بررسی پاسخ هیدرولیکی قطعات سفالی به سطوح مختلف اکسیدمس در آبیاری زیرسطحی

آرزو حسین‌پور، [*1]، حسینعلی بهرامی[2]، دکتر حجت قربانی واقعی[3]،زینب فلاح[4]،

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک حفاظت خاک دانشگاه تربیت مدرس hosseinpoorarezoo@gmail.com

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

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

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک حفاظت خاک دانشگاه تربیت مدرس Z.Fallah761222@gmail.com

خلاصه

آبیاری به روش زیرسطحی به‌عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های صرفه‌جویی در مصرف آب، در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد توجه قرار گرفته است که نازل‌های سفالی متخلخل یکی از این روش‌ها است. با این حال، گرفتگی نازل‌ها و ناپایداری دبی خروجی یکی از چالش‌های اصلی آن است. بدین منظور در این پژوهش، اثر سطوح مختلف مس (۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰پی پی ام) بر تخلخل و دبی قطعات سفالی در شرایط آزمایشگاهی بررسی شد. نازل‌های سفالی با آغشته‌سازی به مدت ۲۴ ساعت در محلول‌های سولفات مس و پخت ثانویه در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد آماده شدند. در ادامه تخلخل با روش اشباع پارافین و دبی با روش حجم-زمان در ارتفاع‌های ۱، ۳ و ۵ متر اندازه‌گیری شد. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر غلظت مس بر تخلخل غیرمعنی‌دار است، با این حال بیشترین تخلخل در غلظت ۲۰۰۰۰ پی پی ام مس با میانگین ۰/۲۹ مشاهده شد. همچنین اثر غلظت مس، ارتفاع و اثر متقابل آن‌ها بر دبی در سطح یک درصد معنی دار بود. بیشترین دبی در غلظت ۲۰۰۰۰پی پی ام مس و ارتفاع ۵ متر با میانگین ۱۱۶.۲۹ میلی‌لیتر بر ساعت به دست آمد. به‌طور کلی، غلظت بهینه مس ۲۰۰۰۰ پی پی ام تعادل مناسبی بین بهبود ساختار متخلخل و پایداری هیدرولیکی ایجاد می‌کند که می‌تواند به کاهش گرفتگی نازل‌ها و افزایش بهره‌وری آب در سامانه‌های آبیاری زیرسطحی کمک کند. پیشنهاد می‌شود اثرات بلندمدت این اصلاح در شرایط مزرعه‌ای بررسی شود.

کلمات کلیدی: آبیاری زیر سطحی، مس، دبی، تخلخل

۱. مقدمه

با افزایش فشار بر منابع آب شیرین و تشدید محدودیت‌های اقلیمی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، توسعه سامانه‌های آبیاری با راندمان بالا به یکی از اولویت‌های اساسی کشاورزی پایدار تبدیل شده است. در این میان، آبیاری زیرسطحی به دلیل انتقال مستقیم آب به ناحیه ریشه، کاهش تلفات تبخیر و افزایش یکنواختی توزیع رطوبت در خاک، به‌عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های صرفه‌جویی در مصرف آب شناخته می‌شود. یک متاآنالیز جهانی مبتنی بر ۹۸۴ مقایسه

از ۱۰۹ مقاله نشان می‌دهد که روش آبیاری قطره ای زیر سطحی در مقایسه با آبیاری قطره‌ای سطحی، موجب افزایش معنی‌دار عملکرد محصول، بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری کل آب می‌شود و کارایی آن به شرایط اقلیمی، نوع خاک و مدیریت مزرعه وابسته است[۱] . همچنین، نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای بلندمدت حاکی از آن است که آبیاری زیرسطحی علاوه بر صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف آب، می‌تواند عملکرد محصول، بهره‌وری مصرف نیتروژن و سودآوری سیستم‌های زراعی را ، حتی با وجود هزینه اولیه بالاتر نصب افزایش دهد [۲].

با وجود مزایای متعدد، یکی از مهم‌ترین چالش‌های عملی آبیاری زیرسطحی، گرفتگی قطعات و ناپایداری دبی خروجی است که می‌تواند یکنواختی توزیع آب و پایداری هیدرولیکی سیستم را در بلندمدت کاهش دهد. بررسی یک سامانه قطره ای زیر سطحی پنج‌ساله نشان داده است که افزایش مصرف نیتروژن موجب کاهش معنی‌دار دبی نسبی قطعات و ضریب یکنواختی کریستینسن می‌شود و تغییر رژیم جریان از آشفته به نیمه‌آشفته، خطر گرفتگی را افزایش می‌دهد؛ بیشترین تجمع رسوبات در ناحیه خروجی رخ می‌دهد و مکش ناشی از فشار منفی نقش اصلی را در ورود ذرات خاک ایفا می‌کند، در حالی که نفوذ ریشه سهم محدودتری دارد [۳].

در راستای کاهش مشکلات گرفتگی و افزایش پایداری دبی، استفاده از قطعات متخلخل، به‌ویژه قطعات سفالی یا سرامیکی، به‌عنوان راهکاری نوین مورد توجه قرار گرفته است. این قطعات به دلیل ساختار متخلخل یکنواخت، امکان خروج تدریجی و کنترل‌شده آب را فراهم کرده و حساسیت دبی به تغییرات فشار را کاهش می‌دهند. مطالعات گلخانه‌ای و میدانی نشان داده‌اند که آبیاری زیرسطحی با قطعات سرامیکی می‌تواند توزیع رطوبت در ناحیه ریشه، عملکرد محصول و بهره‌وری مصرف آب را بهبود بخشد[۲] [۴].

ویژگی‌های ریزساختاری قطعات سفالی، از جمله میزان تخلخل، اندازه و پیوستگی منافذ و پیچیدگی مسیر جریان، نقش تعیین‌کننده‌ای در رفتار هیدرولیکی و دبی خروجی ایفا می‌کند. تحلیل‌های سه‌بعدی مبتنی بر تصویربرداری نشان داده‌اند که افزایش تخلخل موجب بهبود پیوستگی منافذ، کاهش پیچیدگی مسیر جریان و در نتیجه افزایش پایداری دبی می‌شود[۵]. همچنین، مرور نظام‌مند پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اصلاح ترکیب مواد اولیه سفال و استفاده از افزودنی‌ها می‌تواند ابزار مؤثری برای کنترل تخلخل و رفتار هیدرولیکی باشد[۶].

در سال‌های اخیر، اصلاح مواد سفالی با فلزات فعال، به‌ویژه مس، به‌عنوان رویکردی نوین برای بهبود هم‌زمان عملکرد هیدرولیکی و ویژگی‌های کاربردی قطعات متخلخل مطرح شده است. افزودن مس می‌تواند ریزساختار منافذ را تغییر دهد و ضمن ایجاد خاصیت ضدباکتریایی و مهار رشد زیستی، بر الگوی جریان آب و دبی خروجی اثرگذار باشد[۷].

با وجود مطالعات انجام‌شده، اطلاعات کافی درباره پاسخ هیدرولیکی قطعات سفالی به سطوح مختلف مس در آبیاری زیرسطحی وجود ندارد. هدف از این مطالعه، بررسی اثر سطوح مختلف مس بر تخلخل و دبی قطعات سفالی در شرایط آزمایشگاهی کم‌فشار است.

۲. مواد و روش

این پژوهش در آزمایشگاه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، انجام شد. برای ساخت قطعات سفالی، ۹۰ درصد وزنی رس کائولینیت با ۱۰ درصد وزنی پودر شیشه مخلوط گردید. پس از تهیه دوغاب، قطعات سفالی در ابعاد مورد نظر قالب‌گیری شدند. نمونه‌ها پس از خشک‌شدن اولیه، در کوره و در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت.

برای اصلاح قطعات با مس، از سولفات مس پنتاهیدرات ($CuSO_4 \cdot H_2O_5$)با گرید Extra Pure (شرکت دکتر مجللی) به‌عنوان منبع یون مس استفاده شد. محلول‌های سولفات مس با شش غلظت ۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۲۰۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ پی‌پی‌ام با استفاده از آب مقطر تهیه شد. قطعات سفالی پس از شستشو و خشک‌کردن اولیه، به مدت ۲۴ ساعت در محلول‌های تهیه‌شده غوطه‌ور و سپس در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند. به‌منظور تثبیت مس و تبدیل آن به فرم اکسیدی در ساختار سفال، نمونه‌های تیمارشده تحت فرآیند پخت ثانویه در کوره با دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت قرار گرفتند. پس از اتمام زمان پخت، کوره خاموش و نمونه‌ها به‌صورت طبیعی در داخل کوره درب‌بسته تا رسیدن به دمای محیط سرد شدند.

به‌منظور تعیین تخلخل کل نمونه‌های سفالی، از روش وزنی–حجمی اشباع با پارافین استفاده شد. در این روش، ابتدا نمونه‌های پخته‌شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در آون خشک شدند و پس از رسیدن به وزن ثابت، جرم خشک آن‌ها اندازه‌گیری گردید. سپس نمونه‌ها به‌طور کامل در پارافین مذاب با دمای حدود ۷۰ درجه سلسیوس غوطه‌ور شده و به مدت ۲۰ دقیقه در همان دمای ثابت نگه‌داری شدند تا پارافین به‌طور کامل به داخل تخلخل‌های باز نفوذ کند. پس از اشباع، نمونه‌ها از پارافین خارج شده و پس از سرد شدن سطحی، وزن آن‌ها در هوا ثبت گردید. در مرحله بعد، حجم کل نمونه‌ها با استفاده از روش جابجایی آب تعیین شد؛ بدین منظور، نمونه‌های اشباع‌شده با پارافین که سطح آن‌ها نسبت به آب نفوذناپذیر شده بود، ابتدا در هوا و سپس در آب مقطر توزین شدند و حجم کل با استفاده از چگالی آب در دمای آزمایش محاسبه گردید :

رابطه ۱:

$$vt = \frac{(Wp - Ww)}{\rho w}$$

در نهایت، تخلخل کل نمونه‌ها به‌صورت درصد حجم حفره‌های پرشده با پارافین نسبت به حجم کل نمونه، بر اساس اختلاف جرم نمونه اشباع‌شده و خشک، چگالی پارافین و حجم کل نمونه محاسبه شد (رابطه ۲):

رابطه۲:

$$P(\%) = \frac{(Wp - Wd)}{\rho p \times Vt} \times 100$$

- t : حجم کل نمونه(cm^3)
- Wp : وزن نمونه اشباع‌شده با پارافین در هوا(g)
- Ww : وزن نمونه اشباع‌شده با پارافین در آب(g)
- ρw : چگالی آب در دمای آزمایش(g/cm^3)
- P : درصد تخلخل کل
- Wd : وزن نمونه خشک(g)
- ρp : چگالی پارافین در دمای آزمایش(g/cm^3)

به‌منظور تعیین دبی خروجی قطعات سفالی مورد استفاده در سامانه آبیاری زیرسطحی، از روش اندازه‌گیری مستقیم حجم–زمان استفاده شد. برای اعمال هد هیدرولیکی، منبع آب در سه ارتفاع مختلف شامل ۱، ۳ و ۵ متر نسبت به سطح قطعه سفالی قرار داده شد. ارتباط بین منبع آب و قطعه سفالی از طریق یک شیلنگ انعطاف‌پذیر برقرار گردید، به‌گونه‌ای که اختلاف ارتفاع منبع نسبت به قطعه، هد هیدرولیکی مؤثر سیستم را تعیین می‌کرد. پس از برقراری جریان پایدار، آب خروجی از هر قطعه سفالی به مدت یک ساعت توسط ظرف مدرج جمع‌آوری و حجم آن اندازه‌گیری شد. آزمایش برای هر ارتفاع در سه تکرار انجام گرفت و میانگین مقادیر دبی برای تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. دبی خروجی (Q) بر اساس رابطه (۳) محاسبه شد [۴].

رابطه(۳):

$$Q=V/t$$

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

در نهایت تخلخل به روش طرح کاملا تصادفی و دبی به روش طرح فاکتوریل در قالب کاملا تصادفی با مقایسه میانگین به روش دانکن با سه تکرار با استفاده از نرم افزار SAS9.4 تجزیه و تحلیل شد.

۳. نتایج و بحث

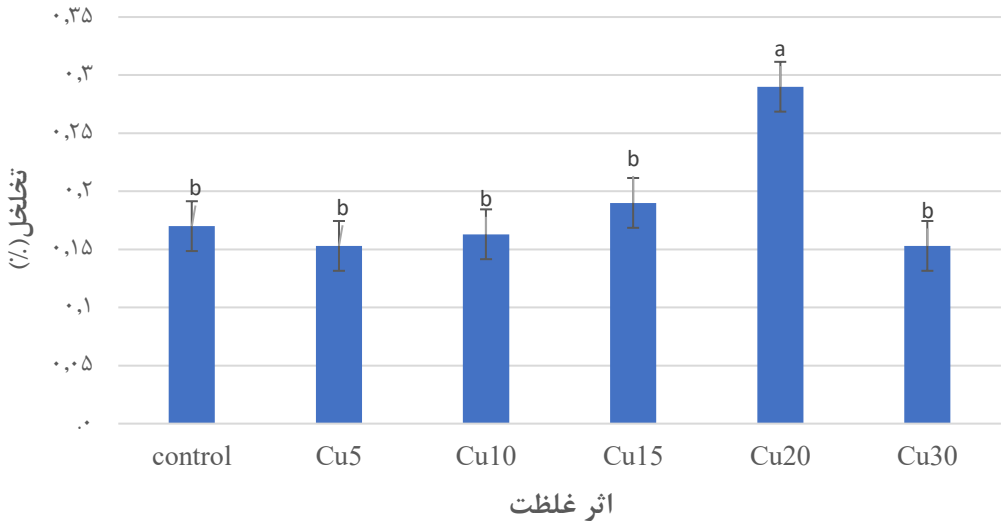
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر غلظت مس بر تخلخل کل قطعات سفالی غیرمعنی‌دار است این نتیجه بیانگر آن است که فرآیند آغشته‌سازی و پخت در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد ساختار متخلخل پایه را به‌طور معنی‌داری تغییر نداده و انسداد اولیه ایجاد نکرده است[۸]. با این وجود، مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن نشان داد که بیشترین تخلخل در

غلظت ۲۰۰۰۰ پی پی ام با میانگین ۰.۲۹ درصد به دست آمد که با سایر سطوح اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد داشت (شکل ۱). این افزایش در غلظت متوسط احتمالاً ناشی از تغییر ریزساختار منافذ و ایجاد حفره‌های بیشتر در فرآیند پخت است[۷]. حفظ و بهبود تخلخل در این سطح، یکی از عوامل کلیدی برای پایداری دبی و کاهش گرفتگی نازل‌ها در سامانه‌های آبیاری زیرسطحی است[۵].

جدول ۱ .تجزیه واریانس اثر غلظت مس بر تخلخل قطعات سفالی

منابع تغییرات	درجه آزادی (DF)	میانگین مربعات (Mse)
		تخلخل
اثر غلظت	5	0/00908^{ns}
خطا	۱۲	۰/۰۰۳۴۳
ضریب تغییرات (درصد)	-	۳۱/۲۲

ns عدم معنی داری، * معنی داری در سطح ۵ درصد، ** معنی داری در سطح یک درصد



شکل ۱. درصد تخلخل کل قطعات سفالی تحت تأثیر سطوح مختلف غلظت مس (آزمون دانکن، $p < ۰.۰۵$).

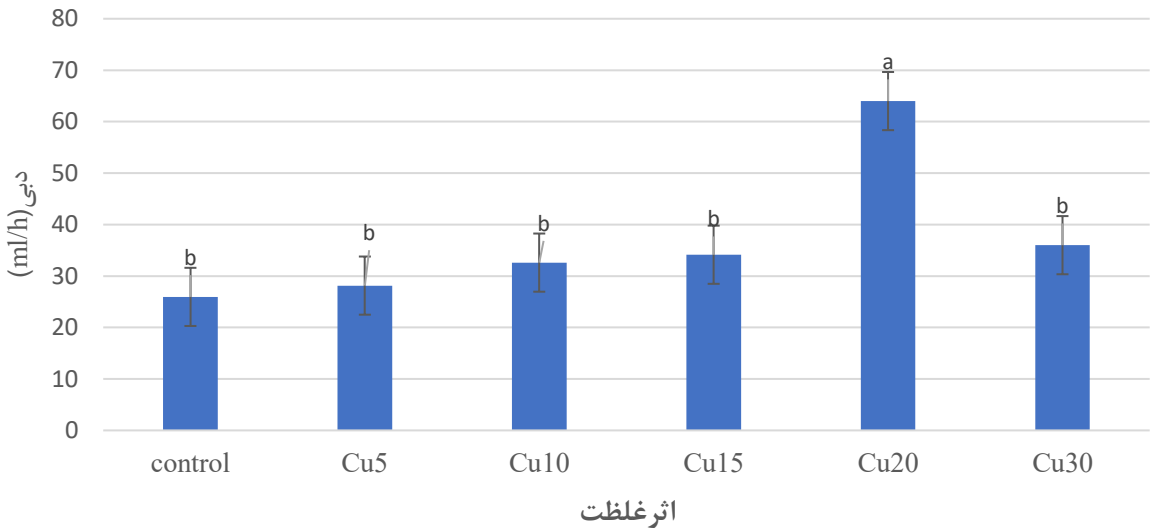
نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر غلظت مس، ارتفاع هد و تعامل آن‌ها بر دبی معنی‌دار است (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها برای اثر اصلی غلظت مس نشان داد که بیشترین دبی در غلظت ۲۰۰۰۰ پی‌پی‌ام با میانگین ۶۴/۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت به دست آمد که با سایر سطوح اختلاف معنی‌دار در سطح یک درصد داشت (شکل ۲). این افزایش احتمالاً ناشی از بهبود ریزساختار منافذ در غلظت متوسط است [۷]. همچنین دبی با افزایش ارتفاع هد به طور معنی‌داری افزایش یافت و بیشترین مقدار در هد ۵ متر (۶۷/۳۸ میلی‌لیتر بر ساعت) مشاهده شد که کاملاً منطبق با اصول هیدرواستاتیک است (شکل

۳). نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیشترین دبی در ترکیب غلظت ۲۰۰۰۰ پی‌پی‌ام و هد ۵ متر (۱۱۶/۲۹میلی‌لیتر بر ساعت) رخ می‌دهد (شکل ۴). در هدهای ۳ و ۵ متر، روند دبی با افزایش غلظت تا ۲۰۰۰۰ پی‌پی‌ام افزایش یافت و سپس کاهش یافت، درحالی‌که در هد ۱ متر تغییرات کمتر بود و در تمام سطوح نزدیک به ۷-۱۹ میلی‌لیتر بر ساعت باقی ماند. این رفتار غیرخطی بیانگر آن است که در غلظت‌های بالاتر، تجمع رسوبات اکسید مس باعث انسداد جزئی منافذ و کاهش دبی می‌گردد [۹] [۱۰].

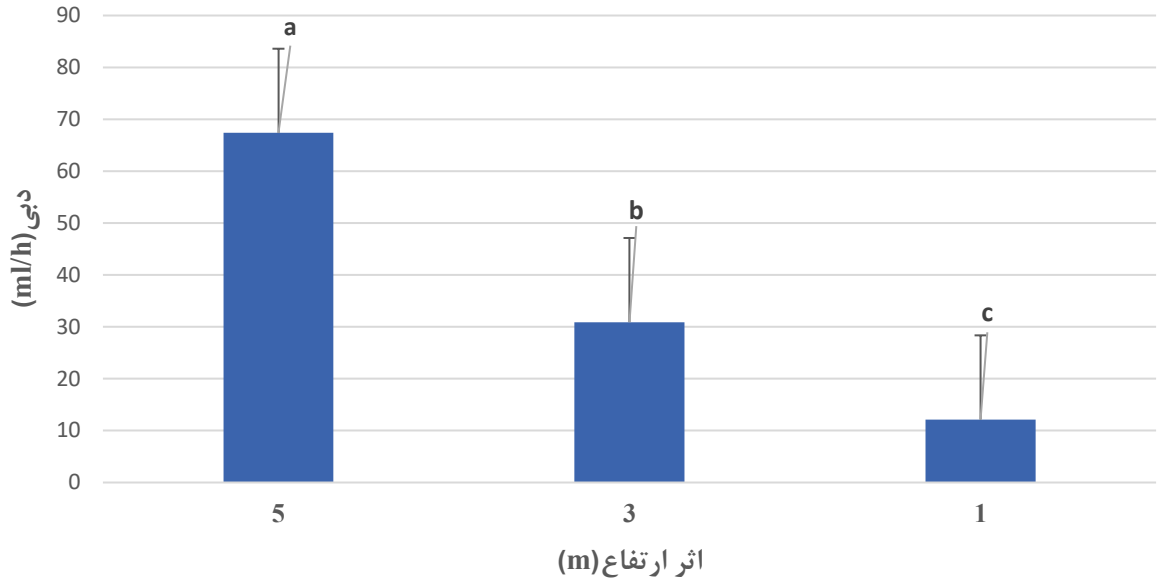
جدول ۲. تجزیه واریانس اثر غلظت مس و ارتفاع بر دبی خروجی قطعات سفالی

منابع تغییرات	درجه آزادی (DF)	میانگین مربعات (Mse)
		آبدهی (ml/h)
اثر غلظت	5	4024/251**
اثر ارتفاع	۲	۳۳۱۳۱/۴۴۷**
اثر غلظت × اثر ارتفاع	۱۰	۱۰۸۸/۹۱**
خطا	۱۰۸	۲۹۲/۱۲۷۱
ضریب تغییرات (درصد)	-	۴۶/۴

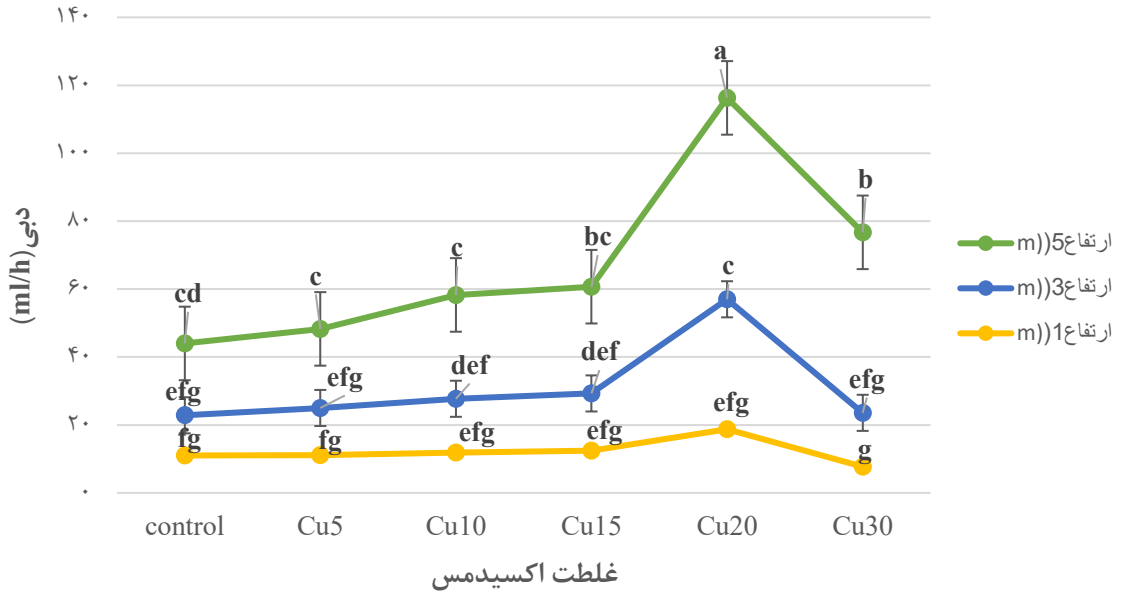
ns عدم معنی‌داری، * معنی‌داری در سطح ۵ درصد، ** معنی‌داری در سطح یک درصد



شکل ۲. درصد تخلخل کل قطعات سفالی تحت‌تأثیر سطوح مختلف غلظت مس (آزمون دانکن، $p < ۰.۰۵$).



شکل ۳. میانگین دبی خروجی قطعات سفالی تحت‌تأثیر ارتفاع (آزمون دانکن، $p < ۰.۰۵$).



شکل ۴ .اثر متقابل غلظت مس و ارتفاع بر دبی خروجی قطعات سفالی (میلی‌لیتر بر ساعت)

یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین همخوانی دارد که نشان می‌دهند افزودن مس در غلظت متوسط می‌تواند تخلخل باز و پیوستگی منافذ را بهبود بخشد و پایداری هیدرولیکی را افزایش دهد [۷] [۵]. در مقابل، غلظت‌های بالا منجر

به تجمع رسوب و افت عملکرد می‌شود [۹]. به‌طورکلی، غلظت بهینه مس (۲۰۰۰۰ پی‌پی‌ام) و دمای پخت ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد تعادل مناسبی بین بهبود ساختار متخلخل و حفظ عملکرد هیدرولیکی ایجاد می‌کند که پتانسیل بالایی برای کاهش گرفتگی نازل‌ها و افزایش بهره‌وری آب در سامانه‌های آبیاری زیرسطحی دارد.

٤. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که اصلاح قطعات سفالی با سطوح مختلف مس (۰ تا ۳۰۰۰۰ پی‌پی‌ام) و پخت در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، تأثیر معنی‌داری بر تخلخل نداشت، اما غلظت ۲۰۰۰۰ پی‌پی‌ام به طور معنی‌داری بالاترین تخلخل را ایجاد کرد. در مقابل، دبی خروجی تحت تأثیر غلظت مس، ارتفاع و تعامل آن‌ها قرار داشت و بیشترین مقدار دبی در غلظت ۲۰۰۰۰ پی‌پی‌ام و هد ۵ متر به دست آمد. این رفتار غیرخطی حاکی از آن است که غلظت بهینه مس (۲۰۰۰۰ پی‌پی‌ام) تعادل مناسبی بین حفظ ساختار متخلخل و کاهش مقاومت جریان ایجاد می‌کند، درحالی‌که غلظت‌های بالاتر به دلیل تجمع رسوبات اکسید مس باعث افت عملکرد هیدرولیکی می‌شود. یافته‌ها تأکید می‌کنند که طراحی نازل‌های سفالی ریشه گریز باید هم‌زمان غلظت مس و شرایط بهره‌برداری را بهینه کند تا پایداری دبی و کارایی مصرف آب در سامانه‌های آبیاری زیرسطحی بهبود یابد. پیشنهاد می‌شود اثرات بلندمدت این اصلاح در شرایط مزرعه‌ای بررسی شود.

٥. قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های علمی و راهنمایی‌های ارزشمند استاد راهنما/مشاور و سایر اعضای هیئت‌علمی دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت‌مدرس صمیمانه قدردانی نمایند. همچنین از همکاری صمیمانه و کمک‌های مؤثر خانم مهندس مرضیه رشیدی در مراحل مختلف انجام پژوهش، از جمله طراحی آزمایش، جمع‌آوری داده‌ها و تحلیل نتایج، کمال تشکر را دارند. بدون همراهی و حمایت ایشان، تکمیل این پژوهش و استخراج مقاله از آن امکان‌پذیر نبود.

٦. مراجع

1. Delbaz R, Ebrahimian H, Abbasi F, Ghameshlou AN, Liaghat A, Ranazadeh D. A global meta-analysis on surface and drip fertigation for annual crops under different fertilization levels. Agric Water Manag [Internet]. 2023 Nov 1 [cited 2026 Feb 4] ;289(1):108504. Available from: https://doi.org/10.1007/s10343-010-0219-5
2. 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 Jul 1 [cited 2026 Feb 4] ;269:107645. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377422001925

3. Zaiyu L, Yan M, Hao G, Shihong G, Yanqun Z, Guangyong L, et al. The hydraulic performance and clogging characteristics of a subsurface drip irrigation system operating for five years in the North China plain. Agric Water Manag. 2025 Feb 1;307:109217.
4. Cai Y, Wu P, Zhu D, Zhang L, Zhao X, Gao X, et al. Subsurface irrigation with ceramic emitters: An effective method to improve apple yield and irrigation water use efficiency in the semiarid Loess Plateau. Agric Ecosyst Environ [Internet]. 2021 Jun 15 [cited 2026 Feb 4] ;313:107404. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880921001080
5. 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 Feb 1 [cited 2026 Feb 4] ;250:68–79. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511024002770
6. Mahler E. Innovations in Clay-Based Irrigation Technologies—A Systematic Review. Sustainability 2024, Vol 16, [Internet]. 2024 Aug 16 [cited 2026 Feb 4] ;16(16). Available from: https://www.mdpi.com/2071-1050/16/16/7029
7. 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. Environmental Pollution [Internet]. 2023 Aug 1 [cited 2026 Feb 4] ;330:121776. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749123007789
8. de Jesus Souza W, Sinobas LR, Sánchez R, Botrel TA, Coelho RD. Prototype emitter for use in subsurface drip irrigation: Manufacturing, hydraulic evaluation and experimental analyses. Biosyst Eng [Internet]. 2014 Dec 1 [cited 2026 Feb 4] ;128:41–51. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511014001640
9. He X, Wu P, Zhang L, Wei Y, Liu X, Yang F, et al. Microporous ceramic emitter: A drip irrigation emitter suitable for high-sediment water. Journal of Water Process Engineering [Internet]. 2024 Nov 1 [cited 2026 Feb 4] ;67:106169. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714424014016
10. Naaz S, Shet VB, Mubarak NM. Green synthesis of copper oxide nanoparticles: Characterization and applications for environmental and biomedical fields. Canadian Journal of Chemical Engineering [Internet]. 2024 Apr 1 [cited 2026 Feb 4] ;102(4):1454–65. Available from: /doi/pdf/10.1002/cjce.25142