نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۵، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۱۶-۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 1, Vol. 15, Apr.-May. 2021, p. 1-16

مقاله علمی-پژوهشی

اثر استفاده از آب آلوده به فلز سرب با آبیاری سطحی و زیرزمینی بر عملکرد و جذب آن توسط گیاه ذرت علوفه‌ای

عبدالمجید لیاقت[۱]، محمدرضا اویسی[۲]، حامد ابراهیمیان[۳*]، مسعود پورغلام آمیجی[۴]، محمد صالح[۵]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۲۲

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی امکان استفاده از آب آلوده به سرب در آبیاری سطحی و زیرزمینی و تأثیر آن بر عملکرد ذرت علوفه‌ای می‌باشد. در همین راستا، پژوهشی در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در سال ۱۳۹۵ در قالب آزمایش فاکتوریل به صورت طرح کاملا تصادفی با شش تیمار در سه تکرار و مجموعاً ۱۸ پلات آزمایشی در لایسیمتر انجام شد. تیمارها عبارت بودند از: آبیاری سطحی با آب آلوده به سرب (SP)، آبیاری سطحی با آب معمولی به عنوان تیمار شاهد (SC)، آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به سرب و عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی‌متر (50P)، آبیاری زیرزمینی با آب معمولی و عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی‌متر (50C)، آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به سرب و عمق سطح ایستابی ۷۵ سانتی‌متر (75P) و در نهایت آبیاری زیرزمینی با آب معمولی و عمق سطح ایستابی ۷۵ سانتی‌متر (75C). نتایج نشان داد که مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه، وزن خشک بوته و عملکرد علوفه گیاه در سطح احتمال ۱ درصد و وزن تر بوته و وزن تر بلال در سطح ۵ درصد اثر معنی‌دار داشت و بر وزن خشک بلال هیچ تأثیری نداشت. همچنین آلودگی هیچ‌گونه تأثیری در رشد و عملکرد ذرت و اجزای عملکرد نداشت. همچنین در تیمار SP، به‌طور میانگین به میزان ۲/۲۵ میلی‌گرم سرب در یک کیلوگرم ماده خشک ذرت وجود داشت که طبق توصیه سازمان جهانی بهداشت (WHO)، این میزان در گروه آلودگی کم قرار می‌گیرد. در نمونه‌های گیاهی دو تیمار 50P و 75P هیچ‌گونه سربی مشاهده نشد. از طرفی بیشترین عملکرد ذرت در تیمار 75P با مقدار ۴۹/۶۵ تن در هکتار و بعد از آن در تیمار 50P با مقدار ۴۷/۰۴ تن در هکتار به ثبت رسید. میزان عملکرد در دو تیمار 75P و 50P نسبت به تیمار شاهد، به ترتیب به مقدار ۳۶ و ۲۹ درصد افزایش داشت. نکته قابل توجه اینکه مقدار فلز سرب تثبیت‌شده و صعود کرده در تیمار آبیاری زیرزمینی، خارج از دسترس گیاه بوده و مشکلی از نظر آلودگی و عملکرد ذرت وجود نداشت.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرزمینی، آلودگی خاک، سطح ایستابی، فلز سنگین

مقدمه

رشد روز افزون جمعیت و نیاز به آب و تولیدات بیشتر از یک‌سو، و خشک‌سالی‌های به وجود آمده از سوی دیگر باعث شده که در سال‌های اخیر تقاضای آب افزایش یابد (Ma et al., 2020). بنابراین با فشار بیش از اندازه به منابع آب سالم و همچنین محدودیت آن، روش‌های جایگزین برای منابع آب کشاورزی شامل نمک‌زدایی از آب‌های شور و همچنین استفاده مجدد از فاضلاب‌های صنعتی و شهری ارائه شده است که این آب‌های نامتعارف هم از جنبه اقتصادی و هم توسعه در کشاورزی مفید می‌باشند (Hakimi et al., 2018). استفاده صحیح از پساب‌های شهری در بخش کشاورزی، علاوه بر گسترش سطح زیر کشت و افزایش تولید محصول‌های زراعی، از آلودگی محیط‌زیست نیز جلوگیری می‌کند (Moretti et al., 2019) اما استفاده از پساب سبب افزایش غلظت فلزهای سنگین در خاک و گیاهان می‌شود که این افزایش بستگی به نوع و ویژگی‌های پساب مصرف‌شده دارد (Ahmad et al., 2019). بررسی‌ها نشانگر آن است که در سال ۱۴۰۰، فاضلاب تولیدی کشور به رقمی برابر با ۵۱ درصد

۱ و ۳ - به ترتیب استاد و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۲ و ۵- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
۴- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(* نویسنده مسئول: Email:ebrahimian@ut.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.1.1

آب مصرفی برسد. بنابراین کاربرد مجدد آن در کشاورزی به علت نیاز روز افزون به آب، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران می‌تواند تا حدودی کمبود منابع آب سالم را جبران کرده و ضمن استفاده در تولیدات کشاورزی، به عنوان یک روش دفع تقریباً ایمن محیط‌زیستی برای فاضلاب به کار رود (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ آتش‌پز و همکاران، ۱۳۹۷). علاوه بر این وجود عناصر غذایی موجود در فاضلاب، سبب کاهش مصرف کودهای شیمیایی می‌شود اما آثار منفی احتمالی این منابع آب در آلودگی محیط‌زیست باید در نظر گرفته شود (ایزدپناه و صراف‌زاده، ۱۳۹۹). نوع سامانه آبیاری در توزیع این منابع آب نامتعارف و مدیریت آبیاری بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Ahmed and Slima, 2018).

اگرچه بدن انسان به عناصری از قبیل روی، مس، نیکل و کروم در مقادیر بسیار کم نیازمند است ولی مقادیر بسیار کم عناصری مانند کادمیوم و سرب برای سلامتی انسان خطرناک است (Liu et al., 2020). اما محققین دریافتند که در خاک‌های قلیایی (pH> ۶/۵) و یا در حضور مواد آلی بسیار زیاد که با رس ترکیب شده‌اند، فلزات سنگین بیشتر تثبیت شده و در نتیجه شستشوی آن‌ها از خاک و در دسترس بودنشان کاهش پیدا می‌کند (Jyothi and Farook, 2020). وی و همکاران در پژوهشی که در چین انجام شد، گزارش کردند که اگر دو رژیم آبیاری یکی با مصرف آب کم و دیگری با مصرف آب زیاد استفاده شود، در رژیم مصرف آب کم، کادمیوم و مس حرکت کمی داشته و دیگر فلزات به‌طور افقی حرکت کرده (همانند آبیاری زیرزمینی) و در فاصله‌ای دور از قطره‌چکان تجمع می‌یابند ولی در رژیم آبیاری با مصرف آب زیاد، حرکت تمامی فلزات به‌صورت عمودی بوده و در عمق‌های بیشتر تجمع پیدا می‌کنند (Wei et al., 2015). همچنین منگ و همکاران پژوهشی درباره میزان فلزات سنگین در بافت گیاه و خاک در آبیاری سطحی طولانی‌مدت در چین انجام دادند و گزارش کردند که غلظت فلزات در خاک سطحی، بسیار بیشتر از خاک زیرین است (Meng et al., 2016).

نصر آزادانی و هودجی (۱۳۹۳) نیز تأثیر یک نمونه پساب صنعتی بر آلودگی خاک با فلزات سنگین را در اصفهان مورد بررسی قرار دادند. نمونه‌های برداشت‌شده شامل چهار عمق از صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متری در زهکش‌های خاکی بود. نتایج همبستگی بین عمق خاک و غلظت فلزات سنگین نشان داد که بین این دو عامل همبستگی منفی وجود داشته که این موضوع با حرکت کند فلزات سنگین در خاک‌های با درصد آهک و pH بالا و تجمع بیشتر این فلزات در لایه‌های سطحی خاک قابل توجیه است. بیگی هرچگانی و بنی طالبی (۱۳۹۲) نیز اثر بیست‌وسه سال آبیاری سطحی با پساب شهری بر انباشت بعضی فلزات سنگین در خاک، انتقال به دانه‌های گندم و ذرت در شهرکرد را بررسی کردند. نتایج نشان داد که آبیاری با پساب در درازمدت منجر به افزایش غلظت روی، مس، کروم و نیکل و افزایش شاخص انباشت آن‌ها از ۱ به ۱/۲، ۱/۳، ۱/۶ و ۱/۶ و کاهش غلظت و شاخص انباشت کادمیوم و سرب به ترتیب به ۰/۴ و ۰/۸ گردید. همچنین ارفعی‌نیا و همکاران (۱۳۹۵) غلظت و ارزیابی خطر فلزات سنگین ناشی از مصرف محصولات کشاورزی در مزارع مختلف بوشهر را بررسی کردند. یافته‌های این مطالعه نشان دادند که میزان آلودگی به فلزات سنگین در خاک و محصولات کشاورزی آبیاری شده با آب آلوده به پساب شهری و صنعتی بالاتر از مقداری بود که با آب زیرزمینی آبیاری می‌شدند. فلزات سنگین مورد بررسی در این پژوهش شامل روی، منگنز، مس، کروم، کادمیوم و سرب بودند.

حسن‌لی و همکاران با بررسی تأثیر پساب شهری بر عملکرد ذرت و کارایی مصرف آب در مرودشت شیراز گزارش کردند که آبیاری با پساب باعث افزایش بیشتر کارایی مصرف آب در مقایسه با آب تازه گردید اما تفاوت آن‌ها معنی‌دار نبود (Hassanli et al., 2009). همچنین کرمی و همکاران (۱۳۹۸) تأثیر سطوح مختلف آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت در منطقه پاکدشت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نوع آب کاربردی باعث ایجاد تفاوت معنی‌داری در مقدار عملکرد ماده خشک گردید و بیشترین عملکرد ماده خشک در تیمار پساب با مقدار ۲۰/۹۰۴ تن در هکتار و کمترین مقدار در تیمار آب چاه با مقدار ۱۷/۲۳۱ تن در هکتار به دست آمد. بنابراین می‌توان پساب تصفیه‌شده در سطح ۷۵ درصد نیاز آبی در منطقه پاکدشت را به عنوان یک راهکار مدیریتی برای آبیاری پیشنهاد نمود.

حاتمیان و همکاران (۱۳۹۸) اثر آبیاری با فاضلاب بر انباشت فلزات سرب و کادمیوم در خاک و دانه‌های گندم و جو در شهرستان قدس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که غلظت‌های کادمیوم و سرب در تیمار ترکیبی فاضلاب تصفیه نشده و آب چاه بیشتر از تیمار فاضلاب تصفیه‌شده بود. همچنین میانگین غلظت کادمیوم در دانه‌های دو گیاه دارای اختلاف معنی‌داری نبود، هرچند که غلظت سرب در دانه‌های جو به طور معنی‌داری بیشتر از گندم بود. خسروی و همکاران (۱۳۹۸) نیز تأثیر آبیاری با فاضلاب‌های شهری بر غلظت فلزهای سنگین در خاک‌های سطحی جنوب شهر هرسین کرمانشاه را در ۱۵ ایستگاه مختلف در عمق‌های ۲۰-۰ و ۴۰-۲۰ سانتی‌متر را بررسی کردند. نتایج نشان داد به جز دو فلز نیکل و کبالت، میانگین مقدار کل فلزهای سنگین در خاک‌های سطحی بیش‌تر از خاک‌های عمقی است. همچنین مقایسه آماری نشان داد که مقدار کل فلزهای سنگین، روی و سرب در دو عمق خاک زمین‌های آبیاری شده با فاضلاب، دارای اختلاف معنی‌دار است. بنابراین یکی از عمده‌ترین راه‌های ورود عناصر سنگین به اراضی کشاورزی آبیاری با پساب صنعتی می‌باشد. آبیاری با پساب صنعتی موجب افزایش مقدار سرب، نیکل، کادمیوم و کروم در خاک می‌شود که توسط پژوهشگران مختلفی نظیر جهانی و رضاپور گزارش شد اما در شرایط که آبیاری

زیرزمینی استفاده شود، شرایط فرق داشته و عمق تجمع فلزات سنگین خارج از محدوده توسعه ریشه می‌باشد (Jahany and Rezapour, 2020).

در مناطق مختلف برای گیاهان مختلف، نتایج متفاوتی در مورد انباشت فلزات سنگین در خاک و گیاه گزارش شده و بنابراین نیاز است که بررسی‌های بیشتری صورت گیرد. با توجه به اینکه در کشور ایران اکثر خاک‌ها از نوع قلیایی هستند، لذا تحرک و شستشوی فلزات سنگین بسیار کم بوده و باعث انباشت فلزات در لایه‌های سطحی خاک می‌شوند. از طرفی، جذب آب و املاح در لایه‌های سطحی که جایگاه تراکم بیشتری از ریشه‌های گیاه می‌باشد، نسبت به لایه‌های زیرین بیشتر است. این دو مسئله (انباشت و جذب فلزات) سبب تنش آلودگی گیاه هنگام آبیاری سطحی با فاضلاب صنعتی می‌شود. حال اگر به‌جای آبیاری سطحی، از آبیاری زیرزمینی (از طریق لوله‌های زهکشی و کنترل سطح ایستابی) با پساب استفاده شود، انتظار می‌رود که انباشت فلزات در لایه‌های زیرین خاک صورت گیرد و پساب با کیفیت بهتری در محیط ریشه قرار گیرد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی استفاده از آب آلوده به فلز سرب با دو روش آبیاری سطحی و زیرزمینی بر عملکرد ذرت علوفه‌ای و آلودگی خاک بود.

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش

پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۵ در مرکز تحقیقات آب و هواشناسی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با مختصات ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه عرض جغرافیایی (°N) و ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه طول جغرافیایی (°E) در ارتفاع ۱۲۹۳ متر از سطح دریا انجام شد. طبق داده‌های درازمدت، منطقه دارای آب و هوای مدیترانه‌ای بوده و بر اساس طبقه‌بندی کوپن با داشتن ۱۵۰ تا ۱۸۰ روز خشک، از نوع اقلیم نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های نسبتاً سرد و مرطوب است. مطابق آمار درازمدت ۳۰ ساله (۲۰۱۸-۱۹۸۸)، متوسط بارندگی سالانه منطقه ۲۴۷/۸ میلی‌متر و میانگین سالانه دمای هوا ۱۵/۹۳ درجه سانتی‌گراد است. بیشینه و کمینه دمای منطقه مورد بررسی به ترتیب ۴۲ و ۱۷- درجه سانتی‌گراد به ثبت رسید. حدود ۴۳ درصد از باران سالانه در فصل زمستان، ۲۸ درصد در فصل پاییز، ۲۸ درصد در فصل بهار و تنها یک درصد در فصل تابستان می‌بارد (پورغلام آمیجی و همکاران، ۱۳۹۷). جدول (۱)، اطلاعات هواشناسی و مقادیر آن‌ها در طول دوره کشت را نشان می‌دهد. لایسیمترها در یک فضای باز قرار داشتند و نزدیک‌ترین ساختمان به آن‌ها، سوله آزمایشگاه بود که در فاصله ۵۰ متری شمال شرقی لایسیمترها قرار داشت. محل قرارگیری لایسیمترها و نحوه قرارگیری آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی دوره کشت در منطقه مورد آزمایش (سال ۱۳۹۵)

شرح	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
حداکثر دما (^{O}C)	۳۱/۵	۳۸/۱	۳۷/۷	۳۲/۹
حداقل دما (^{O}C)	۱۵/۴	۲۲/۵	۲۱/۵	۱۷/۷
متوسط دما (^{O}C)	۲۳/۴	۳۰/۳	۲۹/۶	۲۵/۳
بارش (mm)	۴۱/۹	۰	۰	۰/۵
سرعت باد (m/s)	۳/۳	۲/۸	۳/۳	۲/۷
تبخیر (mm/month)	۲۵۸/۱	۴۷۰	۴۳۶	۳۲۵/۹
رطوبت نسبی (٪)	۴۴/۲	۲۴/۷	۳۰/۸	۳۳/۸

شکل ۱- نمایی از لایسیمترهای تحت آزمایش

خصوصیات خاک مورد آزمایش

پس از تهیه خاک زراعی موردنظر (خاک باغچه‌ای، منطقه مهرشهر کرج)، پر کردن لایسیمترها با خاک طی چند مرحله انجام شد. در هنگام پر کردن لایسیمترها از خاک، عملیات تراکمی خاصی صورت نپذیرفت. خاک به صورت لایه‌هایی به ارتفاع تقریبی ۲۰ سانتی‌متر در لایسیمترها ریخته شد و پس از تسطیح نسبی، لایه بعدی اضافه شد. با رسیدن ارتفاع خاک به میانه لایسیمترها، جهت ایجاد نشست و تحکیم طبیعی، مقداری آب به خاک اضافه شد و سپس اضافه نمودن خاک تا پر شدن لایسیمتر ادامه یافت. در این مرحله مجدداً با افزودن آب و پس از نشست، فضای خالی باقی‌مانده تا ارتفاع پنج سانتی‌متر پایین‌تر از لبه فوقانی لایسیمترها از خاک پر شد. در نهایت پس از پر کردن لایسیمترها و در چندین مرحله، مقداری آب اضافه شد تا شرایط خاک مساعد و آماده کشت شود. برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، قبل از شروع آزمایش و اعمال تیمارها، نمونه‌برداری از خاک لایسیمترها انجام شد. بافت خاک از طریق مثلث بافت خاک USDA تعیین شد. مشخصات فیزیکی خاک مزرعه شامل فراوانی نسبی ذرات، جرم مخصوص ظاهری (Pb)، رطوبت ظرفیت زراعی (FC) و رطوبت نقطه پژمردگی (PWP) و رطوبت اشباع به ترتیب با روش‌های هیدرومتری، سیلندر، دستگاه صفحات فشاری در مکش ۰/۳ و ۱۵ بار و روش وزنی اندازه‌گیری شد. مقدار pH خاک نیز به‌وسیله دستگاه pH متر اندازه‌گیری شد. نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک لایسیمترها

عمق (cm)	ذرات تشکیل‌دهنده خاک (٪)			بافت خاک	pH	P_b (g/cm^3)	θ_{Fc} (cm^3/cm^3)	θ_{PWP} (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)
	رس	سیلت	شن						
۰-۷۰	۱۹/۶۹	۴۵/۰۴	۳۵/۲۷	لوم	۷/۸	۱/۵۵	۲۷/۲۴	۱۴/۸۸	۴۶/۲۷

ساخت لایسیمترها

لایسیمترها از جنس PVC با ابعاد ۶۰ سانتی‌متر قطر و ۱۰۰ سانتی‌متر ارتفاع انتخاب شدند. با توجه به تعداد تیمارها و تعداد تکرار هر کدام، ۱۸ لایسیمتر استفاده شد. برای خارج کردن آب اضافی از لایسیمترها، لوله‌هایی از جنس PVC به قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. روی لوله‌ها سوراخ‌هایی به قطر دو میلی‌متر و به فاصله ۲/۵ سانتی‌متر در ۴ ردیف در ۵۰ سانتی‌متر از طول لوله تعبیه گردید تا به عنوان زهکش عمل کند. به منظور جلوگیری از ورود ذرات خاک به درون لوله‌های زهکش، استفاده از صافی یا فیلتر مناسب در اطراف لوله زهکش امری ضروری است. به همین دلیل، در پژوهش حاضر از نوعی صافی ژئوتکستایل استفاده شد. این صافی پس از دوخت به صورت پوششی هم‌قطر با لوله، به دور آن کشیده شد. لوله‌های زهکشی به طور افقی در پنج سانتی-متری کف لوله قرار گرفتند. به طوری که سر مسدود آن‌ها در داخل لایسیمتر و سر باز آن‌ها، خارج از لایسیمتر قرار می‌گرفت. محل اتصال لوله با بدنه لایسیمتر از داخل و بیرون آب‌بندی شد.

پوشش لایسیمترها

از آنجایی که لایسیمترها روی زمین قرار می‌گیرند، بنابراین در معرض مستقیم تابش خورشید و جریان هوا قرار خواهند داشت. این عوامل بر روی دمای خاک داخل لایسیمترها و تغییرات آن در طول روز تأثیر گذاشته و آن را از شرایط واقعی خاک مزرعه دور می‌کند زیرا دمای خاک تأثیر اساسی در رشد و رویش گیاه داشته و همچنین بر فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک اثرگذار است (Fang et al., 2018). بنابراین انتقال افقی حرارت از جداره لایسیمتر به سمت مرکز آن، قابل توجه می‌باشد (Pütz et al., 2018). برای مقابله با این مسائل بهتر بود که برای لایسیمترها پوششی در نظر گرفته شود. بهترین پوشش برای این لایسیمترها، پشم شیشه با روکش آلومینیوم می‌باشد اما رنگ سفید نیز می‌تواند دمای خاک داخل لایسیمتر را تعدیل کند. در نتیجه با توجه به هزینه‌های پشم شیشه و سخت بودن نمونه‌گیری از بدنه لایسیمتر، در نهایت تصمیم بر این شد که لایسیمترها رنگ سفید زده شود.

تیمارهای آزمایشی

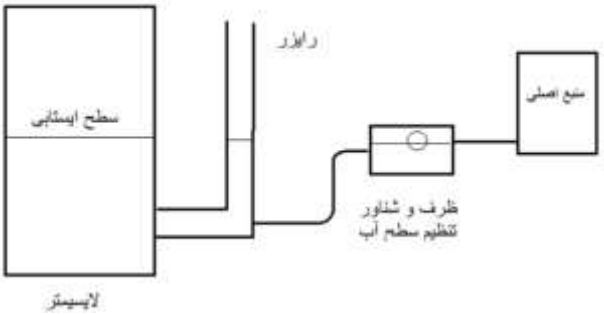
این پژوهش در قالب آزمایش فاکتوریل به صورت طرح کاملا تصادفی با شش تیمار در سه تکرار که مجموع ۱۸ پلات آزمایشی بود، انجام شد. در این تیمارها گیاه ذرت رقم SC 704 کشت شد. تیمارهای آزمایش به شرح زیر بود:

- آبیاری سطحی با آب معمولی (SC)
- آبیاری سطحی با آب آلوده به سرب (SP)
- آبیاری زیرزمینی با آب معمولی و عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی‌متر (50C)
- آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به سرب و عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی‌متر (50P)

- آبیاری زیرزمینی با آب معمولی و عمق سطح ایستابی ۷۵ سانتی‌متر (75C)
- آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به سرب و عمق سطح ایستابی۷۵ سانتی‌متر (75P)

کنترل سطح ایستابی در لایسیمترها

برای کنترل سطح ایستابی و تثبیت آن در آبیاری زیرزمینی، از چهار مخزن آب به حجم ۲۲۰ لیتر استفاده شد (دو مخزن برای تیمارهای 50C و 50P و دو مخزن دیگر برای تیمارهای 75C و 75P). این مخازن توسط شلنگ‌های باریک، هر یک به بشکه کوچکی متصل می‌شد. داخل هریک از این بشکه‌های کوچک، یک شناور قرار داشت که شلنگ‌ها به آن متصل می‌شدند. خروجی این ظرف‌ها توسط شبکه‌ای از شلنگ‌ها به انتهای لوله‌های زهکشی در تیمارهای آبیاری زیرزمینی متصل شد. شکل (۲) شماتیک نحوه آبیاری زیرزمینی لایسیمترها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شماتیک نحوه آبیاری لایسیمترهای آبیاری زیرزمینی

نحوه آبیاری لایسیمترها

آبیاری لایسیمترها به دو بخش مجزا تقسیم‌بندی شد. بخش اول از تاریخ کشت بود تا زمانی که ریشه گیاه برای استحصال آب از اعماق پایین‌تر پروفیل خاک، به حد کافی رشد کرده باشد (خرداد و تیر ۱۳۹۷) و بخش دوم، از انتهای بخش اول تا روز برداشت بود (از انتهای تیر تا اواسط مهر ۱۳۹۷). در ابتدای بخش دوم، سیستم آبیاری زیرزمینی، بر روی تیمارهای مربوطه اعمال گردید.

نحوه آبیاری تیمارهای مختلف در بخش اول

آبیاری تمامی تیمارها، در بخش اول اعم از سطحی و زیرزمینی، از روی سطح خاک انجام شد. در این مرحله به دلایل زیر، بیش‌آبیاری انجام شد تا از تنش احتمالی جلوگیری به عمل آید اما این نکته لازم به ذکر است که میزان آب مصرفی برای تمامی تیمارها به یک میزان و برابر بود. دلایل بیش‌آبیاری لایسیمترها بدین منظور بود که (۱) لایسیمترها روی سطح خاک بودند و هرچند که بدنه لایسیمترها با رنگ سفید پوشیده شده بود، تا نور را بازتاب کند و از افزایش دمای لایسیمتر جلوگیری به عمل آید اما افزایش دما در بدنه لایسیمترها تا اندازه‌ای محسوس بود. (۲) لایسیمترها با خاک دستی پر شده بودند، لذا جریانات ترجیحی و غیرقابل کنترل آب و همچنین شسته شدن خاک کناره‌های بدنه لایسیمتر رخ داد. (۳) به دلیل پر شدن لایسیمترها با خاک دستی، در هر لایسیمتر حدود ۱۵ سانتی‌متر نشست خاک اتفاق افتاد که برای آماده شدن لایسیمترها برای اعمال آبیاری زیرزمینی، به سطح لایسیمتر به‌صورت دستی خاک اضافه شد تا هم فضای خالی ناشی از خاک نشست کرده را پر کند و همچنین عمق‌های سطح ایستابی به میزان مورد انتظار برسد. (۴) در ابتدای کاشت بذر به دلیل جریانات ترجیحی، آب از منطقه دسترس بذر خارج گشته و به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کرد. قبل از جوانه‌زنی بذر نیز گاها شسته شدن بذر مشاهده شد. (۵) به دلیل اینکه لایسیمترها روی سطح خاک بودند و ارتفاعی حدود یک متر را داشتند، سطح صفر خاک و اندام هوایی گیاه، نسبت به سطح زمین در ارتفاع قرار داشتند. (۶) تراکم دو برابری تعداد گیاهان، نسبت به حالت استاندارد مزرعه، درون لایسیمترها. نکته مهم این که، در این مرحله، نیاز آبیاری گیاه در شرایط نرمال، با استفاده از آخرین نسخه نرم‌افزار CROPWAT (نسخه 8.0) محاسبه گردید. سپس به دلیل شش موردی که در بالا ذکر شد، راندمان ۵۰ درصد در نظر گرفته شد. به عبارتی دیگر، میزان آب مورد نیاز گیاه در شرایط استاندارد محاسبه و سپس به میزان دو برابر آن، گیاه درون لایسیمترهای مورد آزمایش، آبیاری شدند.

نحوه آبیاری تیمارهای مختلف در بخش دوم

در این بخش تیمارهای آبیاری زیرزمینی، به منبع آب متصل شدند و با توجه به نیاز تبخیر و تعرق خود، از منبع مورد نظر، آب مورد نیاز را دریافت می‌کردند اما برای اینکه تیمارهای آبیاری سطحی و زیرزمینی با یکدیگر مقایسه شود و همچنین به دلایلی که آب مورد نیاز تیمارهای سطحی قابل محاسبه نبود، در نتیجه تیمار آبیاری

زیرزمینی با عمق آبیاری کمتر (۵۰ سانتی‌متر)، ملاک آبیاری تیمارهای سطحی قرارداده شد. به این نحو که هر میزان مصرف آب تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق کمتر بود (50C و 50P)، به همان میزان از سطح خاک، تیمارهای آبیاری سطحی آبیاری شدند. یکی دیگر از دلایل این امر این بود که یکی از اهداف انجام این تحقیق، بررسی اثر مدیریت آبیاری و آلودگی بر عملکرد گیاه بود؛ در نتیجه می‌بایست تمامی عامل‌های دیگری که ممکن بود بر عملکرد گیاه تأثیر بگذارند، برای تمامی تیمارها شرایط یکسانی می‌داشتند. به همین خاطر تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق کمتر (به دلیل داشتن میزان تبخیر بیشتر) ملاک آبیاری تیمارهای سطحی قرار گرفت. لازم به ذکر است که با توجه به شرایط خاص لایسیمترها و خاک درون آن‌ها، برای جلوگیری از شسته شدن خاک و به حداقل رساندن جریانات ترجیحی زیرزمینی در تیمارهای آبیاری سطحی، دور آبیاری کوتاه در نظر گرفته شد. بجای این‌که از دورهای آبیاری طولانی با آب زیاد استفاده گردد، آبیاری به دفعات بیشتر و میزان کمتر انجام شد؛ به همین دلیل، خروجی آب از زهکش تیمارهای سطحی مشاهده شد.

کیفیت آب مصرفی برای تیمارهای مختلف

آب مورد استفاده در تیمار آبیاری سطحی با آب آلوده به فلزات سنگین (SP)، به صورت مصنوعی تهیه شد، بدین صورت که آب معمولی با غلظت معینی به نمک فلز سرب آلوده شد. به عبارتی فاضلاب مصنوعی تهیه شد. در آب مورد استفاده در تیمار آبیاری سطحی (SC)، هیچ‌گونه آلاینده‌ای وجود نداشت. این تیمار، تیمار شاهد برای تیمار سطحی آلوده بود. کیفیت آب مصرفی تیمار آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به فلزات سنگین (50P و 75P)، مشابه تیمار سطحی آلوده بود. تنها تفاوت آبیاری زیرزمینی با آب معمولی (50C و 75C) با تیمار پیشین، در کیفیت آب است که در این تیمار از آب معمولی استفاده شد. این تیمار نیز، تیمار شاهد برای تیمار آبیاری زیرزمینی با آب آلوده به فلزات در نظر گرفته شد.

مقدار غلظت فلزات مورد استفاده (سرب) در مصارف کشاورزی و آبیاری، بر اساس مقادیر دستورالعمل سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران (۱۳۷۱)، FAO[1] (1992) و WHO[2] (2006) تعیین شد. لازم به ذکر است که به هرکدام از مقادیر استاندارد ۱۰ درصد افزوده شد. این افزایش به منظور حصول اطمینان از وجود حداکثر غلظت مجاز فلزات در آب مورد استفاده، صورت گرفت. برای آبیاری در تیمارهای شاهد، از آب شهری استفاده شد. اما در تیمارهای آب آلوده، با اضافه کردن مقادیر مشخصی از نمک فلزات مورد نظر، آب آلوده به صورت مصنوعی آماده شد. نمک مورد استفاده، استات سرب ($Pb(C_2H_3O_2)_2$) با غلظت ۰/۳۴ گرم در ۲۰۰ لیتر آب بود که بر این اساس، غلظت نهایی فلز سرب (Pb) ۱/۱۰ میلی‌گرم در لیتر به‌دست آمد. لازم به ذکر است که درصد خلوص هر یک از ترکیبات شیمیایی مورد استفاده، تأثیر زیادی در مقدار نمک به‌کار رفته دارد. مقادیر معینی از نمک این فلزات در آب شهری حل شده و به منبع آب متصل به تیمار آبیاری زیرزمینی با آب آلوده اضافه گشته و سپس غلظت فلزات سنگین حاصل از انحلال این نمک‌ها، محاسبه شد. همان طور که ذکر شد، مقادیر نمک برای انحلال در ۲۰۰ لیتر آب (حجم مخزن) محاسبه گردید.

اندازه‌گیری مقدار فلزات

برای اندازه‌گیری مقدار فلزات در نمونه‌های مورد نظر، از روش طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS[3]) استفاده شد. تکنیک AAS برای تعیین مقادیر بسیار ناچیز غلظت فلزات (در حد ppm)، در نمونه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر بسیاری از فلزات مختلف با استفاده از AAS تعیین می‌شوند. در این خصوص دو نکته مهم وجود دارد: (۱) هرچه غلظت عنصری در محلول بالاتر باشد، نور بیشتری از خود منتشر می‌کند و (۲) هر عنصری که انرژی جذب می‌کند، رنگ متفاوتی را به صورت نور از خود منتشر می‌کند. با استفاده از این ویژگی عناصر، طیف‌سنجی جذب اتمی، می‌تواند یون‌های خاص را در نمونه، شناسایی و اندازه‌گیری کند. نحوه تهیه نمونه خاک برای قرائت توسط دستگاه جذب اتمی بدین صورت بود که به دو گرم از نمونه خاک، ۱۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک چهار نرمال اضافه و در حمام آب گرم، در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از گذشت ۱۲ ساعت، نمونه صاف گردید. اندازه‌گیری غلظت عناصر سنگین در عصاره به دست آمده توسط دستگاه جذب اتمی قرائت شد (Walsh, 1989). نحوه تهیه نمونه گیاه برای قرائت توسط دستگاه جذب اتمی نیز بدین صورت بود که ذرت‌های برداشت‌شده، به طور کامل هوا خشک شدند. سپس از قسمت‌های مختلف گیاه ذرت (برگ، ساقه، ذرت) نمونه‌گیری انجام شد. نمونه‌های خشک گیاه توسط دستگاه خردکن، پودر شده و سپس درون کوره سوزانده شد. خاکستر گیاه با اسیدکلریدریک سه نرمال هضم شد و عصاره‌گیری انجام شد (Walsh, 1989). در آخر نمونه‌ها تحویل آزمایشگاه موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی شد، تا میزان فلزات سنگین نمونه‌های آزمایشی، اندازه‌گیری شود.

بذر گیاه ذرت، در تیرماه سال ۱۳۹۵ درون لایسیمترها کاشته شد. مرحله جوانه‌زنی گیاه نیز چهار روز پس از تاریخ کشت، آغاز شد. همچنین در مهرماه همان سال، محصول پس از گذشت ۸۳ روز، محصول علوفه‌ای برداشت شد. در نهایت برای تحلیل آماری داده‌ها،

1- Food and Agriculture Organization
2- World Health Organization
3- Atomic Absorption Spectroscopy

از نرم‌افزار SAS (نسخه 9.4) استفاده شد. لازم به ذکر است که میانگین‌ها، به روش دانکن مورد مقایسه قرار گرفتند.

نتایج و بحث

میزان آب مصرفی برای تیمارهای مختلف

در بخش اول، میزان آبیاری به دو بخش تقسیم شد. در بخش اول، میزان ۴۲۸ میلی‌متر آب به هر یک از لایسیمترها داده شد. در بخش دوم، که سیستم آبیاری زیرزمینی به لایسیمترها وصل شد، در تاریخ‌های مختلف، میزان افت سطح آب منابع یادداشت شد و به میزان افت سطح آب، به تیمارهای شاهد، آب معمولی اضافه شد. برای تیمارهای آلوده به فلزات سنگین نیز، به نسبت افت سطح آب و حجم کل منبع، در هر بار نمک فلزات سنگین مورد نیاز برای آلوده کردن آب، محاسبه و توزین شد و به همراه آب، به منبع اضافه شد. در این بخش، جمع مقادیر آب اضافه‌شده به منبع و به مصرف گیاه رسیده شده، برای تیمارهای زیرزمینی (50C و 50P)، اعم از آلوده و غیرآلوده، برابر با ۶۳۸ میلی‌متر بود و برای تیمارهای زیرزمینی (75C و 75P)، اعم از آلوده و غیرآلوده، برابر با ۶۰۰ میلی‌متر بود. میزان آب اضافه‌شده به تیمارهای سطحی (SC و SP)، همان‌طور که در فصل روش انجام آزمایش ذکر شد، برابر با آب مصرفی تیمار زیرزمینی با عمق کم‌تر (۵۰ سانتی‌متر) بود. مقدار کمتر مصرف آب در روش آبیاری زیرزمینی با عمق بیشتر قابل انتظار بوده و توسط محققین مختلف به آن شاره شده است (Ma et al., 2020; Wei et al., 2015).

در جدول (۳)، اثر مدیریت آبیاری، آلودگی و اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی بر روی صافت اندازه‌گیری شده مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. منظور از مدیریت آبیاری، اعمال آبیاری از سطح خاک، آبیاری زیرزمینی از عمق سطح ایستابی ۵۰ سانتی‌متر و ۷۵ سانتی‌متر می‌باشد. صفات مورداندازه‌گیری شامل ارتفاع ذرت، وزن تر بوته، وزن خشک بوته، وزن تر بلال، وزن خشک بلال و عملکرد گیاه بود. قابل مشاهده است که اثر مدیریت آبیاری بر روی ارتفاع گیاه، وزن خشک بوته و عملکرد گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود زیرا در وقتی ارتفاع گیاه از نوع سامانه آبیاری تأثیر بپذیرد، طبیعتا وزن خشک بوته و عملکرد نیز تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. اثر مدیریت آبیاری بر روی وزن تر بوته و وزن تر بلال در سطح پنج درصد معنی‌دار بوده و بر وزن خشک بلال هیچ تأثیری نداشته است. نکته جالب توجه در این است که آلودگی هیچ‌گونه تأثیری در رشد و عملکرد ذرت و اجزای عملکرد نگذاشته و فقط مدیریت آبیاری است که تعیین کننده شرایط می‌باشد. تنها صفتی که تحت تأثیر اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی قرار گرفت، ارتفاع گیاه بود. دلیل آن هم جذب فلزات سنگین از طریق ریشه و تأثیر مستقیم بر اندام هوایی بوده است.

نتایج مشابهی توسط بیگی هرچگانی و بنی طالبی (۱۳۹۲) و کرمی و همکاران (۱۳۹۸) گارش شده که استفاده از فلزات سنگین در محصول ذرت، تأثیر معنی‌داری بر عملکرد نداشته و چه بسا عملکرد و اجزای آن را نیز افزایش داده است. به غیر از نتایج ارائه‌شده در جدول (۳)، برخی تغییرات مهم نظیر اثر مدیریت آبیاری و اثر متقابل مدیریت و آلودگی بر ارتفاع گیاه، اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر گیاه ذرت و عملکرد گیاه ذرت به تفکیک شرح داده شد که همراه به شکل‌های مربوط به آن، در بخش‌های زیر مورد بحث قرار گرفت.

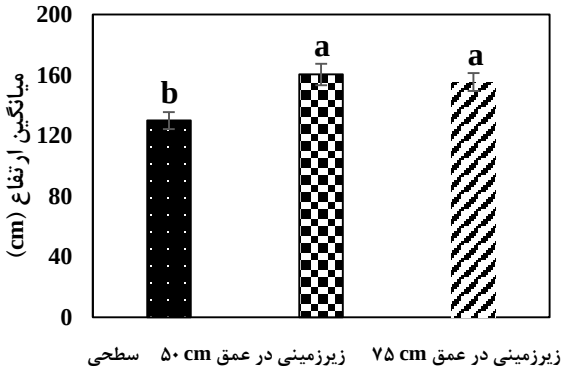
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر مدیریت آبیاری و آلودگی بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت

منابع تغییر	ارتفاع گیاه	وزن تر بوته	وزن خشک بوته	وزن تر بلال	وزن خشک بلال	عملکرد گیاه
اثر مدیریت آبیاری	۱۶۰۵/۵**	۰/۱۴۵*	۰/۰۰۹۸**	۰/۱۹۳*	۰/۰۰۲۶ns	۲۹۳/۸**
اثر آلودگی	۳۲ns	۰/۱۱۲ns	۰/۰۰۰۳۵ns	۰/۰۰۰۱ns	۰/۰۰۰۰۹ns	۵۵/۷۹ns
اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی	۱۱۳/۱۶*	۰/۰۰۲۷ns	۰/۰۰۰۵۹ns	۰/۰۰۱۱ns	۰/۰۰۰۳۳ns	۰/۲۳ns
خطا	۲۷/۵	۰/۰۲۵	۰/۰۰۱۱	۰/۰۲۹	۰/۰۰۰۶۹	۳۹/۷
ضریب تغییرات	۳/۵۳	۱۰/۵۱۵	۹/۸۱۳	۳۱/۴	۴۲/۴	۱۴/۲۴

**، * و ns به ترتیب نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد و عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

اثر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه

طبق نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳)، تأثیر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود اما آلودگی به تنهائی هیچ تأثیری بر ارتفاع گیاه نداشته است. همچنین ملاحظه می‌شود که اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی، در سطح پنج درصد معنی‌دار بوده است. شکل (۳)، به صورتی دیگر اثر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه را نشان می‌دهد. لازم به ذکر که هر عمق موجود در شکل (۳)، مربوط به سه تکرار از آب معمولی و سه تکرار از آب آلوده به فلزات سنگین می‌باشد. بنابراین هر عمق بیان‌شده، معرف میانگین ارتفاع ناشی از ۶ پلات آزمایشی است.

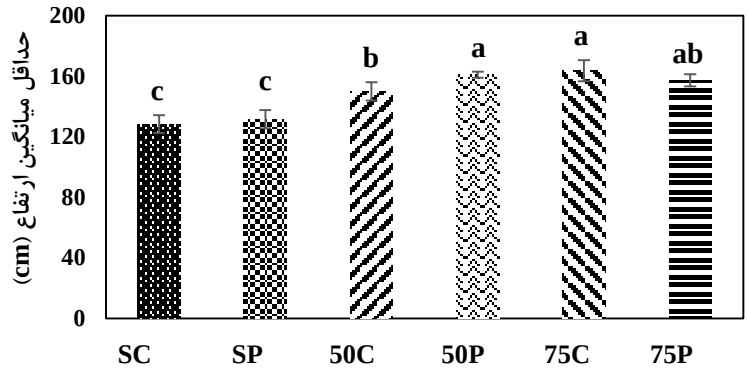


شکل ۳- اثر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه و مقایسه میانگین به روش دانکن

همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، ارتفاع گیاه هر چهار تیمارهای آبیاری زیرزمینی در آزمون مقایسه میانگین دانکن، از لحاظ آماری در گروه a قرار داشت و تیمارهای آبیاری سطحی، در گروه b قرار گرفتند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که نوع سیستم آبیاری در ارتفاع نهائی گیاه تأثیر چشمگیر داشته است. دلیل این امر می‌تواند این باشد که در سیستم آبیاری زیرزمینی (50C، 50P، 75C و 75P)، همواره عمق مشخصی از آب در لایسیمتر موجود بوده است و به علت صعود کاپیلاری در اختیار گیاه قرار گرفته است اما در سیستم آبیاری سطحی (SC و SP)، به علت دستی پر شدن خاک لایسیمتر و جریانات ترجیحی آب که در همه لایسیمترهای سطحی مشاهده گردید، آب به اعماق پائین‌تر نفوذ کرده و از دسترس گیاه خارج شده است. از طرفی بار آبی واردشده از سطح و جریان رو به پایین در آبیاری سطحی قابل توجه بوده و همین امر، عامل دیگری در خارج شدن آب قابل دسترس گیاه در آبیاری سطحی حاضر بوده است. در این شرایط، هر میزان که سطح آب در لایسیمتر در عمق پائین‌تری باشد، گیاه برای دسترسی به آب بالاجبار تخصیص مواد حاصل از فتوسنتز خود را به سمت اندام زمینی خود که همان ریشه است، معطوف کرده که در نتیجه باعث می‌شود سهم اندام هوایی گیاه از این مواد کاهش یابد. متوسط ارتفاع گیاه در آبیاری سطحی برابر ۱۳۰ سانتی‌متر بوده که این میزان در آبیاری زیرزمینی با عمق ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر به ترتیب به ۱۶۰/۵ و ۱۵۵/۵ سانتی‌متر رسیده است. به عبارتی در تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر نسبت به تیمار شاهد (آبیاری سطحی)، به ترتیب ۲۳/۵ و ۱۹/۶ درصد افزایش ارتفاع رخ داده که این قابلیت بالای آبیاری زیرزمینی در مصرف کمتر آب و افزایش اجزای عملکرد را نشان می‌دهد. یافته‌های این بخش با نتایج پژوهش کرمی و همکاران (۱۳۹۸)، Alizadeh et al. (2001) و Hirich et al. (2012) مطابقت دارد.

اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی بر ارتفاع گیاه

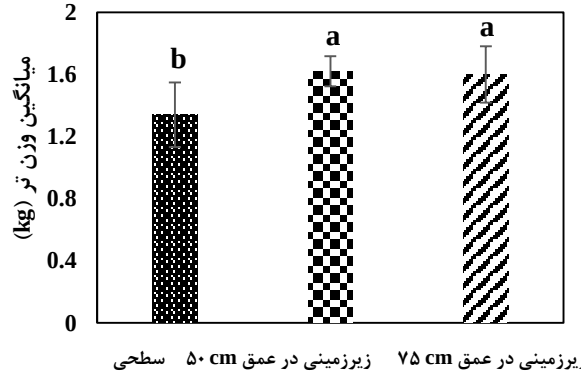
اثر متقابل مدیریت و آلودگی بر ارتفاع گیاه در جدول (۳) و شکل (۴) نشان داده شده است. در تیمارهای آبیاری سطحی (SC و SP) اختلاف معنی‌داری بین اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی بر ارتفاع گیاه مشاهده نشد و مقایسه میانگین به روش دانکن حاکی از اختلاف سه سانتی‌متری در میانگین ارتفاع بوده که هر دو در یک خانواده قرار گرفتند (c) ولی نوسانات متوسط ارتفاع گیاه در تکرارهای مختلف پلات‌های این تیمار، نسبت به دیگر تیمارها مقدار بالاتری دارد. نکته بعدی مربوط به تیمار آبیاری زیرزمینی عمق ۵۰ سانتی‌متری می‌باشد که در حالت شاهد (50C) و آلوده به فلزات سنگین (50P) اختلاف معنی‌دار بین میانگین ارتفاع ذرت وجود دارد. همچنین با تیمار قبلی و بعدی خود نیز اختلاف معنی‌دار داشته و در یک گروه آماری قرار نگرفتند (b و a). اما نکته قابل توجه این است که تیمار آب آلوده عمق ۵۰ سانتی‌متر (50P) و تیمار شاهد عمق ۷۵ سانتی‌متر (75C) در یک ردیف آماری قرار داشته که در نوبه خود قابل توجه می‌باشد. به هرحال مشهود است که آبیاری زیرزمینی ضمن کاهش مصرف، تأثیر بالایی در رشد، عملکرد و اجزای عملکرد محصول گذاشته و اثر معنی‌دار آن، گواه این ادعا می‌باشد. در تیمارهای عمق ۷۵ سانتی‌متر (75C و 75P) نیز اختلاف ناچیزی بین میانگین ارتفاع ذرت وجود داشته و اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی در این تیمار تأثیر کمتری بر میانگین ارتفاع گذاشته است. ضمن اینکه بین تیمار زیرزمینی ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر اختلاف ناچیز وجود داشته و عمده تفاوت مربوط مقایسه آن با آبیاری سطحی است. از طرفی کمترین میزان نوسان در تیمار (50P) مشاهده شد. نتایج مشاهدات محققین نیز نشان داد که تأثیر آب آلوده به فلزات سنگین بر اجزای عملکرد ذرت تأثیر معنی‌داری نداشته و در صورت کاهش عملکرد، مقدار آن بسیار ناچیز بود (Hassanli et al., 2009; Hirich et al., 2012; Abedinzadeh et al., 2019).



شکل ٤- اثر متقابل مدیریت آبیاری و آلودگی بر ارتفاع گیاه و مقایسه میانگین به روش دانکن

اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر گیاه ذرت

با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۳)، مشاهده می‌شود که در سطح پنج درصد، تأثیر مدیریت آبیاری بر وزن تر گیاه معنی‌دار شده است ولی آلودگی هیچ‌گونه تأثیری بر وزن تر گیاه نداشته است. دلیل این امر می‌تواند این باشد که pH آب آبیاری و خاک درون لایسیمترها، در محدوده قلیایی بوده و در نتیجه حرکت فلزات سنگین به شدت کاهش یافته است. به همین دلیل، فلزات سنگین موجود در آب آبیاری، به میزان بسیار کمی جذب خاک و سپس گیاه شد. روند تغییرات شکل (۵) همانند شکل (۳) و اثر مدیریت آبیاری بر ارتفاع گیاه بوده و تیمار (50C و 50P) نسبت به تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر (75C و 75P) و سپس تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۵۰ سانتی‌متر (SC و SP) وزن تر بیشتری ثبت کرده است. حتی نوسان میانگین وزن تر در این تیمار نسبت به دیگر تیمارها کم تر بوده است. از طرفی کاملا قابل انتظار بود که با توجه به میانگین ارتفاع بیشتر در تیمارهای آبیاری زیرزمینی، در نتیجه میزان وزن تر گیاه هم با همین روند باشد که این‌گونه هم شد. همچنین به دلیل مواجه‌شدن گیاه تیمارهای آبیاری سطحی با تنش کم‌آبی، محصول تولیدی آن‌ها کاهش یافته است. تأثیر آبیاری زیرزمینی در کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد محصول در پژوهش‌های مختلفی نظیر ارفعی نیا و همکاران (۱۳۹۵)، خسروی و همکاران (۱۳۹۸) و Wei et al. (2015) به آن اشاره شده است. همانند روند تغییرات ارتفاع گیاه، کمترین وزن تر بوته در تیمار آبیاری سطحی با مقدار ۱/۳۴ کیلوگرم ثبت شد و بعد از آن تیمار آبیاری زیرزمینی در عمق ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متر به ترتیب مقادیر ۱/۶۲ و ۱/۶ کیلوگرم را دارا بودند. به عبارتی دو تیمار آبیاری زیرزمینی، حدود ۲۰ درصد وزن تر بیشتری نسبت به تیمار شاهد داشته که مقدار قابل توجهی است.



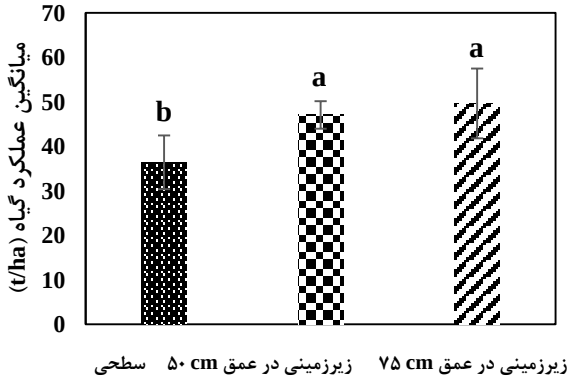
شکل ۵- اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر بوته و مقایسه میانگین به روش دانکن

اثر مدیریت آبیاری بر عملکرد گیاه ذرت

از جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) قابل مشاهده است که اثر بر عملکرد گیاه ذرت (مجموع وزن تر بوته و بلال) در سطح یک درصد معنی‌دار شده است. همان‌طور که در شکل (۶) قابل مشاهده است، تیمارهای آبیاری زیرزمینی (50C، 50P، 75C و 75P) در گروه a قرارگرفته‌اند، ولی تیمارهای آبیاری سطحی (SC و SP) در گروه b دسته‌بندی شدند. با توجه به یک اندازه بودن میزان آب مصرفی برای تمامی لایسیمترها و همچنین جدول تجزیه واریانس، مشخص است

که عامل آلودگی بر عملکرد گیاه تأثیری نداشته است. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط برابر، نوع سیستم آبیاری بر روی عملکرد گیاه به‌شدت تأثیرگذار است. از جدول (۳) می‌توان دریافت که با تغییر سیستم آبیاری از زیرزمینی با عمق ثابت به سیستم آبیاری سطحی، تقریباً ۱۱ تن در هکتار عملکرد محصول کاهش یافته است. دلیل این امر این است که طبق قانون ۴۰-۳۰-۲۰-۱۰، هر گیاه هفتاد درصد آب مورد نیاز خود را از لایه‌های فوقانی دریافت می‌کند. با توجه به اینکه جریانات سطحی در تیمارهای آبیاری سطحی مشاهده شد، سپس آب در لایه‌های زیرین خاک نفوذ کرد و مانند تیمارهای آبیاری زیرزمینی همیشه آب در دسترس گیاه نبود؛ می‌توان نتیجه گرفت که گیاه در تیمارهای سطحی دچار کمبود آب زیاد نسبت به تیمارهای زیرزمینی شده و در نهایت از عملکرد آن کاسته شده است. همانند اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر گیاه، اثر مدیریت آبیاری بر عملکرد گیاه ذرت به گونه‌ای است که آبیاری زیرزمینی تأثیر بیشتری در افزایش عملکرد داشته و اختلاف معنی‌دار آن با آبیاری سطحی نیز گزارش شده است (خسروی و همکاران، ۱۳۹۸؛ کرمی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Ahmad et al., 2019).

همچنین با مقایسه شکل (۶) و شکل (۵) (اثر مدیریت آبیاری بر وزن تر) می‌توان دریافت که، عملکرد تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر (75C و 75P) از تیمار زیرزمینی با عمق ۵۰ سانتی‌متر بیشتر شده است. در صورتی که در شکل مربوط به وزن تر گیاه، تیمار زیرزمینی با عمق ۵۰ سانتی‌متر (50C و 50P) عملکرد بهتری از خود نشان داده بود. دلیل این امر این است که وزن بلال تولیدی در تیمار زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر بیشتر از تیمار عمق ۵۰ سانتی‌متر بوده است که در نتیجه ۲/۶ کیلوگرم در هکتار عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. چرایی آن به این مسئله بر می‌گردد که در تیمار زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر، گیاه برای دسترسی به آب، کمی دچار تنش شده است (به علت عمق زیاد سطح آب) ولی این کمبود مانند تیمار آبیاری سطحی، آن‌قدر زیاد نبوده است که باعث کاهش عملکرد شود و به حد آستانه برسد. از طرفی به دلیل اینکه گیاه ذرت به شدت به کم‌آبی حساس است، سطوح کم تنش آبی باعث می‌شود گیاه ذرت بنابه خصوصیات فیزیولوژیکی خود، سیستم ریشه خود را قوی‌تر کند که باعث زودرس شدن گیاه شده و در نتیجه رشد زایشی بهتر و بیشتری خواهد داشت که این مورد در تیمار آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر دیده شد. بیشترین عملکرد ذرت در تیمار 75P و با مقدار ۴۹/۶۵ تن در هکتار و بعد از آن در تیمار 50P با مقدار ۴۷/۰۴ تن در هکتار به ثبت رسید. میزان عملکرد در دو تیمار 75P و 50P نسبت به تیمار شاهد، به ترتیب به مقدار ۳۶ و ۲۹ درصد افزایش داشته است. نتایج این بخش نیز با نتایج علیزاده و همکاران، جی و همکاران و بلهاج و همکاران مطابقت دارد (Alizadeh et al., 2001; Ji et al., 2018; Belhaj et al., 2016).



شکل ٦- اثر مدیریت آبیاری بر عملکرد گیاه ذرت و مقایسه میانگین به روش دانکن

میزان جذب سرب در خاک

استانداردی که سازمان جهانی بهداشت برای خاک‌های آلوده به فلزات سنگین توصیه کرده است، در جدول (۴) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۴)، خاکی که به میزان ۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم و یا کم‌تر، دارای فلز سرب باشد، در دسته خاک‌های با آلودگی کم قرار می‌گیرد. در صورتی که فلز سرب یافت شده در خاک لایسیمترهای این تحقیق، از یک‌دهم این میزان نیز کم‌تر بود؛ در نتیجه می‌توان انتظار داشت که بدون نگرانی و ایجاد مشکل آلودگی برای خاک، بتوان چند سال متوالی از آب آلوده به فلزات سنگین با این غلظت، برای آبیاری زیرزمینی استفاده کرد.

جدول ٤- استاندارد سازمان جهانی بهداشت برای طبقه‌بندی خاک‌ها از نظر آلودگی (WHO, 2019)

نوع فلز سنگین	واحد	آلودگی کم	آلودگی متوسط	آلودگی شدید
آهن	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۲۰۰۰	۵۰۰۰	–
نیکل	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۲۳	۳۶	۴۹
مس	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۳۵	–	–
روی	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۱۲۰	۲۹۰	۴۶۰
سرب	میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک	۳۶	۸۳	۱۳۰

حرکت سرب در خاک

میزان فلز سرب موجود در لایه‌های مختلف خاک پس از اتمام دوره کشت و برداشت محصول، در جدول (۵) آمده است. قابل مشاهده است که میزان سرب جذب‌شده در تیمار آبیاری سطحی فقط مربوط به لایه‌های سطحی خاک (۲۰-۰ سانتی‌متر) بوده و در تیمارهای آبیاری زیرزمینی در لایه‌های زیرین (۸۵-۶۵ سانتی‌متر)، مقادیری از سرب مشاهده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود (جدول ۵)، حرکت فلز سرب در جریان رو به پایین در تیمار SP (آبیاری سطحی)، ۳۰ سانتی‌متر از طول مسیر خاک بوده است و هر مقدار که فلز سرب با آب آلوده در تیمارهای سطحی وارد خاک شده است (حدوداً ۴/۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)، تقریباً به همان میزان در خاک تثبیت شده است. بنابراین حدود ۶۵ درصد فلز سرب در لایه ۱۰ سانتی‌متری ابتدایی خاک تثبیت شده و ۲۵ درصد در لایه ۱۰ سانتی‌متری دوم خاک در تیمار سطحی، نفوذ کرده است. میزان این فلز در لایه بعدی خاک، ناچیز بود. ۱۰ درصد باقیمانده از سرب تزریق‌شده در آبیاری سطحی، به صورت تلفات تبخیری بود.

در مورد حرکت فلز سرب در جریان رو به بالای تیمار 50P (آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر)، ۲/۵۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم از سرب در همان محدوده‌ای بوده که تزریق شده و فقط ۰/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم آن به ۱۰ سانتی‌متر لایه بالایی صعود کرده است. به عبارتی دیگر، ۶۰ درصد از کل مقدار سربی که وارد خاک شده است (۴۰ درصد از ۴/۵۲ ppm به دلیل قلیاییت درون مخزن ته‌نشین شد)، از این میزان ۹۱ درصد در عمق ۶۵-۵۵ سانتی‌متری خاک تثبیت شده و فقط ۹ درصد آن به لایه بالایی صعود کرده است. نکته قابل توجه اینکه همین مقدار فلز سرب تثبیت شده و صعود کرده، خارج از دسترس گیاه بوده و بنابراین مشکلی در جذب آب و تأثیر بر عملکرد ذرت به وجود نیامده است. سرب از جمله کم‌تحرک‌ترین فلزات سنگین در خاک است و بنابراین عدم تحرک آن در لایه‌های خاک نیز قابل توجیه است. قابلیت استفاده از این عنصر، با افزایش pH خاک کاهش می‌یابد (Abedinzadeh et al., 2019; Alghobar & Suresha, 2015). نتایج این بخش در مورد حرکت ناچیز و جذب سرب در خاک با مشاهدات کرمی و همکاران (۱۳۹۸)، آتش‌پز و همکاران (۱۳۹۷)، بیگی هرچگانی و بنی‌طالبی (۱۳۹۲) و نصر آزادانی و هودجی (۱۳۹۳) در تطابق است.

جدول ۵- غلظت فلز سرب موجود در لایه‌های مختلف خاک (mg/kg)

عمق خاک (cm)	تیمار		
	SP	50P	75P
۰-۱۰	۲/۹۴	۰	۰
۱۰-۲۰	۱/۱۳	۰	۰
۲۰-۴۰	۰	۰	۰
۴۰-۵۵	۰	۰/۲۴	۰
۵۵-۶۵	۰	۲/۴۷	۰
۶۵-۷۵	۰	۰	۰/۱۰
۷۵-۸۵	۰	۰	۲/۴۵

حرکت فلز سرب در جریان رو به بالا در تیمار 75P (آبیاری زیرزمینی با عمق ۷۵ سانتی‌متر)، برابر با ۱۰ سانتی‌متر از طول مسیر خاک بوده است. البته با توجه به اینکه نمونه‌گیری خاک از وسط لوله ورودی آبیاری زیرسطحی تا ۱۰ سانتی‌متر بالای آن بود و شعاع لوله نیز ۲/۵ سانتی‌متر بود، می‌توان نتیجه گرفت که حرکت این فلز (۹۶ درصد فلز واردشده در خاک)، برابر با ۷/۵ سانتی‌متر بوده و ۴ درصد مابقی، تا لایه ۱۰ سانتی‌متر دوم صعود کرده است. البته این نکته نیز قابل ذکر است که حدود ۴۰ درصد از فلز سرب (۴۰ درصد از ppm ۴/۲۵ کل که می‌توانست وارد خاک شود)، در منبع آب ته‌نشین شده (به‌علت قلیاییت آب) و حدودا ۶۰ درصد آن وارد خاک شده است؛ که از این میزان، به مقدار ۹۶ درصد، در ۷/۵ سانتی‌متری بالای لوله آب ورودی، تثبیت گشته است. علت تفاوت حرکت روبه بالای بیشتر در تیمار 50P، به مقدار بیشتر فلز سرب در آن حالت بر می‌گردد. بنابراین ۹ درصد از فلز سرب قابل‌جذب، به لایه بالایی (۵۵-۴۰ سانتی‌متر) صعود کرده در صورتی که در تیمار 75P این مقدار برابر ۴ درصد از فلز سرب موجود و صعود مویینگی آن به لایه بالایی آن (۷۵-۶۵ سانتی‌متر) بود. دلیل اختلاف میزان حرکت فلز سرب در جریان رو به بالا و جریان رو به پائین، تفاوت در نوع سیستم آبیاری است. در سیستم آبیاری سطحی پس از گذشت از یک دور آبیاری، خاک داخل لایسیمتر رطوبت خود را از دست داده و منجر به ایجاد درز و شکاف در خاک می‌شود. در نتیجه با اضافه کردن آب به خاک، آب از طریق

این درز و شکاف‌ها به‌راحتی به لایه‌های زیرین نفوذ می‌کند اما در سیستم آبیاری زیرزمینی، به علت این‌که آب همیشه در خاک موجود بوده و به دلیل صعود کاپیلاری پروفیل خاک همواره مرطوب می‌باشد، درز و شکافی در پروفیل خاک ایجاد نشده و در نتیجه حرکت فلز سرب در جریان رو به بالا، کاهش یافته است. این موضوع در مورد هر دو تیمار آبیاری زیرزمینی (50P و 75P)، صدق کرده است (Ahmed and Slima, 2018; Moretti et al., 2019).

نتایج فوق‌الذکر در مورد حرکت فلزات در خاک، با تحقیقاتی که پورسعیدی (۱۳۸۶) و موگویی (۱۳۹۵) انجام دادند، مطابقت کامل دارد. نتایج فوق‌الذکر در مورد حرکت فلزات در خاک، با تحقیقاتی که پورسعیدی (۱۳۸۶) و موگویی (۱۳۹۵) انجام دادند، مطابقت کامل دارد. پورسعیدی در تحقیق انجام‌شده اظهار داشت که حرکت فلزات درون خاک بسیار کم بوده و در نتیجه می‌توان از آب آلوده به فلزات سنگین برای آبیاری زیرزمینی استفاده کرد. تفاوت نتایج این تحقیق با تحقیق ایشان، این است که گیاهان تیمار آبیاری سطحی آلوده تحقیق حاضر، فلز سرب را جذب کرده ولی در آزمایشی که پورسعیدی در سال ۱۳۸۶ انجام داد، بیان کرد که حتی گیاهان تیمارهای آبیاری سطحی نیز فلز سرب را جذب نکردند. دلیل این امر این است که گیاه کشت‌شده در آزمایش مذکور کلزا بوده و گیاه کشت‌شده در تحقیق حاضر، ذرت می‌باشد. دلیل این تفاوت می‌تواند به علت تفاوت در مصرف آب دو گیاه و یا تفاوت در مشخصات گیاه‌شناسی و فیزیولوژیک آن‌ها باشد. ذرت گیاهی است که به دلیل کشت تابستانه و نیاز آبی بالا، آب زیادی مصرف می‌کند ولی کلزا به دلیل کشت پائیزه و نیاز آبی کمتر، نیاز کم‌تری به آبیاری دارد و این می‌تواند دلیل جذب سرب در گیاه ذرت باشد. چراکه مقدار سرب بیشتری همراه با آبیاری وارد خاک و در محیط ریشه انباشته شده است. همچنین ایشان بیان کردند که حرکت فلزات سنگین در جریان رو به بالا بسیار کم‌تر از حرکت فلزات در جریان رو به پائین می‌باشد. همچنین موگویی (۱۳۹۵) در تحقیق انجام‌شده بیان کرد که حرکت فلز سرب در خاک بسیار کم بوده و در همان چند سانتی‌متر اول مسیر خاک، فلز سرب رسوب کرد.

بیلان سرب در خاک

میزان فلز سرب تزریق‌شده به آب تیمارهای آلوده، واردشده به خاک لایسیمترها و جذب‌شده توسط گیاه، به شرح جدول (۶) می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، در تیمار آبیاری سطحی آلوده (SP) حدود ۹۲ درصد فلز ورودی از طریق آب آبیاری، جذب خاک و گیاه شده است. دلیل این‌که طبق جدول فوق، ۱۰۰ درصد فلز سرب ورودی به لایسیمتر، جذب خاک و گیاه نشده است، می‌تواند مربوط به توزیع غیریکنواخت آلاینده فلز سرب در خاک به دلیل ناهمگنی خاک باشد. به‌طوری‌که نمونه خاک تهیه‌شده از لایسیمتر، میانگینی از توزیع آلاینده نباشد. دلیل دیگر می‌تواند به خاطر خطای اندازه‌گیری باشد؛ چرا که حساسیت دستگاه در طول آزمایش یکسان و یکنواخت نیست. همچنین فلز سرب می‌تواند در سطل مدرجی که با آن تیمارهای سطحی آبیاری می‌شدند، ته‌نشین شده باشد. البته که دیگر محققین نیز افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک و بعضا گیاه که در آبیاری معمول و آب آلوده انجام شدند را تایید کردند که کم‌تر از حد سازمانی بهداشت جهانی بود که با نتیجه پژوهش حاضر همخوانی دارد (یزدانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Salakinkop and Hunshal, 2014).

جدول ٦- بیلان فلز سرب در آب، خاک و گیاه

تیمار	فلز ورودی به لایسیمتر از طریق آب آبیاری (mg)	فلز جذب‌شده در خاک لایسیمتر (mg)	میزان فلز جذب‌شده توسط گیاه (mg)	جمع فلز جذب‌شده در خاک و گیاه (mg)
SP	۱۴۹	۱۳۳/۹	۲/۲۵	۱۳۶/۱
50P	۱۴۹	۸۹/۲	۰	۸۹/۲
75P	۱۴۰/۱	۸۳/۹	۰	۸۳/۹

با مشاهده جدول (۶) مشخص است، به‌طور میانگین، حدوداً ۶۰ درصد فلز سرب ورودی به تیمارهای آب زیرزمینی (50P و 75P)، جذب خاک لایسیمترها شده است. پس با توجه به بیلان فلز سرب می‌توان انتظار داشت که احتمالاً ۴۰ درصد کل فلز سرب تزریقی به منبع آب آبیاری تیمارهای زیرزمینی، درون منبع آب رسوب کرده باشد. دلیل این امر این است که pH آب آبیاری ۷/۷ بود و فلزات سنگین بخصوص فلز سرب، در محیط قلیایی رسوب کرده و حرکت کمی دارند. در سیستم آبیاری زیرزمینی به دلیل حرکت جزئی آب در خاک، زمان زیادی آب در مخزن باقی می‌ماند تا به داخل خاک نفوذ کند. این امر باعث شده تا رسوب فلز سرب در مخزن آب تیمارهای آب زیرزمینی بیشتر باشد اما در آبیاری سطحی، زمان ماند آب آلوده در مخزن آب بسیار کمتر بوده و به عبارتی بلافاصله به داخل سیستم ریخته می‌شد. در تحقیقی که موگویی (۱۳۹۵) انجام داد، بیان کرد که غلظت فلز سرب درون منبع آب، از مقدار ۶ تا ۱۸/۳ میلی‌گرم در لیتر،

متغیر بود و دلیل آن را قلیایی بودن آب درون منبع دانستن و بیان کردند که فلز سرب در pH بالای ۷، مقداری رسوب خواهد کرد. دیگر محققین نیز حرکت بیشتر فلز سرب در لایه‌های سطحی خاک و جذب کمتر آن در آبیاری زیرزمینی را تایید کردند. در واقع این یافته نشان می‌دهد که آبیاری با فاضلاب آلوده به فلزات سنگین با آبیاری زیرزمینی نتوانسته غلظت سرب خاک را افزایش دهد معنی‌داری دهد که با مطالعات دیگر پژوهشگران در این زمینه هم سو است (Liu et al., 2020; Jyothi & Farook, 2020; Belhaj et al., 2015; Alghobar and Suresha, 2015).

جذب سرب توسط گیاه

از گیاهان هر شش لایسیمتر مربوط به دو تیمار آبیاری زیرزمینی آلوده، نمونه‌گیری انجام شد. همچنین از دو تیمار شاهد آبیاری زیرزمینی نیز دو نمونه تهیه شد تا بتوان نمونه‌های تیمارهای آلوده را مورد بررسی قرار داد و با تیمارهای شاهد مقایسه کرد. همچنین سه نمونه از گیاهان سه لایسیمتر مربوط به تیمار آبیاری سطحی آلوده و یک نمونه از گیاه تیمار آبیاری سطحی با آب معمولی تهیه شد. در هر دو تیمار آبیاری زیرزمینی با آب آلوده و تمامی تکرارهای آن‌ها، میزان سرب جذب‌شده توسط گیاه برابر با صفر بود و فلز سرب وارد اندام هوایی گیاه ذرت نشد اما گیاه ذرت، در تیمار آبیاری سطحی با آب آلوده، به‌طور میانگین (میانگین سه تکرار)، به میزان ۲/۲۵ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک ذرت، سرب را به اندام هوایی خود جذب کرد. بر اساس نتیجه تحقیقات، سرب فلزی است که به وسیله ریشه گیاه جذب شده، به بخش‌های بیرونی ریشه، آپوپلاست و دیواره سلولی متصل شده و بنابراین کمتر در اختیار اندام هوایی گیاه قرار می‌گیرد که در پژوهش حاضر نیز چنین نتیجه‌ای به دست آمد و سرب به مقدار بسیار کم جذب گیاه شد (Agarwal, 2009). همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقادیر سرب جذب‌شده در خاک، طبق جدول توصیه‌شده توسط سازمان جهانی بهداشت (جدول ۴)، کمتر از ۳۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بوده است و این میزان از آلودگی در گروه آلودگی کم و ناچیز قرار می‌گیرد و طبیعی است که اثر عامل آلودگی بر صفات اندازه‌گیری شده گیاه ذرت، در تحلیل‌های آماری معنی‌دار نشده است. هرچند که برخی نتایج عکس این موضوع است؛ زیرا برخی پژوهشگران درباره تأثیر آبیاری با آب‌های آلوده یافتند که موجب صدمه به خاک و تجمع برخی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه تیانجین چین (Meng et al., 2016) و خاک‌های زیرکشت محصولات گلخانه‌ای در تونس (Belhaj et al., 2016) شده که این موضوع، لزوم بررسی آبیاری با آب آلوده به فلزات سنگین در هر منطقه خاص و استفاده از سامانه‌های مختلف آبیاری را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف استفاده مطمئن از آب آلوده به فلز سنگین سرب با آبیاری سطحی و زیرزمینی و اثر آن بر عملکرد و اجزای عملکرد ذرت انجام شد. نتایج نشان داد که قابلیت استفاده از آب‌های آلوده به فلزات سنگین به صورت مدیریت‌شده، در آبیاری زیرزمینی وجود دارد. در مورد حرکت سرب در خاک در جریان رو به پایین تیمار آبیاری سطحی با فلز سرب، حدوداً ۶۵ درصد فلز سرب در لایه ۱۰ سانتی‌متری ابتدایی خاک تثبیت شده و ۲۵ درصد در لایه ۱۰ سانتی‌متری دوم خاک، نفوذ کرد. ۱۰ درصد باقیمانده از سرب تزریق‌شده در آبیاری سطحی، احتمالاً به صورت تلفات تبخیری بود. در مورد حرکت فلز سرب در جریان رو به بالای تیمار آبیاری زیرزمینی در عمق ۵۰ سانتی‌متر، مقدار ۹۱ درصد سرب واردشده به خاک در عمق ۶۵–۵۵ سانتی‌متری خاک تثبیت شده و فقط ۹ درصد آن به لایه ۱۰ سانتی‌متری بالایی صعود کرده بود. در مورد تیمار آبیاری زیرزمینی در عمق ۷۵ سانتی‌متر نیز همین روند تکرار شد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اگر یک منبع تصفیه کوچک و پر از خاک وجود داشته باشد (به‌طور مثال، منبع میانی مورد استفاده در این تحقیق که درون آن شناور قرار داشت تا سطح آب را درون لایسیمتر کنترل کند)، از یک خاک قلیایی با حداقل pH بیشتر از ۷/۵ پر شود و علاوه بر تنظیم سطح آب درون لایسیمتر، نقش فیلتراسیون آب درون منبع اصلی را نیز ایفا کند، با مقدار بسیار کم خاک (خاک درون منبع تصفیه) انتظار می‌رود که بتوان فاضلاب آلوده به فلزات سنگین را به‌طور کامل تصفیه کرد، بدون آنکه کم‌ترین مقداری از فلزات سنگین وارد خاک لایسیمتر شود. همچنین در این صورت، به دلیل حجم کم خاک فیلتراسیون، به راحتی می‌توان با استفاده از اسید ضعیف آن را از فلزات جذب‌شده پاکسازی کرد. در مورد تأثیر فلزات سنگین و نوع روش آبیاری باید گفت که عملکرد گیاه ذرت در تیمارهای آبیاری زیرزمینی تفاوت معنی‌داری با یکدیگر نداشتند اما عملکرد محصول در تیمارهای آبیاری سطحی نسبت به تیمارهای زیرزمینی، کاهش یافت.

منابع

آتش‌پز، ب.، رضاپور، س. و قائمیان، ن. ۱۳۹۷. اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده بر غلظت، توزیع و آلودگی بعضی عناصر سنگین خاک. آب و خاک. ۳۲ (۳): ۵۸۵–۵۷۳.

ارفعی‌نیا، ح.، رنجبر وکیل‌آبادی، د.، سیفی، م.، اسدگل، ز. و هاشمی، س.ع. ۱۳۹۵. بررسی غلظت و ارزیابی خطر (Risk Assessment) فلزات سنگین ناشی از مصرف محصولات کشاورزی در مزارع مختلف شهرستان دیر، بوشهر. طب جنوب. ۱۹ (۵): ۸۵۴–۸۳۹.

ایزدپناه، م. و صراف‌زاده، م. ح. ۱۳۹۹. بررسی پتانسیل استفاده مجدد از پساب استخرهای شنا برای آبیاری فضای سبز، مطالعه موردی شهر تهران. آب و فاضلاب. ۳۱ (۱): ۱۱۰-۹۹.

بیگی هرچگانی، ح. و بنی طالبی، گ. ۱۳۹۲. اثر بیست‌وسه سال آبیاری سطحی با پساب شهری بر انباشت بعضی فلزات سنگین در خاک، انتقال به دانه‌های گندم و ذرت و خطرات بهداشتی مرتبط. آب و خاک. ۲۷ (۳): ۵۸۰-۵۷۰.

پورسعیدی، م. ۱۳۸۶. استفاده مطمئن از آب آلوده به فلزات سنگین برای آبیاری کلزا به روش آبیاری زیرزمینی در اقلیم کرج. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

پورغلام آمیجی، م.، لیاقت، ع.، نازی قمشلو، آ. و خوش‌روش، م. ۱۳۹۷. اثر آب زیرزمینی کم‌عمق و شور بر روی رشد و زیست-توده برنج. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۲ (۴): ۵۱۶-۴۹۹.

حاتمیان، ل.، رفعتی، م. و فرساد، ف. ۱۳۹۸. اثر آبیاری با فاضلاب بر انباشت فلزات سرب و کادمیوم در خاک و دانه‌های گندم و جو. مدیریت آب و آبیاری. ۹ (۲): ۳۳۲-۳۲۱.

خسروی، ی.، زمانی، ع.، پری زنگنه، ع. و نوری، ف. ۱۳۹۸. مطالعه تأثیر آبیاری با فاضلاب‌های شهری بر غلظت فلزهای سنگین در خاک‌های سطحی جنوب شهر هرسین، کرمانشاه. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۶): ۱۵۶۴-۱۵۵۰.

کرمی، ع.، هاشمی گرم‌دره، س. ا.، قربانی جاوید، م. و وراوی پور، م. ۱۳۹۸. تأثیر سطوح مختلف آبیاری با پساب تصفیه‌شده شهری بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت در منطقه پاکدشت. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۰ (۹): ۲۱۹۲-۲۱۸۳.

معاونت تحقیقاتی سازمان حفاظت محیط‌زیست. ۱۳۷۱. استاندارد خروجی فاضلاب‌ها. انتشارات دفتر آموزش زیست‌محیطی.

موگویی، م. ۱۳۹۵. مدیریت ذخیره-بازیافت در سفره‌های آب زیرزمینی بر اساس ارزیابی کیفیت آب. پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

نصر آزادانی، آ. و هودجی، م. ۱۳۹۳. ارزیابی تأثیر یک نمونه پساب صنعتی بر آلودگی خاک با فلزات سنگین. علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. ۱۶ (۱): ۳۸۹-۳۷۹.

یزدانی، ع.، صفاری، م. و رنجبر، غ. ۱۳۹۶. اثر آبیاری با فاضلاب شهری تصفیه‌شده بر عملکرد دانه و تجمع فلزات سنگین در دانه ژنوتیپ‌های جو. علوم زراعی ایران. ۱۹ (۴): ۲۹۶-۲۸۴.

Abedinzadeh, M., Etesami, H. and Alikhani, H.A. 2019. Characterization of rhizosphere and endophytic bacteria from roots of maize (Zea mays L.) plant irrigated with wastewater with biotechnological potential in agriculture. Biotechnology Reports. 21, e00305.

Agarwal, S.K. 2009. Heavy metal pollution (Vol. 4). APH publishing.

Ahmad, K., Wajid, K., Khan, Z.I., Ugulu, I., Memoona, H., Sana, M. ...and Sher, M. 2019. Evaluation of potential toxic metals accumulation in wheat irrigated with wastewater. Bulletin of environmental contamination and toxicology. 102 (6): 822-828.

Ahmed, D.A. and Slima, D.F. 2018. Heavy metal accumulation by Corchorus olitorius L. irrigated with wastewater. Environmental Science and Pollution Research. 25 (15): 14996-15005.

Alghobar, M.A. and Suresha, S. 2015. Evaluation of nutrients and trace metals and their enrichment factors in soil and sugarcane crop irrigated with wastewater. Journal of Geoscience and Environment Protection. 3 (08): 46.

Alizadeh, A., Bazari, M.E., Velayati, S., Hasheminia, M. and Yaghmai, A. 2001. Using reclaimed municipal wastewater for irrigation of corn. In ICID International Workshop on Wastewater Reuse Management, Korea.

Belhaj, D., Jerbi, B., Medhioub, M., Zhou, J., Kallel, M. and Ayadi, H. 2016. Impact of treated urban wastewater for reuse in agriculture on crop response and soil ecotoxicity. Environmental Science and Pollution Research. 23 (16): 15877-15887.

Fang, Q., Zhang, X., Shao, L., Chen, S. and Sun, H. 2018. Assessing the performance of different irrigation systems on winter wheat under limited water supply. Agricultural water management. 196: 133-143.

FAO. 1992. Wastewater Treatment and Use in Agriculture. Irrigation and Drainage Paper, No 47, FAO, Rome, Italy.

Hakimi, L., Sadeghi, S.M.M., Van Stan, J.T., Pypker, T.G. and Khosropour, E. 2018. Management of pomegranate (Punica granatum) orchards alters the supply and pathway of rain water reaching soils in an arid agricultural landscape. Agriculture, Ecosystems & Environment. 259: 77-85.

Hassanli, A.M., Ebrahimizadeh, M.A. and Beecham, S. 2009. The effects of irrigation methods with effluent and irrigation scheduling on water use efficiency and corn yields in an arid region. Agricultural Water Management. 96 (1): 93-99.

Hirich, A., Allah, R.C., Jacobsen, S.E., El Youssfi, L. and El Homaria, H. 2012. Using deficit irrigation with treated wastewater in the production of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) in Morocco. Revista Científica UDO Agrícola. 12 (3): 570-583.

Ji, Y., Wu, P., Zhang, J., Zhang, J., Zhou, Y., Peng, Y. ... and Gao, G. 2018. Heavy metal accumulation, risk assessment and integrated biomarker responses of local vegetables: a case study along the Le'an River. Chemosphere. 199: 361-371.

Jyothi, N.R. and Farook, N.A.M. 2020. Heavy Metal

1521.

Pütz, T., Fank, J. and Flury, M. 2018. Lysimeters in vadose zone research. Vadose Zone Journal. 17 (1).

Salakinkop, S.R. and Hunshal, C.S. 2014. Domestic sewage irrigation on dynamics of nutrients and heavy metals in soil and wheat (Triticum aestivum L.) production. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture. 3 (3): 1-11.

Walsh, A. 1989. The application of atomic absorption spectra to chemical analysis. Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy. 45: 221-230.

Wei, Z., Paredes, P., Liu, Y., Chi, W.W. and Pereira, L. S. 2015. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. Agricultural water management. 147: 43-53.

World Health Organization. 2006. Guidelines for the Safe Use of Waste water Excreta and Grey water, Volume 2: Wastewater Use in Agriculture. World Health Organization, Geneva.

World Health Organization. 2019. Chemical Safety, Activity Report 2018.

Toxicity in Public Health. In Heavy *Metal Toxicity in Public Health*. IntechOpen.

Liu, J., Xue, J., Yuan, D., Wei, X. and Su, H. 2020. Surfactant Washing to Remove Heavy Metal Pollution in Soil: A Review. Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering). 13 (1): 3-16.

Ma, X., Sanguinet, K.A. and Jacoby, P.W. 2020. Direct root-zone irrigation outperforms surface drip irrigation for grape yield and crop water use efficiency while restricting root growth. Agricultural Water Management. 231: 105993.

Meng, W., Wang, Z., Hu, B., Wang, Z., Li, H. and Goodman, R.C. 2016. Heavy metals in soil and plants after long-term sewage irrigation at Tianjin China: A case study assessment. Agricultural water management. 171: 153-161.

Moretti, M., Van Passel, S., Camposeo, S., Pedrero, F., Dogot, T., Lebailly, P. and Vivaldi, G. A. 2019. Modelling environmental impacts of treated municipal wastewater reuse for tree crops irrigation in the Mediterranean coastal region. Science of the Total Environment. 660: 1513-

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 1, Vol. 15, Apr.-May. 2021, p. 1-16

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره ۱، جلد ۱۵، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۱۶-۱

Effect of Using Lead-Contaminated Water by Surface Irrigation and Subirrigation on Silage Maize Yield and Uptake

A. Liaghat[1], M. R. Oveysi[2], H. Ebrahimian[3*], M. Pourgholam-Amiji[4], M. Saleh[5]
Recived: Jun.07, 2020 Accepted: Aug.12, 2020

Abstract

The aim of this study was to investigate the possibility of using lead contaminated water in surface irrigation and subirrigation and its effect on silage maize yield. In this regard, lysimeter experiments were conducted in the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran in 2017 in the form of factorial experiment in a completely randomized design with six treatments in three replications and a total of 18 experimental plots. Treatments included: Surface irrigation with lead-contaminated water (SP), Surface irrigation with fresh water as control treatment (SC), Subirrigation with lead-contaminated water and water table depth of 50 cm (50P), Subirrigation with fresh water and water table depth of 50 cm (50C), Subirrigation with lead-contaminated water and water table depth of 75 cm (75P), and finally, Subirrigation with fresh water and water table depth of 75 cm (75C). The results showed that the effect of irrigation management on plant height, plant dry weight and maize silage yield at 1% probability level, wet plant weight and maize wet weight at 5% level was significant and it had no effect on maize dry weight. Also, pollution had no effect on growth and yield and components of maize yield. The results also showed there was a 2.25 mg of lead per one kg of maize dry matter in the SP treatment, which this amount is in the group of low pollution according to the World Health Organization (WHO), No lead was observed in the plant samples of the 50P and 75P treatments. On the other hand, the highest maize yield was recorded in the 75P treatment with 49.65 t/ha and then in the 50P treatment with 47.04 t/ha. Crop yield increased by 36% and 29% in the 75P and 50P treatments compared to the control treatment, respectively. It is noteworthy that the amount of lead metal stabilized and rised in the subirrigation treatment was out of reach of the plant and there was no problem in terms of pollution and maize yield.

Keywords: Heavy metals, Soil pollution, Subirrigation, Water table

1 and 3- Respectively Professor and Associate Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2 and 5- M.Sc. Graduate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*-Corresponding Author Email: ebrahimian@ut.ac.ir)