محیط‌شناسی، دورهٔ ٤٥، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۸، صفحهٔ ۱۵-۱

اثر فاضلاب و لجن فاضلاب بر جذب برخی فلزات سنگین در خاک و گیاه نعناع (*Mentha spicata L.*)

مسعود شاکرمی[۱] و صفر معروفی[۲]*

۱. دانشجوی دکتری، مدیریت منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان Mas.Shakarami@gmail.com
۲. استاد، گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی‌سینا همدان

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱٤ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۰

چکیده

تحقیق حاضر به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در شرایط لایسیمتری با سه نوع آب آبیاری: آب معمولی (W_1)، فاضلاب خام (W_2) و فاضلاب تصفیه‌شده (W_3) و سه سطح لجن فاضلاب: ۰ (S_1)، ۵۰ (S_2) و ۱۰۰ (S_3) تن در هکتار انجام شد. لایسیمترها، با خاک دو لایه پر و گیاه نعناع در آن‌ها کشت شد. عملکرد، میزان عناصر مغذی گیاه و میزان فلزات سرب، نیکل و کادمیوم در گیاه (شاخساره) و خاک (اعماق ۱۰ و ۴۰ سانتیمتری) تعیین شدند. نتایج نشان داد کاربرد فاضلاب و لجن، میزان فلزات خاک را افزایش می‌دهد؛ به‌طوری‌که نسبت به شاهد، تیمار W_2S_3 میزان سرب، نیکل و کادمیوم را به‌ترتیب ۳۰۴، ۳۷۵ و ۲۰۸ درصد افزایش داده است. همچنین نتایج نشان داد کاربرد فاضلاب و لجن سبب افزایش معنادار وزن‌های تر و خشک و همچنین میزان سرب، نیکل و کادمیوم گیاه می‌شود. دامنهٔ تغییرات وزن‌های تر و خشک گیاه به ترتیب ۱۶۱- ۳۱ و ۵۴- ۱۱ گرم در لایسیمتر، دامنهٔ تغییرات نیتروژن و فسفر به ترتیب ۲/۹۳- ۱/۱۲ و ۰/۵۶- ۰/۱۹ درصد وزن خشک گیاه، دامنهٔ تغییرات پتاسیم (۳/۸۵- ۱/۰۵)، نیکل (۰/۷۱- ۰/۰۲)، سرب (۰/۵۷- ۰/۰۱) و کادمیوم (۰/۳- ۰/۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گیاه) گیاه، در نوسان است.

کلیدواژه

پارامترهای رشد، عناصر سنگین، فاضلاب، لجن فاضلاب، نعناع.

۱. سرآغاز

عناصر سنگین، از آلاینده‌های خطرناک محیطی برای سلامتی بشر و محیط‌زیست بوده که از طریق جذب توسط گیاهان، وارد رژیم غذایی بشر شده و باعث بروز مشکلاتی در بدن انسان می‌شوند. همچنین، به دلیل عدم تجزیه و تخریب، این فلزها از آلاینده‌های پایدار و بادوام محیط‌زیست به شمار می‌آیند. آلودگی خاک به عناصر سنگین، دربارهٔ سبزی‌ها و گیاهان دارویی بسیار اهمیت دارد، زیرا بیشتر به‌صورت مستقیم مورد استفاده انسان قرار می‌گیرند. همچنین آبشویی این عناصر موجب آلودگی آب‌های زیرزمینی و بروز مشکلات زیست‌محیطی می‌شوند. بنابراین یکی از مسائل عمده‌ای که باید در هنگام استفاده از فاضلاب و لجن در اراضی کشاورزی بدان توجه شود، احتمال تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه است (طولابی و همکاران، ۱۳۹۳).

مصرف سبزی‌های آلوده به کادمیوم و سرب، خطراتی برای سلامتی انسان دارد. کادمیوم باعث ضایعات کلیوی، افزایش فشارخون، جهش‌زایی و سرطان‌زایی و سرب نیز به سیستم‌های خون‌ساز، عصبی و کلیوی آسیب می‌رساند. بر اساس استاندارد فائو و سازمان بهداشت جهانی غلظت مجاز کادمیوم و سرب در گیاه برای مصرف انسان، نباید بیشتر از ۲و ۳ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک شود

* نویسندهٔ مسئول: Email: Smarofi@yahoo.com

(ناظمی و همکاران، ۱۳۸۹). معمولاً مقادیر نیکل در مواد غذایی بسیار کم (۰/۰۰۱ تا ۰/۰۱ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تازه) است. غلظت نیکل، حتی تا ۶۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن تازه، ممکن است برای مصرف ایمن باشد. زیرا بیش از ۹۰ درصد از نیکل به شکل آلی بوده که به‌راحتی دفع می‌شود (Weigert, 1991).

در زمینهٔ اثر فاضلاب‌ها و لجن فاضلاب بر تمرکز عناصر سنگین در خاک و اندام‌های مختلف گیاه، تحقیقاتی در کشور و سطح جهان صورت گرفته است. ناظمی و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای درباره میزان عناصر کادمیوم، سرب و روی در سبزی‌ها پرورش یافته در حومهٔ شهر شاهرود نشان دادند که میانگین غلظت سرب و کادمیوم در سبزی‌ها بیش از استاندارد ارائه شده توسط سازمان جهانی بهداشت WHO و سازمان خواربارFAO برای گیاهان است. این محققان استفاده از پساب‌های شهری و صنعتی را علت اصلی آلودگی سبزی‌های پرورشی در مزارع حومهٔ شهر شاهرود گزارش کردند. در مطالعهٔ دیگری که توسط Kalavrouziotis و همکاران (۲۰۰۸) در یونان انجام شده است مشخص شد میزان کادمیوم، کبالت، نیکل، و آهن در کلم بروکلی (کلم فندقی) و گل‌کلم که با پساب تصفیه شده آبیاری شده‌اند، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. بررسی‌هایDolgen و همکاران (۲۰۰۷)، غلظت بیشتر کادمیوم، سرب و نیکل را در گیاهانی مانند کلم، اسفناج، تربچه، فلفل قرمز و سبزی های برگی رشد یافته در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب در مقایسه با گیاهانی نشان داد که در خاک بدون لجن فاضلاب رشد کرده‌اند.

نعناع معمولی، به‌عنوان گیاهی دارویی، گیاهی است علفی و چندساله با نام علمی (*Mentha spicata L.*) متعلق به خانواده (*Lamiaceae*) که از برگ‌ها، پیکر رویشی و اسانس آن در بیشتر کشورها، به‌عنوان دارو یاد شده است (Aflatuni, 2005). تحقیقات نشان داده است گیاهان دارویی، به سبب مقاومت بالای این گیاهان به تنش فلزات سنگین، گیاهان مناسب برای گیاه‌پالایی در خاک‌های آلوده به فلزات سنگین هستند. همچنین تحقیقات نشان داده است، فلزات سنگین جذب شده توسط گیاه، در اسانس ظاهر نخواهد شد (Gupta et al., 2013)

در حال حاضر در کشور، به‌ویژه در حواشی شهرهای بزرگ و مراکز استان‌ها، مناطق وسیعی با پساب‌ها آبیاری می‌شوند. در بیشتر مواقع این استفاده غیراصولی بوده و موجب آلودگی محیط‌زیست، خاک و همچنین محصول تولیدی می‌شود. از طرفی یکی از راه‌های اقتصادی و مؤثر استفاده از لجن فاضلاب، به‌کارگیری آن‌ها در کشاورزی است. به دلیل کیفیت پسماندهای فاضلاب و لجن حاصله از آن و حضور عوامل گوناگون که می‌توانند به‌عنوان آلاینده‌های بالقوه محیط‌زیست مطرح باشند، برنامه‌ریزی به‌منظور کاربرد بهینه این پسماندها در اراضی کشاورزی و همچنین تحقیقات لازم در شرایط محلی از اهمیت بسزایی برخوردار است. با عنایت به مطالب مطرح شده، هدف از این تحقیق بررسی کاربرد فاضلاب شهری و لجن فاضلاب بر عملکرد و غلظت برخی فلزات سنگین در محیط خاک و گیاه نعناع است.

۲. مواد و روش‌ها

این تحقیق طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ در گلخانهٔ دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه بوعلی‌سینای همدان در شرایط لایسیمتری انجام گرفت. در طول دورهٔ آزمایش، دامنهٔ تغییرات درجه حرارت و رطوبت نسبی درون گلخانه به‌ترتیب ۱۲ تا ۳۹ درجهٔ سلسیوس و ۶۰ تا ۸۰ درصد بود و با توجه به پوشش شیشه‌ای گلخانه، بارندگی نقشی در تولید نداشت.

با توجه به ماهیت تحقیق، آزمایشی بر اساس طرح فاکتوریل کاملاً تصادفی شامل نوع آب آبیاری (آب معمولی (W_1)، فاضلاب خام (W_2) فاضلاب تصفیه شده (W_3))، سه سطح لجن فاضلاب (۰ (S_1)، ۵۰ (S_2) و ۱۰۰ تن در هکتار (S_3)) و سه زمان برداشت T_1، T_2 و T_3 توأم با سه

تکرار تدوین شد. بدون در نظر گرفتن عامل زمان به‌عنوان فاکتور مستقل (زمانی، ۱۳۹۰)، در مجموع با توجه به فاکتورهای تعیین شده، ۹ تیمار تحت عناوین W_1S_1 الی W_2S_3 نام‌گذاری و در نظر گرفته شد.

در اجرای این پژوهش، از ۲۷ عدد لایسیمتر فلزی حجمی با ابعاد سطح مقطع ۳۰ ×۳۰ سانتیمترمربع و ارتفاع ۱۲۶ سانتی‌متر استفاده شد. تمامی لایسیمترها، با خاکی دو لایه، متشکل از بخش روئین (صفر تا ۵۰ سانتیمتر) از جنس لوم رسی شنی و بخش زیرین (۵۰ تا ۱۱۰ سانتیمتر) از جنس لوم شنی، پر شدند. برای تأمین فضای لازم برای قرارگرفتن آب آبیاری، عمقی معادل ۱۶ سانتی‌متر در بالای خاک روئین، در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که برای نیل به شرایط واقعی خاک (از نظر میزان تراکم و ایجاد جریان‌های ترجیحی طبیعی)، پر کردن لایسیمترها طی چند مرحله و به‌تدریج طی دورهٔ زمانی بیش از پنج‌ماه، با انجام آبیاری‌های متناوب و بدون کشت صورت گرفت. به‌گونه‌ای که در حین پر کردن لایسیمترها هیچ‌گونه عملیات تراکمی، روی خاک صورت نپذیرفت. شایان ذکر است که برای اعمال سطوح لجن فاضلاب، نخست لجن به مدت یک هفته در دمای حدود ۲۵ درجهٔ سلسیوس در گلخانه، هوا خشک‌شده، سپس سطوح مختلف لجن، صرفاً با خاک لایه رویین (صفر تا ۳۰ سانتیمتر) مخلوط شدند. فاضلاب‌های خام و تصفیه‌شده و همچنین لجن فاضلاب، از تصفیه‌خانهٔ فاضلاب شهر همدان تهیه شد.

پس از آماده‌سازی بستر کشت در اول دی ۱۳۹۴، چهار عدد ریزوم هم‌اندازه گیاه نعناع معمولی (*Mentha spicata L.*)، به‌صورت دستی در عمق شش سانتی‌متری سطح خاک هر لایسیمتر کاشته شد. ردیف‌های کشت به‌گونه‌ای در نظر گرفته شدند که فاصلهٔ ردیف‌ها از یکدیگر، ۱۵ سانتی‌متر و فاصلهٔ ردیف‌ها از لبهٔ کناری لایسیمتر ۷/۵ سانتیمتر باشد.

در مجموع در طول فصل رشد گیاه، ۱۱ آبیاری صورت گرفت. نخست فواصل آبیاری در دوره‌های ۱۲ روزه و به میزان ۹ لیتر صورت پذیرفت. سپس با رشد گیاه و گرم شدن بیشتر هوا، دورهٔ آبیاری به ۸ روز کاهش و میزان آبیاری نیز به ۱۲ لیتر افزایش یافت.

برداشت گیاه، با فواصل تقریبی ۵۰ روزه و در سه نوبت، در زمان‌های ۷۰ درصد گلدهی صورت گرفت. در هر نوبت پس از برداشت گیاه، بلافاصله وزن‌تر اندام هوایی با استفاده از ترازو دیجیتالی (دقت ۰/۰۰۱) اندازه‌گیری شد. وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه نیز پس از شستشو با آب مقطر و خشک شدن در آون (دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت)، اندازه‌گیری شد.

میزان عناصر سرب، کادمیوم و نیکل موجود در اندام هوایی گیاه با استفاده از روش هضم تر اندازه‌گیری شدند (Allen et al., 1986). برای اندازه‌گیری میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در شاخسارهٔ گیاه، نمونه‌ها بعد از شستشو و خشک‌کردن در آون (دمای ۷۰ درجهٔ سانتی‌گراد به‌مدت ۴۸ ساعت)، به‌وسیلهٔ آسیاب برقی به پودر تبدیل شدند. سپس عصارهٔ گیاه به روش هضم اسیدی، با استفاده از اسیدسولفوریک، اسید سالیسیک، آب‌اکسیژنه و سلنیم، برای اندازه‌گیری عناصر تهیه شد. میزان مقادیر نیتروژن با دستگاه کجلدال، فسفر به روش رنگ‌سنجی با وانادات مولیبدات توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر و پتاسیم با استفاده از روش نشر شعله‌ای توسط دستگاه فلیم فوتومتر اندازه‌گیری شدند (Chapman & Pratt, 1961).

پس از برداشت سوم گیاه، از خاک لایسیمترها، در اعماق ۱۰ و ۴۰ سانتیمتری نمونه‌برداری و شکل قابل جذب فلزات سرب، نیکل و کادمیوم خاک، با محلول DTPA ۰/۰۰۵ مولار و کلرورو کلسیم ۰/۰۱ مولار در pH=۷/۳ عصاره‌گیری و با دستگاه اسپکتروفتومتری جذب اتمی مدل واریان ۲۲۰، اندازه‌گیری شدند (Lindsay, 1992). در هر دوره آبیاری، نمونه‌هایی از فاضلاب‌های خام و تصفیه‌شده و همچنین آب معمولی ورودی به لایسیمترها تهیه شد. پس از صاف کردن با کاغذ صافی واتمن ۴۲، برای اندازه‌گیری پارامترهای pH، EC، نیتروژن- نیتراتی، فسفر- فسفاتی، سدیم، پتاسیم، سرب،

کادمیوم و نیکل استفاده شد (جدول ۲). آنالیز تمامی پارامترهای موجود در فاضلاب‌های خام، تصفیه‌شده و آب معمولی ورودی به لایسیمترها، مطابق با روش استاندارد آمریکا (APHA, 1995) انجام گرفت.

برای اندازه‌گیری پارامترهای شیمیایی لجن فاضلاب، نخست محلولی با نسبت ۱ (لجن) به ۵ (آب مقطر) تهیه، و سپس مقادیر pH و EC نمونه‌ها تعیین شد (Roades, 1995). برای اندازه‌گیری فسفر، از روش هضم اسیدی با استفاده از اسید پرکلریدریک و اسید نیتریک، به ترتیب، به نسبت ۹ به ۴ استفاده شد (Olsen, 1982). سدیم و پتاسیم، پس از تهیهٔ خاکستر، تعیین شدند (Pauwels et al., 1992). نیتروژن کل به روش کجلدال اندازه‌گیری شد (Page et al., 1982). برای تعیین غلظت کل فلزات سنگین موجود در لجن فاضلاب از روش توکالیوگلو استفاده شد (Tokalioglu et al., 2002). خصوصیات شیمیایی لجن فاضلاب مورد استفاده، در جدول ۲ آمده است.

قبل از شروع آزمایش‌های مربوط (قبل از ریختن خاک به درون لایسیمترها)، نخست بافت لایه‌های خاک مورد استفاده تعیین شد. سپس خصوصیات فیزیکی و خصوصیات شیمیایی آن‌ها اندازه‌گیری شد که نتایج آن در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. مقادیر pH و EC نمونه‌های خاک، پس از تهیهٔ محلول ۱ (خاک) به ۵ (آب) اندازه‌گیری شدند (Rowell, 1994).

در تمامی آزمایش‌ها، مقدار pH با استفاده از دستگاه pHمتر (Metrohm model 744) و EC با استفاده از دستگاه ECسنج (Metrohm model 712) اندازه‌گیری شدند. مقادیر نیتروژن کل و فسفر خاک نیز به ترتیب روش کجلدال و اسپکتروفتومتری (Varian model Cary-100) سدیم و پتاسیم با استفاده از فلیم‌فتومتری (405 G)، اندازه‌گیری شدند.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (9.1) انجام گرفت. میانگین داده‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه و نمودارها با نرم‌افزار Excel 2013 ترسیم شدند.

جدول ۱. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مورد نظر

بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)
لوم شنی	۶۰	۲۱/۳	۱۸/۷
لوم رسی شنی	۵۲/۲	۲۳/۱	۲۴/۷

جدول ۲. برخی خصوصیات شیمیایی خاک، لجن و فاضلاب‌های مصرفی

پارامتر	واحد	لایه‌های خاک		لجن*	پارامتر	واحد	فاضلاب		آب معمولی
		اول	دوم				خام	تصفیه‌شده	
pH	-	۷/۳۸	۷/۴۰	۶/۳۸	pH	-	۷/۴۸	۷/۴۲	۷/۶۹
EC*	dS/m	۰/۷۱	۰/۸۳	۵/۴۳	EC*	dS/m	۱/۸	۰/۷۱	۰/۶۱
Ni	$mgkg^{-1}$	۱/۱۵	۲/۰۲	۶۸/۱	Ni	mgL^{-1}	۰/۰۸	۰/۰۵	۰
Pb	$mgkg^{-1}$	۶/۷	۸/۱۳	۵۷/۷۱	Pb	mgL^{-1}	۰/۰۶	۰/۰۴	۰
Cd	$mgkg^{-1}$	۰/۶۲	۰/۹۸	۲/۵۵	Cd	mgL^{-1}	۰/۰۴	۰/۰۲	۰
P	٪	۱۱/۲	۷/۲۳	۱/۰۲	P	mgL^{-1}	۳۴/۲۳	۱۹/۷۱	۳/۹۸
K	٪	۲۰۷/۲۳	۲۹۷/۳۱	۰/۲۹	K	mgL^{-1}	۵/۰۱	۲/۸۱	۱/۵۷
N	٪	۰/۰۳	۰/۰۵	۱/۴	N	mgL^{-1}	۳۸/۲۲	۲۴/۲۱	۸/۱۲

*: در لجن، میزان کل هریک از عناصر اندازه‌گیری شد.

۳. نتایج و بحث

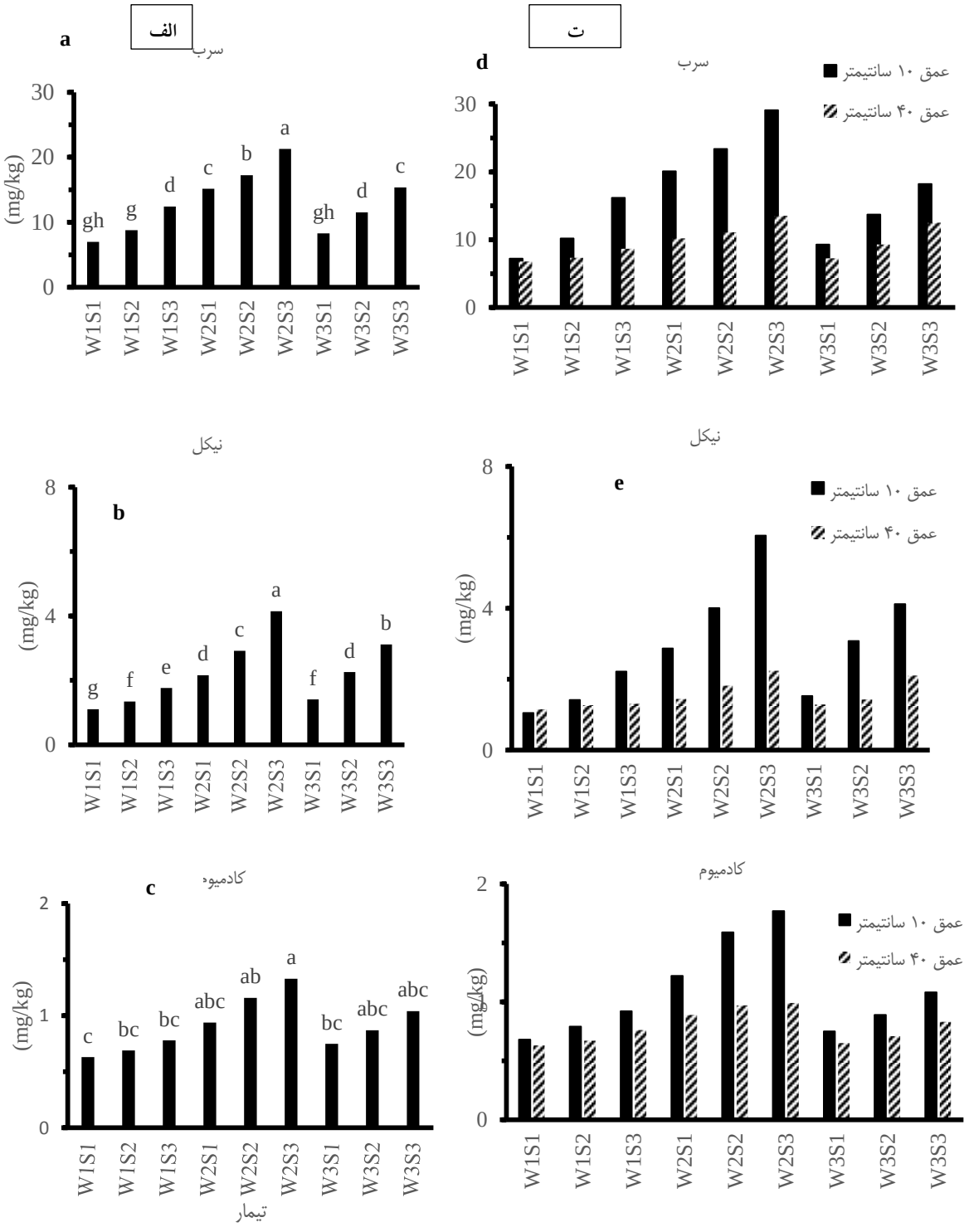
خاک: میزان عناصر سرب، نیکل و کادمیوم در خاک

بر اساس نتایج جدول تجزیه آماری، اثر برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطح لجن بر میزان سرب، نیکل و کادمیوم خاک معنادار شد (جدول ارائه نشده است). باید در نظر داشت که مقایسهٔ میانگین سطوح یک فاکتور، فقط در مواردی امکان‌پذیر است که برهم‌کنش آن فاکتور با فاکتورهای دیگر معنادار نباشد، زیرا در صورت معنادار بودن برهم‌کنش فاکتورها نتیجهٔ به‌دست‌آمده از مقایسهٔ میانگین سطوح هر یک از آن‌ها قابل اعتماد نخواهد بود (زمانی، ۱۳۹۰). با توجه به معنادار شدن برهم‌کنش فاکتورها، صرفاً مقایسهٔ میانگین بین برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطوح لجن بر این فلزات در خاک انجام شد (شکل ۱ a، b و c).

قایسهٔ جفتی بین تیمارهای مختلف نشان داد که اختلاف آماری معناداری ($p <$ ۰/۰۵) بین تمامی تیمارها (به جز تیمار شاهد با تیمارهای W_1S_2 و W_3S_1) از نظر میانگین سرب خاک وجود دارد (شکل ۱ a). همچنین نتایج این شکل حاکی از اختلاف آماری معناداری (۰/۰۵> p) بین میانگین نیکل خاک در تمامی تیمارها (به‌جز تیمارهای W_1S_2 و W_3S_1، همچنین تیمارهای W_2S_3 و W_2S_1) است (شکل ۱ b). اما از نظر میانگین کادمیوم صرفاً اختلاف آماری بین تیمارهای W_3S_3 با تیمارهای W_1S_1، W_1S_2، W_1S_3 و W_3S_1 معنادار است (شکل ۱ c).

وند تغییرات عناصر نیکل، سرب، کادمیوم قابل جذب در اعماق ۱۰ و ۴۰ سانتیمتری نیز در شکل (۱ d، e و f) آمده است. با توجه به نتایج این شکل، تمامی تیمارها میزان فلزات را نسبت به مقدار اولیه افزایش داده است. کاهش pH یکی از دلایل عمده برای قابلیت جذب عناصر است. در تحقیق حاضر، کاربرد فاضلاب و لجن سبب کاهش pH خاک شد. به‌طوری‌که میانگین pH در عمق ۱۰ سانتیمتری در تمامی تیمارها کمتر از عمق ۴۰ سانتیمتری بود (نتایج ارائه نشده است). به نظر می‌رسد، کمتر بودن pH در عمق ۱۰ سانتیمتری به سبب مساعدتر بودن ورود هوا به خاک در این عمق نسبت به عمق ۴۰ سانتیمتری باشد. ورود هوا و اکسیژن موجب افزایش سرعت تجزیهٔ مواد آلی حاصل از فاضلاب و لجن و همچنین تسریع فرایند نیتریفیکاسیون می‌شود. فرایند نیتریفیکاسیون، کاهش pH خاک را به دنبال دارد (Foppen, 2002).

همچنین نتایج شکل (۱ d، e و f) حاکی از کاهش چشمگیر فلزات با افزایش عمق است که حکایت از تجمع این عناصر در لایه‌های بالایی از ستون خاک دارد. Mclean و همکاران (۱۹۹۲) مهم‌ترین مانع در برابر تحرک فلزات سنگین را مکانیسم‌هایی از قبیل رسوب و جذب فلزات سنگین گزارش کردند که انتقال فلزات سنگین به اعماق پایین‌تر اتفاق نخواهد افتاد، مگر اینکه غلظت فلزات سنگین در خاک بیشتر از ظرفیت نگهداری خاک باشد. اما Alloway (۱۹۹۰) بیان کرد حرکت فلزات سنگین در خاک‌هایی که منافذ بزرگ دارند، می‌تواند به علت حرکت بخشی از رسوبات کلوئیدی و ذرات رس همراه با حرکت محلول خاک باشد که به سبب آن، فلزات سنگین متصل به این ذارت نیز منتقل می‌شوند. همچنین بر اساس نتایج Camobreco و همکاران (۱۹۹۶)، جریان ترجیحی نقش مهمی در انتقال فلزات از نیمرخ خاک دارد. در دفتر آب‌وخاک معاونت محیط‌زیست انسانی، حدمجاز غلظت عناصر سرب، نیکل و کادمیوم خاک به‌ترتیب ۳۰۰، ۱۱۰ و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک خاک و براساس استاندارد فائو حدود بحرانی سرب، نیکل و کادمیوم خاک به‌ترتیب ۳۰۰، ۱۰۰ و ۳ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک خاک گزارش شده است که غلظت هر سه فلز پایین‌تر از حدود استانداردها است (Alloway، ۱۹۹۰؛ تابنده و طاهری، ۱۳۹۵)



شکل ۱. مقایسهٔ میانگین (a، b و c) اثر برهمکنش نوع آب آبیاری و سطح لجن و میزان فلزات سنگین (d، e و f) در اعماق ۱۰ و ۴۰ سانتیمتری خاک.

میانگین‌هایی که حروف مشترک دارند، اختلاف معنادار ($p<۰/۰۵$) ندارند.

گیاه

جدول ۳ تجزیه آماری حاصل از پارامترهای رشد و تجمع عناصر در اندام هوایی گیاه نعناع، را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جدول، اثر ساده نوع آب آبیاری و اثر ساده سطح لجن، بر وزن‌های تر و خشک و تجمع تمامی عناصر مورد بررسی، معنادار است. همچنین اثر ساده زمان برداشت نیز بر تمامی پارامترها (به جز سرب و نیکل) معنادار شد. در رابطه با برهم‌کنش دوگانه و سه گانهٔ فاکتورها، صرفاً برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطح لجن بر تمامی پارامترهای مورد نظر (به جز سرب و نیکل) اثر معناداری را نشان داد.

جدول ۳. تجزیهٔ واریانس اثر نوع آب آبیاری، لجن فاضلاب و زمان برداشت بر عملکرد و میزان عناصر موجود در گیاه نعناع

منبع تغییرات‡	درجه آزادی	میانگین مربعات وزن (گرم در لایسیمتر)		میانگین مربعات (درصد)		میانگین مربعات عناصر (میلی‌گرم در وزن خشک)			
		تر	خشک	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	سرب	نیکل	کادمیوم
W+	۲	۱۱۰۸۰/۴۲**	۱۲۴۹/۸**	۲۲/۲۱**	۰/۶۴**	۱۱/۵۱**	۰/۲۸**	۰/۸۳**	۰/۰۴**
S+	۲	۱۴۱۸۹/۰۴**	۴۳۸/۶۹**	۱۶/۱۸**	۰/۴۰**	۷/۳۴**	۰/۰۹**	۰/۱۷**	۰/۰۵**
W×S	۴	۱۲۰۸/۲۹**	۵۷۳/۸**	۰/۵۰**	۰/۰۴**	۰/۵۸*	۰/۰۰ns	۰/۰۱ns	۰/۰۱**
T+	۲	۳۷۴۸/۳۱**	۴۱۳/۵۴**	۰/۲۳*	۰/۰۲**	۰/۰۹*	۰/۰۱ns	۰/۰۵**	۰/۰۰**
W×T	۴	۴۶/۸۱ns	۲/۷۲ns	۰/۰۲ns	۰/۰۰ns	۰/۰۱ns	۰/۰۰ns	۰/۰۰ns	۰/۰۰ns
S×T	۴	۶۷/۵۹ns	۶/۱۵ns	۰/۰۱ns	۰/۰۰ns	۰/۰۲ns	۰/۰۰ns	۰/۰۰ns	۰/۰۰ns
W×S×T	۸	۵۶/۶۳ns	۷/۰۱ns	۰/۰۱ns	۰/۰۰ns	۰/۰۱ns	۰/۰۰ns	۰/۰ns	۰/۰۰ns
خطا	۳۶	۱۰۹/۰۶	۱۲/۶۱	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

W، S و T : به ترتیب نوع آب آبیاری، سطح لجن و زمان برداشت، *:سطح معناداری ۰/۰۵>p، **: سطح معناداری ۰/۰۱> p و ns: غیرمعنادار.

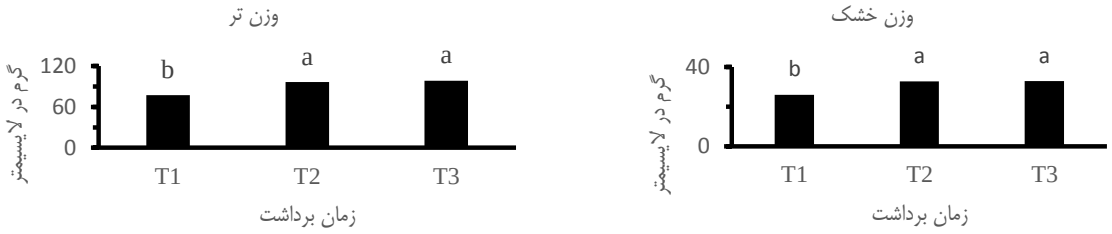
وزن‌های تر و خشک گیاه نعناع

باید در نظر داشت که مقایسهٔ میانگین سطوح یک فاکتور، فقط در مواردی امکان‌پذیر است که برهم‌کنش آن فاکتور با فاکتورهای دیگر معنادار نیست، زیرا در صورت معنادار بودن برهم‌کنش فاکتورها نتیجهٔ به‌دست‌آمده از مقایسهٔ میانگین سطوح هر یک از آن‌ها قابل اعتماد نخواهد بود (زمانی، ۱۳۹۰). ازاین‌رو با توجه به غیرمعنادار شدن برهم‌کنش دوگانه و سه گانه تمامی فاکتورها (به‌جز نوع آب آبیاری و سطح لجن مصرفی)، بر وزن‌های تر و خشک، صرفاً مقایسهٔ میانگین بین اثر ساده زمان برداشت و همچنین برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطح لجن از نظر وزن‌های تر و خشک اندام هوایی نعناع انجام گرفت.

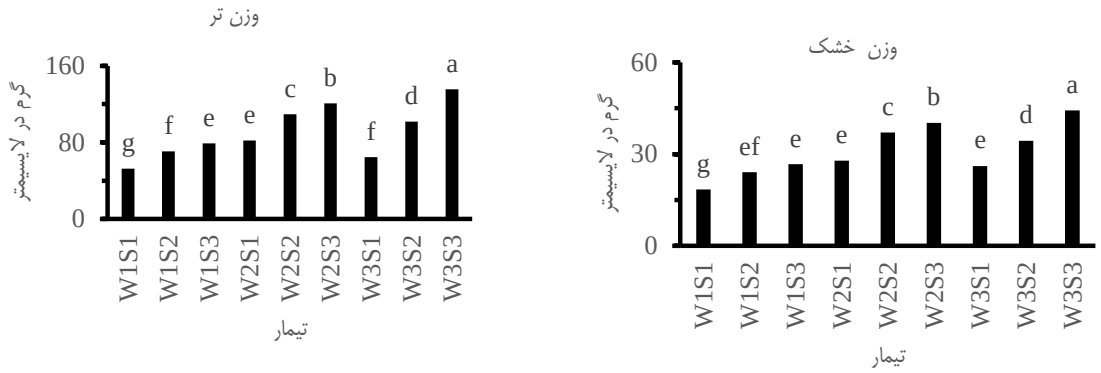
اثر ساده زمان برداشت بر وزن‌های تر و خشک اندام هوایی گیاه نعناع در شکل ۲ آمده است. با توجه به نتایج این شکل ملاحظه می‌شود که بیشترین مقادیر وزن‌تر (۹۸/۵۱) و وزن خشک (۳۲/۸۲ گرم در لایسیمتر) به چین سوم و کمترین مقادیر وزن‌تر (۷۷/۱۶) و وزن خشک (۲۵/۹۹ گرم در لایسیمتر) مربوط به چین اول است. مقایسهٔ میانگین وزن‌های تر و خشک در اثر زمان‌های برداشت مختلف نشان داد که از لحاظ آماری، اختلاف بین میانگین وزن‌های تر و خشک در برداشت نخست با برداشت‌های دوم و سوم معنادار (p <۰/۰۵) است. اما اختلاف آماری بین میانگین وزن‌های تر و خشک در برداشت‌های دوم و سوم معنادار نیست. به نظر می‌رسد عدم اختلاف آماری معنادار بین زمان‌های T۲ و T۳، از نظر میانگین وزن‌های تر و خشک، به دلیل تولید ریزوم‌های گیاه نعناع و افزایش حداکثری حجم کانوپی بوده است که در چین‌های دوم و سوم به دلیل اثر متقابل گیاهان بر یکدیگر تقریباً مشابه هستند.

کمتر بودن وزن‌های تر و خشک گیاه در نوبت برداشت نخست و افزایش آن طی برداشت‌های بعدی می‌تواند به سبب آزادسازی تدریجی عناصر غذایی با کودهای آلی و

تأثیر تدریجی آن‌ها در افزایش رشد گیاه باشد. از عوامل دیگر در افزایش وزن‌های تر و خشک گیاه، می‌توان به مساعدتر بودن شرایط محیطی برای رشد گیاه در زمان‌های T۲ و T۳، به علت گرم شدن هوا اشاره کرد (صفائی و همکاران، ۱۳۹۳). نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق شاکرمی و همکاران (۱۳۹۳) همخوانی دارد. بر اساس این منبع، عملکرد گیاه ریحان از چین نخست تا سوم به‌طور معناداری با کاربرد کودهای کمپوست زباله شهری، افزایش داشته است.



شکل ۲. اثر ساده زمان برداشت بر وزن‌های تر و خشک‌تر گیاه نعناع



شکل ۳. اثر برهمکنش نوع آب آبیاری و سطح لجن بر وزن‌ها تر و خشک گیاه نعناع

شکل ۳ مقایسهٔ میانگین اثر برهمکنش نوع آب آبیاری و سطح لجن را بر میانگین وزن‌های تر و خشک گیاه نعناع نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که کاربرد فاضلاب (خام و تصفیه‌شده) و همچنین لجن فاضلاب، وزن‌های تر و خشک گیاه نعناع را نسبت به تیمار شاهد به‌طور معناداری ($p <$ ۰/۰۵) افزایش داده است. تیمارهای $W_۳S_۳$ و $W_۲S_۳$ به ترتیب ۲۵۷ و ۲۳۰ درصد، وزن‌تر گیاه را نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. همچنین، در مقایسه با تیمار شاهد، بیشترین افزایش در وزن خشک گیاه به‌ترتیب در تیمارهای $W_۳S_۳$ (۲۳۹) و $W_۲S_۳$ (۲۱۷ درصد) مشاهده شد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۲، ملاحظه می‌شود که از نظر وزن خشک، اختلاف آماری معناداری بین تیمارهای $W_۱S_۲$، $W_۱S_۳$، $W_۲S_۱$ و $W_۳S_۱$ وجود ندارد.

افزایش عملکرد محصولات کشاورزی در هنگام آبیاری با پساب در مقایسه با آب معمولی می‌تواند از بارزترین منافع استفاده از پساب در بخش کشاورزی باشد. محققان تأثیرات مثبت پسماندهایی مانند فاضلاب شهری و لجن حاصله از آن‌ها را بر رشد و عملکرد گیاهان تحت تیمار و عناصر ریزمغذی و پرمصرف این پسماندها ربط داده‌اند. تحقیقات صورت گرفته در فلوریدای امریکا نشان‌دهنده افزایش ۲۴۰ درصدی محصول برای نیشکر ژاپنی و علف نیپر، آبیاری شده با فاضلاب تصفیه‌شده در مقایسه با شرایط دیم و آبیاری با آب معمولی است (Pettygrore & Asano, 1984).

نتایج تحقیق شاکرمی و همکاران (۱۳۹۳) نشان داد، کاربرد فاضلاب (خام و تصفیه‌شده) نسبت به آب معمولی با ایجاد تغییرات مثبت بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و تأمین به‌موقع عناصر مورد نیاز گیاه در طی فصل رشد، می‌توانند شرایط بهینه‌ای را برای افزایش وزن گیاه ریحان فراهم آورند.

دارا بودن مواد آلی، افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، تقویت فعالیت‌های شبه هورمونی گیاه، افزایش جذب مواد غذایی توسط گیاه و به‌طورکلی بهبود ساختار شیمیایی و فیزیکی بستر کاشت، از جمله دلایلی است که برای افزایش عملکرد گیاهان در اثر کاربرد کودهای آلی گزارش شده است (Bachman & Metzger, 2008). کودهای آلی در مقایسه با کودهای شیمیایی دارای مقادیر زیادی مواد آلی هستند و می‌توانند منابع غنی از عناصر غذایی به‌ویژه نیتروژن، فسفر و پتاسیم به شمار آیند و به مرور، این عناصر را در اختیار گیاهان قرار دهند. در مطالعهٔ دیگری، آثار رشد گیاه خیار (طول ساقه، تعداد برگ، وزن بخش سبز گیاه و رشد ریشه) با کاربرد مقادیر صفر، ۳۳۰، ۴۹۵ و ۶۶۰ تن در هکتار تن لجن تولیدی از تصفیه‌خانه فاضلاب کارخانهٔ تولید سبزی، بررسی و گزارش شد که بیشترین رشد مربوط به سطوح ۳۳۰ و ۱۶۲ تن در هکتار است (Dolgen et al., 2007).

با توجه به نتایج شکل ۳، ملاحظه می‌شود که تیمار W_2S_3، به‌رغم دریافت محتوای بالای عناصر کودی نسبت به تیمار W_3S_3، دارای عملکرد پایین‌تری است. کمتر بودن عملکرد در این تیمار نسبت به تیمار W_3S_3، می‌تواند به سبب شوری نسبتاً بالای خاک دریافت‌کنندهٔ فاضلاب خام و ۱۰۰ تن لجن فاضلاب باشد.

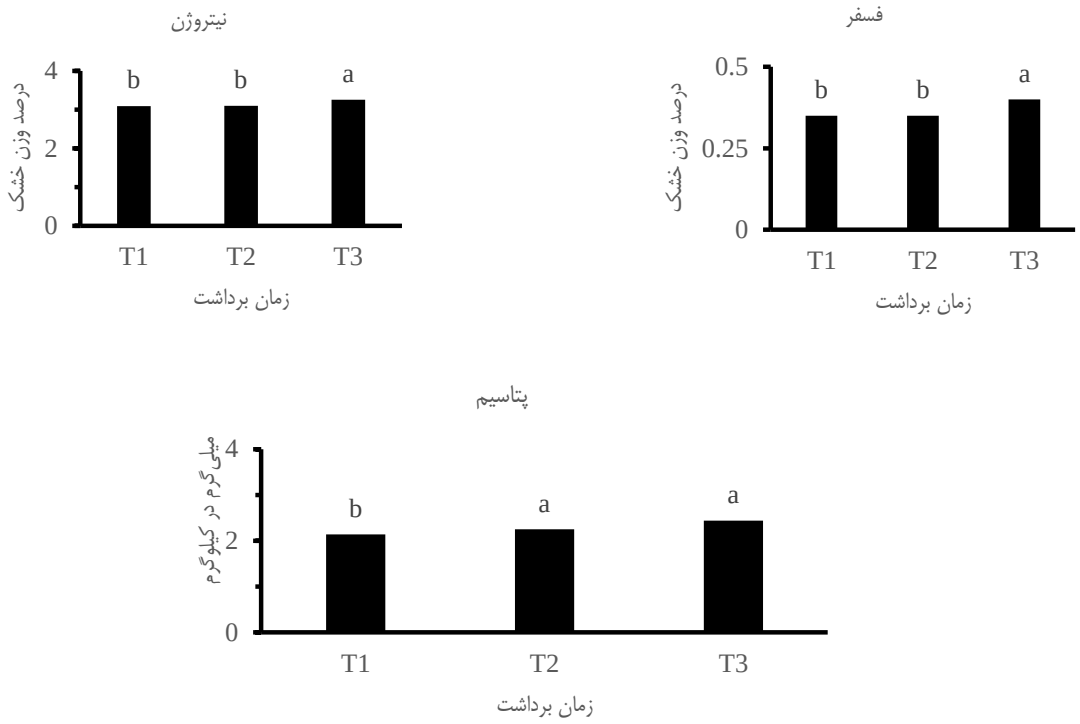
میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در شاخسارهٔ گیاه نعناع

با توجه به غیر معنادار شدن برهم‌کنش دوگانه و سه گانه تمامی فاکتورها (به‌جز نوع آب آبیاری و سطح لجن مصرفی) بر میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در اندام هوایی گیاه نعناع، صرفاً مقایسهٔ میانگین بین اثر ساده زمان برداشت و همچنین اثر برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطح لجن بر عناصر اندازه‌گیری شده در نعناع انجام گرفت.

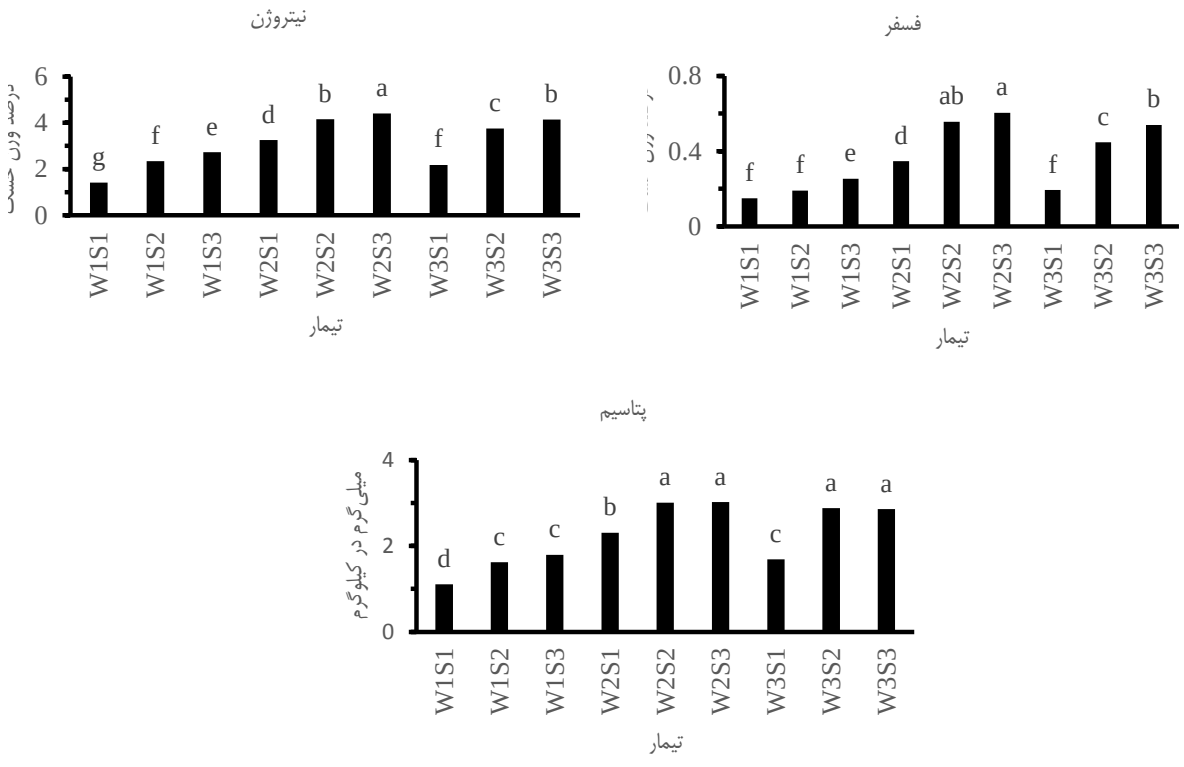
اثر سادهٔ زمان برداشت بر میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در اندام هوایی گیاه نعناع در شکل ۴ آمده است. با توجه به نتایج این شکل ملاحظه می‌شود، بیشترین مقادیر این عناصر مربوط به T_3 و کمترین مقدار مربوط به T_1 است. از لحاظ آماری، اختلاف بین میانگین نیتروژن و فسفر در برداشت سوم با برداشت‌های نخست و دوم معنادار ($p <$ ۰/۰۵) است. اما اختلاف آماری معناداری بین میانگین نیتروژن و فسفر در برداشت‌های نخست و دوم مشاهده نشد.

مقایسهٔ میانگین پتاسیم در برداشت‌های مختلف نشان داد که از لحاظ آماری، اختلاف بین میانگین پتاسیم در برداشت نخست با میانگین پتاسیم در برداشت‌های دوم و سوم معنادار ($p <$ ۰/۰۵) است. اما اختلاف آماری بین میانگین پتاسیم در برداشت‌های دوم و سوم معنادار نبوده است. به نظر می‌رسد عدم اختلاف آماری بین زمان‌های مختلف برداشت، از نظر میانگین نیتروژن، فسفر و پتاسیم به سبب آزادسازی تدریجی عناصر غذایی با فاضلاب و لجن فاضلاب باشد. بهبود در وضعیت جذب عناصر غذایی در نتیجهٔ کاربرد کودهای آلی، به علت اثر مثبت این مواد بر منافذ خاک بوده که با افزایش قابلیت نگهداری عناصر غذایی در این منافذ، متعاقباً مقدار بیشتری از عناصر غذایی به گیاه منتقل خواهد شد (احمدآبادی و همکاران، ۱۳۹۱).

ahfouz و Sharaf-Eldin (۲۰۰۷) نیز طی تحقیقی روی رازیانه نشان دادند که باکتری حل‌کننده فسفات با تولید اسیدهای آلی، باعث تبدیل فسفات تثبیت‌شده به فسفات دردسترس خواهند شد. این محققان همچنین گزارش کردند که با افزایش رشد ریشه‌ها جذب فسفر افزایش یافت. به نظر می‌رسد مصرف کودهای آلی، از طریق ایجاد آثار تقویت‌کننده و مثبت بر میکروارگانیسم‌های خاک، با رهاسازی کند و مداوم فسفر از منابع آلی و معدنی موجود در خاک، موجب تأمین فسفر مورد نیاز گیاه و بهبود رشد گیاه می‌شوند.



شکل ۴. اثر سادهٔ زمان برداشت بر میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در اندام هوای گیاه نعناع



شکل ۵. اثر برهمکنش نوع آب آبیاری و سطح لجن بر میزان عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در اندام هوای گیاه نعناع

شکل ۵، مقایسهٔ میانگین، اثر برهمکنش نوع آب آبیاری و سطح لجن را بر میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم موجود در اندام هوایی گیاه نعناع را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود، کاربرد فاضلاب (خام و تصفیه‌شده) و همچنین لجن فاضلاب، میزان نیتروژن و پتاسیم موجود در اندام هوایی نعناع را نسبت به تیمار شاهد (W_1S_1) به‌طور معناداری ($p<۰/۰۵$) افزایش داده است. در مقایسه با تیمار شاهد، بیشترین افزایش (۳۱۲ درصد) مربوط به تیمار W_2S_3 است. مقایسه میانگین تیمارها از نظر میانگین درصد نیتروژن، حاکی از عدم اختلاف آماری معنادار بین تیمارهای W_2S_3 و W_3S_3، و همچنین بین تیمارهای W_1S_2 و W_3S_1 است.

مقایسهٔ میانگین اثر برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطح لجن مصرفی بر میزان فسفر گیاه در شکل ۵ آمده است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که تمامی تیمارها میانگین فسفر اندام هوایی گیاه را نسبت به تیمار شاهد (۰/۱۵ درصد وزن خشک)، به‌طور معناداری ($p<۰/۰۵$) افزایش داده، اما بالاترین میانگین (۰/۶ درصد وزن خشک) در تیمار W2S3 مشاهده شد. مقایسه جفتی بین تیمارهای مختلف نشان داد که اختلاف آماری معناداری ($p<۰/۰۵$) بین میانگین فسفر در تیمارهای W_1S_1، W_1S_2 و W_3S_1 و همچنین در تیمارهای W_2S_3 و W2S2 وجود ندارد (شکل ۵).

نتایج مقایسهٔ میانگین اثر متقابل نوع آب آبیاری و لجن نشان داد، میزان پتاسیم موجود در اندام هوایی در تمامی تیمارها، نسبت به تیمار شاهد (W1S1) به‌طور معناداری ($p<۰/۰۵$)، افزایش یافته است. مقایسهٔ جفتی بین تیمارهای مختلف نشان داد که بر اساس آزمون دانکن، اختلاف آماری معناداری ($p<۰/۰۵$) بین میانگین پتاسیم موجود در اندام هوایی نعناع در تیمارهای W_1S_2، W_1S_3 و W_3S_1 و همچنین در تیمارهای W_2S_2، W_2S_3، $W3_{S2}$ و W_3S_3 وجود ندارد (شکل ۵).

ز دلایل افزایش در میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم گیاه می‌توان به غنی بودن فاضلاب و لجن از نظر این نوع عناصر اشاره کرد. آقایاری و حسین پور درویشی (۱۳۹۲) گزارش کردند که فاضلاب دارای عناصر مفید فراوانی است و استفاده از آن به‌عنوان آبیاری، معمولاً سبب افزایش غلظت عناصر مغذی در گیاه می‌شود. در بسیاری از پژوهش‌های قبلی، اشاره شده است که علاوه بر اضافه شدن عناصر غذایی خاک در آبیاری با فاضلاب، مواد آلی موجود در آن‌ها نیز پس از ورود به خاک با میکروارگانیسم‌ها تجزیه‌شده و باعث افزایش هوموس خاک و در نهایت بهبود خواص فیزیکی- شیمیایی و حاصلخیزی خاک می‌شود (شاکرمی و همکاران، ۱۳۹۴، توسلی و همکاران، ۱۳۸۹). در بررسی که Kiziloglu و همکاران (۲۰۰۸) در ترکیه انجام دادند، مشخص شد که میزان محتوی فسفر، نیتروژن و پتاسیم گل‌کلم و کلم قرمز که با پساب تصفیه شده، آبیاری شده‌اند، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. Marofi و همکاران (۲۰۱۵) نیز نتایج مشابهی در افزایش محتوی عناصر غذایی ریحان در آبیاری با پساب گزارش کردند.

مطالعهٔ Khalid و همکاران (۲۰۰۶) بر ریحان، مبین بهبود غلظت عناصر غذایی نظیر نیتروژن و فسفر گیاه در اثر مصرف کمپوست است. همچنین درزی و حاج سیدهادی (۱۳۹۵)، در تحقیقی بر گیاه دارویی بادرشبی (*Dracocephalum moldavica L.*) به افزایش غلظت فسفر و نیتروژن جذب شده توسط گیاه در اثر مصرف کودهای دامی و ورمی‌کمپوست به دلیل افزایش فعالیت میکروبی خاک و بهبود فراهمی جذب این عناصر غذایی اذعان داشتند. اما این محققان تأثیر این کودها را بر میزان پتاسیم گیاه غیر معنادار گزارش کردند.

میزان عناصر سرب، نیکل وکادمیوم موجود در شاخساره گیاه نعناع

جدول ۳ تجزیه آماری حاصل از تجمع نیکل، سرب و کادمیوم در اندام هوایی گیاه نعناع، را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جدول، اثرهای ساده نوع آب آبیاری و

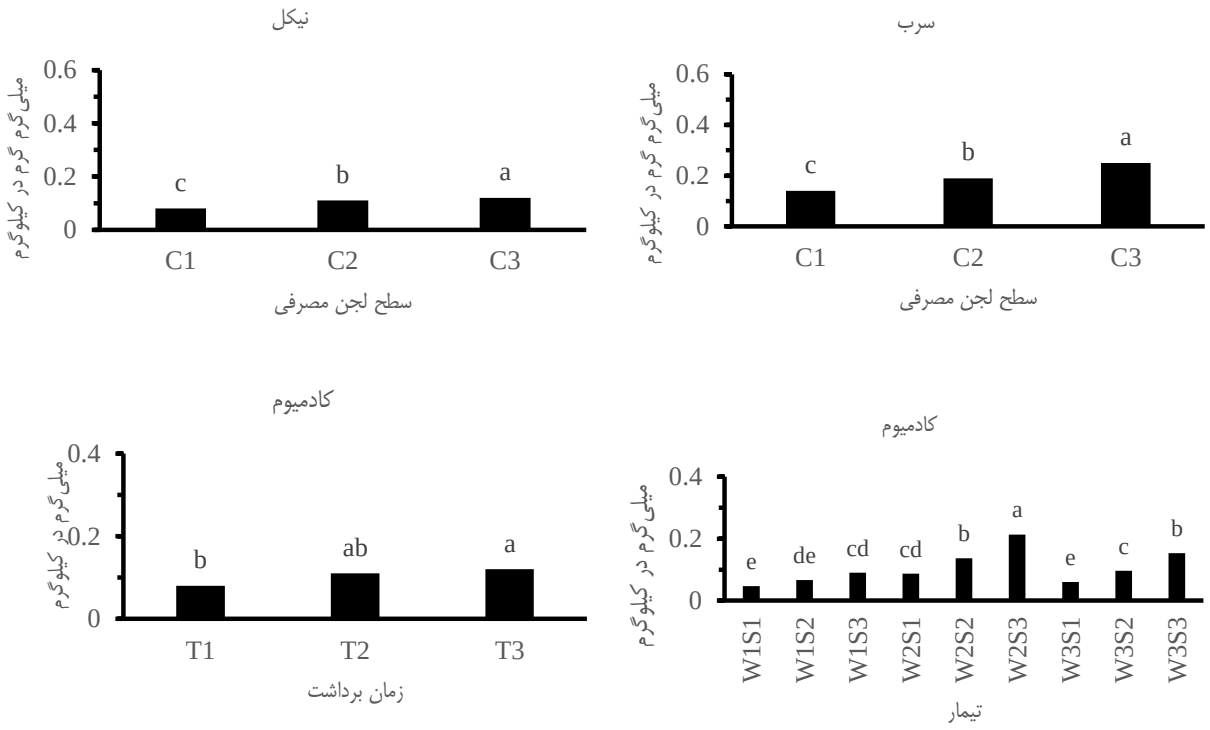
سطح لجن، بر تجمع هر سه فلز مورد بررسی، معنادار است. اثر ساده زمان برداشت نیز صرفاً بر کادمیوم، معناداری بوده است. در رابطه با برهم‌کنش دوگانه و سه گانه فاکتورها، صرفاً برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطح لجن بر کادمیوم معنادار شد.

بر اساس نتایج جدول ۳، اثر برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطح لجن صرفاً بر کادمیوم موجود در اندام هوایی معنادار ($p <$ ۰/۰۱) شد و بر میزان سرب و نیکل اندام هوایی اثر معناداری نداشت. به سبب غیر معنادار شدن اثر برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطوح لجن مصرفی بر مقادیر سرب و نیکل، صرفاً مقایسهٔ میانگینی بین آثار ساده نوع آب آبیاری و سطح لجن مصرفی، برای این فلزات انجام گرفت (شکل ۶).

اثر سادهٔ زمان برداشت بر میزان کادمیوم موجود در اندام هوایی گیاه نعناع در شکل ۶ آمده است. با توجه به نتایج این شکل ملاحظه می‌شود که با تداوم چین، میزان کادمیوم اندام هوایی گیاه نیز افزایش یافته است. مقایسهٔ جفتی بین زمان‌های مختلف برداشت، نشان داد که بر اساس آزمون دانکن، اختلاف آماری معناداری ($p<$۰/۰۵) بین میانگین کادمیوم موجود در اندام هوایی نعناع، بین زمان‌های T_3 و T_2 و همچنین بین زمان‌های T_2 و T_1 وجود ندارد (شکل ۶).

شکل۶، مقایسهٔ میانگین اثر برهم‌کنش نوع آب آبیاری و سطح لجن را بر میزان کادمیوم موجود در اندام هوایی گیاه نعناع نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود، میزان کادمیوم اندام هوایی گیاه در تیمارهای W_2S_3 و W_3S_3 به ترتیب ۴۵۷ و ۳۲۸ درصد، نسبت به تیمار شاهد (W_1S_1) افزایش یافته است. هر چند در تمامی تیمارها، میزان کادمیوم موجود در گیاه نعناع پایین‌تر از حدود مجاز ارائه شده (۲ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) توسط فائو و سازمان بهداشت جهانی است، اما مقادیر مربوط به تیمارهای W_2S_3 (۰/۲۱) و W_2S_3 (۰/۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک) نشان داد که استفادهٔ طولانی‌مدت از این دو پسماند باید با احتیاط به‌کار رود.

مقایسهٔ میانگین غلظت نیکل و سرب اندام‌های هوایی در اثر اعمال سطوح لجن مصرفی نشان داد که بالاترین غلظت هر دو فلز مربوط به سطح C_3 (۱۰۰) و کمترین مربوط به سطح C_1 (۰ تن در هکتار) بوده است، و اختلاف بین هر سه سطح لجن مصرفی، معناداری است (شکل ۶). اثر ساده نوع آب آبیاری بر میانگین مقادیر سرب و نیکل جذب شده در اندام هوایی نعناع در شکل ۶ آمده است. نتایج این شکل بیانگر افزایش معنادار ($p <$ ۰/۰۵) مقادیر سرب و نیکل جذبی به‌وسیلهٔ گیاه، تحت شرایط کاربرد فاضلاب‌های خام (W_2) و تصفیه‌شده (W_3)، نسبت به شاهد (W_1) است.



شکل ۶. اثر سادهٔ نوع آب آبیاری و سطح لجن بر میزان نیکل، سرب و کادمیوم در گیاه نعناع

بر اساس استاندارد فائو و سازمان بهداشت جهانی غلظت مجاز کادمیوم، سرب و نیکل در گیاه برای مصرف انسان به‌ترتیب نباید بیشتر از ۲، ۳ و ۶۸ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک باشد (Mapanda et al., 2007). در تحقیق حاضر، دامنهٔ مقادیر غلظت سرب، نیکل و کادمیوم به‌ترتیب ۰/۰۱ تا ۰/۵۷، ۰/۰۲ تا ۰/۷۱ و ۰/۰۱ تا ۰/۳ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک است که بسیار پایین‌تر از حدود مجاز ارائه شده است.

دامنهٔ مقادیر غلظت سرب، نیکل و کادمیوم در تحقیق حاضر بسیار پایین‌تر از مقادیر ارائه شده در تحقیق Mapanda و همکاران (۲۰۰۷) است. محققان اخیر، در مطالعه‌ای‌که روی سبزی‌های برگی آبیاری شده با فاضلاب در منطقهٔ هراره زیمباوه انجام دادند، دامنهٔ غلظت سرب، نیکل و کادمیوم را به‌ترتیب ۱/۵ تا ۶/۶، ۰/۷ تا ۵/۴ و ۰/۷تا ۲/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک گزارش کردند. در مطالعه‌ای دیگر که با عنوان میزان فلزات سنگین در سبزی‌های آبیاری شده با فاضلاب، در همان منطقه انجام شد، نتایج نشان داد که سبزی‌های آزمایش‌شده به‌شدت به عناصر کادمیوم و سرب آلوده هستند (Muchuweti et al., 2006). Sharma و همکاران (۲۰۰۸)، نتایج بررسی انجام شده در خصوص اثر فاضلاب (خام و تصفیه‌شده) بر میزان فلزات سنگین، که در دو فصل کشت بر چغندرقند صورت گرفت، حاکی از آن است که غلظت عنصر کادمیوم در فصل تابستان و عناصر سرب و نیکل در فصول زمستان و تابستان، از حدود مجاز توصیه شده برای این فلزات بالاتر بوده است. Marofi و همکاران (۲۰۱۳) با کاربرد فاضلاب در کشت سیب‌زمینی، نتایج مشابهی را گزارش کردند. این محققان دریافتند که استفاده از فاضلاب، سبب افزایش فلزات سنگین در گیاه سیب‌زمینی می‌شود.

تابنده و طاهری (۱۳۹۵) با ارزیابی، غلظت فلزات سنگین کادمیوم و سرب در سبزی‌های گشنیز، ریحان، شوید، نعناع، مرزه، تره، برگ چغندر، شنبلیله و جعفری در

شش منطقه زنجان، اعلام کردند که غلظت کادمیوم و سرب در همهٔ سبزی‌های مورد مطالعهٔ بالاتر از محدودهٔ ایمن برای مصرف انسان است. این محققان بیشترین (۱/۸) آلودگی کادمیوم را در نمونه‌های مرزه و بیشترین (۷/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم در وزن خشک) سرب را در نمونه‌های نعناع گزارش کردند که این مقادیر برای مصرف انسان، بالاتر از محدودهٔ قابل قبول استاندارد ملی ایران است. بر اساس این محققان، استفادهٔ طولانی مدت و مصرف بالای (بیش‌تر از ۵۸ گرم روزانه) سبزی‌ها در استان زنجان، می‌تواند عواقب خطرناکی بر سلامتی انسان داشته باشد.

در آزمایش دیگری که به‌منظور بررسی جذب فلزات سنگین (سرب، نیکل، کادمیوم و کروم) در گیاه نعناع در خاک‌های تیمار شده با لجن دباغی در نسبت‌های مختلف صورت گرفت، گزارش شد که نگهداشت فلزات سنگین ناشی از لجن دباغی توسط ریشه، به انتقال کمتر به قسمت‌های هوایی گیاه می‌انجامد. در این آزمایش مشخص شد که میزان تجمع این فلزات در ریشه به‌طور چشمگیری بیش از ساقه و برگ است (Patel et al., 2016). به‌طور عمده فلزات سنگین به سبب دارا بودن بار مثبت، بر دیواره‌های سلولی سطح ریشه جذب می‌شوند که دارای بار منفی هستند. بنابراین انتقال آن‌ها از ریشه به بخش‌های هوایی محدود می‌شود (Sridhar et al., 2005; Yang et al., 2005).

با توجه به شکل ۶، با افزایش سطوح لجن فاضلاب بر میزان غلظت فلزات سرب، نیکل و کادمیوم موجود در گیاه افزوده شده است. از دلایل این افزایش می‌توان به غلظت بیشتر این فلزات، با افزایش سطح لجن و همچنین کاهش pH اشاره کرد (Percival, 2003). هر چند برخی از محققان، دلیل کاهش فراهمی سرب موجود در گیاه را، به قابلیت لجن فاضلاب در جذب سرب و ایجاد فرم‌های پایدار ذکر کرده‌اند، که با نتایج تحقیق حاضر مغایرت دارد (Carlton, 2003).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر فاضلاب و سطوح مختلف لجن بر برخی پارامترهای رشد و تجمع عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، نیکل، سرب و کادمیوم در گیاه نعناع و همچنین میزان فلزات نیکل، سرب و کادمیوم موجود در خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که کاربرد فاضلاب (خام و تصفیه شده) و سطوح مختلف لجن، سبب افزایش معنادار در عملکرد و جذب عناصر مختلف از قبیل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، سرب، نیکل و کادمیم در گیاه و همچنین میزان نیکل، سرب و کادمیوم موجود در خاک می‌شود. گرچه مقادیر تجمع فلزات سرب، نیکل و کادمیم زیاد و بحرانی نبوده و پایین‌تر از حدود مجاز ارائه شده توسط استاندارد فائو است، اما با توجه به گسترش استفاده از گیاهان دارویی (به‌ویژه سبزی‌هایی که به‌صورت خام مصرف می‌شوند)، استفاده طولانی‌مدت از این دو پسماند باید با احتیاط صورت پذیرد. زیرا استفادهٔ طولانی‌مدت، سبب جذب و تجمع فلزات سنگین در محیط‌های خاک و گیاه خواهد شد. ازاین رو به نظر می‌رسد، که برداشت محصول بیشتر، نمی‌تواند در استفاده از این نوع پسماندها در بلندمدت، مورد توجه قرار گیرد، بلکه لازم است تعادلی را بین مقدار پسماند مصرفی و اعمال تناوب، در فصول متمادی برقرار شود.

منابع

احمدآبادی، ز.، قاجار سپانلو، م. و بهمنیارم.ع. ۱۳۹۱. اثر کاربرد لجن فاضلاب بر غلظت عناصر کم‌مصرف خاک و جذب آن‌ها به‌وسیلهٔ گیاه دارویی گاوزبان، مجلهٔ آب و فاضلاب، ۲۳(۱): ۱۰۱-۱۱۰.

تابنده، ل. و طاهری، م. ۱۳۹۵. ارزیابی آلودگی و ارتباط بین غلظت فلزات سنگین در خاک و سبزی‌های برگی استان زنجان، مجلهٔ پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، ۳۰(۱): ۴۹- ۶۰.

درزی، م.، حاج سیدهادی، م. ۱۳۹۵. نقش کاربرد مجزا و تلفیقی نهاده‌های آلی و زیستی بر غلظت عناصر N، P و K و اسانس گیاه دارویی بادرشبی (*Dracocephalum moldavica L.*)، دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۲۶(۳): ۱۰۱-۱۱۴.

زمانی، پ. ۱۳۹۰. طرح‌های آماری در علوم دامی، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه بوعلی‌سینا همدان.

شاکرمی، م.، معروفی، ص. و رحیمی، ق. ۱۳۹۴. بررسی اثرات فاضلاب شهری و کمپوست زباله شهری بر برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، آب‌وخاک مشهد، ۲۹(۶): ۱۶۲۸-۱۶۱۲.

شاکرمی، م.، معروفی، ص.، دشتی، ف.، رحیمی، ق. و پارسافر، ن. ۱۳۹۳. بررسی اثر استفاده از فاضلاب و کمپوست بر شاخص‌های رشد و جذب برخی عناصر غذایی در ریحان، فناوری تولیدات گیاهی، ۱۴(۱): ۱-۱۵.

صفائی، ل.، شریفی عاشورآبادی، ا.، افیونی، د.، دوازده امامی، س. و شعاعی، ع.ا. ۱۳۹۳. تأثیر سیستم‌های مختلف تغذیه‌ای بر عملکرد اندام هوایی و اسانس گیاه دارویی آویشن دنایی (Thymus daenensis Celak)، تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۳۰(۵): ۷۰۲-۷۱۳.

طولابی، ز.، رحیمی، ق. و معروفی، ص. ۱۳۹۳. تجمع فلزات سنگین در بخش هوایی و ریشه تربچه رشد یافته (Raphanus Sativus) در خاک‌های اصلاح شده با لجن فاضلاب، پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، ۲۱(۲): ۲۰۹-۲۲۶.

ناظمی، س.، عسگری، ع. و راعی، م. ۱۳۸۹. بررسی مقدار فلزات سنگین در سبزی‌های پرورشی حومهٔ شهر شاهرود، سلامت و محیط، فصلنامهٔ علمی پژوهشی انجمن علمی بهداشت محیط ایران، ۲(۲):۱۹۵-۲۰۲.

Aflatuni, A. 2005. The yield and essential oil content of mint (Mentha ssp.) in Northern Ostrobothnia. University of Oulu, Finland.

Allen, S.E., Grimshaw, H.M. and Rowland, A.P. 1986. Chemical analysis. In: Moore PD, Chapman SB, editors, Methods in Plant Ecology. Oxford: Blackwell Scientific Publication, London. 285-344.

Alloway, B.J. 1990. Heavy Metal in Soil. Blackie and Son Ltd, London.

APHA, 1995. Standard methods for examination of water and wastewater. APHA (American Public Health Association), WWA (American Water Works Association), WPCF (Water Pollution Control Federation), Washington D.C., USA.

Bachman, G.R. and Metzger, J.D. 2008. Growth of bedding plants in commercial potting substrate amended with vermicompost. J. Bioresource Technology, 99: 3155-3161.

Camobreco, V.J., Richards, B.K., Steenhuis, T.S., Peverly, J.H. and McBride, M.B. 1996. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columNs. J. Soil Science, 161: 740-750.

Carlton, C.H. 2004. Effect of metals in sludge-treated soils on crops. Environment. J. Water Research. 11(2): 27-36.

Chapman, H.D. and Pratt, V. 1961. Methods of analysis for soils, plant and waters. University of California. 9-145.

Dolgen, D., Alpaslan Necdet, M. and Delen, N. 2007. Agriculture recycling of treatment- plant sludge: A case study for a vegetable, processing factory. J. Environ. Manage. 84: 274-281.

Foppen, J.W.A. 2002. Impact of high-strength wastewater infiltration on groundwater and drinking water supply: the case of Sanaa, Yemen. J.Hydrology. 263:198-216.

Gupta, A.K., Verma, S.K., Khan, K. and Verma, R.K. 2013. Phytoremediation using aromatic plants: A sustainable approach for remediation of heavy metals polluted sites. J. environ. Science and Techno, 47(18):10115-10116.

Kalavarouziotis, I.K., Robolas, P., Koukoulakis, P.H. and Papadopoulos, P. 2008. Effect of municipal reclaimed reclaimed wastewater on the macro-and micro-elements status of soil and of Brassica oleracea var. Italica (Brocoli) and Boleracea var Gemmifera (Brussels sporouts). J. of Agricultural water Management, 95:419-426.

Khalid, K., Hendawy, SF. and El-Gezawy E. 2006. Ocimum basilicum L. Production under Organic Farming. J. Agric. and Bio. Sciecnes, 2(1): 25-32.

Kiziloglu, F.M., Turan, M., Sahin, U., Kuslu, Y. and Dursun, A. 2008. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (Brassica olerecea L. var. botrytis) and red cabbage (Brassica olerecea L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. J.Agri water manage, 95: 716– 724.

Lindsay, WL. 1992. Chemical equilibration in soils. John Wiley and Sons, New York.

Mahfouz, S.A. and Sharaf-Eldin, M.A. 2007. Effect of mineral vs. biofertilizer on growth, yield, and essential oil content of fennel (Foeniculum vulgare mill.). International Agrophysics, 21: 361-366.

Mapanda, F., Mangwayana, E.N., Nyamangara J. and Giller K.E. 2007. Uptake of heavy metals by vegetables irrigated using wastewater and the subsequent risks in Harare, Zimbabwe. J. Physics and Chemistry of the Earth, 32: 1399-1405.

Marofi, S., Parsafar, N., Rahim G., Dashti, F. and Marofi, H. 2013. The effects of wastewater reuse on potato growth properties under greenhouse lysimeteric condition. J. Science Environ. and Techno. 10:133-140.

Marofi, S., Shakarami, M., Rahim G. and Ershadfath, F. 2015. Effect of wastewater and compost on leaching nutrients of soilcolumn under basil cultivation. J.Agri water manage, 158: 266– 276.

Mclean, J. and Bledsoe, B. 1992. Ground water issue: behavior of metals in soils. EPA/ 540/ S-92/ 018.

Muchuweti, M., Birkett, J.W., Chinyanga, E., Zvauya, R., Scrimshaw, M.D. and Lester, J.N. 2006. Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: Implications for human health. J. Agric. Ecosyst. Environ. 112: 41-48.

Olsen, S.R. and Sommers, L.E. 1982. Phosphorus. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph No. 9, ASA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA, 403-430.

Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney D.R. 1982. Method of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (2nd edition). America Society of Agronomy Soil Science of America Publisher. Madison.Wisconis.USA.

Patel, A., Pandey, V. and Patra, D.D. 2016. Metal absorption properties of Mentha spicata grown under tannery sludge amended soil-its effect on antioxidant system and oil quality. J. Chemosphere 147:67-73.

Pauwels J.M., Van, RE., Verloo, M. and Mvondo, Z. 1992. Methods of analyses of grounds and plants, equipment, stock management of glassmaking and chemicals. Publication Agricultural, 28 P.

Percival, H.J. 2003. Soil and soil solution chemistry of a New Zealand pasture soil amended with heavy metal containing sewage sludge. J. Soil Research. 41:1-17.

Pettygrore, G.S. and Asano, T. 1984. Irrigation with reclaimed municipal wastewater, Guidance Manual.

Roades, J.D. 1996. Salinity: electrical conductivity and and total dissolved solids. Method of soil analysis, parss: chemical methods. Madison. Wisconsin, USA. 417-436.

Rowell, D.L. 1994. Soil Science: Methods and Applications. Longman Group, Harlow, 350.

Sharma, R.K., Agrawal, M. and Marshall, F.M. 2008. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) contamination of vegetables in urban India: A case study in Varanasi. J. Environ. Pollut. 154: 254 -263.

Sridhar, B.B.M., Diehl, S.V., Han, F.X., Monts, D.L. and Sub, Y. 2005. Anatomical changes due to uptake and accumulation of Zn and Cd in Indian mustard (Brassica juncea). J. Environ. Exp. Bot. 54:131-141.

Tokalioglu, S., Kartal, S. and Elc-i, L. 2000. Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic absorption spectrometry after a four-stage sequential extraction procedure. J. Anal. Chim. Acta. 413: 33-40.

Weigert, P. 1991. Metal loads of food of vegetable origin including mushrooms. In: Marian, E. (Ed.), In: Metals and Their Compounds in the Environment, Occurrence, Analysis and Biological Relevance. VCH, Weinheim, 458–468.

Yang, X., Feng, Y., He, Z. and Stoffella, P.J., 2005. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulatio n and phytoremediation. J. Trace Elem. Med. Biol. 18 (4): 339-353.