاران (۲۰۱۲) مشاهده کردند که مصرف کودهای شیمیایی از جمله اوره در سطح ۲۰ گرم لجن فاضلاب ماده خشک شاخساره برنج را به‌طور معنادار افزایش داد، اما در سطح ۴۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم خاک اثر معناداری نداشت. میرزایی و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که مصرف کودهای آلی میزان ماده خشک شاخساره و ریشه گوجه‌فرنگی را نسبت به شاهد افزایش داد. مصرف کودهای آلی منجر به افزایش مواد آلی خاک و فراهمی عنصرهای غذایی مورد نیاز گیاه و بهبود فعالیت میکروب‌ها و افزایش عملکرد گیاه می‌شود. محمودی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که ماده خشک شاخساره یونجه با مصرف ۳۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم افزایش معناداری نسبت به شاهد داشت، درحالی‌که با مصرف ۶۰ گرم لجن فاضلاب بر کیلوگرم، به دلیل افزایش شوری محلول خاک، به‌طور معناداری کاهش یافت. کاظم‌علیلو و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند که مصرف ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب در هکتار در شرایط آبیاری مطلوب و محدود سبب افزایش ماده خشک گیاه آفتابگردان نسبت به شاهد شد.



شکل ۲- اثر متقابل ماده آلی × مس × نیتروژن بر ماده خشک شاخساره (a) و ریشه (b) برنج.

افزایش معنادر ماده خشک شاخساره گیاه خردل هندی شد. کمترین ماده خشک شاخساره در تیمارهای بدون ماده آلی و N_0Cu_{250} مشاهده شد، اما با تیمارهای بدون ماده آلی و N_0Cu_{10} و N_0Cu_{250} تفاوت معنادر نداشت. بیشترین ماده خشک شاخساره در تیمارهای دارای لجن فاضلاب، mg $250N/kg$ و در هر سه سطح مس مشاهده شد که با تیمارهای دارای هیدروچار لجن فاضلاب، $N_{250}Cu_0$ و $N_{250}Cu_{10}$ تفاوت معنادر داشت (شکل ۲).

ماده خشک ریشه

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف لجن فاضلاب، هیدروچار آن و نیتروژن ماده خشک ریشه را نسبت به شاهد به‌طور معنادر افزایش داد. بین سه سطح مس هم تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای از نظر اثر بر ماده خشک ریشه وجود داشت. با مصرف $10mg$ Cu/kg ماده خشک ریشه نسبت به شاهد به‌طور معنادر افزایش یافت اما با سطح سوم مس ($250mg/kg$) تفاوت معنادر نداشت. با این‌حال، زو و همکاران (۲۰۰۶) گزارش دادند که وقتی غلظت مس کل خاک به بیش‌تر از 100 میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید، ماده خشک ریشه برنج کاهش یافت. همچنین، تأثیر هر یک از عامل‌های مورد آزمایش (ماده آلی، نیتروژن و مس) بر ماده خشک ریشه به سطح دو عامل دیگر بستگی داشت. کمترین ماده خشک ریشه در تیمارهای بدون ماده آلی و N_0Cu_{250} مشاهده شد که با تیمارهای بدون ماده آلی و N_0Cu_{10} تفاوت معنادر نداشت. بیشترین ماده خشک ریشه در تیمارهای دارای لجن فاضلاب، $N_{250}Cu_{10}$ و $N_{250}Cu_{250}$ مشاهده شد که با

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بین سه سطح مس در حضور لجن فاضلاب و هیدروچار آن از نظر اثر بر ماده خشک شاخساره تفاوت معنادر وجود نداشت؛ اما در شرایط بدون مصرف ماده آلی، با افزایش سطح مس به 250 میلی‌گرم در کیلوگرم (آلودگی مس)، ماده خشک شاخساره برنج به‌طور معناداری کاهش یافت (شکل ۲). به‌عبارت‌دیگر، اثر آلودگی مس بر ماده خشک شاخساره برنج به حضور یا عدم حضور ماده آلی و نیتروژن بستگی داشت. این نتایج نشان می‌دهد که هم لجن فاضلاب و هم هیدروچار آن تحمل گیاه برنج را در برابر آلودگی مس افزایش می‌دهند که ناشی از تشکیل کمپلکس پایدار مس با مواد آلی است؛ به‌طوری‌که این کمپلکس برای گیاه قابل‌جذب نیست (مارشمن ۲۰۱۱، هاولین و همکاران ۲۰۱۷). به‌رحال، شکل ۲ نشان می‌دهد که لجن فاضلاب در کاهش اثر سمیت مس بر ماده خشک شاخساره موفق‌تر از هیدروچار آن عمل کرده است. کم‌تر بودن ماده خشک برنج در تیمارهای دارای هیدروچار نسبت به لجن فاضلاب ممکن است به حل‌شدن و خارج‌شدن بخشی از عنصرهای غذایی لجن فاضلاب در بخش مایع هیدروچار (عظیم‌زاده و همکاران ۲۰۱۹a) و کاهش سرعت تجزیه هیدروچار (لعل ۲۰۰۰) و کاهش آزادسازی عنصرهای غذایی مربوط باشد. همچنین، هیدروچار عنصرهای غذایی پرمصرف (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) کم‌تری از لجن فاضلاب دارد (جدول ۲) که ممکن است بر رشد گیاه و ماده خشک شاخساره آن اثر داشته باشد. مکرم آیدینلو (۲۰۱۵) گزارش کرد که افزودن کود دامی به خاک آلوده به مس سبب

با مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن و همچنین مصرف نیتروژن، رشد گیاه بهبود یافت و به دنبال آن تعداد پنجه نیز افزایش یافت. تحلیل همبستگی‌ها نشان داد که تعداد پنجه همبستگی مثبت و معناداری با تعداد خوشه ($r=0.927^{**}$)، تعداد برگ سالم ($r=0.941^{**}$)، تعداد کل برگ ($r=0.921^{**}$)، ارتفاع گیاه ($r=0.858^{**}$)، ماده خشک شاخساره ($r=0.844^{**}$) داشت.

بیندرا و همکاران (۲۰۰۰) گزارش کردند که بیشترین اثر نیتروژن بر عملکرد برنج از طریق افزایش تعداد پنجه بود. چاتورودی و همکاران (۲۰۰۵) مشاهده کردند که کاربرد کود نیتروژن سبب افزایش تعداد پنجه در بوته برنج گردید. در مطالعه یزدانی مطلق و همکاران (۲۰۱۴) بیشترین تعداد پنجه در بوته گیاه برنج با مصرف ۷۵ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک مشاهده شد و با افزایش سطح نیتروژن تغییر معناداری در تعداد پنجه در بوته حاصل نشد. عباسی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که بیشترین تعداد پنجه برنج با مصرف توأم لجن فاضلاب و کودهای شیمیایی مشاهده شد. به نظر آنان مصرف کودهای شیمیایی در سطوح کم کودهای آلی می‌تواند کمبود عنصرهای غذایی را جبران کند و رشد گیاه از جمله تعداد پنجه را بهبود بخشد. ویو و همکاران (۲۰۱۰) گزارش دادند که مصرف کود مرغی به میزان یک درصد جرم خاک، سبب افزایش تعداد پنجه در بوته برنج در شرایط آلودگی مس شد اما اثر سطوح بالاتر آن (۳ درصد) به سطح آلودگی مس خاک بستگی داشت. در شرایط نیتروژن کافی سهم لجن فاضلاب در عرضه نیتروژن به گیاه کم شده و مشابه هیدروچار می‌شود. در شرایط کمبود نیتروژن سرعت تجزیه لجن فاضلاب به دلیل افزایش نسبت C/N، کم شده و اثر آن بر تعداد پنجه مشابه هیدروچار حاصل از آن می‌شود. بنابراین، می‌توان با مصرف ۱۰ گرم بر کیلوگرم لجن فاضلاب در هزینه‌ها و انرژی صرفه‌جویی کرد؛ اما با توجه به اصلاحگر بودن هیدروچار، سرعت کندتر تجزیه آن و نبود میکروب‌های بیماری‌زا در آن، مصرف آن به‌عنوان کود آلی توصیه می‌شود.

تعداد خوشه در بوته

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف لجن فاضلاب و نیتروژن تعداد خوشه برنج را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. بین سه سطح مس هم تفاوت

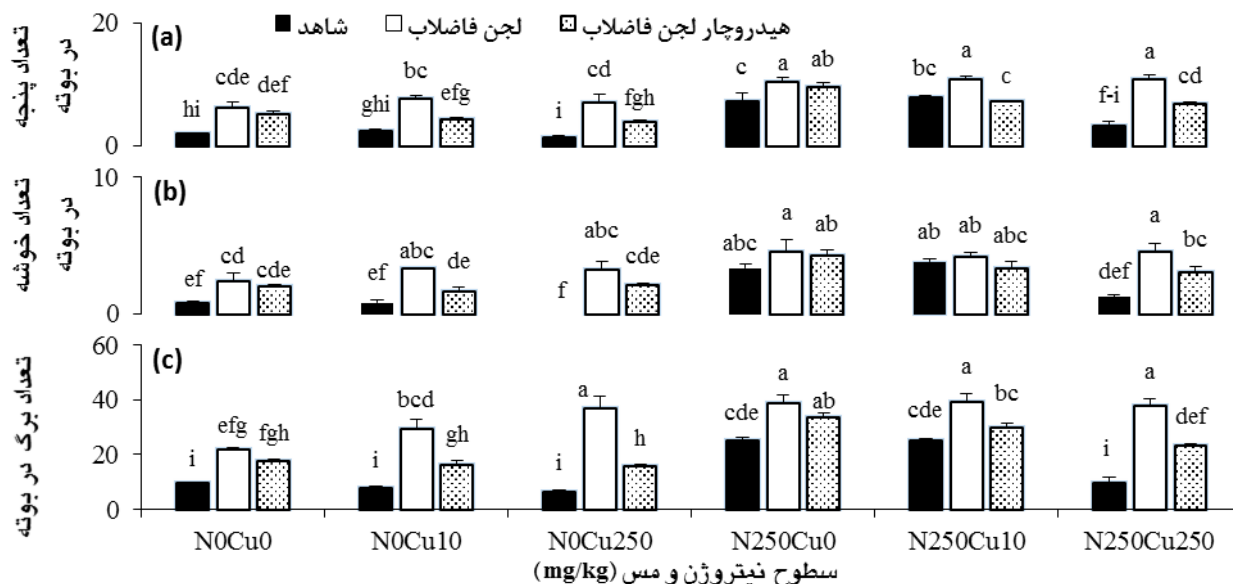
تیمارهای دارای هیدروچار لجن فاضلاب، $N_{250}Cu_0$ و $N_{250}Cu_{10}$ و $N_{250}Cu_{250}$ تفاوت معنادار داشت. در مجموع، لجن فاضلاب در کاهش اثر سمیت مس بر رشد ریشه موفق‌تر از هیدروچار آن بود (شکل ۲) و دلایل آن پیش از این بحث شد. قانیم (۲۰۰۸) مشاهده کرد که ماده خشک ریشه برنج با مصرف کودهای شیمیایی (NPK) و بقایای آلی پوسیده افزایش یافت. نجفی و مردمی (۲۰۱۲) گزارش کردند که مصرف لجن فاضلاب سبب افزایش ماده خشک ریشه گیاه آفتابگردان شد. مکرم آیدینلو (۲۰۱۵) نیز گزارش کرد که افزودن کود دامی به خاک باعث افزایش معنادار ماده خشک ریشه گیاه خردل هندی در شرایط با و بدون آلودگی مس شد.

تعداد پنجه در بوته

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف لجن فاضلاب، هیدروچار لجن فاضلاب و نیتروژن تعداد پنجه در بوته را به‌طور معنادار نسبت به شاهد افزایش داد. بین سه سطح مس هم از نظر اثر بر تعداد پنجه در بوته تفاوت معنادار وجود داشت. تعداد پنجه در بوته با مصرف 10 mg Cu/kg نسبت به شاهد تغییر معنادار نکرد اما با مصرف 250 mg Cu/kg به‌طور معنادار کاهش یافت. ویو و همکاران (۲۰۱۰) گزارش دادند که سطوح کم مس (تا 200 میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) سبب افزایش تعداد پنجه در بوته برنج شد اما سطوح زیاد آن سبب کاهش این صفت شد. همچنین، تأثیر هر یک از عامل‌های مورد آزمایش (ماده آلی، نیتروژن و مس) بر تعداد پنجه در بوته به سطوح دو عامل دیگر بستگی داشت. کمترین تعداد پنجه در بوته در تیمار بدون ماده آلی و نیتروژن در شرایط آلودگی مس (N_0Cu_{250}) مشاهده شد، اما با تیمارهای بدون ماده آلی و N_0Cu_0 و N_0Cu_{10} تفاوت معنادار نداشت. بیشترین تعداد پنجه در تیمارهای دارای لجن فاضلاب با مصرف 250 mg N/kg و در هر سه سطح مس مشاهده شد، اما با تیمار دارای هیدروچار لجن فاضلاب و $N_{250}Cu_0$ تفاوت معنادار نداشت. در شرایط N_0Cu_0 و $N_{250}Cu_0$ میان لجن فاضلاب و هیدروچار حاصل از آن تفاوت معنادار وجود نداشت، درحالی‌که در سایر تیمارها لجن فاضلاب از نظر اثر بر تعداد پنجه در بوته بر هیدروچار حاصل از آن برتری داشت. در شرایط با و بدون مصرف نیتروژن، این دو ماده آلی بر تعداد پنجه در بوته اثر مشابهی داشتند (شکل ۳).

نیتروژن و مس) بر تعداد خوشه در بوته به سطوح دو عامل دیگر بستگی داشت. کمترین تعداد خوشه در بوته در تیمار بدون ماده آلی و N_0Cu_{250} مشاهده شد، اما با تیمارهای بدون ماده آلی و N_0Cu_{10} و N_0Cu_{250} تفاوت معنادار نداشت.

قابل ملاحظه‌ای از نظر اثر بر تعداد خوشه‌ها وجود داشت. با مصرف 10 mgCu/kg تعداد خوشه تغییر معناداری نسبت به شاهد نکرد اما با مصرف 250 mg Cu/kg تعداد خوشه نسبت به شاهد و سطح 10 mg Cu/kg به‌طور معنادار کاهش یافت. همچنین، تأثیر هر یک از عامل‌های مورد آزمایش (ماده آلی،



شکل ۳- اثر متقابل ماده آلی × مس × نیتروژن بر تعداد پنجه (a)، تعداد خوشه (b) و تعداد برگ (c) در بوته برنج.

تحمل گیاه در برابر سمیت مس زیاد شد. اصفهانی و همکاران (۲۰۰۴) گزارش کردند که با مصرف نیتروژن، تعداد سنبلچه در خوشه برنج افزایش یافت و مصرف 120 کیلوگرم نیتروژن در هکتار بیشترین تعداد سنبلچه در خوشه را ایجاد کرد. هاری و همکاران (۲۰۰۰) در یک آزمایش برای بررسی پاسخ دو هیبرید برنج به نیتروژن مشاهده کردند که مصرف 200 کیلوگرم نیتروژن در هکتار سبب افزایش وزن دانه، تعداد خوشه‌ها در واحد سطح و محصول دانه برنج شد. تحلیل همبستگی‌ها نشان داد که تعداد خوشه همبستگی مثبت و معناداری با تعداد برگ سالم ($r=0.898^{**}$)، تعداد برگ ($r=0.891^{**}$)، ارتفاع گیاه ($r=0.832^{**}$) و ماده خشک شاخساره ($r=0.789^{**}$) داشت.

تعداد برگ در بوته

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف لجن فاضلاب، هیدروچار و نیتروژن تعداد برگ در بوته را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. با مصرف 250 mg Cu/kg تعداد برگ برنج نسبت به شاهد و 10 mg Cu/kg به‌طور معنادار کاهش یافت. مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن

بیشترین تعداد خوشه در تیمارهای دارای لجن فاضلاب، $N_{250}Cu_0$ و $N_{250}Cu_{10}$ مشاهده شد، اما با تیمار دارای هیدروچار لجن فاضلاب و $N_{250}Cu_0$ تفاوت معنادار نداشت. از نظر اثر بر تعداد خوشه برنج، میان لجن فاضلاب و هیدروچار آن فقط در شرایط N_0Cu_{10} و $N_{250}Cu_{250}$ تفاوت معنادار وجود داشت و در سایر تیمارها بین این دو ماده آلی تفاوت معنادار وجود نداشت (شکل ۳). پینگ و همکاران (۲۰۰۸) گزارش دادند که مصرف کود مرغی و پیت در خاک سبب کاهش جذب مس به‌وسیله گیاه برنج و افزایش محصول دانه آن در یک آلوده به مس گردید. ویو و همکاران (۲۰۱۰) گزارش دادند که مصرف کود مرغی به میزان یک درصد جرم خاک، سبب افزایش تعداد پنجه در بوته برنج در شرایط آلودگی مس (تا 400 میلی‌گرم مس در کیلوگرم خاک) شد اما در سطوح بالاتر مس (600 و 800 میلی‌گرم مس در کیلوگرم خاک) سبب کاهش این صفت شد. آنان مشاهده کردند که با مصرف کود مرغی (سطح یک درصد) در خاک آلوده به مس، فراهمی مس (قابل استخراج با DTPA) و در نتیجه غلظت مس در دانه گیاه برنج کاهش یافت. در نتیجه،

به همراه کود شیمیایی نیتروژن، باعث افزایش رشد و سایر ویژگی‌های رشد گیاه شد (شکل ۳). عباسی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که بیشترین تعداد برگ در بوته برنج با مصرف توأم لجن فاضلاب و کودهای شیمیایی و کمترین آن در شاهد مشاهده شد. یزدانی مطلق و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که مصرف کود اوره تعداد برگ در بوته برنج را افزایش داد. به‌طور کلی، مصرف تلفیقی نیتروژن با لجن فاضلاب و هیدروچار آن باعث افزایش معنادار تعداد برگ در بوته برنج شد (شکل ۳). این افزایش را می‌توان به بهبود تغذیه نیتروژن گیاه، کاهش نسبت C/N و افزایش سرعت تجزیه این مواد آلی و افزایش سرعت آزادسازی عنصرهای غذایی نسبت داد (مارشدر ۲۰۱۱، هاولین و همکاران ۲۰۱۷). آلودگی خاک به فلز مس سبب مختل شدن جذب عنصرهای غذایی به‌وسیله ریشه، تولید گونه‌های فعال اکسیژن، کاهش رشد گیاه و کاهش تعداد برگ شد (شکل ۳). نیتروژن به‌دلیل نقشی که در ساختمان آنزیم‌ها و آنتی‌اکسیدان‌ها دارد باعث می‌شود اثر سمیت مس بر تعداد برگ گیاه کاهش یابد. از این‌رو گیاه در حضور کود نیتروژن رشد خوبی داشته و تعداد برگ‌های آن افزایش می‌یابد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که تأثیر هر یک از عامل‌های مورد آزمایش بر تعداد برگ در بوته به سطوح دو عامل دیگر بستگی داشت. کمترین تعداد برگ در بوته در تیمار بدون ماده آلی و N_0Cu_{250} مشاهده شد، اما با تیمارهای بدون ماده آلی، N_0Cu_0 ، $N_{250}Cu_{10}$ و $N_{250}Cu_{250}$ تفاوت معنادار نداشت. بیشترین تعداد برگ در تیمار دارای لجن فاضلاب و با کاربرد 250 mg N/kg و بدون مس مشاهده شد که با تیمارهای لجن فاضلاب، $N_{250}Cu_{10}$ ، $N_{250}Cu_{250}$ و N_0Cu_{250} تفاوت معنادار نداشت (شکل ۳).

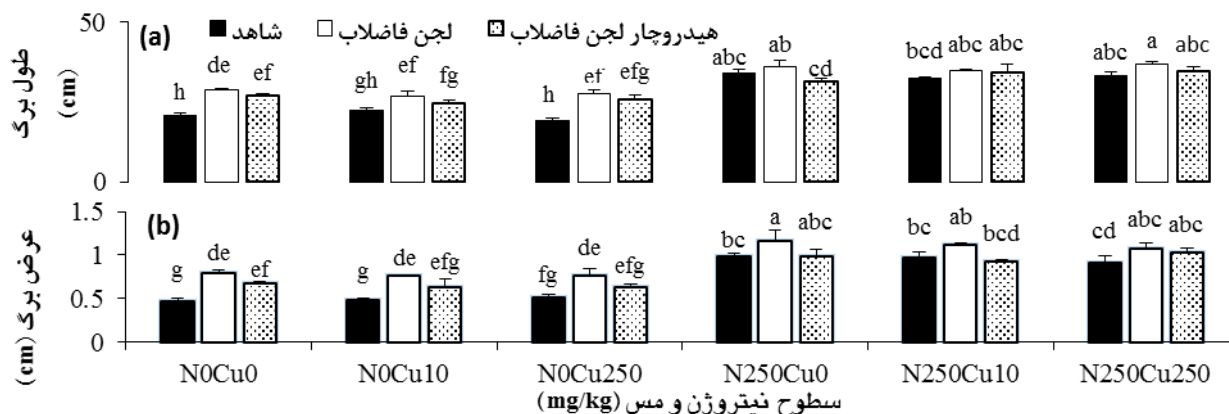
طول و عرض برگ

طول و عرض برگ شاخصی است از سطح برگ. هرچه برگ سطح بیش‌تری داشته باشد، فتوسنتز گیاه و تولید ماده خشک آن بیش‌تر خواهد بود (مارشدر ۲۰۱۱، محمدنژاد و همکاران ۲۰۱۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف کود اوره طول و عرض برگ برنج را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. همچنین، اثر مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن بر طول و عرض برگ برنج به سطوح نیتروژن و مس بستگی داشت؛ به‌طوری‌که در شرایط

محمدنژاد و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که مصرف کمپوست لجن فاضلاب شهری باعث افزایش طول و عرض برگ گیاه نرت شد. نیتروژن در ساختمان دو هورمون رشد (اکسین و سیتوکینین) شرکت می‌کند (چن و همکاران ۱۹۹۸، مارشدر ۲۰۱۱). بنابراین، با توجه به نقش این دو هورمون در رشد و توسعه یاخته‌ها، به‌نظر می‌رسد افزایش شاخص‌های رشد گیاه از جمله سطح برگ گیاه برنج در حضور کود نیتروژن، لجن فاضلاب و هیدروچار آن به این موضوع مربوط باشد. همچنین، افزایش طول و عرض برگ با مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن (شکل ۴) علاوه بر نیتروژن به سایر عنصرهای غذایی موجود در این کودهای آلی نیز مربوط می‌باشد. برای مثال، بهبود تغذیه روی گیاه با مصرف کودهای آلی می‌تواند غلظت هورمون رشد اکسین در گیاه را افزایش دهد (مارشدر ۲۰۱۱، هاولین و همکاران ۲۰۱۷). بین سه سطح مس در سطوح مختلف ماده آلی و نیتروژن، از نظر اثر بر طول و عرض برگ تفاوت معنادار مشاهده نشد. این نتایج نشان می‌دهد که حتی سمیت مس بر طول و عرض برگ برنج اثر معنادار نداشت و گیاه برنج از این نظر به زیادی مس متحمل است. شاید یک دلیل برای این نتیجه، کاهش فراهمی مس بر اثر رسوب آن به شکل کربنات مس و سولفید مس پس از غرقاب شدن خاک باشد (دوتا و همکاران ۱۹۸۶) که سبب کاهش سمیت مس می‌شود. در شرایط آلودگی خاک به مس، مصرف کود اوره، لجن فاضلاب و هیدروچار آن، سبب افزایش طول و عرض

فاضلاب و هیدروچار آن است.

برگ برنج شد (شکل ۴) که نشان‌دهنده افزایش تحمل گیاه برنج در برابر سمیت مس در حضور کود اوره، لجن

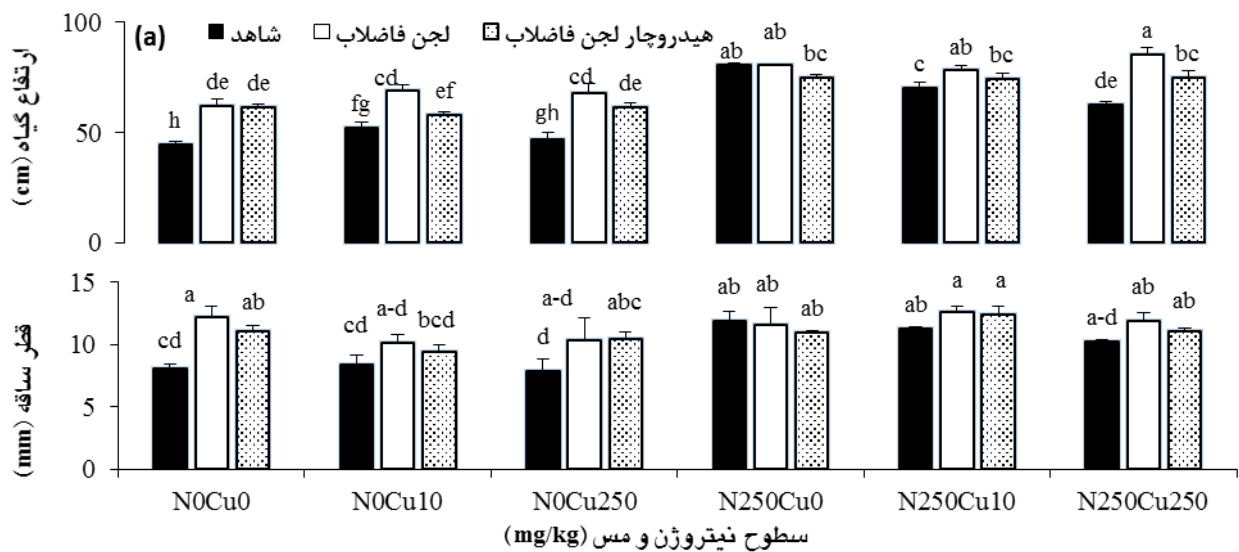


شکل ۴- اثر متقابل ماده آلی × مس × نیتروژن بر طول برگ (a) و عرض برگ (b) برنج.

مشاهده شد، اما با تیمار بدون ماده آلی و N₀Cu₂₅₀ تفاوت معنادار نداشت. بیش‌ترین ارتفاع گیاه در تیمار دارای لجن فاضلاب یا هیدروچار آن و N₂₅₀Cu₂₅₀ مشاهده شد که با تیمارهای لجن فاضلاب یا هیدروچار آن و N₂₅₀Cu₀ و N₂₅₀Cu₁₀ تفاوت معنادار نداشت (شکل ۵). محمدزاد و همکاران (۲۰۱۵) گزارش کردند که مصرف کود دامی، کمپوست لجن فاضلاب و کمپوست پسماند شهری ارتفاع قطر ساقه نرت را نسبت به شاهد به‌طور معنادار افزایش داد. افزایش ارتفاع و قطر ساقه آفتابگردان پس از مصرف لجن فاضلاب به‌وسیله نجفی و مردمی (۲۰۱۲) نیز گزارش شده است. کاظم‌علیلو و همکاران (۲۰۱۸) گزارش کردند ارتفاع گیاه آفتابگردان با مصرف تلفیقی ۲۰۰ کیلوگرم کود سوپرفسفات تریپل + ۵۶/۷ تن لجن فاضلاب در هکتار در شرایط آبیاری مطلوب نسبت به شاهد ۲۶ درصد افزایش یافت. محمودی و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند مصرف ۳۰ گرم کمپوست لجن فاضلاب در کیلوگرم خاک موجب افزایش معنادار ارتفاع بوته یونجه نسبت به تیمار شاهد شد. رضوانی و شفیع‌زاده (۲۰۱۵) بیشینه ارتفاع بوته برنج را با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار و کمینه آن را در تیمار شاهد مشاهده کردند (شکل ۵).

ارتفاع و قطر ساقه برنج

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که مصرف کود اوره سبب افزایش ارتفاع و قطر ساقه برنج در سطوح مختلف ماده آلی و مس شد. در شرایط عدم مصرف نیتروژن، مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن در سطوح مختلف مس، ارتفاع و قطر ساقه برنج را نسبت به شاهد افزایش داد. در حضور کود اوره، مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن در دو سطح ۱۰ و ۲۵۰ میلی‌گرم مس بر کیلوگرم خاک، فقط ارتفاع ساقه برنج را نسبت به شاهد افزایش داد و اثر آن‌ها بر قطر ساقه معنادار نبود. مصرف ۱۰ میلی‌گرم مس بر کیلوگرم خاک در شرایط عدم مصرف مواد آلی و نیتروژن ارتفاع گیاه برنج را افزایش داد اما در سایر شرایط در اکثر موارد غیرمعنادار بود. آلوده شدن خاک به مس در شرایط عدم مصرف مواد آلی و مصرف کود اوره ارتفاع گیاه را به‌طور معنادار کاهش داد اما در حضور لجن فاضلاب و هیدروچار بر ارتفاع گیاه اثر معنادار نداشت. بین سه سطح مس از نظر اثر بر قطر ساقه برنج در سطوح مختلف نیتروژن و ماده آلی تفاوت معنادار وجود نداشت. کم‌ترین ارتفاع گیاه در تیمار بدون ماده آلی و N₀Cu₀



شکل ۵- اثر متقابل ماده آلی × مس × نیتروژن بر ارتفاع و قطر ساقه در محل طوقه گیاه برنج.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج نشان داد که با مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن به همراه ۲۵۰ mg N/kg در شرایط آلوده به مس و غیرآلوده، اکثر ویژگی‌های گیاهی مورد مطالعه شامل تعداد پنجه، تعداد خوشه، تعداد کل برگ، طول برگ، عرض برگ، ارتفاع گیاه، قطر ساقه در محل طوقه، ماده خشک شاخساره و ریشه نسبت به شاهد را به طور معنادار افزایش داد اگرچه میزان این افزایش در حضور لجن فاضلاب بیش‌تر از هیدروچار آن بود. مصرف ۲۵۰ mg Cu/kg نسبت به سطح صفر مس باعث کاهش معنادار تعداد پنجه، تعداد خوشه، تعداد کل برگ و ماده خشک ریشه شد، اما اثر آن بر طول برگ، عرض برگ، ارتفاع گیاه، قطر ساقه در محل طوقه، ماده خشک شاخساره معنادار نبود. نتایج نشان داد که مصرف هیدروچار لجن فاضلاب و کود نیتروژن با کاهش غلظت مس در شاخساره گیاه برنج می‌تواند اثر سمیت مس را کاهش و تحمل گیاه را در برابر سمیت مس افزایش دهد. در هر دو شرایط آلوده و غیرآلوده به مس، مصرف لجن فاضلاب و هیدروچار آن به میزان ۱۰ g/kg و نیتروژن به میزان ۲۵۰ mg/kg می‌تواند در شرایط مشابه توصیه شود. با توجه به تفاوت‌های شرایط گلخانه‌ای و شرایط مزرعه‌ای، پیشنهاد می‌شود این آزمایش در شرایط مزرعه‌ای و در یک خاک آلوده به مس نیز انجام شود.

کاویتا و سوبرامانیان (۲۰۰۷) گزارش کردند که مصرف کمپوست غنی شده به همراه کودهای شیمیایی باعث افزایش معنادار ارتفاع گیاه برنج شد. احمدی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۲) گزارش دادند که مصرف توأم کود اوره و لجن فاضلاب سبب افزایش ارتفاع و قطر ساقه گیاه گندم شد. عباسی و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که ارتفاع و قطر ساقه برنج با مصرف لجن فاضلاب در خاک افزایش یافت. مکرّم آیدینلو (۲۰۱۵) گزارش کرد که افزودن کود دامی به یک خاک آلوده مس باعث افزایش ارتفاع گیاه خردل هندی شد اما بر قطر ساقه اثر معنادار نداشت. افزایش ارتفاع و قطر ساقه برنج در حضور کود اوره، لجن فاضلاب و هیدروچار آن را می‌توان به بهبود جذب عنصرهای غذایی مختلف از جمله نیتروژن و روی و نقش داشتن این عنصرهای غذایی در تشکیل هورمون‌های رشد مانند اکسین و سیتوکینین و افزایش غلظت این هورمون‌ها در گیاه نسبت داد (مارشدر ۲۰۱۱، هاولین و همکاران ۲۰۱۷). همچنین، مصرف لجن فاضلاب یا هیدروچار آن می‌تواند مقدار عنصرهای غذایی قابل جذب گیاه در خاک را افزایش دهد (نجفی و همکاران ۲۰۱۲) و از این طریق بر رشد گیاه و ارتفاع و قطر آن اثر داشته باشد.

منابع مورد استفاده

- Abbasi M, Najafi N, Aliasghar zad N and Oustan S, 2012. Effects of soil water conditions and organic and chemical fertilizers on growth characteristics and water use efficiency of rice in an alkaline non-calcareous soil. *Journal of Greenhouse Crop Science and Technology* 3(3): 1–17. (In Persian with English abstract)
- Ahmadinezhad R, Najafi N, Aliasghar zad N and Oustan S, 2012. Effects of organic and nitrogen fertilizers on water use efficiency, yield and the growth characteristics of wheat (*Triticum aestivum* cv. Alvand). *Journal of Water and Soil Science-University of Tabriz* 23(2): 177–194. (In Persian with English abstract)
- Allison LE and Moodie CD, 1965. Carbonate. Pp: 1379–1396. In: Black CA (ed), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wis, USA.
- Asgari Lajayer L, Najafi N, Moghiseh E, Mosaferei M and Hadian J, 2019a. Micronutrient and heavy metal concentrations in basil plant cultivated on irradiated and non-irradiated sewage sludge-treated soil and evaluation of human health risk. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 104: 141–150.
- Asgari Lajayer L, Najafi N, Moghiseh E, Mosaferei M and Hadian J, 2019b. Effects of gamma irradiated and non-irradiated sewage sludge on leaf chlorophyll index and growth characteristics and macronutrients concentrations in basil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 19: 580–591.
- Azimzadeh Y, Najafi N, Reyhanitabar A and Oustan S, 2019a. Investigation of properties of liquid and solid fractions of hydrochars produced from apple wood wastes at different temperatures and times of hydrothermal carbonization. 2019. *Iranian Journal of Soil Research* 32(4): 493–510. (In Persian with English abstract)
- Azimzadeh Y, Najafi N, Reyhanitabar A, Oustan S, Khataee A, 2019b. Effects of layered double hydroxide functionalized biochars and hydrochars on dry matter and N, P, and K concentrations of corn. *Journal of Agricultural Engineering*, 42(1): 127–146. (In Persian with English abstract)
- Azimzadeh Y, Najafi N, Reyhanitabar A, Oustan S, Khataee A, 2021. Effects of phosphate loaded LDH-biochar/hydrochar on maize dry matter and P uptake in a calcareous soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(12): 1649–1664.
- Barati V, Emad Y and Maftoun M, 2006. Responses of two lowland: rice cultivars to the different sources and levels of nitrogen. *Agrochimica* 1: 158–164.
- Berengure P, Santiveri F, Boixadera J and Loveras J, 2009. Nitrogen fertilization of irrigated maize under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 30: 163–171.
- Bindra AD, Kalia BD and Kumar S, 2000. Effect of N-levels and dates of transplanting on growth, yield and yield attributes of scented rice. *Advances in Agricultural Research in India* 10: 45–48.
- Chaturvedi I, 2005. Effect of nitrogen fertilizers on growth, yield and quality of hybrid rice (*Oryza sativa*). *Journal of Central European Agriculture* 6: 611–618.
- Chen JG, Cheng SH, Cao, WX and Zhou X, 1998. Involvement of endogenous plant hormones in the effect of mixed nitrogen source on growth and tillering of wheat. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 21: 87–97.
- Doberman A and Fairhurst TH, 2000. Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management. Handbook Series. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines, 192 p.
- Dutta D, Mandal B and Mandal LM, 1989. Decrease in availability of zinc and copper in acidic to neutral soils on submergence. *Soil Science* 147: 187–195.
- Eghball B, Ginting D and Gilley JE, 2004. Residual effect of manure and compost application on maize production and soil properties. *Agronomy Journal* 96: 442–447.
- Esfahani M, Sadrzadeh SM, Kavooosi M and Dabagh-Mohammadi-Nasab A, 2004. Study the effect of different levels of nitrogen and potassium fertilizers on yield, yield components and growth of rice c.v. Khazar. *Iranian Journal of Crop Science* 7(3): 226–241. (In Persian with English abstract)
- Fang J, Gao B, Chen J and Zimmerman AR, 2015. Hydrochars derived from plant biomass under various conditions: Characterization and potential applications and impacts. *Chemical Engineering Journal* 267: 253–259.
- Gee GW and Or D, 2002. Partical Size Analysis. Pp. 201–214. In: Dane JH and Topp GC (eds) *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America Book Series 5, Madison, Wis,

- USA, 866 p.
- Ghoneim AM, 2008. Nitrogen dynamics and fertilizer use efficiency in rice using the nitrogen-15 isotope techniques. *World Applied Sciences Journal* 3: 869–874.
- Hari OM, Katyal SK and Himan SD, 2000. Response of two rice (*Oryza sativa* L.) hybrids to graded levels of nitrogen. *Indian Journal of Agricultural Science* 70: 140–142.
- Havlin JL, Beaton JD, Tisdale SL and Nelson WL, 2017. *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Eighth Edition, Pearson India Education Services, Tamil Nadu, India, 520 p.
- Jones JB Jr, 2001. *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA. 363 p.
- Kavitha R and Subramanian P, 2007. Effect of enriched municipal solid waste compost application on growth, plant nutrient uptake and yield of rice. *Journal of Agronomy* 6: 586–592.
- Kazemalilou S, Najafi N, Reyhanitabar A and Ghaffari M, 2018. Effects of integrated application of phosphorus fertilizer and sewage sludge on leaf chlorophyll index and some growth characteristics of sunflower under water deficit conditions. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 7(4): 1–18.
- Kazemzadeh M, Peighambaroust H and Najafi N, 2014. Improving the nutrients concentrations of wheat flour cv. Alvand by integrated application of organic and nitrogen fertilizers. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 44(4): 405–420. (In Persian with English abstract)
- Khan S, Chao C, Waqas M, Arp H and Zhu Y, 2013. Sewage sludge biochar influence upon rice (*Oryza sativa* L.) yield, metal bioaccumulation and greenhouse gas emission from acidic paddy soil. *Environmental Science and Technology* 47 (15): 8624–8632.
- Kruse A, Funke A and Titirici MM, 2013. Hydrothermal conversion of biomass to fuels and energetic materials. *Current Opinion in Chemical Biology* 17: 515–521.
- Lal R, 2000. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123: 1–22.
- Liao R, Gao B and Fang J, 2013. Invasive plants as feedstock for biochar and bioenergy production. *Bioresource Technology* 140: 439–442.
- Liard D, Fleming P, Wang B, Horton R and Karlen D, 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158(3–4): 436–442.
- Libra JA, Ro KS, Kammann C, Funke A, Berge ND, Neubauer Y, Titirici M, Fühner C, Bens O, Kern J and Emmerich KH, 2011. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Journal of Biofuels* 2: 89–24.
- Lindsay WL and Norvell WA, 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society America Journal* 42: 421–428.
- Mahmoudi S, Najafi N and Reyhanitabar A, 2014. Effect of soil moisture and sewage sludge compost on leaf chlorophyll index and some plant growth characteristics of Alfalfa in greenhouse conditions. *Science and Technology of Greenhouse Crops* 5(20): 207–220. (In Persian with English abstract)
- Marschner H, 2011. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd Edition, Academic Press, Massachusetts, USA. 889 p.
- Mirzaei R, Kambozia J, Sabahi H and Mahdavi A, 2009. Effect of different organic fertilizers on soil physicochemical properties, production and biomass yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *Iranian Journal of Crop Research* 7(1): 257–268. (In Persian with English abstract)
- Modhej A, Naderi A, Emam Y, Aynehband A and Normohamad IGH, 2008. Effects of post-anthesis heat stress and nitrogen levels on grain yield in wheat (*T. durum* and *T. aestivum*) genotypes. *International Journal of Plant Production* 2: 257–267.
- Mohammadnejad A, Najafi N and Nishabouri MR, 2015. Effects of three types of organic fertilizers on the growth characteristics and water use efficiency of corn at different levels of soil compaction. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 5(2): 25–47. (In Persian with English abstract)
- Mokaramaidinlo F, 2015. The combined effect of organic matter and moisture on a plant infested with copper contaminated by Indian mustard (*Brassica juncea* L.). Master of Science Thesis in Soil Science, University of Tabriz. (In Persian with English abstract)
- Mukherjee A, Zimmerman A and Harris W, 2011. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma* 163(3): 247–255.
- Mustafavirad M, Tahmasebi Sarvestani Z and Mahmudi VR, 2006. The effects of nitrogen fertilizer on dry matter and nitrogen remobilization, yield and yield components in rice cultivars. *Journal of Agricultural*

- Sciences and Natural Resources 13(3): 76–87. (In Persian with English abstract)
- Najafi N and Mardomi S, 2012. The effects of waterlogging, sewage sludge and manure on the growth characteristics of sunflower in a sandy loam soil. *Journal of Water and Soil-Ferdowsi University of Mashhad* 25(6): 1264–1276. (In Persian with English abstract)
- Najafi N, Mardomi S and Oustan S, 2012. Changes in DTPA extractable copper, iron, manganese and zinc after waterlogging and application of sewage sludge and animal manure in two different soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 43(1): 9–22. (In Persian with English abstract)
- Najafi N, Ahmadinezhad R, Oustan S and Aliasgharzad N, 2019. Effects of urea integration with manure and two types of compost (municipal solid waste and sewage sludge) on leaf, stem and seed yield of wheat and their nitrogen, phosphorus and potassium concentration. *Journal of Water and Soil-Ferdowsi University of Mashhad* 33(1): 63–81. (In Persian with English abstract)
- Nelson DW and Sommers LE, 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. Pp. 961–1010. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA and SSSA, Madison, Wis, USA. 1159 p.
- Olsen SR and Sommer LE, 1982. Phosphorous. Pp.403–430. In: Page AL, Miller RH and Keeney DR (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. ASA and SSSA, Madison Wis, USA. 1159 p.
- Parshetti GK, Chowdhury S and Balasubramanian R, 2014. Hydrothermal conversion of urban food waste to chars for removal of textile dyes from contaminated waters. *Bioresource Technology* 161: 310–319.
- Ping LI, Xingxiang W, Taolin Z, Dongmei Z and Yuanqiu HE, 2008. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil. *Journal of Environmental Sciences* 20(4): 449–455.
- Rezvani M and Shafieezadeh M, 2015. Effects of nitrogen and cycocel application on soil nitrate pollution and agronomic characters of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural Science and Technology* 19(71):141–150.
- Sevilla M, Maciá-Agulló JA and Fuertes AB, 2011. Hydrothermal carbonization of biomass as a route for the sequestration of CO₂: Chemical and structural properties of the carbonized products. *Biomass Bioenergy* 35(7): 3152–3159.
- Toufiq Reza M, Andert J, Wirth B, Busch D, Pielert J, Lynam JG and Mumme J, 2014. Hydrothermal carbonization of biomass for energy and crop production. *Bioenergy* 1: 11–29.
- Turhut C, Pepe KM and Cutright TJ, 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr and Ni from soil using *Helianthus annuus*. *Environmental Pollution* 131: 147–154.
- Uchimiya M, Chang S and Klasson KT, 2011. Screening biochars for heavy metalretention in soil: Role of oxygen functional groups. *Journl of Hazardous Materials* 190: 432–441.
- Wu J, Yu X, Malik Z, Chen H and Xu J, 2010. Impacts of copper on rice growth and yield as affected by pig manure. Pp. 141–143. In: Xu J and Huang PM (eds) *Molecular Environmental Soil Science at the Interfaces in the Earth's Critical Zone*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 346 p.
- Xu J, Yang L, Wang Z, Dong G, Huang J and Wang Y, 2006. Toxicity of copper on rice growth and accumulation of copper in rice grain in copper contaminated soil. *Chemosphere* 62(4): 602–607.
- Yang C, Yang L, Yan T and Ouyang ZM, 2004. Effects of nutrient and water regimes on lodging resistant of rice. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao* 15: 646–650.
- Yazdani Motlag N, Reyhanitabar A, Najafi N and Bandehagh A, 2014. Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on the growth characteristics of rice plants under flooded and periodic saturation conditions. *Journal of Water and Soil Science-University of Tabriz* 24(3): 145–160. (In Persian with English abstract)