چهارمین کنفرانس بین المللی دانشجویان
علوم خاک و آب
4th International Conference of
Soil and Water
Science Students
www.gw.cdsts.ir

تحلیل رفتار هیدرولیکی قطعات سفالی متخلخل اصلاح‌شده با اکسیدهای مس و روی در سیستم آبیاری زیرسطحی

زینب فلاح[*۱]، حسینعلی بهرامی [۲]، دکتر حجت قربانی واقعی [۳]، آرزو حسین‌پور [۴]

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد فیزیک حفاظت خاک دانشگاه تربیت‌مدرس Z.Fallah761222@gmail.com

۲- استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت‌مدرس bahramih@modares.ac.ir

۳- استاد دانشکده کشاورزی گنبد کاووس ghorbani169@yahoo.com

۴- دانشجوی کارشناسی‌ارشد فیزیک حفاظت خاک دانشگاه تربیت‌مدرس hosseinpoorarezoo@gmail.com

خلاصه

آبیاری زیرسطحی به‌عنوان یکی از روش‌های نوین بهینه آبیاری به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در آبیاری زیرسطحی، نازل‌ها نقش کلیدی در تعیین رفتار جریان، یکنواختی توزیع و عملکرد سیستم دارند. بدین منظور در این پژوهش اثر غلظت‌های ادغام‌شده اکسید مس و روی بر رفتار هیدرولیکی قطعات سفالی زیرسطحی بررسی شد. تیمارها شامل سطوح مختلف غلظت‌های اکسید روی و مس شامل کنترل (مس ۰ و روی ۰)، روی ۵۰۰۰ و مس صفر پی‌پی‌ام، روی ۵۰۰۰ و مس ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO5-ZnO5)، روی ۵۰۰۰ و مس ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO10-ZnO5)، روی ۵۰۰۰ و مس ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO15-ZnO5)، روی ۵۰۰۰ و مس ۲۰۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO20-ZnO5) و روی ۵۰۰۰ و مس ۳۰۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO30-ZnO5) است. فاکتورهای اندازه‌گیری شامل تخلخل و دبی قطعات در سه ارتفاع ۱، ۳ و ۵ متر بود. نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین نشان داد که غلظت‌های مختلف اکسید مس و روی تأثیر معنی‌داری بر تخلخل قطعات سفالی نداشتند. در مقابل، دبی خروجی به طور معنی‌داری تحت‌تأثیر غلظت‌های اکسیدهای فلزی، ارتفاع قرارگیری و اثر متقابل این دو عامل قرار گرفت. به‌طوری که بیشترین دبی مربوط به تیمار با غلظت روی ۵۰۰۰ و مس ۱۵۰۰۰ (CuO15-ZnO5) و ارتفاع ۵ متر با میانگین ۸۶/۴۳ میلی‌لیتر بر ساعت بود که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد داشت. به‌طورکلی، نتایج این تحقیق نشان داد که کنترل دبی خروجی در قطعات سفالی آبیاری زیرسطحی صرفاً تابع تخلخل کل نبوده و تعامل بین ترکیب مواد افزودنی و شرایط بهره‌برداری از جمله **فشار آب** (تغییر ارتفاع) نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد هیدرولیکی این قطعات دارد

کلمات کلیدی: آبیاری زیرسطحی، قطعات سفالی متخلخل، اکسید مس، اکسید روی، ویژگی‌های هیدرولیکی

۱. مقدمه

با افزایش فشار بر منابع آب شیرین در جهان و تشدید پیامدهای تغییر اقلیم، بهبود بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی به یکی از اولویت‌های اساسی در مدیریت منابع آب تبدیل شده است. در این میان، روش‌های نوین آبیاری که منجر به کاهش تلفات آب و افزایش راندمان مصرف می‌شوند، توجه پژوهشگران و مدیران بخش کشاورزی را به خود جلب کرده‌اند (۱) (۲) (۳) (۴). آبیاری زیرسطحی به‌عنوان یکی از روش‌های نوین بهینه آبیاری شناخته می‌شود که با کاهش تبخیر سطحی، انتقال مستقیم آب به ناحیه ریشه و توزیع یکنواخت‌تر رطوبت در خاک، موجب افزایش راندمان مصرف آب و عملکرد گیاه می‌گردد. این روش به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که منابع آب محدود هستند، پتانسیل بالایی برای افزایش بهره‌وری مصرف آب دارد (۵) (۶) (۴). در آبیاری زیرسطحی، نازل‌ها یا توزیع‌کننده‌های جریان آب نقش کلیدی در تعیین رفتار جریان، یکنواختی توزیع و عملکرد سیستم ایفا می‌کنند (۷). یکی از فناوری‌های امیدوارکننده در این زمینه، استفاده از نازل‌های سفالی متخلخل یا سرامیکی است که به دلیل ساختار متخلخل خود، امکان خروج آب به‌صورت آرام و یکنواخت را فراهم می‌کنند. این نوع نازل‌ها بر اساس حرکت مویرگی و تراوش تدریجی آب عمل می‌کنند و در نتیجه می‌توانند با مصرف انرژی کمتر و کاهش گرفتگی، عملکرد بهتری ارائه دهند (۸) (۹) (۱۰). روند تحقیق در زمینه نازل‌های سرامیکی متخلخل برای آبیاری زیرسطحی نشان داده است که ساختار میکرو پوری و تخلخل داخلی این مواد به طور مستقیم بر نفوذپذیری و الگوی جریان آب تأثیر می‌گذارد. مطالعات اخیر با بهره‌گیری از تکنیک‌های تصویربرداری و مدل‌سازی سه‌بعدی نشان داده‌اند که توزیع و اندازه منافذ می‌تواند مسیرهای جریان را شکل داده و میزان دبی خروجی را تعیین کند، چیزی که برای طراحی بهینه این نازل‌ها اهمیت زیادی دارد (۱۱). تحقیقات تجربی و شبیه‌سازی نیز نشان داده‌اند که پارامترهای طراحی مانند هد آب (water head)و خصوصیات خاک اطراف نازل می‌توانند به طور قابل‌توجهی رفتار خروجی آب را تحت‌تأثیر قرار دهند؛ برای مثال، دبی و پخش رطوبت در خاک به فشار کاری نازل* و بافت خاک وابسته است و این پارامترها باید برای شرایط خاص مزرعه‌ای بهینه شوند (۱۲) (۱۳) یکی دیگر از دغدغه‌های مهندسی در کاربرد عملی این نازل‌ها، گرفتگی منافذ و کاهش دبی خروجی در طول زمان است؛ تحقیقات نشان داده‌اند که گرفتگی منافذ ناشی از تجمع مواد و رسوبات در مسیر آب می‌تواند عملکرد نازل‌های سرامیکی را کاهش دهد و برای مدیریت بهتر این پدیده باید راهکارهای فنی و طراحی مناسبی ارائه شود (۱۴) باوجود توسعه فناوری نازل‌ها و قطعات سفالی متخلخل و کاربرد موفق آن‌ها در سیستم‌های آبیاری زیرسطحی، بررسی دقیق اثر اصلاح ساختار این قطعات با افزودنی‌هایی نظیر اکسید مس (CuO) و اکسید روی (ZnO) بر رفتار هیدرولیکی آن‌ها همچنان نیازمند مطالعات بیشتری است. افزودن اکسیدهای فلزی می‌تواند منجر به تغییر در تخلخل کل، اندازه و توزیع منافذ و ریزساختار داخلی قطعات سفالی شده و در نتیجه، نفوذپذیری و الگوی جریان آب در ساختار متخلخل را تحت‌تأثیر قرار دهد .(۱۵) مطالعات مروری اخیر نشان داده‌اند که اصلاح ریزساختار سرامیک‌های متخلخل از طریق افزودنی‌های معدنی، یکی از عوامل کلیدی در کنترل دبی خروجی و پایداری عملکرد هیدرولیکی نازل‌های سرامیکی در سیستم‌های آبیاری زیرسطحی است .(۸) همچنین گزارش شده است که تغییر ویژگی‌های ساختاری قطعات سفالی متخلخل می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد هیدرولیکی این نازل‌ها، به‌ویژه در شرایط فشار پایین، داشته باشد .(۱۲) آگاهی از این اثرات می‌تواند زمینه‌ساز طراحی بهینه نازل‌های سرامیکی، بهبود عملکرد هیدرولیکی و افزایش پایداری سیستم‌های آبیاری زیرسطحی شود.

بنابراین، هدف این پژوهش تحلیل رفتار هیدرولیکی قطعات سفالی متخلخل اصلاح‌شده با اکسیدهای فلزی در سیستم آبیاری زیرسطحی است، به‌گونه‌ای که اثر افزودن مواد اصلاح‌کننده بر دبی خروجی، الگوی پخش آب و رفتار جریان در مقایسه با نمونه‌های شاهد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

---

* Operating Pressure of the Nozzle : فشار کاری نازل، فشار هیدرواستاتیکی آب داخل نازل است که خروج آب را کنترل می‌کند.

۲. مواد و روش

آماده‌سازی قطعات سفالی متخلخل با پوشش اکسید روی و مس

در این پژوهش، قطعات سفالی متخلخل مورداستفاده برای سیستم آبیاری زیرسطحی از کارگاه ساخت قطعات سفالی آب بانک تهیه و در آزمایشگاه مورداستفاده قرار گرفتند. ترکیب مواد اولیه شامل ۹۰ درصد وزنی رس کائولینیت و ۱۰ درصد وزنی پودر شیشه بود. دمای نهایی پخت ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد بود. به‌منظور تثبیت مس و روی در قطعات، سولفات مس پنتاهیدرات ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) و سولفات روی هپتاهیدرات ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) با گرید Extra Pure (شرکت دکتر مجللی) به ترتیب به‌عنوان منبع یون‌های مس و روی استفاده شدند و با غلظت‌های مختلف: کنترل (CuO0–ZnO0)، روی ۵۰۰۰ و مس صفر پی‌پی‌ام (CuO0–ZnO5)، روی ۵۰۰۰ و مس ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO5–ZnO5)، روی ۵۰۰۰ و مس ۱۰۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO10–ZnO5)، روی ۵۰۰۰ و مس ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO15–ZnO5)، روی ۵۰۰۰ و مس ۲۰۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO20–ZnO5) و روی ۵۰۰۰ و مس ۳۰۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO30–ZnO5) به مدت یک شبانه‌روز قرار گرفتند تا سطح قطعات با یک‌لایه نازک ترکیبات مس و روی پوشش داده شود. پس از این مرحله، نمونه‌ها از محلول خارج شده و پس از خشک‌شدن اولیه در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد، تحت فرایند پخت ثانویه قرار گرفتند. پخت ثانویه نمونه‌ها در کوره الکتریکی و در دمای ۷۳۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. این مرحله باهدف تثبیت لایه ایجادشده بر سطح قطعات سفالی و افزایش چسبندگی آن به بستر سفالی صورت گرفت. پس از اتمام پخت، نمونه‌ها به‌صورت تدریجی تا دمای محیط سرد شدند.

اندازه‌گیری تخلخل با روش پارافین

درصد تخلخل کل نمونه‌ها در سه تکرار با استفاده از روش پارافین (Paraffin Impregnation Method) تعیین شد. در این روش نمونه‌ها از نظر ترک یا شکستگی بررسی و با الکل ایزوپروپیل تمیز شدند. نمونه‌ها به مدت مشخصی در پارافین مایع غوطه‌ور شدند تا تمامی منافذ باز پر شوند. سپس وزن نمونه‌ها قبل و بعد از غوطه‌ورشدن به ترتیب به‌عنوان W1 و W2 ثبت شد. در نهایت درصد تخلخل با فرمول ۱ محاسبه شد:

فرمول ۱:

$$P = \frac{(W1 - W2)}{\rho w \times V} \times 100$$

که در آن W1 وزن اولیه نمونه، W2 وزن نمونه پس از غوطه‌وری در پارافین، ρw چگالی پارافین و V حجم کل نمونه است.

آزمون‌های هیدرولیکی و محاسبه دبی خروجی

به‌منظور بررسی رفتار هیدرولیکی قطعات سفالی متخلخل، آزمون‌های هیدرولیکی در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی انجام شد. برای این منظور، قطعات سفالی به‌صورت مجزا در یک سامانه آزمایشگاهی شبیه‌سازی‌شده آبیاری زیرسطحی نصب

شدند. سامانه شامل مخزن تأمین آب، لوله‌های رابط و محل نصب قطعه سفالی بود به‌گونه‌ای که جریان آب تنها از طریق قطعه متخلخل برقرار می‌شد. آزمون‌ها تحت‌فشار هیدرولیکی ثابت در سه ارتفاع ۱، ۳ و ۵ متر انجام شدند که فشار اعمالی با استفاده از اختلاف ارتفاع ستون آب تنظیم و کنترل گردید. پس از رسیدن جریان به حالت پایدار، آب خروجی از قطعه سفالی در بازه‌های زمانی ۱ ساعت جمع‌آوری شد. حجم آب جمع‌آوری‌شده با استفاده از استوانه مدرج اندازه‌گیری و زمان جمع‌آوری با کرونومتر ثبت شد. دبی خروجی قطعات سفالی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردید:

فرمول ۲:

$$Q = \frac{V}{t}$$

که در آن:

Q دبی خروجی (میلی‌لیتر بر ساعت)، V حجم آب جمع‌آوری‌شده (میلی‌لیتر)، t زمان جمع‌آوری (ساعت) است.

در نهایت تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی (تخلخل) و طرح فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی (دبی خروجی) با استفاده از نرم‌افزار SAS9.4 انجام شد. همچنین به‌منظور مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون دانکن در سطح یک درصد و ۵ درصد استفاده شد.

۳. نتایج و بحث

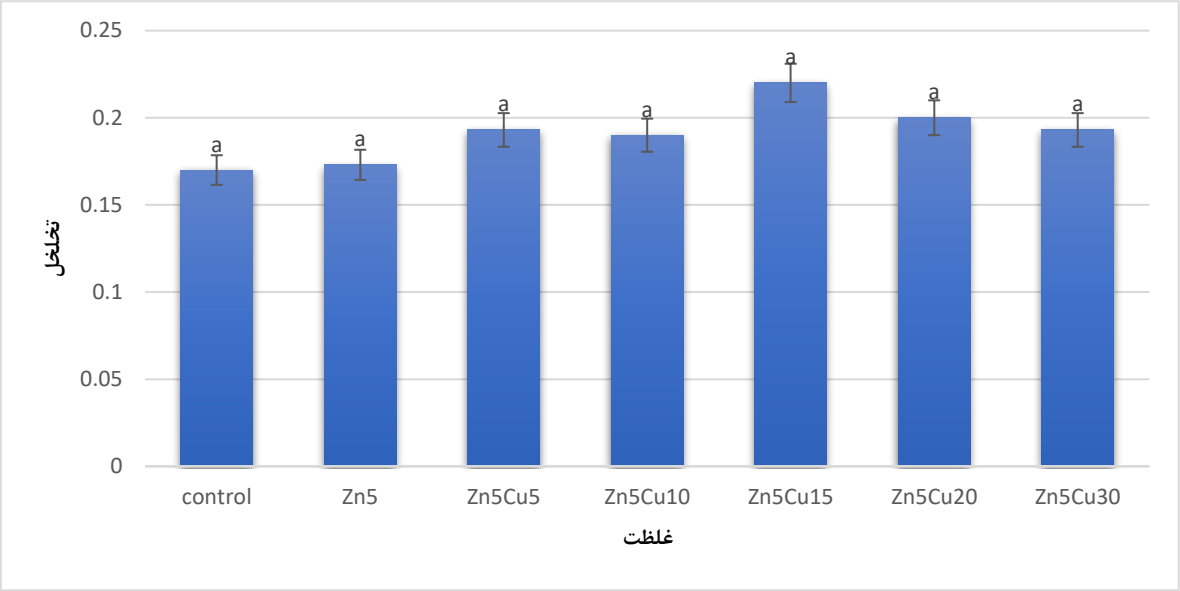
۳-۱. اثر غلظت‌های ادغام‌شده اکسید مس و روی بر تخلخل قبل از کشت

نتایج تجزیه واریانس اثر غلظت‌های ادغام‌شده اکسید مس و روی بر تخلخل قطعات سفالی قبل از کشت در جدول (۱) ارائه شده است. بر اساس نتایج، اثر تیمارهای مختلف اکسید مس و روی بر تخلخل معنی‌دار نبود .باتوجه‌به عدم معنی‌داری اثر تیمارها، اختلاف قابل‌توجهی در تخلخل قطعات سفالی حاوی غلظت‌های مختلف اکسید مس و روی مشاهده نشد و روند مشخص افزایشی یا کاهشی در پاسخ تخلخل نسبت به افزایش غلظت‌ها وجود نداشت (شکل ۱). بااین‌حال بیشترین تخلخل مربوط به تیمار CuO15–ZnO5 با میانگین ۰/۲۲ درصد و کمترین تخلخل مربوط به تیمار CuO0–ZnO0 با میانگین ۰/۱۷ درصد بوده است.

جدول (۱) - تجزیه واریانس اثر غلظت‌های ادغام‌شده اکسید مس و روی بر تخلخل قطعات سفالی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
غلظت CuO–ZnO	۶	**0/0008 ns**
خطا	۱۴	**۰/۰۰۱۷**

**معنی‌داری در سطح ۱ درصد *معنی‌داری در سطح ۵ درصد ns معنی‌دار نیست



شکل (۱) – میانگین تخلخل قطعات سفالی حاوی غلظت‌های مختلف ادغام‌شده اکسید مس و روی

میله‌ها نشان‌دهنده میانگین تخلخل و خط‌های عمودی بیانگر خطای استاندارد (SE) می‌باشند. حروف غیر مشابه نشان دهنده معنی داری و مشابه نشان دهنده معنی داری است.

۳-۲. اثر غلظت‌های اکسید مس و روی و هد هیدرولیکی بر دبی خروجی

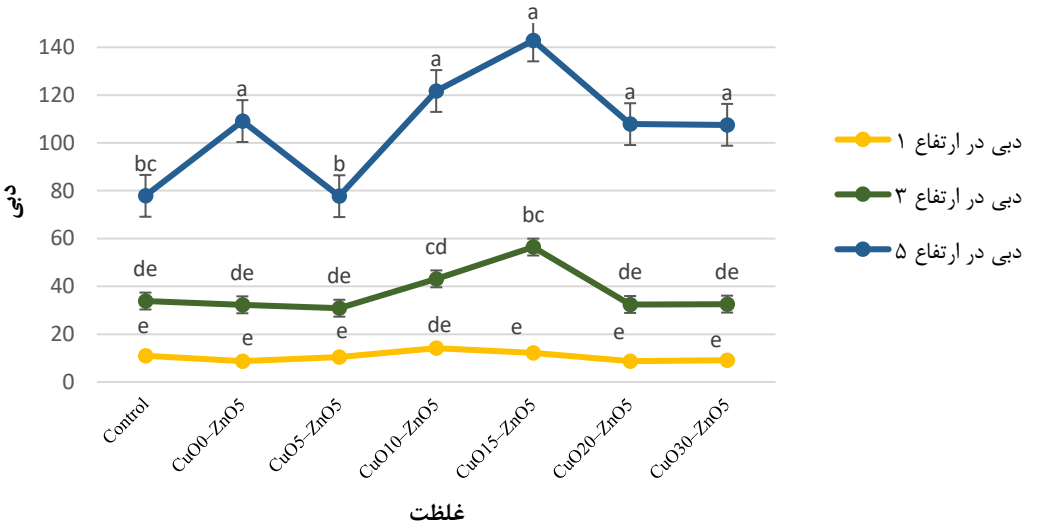
نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین نشان داد (جدول ۲)، اثر اصلی غلظت‌های اکسید مس و روی، اثر اصلی ارتفاع و همچنین اثر متقابل غلظت و ارتفاع بر دبی خروجی معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل غلظت‌های فلزی و ارتفاع بر دبی خروجی آن در شکل (۲) نشان داد بیشترین مقدار دبی خروجی مربوط به تیمارهایی بود که در آن‌ها غلظت‌های بالاتر اکسید روی و مس در ارتفاع‌های بالاتر به‌کاررفته بود، درحالی‌که کمترین دبی خروجی عمدتاً در تیمارهای دارای غلظت‌های پایین‌تر و ارتفاع‌های کمتر مشاهده شد. اختلاف معنی‌دار بین برخی ترکیب‌های غلظت و ارتفاع بیانگر آن است که نقش هر یک از این عوامل به‌تنهایی وابسته به سطح عامل دیگر بوده و نمی‌توان اثر آن‌ها را مستقل از یکدیگر تفسیر نمود. به‌طورکلی تیمار با غلظت CuO15-ZnO5 و ارتفاع ۵ متر با میانگین ۸۶/۴۳ میلی‌لیتر بر ساعت بیشترین دبی خروجی را داشت که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد بود. همچنین پاسخ دبی خروجی به تغییرات غلظت‌های اکسید روی و مس در ارتفاع‌های مختلف یکسان نبوده و الگوی تغییرات دبی به طور معنی‌داری تحت‌تأثیر هم‌زمان این دو عامل قرار دارد (شکل ۲). به‌طوری‌که در برخی ارتفاع‌ها، افزایش غلظت اکسیدهای مس و روی منجر به افزایش قابل‌توجه دبی خروجی شد، درحالی‌که در ارتفاع‌های دیگر، این روند شدت کمتری داشته یا الگوی متفاوتی را نشان داد. الگوی مشاهده‌شده در شکل (۲) نیز به‌وضوح وجود برهم‌کنش معنی‌دار بین غلظت‌های ادغام‌شده اکسید مس و روی و

ارتفاع قرارگیری را تأیید می‌کند، به‌گونه‌ای که خطوط مربوط به سطوح مختلف ارتفاع موازی نبوده و در برخی موارد یکدیگر را قطع می‌کنند. این رفتار نشان‌دهنده وابستگی اثر غلظت به ارتفاع و بالعکس می‌باشد.

جدول (۲) - تجزیه واریانس اثر غلظت‌های ادغام‌شده اکسید مس و روی و ارتفاع بر دبی خروجی قبل از کشت

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات
غلظت CuO–ZnO	۶	۱۲۴۹/۲۰۲ **
ارتفاع	۲	۴۴۵۷۷/۴۳۵**
غلظت × ارتفاع	۱۲	۵۸۴/۱۳۳**
خطا	۱۲۶	۲۳۶/۸۰۰۵

**معنی‌داری در سطح ۱ درصد **معنی‌داری در سطح ۵ درصد ns معنی‌دار نیست



شکل ۲- نمودار اثر متقابل غلظت‌های اکسید مس و روی و ارتفاع(هد هیدرولیکی) بر دبی خروجی قطعات

حروف غیرمشابه نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند.

به‌طورکلی نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه غلظت‌های ادغام‌شده اکسید مس و روی تأثیر معنی‌داری بر تخلخل کل قطعات سفالی نداشتند، اما دبی خروجی به طور معنی‌داری تحت‌تأثیر غلظت اکسیدها، هد هیدرولیکی اعمال‌شده و به‌ویژه اثر متقابل این دو عامل قرار گرفت .این موضوع نه‌تنها نشان می‌دهد که تغییرات دبی خروجی الزاماً تابع مقدار کل تخلخل نیست، بلکه به ریزساختار منافذ، اندازه مؤثر منافذ، تورسوزیتی و مسیرهای جریان در ساختار متخلخل قطعات سفالی وابسته است.

مطالعات قبلی نشـان داده‌اند که افزایش بار مس در سـرامیک‌های متخلخل می‌تواند اندازه منافذ را افزایش داده و در نتیجه دبی خروجی را بهبود دهد، حتی زمانی که تخلخل کل تغییر چشمگیری نداشته باشد .(۱۶) همچنین تحلیل‌های سه‌بعدی ریزساختار سرامیک‌های ریز متخلخل نشان داد که اندازه مؤثر منافذ، قطر گلوگاه‌ها (*pore throat*) و ضریب اتصال منافذ (*coordination number*)نقش مهمی در نفوذپذیری و جریان آب دارند .افزایش اندازه منافذ و کاهش تورســوزیتی* مسیرهای جریان مؤثر را گسترش داده و رفتار هیدرولیکی سرامیک‌ها را به طور قابل‌توجهی تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (۱۱) علاوه بر این، تأثیر هد هیدرولیکی یا اختلاف فشار کاری بر دبی خروجی سرامیک‌های متخلخل نیز در مطالعات قبلی تأیید شده است .مدل‌های ساده‌شده نشان می‌دهند که با افزایش هد (water head) اعمال‌شده، دبی صادرشده از سرامیک‌های متخلخل افزایش‌یافته و رفتار جریان قابل‌پیش‌بینی‌تر می‌شود .(۱۷)

معنی‌دار بودن اثر متقابل غلظت اکسـیدها و هد هیدرولیکی بر دبی خروجی نشـان می‌دهد که پاسـخ سـیسـتم آبیاری زیرسطحی به تغییرات غلظت اکسیدهای مس و روی وابسته به شرایط نصب، هد کاری و ساختار داخلی منافذ می‌باشد. همان‌گونه که در جدول مقایسـه میانگین‌ها و نمودار اثر متقابل مشـاهده شـد، افزایش غلظت اکسـید روی و مس در برخی بردارهای هد، موجب افزایش چشمگیر دبی خروجی شد، درحالی‌که در شرایط هد دیگر این افزایش با شدت کمتر یا الگوی متفاوتی همراه بود. این رفتار می‌تواند ناشـی از تعامل هم‌زمان نیروی محرک جریان (هد هیدرولیکی) و تغییرات ریزساختاری ایجادشده در بدنه سفالی باشد.

۴. نتیجه‌گیری

بر اسـاس نتایج این پژوهش، افزودن غلظت‌های مختلف اکسـید مس و روی به‌صـورت ترکیبی، اثر معنی‌داری روی تخلخل قطعات سـفالی نداشـت، بااین‌حال رفتار هیدرولیکی آن‌ها به‌شـدت تحت‌تأثیر غلظت اکسـیدها، ارتفاع نصب و اثر متقابل این عوامل قرار گرفت. بیشـترین دبی خروجی در غلظت‌های روی ۵۰۰۰ و مس ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO15-ZnO5) و در ارتفاع ۵ متر به دسـت آمد و بالاترین تخلخل مربوط به غلظت روی ۵۰۰۰ و مس ۱۵۰۰۰ پی‌پی‌ام (CuO15-ZnO5) بود. این یافته‌ها نشـان می‌دهد که اثر هیدرولیکی قطعات سـفالی نه‌تنها تابع ویژگی‌های سـاختاری، بلکه تابع شـرایط بهره‌برداری نیز می‌باشد و کنترل هدفمند دبی نیازمند انتخاب هم‌زمان غلظت‌های مناسب اکسیدها و تنظیم شـرایط نصب است. نتایج این تحقیق می‌تواند راهنمای طراحی و بهینه‌سـازی سـامانه‌های آبیاری زیرسـطحی با رویکرد افزایش کارایی مصـرف آب باشـد، به‌ویژه در شرایط مزرعه‌ای که تعامل عوامل ساختاری و بهره‌برداری اهمیت زیادی دارد.

قدردانی

نویسـندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های علمی و راهنمایی‌های ارزشـمند اسـتاد راهنما و سـایر اعضـای هیئت‌علمی دانشـکده کشـاورزی دانشـگاه تربیت‌مدرس صـمیمانه قدردانی نمایند. همچنین از همکاری صـمیمانه و تلاش‌های مؤثر خانم مهندس مرضیه رشیدی، دانشجوی دکتری فیزیک حفاظت خاک دانشگاه تربیت‌مدرس در مراحل مختلف پژوهش، از جمله طراحی آزمایش، جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل نتایج، سپاسگزاری می‌نمایند. بدون همراهی و راهنمایی‌های ایشان، تکمیل این پژوهش و استخراج مقاله حاصل از آن میسر نمی‌شد.

* تورسوزیتی (Tortuosity) یک پارامتر هندسی است که پیچیدگی مسیر جریان در یک محیط متخلخل را نشان می‌دهد.

۵. منابع

1. Camp CR. Camp 1998 Sibsurface Drip Ittigation a Review. 1998;41(5):1353–67.
2. Ayars JE, Fulton A, Taylor B. Subsurface drip irrigation in California—Here to stay? Agric Water Manag [Internet]. 2015;1–9. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.001
3. Wang H, Wang N, Quan H, Zhang F, Fan J, Feng H, et al. Yield and water productivity of crops , vegetables and fruits under subsurface drip irrigation: A global meta-analysis. Agric Water Manag [Internet]. 2022;269(April):107645. Available from: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107645
4. Petrie PR. Evaluation of crop coefficients , water productivity , and water balance components for wine grapes irrigated at different deficit levels by a sub-surface drip. 2017;180:22–34.
5. Si SSI, Ssilh SI, Ssilh SSI, Ssilh SI. No Title.
6. Lamm FR, Trooien TP. Subsurface drip irrigation for corn production: A review of 10 years of research in Kansas. Irrig Sci. 2003;22(3–4):195–200.
7. Yang P, Wu L, Cheng M, Fan J, Li S, Wang H, et al. Review on Drip Irrigation: Impact on Crop Yield , Quality , and Water Productivity in China. 2023;
8. Mahler E. Innovations in Clay-Based Irrigation Technologies — A Systematic Review. 2024;
9. Shani BU, Warrick AW. Soil-limiting flow from subsurface emitters. 1996; (October):291–5.
10. Siyal AA, Skaggs TH. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. 2009;96:893–904.
11. He X, Wu P, Zhang L, Wu S, Liu X, Yang F, et al. Quantitative characterisation of microporous ceramic emitters microstructure and visualisation of seepage based on CT 3D reconstruction. Biosyst Eng [Internet]. 2025;250:68–79. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511024002770
12. Cai Y, Yao C, Wu P, Zhang L, Zhu D, Chen J. E ff ectiveness of a subsurface irrigation system with ceramic emitters under low-pressure conditions. Agric Water Manag [Internet]. 2021;243(22):106390. Available from: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106390
13. Tong X, Wu P, Liu X, Zhang L, Xu L, Tang Y. Optimizing working water head of subsurface irrigation system with ceramic emitters based on various climatic scenarios and water balance components. J Hydrol [Internet]. 2025;646:132339. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169424017359
14. Yao C, Zhang L, Wu P, Liu Y, Cai Y, Zhou W. Clogging formation and an anti-clogging method in subsurface irrigation system with porous ceramic emitter. Agric Water Manag [Internet]. 2021;250(March):106770. Available from: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106770
15. Bouras D, Mecif A, Harabi A, Zaabat M, El O. Porosity properties of porous ceramic substrates added with zinc and magnesium material.
16. He X, Liu X, Wu P, Zhang L, Zhou W, Zhang Q, et al. Reduction of pathogenic bacteria from irrigation water through a copper-loaded porous ceramic emitter. Environ Pollut [Internet]. 2023;330:121776. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749123007789
17. Liu X, He X, Zhang L. Simplified method for estimating discharge of microporous ceramic emitters for drip irrigation. Biosyst Eng [Internet]. 2022;219:38–55. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511022001015