

تاثیر کاربرد فاضلاب خام شهری بر کیفیت فیزیکی خاک و عملکرد بیولوژیکی گندم (مطالعه موردی: منطقه

هرسین)

راضیه شهباززاده^۱ و علی اشرف امیری نژاد^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی

۲. استادیار گروه علوم و مهندسی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۷/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۴/۲۵)

چکیده

این پژوهش، با هدف بررسی کاربرد چندین دهه فاضلاب خام شهری بر کیفیت فیزیکی خاک و عملکرد بیولوژیکی گندم در منطقه هرسین اجراء گردید. در این راستا، مهمترین ویژگی‌های فیزیکی موثر بر کیفیت فیزیکی خاک، و نیز غلظت کل بعضی از عناصر سنگین نمونه‌های خاک ده نقطه مطالعاتی تحت آبیاری با آب چاه و فاضلاب مورد تجزیه آماری قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد فاضلاب با افزایش ماده آلی، موجب بهبود پایداری خاکدانه‌ها، کاهش چگالی ظاهری، و افزایش سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل: هدایت هیدرولیکی اشباع، درصد تخلخل و رطوبت اشباع گردید. غلظت کل روی و آهن در اراضی آبیاری شده با فاضلاب در مقایسه با اراضی تحت آبیاری با آب چاه، به طور معنی‌داری بیشتر بوده، در حالیکه غلظت کروم، سرب و نیکل دارای اختلاف معنی‌داری نبودند. بطور کلی، کاربرد فاضلاب در اراضی، بعضی از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک را در منطقه مطالعاتی بهبود بخشیده است.

واژه‌های کلیدی: آبهای نامتعارف، آبیاری، فلزات سنگین، ویژگی‌های فیزیکی خاک.

مقدمه

کمبود آب یکی از چالش‌های اساسی مناطق خشک و نیمه خشک مانند ایران است، و این وضعیت در سال‌های اخیر به دلیل پدیده خشکسالی حادث شده است (Tabari and Salehi, 2009). پیش‌بینی موسسه بین‌المللی مدیریت آب (IWMI)^۱ نیز بیانگر آن است که کشورهای شمال آفریقا و خاورمیانه در سال ۲۰۲۵ با کم‌آبی شدید مواجه می‌شوند (IWMI, 2000).

بخش کشاورزی ایران حدود ۹۰ درصد مصرف منابع آب را به خود اختصاص داده است (Ehsani, and Khalidi, 2006). علاوه بر این، افزایش جمعیت، نیاز به تولیدات کشاورزی را به طور چشمگیری افزایش داده است. این نیاز روزافزون، علاوه بر اینکه فشار زیادی را بر منابع آب موجود وارد می‌کند، موجب خواهد شد تا اراضی کشاورزی دچار کمبود مواد آلی و فقر عناصر غذایی گردند (Tqvaean, et al., 2007).

از طرف دیگر، به دلیل توسعه شهرها و افزایش مصرف آب، و از آنجایی که به طور متوسط حدود ۷۵ درصد آب مصرفی شهرها به فاضلاب تبدیل می‌شود، مقدار زیادی فاضلاب شهری تولید می‌شود (Soroush, et al., 2008). فاضلاب حاصله دارای

مخلوطی از مواد معلق معدنی و آلی بوده (Metcalf, 2003) و سرشار از مواد مغذی مورد نیاز گیاهان (مثل نیتروژن و فسفر) است که می‌تواند اثرات مثبتی بر عملکرد گیاهان و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک داشته باشد (Kilbride, 2006).

با توجه به ارزش بالای آب شیرین و دشواری دستیابی به منابع آب، استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده یک گزینه کارآمد در مدیریت مصرف آب محسوب می‌شود (Kibria and Alamgir, 2012). کاربرد این منابع آبی در کشاورزی، سابقه‌ای دیرینه داشته و به چند دهه پیش از قرن نوزدهم بر می‌گردد (Abedi-Koupai, et al., 2003). امروزه در کشورهای صنعتی، طرح استفاده مجدد از فاضلاب و پساب شهری در مقیاس وسیع در حال اجرا بوده (Shahriari, et al., 2010) و به عنوان مثال، در کشور چین بیش از ۱/۳۳ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی تحت آبیاری با فاضلاب است (Panahpoor, et al., 2008).

در زمینه تاثیر فاضلاب شهری بر خواص خاک، مطالعات مختلفی انجام شده است. به عنوان مثال، مشخص شده که کاربرد فاضلاب موجب افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک (Rattan, et al., 2005)، کاهش واکنش خاک (pH)، ناشی از تولید اسیدهای آلی (Mathan, 1994)، افزایش غلظت املاح محلول-خاک (EC) (Molahoseini, 2014)، و یا افزایش تخلخل و

* نویسنده مسئول: aliamirinejad@yahoo.co.uk

1. International Water Management Institute

بعد) که از آب ترکیبی فاضلاب خام شهر با آب سراب به عنوان آب آبیاری در اراضی کشاورزی استفاده می‌گردد. توضیح اینکه، در اراضی مجاور نیز گروهی از زارعین صرفاً از آب چاه برای زراعت استفاده می‌کنند. مساحت کل اراضی کشاورزی این محدوده قریب به ۷۹۶ هکتار بوده و گیاه زراعی غالب زارعین گندم است. سیستم آبیاری در کل اراضی منطقه (هر دو سری اراضی مورد نظر) به صورت سطحی (سنتی) است.

نمونه برداری و اندازه گیری ویژگی‌ها

نمونه برداری خاک از اراضی جنوب شهر هرسین و از دو منطقه مجاور هم (اراضی صرفاً آبیاری شده با آب چاه منطقه و اراضی صرفاً آبیاری شده با فاضلاب شهری) صورت گرفت. شکل شماره ۱، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری خاک را نشان می‌دهد. در این بررسی، جمعاً تعداد ۱۰ نقطه مطالعاتی به صورت تصادفی انتخاب، و عملیات نمونه برداری خاک از عمق ۰-۳۰ cm انجام شد. دلیل انتخاب این لایه جهت نمونه برداری، توجه به عمق توسعه حداکثری ریشه در خاک، و نیز تجمع اکثریت فلزات سنگین در لایه سطحی خاک بوده است. سپس نمونه‌های خاک در آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه رازی مورد تجزیه قرار گرفت. همینطور، از آب چاه و فاضلاب کاربردی در آبیاری مزارع گندم نمونه برداری انجام شد. نتایج آزمایشگاهی ویژگی‌های شیمیایی نمونه آب چاه و فاضلاب شهری مورد استفاده در جدول شماره ۱ آمده است.

در آزمایشگاه. مواد آلی، pH، EC و بافت خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، درصد رطوبت اشباع، پایداری خاکدانه‌ها، و همینطور، غلظت کل فلزات سنگین (شامل کروم، آهن، نیکل، روی و سرب) تمام نمونه‌های خاک مطابق روش‌های استاندارد (Page, et al., 1996) اندازه گیری شد. همچنین، علاوه بر ویژگی‌های شیمیایی و نیز غلظت بعضی از یونها (Ca، Mg، Na، SO₄ و HCO₃)، غلظت کل فلزات سنگین مورد نظر در نمونه‌های آب چاه و فاضلاب اندازه گیری گردید (Rice, et al., 2012). انتخاب پارامترهای مورد سنجش بر اساس بررسی منابع علمی مختلف بوده که در راستای مطالعه کاربرد فاضلاب در اراضی کشاورزی صورت گرفته است.

هدایت هیدرولیکی خاک (Mojiri and Abdul Aziz., 2011) می‌گردد.

همینطور، فاضلاب شهری دارای مقدار قابل توجهی فلزات سنگین بوده که نوع و مقدار آن‌ها از مکانی به مکان دیگر و در طول زمان متفاوت است. در حقیقت مشکل اساسی استفاده از فاضلاب شهری در آبیاری اراضی، حضور عناصر سنگین در فاضلاب، رسوب آن‌ها در خاک، و در نهایت جذب آن‌ها توسط گیاه است (Manh Khai., 2008). از طرفی، آبیاری با فاضلاب در تمام مراحل رشد گیاه منجر به حصول بیشترین عملکرد بیولوژیکی گیاه ذرت (Alizadeh, et al., 2001) و یا باعث افزایش قدرت پنجه زنی، طول ساقه، و تعداد سنبله در برنج می‌شود (Yoon and Kwun, 2015).

از آنجا که در شهرستان هرسین استان کرمانشاه چندین دهه است که از فاضلاب خام شهری به عنوان آب آبیاری در اراضی کشاورزی استفاده می‌شود و تا به حال تأثیر این آبیاری بر کیفیت فیزیکی خاک و عملکرد گیاهان زراعی تحت کشت بررسی نشده است، بنابراین اهداف این پژوهش، بررسی کاربرد طولانی مدت فاضلاب شهری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، غلظت کل فلزات سنگین و همینطور اثرات آن بر عملکرد بیولوژیکی گندم (به عنوان گیاه زراعی غالب منطقه) بوده است.

مواد و روش‌ها

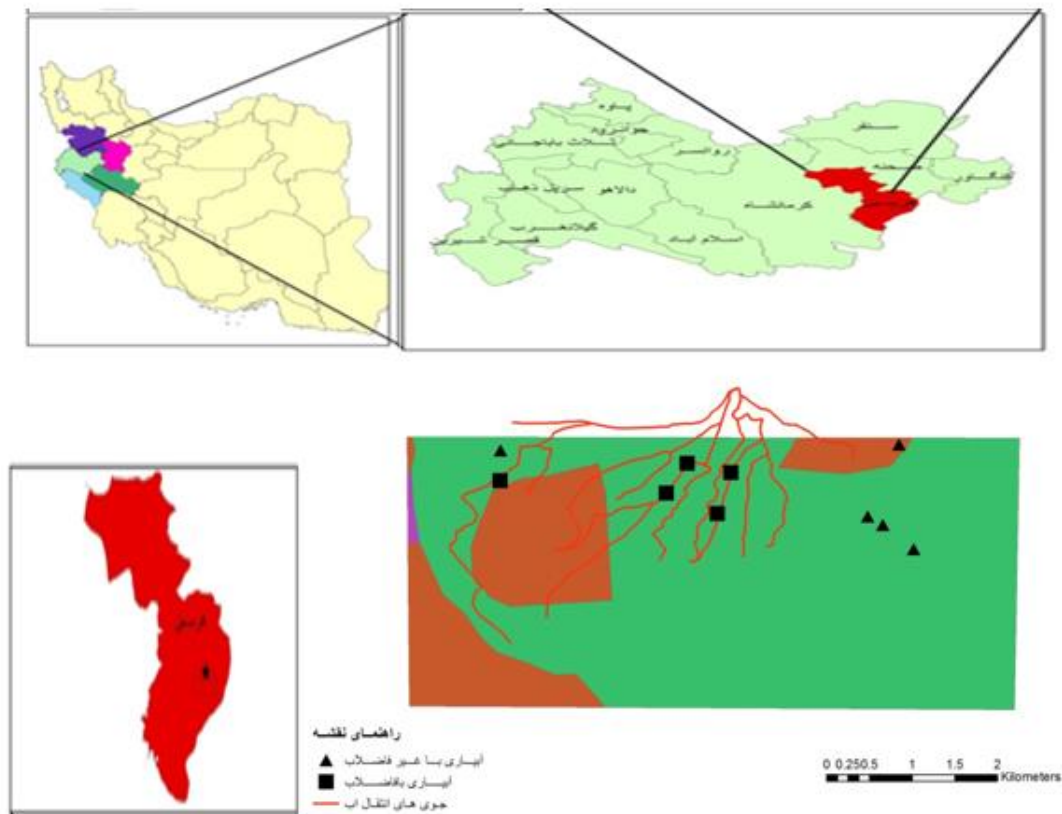
موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شهرستان هرسین با مساحت بیش از هزار کیلو متر مربع در استان کرمانشاه، غرب ایران قرار دارد. بر اساس آمار هواشناسی، دمای متوسط هوا ۱۴/۸ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش سالانه منطقه ۴۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد. مقدار ضریب خشکی دومارتن ۱۶/۲ محاسبه گردید که نشان می‌دهد منطقه در محدوده اقلیمی نیمه خشک واقع شده است.

سراب شهر هرسین به همراه ۱۴ حلقه چاه، منبع اصلی تامین کننده آب شهر است. آب این سراب در پایین دست شهر با فاضلاب خام شهری آمیخته شده (ورود فاضلاب شهری به آب رودخانه سراب)، و به وسیله بخشی از کشاورزان منطقه در زراعت و باغبانی به مصرف می‌رسد. به عبارت دیگر، در بخشی از جنوب این شهر بیش از چند دهه است (از دهه ۵۰ شمسی به

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی نمونه آب چاه و فاضلاب شهری مورد استفاده

تیمار	EC dSm ⁻¹	pH	TDS mgL ⁻¹	SAR	Na mgL ⁻¹	Ca mgL ⁻¹	Mg mgL ⁻¹	HCO ₃ mgL ⁻¹	SO ₄ mgL ⁻¹
آب چاه	۰/۱۱۷	۷/۷	۷۵/۵	۰/۵۰	۰/۳۳	۰/۵۱	۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۲۵
فاضلاب	۰/۶۱۴	۷/۲۸	۳۹۴/۸	۲/۹۷	۳/۲۴	۱/۸۲	۰/۹۴	۳/۴۲	۰/۴۸



شکل ۱ - موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه برداری خاک

در این معادله Igeo شاخص زمین انباشتگی، Cn غلظت فلز در خاک و Bn غلظت فلز در زمینه یا همان غلظت میانگین در پوسته می باشد.

نتایج و بحث

یکی از اهداف اصلی این مطالعه تاثیر کاربرد فاضلاب خام شهری بر برخی شاخص های کیفیت فیزیکی خاک در منطقه هرسین بوده است. کیفیت خاک، توانایی خاک برای حفظ اکوسیستم، نگهداری محیط، رشد گیاه و سلامتی موجودات است، و کیفیت فیزیکی خاک به وسیله ویژگی های فیزیکی آن سنجیده می شود (Logan and Billite, 1998).

ویژگی های فیزیکی خاک مورد مطالعه

بررسی آماری نتایج تجزیه های فیزیکی خاک اراضی آبیاری شده با آب چاه و با فاضلاب شهری در منطقه مورد مطالعه نشان می دهد که میانگین چگالی ظاهری خاک اراضی آبیاری شده با چاه ۱/۴۶ و در اراضی آبیاری شده با فاضلاب شهری ۱/۳۱ g.cm⁻³ بوده است. همینطور، میانگین تخلخل خاک اراضی آبیاری شده با چاه ۴۵ درصد و در اراضی آبیاری شده با فاضلاب شهری ۵۰

جهت تعیین عملکرد بیولوژیکی گندم در ایستگاه های نمونه برداری خاک، مقدار محصول (کل قسمت هوایی) در کرت های به ابعاد ۲×۲ متر مربع برداشت و توزین شده، و بعد بر مبنای کیلوگرم در هکتار محاسبه شد. توضیح اینکه، در این منطقه از گندم آبی رقم پیشگام استفاده می گردد و سطح مدیریتی زارعین در بخش کشاورزی (با توجه به شرایط فرهنگی خاص منطقه)، یکنواخت و یکسان است.

بعد از انجام آزمایشات مختلف بر روی نمونه های آب و خاک، و نیز تعیین عملکرد بیولوژیکی گندم، تجزیه و تحلیل داده ها و ارتباط آماری آنها با یکدیگر با استفاده از نرم افزارهای SPSS و Excel صورت گرفت.

شاخص زمین انباشتگی^۱

شاخص زمین انباشتگی که توسط مولر در سال ۱۹۷۹ معرفی شده است، با استفاده از رابطه زیر در خاک تمام ایستگاه های نمونه برداری محاسبه و تعیین گردید:

$$\text{Igeo} = \text{Log} \left(\frac{C_n}{1.5 \times B_n} \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

1. Geoaccumulation index

خاک و بهبود رشد گیاه، موجب افزایش هدایت هیدرولیکی خاک می‌گردد. به عبارت دیگر، استفاده از فاضلاب به دلیل وجود مقادیر بالای عناصر غذایی و به خصوص فسفر در آن، موجب گسترش سیستم ریشه و افزایش منافذ درشت خاک شده، و این موضوع باعث بیشتر شدن هدایت هیدرولیکی خاک می‌گردد (Yoon and Kwun, 2015).

همچنین، میانگین پایداری خاکدانه‌ها در اراضی آبیاری شده با چاه ۰/۵۸ و در اراضی آبیاری شده با فاضلاب شهری ۰/۸۸ mm بوده است. به عبارتی، مقدار این کمیت در اثر کاربرد فاضلاب شهری بطور معنی‌داری (در سطح ۵ درصد) بیشتر شده است. آبیاری با فاضلاب، با افزایش کربن آلی خاک، موجب پیدایش ساختمان اسفنجی و به موازات آن افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌شود (Aghabraty, et al., 2009). همین‌طور، مواد آلی موجود در فاضلاب پس از افزوده شدن به خاک مورد حمله قارچ‌ها قرار گرفته، و میسیلیوم قارچ‌ها می‌تواند باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها شود.

لازم به ذکر است، بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، اگرچه درصد رطوبت اشباع خاک در اراضی آبیاری شده با فاضلاب شهری بیشتر از زمین‌های آبیاری شده با آب چاه بوده است، اما این ویژگی، از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نداشته است. همین‌طور، اگرچه میانگین درصد ذرات رس در اراضی آبیاری شده با فاضلاب بیشتر از اراضی آبیاری شده با آب چاه است، اما درصد ذرات معدنی دو گروه اراضی از لحاظ آماری تغییر معنی‌داری نداشته است.

درصد است (جدول ۲). این کاهش چگالی ظاهری خاک و افزایش تخلخل در اراضی آبیاری شده با فاضلاب شهری، از لحاظ آماری (در سطح احتمال ۵ درصد) (با توجه به آزمون پارامتری t) معنی‌داری شده است.

کاهش چگالی ظاهری خاک با کاربرد فاضلاب توسط بسیاری از محققین گزارش شده است (Tabari and Salehi, 2009; Yoon and Kwun, 2015). این در حالی است که بعضی از محققین، برخلاف دیگران، ضمن بیان افزایش چگالی ظاهری خاک در اثر کاربرد فاضلاب، علت مسئله را گرفتگی منافذ توسط ذرات معلق موجود در فاضلاب و در نتیجه کاهش تخلخل خاک اعلام کرده‌اند (Mathan, 1994). آبیاری با فاضلاب، به علت نقشی که در افزایش مواد آلی خاک دارد، می‌تواند در بهبود ساختمان خاک و کاهش چگالی ظاهری موثر باشد. البته، بهبود شرایط رشد گیاه و توسعه سیستم ریشه‌ای، و نیز ترشحات آلی ریشه در این قضیه موثر بوده است (Mojiri and Abdul Aziz., 2011).

از طرفی، میانگین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک اراضی آبیاری شده با آب چاه و با فاضلاب به ترتیب ۱/۴۰ و ۲/۳۶ cm.h^{-1} است. به عبارت دیگر، افزایش هدایت هیدرولیکی اشباع در اراضی آبیاری شده با فاضلاب شهری از لحاظ آماری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است. طبیعتاً افزایش ماده آلی خاک و تقویت فرایند خاکدانه‌سازی در اراضی آبیاری شده با فاضلاب، موجب افزایش هدایت هیدرولیکی خاک می‌شود (Razzaghi, et al., 2015). همین‌طور، افزایش کیفیت فیزیکی

جدول ۲- چکیده آماری ویژگی‌های خاک اراضی آبیاری شده با آب چاه و با فاضلاب در منطقه مورد مطالعه

متغیر (ویژگی خاک)	اراضی تحت آبیاری با آب چاه			اراضی تحت آبیاری با فاضلاب			
	میانگین	کمینه	بیشینه	انحراف معیار	میانگین	کمینه	بیشینه
چگالی ظاهری (g.cm^{-3})	۱/۴۶	۱/۳۵	۱/۵۴	۰/۰۷	۱/۳۱	۱/۲۷	۱/۳۵
تخلخل (%)	۴۵/۰	۴۲/۰	۴۹/۰	۰/۰۲	۵۱/۰	۴۹/۰	۵۲/۰
هدایت هیدرولیکی اشباع (cm.h^{-1})	۱/۴۱	۱/۱۲	۱/۶۱	۰/۱۹	۲/۳۷	۱/۵۶	۳/۱۹
رطوبت اشباع (%)	۵۴/۴	۵۰/۳	۵۷/۴	۳/۱۰	۵۷/۶	۵۲/۹	۶۰/۸
شن (%)	۴۰/۰	۳۲/۸	۵۱/۲	۸/۱۰	۳۱/۹	۲۰/۵	۵۰/۰
سیلت (%)	۴۹/۸	۴۵/۰	۵۴/۲	۶/۵۶	۵۲/۷	۳۴/۵	۶۳/۴
رس (%)	۱۰/۱	۳/۸	۱۳/۴	۵/۶۸	۱۵/۳	۶/۶	۲۲/۰
پایداری خاکدانه‌ها (mm)	۰/۵۸	۰/۴۰	۰/۸۰	۰/۱۲	۰/۸۸	۰/۵۰	۱/۱۰
pH	۷/۶۲	۷/۴۰	۷/۷۰	۰/۱۳	۷/۵۲	۷/۳۰	۷/۶۰
EC (dS.m^{-1})	۰/۲۸۹	۰/۲۳۴	۰/۳۵۲	۰/۴۹	۰/۴۶۵	۰/۳۷۳	۰/۵۷۸
کربن آلی (%)	۰/۶۰	۰/۵۶	۰/۶۶	۰/۲۶	۰/۹۹	۰/۶۸	۱/۳۹

حاصلخیزی خاک داشته باشند (Kilbride, 2006). به عبارت دیگر، مواد غذایی موجود در فاضلاب می‌تواند نیاز گیاهان به کودهای شیمیایی را کاهش دهد (Metcalf, 2003).

از طرف دیگر، میزان pH فاضلاب شهری منطقه مورد مطالعه کمتر از آب چاه کاربردی است. از آنجا که فاضلاب شهری علاوه بر مواد معدنی، دارای مخلوطی از مواد معلق آلی است (Metcalf, 2003)، تجزیه شیمیایی یا بیولوژیکی ترکیبات آلی فاضلاب، موجب تولید یک سری اسیدهای آلی، و کاهش اسیدیته می‌گردد (Mathan, 1994). این یافته‌ها با نتایج تحقیقات دیگر محققین مطابقت کامل دارد (Mojiri and Abdul Aziz., 2011, Salehi, et al., 2008).

همچنین، مقایسه میانگین غلظت کل فلزات سنگین نمونه آب چاه و فاضلاب مورد استفاده در آبیاری مزارع منطقه (با استفاده از آزمون پارامتری t) نشان می‌دهد که مقدار کل فلزات سنگین در نمونه فاضلاب به طور معنی‌داری بیشتر از آب چاه است (جدول ۳). به عبارت دیگر، فاضلاب شهری دارای مقدار قابل توجهی فلزات سنگین است (Manh Khai., 2008, Zeid, et al., 2013).

ویژگی‌های شیمیایی و غلظت کل فلزات سنگین نمونه های آب چاه و فاضلاب شهری

ارزیابی نتایج ویژگی‌های آب چاه و فاضلاب منطقه مورد مطالعه بیانگر این است که غلظت تمام کاتیونها و آنیونها اندازه گیری شده (Na، Mg، Ca، SO₄ و HCO₃) در نمونه فاضلاب شهری بیش از آب چاه مورد استفاده بوده است (جدول ۱). به عبارت دیگر، فاضلاب حاصل از مصرف آب در زندگی روزمره انسان (فاضلاب شهری) دارای مخلوطی از مواد معدنی بوده (Metcalf, 2003) که تجزیه شیمیایی (انحلال) آنها باعث تولید یون های مختلف (کاتیون ها و آنیون ها) می‌گردد. به عبارت دیگر، فاضلاب شهری دارای مقادیر زیادی یونهای مختلف از قبیل سدیم، کلسیم و منیزیم است (Mojiri, et al., 2011). از آنجا که TDS نیز بیانگر غلظت کل املاح محلول در آب است (و با EC ارتباط مستقیم دارد)، و همینطور، SAR بیانگر نسبت جذبی سدیم است، لذا مقادیر این پارامترها نیز در فاضلاب شهری بیش از آب چاه بوده است.

البته، بیشتر یونهای موجود در فاضلاب شهری، از قبیل کلسیم، منیزیم، نیتروژن و فسفر، جزء مواد مغذی مورد نیاز گیاهان بوده، که می‌تواند اثرات مثبتی بر عملکرد گیاهان و

جدول ۳- مقایسه میانگین غلظت کل فلزات سنگین (mg.l⁻¹) در نمونه آب چاه و فاضلاب شهری

تیمار آبیاری	کروم	آهن	نیکل	روی	سرب
آب چاه	۰/۱۳	۰/۲۷	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۳۴
فاضلاب	۰/۲۱	۰/۹۱	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۹۱
مقدار مجاز (آبیاری)	۱	۳	۲	۲	۱

اراضی تحت آبیاری فاضلاب حدود ۳۸ تا ۷۹ درصد بیش‌تر از اراضی تحت آبیاری با آب چاه بوده است.

همچنین، نتایج نشان می‌دهد که میانگین واکنش خاک (pH) اراضی آبیاری شده با چاه و با فاضلاب شهری به ترتیب ۷/۶۲ و ۷/۵۲ است. به عبارتی، نتایج بیانگر کاهش مقدار این کمیت در اثر کاربرد فاضلاب شهری است. اضافه شدن ماده آلی به خاک در اثر کاربرد فاضلاب شهری و سپس انجام تجزیه میکروبی آن، منجر به تولید اسیدهای آلی و کاهش pH می‌شود (Mathan, 1994). البته با توجه به آهکی بودن اراضی منطقه مورد مطالعه، این کاهش pH خاک اراضی از لحاظ آماری معنی داری نبوده است. توضیح اینکه درصد آهک اراضی مورد مطالعه بین ۱۵-۲۶ درصد متغیر بوده است. بر طبق یک گزارش، pH خاک اراضی آبیاری شده با فاضلاب بطور متوسط ۰/۴ واحد کمتر از اراضی آبیاری شده با آب چاه بوده است (Rattan, et al., 2005).

ویژگی‌های شیمیایی خاک ایستگاه‌های نمونه‌برداری

بررسی آماری نتایج تجزیه های شیمیایی خاک اراضی آبیاری شده با آب چاه و با فاضلاب شهری در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که میانگین کربن آلی خاک اراضی آبیاری شده با فاضلاب شهری ۰/۳۹ واحد بیشتر از اراضی آبیاری شده با آب چاه است (۰/۶۰ در مقابل ۰/۹۹ درصد) (جدول ۲). این افزایش از لحاظ آماری نیز (در سطح ۵٪) معنی داری بوده است (با توجه به آزمون پارامتری t). از آنجا که نتایج تجزیه شیمیایی نمونه فاضلاب کاربردی نشان دهنده وجود مقادیر متناهی مواد آلی در فاضلاب شهری است (جدول ۲)، طبیعتاً کاربرد این فاضلاب به عنوان آب آبیاری در اراضی کشاورزی موجب افزایش درصد کربن آلی خاک منطقه شده است. Rattan, et al., 2005 نیز در بررسی کاربرد دراز مدت فاضلاب به عنوان آب آبیاری در اراضی دهلی هند گزارش کرده اند که میزان کربن آلی خاک در

فاضلاب شهری است (جدول ۴). غلظت نسبتاً بالای فلزات سنگین در نمونه فاضلاب های مورد استفاده در منطقه مطالعاتی (جدول ۳)، همراه با استفاده طولانی مدت (به مدت چندین دهه) از فاضلاب به عنوان آب آبیاری در اراضی می تواند سبب افزایش قابل ملاحظه فلزات سنگین در خاک شود. مشابه این نتیجه توسط محققین زیادی گزارش شده است (Rana, et al., Parsafar, and Marofi, Manh Khai, et al., 2008, 2010 (2013).

شاخص زمین انباشتگی

شاخص زمین انباشتگی مولر بیانگر درجه آلاینده‌گی در یک منطقه است. در منطقه مورد مطالعه، بیشترین میزان این شاخص مربوط به فلز سرب و کمترین میزان آن به آهن تعلق دارد. به عبارت دیگر، با توجه به شاخص زمین انباشتگی مولر، تمام مناطق مورد مطالعه (۱۰ ایستگاه نمونه برداری)، از نظر آلودگی به عناصر کروم، نیکل، روی و آهن غیرآلوده بوده و فقط از نظر سرب، درجه آلودگی خاک ایستگاهها کمی آلوده (مناطق تحت آبیاری با چاه) تا خیلی آلوده (مناطق تحت آبیاری با فاضلاب شهری) است.

همینطور، میانگین قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC) اراضی آبیاری شده با چاه و با فاضلاب شهری به ترتیب ۰/۲۸۹ و ۰/۴۶۵ dS.m⁻¹ است. به عبارتی، نتایج بیانگر افزایش مقدار این کمیته در اثر کاربرد فاضلاب شهری بوده و این افزایش از لحاظ آماری (در سطح ۵٪) معنی دار بوده است. طبیعتاً وجود املاح فراوان در فاضلاب شهری (با توجه به جدول ۲) و اضافه شدن آنها در طول زمان به خاک، باعث افزایش هدایت الکتریکی خاک شده است. در تحقیقات انجام شده در یک مزرعه گندم در جنوب تهران نیز مشخص شده است که آبیاری با فاضلاب شهری پس از ۲۹ سال، pH خاک را کاهش ولی مواد آلی و EC خاک را افزایش داده است (Molahoseini, 2014).

غلظت کل فلزات سنگین خاک

بررسی اجمالی چکیده آماری غلظت کل فلزات سنگین نشان می دهد که میانگین غلظت تمام فلزات سنگین مورد بررسی (کروم، آهن، نیکل، روی و سرب) در اراضی آبیاری شده با فاضلاب در مقایسه با اراضی آبیاری شده با چاه بیشتر بوده است، هر چند نتایج آزمون پارامتری t بیانگر افزایش معنی داری غلظت فقط بعضی از فلزات سنگین (روی و آهن) در اثر کاربرد

جدول ۴- چکیده آماری غلظت کل فلزات سنگین (mg.l⁻¹) اراضی آبیاری شده با آب چاه و با فاضلاب

متغیر	آب چاه		فاضلاب	
	میانگین	کمینه	میانگین	کمینه
کروم	۸۳/۹	۷۰/۱	۹۱/۳	۷۶/۸
آهن	۱۴۱۷/۵	۱۰۱۸/۵	۱۹۰۸/۸	۱۴۷۸/۳
نیکل	۵۸/۰	۴۳/۲	۷۲/۸	۵۵/۸
روی	۴۷/۷	۳۵/۵	۶۶/۴	۵۵/۳
سرب	۸۳/۴	۶۰/۳	۹۴/۸	۸۸/۶
انحراف معیار				
کروم	۱۳/۹۵	۱۰۴/۵	۱۱/۸۸	۱۰۶/۷
آهن	۳۷۲/۸	۱۸۲۷/۸	۲۹۲/۰	۲۱۶۵/۳
نیکل	۱۱/۹۴	۷۰/۶	۱۰/۳۴	۸۱/۷
روی	۱۲/۹۱	۶۹/۷	۱۲/۰۰	۸۵/۲
سرب	۱۶/۳۸	۱۰۵/۹		۱۰۱/۱

همینطور، مواد غذایی موجود در فاضلاب، و یا عناصر مغذی حاصل از تجزیه مواد آلی موجود در آن، در اختیار گیاه قرار گرفته و در نتیجه باعث افزایش رشد و عملکرد گیاه می شوند. از طرف دیگر، در اثر تجزیه مواد آلی و تولید اسیدهای آلی، برخی از مواد غذایی نامحلول، به صورت محلول و قابل جذب گیاه در می آید (Logan, and Billite, 1998). افزایش عملکرد محصولات کشاورزی در اثر کاربرد فاضلاب در اراضی به وسیله بسیاری از دیگر محققین گزارش شده است (Ghanbari, et al., 2006; Alizadeh, et al., 2001).

مقایسه عملکرد بیولوژیکی گندم در ایستگاههای نمونه برداری خاک

مقایسه میانگین ها نشان می دهد که میانگین عملکرد بیولوژیک گندم در اراضی آبیاری شده با فاضلاب شهری تقریباً ۲۲/۵ تن در هکتار و در اراضی آبیاری شده با آب چاه ۱۷/۸ تن در هکتار بوده است. این تفاوت از لحاظ آماری در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار شده است (جدول ۵). کاربرد فاضلاب، به دلیل دارا بودن مقادیر بالایی ماده آلی، باعث بهبود کیفیت فیزیکی خاک شده و لذا می تواند در افزایش عملکرد موثر باشد.

جدول ۵- چکیده آماری میزان عملکرد بیولوژیک گندم (kg/ha)

تیمار آبیاری	میانگین عملکرد	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
آب چاه	۱۷۷۸۴	۲۸۵/۰	۱۷۴۰۰	۱۸۲۰۰
فاضلاب	۲۲۴۴۸	۵۵۹/۵	۲۱۸۰۰	۲۳۲۰۰

نتیجه گیری کلی

فاضلاب شهری با اضافه شدن مواد آلی به خاک، موجب بهبود ساختمان خاک (تقویت خاکدانه ها)، و نیز باعث افزایش تخلخل و کاهش چگالی ظاهری خاک می گردد. همینطور کاربرد فاضلاب شهری بر سایر ویژگی های فیزیکی خاک شامل: ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع، پایداری خاکدانه ها و رطوبت اشباع خاک تاثیرگذار بوده، و به عبارتی، آبیاری با فاضلاب شهری موجب افزایش مقدار این ویژگی ها شده است. این نتایج بیانگر بهبود کیفیت فیزیکی خاک با کاربرد فاضلاب شهری بوده، و می تواند دلیلی باشد که چرا آبیاری با فاضلاب شهری در افزایش عملکرد بیولوژیک گندم موثر بوده است.

همینطور آبیاری با فاضلاب شهری بر ویژگی های شیمیایی خاک مثل pH و EC تاثیرگذار بوده، و به عبارتی، باعث افزایش جزئی EC و یا کاهش pH خاک شده است. البته در این شرایط (کاربرد فاضلاب)، غلظت کل بعضی از فلزات سنگین خاک نیز افزایش یافته است. بنابراین، استفاده از فاضلاب شهری باید بر پایه یک مدیریت صحیح، و رعایت استانداردهای زیست محیطی صورت گیرد. به عبارت دیگر، اگرچه فاضلاب شهری به دلیل داشتن مواد آلی و عناصر مغذی می تواند موجب بهبود کیفیت فیزیکی خاک (از طریق اصلاح

خواص فیزیکی آن)، شود، که به طبع آن، عملکرد محصولات کشاورزی نیز افزایش می یابد، اما توجه به آثار زیست محیطی این عملیات، از قبیل تجمع نسبی عناصر سنگین در خاک و امکان ورود این فلزات به چرخه زیستی و زنجیره غذایی بشر بایستی مورد نظر قرار گیرد. به عبارت دیگر، توصیه می شود در تحقیقات دیگر، خصوصیات کیفی و محدودیتهای کشت با فاضلاب خام به طور دقیق بررسی شود.

در مجموع، با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، به نظر می رسد که کاربرد فاضلاب شهری در اراضی آهکی (که پتانسیل بافری بالایی داشته و می تواند قابلیت جذب فلزات سنگین توسط گیاهان را تا حدودی خنثی نماید)، و در مناطق خشک و نیمه خشک کشور (با محدودیت شدید کمبود آب)، در افزایش عملکرد بعضی از محصولات خاص (مثل گندم که به طور خام مصرف نمی شوند) مفید واقع گردد. البته، در این راستا بایستی به مباحث مدیریتی آب و خاک در اراضی توجه کافی معطوف گردد، تا ضمن حذف املاح محلول و فلزات سنگین از منطقه توسعه ریشه، کیفیت خاک حفظ گردد. در آخر با توجه به اینکه این تحقیق بیشتر از لحاظ کمی به موضوع کاربرد فاضلاب پرداخته است، توصیه شود در تحقیقات بعدی، خصوصیات کیفی و محدودیتهای کشت با فاضلاب خام بررسی شود.

REFERENCES

- Abedi-Koupai, J., Afyuni, M. Mousavi, S.F. Mostafazadeh, B. and Bagheri, M.R. (2003). The effect of sprinkler and surface irrigation with treated wastewater on soil salinity. *Journal of Water & Wastewater*, 45, 212-218.
- Aghabraty, A., Hosseini S. Ismaili, A. and Maralian, H. (2009). Effect of irrigation with wastewater on soil physico-chemical properties, nutrients and Cd accumulation in olive. *Journal of Environmental Sciences*, 3, 32-41 (In Farsi).
- Alizadeh, A., Bazari, E. Velayati, S. Hashemina, M and Yaghmaie, A. (2001). Irrigation of corn with waste water. Pp. 147-154.
- Ehsani, M., and Khalidi H. (2006). Understanding and improving agricultural water supply water and food security of the country. 11th Committee on Irrigation and Drainage Conference, (pp. 657-674). Tehran, Iran (In Farsi).
- Ghanbari, A., Abedi Koupai, S. and Talaei, J. (2006). Effect of irrigation with wastewater on yield of wheat and some soil properties in the Sistan. *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, 4, 45-51.
- IWMI, (2000) World Water Supply and Demand: 1990 to 2025. International Water Management Institute. (p. 789). Colombo, Sri Lanka.
- Logan, T. J., and Billite, J. (1998). Field response of soil physical properties to sewage sludge. *Journal of Environmental Quality*, 27,534-542.
- Kilbride, C., (2006). Application of sewage sludge and composts, Note 6 BPG (Best Practice Guidance for land regeneration), forest research, The Land Regeneration and Urban Greening Research Group.
- Kibria, M.G., and Alamgir, M. (2012). Influence of waste water irrigation on heavy metal accumulation in soil and plant. *International Journal of Applied and Natural Sciences*, 1 (1), 43-54.

- Manh Khai, N., Tuan, P.T. and Cong Vinh, N. (2008). Effects of using wastewater as nutrient sources on soil chemical properties in periurban agricultural systems. *Journal of Earth Sciences*, 24, 87-95.
- Mathan, K.K., (1994). Studies of the influence of long-term municipal sewage-effluent irrigation on soil physical properties. *Bioresource Technology*, 48(3), 275-276.
- Metcalf, E., (2003). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Forth Edition, McGraw Hill.
- Mojiri, A., and Abdul Aziz, H. (2011). Effects of municipal wastewater on accumulation of heavy metals in soil and wheat (*triticum aestivum* L.) with two irrigation methods. *Romanian Agricultural Research*, 28, 217-222.
- Molahoseini, H., (2014). Long-term effects of municipal wastewater irrigation on some properties of a semiarid region soil of Iran. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 3, 444-449.
- Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. (1996) *Methods of Soil Analysis, Part 2*, (pp. 831- 872). Soil Sci. Soc. Am, Madison, Wisconsin.
- Panahpoor, E., Afyuni, M. Homae, M. and Hoodaji, M. (2008). Cd, Cr, and Co motion in soil treated with sewage sludge and salts of the metals and their uptake by vegetable crops case study in east Isfahan. *Journal of Water and Wastewater*, 67, 9-17.
- Parsafar, N., and Marofi, S. (2013). The impact of wastewater on the accumulation of heavy metals in soil under greenhouse conditions. *Journal of Agriculture Water Research*, 27, 89-95 (In Farsi).
- Rana, L., Dhankhar, and R. Chhikara, A. (2010). Soil characteristics affected by long-term application of sewage wastewater. *International Journal of Environmental Research*, 4(3), 513-518.
- Rattan, R.K., Datta, S.P. Chhonkar, P.K. Suribabu, K. and Singh, A.K. (2005). Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 109, 310-322.
- Razzaghi, S., Khodaverdiloo, H. and Ghorbani Dashtaki, S.H. (2015). Long-term wastewater irrigation on physical properties and performance of selected infiltration model in semiarid region. *Hydrological Sciences Journal*, 15, 181-193.
- Rice, E. W., Baird, R. B. Eaton, A. and Clesceri, D. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (22 Ed), Am. Public Health Association, Washington, DC.
- Salehi, A., Tabari, M. Mohammadi, J. and Ali Arab, A. (2008). Effect of irrigation with wastewater on the soil and the growth of pine trees Tehran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 16(2), 196-186 (In Farsi).
- Shahriari, A., Noori, F. Abedi Koupai, J. and Asaleh, F. (2010). Effect of irrigation with treated municipal wastewater on plant growth under greenhouse conditions. *Greenhouse Culture Science and Technology*, 4, 13 -21 (In Farsi).
- Soroush, F., Mousavi, F. Razmjoo, K.H. and Mostafazadeh-Fard, B. (2008). Effect of treated wastewater on uptake of some elements by Turf grass in different soil textures. *Journal of Water and Soil*, 22, 285-294.
- Tabari, M., and Salehi, A. (2009). The use of municipal wastewater in afforestation: effects on soil properties and yield of Pine trees. *Polish Journal of Environment Study*, 18, 1113-1121.
- Tqvaean, P., Alizadeh, A. and Danesh, S. (2007). The effect of the application of wastewater irrigation on soil chemical and physical properties and characteristics. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 1: 49-61 (In Farsi)
- Yoon, G., and Kwun S. K. (2015). Feasibility study of reclaimed wastewater irrigation to paddy rice culture in Korea. In: Ragab R, perace G, Changkim J, Nairizi S, Hamdy A. (Eds.), (pp. 42-43). ICID International Work shop on wastewater.
- Zeid, I.M., Ghazi, S.M., Nabawy D.M. (2013). Alleviation of heavy metals toxicity in waste water used for plant irrigation. *International journal of Agronomy and Plant Production*, 4: 976-983.