

## اصلاح معادله نفوذ کاستیاکوف برای اعمال تأثیر رطوبت اولیه خاک

جهانشیر محمدزاده هابیلی<sup>۱\*</sup> و منوچهر حیدرپور<sup>۲</sup>

### چکیده

در طراحی سیستم‌های آبیاری، محاسبه میزان و شدت نفوذ آب به خاک لازم است. در طی سال‌های مختلف، معادله‌های زیادی برای بیان نفوذ به صورت تابعی از زمان پیشنهاد شده‌اند. در بین این معادلات، از معادله تجربی کاستیاکوف به دلیل سادگی و قابلیت انطباق بسیار خوب بر داده‌های نفوذ، بسیار در طراحی سیستم‌های آبیاری استفاده شده است. تأثیر رطوبت اولیه خاک در این معادله مهم منظور نشده است. هدف از پژوهش حاضر، مطالعه تأثیر رطوبت اولیه خاک روی پارامترهای این معادله تجربی و اعمال تأثیر رطوبت اولیه خاک در آن است. بدین منظور، روی دو ستون خاک، آزمایش‌های نفوذ تحت بار افتان در سه رطوبت اولیه متفاوت انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که توان این معادله مقدار ثابتی بوده و مستقل از مقدار رطوبت اولیه خاک؛ ولی مقدار ضریب این معادله به شدت متأثر از رطوبت اولیه خاک است. با افزایش رطوبت اولیه خاک از صفر به رطوبت‌های نزدیک به حالت اشباع، ضریب معادله کاستیاکوف تا بیش از ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. پس از تحلیل نتایج آزمایشگاهی، تأثیر رطوبت اولیه خاک در معادله نفوذ کاستیاکوف اعمال و شیوه کاربرد معادله حاصل شده برای آزمایش‌های صحرائی نفوذ شرح داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** بار افتان، ستون خاک، جبهه رطوبتی، آبیاری

**ارجاع:** محمدزاده هابیلی ج. و حیدرپور م. ۱۳۹۸. اصلاح معادله نفوذ کاستیاکوف برای اعمال تأثیر رطوبت اولیه خاک. مجله پژوهش آب ایران. ۳۲: ۱۵۷-۱۶۳.

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

\* نویسنده مسئول: [jahan\\_mohamadzadeh@yahoo.com](mailto:jahan_mohamadzadeh@yahoo.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۲۷

## مقدمه

نفوذ، فرآیند ورود آب از هوا به داخل خاک است. بخشی از آبی که به داخل خاک نفوذ می‌کند، در اثر تبخیر و تعرق از خاک خارج و مابقی آن وارد سفره‌های آب زیرزمینی می‌شود. همچنین در صورتی که شدت بارش از شدت نفوذ آب به خاک بیشتر باشد، بخشی از بارش به صورت رواناب سطحی روی سطح زمین جاری می‌شود؛ بنابراین در صورت تخمین صحیح نفوذ، میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی، رواناب سطحی و فرسایش خاک قابل تخمین است. همچنین طراحی صحیح سیستم‌های آبیاری غرقابی و تحت فشار نیاز به تخمین درست نفوذ به صورت تابعی از زمان دارد. در طول سال‌های مختلف، معادلات نفوذ زیادی از جمله معادله گرین-آمپت (۱۹۱۱)، معادله کاستیاکوف (۱۹۳۲)، معادله فیلیپ (۱۹۵۷)، معادله کاستیاکوف اصلاح شده توسط اسمیت (۱۹۷۲) و ... برای بیان نفوذ به صورت تابعی از زمان پیشنهاد شده‌اند. در بین این معادلات، معادلات گرین-آمپت و فیلیپ دارای پایه فیزیکی هستند و در علم هیدرولوژی بیشتر استفاده می‌شوند؛ ولی معادلات کاستیاکوف و کاستیاکوف اصلاح شده تجربی بوده و به دلیل سادگی و قابلیت انطباق بسیار خوب بر داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ در طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی و تحت فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساده‌ترین شکل معادله نفوذ یک معادله توانی به شکل  $I=at^b$  است و آن را کاستیاکوف (۱۹۳۲) بیان کرده است. که  $I$  نفوذ تجمعی،  $t$  زمان و  $a$  و  $b$  پارامترهای تجربی معادله هستند. بیگی‌هرچگانی و رحیم‌زادگان (۱۳۶۸) اثر رطوبت اولیه خاک و بار آب بر فرآیند نفوذ را به صورت صحرایی در سه بافت خاک بررسی کردند. نتایج کار آنان نشان داد که تأثیر بافت و رطوبت اولیه خاک بر فرآیند نفوذ معنادار ولی تأثیر بار آب ناچیز است. محمدی و رفاهی (۱۳۸۴) پارامترهای معادلات نفوذ کاستیاکوف، فیلیپ و هورتون را توسط رگرسیون چندگانه به ویژگی‌های فیزیکی خاک ارتباط دادند. موسوی و همکاران (۱۳۸۴) همخوانی معادلات نفوذ گرین-آمپت، فیلیپ، کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح شده و هورتون را روی داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده در زمین‌های شخم‌خورده و شخم‌نخورده ارزیابی و مقایسه کردند. در بین این معادله‌ها، معادله کاستیاکوف بهترین برازش را با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد. مرادی‌پور و همکاران (۱۳۸۸)

نشان دادند که مقدار ضریب  $a$  معادله کاستیاکوف به ضریب جذبی  $S$  در معادله فیلیپ نزدیک است و این نشان‌دهنده وابستگی ضریب  $a$  به خواص فیزیکی خاک است. همچنین در تمامی آزمایش‌های نفوذی که آنان انجام دادند، مقدار ضریب  $b$  معادله کاستیاکوف بزرگ‌تر از  $0/5$  به دست آمد. هارتلی (۱۹۹۲) نیز بیان کرده که در خاک‌های همگن با رطوبت یکنواخت، مقدار ضریب  $b$  معمولاً بزرگ‌تر از  $0/5$  است. روشناس و همکاران (۱۳۹۳) قابلیت معادله کاستیاکوف را در شش کلاس بافت خاک بررسی کردند. آنان نتیجه گرفتند که مدل کاستیاکوف کارایی بسیار بالایی برای بیان کمی فرآیند نفوذ آب به خاک در اراضی آبیاری شده با پساب تصفیه شده شهری در اکثر کلاس‌های بافت خاک دارد.

به دلیل سادگی تخمین ضرایب  $a$  و  $b$ ، معادله نفوذ کاستیاکوف دارای کاربرد زیادی در علم آبیاری است. این معادله دارای دو محدودیت عمده است. اول در صورتی که مدت زمان نفوذ خیلی طولانی شود، به دلیل نبود پارامتر شدت نفوذ نهایی در معادله، منحنی این معادله به خوبی بر داده‌های نفوذ منطبق نمی‌شود (میرزایی و همکاران، ۲۰۱۳). با توجه به کوتاه بودن زمان آبیاری، این محدودیت در دقت این معادله در علم آبیاری مشکلی را ایجاد نمی‌کند و دوم این‌که تأثیر رطوبت خاک قبل از نفوذ یا رطوبت اولیه خاک در این معادله منظور نشده است. هدف از انجام این پژوهش، اصلاح معادله نفوذ کاستیاکوف برای اعمال تأثیر رطوبت اولیه خاک در آن است. بدین منظور، آزمایش‌های نفوذ تحت بار افتان روی دو ستون خاک در سه رطوبت اولیه متفاوت انجام شده است. پس از تحلیل نتایج آزمایشگاهی، تأثیر رطوبت اولیه خاک در معادله نفوذ کاستیاکوف اعمال شده است.

## مواد و روش‌ها

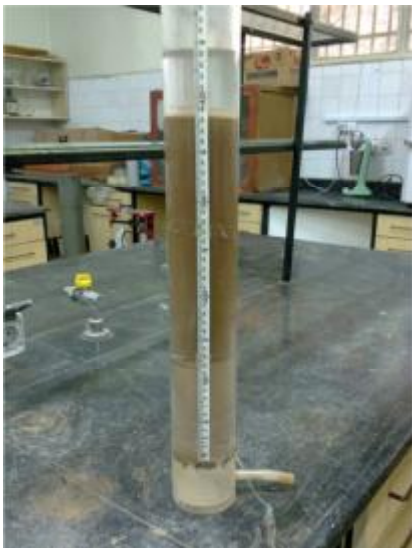
## آزمایش‌های نفوذ در آزمایشگاه

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی آزمایش نفوذ تحت بار افتان در رطوبت‌های اولیه متفاوت خاک، از یک استوانه شفاف از جنس آکرلیک به قطر داخلی ۷ سانتی‌متر و ارتفاع ۶۶/۵ سانتی‌متر استفاده شد. به دلیل اصطکاک داخلی بین ذرات ماسه، خاک‌های ماسه‌ای در اثر مرطوب شدن و از دست دادن رطوبت دچار انقباض یا انقباض نمی‌شوند؛ بنابراین، این نوع خاک‌ها برای انجام آزمایش

آن تا حد امکان کم شد. پس از زهکشی، استوانه دارای خاک مرطوب وزن و رطوبت اولیه حجمی آن  $\theta_i$  با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$\theta_i = \rho_b \frac{m_w}{m_s} \quad (۳)$$

که  $m_w$  جرم آب داخل خاک بر حسب گرم است. پس از محاسبه رطوبت ستون خاک، دوباره یک بار آبی به ارتفاعی معادل تست نفوذ قبلی روی سطح خاک قرار داده و نفوذ تجمعی آب به داخل خاک مرطوب تا زمان رسیدن جبهه رطوبتی به انتهای ستون خاک با زمان ثبت شد. پس از اتمام دومین تست نفوذ، ستون خاک دوباره با پمپ خلاء در مدت زمان کوتاه‌تری (در حدود ۱۰ دقیقه) نسبت به تست دوم زهکشی و پس از وزن کردن، مقدار رطوبت آن با استفاده از معادله (۳) محاسبه و برای بار سوم تست نفوذ تحت بار ثابت روی ستون خاک انجام شد. به دلیل طولانی‌تر بودن زمان زهکشی تست دوم نسبت به تست سوم، میزان رطوبت اولیه ستون خاک در تست دوم نسبت به تست سوم کمتر است. پس از اتمام سومین تست نفوذ، استوانه دارای خاک شماره ۱ تخلیه و استوانه خالی خشک شد. سپس در یک فرآیند مشابه، استوانه از خاک خشک شماره ۲ پر و سه تست نفوذ در سه رطوبت اولیه متفاوت روی آن انجام شد.



شکل ۱- تصویری از نفوذ آب به خاک تحت بار افتان در سیلندر آزمایشگاهی

نفوذ در مقیاس آزمایشگاهی مناسب‌ترند. در پژوهش‌های مختلفی از جمله ما و همکاران (۲۰۱۰)، محمدزاده-هابیلی و حیدرپور (۲۰۱۱) و (۲۰۱۵) نیز از این نوع خاک‌ها برای شبیه‌سازی نفوذ در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شده است. در این پژوهش از دو خاک ماسه‌ای (خاک شماره ۱ و خاک شماره ۲) با دانه‌بندی یکنواخت استفاده شده که وزن مخصوص حقیقی  $\rho_s$  آن‌ها برابر با ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب است. این دو نوع خاک، با عبور یک خاک ماسه‌ای از الک‌های مختلف به دست آمده‌اند. پس از دانه‌بندی، این خاک‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. پس از خشک شدن، ابتدا خاک شماره ۱ با استفاده از یک کیف پلاستیکی به آرامی داخل استوانه ریخته شده و با زدن ضربات ملایم یک چکش پلاستیکی به بدنه استوانه متراکم شده است. در قسمت پایینی استوانه یک توری فلزی برای جلوگیری از عبور ذرات خاک تعبیه و محفوظه پایین توری نیز برای زهکشی خاک درون استوانه و عبور هوای آزاد از انتهای ستون خاک تعبیه شده است. پس از متراکم کردن، استوانه حاوی ستون خاک وزن شده و وزن مخصوص ظاهری ستون خاک با استفاده از معادله زیر محاسبه شده است:

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_s} \quad (۱)$$

که  $\rho_b$  وزن مخصوص ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌مترمکعب،  $m_s$  جرم خاک خشک درون استوانه بر حسب گرم و  $V_s$  حجم ستون خاک بر حسب سانتی‌مترمکعب است. تخلخل ستون خاک  $\phi$  نیز با استفاده از معادله زیر حساب شده است:

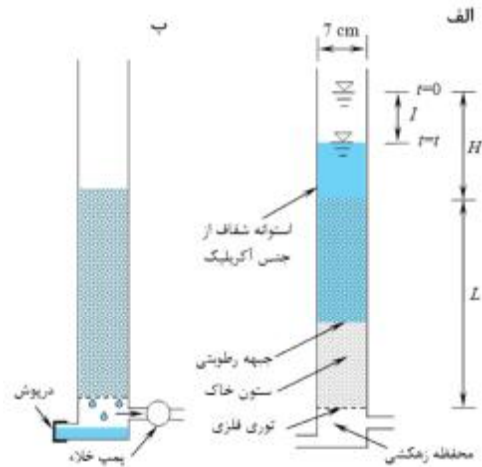
$$\phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (۲)$$

پس از محاسبه وزن مخصوص ظاهری و تخلخل خاک، مطابق تصویر شکل ۱، یک بار آبی به ارتفاع  $H$  روی سطح خاک قرار داده و نفوذ تجمعی آب به داخل خاک تا زمان رسیدن جبهه رطوبتی به انتهای ستون خاک با زمان ثبت شد. میزان کاهش سطح آب در هر زمان برابر با عمق نفوذ تجمعی  $I$  است. پارامترهای  $H$ ،  $L$  و  $I$  نیز در شکل ۲- الف مشخص شده‌اند. که  $L$  طول ستون خاک است. پس از محو شدن سطح آب از روی سطح ستون خاک، ستون خاک مرطوب مطابق شکل ۲- ب توسط یک پمپ خلاء به مدت تقریبی ۳۰ دقیقه زهکشی شده و میزان رطوبت

در جدول ۱، مشخصات فیزیکی خاک‌های شماره ۱ و ۲ و مشخصات آزمایش‌های نفوذ انجام شده روی این دو خاک آورده شده است. در این جدول،  $d$  محدوده قطر ذرات خاک است. برای هر یک از آزمایش‌های نفوذ انجام شده، میزان افزایش رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی  $\Delta\theta$  با استفاده از معادله زیر که آن را محمدزاده هابیلی و حیدرپور (۲۰۱۵) پیشنهاد داده‌اند، محاسبه و نتایج حاصل شده در جدول ۱ آورده شده است:

$$\Delta\theta = \frac{I_t}{L} \quad (۴)$$

که  $I_t$  عمق آب نفوذ یافته به داخل ستون خاک از زمان شروع آزمایش نفوذ تا زمان رسیدن جبهه رطوبتی به انتهای ستون خاک است.



شکل ۲- الف - شمایی از مدل سازی آزمایشگاهی نفوذ تحت بار افتان ب- زهکشی ستون خاک مرطوب توسط پمپ خلاء

جدول ۱- مشخصات فیزیکی دو خاک آزمایشگاهی مورد مطالعه و مشخصات آزمایش‌های نفوذ انجام شده روی آن‌ها

شماره خاک	$d$ (mm)	$L$ (cm)	$\phi$ (-)	$H$ (cm)	$\theta_i$ (cm)	$\Delta\theta$ (-)
۱	۰/۱۵-۰/۳۰	۳۸/۶	۰/۴۴۵	۱۷/۶	۰/۱۰۰	۰/۴۰۷
					۰/۱۵۰	۰/۲۵۶
					۰/۲۷۷	۰/۱۳۰
۲	۰/۰۷۵-۰/۱۵	۳۷/۸	۰/۴۶۶	۱۹/۲	۰/۱۰۰	۰/۴۰۲
					۰/۱۲۲	۰/۲۸۰
					۰/۲۷۱	۰/۱۳۳

از داخل خاک بیرون کشیده و محل آزمایش کنده شد. سپس با استفاده از یک خط‌کش فولادی، فاصله عمودی بین سطح زمین تا محل جبهه رطوبتی اندازه‌گیری و با استفاده از معادله زیر میزان افزایش رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی محاسبه شد:

$$\Delta\theta = \frac{I_t}{L_f} \quad (۵)$$

که  $I_t$  عمق آب نفوذ یافته در داخل خاک از زمان شروع آزمایش تا زمان قرائت آخر سطح آب داخل رینگ و  $L_f$  فاصله عمودی بین سطح زمین تا محل جبهه رطوبتی است. در این آزمایش مقدار  $I_t$  برابر با ۱۴ سانتی‌متر و مقدار  $L_f$  برابر با ۳۳/۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. در نتیجه با استفاده از معادله (۵)، مقدار  $\Delta\theta$  برابر با ۰/۴۱۸ محاسبه شد.

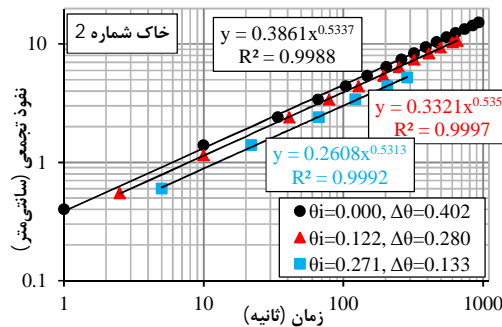
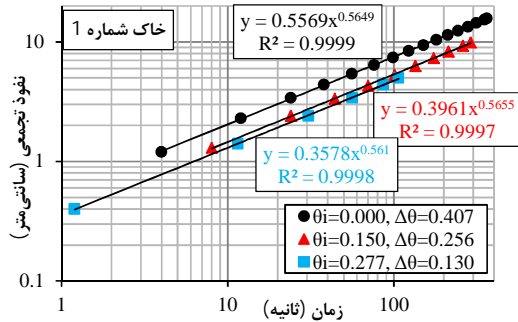
### نتایج و بحث

برای بررسی تأثیر رطوبت اولیه خاک روی پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکوف، مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ

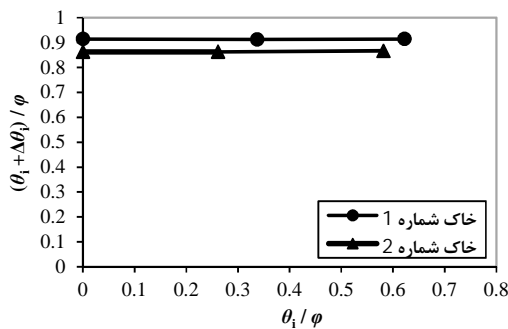
### آزمایش صحرایی نفوذ

برای توضیح چگونگی تعمیم نتایج آزمایشگاهی به آزمایش‌های صحرایی نفوذ، یک آزمایش نفوذ تحت بار افتان در یک مزرعه با بافت خاک رسی انجام شده است. در فاصله نزدیکی از محل انجام آزمایش، با استفاده از یک رینگ فولادی به حجم ۲۹۳ سانتی‌متر مکعب از خاک مزرعه برای تعیین رطوبت اولیه و تخلخل آن نمونه‌برداری شد. میزان رطوبت حجمی اولیه خاک و تخلخل آن به ترتیب، ۰/۴۳ و ۰/۵۱۰ محاسبه و آزمایش نفوذ با استفاده از رینگ مضاعف انجام شد. قطر رینگ داخلی ۲۵ سانتی‌متر و قطر رینگ خارجی ۴۰ سانتی‌متر بود. پس از هم مرکز کردن، هر دو رینگ با استفاده از یک چکش فولادی و به آرامی در حدود ۵ سانتی‌متر به داخل خاک فرو برده و سپس داخل رینگ مرکزی و فضای بین دو رینگ تا ارتفاع یکسان ۱۶ سانتی‌متر از آب پر شدند و پایین رفتن سطح آب در داخل رینگ داخلی با زمان ثبت شد. در طول آزمایش، آب به داخل رینگ‌ها اضافه نشد. همزمان با آخرین قرائت سطح آب، هر دو رینگ به سرعت

گرفت که مقدار  $\theta_i + \Delta\theta$  برای هر خاک ثابت بوده و مقدار آن مستقل از رطوبت اولیه خاک است. همچنین در طی فرآیند نفوذ، پروفیل خاک در پشت جبهه رطوبتی به طور کامل اشباع نمی‌شود.



شکل ۳- نفوذ تجمعی بر حسب زمان در مقادیر متفاوت رطوبت اولیه خاک



شکل ۴- تأثیر رطوبت اولیه خاک روی میزان رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی  $(\theta_i + \Delta\theta) / \varphi$  بر حسب  $\theta_i / \varphi$

با توجه به نتایج شکل ۳، از دو پارامتر  $a$  و  $b$  معادله نفوذ کاستیاکوف، فقط پارامتر  $a$  تحت تأثیر رطوبت اولیه خاک قرار می‌گیرد؛ در نتیجه، برای اعمال تأثیر رطوبت اولیه خاک در معادله نفوذ کاستیاکوف، فقط بایستی تأثیر رطوبت اولیه خاک را روی مقدار  $a$  بررسی کرد. بدین منظور، مقدار  $a$  در حالتی که رطوبت اولیه خاک صفر باشد، با  $a_0$  نشان داده می‌شود و آن را به عنوان یک مبنا

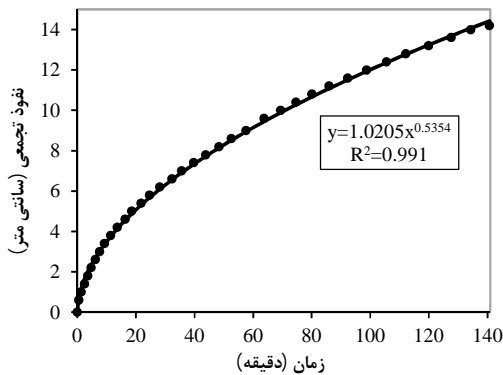
تجمعی در دو خاک آزمایشگاهی مورد مطالعه و در رطوبت‌های اولیه متفاوت خاک در دستگاه مختصات دو لگاریتمی بر حسب زمان در شکل ۳ نشان داده شده است. معادله نفوذ کاستیاکوف نیز با ضریب همبستگی تقریباً برابر با یک روی داده‌های نفوذ تجمعی برازش داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، در یک زمان مساوی، با افزایش رطوبت اولیه خاک، میزان نفوذ تجمعی آب به خاک می‌یابد؛ بنابراین یک منحنی نفوذ تجمعی واحد را نمی‌توان به عنوان منحنی نفوذ تجمعی آب به خاک در نظر گرفت و حتماً لازم است که تأثیر رطوبت اولیه خاک در معادله حاکم بر منحنی نفوذ تجمعی آب به خاک منظور شود. داده‌های نفوذ تجمعی در دستگاه مختصات دولگاریتمی در رطوبت‌های اولیه متفاوت خاک موازی هستند و مقدار توان معادله نفوذ کاستیاکوف یا  $b$  برای تمامی آزمایش‌های انجام شده روی هر خاک مساوی است؛ در نتیجه تأثیر رطوبت اولیه خاک روی مقدار  $b$  قابل صرف نظر کردن است. برای خاک شماره ۱ مقدار  $b$  برابر با  $0.56$  و برای خاک شماره ۲، مقدار  $b$  برابر با  $0.53$  است. برای هر دو خاک، با افزایش رطوبت اولیه خاک از صفر به رطوبت‌های نزدیک به حالت اشباع، ضریب  $a$  معادله کاستیاکوف تا بیش از ۳۰ درصد کاهش یافته است.

با توجه به جدول ۱، مقدار افزایش رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی  $\Delta\theta$  مقدار ثابتی نبوده است و با افزایش رطوبت اولیه خاک مقدار آن کاهش می‌یابد؛ در نتیجه تغییرات  $a$  در اثر تغییر رطوبت اولیه خاک می‌تواند ناشی از تغییرات  $\Delta\theta$  در اثر تغییر رطوبت اولیه خاک باشد. برای محاسبه  $\Delta\theta$  ابتدا بایستی میزان رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی  $(\theta_i + \Delta\theta)$  را که یکی از عوامل تأثیرگذار روی میزان نفوذ آب به خاک است، را تخمین زد. حداکثر مقدار رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی می‌تواند برابر با تخلخل خاک  $\varphi$  باشد. برای هر دو خاک آزمایشگاهی، مقادیر  $\theta_i$  و  $(\theta_i + \Delta\theta)$  بر حسب  $\varphi$  بدون بعد و سپس در شکل ۴،  $(\theta_i + \Delta\theta) / \varphi$  بر حسب  $\theta_i / \varphi$  نمایش داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۴ دیده می‌شود، برای هر دو خاک نسبت  $(\theta_i + \Delta\theta) / \varphi$  ثابت بوده است و مقدار آن که کمتر از یک، مستقل از رطوبت اولیه خاک است. به دلیل وجود هوای محبوس در پشت جبهه رطوبتی، مقدار  $(\theta_i + \Delta\theta)$  کمتر از  $\varphi$  است. در مجموع می‌توان از شکل ۴ نتیجه

با جایگزین کردن  $a$  از معادله (۷)، معادله نفوذ کاستیاکوف برای مزرعه مورد مطالعه که تأثیر رطوبت اولیه خاک نیز در آن منظور شده است به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$I = 0.9508 \left[ 1 - 0.768 \left( \frac{\theta_i}{0.461} \right) + 0.384 \left( \frac{\theta_i}{0.461} \right)^2 \right] t^{0.5354} \quad (۸)$$



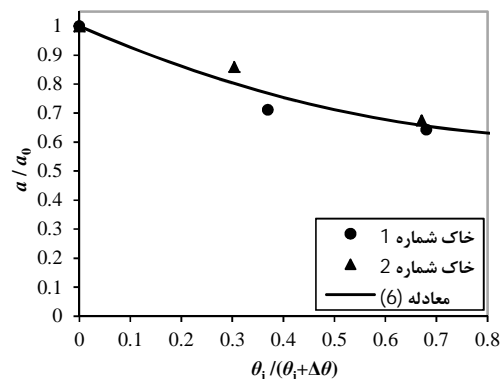
شکل ۶- داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با استفاده از رینگ مضاعف در مزرعه (نفوذ تجمعی بر حسب زمان)

#### نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد که نفوذ تجمعی آب به خاک به شدت تحت تأثیر رطوبت خاک قبل از انجام آزمایش نفوذ یا رطوبت اولیه خاک قرار می‌گیرد. در یک زمان مساوی، با افزایش رطوبت اولیه خاک، میزان نفوذ تجمعی آب به خاک به شدت کاهش می‌یابد؛ بنابراین لازم است که تأثیر رطوبت اولیه خاک در معادله نفوذ آب به خاک منظور شود. در این پژوهش، تأثیر رطوبت اولیه خاک روی پارامترهای معادله نفوذ کاستیاکوف بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقدار توان این معادله برای هر خاک، مقداری ثابت و مستقل از رطوبت اولیه خاک است. این بدان معناست که مقدار توان  $b$  معادله کاستیاکوف فقط تابعی از بافت خاک است. به‌دست آوردن این تابع نیازمند پژوهش‌های بیشتر می‌باشد؛ ولی مقدار ضریب  $a$  معادله به شدت متأثر از رطوبت اولیه خاک است. با افزایش رطوبت اولیه خاک، میزان جذب آب توسط ذرات خاک و فضای بین آن‌ها کاهش می‌یابد و این موضوع سبب کاهش مقدار نفوذ تجمعی آب به خاک و در نتیجه، کاهش مقدار ضریب  $a$  معادله نفوذ کاستیاکوف می‌شود. همانند خاک‌های مورد مطالعه هارتلی (۱۹۹۲) و مرادی‌پور و همکاران (۱۳۸۸)، مقدار توان  $b$  معادله کاستیاکوف برای خاک‌های مورد

برای تخمین  $a$  در مقادیر مختلف  $\theta_i$  گرفته می‌شود. در شکل ۵، مقادیر  $a/a_0$  هر دو خاک مورد مطالعه بر حسب  $\theta_i/(\theta_i+\Delta\theta)$  نشان داده شده است. با توجه به اینکه حداکثر رطوبت خاک در پشت جبهه رطوبتی برابر با  $(\theta_i+\Delta\theta)$  است؛ در نتیجه  $\theta_i$  بر حسب  $(\theta_i+\Delta\theta)$  بدون بعد شده است. همچنین معادله زیر با ضریب همبستگی نسبتاً خوبی روی تمامی داده‌های آزمایشگاهی برازش داده شده است ( $R^2=0.945$ ):

$$\frac{a}{a_0} = 1 - 0.768 \left( \frac{\theta_i}{\theta_i + \Delta\theta} \right) + 0.384 \left( \frac{\theta_i}{\theta_i + \Delta\theta} \right)^2 \quad (۹)$$



شکل ۵- تأثیر رطوبت اولیه خاک روی پارامتر  $a$  معادله نفوذ کاستیاکوف ( $a/a_0$ ) بر حسب  $(\theta_i/(\theta_i+\Delta\theta))$

برای تعمیم نتایج آزمایشگاهی به آزمایش‌های صحرایی نفوذ، باید از داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در یک رطوبت اولیه خاک در مزرعه استفاده شود. در شکل ۶، داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با استفاده از رینگ مضاعف در مزرعه مورد مطالعه بر حسب زمان نشان داده و همچنین، منحنی معادله نفوذ کاستیاکوف روی داده‌های اندازه‌گیری شده برازش داده شده است و انطباق خوبی بین این منحنی و داده‌های اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود.

برای اعمال تأثیر رطوبت اولیه خاک این مزرعه در معادله نفوذ کاستیاکوف، با قرار دادن  $a=1.0205$  و  $\theta_i=0.043$  و  $\Delta\theta=0.418$  در معادله (۹)، مقدار  $a_0$  برابر با  $0.9508$  محاسبه شده است. با جایگزین کردن  $a_0=0.9508$  و  $\theta_i+\Delta\theta=0.043+0.418=0.461$  در معادله (۹)، رابطه بین  $a$  و رطوبت اولیه برای مزرعه مورد مطالعه به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$a = 0.9508 \left[ 1 - 0.768 \left( \frac{\theta_i}{0.461} \right) + 0.384 \left( \frac{\theta_i}{0.461} \right)^2 \right] \quad (۷)$$

8. Kostiakov A. N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Proceeding. Transactions of the 6<sup>th</sup> Communication of the International Society of Soil Science. Part A. Moscow. 17-21.
9. Ma Y. Feng S. Su D. Gao G. and Huo Z. 2010. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D. Computers and Electronics in Agriculture. 71(1): S40-S47.
10. Mirzaee S. Zolfaghari A. A. Gorji M. Dyck M. and Ghorbani Dashtaki S. 2013. Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. Archives of Agronomy and Soil Science. 60(5): 681-693.
11. Mohammadzadeh-Habili J. and Heidarpour M. 2011. Estimating soil hydraulic parameters by using Green and Ampt infiltration equation. Journal of Hydrologic Engineering. 16(10): 772-780.
12. Mohammadzadeh-Habili J. and Heidarpour M. 2015. Application of the Green-Ampt model for infiltration into layered soils. Journal of Hydrology. 527: 824-832.
13. Philip J. R. 1957. The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Science. 843: 257-264.
14. Smith R. E. 1972. The infiltration envelope: results from a theoretical infiltrometer. Journal of Hydrology. 17: 1-21.

مطالعه در این پژوهش بزرگ‌تر از ۰/۵ به‌دست آمد. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده در این پژوهش، تأثیر رطوبت اولیه خاک در معادله نفوذ کاستیاکوف برای توصیف نفوذ تجمعی در سطح مزرعه اعمال شده است.

## منابع

۱. بیگی‌هرچگانی ح. و رحیم‌زادگان ر. ۱۳۶۸. اثر رطوبت اولیه خاک و بار آب بر فرآیند نفوذ در سه بافت مختلف خاک. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشگاه صنعتی اصفهان. ۸۹ ص.
۲. روشناس ن. کاراندیش ف. طباطبایی س. م. و شریف‌آذری س. ۱۳۹۳. بررسی قابلیت معادله کاستیاکوف در تعیین منحنی نفوذ در کلاس‌های بافتی مختلف. کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار، راهکارها و چالش‌ها با محوریت کشاورزی، منابع طبیعی، محیط‌زیست و گردشگری. تبریز. ۵ تا ۷ اسفند ۱۳۹۳. ۷ ص.
۳. محمدی م. و رفاهی ح. ۱۳۸۴. تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳۶(۶): ۱۳۹۱-۱۳۹۸.
۴. مرادی‌پور س. برومندنسب س. و کشکولی ح. ۱۳۸۸. تعیین ضرایب معادلات نفوذ و ارزیابی آن‌ها در قسمتی از اراضی کشاورزی ملاتانی با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS17. همایش ملی علوم آب، خاک، گیاه و مکانیزاسیون کشاورزی. دزفول- دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول. ۱۱ اسفند ۱۳۸۸. ۵ ص.
۵. موسوی س. نیشابوری م. و فیضی‌اصل و. ۱۳۸۴. نفوذپذیری و تعیین ضرایب معادلات نفوذ با روش‌های استوانه مضاعف، باران‌ساز مصنوعی و آبپاش. دانش کشاورزی. ۱۵(۱): ۷۹-۹۱.
6. Green W. H. and Ampt G. A. 1911. Studies on soil physics, part I: The flow of air and water through soils. Journal of Agriculture Science. 4(1): 1-24.
7. Hartly D. M. 1992. Interpretation of kostiakov infiltration parameters for borders. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. 118(1): 156-164.

