مدل شبیه‌سازی تغییرات زمانی معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس در دو مدیریت زراعی خاک‌های درز و ترک‌دار

سیدحسن طباطبایی[۱]، حسین فرداد[۲]، محمدرضا نیشابوری[۳] و عبدالمجید لیاقت[۲]

چکیده

برای تعیین دقیق‌تر بازده کاربرد آبیاری جویچه‌ای نسبت به روش‌های متداول، لحاظ کردن تغییرات مکانی و زمانی خصوصیات نفوذ ضروری می‌باشد. از طرفی مدیریت‌های مختلف زراعی به نحو قابل توجهی بر نفوذ مؤثر است. هدف از این پژوهش شبیه سازی تغییرات زمانی ضرایب نفوذ معادله کوستیاکف- لوئیس در خاک‌های درز و ترک‌دار با دو مدیریت زراعی رایج بوده است. آزمایش‌ها در یک فصل زراعی در کرج در زمینی با بافت لوم- رسی انجام گرفت. دو تیمار مدیریتی شامل خاک بدون کاه و کلش و خاک با کاه و کلش به میزان ۵ تن در هکتار بوده و جویچه‌ها به تعداد ۲۲ عدد و به عرض ۰/۷۵ متر ایجاد شد. ضرایب معادله نفوذ با استفاده از روش ورودی- خروجی و دو نقطه‌ای الیوت واکر در ۶ جویچه به دست آمد. بر اساس نتایج این پژوهش ضرایب k و a در طی فصل رشد تغییرات معنی‌داری نداشته ولی ضریب f در دو مدیریت مختلف تغییرات معنی‌داری نشان داده که توسط مدل لگاریتمی شبیه سازی شده است. مقادیر تغییرات زمانی نفوذ تجمعی (Z) نیز تحت بررسی قرار گرفت که نتایج نشان داد مقادیر Z در طی فصل رشد تغییرات معنی‌داری داشته و با مدل لگاریتمی قابل شبیه سازی است. در پایان روابط بدون بعد Z^* برای به دست آوردن Z در زمان‌های متفاوت، آبیاری‌های مختلف و مدیریت کاه و کلش ارائه شده است. بر پایه نتایج این پژوهش اگر چه کاه و کلش باعث اختلاف در مقادیر f و Z در دو تیمار مورد مطالعه شده است ولی کاه و کلش تاثیری در روند تغییرات زمانی این پارامترها نداشته و این روند مستقل از حضور یا عدم حضور بقایای گیاهی است که احتمالاً به افزایش چگالی ظاهری خاک و کاهش پایداری خاکدانه‌ها در طی فصل رشد مربوط است.

واژه‌های کلیدی: تغییرات زمانی، ضرایب نفوذ، شبیه سازی، آبیاری جویچه‌ای، مدیریت زراعی

مقدمه

در ایران بازده کاربرد ۱۳/۶ تا ۳۶ درصد و گسترش شبکه آبیاری سطحی در حدود ۹۷٪ گزارش شده است (۱ و ۷). در طرح‌هایی با اتوماسیون، پایش دقیق رطوبت خاک، میزان بازده کاربرد ۸۵ تا۹۰ درصد نیز برای آبیاری جویچه‌ای گزارش شده است (۱۲). تلاش برای به دست آوردن بازده کاربرد بالا در

۱. استادیار آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲. به ترتیب دانشیار و استادیار آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران

۳. دانشیار خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]

آبیاری جویچه‌ای صورت می‌گیرد ولی این پارامتر توسط تغییرات خصوصیات نفوذ چه به صورت زمانی و چه به صورت مکانی دچار محدودیت است (۵). راجاوانچی و والندر (۱۹) دریافتند که طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری و درآمد خالص آبیاری، نسبت به تغییرات نفوذ حساس هستند و این تغییرات در طراحی آبیاری جویچه‌ای باید مورد توجه قرار بگیرند. یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی و ارزیابی سیستم آبیاری جویچه‌ای، نفوذ و به صورت دقیق‌تر ضرایب معادله نفوذ است (۴). معادله نفوذ کوستیاکوف- لوئیس به شکل زیر است که در آن Z مقدار نفوذ برحسب متر مکعب در متر، t زمان آبیاری برحسب دقیقه، f. نفوذپذیری نهایی خاک برحسب متر مکعب در دقیقه در متر، k و a ضرایب تجربی معادله هستند که k بر حسب متر مکعب بر متر بر دقیقه به توان 1/a بوده و a بدون واحد است. (۲).

$$Z = kt^{a} + f.t \qquad [۱]$$

شفیق و همکاران (۲۱) تغییرات نفوذ را در چند نمونه خاک (لوم- رسی) و در دو نوع محصول (یکساله و چند ساله) در منطقه کلرادوی آمریکا بررسی کرده و تغییرات معنی‌داری را بین دو آبیاری و در طول فصل رشد بر روی میزان نفوذ گزارش کردند. اسفندیاری و ماهشوری (۱۳) و هانسوکر و همکاران (۱۶) در پژوهش خود تغییرات نفوذ پذیری را به میزان قابل توجهی گزارش نمودند. هانسوکر و همکاران (۱۶) هم‌چنین در بررسی خود روی ۱۳ آبیاری گزارش نمودند که مقدار ضریب نفوذ (k) به طور معنی‌داری به صورت خطی کاهش می‌یابد. ایشان از معادله نفوذ کوستیاکف استفاده کردند.

ملک‌پور و همکاران (۶) با انجام آزمون حساسیت روی پارامترهای مختلف در آبیاری جویچه‌ای به این نتیجه رسیدند که وارد شدن ۲۰ درصد خطا در پارامترهای f.، a، k معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس در محاسبه زمان پیشروی به ترتیب ۱۸/۴، ۲/۸ و ۳۲/۴ درصد خطا وارد محاسبات خواهد کرد. چایلدز و همکاران (۱۰) نتایج روش نفوذ سنجی از طریق جریان (Flowing through method)، را با روش نوترونی (Neutron probe) مقایسه کردند. اندازه‌گیری نفوذ در آبیاری اول (شخم) و سه آبیاری بعد از کشت انجام شد. نتایج نشان داد که متوسط نفوذ قبل از کشت گیاه بیشتر از نفوذ در آبیاری بعد از کشت گیاه است. آنها بیان نمودند که باید این تغییرات در برنامه‌ریزی‌های آبیاری به منظور تعیین میزان جریان و زمان قطع بهینه گنجانده شوند.

کریستیانسن و همکاران (۱۱) تأثیر مدیریت شخم را در میزان نفوذ در یک نوع خاک لومی- رسی- شنی گزارش نمودند. عملکرد کشاورزان در مورد بقایای گیاهی (بقایای گندم، جو و ...) به سه صورت است. اول کاربرد آن به صورت پوشش سطح خاک (Soil surface covering) توسط کاه و کلش است. دوم کاربرد کاه و کلش به صورت مخلوط با خاک از طریق شخم زدن، که مسأله اخیر بیشتر متوجه مناطق خشک و نیمه خشک جهان است. دسته سوم از زارعین هم برای این که کشت دوم در سال را از دست ندهند، اقدام به برداشت یا سوزاندن بقایای گیاهی نموده و بلافاصله کشت دوم را انجام می‌دهند. پوشش گیاهی سطحی، مانع از برخورد شدید قطرات آب به ذرات خاک شده، در نتیجه نفوذپذیری را افزایش می‌دهد چرا که در اثر برخورد قطرات آب به سطح ذرات خاک، خاکدانه‌ها خرد می‌شوند و خاکدانه‌های خرد شده حفرات بزرگ را می‌بندند که در نتیجه نفوذ آب به داخل خاک کاهش می‌یابد. کشت چمن و یونجه باعث افزایش پایداری خاک می‌شود (۸ و ۲۲).

بررسی تحقیقات بیانگر آن است که تغییرات ۳۰ درصد در نفوذ در طی چند آبیاری اول در فصل کشت به میزان حدود ۵۰ درصد بر زمان پیشروی در جویچه مؤثر است که معمولاً، در محاسبات طراحی و ارزیابی آبیاری جویچه‌ای در نظر گرفته نشده است و طراحی جویچه، زمان آبیاری، برنامه آبیاری، ارزیابی آبیاری و... بر مبنای همان آبیاری اول صورت می‌گیرد. بعضی مراجع (۲۰ و ۲۴) نیز وجود این تغییرات را گزارش کرده‌اند ولی مدلی برای تخمین آن در آبیاری‌های بعدی بر اساس معادله نفوذ در آبیاری اول ارائه نکرده‌اند تا بتوان از آن استفاده نمود و برنامه‌ریزی آبیاری را صحیح‌تر انجام داد. ضمن

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]

جدول ۱. مشخصات بافت خاک مزرعه‌های مورد آزمایش

ردیف	محل آزمایش	تاریخ آزمایش	درصد شن	درصد رس	درصد سیلت	بافت خاک روش مثلث	شیب جویچه (متر در متر)	دبی (لیتر در ثانیه)
۱	کرج	۱۳۸۱	۲۷/۲	۲۵/۴	۴۷/۴	لوم رسی	۰/۰۰۶۸	۰/۲

این که تا کنون تأثیر استفاده از کاه و کلش یا عدم استفاده از آن به عنوان یکی از مدیریت‌های رایج زراعی در کشور به صورت کمّی بر روی طراحی جویچه، زمان آبیاری، برنامه آبیاری و ارزیابی آبیاری لحاظ نشده است.

هدف این پژوهش، یافتن معادلات پایه در جهت رفع نواقص فوق (نادیده انگاشتن توالی آبیاری و مدیریت زراعی بر نفوذ به صورت کیفی و کمّی) در مدل بیلان حجمی، برای آبیاری جویچه‌ای بوده به طوری که مدلی برای شبیه سازی معادله نفوذ در آبیاری‌های بعد از کاشت بر پایه آبیاری اول در دو مدیریت رایج کاه و کلش در خاک مورد آزمایش ارائه شود. بر پایه نتایج این پژوهش و معادلات پیشنهادی امکان اصلاح نواقص مذکور در طراحی و ارزیابی امکان‌پذیر می‌شود.

مواد و روش‌ها

مواد

آزمایش در سال ۱۳۸۱ در کرج در مزرعه تحقیقاتی گروه آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران با خاک لوم - رسی انجام گرفت. مشخصات بافت خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است.

تیمارهای این پژوهش مبتنی بر دو تیمار به صورت زیر بودند: ۱- تیمار خاک سنگین و بدون استفاده از بقایای گیاهی (کاه و کلش گندم) CL-NR و ۲- تیمار خاک سنگین و با استفاده از بقایای گیاهی (کاه و کلش گندم) CL-WR. در تیمار ۱ از بقایای گیاهی استفاده نشد و بنابراین مراحل مختلف کاشت مانند شخم، دیسک، ماله، کود پاشی و ایجاد جویچه به صورت عادی انجام شد. در تیمار ۲، ابتدا کاه و کلش گندم روی سطح خاک پخش شده و با شخم سطحی این کاه و کلش‌ها به زیر خاک رفت. برای کنترل نمودن یک‌نواختی پخش، کاه و کلش خشک گندم در حدود ۵ تن در هکتار در یک نوار به عرض ۱۱ متر و به طول ۶۰ متر پخش شده و سپس بقیه مراحل کاشت مانند شخم، دیسک، ماله، کود پاشی و ایجاد جویچه مشابه تیمار ۱ انجام شد. عمق شخم مورد استفاده در این پژوهش ۳۵ سانتی‌متر بود. با دو تیمار در مزرعه و احتساب جویچه‌های محافظ (به منظور حذف اثر جویچه‌ها بر روی یکدیگر در طرفین هر جویچه (و طرفین مزرعه) یک جویچه به عنوان محافظ در نظر گرفته شد.)، تعداد ۲۲ جویچه به عرض ۰/۷۵ متر و طول ۶۰ متر ایجاد شد (شکل ۱). از نظر آماری طرح دارای ۲ تیمار و ۳ تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی بوده است که اندازه‌گیری‌ها در ۶ جویچه صورت گرفت (شکل ۱). گیاه کشت شده در مزرعه‌های آزمایشی ذرت علوفه‌ای (رقم ۶۴۷) بود که از مؤسسه اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه شد. مدت زمان پژوهش یک فصل زراعی بوده که با توجه به تاریخ مناسب کاشت ذرت در منطقه کرج از اوایل خرداد ماه آغاز شد و در اواسط شهریور خاتمه یافت. آزمایش‌ها برای هر تیمار در حداقل سه تکرار اجرا شد.

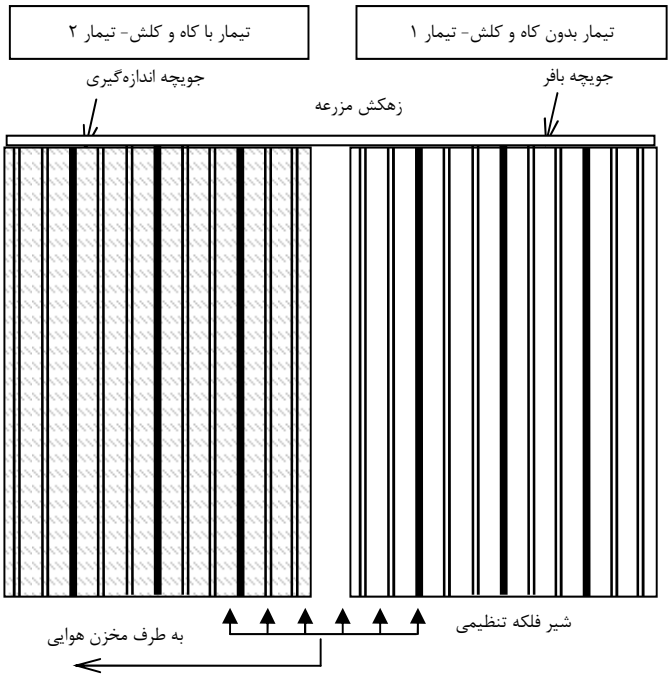
روش‌ها

تعیین منحنی رطوبتی خاک (SMCC) (Soil moisture characteristic curve) با استفاده از روش صفحه فشار (Pressure plate) انجام گرفت (۳). در شکل ۲، منحنی رطوبتی برای خاک‌های مورد آزمایش آمده است.

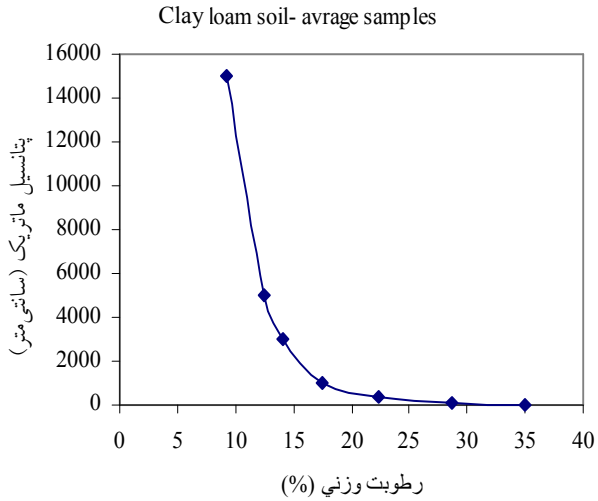
برای تعیین چگالی ظاهری خشک خاک از روش کلوخه (پارافین) استفاده شد. آزمایش‌های چگالی ظاهری در ابتدا، وسط و انتهای فصل رشد انجام گرفت. چگالی ظاهری

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]



شکل ۱. الگوی طرح و نحوه قرارگیری تیمارها در مزرعه آزمایشی



شکل ۲. منحنی رطوبتی خاک مزرعه مورد مطالعه

خاک در ابتدای دوره برابر ۱/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌دست آمد. در سه دوره زمانی مختلف (ابتدا، وسط و انتهای دوره کشت) آزمایش‌های کیفی بر روی نمونه‌های آب و خاک صورت پذیرفت. نتایج بیانگر ثابت بودن کیفیت آب آبیاری در طول دوره ۳ ماهه آبیاری بود.

برای تعیین مشخصات هندسی جویچه از روش مقطع سنجی (Profilemetery) استفاده شد. اندازه‌گیری در سه فاصله ۵ متری، ۳۰ متری و ۵۵ متری از ابتدای بالادست جویچه انجام گرفت. قبل و بعد از هر آبیاری این مشخصات اندازه‌گیری شده و سپس بنا به پیشنهاد کاهون (۹) با روش میان‌یابی خطی بین نقاط متوالی کلیه ضرایب هندسی و هیدرولیکی مقطع محاسبه شد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]

زمان آبیاری بر مبنای رطوبت اولیه خاک قبل از آبیاری تعیین شد . زمان آبیاری در ۵۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی اتفاق می‌افتاد و عمق آبیاری با توجه به عمق توسعه ریشه در هر آبیاری محاسبه گردید. عمق توسعه ریشه در اواسط رشد ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری و بر اساس پیشنهاد فائو (۱۵) این مقدار در حداکثر رشد ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در این پژوهش از روش نوترونمتری برای تعیین رطوبت استفاده شد . معادله واسنجی (Calibration) دستگاه نوترونمتر مطابق معادله ۲ است. لوله‌های مورد استفاده در این پژوهش از جنس آلومینیم به طول ۷۰ سانتی‌متر بوده و اندازه‌گیری در دو عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر صورت پذیرفت. N_1 عدد قرائت شده دستگاه، N_S قرائت استاندارد و θ_m درصد رطوبت وزنی می‌باشند.

$$\theta_m = ۲۷/۵۶۷ \times \frac{N_۱}{N_s} + ۲/۸۹۶ \qquad [۲]$$

بر اساس اندازه‌گیری مربوط به منحنی مشخصه رطوبتی خاک (شکل ۲)، مقادیر رطوبت وزنی در نقطه ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی تعیین شد. با توجه به پیشنهاد فائو (۱۴) برای آبیاری ذرت پس از تخلیه ۵۰ درصد رطوبت قابل استفاده و برای ثابت کردن اثر پارامتر رطوبت بر نفوذ و ضرایب آن، کلیه آبیاری‌ها سعی شد در رطوبت وزنی معین ۱۵/۷ درصد انجام گیرد. برای این منظور در زمان‌های مختلف اقدام به اندازه‌گیری رطوبت خاک شده و در زمان مناسب آبیاری انجام گرفت.

برای تعیین دبی جریان ورودی به جویچه‌ها از روش حجمی و برای تعیین دبی جریان خروجی از جویچه‌ها از روش فلوم دبلیو اس سی تیپ دو (W.S.C. flume type 2.0) استفاده شد . رابطه واسنجی شده این فلوم برای تیپ دو به صورت معادله زیر است، که در آن Q_{out} دبی خروجی بر حسب بر حسب متر مکعب بر دقیقه و H ارتفاع آب بر روی فلوم بر حسب سانتی‌متر است.

$$Q_{out} = ۰/۰۰۳۷۴ \times H^{۲/۶۴} \qquad [۳]$$

با توجه به هدف پژوهش برای به دست آوردن ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف - لوئیس، میزان نفوذ در جویچه‌ها از روش دونقطه‌ای الیوت- واکر (۱۲) استفاده شد. پیشروی آب در دو نقطه وسط و انتهای جویچه انجام گرفت و از معادله نمائی پیشروی (۲۴) برای برازش داده‌های پیشروی استفاده شد. از آنجایی که در تعیین ضرایب نفوذ روش دو نقطه‌ای، به نفوذ نهایی ($f_.$) نیاز است، میزان نفوذ نهایی، در زمان حدود ۱۲۰ دقیقه از شروع آبیاری، طبق روش ورودی- خروجی (Inflow – outflow method) و معادله زیر به دست آمد (۲۴) که در آن، L طول جویچه بر حسب متر بوده و سایر پارامتر قبلاً توضیح داده شده است.

$$f_. = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{L} \qquad [۴]$$

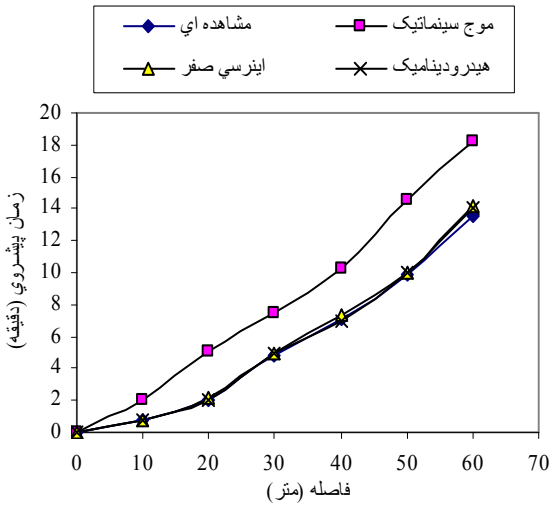
پس از محاسبه ضرایب نفوذ با استفاده از روش‌های دو نقطه‌ای برای اطمینان از صحت نتایج مجدداً با استفاده از مدل‌های دیگر آبیاری سطحی نیز زمان پیشروی کنترل شد. برای این کار از سه مدل موج سینماتیک (Kinematic wave model)، مدل اینرسی صفر (Zero inertia model) و مدل هیدرودینامیک (Hydrodynamic model) استفاده شد (۲۴). پس از تعیین صحت نتایج و روش محاسبه، با استفاده از اصول آمار (آزمون‌های t استیودنت، اختلاف نمونه‌های جفتی، آزمون هم‌بستگی پیرسون) و نرم افزارهای آماری MSTATC و SPSS مقایسه تیمارهای مختلف انجام پذیرفت. در آزمون اختلاف نمونه‌های جفتی، مقادیر میانگین دو متغیر برای یک گروه اعداد مقایسه می‌شود. در این آزمون مقدار اختلاف بین مقادیر دو متغیر را برای هر جفت عدد متناظر محاسبه کرده و سپس آزمون می‌کند که آیا متوسط اختلاف برابر صفر است یا نه (۲۳). سپس براساس نتایج و آنالیزهای آماری، برای هر یک از تیمارها بحث و نتایج صورت گرفت که در زیر آمده است.

نتایج و بحث

پس از جمع‌آوری داده‌های مزرعه نسبت به آنالیز داده‌ها اقدام شد که نتایج در زیر آورده شده است.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]



شکل ۳. زمان پیشروی شبیه‌سازی شده با سه مدل آبیاری سطحی

آزمون تعیین صحت

مقایسه و تحلیل صحت نتایج روش دو نقطه‌ای در مزرعه مورد آزمایش بر اساس آمار چهار جویچه مشاهده‌ای صورت گرفت. در شکل ۳ به عنوان نمونه نتایج تعیین صحت مربوط به جویچه شماره سه، آبیاری شماره دو ارائه شده است.

نتایج حاصل از آزمون حداقل مربعات خطا، بیانگر نبود اختلاف معنی‌داری بین نتایج روش‌های اینرسی صفر و هیدرودینامیک با نتایج مشاهده‌ای مزرعه است. به این معنی که ضرایب نفوذ به‌دست آمده توسط روش دو نقطه‌ای با واقعیت مزرعه‌ای مطابقت دارد. اختلاف در مقادیر مشاهده‌ای با نتایج مدل موج سینماتیک هم به دلیل فرضیاتی بوده که در مدل مذکور به صورت ذاتی وجود دارد.

تغییرات ضرایب معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس

شکل ۴ تغییرات ضریب k را از آبیاری اول تا دوازدهم نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود ضریب فوق در طی دوره کشت، نوسانات مختلف داشته و از روند خاصی تبعیت نمی‌کند. به عبارتی نحوه این تغییرات قابل پیش‌بینی نیست. در این شکل Ie شماره آبیاری (Irrigation event) است. دلیل عدم تطابق نتایج این پژوهش با نتایج هانسوکر و همکاران (۱۶)، استفاده ایشان از معادله کوستیاکف و استفاده نویسنده‌گان از معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس است. عدم حضور پارامتر نفوذ نهایی در معادله نفوذ کوستیاکف سبب می‌شود تا نحوه تأثیرگذاری بر پارامترها تغییر کند.

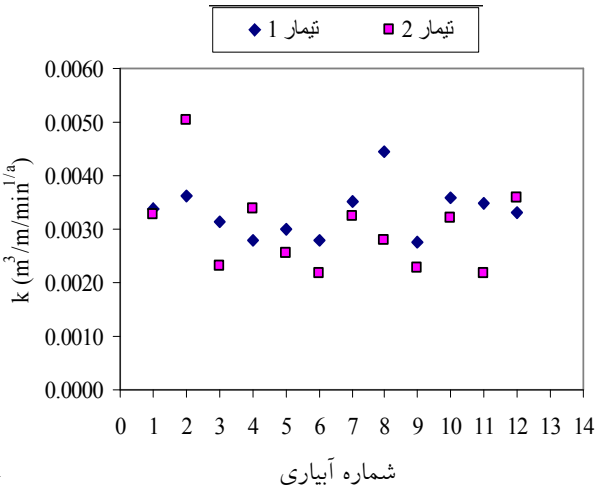
همان‌گونه که در نتایج اسفندیاری و ماهشوری (۱۳) آمده است، ضریب k معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس روند تغییرات مشخصی در پنج آبیاری نداشته است. نامبردگان به صورت احتمالی وجود درز و شکاف را عامل این کار دانسته‌اند. در آزمایش جاری (شکل ۵) نیز درز و شکاف فراوان در جویچه‌ها مشاهده شد که احتمالاً منجر به تغییرات زیاد و ناهم‌آهنگ k شده است. نتایج این پژوهش(شکل ۴) نیز با نتایج اسفندیاری منطبق است.

برای بررسی معنی‌دار بودن میزان تغییرات ضریب معادله نفوذ کوستیاکف - لوئیس(k) در طی فصل رشد، از آزمون t استودنت استفاده شد که نتایج در جدول ۲ آمده است. بر این اساس تغییرات ضریب معادله نفوذ در طول فصل رشد از نظر آماری معنی‌دار نیست.

با توجه به شکل ۴، هیچ‌گونه روند خاصی در تغییرات زمانی k چه در تیمار با کاه و کلش و چه بدون کاه و کلش

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]



شکل ۴. تغییرات مقادیر ضریب k در تیمارهای ۱ و ۲ در آبیاری‌های متوالی در طی یک فصل رشد



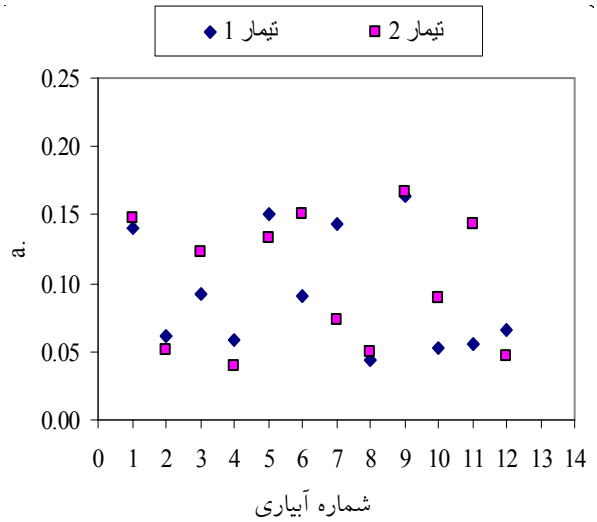
شکل ۵. وجود درز و شکاف در مزرعه مورد آزمایش پس از آبیاری اول

جدول۲. آزمون معنی‌داری تغییرات ضرایب و مقادیر پارامترهای نفوذ در بافت لوم- رسی در دو مدیریت مختلف

ردیف	تیمار آزمایش	پارامتر نفوذ	مقدار پارامتر در آبیاری اول	مقدار T	درجه آزادی	سطح معنی‌داری	میانگین اختلافات	بازه اطمینان در سطح ۹۵ درصد	
								حد بالا	حد پائین
۱	۱	k	۰/۰۰۳۴۰	-۰/۷۲۱	۳۵	۰/۴۷۶	$-۷/۵۰\times۱۰^{-۵}$	$۱/۳۶\times۱۰^{-۴}$	$-۲/۸۶\times۱۰^{-۴}$
۲	۱	a	۰/۱۴	-۵/۹۴۶	۳۵	۰/۱۲۰	$-۴/۶۶\times۱۰^{-۲}$	$-۳/۰۷\times۱۰^{-۲}$	$-۶/۲۶\times۱۰^{-۲}$
۳	۱	f.	۰/۰۰۰۱۳۸	-۱۶/۵۸۰	۳۵	۰/۰۰۰	$-۵/۲۳\times۱۰^{-۵}$	$-۴/۳۷\times۱۰^{-۵}$	$-۶/۰۹\times۱۰^{-۵}$
۴	۱	Z	۰/۰۶۳	-۱۱/۵۴۵	۲۳	۰/۰۰۰	$-۲/۶۴\times۱۰^{-۲}$	$-۱/۹۹\times۱۰^{-۲}$	$-۳/۲۸\times۱۰^{-۲}$
۵	۲	k	۰/۰۰۳۲۸	-۱/۹۳۲	۳۵	۰/۰۶۱	$-۲/۸۰\times۱۰^{-۴}$	$۱/۴۲\times۱۰^{-۵}$	$-۵/۷۵\times۱۰^{-۴}$
۶	۲	a	۰/۱۵	-۴/۹۱۹	۳۵	۰/۰۶۰	$-۴/۸۶\times۱۰^{-۲}$	$-۲/۸۵\times۱۰^{-۲}$	$-۶/۸۷\times۱۰^{-۲}$
۷	۲	f.	۰/۰۰۰۱۵۴	-۱۷/۷۷۳	۳۵	۰/۰۰۰	$-۶/۳۱\times۱۰^{-۵}$	$-۵/۳۵\times۱۰^{-۵}$	$-۷/۲۸\times۱۰^{-۵}$
۸	۲	Z	۰/۰۶	-۱۱/۵۴۵	۲۳	۰/۰۰۰	$-۲/۶۴\times۱۰^{-۲}$	$-۱/۹۹\times۱۰^{-۲}$	$-۳/۲۸\times۱۰^{-۲}$

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]



شکل ۶. تغییرات مقادیر ضریب a در تیمارهای ۱ و ۲ در آبیاری‌های متوالی در طی یک فصل رشد

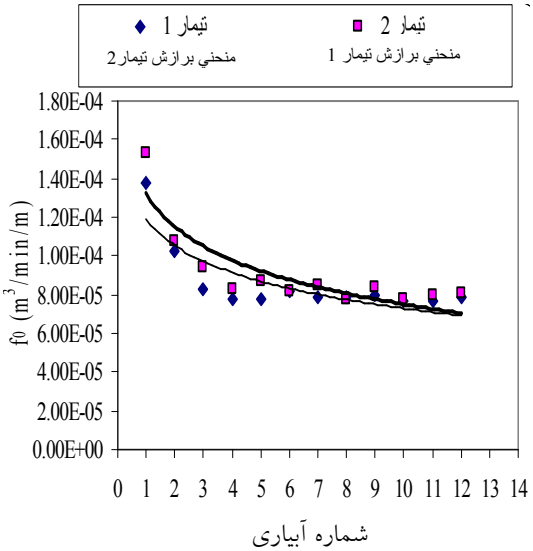
مشاهده نمی‌شود. مقایسه معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس با معادله نفوذ فلیپ بیانگر آن است که اگرچه ضریب k در معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس یک ضریب تجربی است ولی در عین حال مشابهت نزدیکی با پارامتر ضریب جذبی (S) در معادله نفوذ فلیپ دارد. f، معادله کوستیاکف- لوئیس نیز مشابهت نزدیکی با ضریب انتقال خاک (A) معادله فلیپ دارد. چون بافت خاک و رطوبت اولیه (قبل از آبیاری) کاملاً بر S موثرند (۳ و ۱۸) بنابراین در صورتی که رطوبت اولیه خاک در آبیاری‌های مختلف تقریباً یکسان باشد انتظار می‌رود k نیز تقریباً ثابت بماند. بنابراین عدم تغییر معنی دار در ضریب k با توجه به این که آبیاری‌ها در رطوبت تقریبا برابر صورت گرفته قابل توجیه است و نتیجه آزمایش‌ها نیز این مسأله را تأیید می‌نماید.

مقادیر a معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس تغییرات آن در طول دوره کشت در شکل ۶ ارائه شده است. مقدار تغییرات این ضریب در طی دوره کشت نیز از روند خاصی پیروی نمی‌کند. به عبارت دیگر مقدار a توسط مدل، قابل پیش‌بینی نیست. جدول ۲ نشان می‌دهد که تغییرات a در طول فصل رشد از نظر آماری معنی‌دار نیست. نتایج هانسوکر و همکاران (۱۶) نقض کننده و نتایج اسفندیاری و ماهشوری (۱۳) تأیید کننده نتایج به دست آمده از پژوهش است. اسفندیاری و ماهشوری (۱۳) عدم مشاهده روند مشخص در تغییرات a در خاک ریز بافت را ناشی از وجود و تأثیر درز و شکاف دانستند که عامل مهمی در بر هم زدن و ایجاد اختلال در روند تغییرات زمانی پارامتر a در طی فصل رشد است. مطابق یافته‌های هانسوکر و همکاران (۱۶)، تغییرات a نه از مدل لگاریتمی و نه از مدل خطی به خوبی تبعیت نمی‌کند.

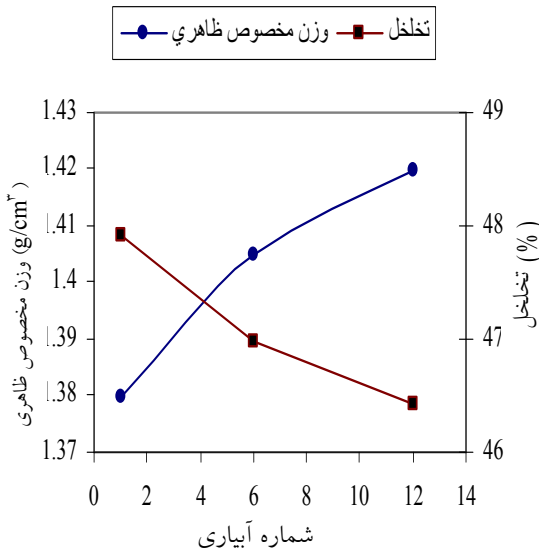
مقادیر f، برای خاک لوم- رسی در شکل ۷ ارائه شده است. آزمون آماری تغییرات f، با آزمون t استودنت در جدول ۲ آمده است. بر این اساس تغییرات f، در طول فصل رشد از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار است. روند تغییرات زمانی f، در شکل ۷ نشان داده شده که از سیر نزولی برخوردار است، منتها کاهش در ابتدای فصل زیاد بوده و به تدریج کمتر می‌شود. تغییرات آن از یک مدل لگاریتمی تبعیت می‌کند. این یافته با نتایج اسفندیاری و ماهشوری (۱۳) مطابقت دارد. نامبردگان کاهش f، در طول فصل رشد را ۴۰ درصد گزارش کرده‌اند. در پژوهش حاضر میزان تغییرات f، در طی ۱۲ آبیاری در حدود ۴۳ و ۴۷ درصد به ترتیب در تیمار ۱ و ۲ به دست آمده است (شکل ۷). در طول فصل رشد برخی از خصوصیات فیزیکی خاک مانند خلل و فرج به دلیل نشست خاک و کاهش

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]



شکل ۷. تغییرات مقادیر ضریب f. در تیمارهای ۱ و ۲ در آبیاری‌های متوالی در طی یک فصل رشد



شکل ۸. تغییرات زمانی چگالی ظاهری ظاهری و تخلخل در آبیاری‌های متوالی در طی یک فصل رشد

پایداری خاکدانه‌ها به دلیل حرکت آب بر روی سطح خاک کاهش می‌یابند. این دو عامل به طور مستقیم روی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و به عبارتی نفوذپذیری پایه تأثیر می‌گذارد. اگر تغییر در پارامترهای فیزیکی خاک (خلل و فرج، پایداری خاکدانه) دارای یک روند مشخصی باشد، طبیعی است که f. به عنوان متغیر وابسته به آنها نیز از روند مشخص تبعیت کند و نتایج این پژوهش مؤید این تفسیر است (شکل ۷). در ابتدای دوره کشت به دلیل شخم، تخلخل خاک بالا است و نفوذ پذیری پایه نیز بالا است. پس از آبیاری اول، تخلخل خاک کاهش یافته و به دلیل جریان آب بر روی سطح خاک، خاکدانه‌ها تخریب گردیده و سله سطحی تشکیل می‌شود. اثر هم‌زمان این دو عامل سبب کاهش شدید میزان نفوذپذیری پایه می‌شود (شکل ۷). نتایج نشان داده که میزان تغییرات وزن مخصوص ظاهری و تخلخل خاک در طی دوره رشد ناچیز بوده است (شکل ۸). بنابراین میزان تأثیر این عامل روی کاهش نفوذ پذیری پایه کم بوده است و کاهش نفوذ پذیری ناشی از تأثیر سایر عوامل بوده است. با گذشت زمان، میزان تخریب خاکدانه‌ها کاهش یافته و تخلخل خاک هم به حد ثابتی نزدیک می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که میزان نفوذ پذیری پایه نیز به یک حد ثابتی نزدیک شود. نتایج تحقیق نیز این مطلب را تأیید می‌کند (شکل ۷).

روند کاهش f. می‌تواند توسط روابط مختلف، شبیه‌سازی گردد. از بین معادلات و روابط مختلف، مدل لگاریتمی، رابطه مناسبی با ضریب هم‌بستگی بالا به‌دست داده است. معادله ۵ رابطه شبیه‌سازی f. را در یک خاک لوم - رسی و مدیریت بدون کاه و کلش و معادله ۶ در مدیریت با کاه و کلش را نشان می‌دهد که در آن Ie شماره آبیاری از ابتدای دوره است.

$$f_. = ۰/۰۰۰۱۱۹ - ۰/۰۰۰۰۲۰۱ \times \ln(Ie) \quad r^۲ = ۰/۶۱^{**} \qquad [۵]$$

$$f_. = ۰/۰۰۰۱۳۳ - ۰/۰۰۰۰۲۵ \times \ln(Ie) \quad r^۲ = ۰/۷۴^{**} \qquad [۶]$$

آزمون اختلاف نمونه‌های جفتی انجام گرفته نشان داده است که دو معادله فوق از نظر آماری در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد. توضیح این که هر یک از معادلات فوق به تنهایی بر داده‌های مزرعه‌ای منطبق بوده و با استفاده از آزمون t استیودنت ضریب هم‌بستگی به‌دست آمده در سطح ۱ درصد معنی‌دار است ($r^۲$=۰/۶۱** و $r^۲$=۰/۷۴**) و هم این که معادلات فوق در سطح ۱ درصد از یکدیگر مختلف می‌باشند و به عبارتی با یکدیگر مساوی نیستند.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]

تغییرات نفوذ تجمعی در طی فصل رشد

پیش‌بینی سرعت و مقدار نفوذ در هر آبیاری از اهداف مهم در برنامه ریزی آبیاری است. معادله نفوذ کوستیاکوف- لوئیس از سه ضریب a، f، k تشکیل شده است و بر اساس آنچه بحث شد تغییرات زمانی مشخص برای a و k وجود ندارد و هم‌بستگی بین اینها با تعداد آبیاری، معنی‌دار نیست. برای رفع این مشکل سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی در تمام آبیاری‌ها در زمان معینی (۴۰۰ دقیقه) محاسبه شده و روند آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای بررسی معنی‌دار بودن میزان تغییرات نفوذ تجمعی (Z) در زمان معین ۴۰۰ دقیقه در طول فصل رشد از آزمون t استفاده شد. بر این اساس تغییرات نفوذ تجمعی در طول فصل رشد از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار است. مطابق شکل ۹ روند تغییرات نفوذ تجمعی با یک مدل لگاریتمی به خوبی قابل توصیف بوده و ضریب هم‌بستگی نیز از نظر آماری در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

نفوذ تجمعی، تابع مستقیمی از سرعت نفوذ پایه و سرعت نفوذ پایه تابعی از خصوصیات فیزیکی خاک است و بنابراین روند تغییرات نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ پایه نیز در جهت روند تغییرات خصوصیات فیزیکی خاک است و بحث علل تغییرات نفوذ تجمعی مشابه نفوذپذیری پایه می‌باشد که به منظور جلوگیری از تکرار مطالب در این‌جا ذکر نمی‌شود. بر اساس نتایج، مدل لگاریتمی به صورت معادله زیر برای برازش داده‌های نفوذ تجمعی در تیمار بدون کاه و کلش پیشنهاد شد. جدول ۲، نشان می‌دهد که تغییرات نفوذ تجمعی در طول فصل رشد از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار است.

$$Z = ۰/۰۵۵ - ۰/۰۰۹۳۴ \times \ln(Ie) \quad r^۲ = ۰/۶۵^{**} \qquad [۷]$$

همان گونه که در شکل ۹ مشخص است روند تغییرات مقدار نفوذ تجمعی (Z) در خاک لوم - رسی بدون کاه و کلش، مشابه روند تغییرات زمانی نفوذپذیری پایه است. به عبارت بهتر عامل خصوصیات فیزیکی خاک موثر بر نفوذپذیری پایه، عینا بر نفوذ تجمعی تأثیر می‌گذارد و هر دو پدیده توسط مدل لگاریتمی قابل ارائه و پیش‌بینی هستند. میزان ضریب هم‌بستگی (۰/۶۵) در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. معادله زیر برای برازش داده‌های نفوذ تجمعی در خاک لوم - رسی با کاه و کلش پیشنهاد شد.

$$Z = ۰/۰۶۱ - ۰/۰۱۱۸ \times \ln(Ie) \quad r^۲ = ۰/۷۶^{**} \qquad [۸]$$

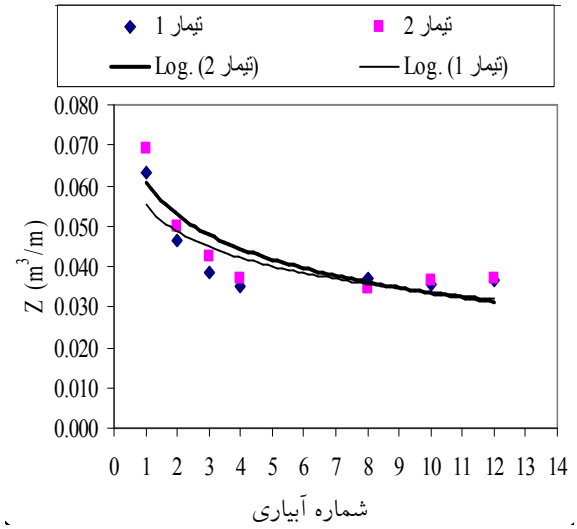
نتایج لیندرمن و استگمن (۱۷) بیانگر تغییرات قابل توجه نفوذ در آبیاری اول و دوم است. ایشان سله سطحی و نرمی سطح خاک را عامل اصلی این تغییرات دانسته‌اند. شپارد و همکاران (۲۲)، با هدف مقایسه روش‌های اندازه‌گیری نفوذ، پنج روش اندازه‌گیری نفوذ را در خاک‌های بافت مختلف مقایسه نمودند. متوسط نفوذ در تمام روش‌ها کاهش نشان داد و مقدار آن بسته به روش اندازه‌گیری از حداقل ۴۴ تا حداکثر ۷۸ درصد به دست می‌آید. میزان تغییرات فصلی نفوذ تجمعی به دست آمده در این پژوهش در حدود ۴۸ درصد به دست آمده است.

تأثیر کاه و کلش بر تغییرات زمانی معادله نفوذ کوستیاکف - لوئیس

برای بررسی این‌که آیا رفتار خاک لوم- رسی با کاه و کلش و بدون کاه و کلش در طول فصل یکسان بوده است یا نه از آزمون همگرایی نمونه‌های جفتی (Paired samples correlation)(PSC) استفاده شد که نتایج در جدول ۳ آمده است. بر اساس نتایج جدول مذکور مشاهده می‌شود که همگرایی یا روند تغییرات فصلی ضریب f. و Z در دو تیمار خاک با کاه و کلش و بدون کاه وکلش در خاک لوم - رسی در سطح ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۳). به عبارت دیگر، پارامترهای f. و Z با احتمال ۹۹ درصد همگرا بوده و دارای یک روند مشابه می‌باشند. این مسأله بیان کننده آن است که کاه و کلش تأثیری در روند یا رفتار تغییرات زمانی پارامترهای f. و Z در خاک لوم- رسی علی‌رغم این که کاه و کلش باعث تغییر در مقدار پارامترهای مذکور شده، ندارد (جدول ۴).

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]



شکل ۹. تغییرات زمانی مقادیر نفوذ تجمعی در تیمارهای ۱ و ۲ در آبیاری‌های متوالی در طی یک فصل رشد

جدول ۳. آزمون همگرایی نمونه‌های جفتی (PSC) پارامترهای معادله نفوذ در بافت لوم- رسی، با کاه و کلش و بدون کاه و کلش

ضرایب و مقادیر نفوذ	تعداد نمونه	میزان هم‌بستگی بین دو تیمار	سطح معنی‌دار شدن
f.	۳۶	۰/۹۱۶	۰/۰۰۰
Z	۲۸	۰/۸۸۹	۰/۰۰۰

جدول ۴. آزمون اختلاف نمونه‌های جفتی(PDST) پارامترهای معادله نفوذ در بافت لوم- رسی، با کاه و کلش و بدون کاه و کلش

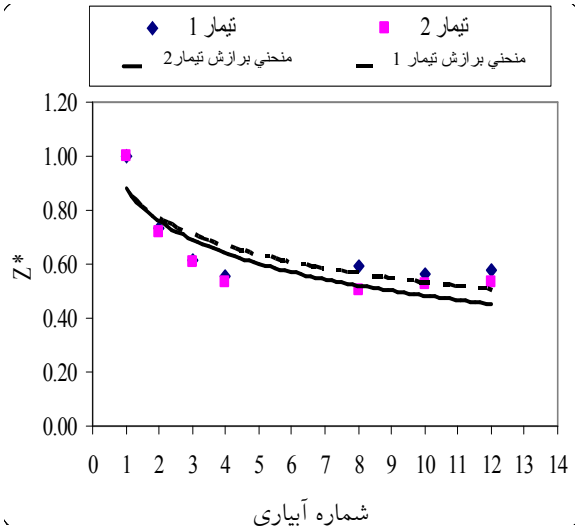
ضرایب و مقادیر نفوذ	اختلاف جفت‌ها					مقدار t	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
	میانگین	انحراف معیار	میانگین خطای استاندارد	سطح اعتماد ۹۹ درصد				
				حد پائین	حد بالا			
k	$۳/۲۵\times۱۰^{-۴}$	$۹/۳۴\times۱۰^{-۴}$	$۱/۵۶\times۱۰^{-۴}$	$۷/۴۶\times۱۰^{-۶}$	$۶/۴۳\times۱۰^{-۴}$	۲/۰۷۸	۳۵	۰/۰۵۵
a	$-۸/۰۶\times۱۰^{-۳}$	$۵/۵۲\times۱۰^{-۲}$	$۹/۲۵\times۱۰^{-۳}$	$-۲/۶۷\times۱۰^{-۲}$	$۱/۰۶\times۱۰^{-۲}$	-۰/۸۷۵	۳۵	۰/۳۸۷
f.	$-۵/۱۲\times۱۰^{-۶}$	$۸/۵۸\times۱۰^{-۶}$	$۱/۴۳\times۱۰^{-۶}$	$-۸/۰۲\times۱۰^{-۶}$	$-۲/۲\times۱۰^{-۶}$	-۳/۵۸۲	۳۵	۰/۰۰۱
Z	$-۴/۸۰\times۱۰^{-۲}$	$۳/۶۴\times۱۰^{-۲}$	$۶/۸۸\times۱۰^{-۳}$	$-۶/۷۱\times۱۰^{-۲}$	$-۲/۸۹\times۱۰^{-۲}$	-۶/۹۸۱	۲۷	۰/۰۰۰

موضوع دیگر این است که آیا مقادیر متناظر ضریب k در خاک لوم- رسی در دو تیمار کاه و کلش و بدون کاه وکلش اختلاف معنی‌داری داشته یا نه. به عبارتی علی‌رغم این که کاه و کلش روی روند تغییرات زمانی ضریب k تأثیری نداشته ممکن است باعث تغییر در مقدار پارامتر مورد نظر شده باشد. برای این از آزمون اختلاف نمونه‌های جفتی (Paired difference sample test)(PDST) استفاده شد (جدول ۴). بر این اساس بین مقادیر k در دو تیمار با کاه و کلش و بدون کاه وکلش اختلاف معنی‌داری از نظر آماری وجود ندارد. به عبارتی کاه و کلش در خاک سنگین باعث تغییر در مقدار ضریب k نشده است.

مشابهاً برای a، آزمون اختلاف نمونه‌های جفتی (جدول ۴) انجام شد. نتایج نشان داده که بین مقدار ضریب a در حالت با کاه و کلش و بدون کاه و کلش تفاوت معنی‌دار وجود ندارد.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]



شکل ۱۰. تغییرات زمانی کمیت Z^* در تیمارهای ۱ و ۲ در آبیاری‌های متوالی در طی یک فصل رشد

برای مقادیر نفوذپذیری پایه و نفوذ تجمعی، نیز آزمون همگرائی (جدول ۳) و آزمون اختلاف نمونه‌های جفتی (جدول ۴) انجام شد. با احتمال ۹۹ درصد روند تغییرات در حالت با کاه وکلش و بدون کاه و کلش یکسان بوده و هم‌چنین با احتمال ۹۹ درصد بین دو تیمار تفاوت معنی‌دار وجود دارد. به عبارتی کاه و کلش باعث ایجاد یک اختلاف فاز در مقدار نفوذپذیری پایه و نفوذ تجمعی شده است. احتمالاً افزایش خلل و فرج درشت خاک توسط کاه و کلش در تیمار خاک لوم – رسی با کاه و کلش نسبت به تیمار خاک لوم– رسی بدون کاه وکلش سبب افزایش مقادیر نام برده شده است. در عین حال این افزایش، باعث تغییر در روند تغییرات زمانی مقادیر فوق نشده است.

بررسی شکل‌های۷ و ۹ نشان می‌دهد که به کارگیری کاه و کلش باعث ایجاد یک افزایش فاز در مقادیر f. و Z شده است. به عنوان نمونه در شکل ۷ در چند آبیاری اول، مقدار f. در خاک سنگین با کاه و کلش به میزان ۱۰ درصد بیشتر از خاک سنگین بدون کاه و کلش است. در عین حال در هر آبیاری اگرچه مقدار نفوذپذیری پایه در حال کاهش است ولی این اختلاف بین دو تیمار کاه و کلش و بدون کاه و کلش تقریباً تا مرحله آخر ادامه دارد و البته در انتهای فصل آبیاری اختلاف تقریباً از بین می‌رود.

منحنی‌های بدون بعد جهت پیش‌بینی نفوذ

از آن جایی که در جدول‌های برنامه‌ریزی آبیاری معمولا به جای ضرایب معادله نفوذ، عمق نفوذ مشخص می‌شود. بنابراین یافتن رابطه‌ای بین عمق نفوذ (Z) و شماره آبیاری (Ie) آن از اهمیت خاصی برخوردار است (۱۴). معادلات رگرسیون به دست آمده بین Z و Ie در پژوهش حاضر بر مبنای مقادیر Z در زمان ۴۰۰ دقیقه است. به منظور تعمیم روابط رگرسیون بین آن دو در دیگر زمان‌های پس از شروع آبیاری، از معادله ۹ برای بدون بعد سازی متغیر Z استفاده شد.

$$Z_n^* = \frac{Z_n}{Z_1} \qquad [۹]$$

با به کار گیری مقادیر بدون بعد Z (شکل ۱۰) روابط رگرسیونی بدون بعد برای تیمار بدون کاه و کلش و با کاه و کلش به ترتیب زیر حاصل شدند:

$$Z^* = -۰/۱۴۸\,Ln(Ie) + ۰/۸۷۴۱ \qquad r^۲ = ۰/۷۰^{**} \qquad [۱۰]$$

$$Z^* = -۰/۱۷۲۲\,Ln(Ie) + ۰/۸۷۹۴ \qquad r^۲ = ۰/۷۸^{**} \qquad [۱۱]$$

ضرایب معادلات به دست آمده فوق، به زمان سپری شده از شروع آبیاری بستگی ندارد. برای هر زمان آبیاری مشخص، میزان نفوذ تجمعی را در آبیاری اول محاسبه نموده و با روابط فوق، درصد کاهش مقدار نفوذ تجمعی را در آبیاری n ام

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]

محاسبه می‌نماید. با استفاده از این مدل‌ها امکان دقیق‌تر نمودن (Adjusting) طراحی، برنامه‌ریزی آبیاری و ارزیابی سیستم آبیاری جویچه‌ای فراهم می‌گردد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش بیانگر عدم وجود اختلاف معنی‌داری در مقادیر ضرایب k و a معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیس بین آبیاری‌های مختلف در یک فصل زراعی است. مقدار سرعت نفوذ پایه و نفوذ تجمعی در آبیاری‌های متوالی در حال کاهش بوده که توسط مدل‌های لگاریتمی قابل پیش بینی است. هم‌چنین نتایج نشان داده که مدیریت استفاده از کاه و کلش به صورت رایج در مزارع کشاورزی در خاک سنگین اگرچه باعث افزایش اختلاف معنی‌داری در مقدار نفوذ تجمعی در مقایسه با خاک‌های بدون کاه و کلش می‌شود ولی تأثیری بر روند کاهشی نفوذ در طی فصل رشد ندارد. با توجه به نتایج این پژوهش و آنالیز حساسیت صورت گرفته توسط محققین دیگر، اعمال این تغییرات در هر دو مدیریت به کار گرفته شده ضروری به نظر می‌رسد که مدل‌های این مقاله برای این منظور ارائه شده است.

منابع مورد استفاده

۱. اسدی، م. ا. ۱۳۷۵. بررسی عملکرد روش‌های آبیاری سطحی تحت مدیریت زارعین. مجموعه مقالات دومین کنگره ملی مسایل آب و خاک کشور، تهران.

۲. بای‌بوردی، م. ۱۳۷۲. *اصول مهندسی آبیاری، رابطه آب و خاک*. جلد اول، چاپ ششم، انتشارات دانشگاه تهران.

۳. بای‌بوردی، م. ۱۳۷۲. *فیزیک خاک*. چاپ پنجم، انتشارات دانشگاه تهران.

۴. طباطبائی، س. ح. ۱۳۸۳. تغییرات زمانی معادله نفوذ آب در آبیاری جویچه‌ای متأثر از بافت خاک و مدیریت مزرعه. پایان نامه دکتری آبیاری و زه‌کشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

۵. طباطبائی، س. ح.، ح. فرداد، م. ر. نیشابوری و ع. لیاقت. ۱۳۸۳. تغییرات زمانی و مکانی مقطع جریان در آبیاری جویچه‌ای. علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۱۱(۲): ۱۷۱- ۱۷۹.

۶. ملک‌پور. ا. ۱۳۷۳. مدل ریاضی حرکت آب در فارو. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تأسیسات آبیاری، دانشگاه تهران.

۷. میرابوالقاسمی، ه. ۱۳۷۳. ارزیابی بازده آبیاری در تعدادی از شبکه‌های سنتی ایران. مجموعه مقالات هفتمین سمینار ملی آبیاری و زه‌کشی ایران، تهران.

8. Angers, D. A. and G. R. Mehuys. 1989. Effects of cropping on carbohydrate content and water-stable aggregation of a clay soil. Can. J. Soil. Sci. 69:375-380.
9. Cahoon, J. E. 1995. Defining furrow cross section. J. Irrig. & Drain. Eng. ASCE 121(1): 114-119 .
10. Childs, J. L., W. W. Wallender and J. W. Hopmans. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow infiltration. J. Irrig. & Drain. Eng. ASCE 119(1): 74-90 .
11. Christensen, N. B., T. L. Jones and G. J. Kauta. 1998. Infiltration characteristics under no-till and clean-till furrow irrigation. ASCE 58(5): 1495-1500.
12. Elliott, R. L. and W. R. Walker. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Trans. ASAE 25(2): 396-400.
13. Esfandiari, M. and B. L. Maheshwari. 1997. Field values of the shape factor for estimating surface storage in furrows on a clay soil. Irrig. Sci. 17(4):157-161.
14. F. A. O. 1998. Cropwat a Software for Calculating Water Requirment and Irrigation Scheduling. FAO press, Rome, Italy.
15. F. A. O. 1998. Crop Evapotranspiration, Guideline for Computing Crop Water Requirement. FAO press. Rome, Italy.
16. Hunsaker, D. J., J. Clemmens and D. D. fangmeier. 1993. Cultural and irrigation management effects on infiltration, soil roughness and advance in furrow level basins. Trans. ASAE 42 (6):1753-1762.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]

17. Linderman, C. L. and E. C. Stegman. 1971. Seasonal variation of hydraulic parameters and their influence upon surface irrigation application efficiency. Trans. ASAE 14 (5):914-923.
18. Philip, J. R. 1957. The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci. 84: 257-264.
19. Raghuwanshi, N. and W. W. Wallender. 1997. Economic optimization of furrow irrigation. J. Irrig. & Drain. Eng. ASCE 123(5): 377-385.
20. Rowel, D. L., D. Payne and N. Ahmad. 1969. The effect of the concentration and movement of clay in saline and alkali soils. Soil Sci. 20:176-188.
21. Shafique, M. S., G. V. Skogerboe. 1983. Impact of seasonal infiltration function variation on furrow irrigation performance. Conf. on Advance in Infiltration, ASAE, USA.
22. Shepard, J. J., W. W. Wallender and J. W. Hopmans. 1993. One point method for estimating furrow infiltration. Trans. ASAE 36(2):395- 404.
23. SPSS. 1999. SPSS for Windows. Ver. 9.0.0., SPSS Inc. pub., Chicago.
24. Walker, W. R. and G. V. Skogerboe. 1987. Surface Irrigation: Theory and Practice. Prentice & Hall pub. Inc., Englewood Cliffs, N. J .

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-11-26]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.1.5.5]