مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۹/ شماره ۲/تابستان ۱۳۸۷/ص ۱۵۲-۱۳۷

تحلیل علیت نفوذ تجمعی در جویچه‌های آبیاری

ابوالفضل ناصری و محمدرضا نیشابوری*

* به ترتیب استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان‌شرقی، نشانی: تبریز، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان‌شرقی، ص. پ. ۱۴۱-۵۳۵۵۵، تلفن: ۲۶۶۳۹۱۵(۰۴۱۲)، پیام‌نگار: ab-nasseri@azaran.org.ir ؛ و استاد گروه خاکشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.

تاریخ دریافت مقاله: ۸۲/۵/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۶/۳۱

چکیده

طراحی، ارزیابی، و مدیریت آبیاری جویچه‌ای در مزرعه مبتنی بر مشخصه‌های نفوذ آب در خاک است. تغییرات نفوذ آب در جویچه‌های آبیاری تابع تغییرات عامل‌هایی مختلف است و بدین جهت نفوذ فرایندی پیچیده خواهد بود و مدل‌سازی آن به ویژه برای تمام سطح مزرعه دشوار است. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثرهای مستقیم و غیرمستقیم متغیرهای فرصت نفوذ، رطوبت اولیهٔ خاک، عمق جریان آب در جویچه، سطح مقطع جریان، محیط خیس‌شده، و کمّی‌سازی میزان مشارکت این متغیرها در تغییرات نفوذ آب در جویچه در سطح مزرعه اجرا شده است. آزمایش‌های مزرعه‌ای برای جمع‌آوری داده‌های مشاهداتی در مزرعه‌ای به ابعاد ۱۳۰×۷۰ متر در ۵۸ واحد آزمایشی در تابستان ۱۳۸۱ و اندازه‌گیری نفوذ آب در جویچه با روش جویچه مسدود اجرا شده است. بر مبنای یافته‌های این پژوهش، سهم اثر مستقیم فرصت نفوذ، سطح مقطع جریان، رطوبت اولیهٔ خاک، محیط خیس‌شده، و عمق جریان به ترتیب برابر ۹۷/۴، ۴۲/۰، ۳۶/۵، ۱۵/۰، و ۱۲/۰ درصد اثرهای کل این متغیرهاست. ترتیب اثرهای کل متغیرها بر نفوذ تجمعی در سطح مزرعه به صورت فرصت نفوذ، عمق جریان آب در جویچه، رطوبت اولیهٔ خاک، سطح مقطع جریان، و محیط خیس‌شده بود. با بررسی سهم اثرهای مستقیم و غیرمستقیم متغیرها بر نفوذ تجمعی، فرصت نفوذ، رطوبت اولیه خاک، و سطح مقطع جریان به عنوان مولفه‌های اصلی نفوذ تجمعی از جویچه آبیاری تشخیص داده شدند. بر این مبنا، با استفاده از روش‌های آماری یک مدل غیرخطی برای توصیف نفوذ تجمعی از سطح مزرعه با داده‌های اندازه‌گیری‌شده به دست آمد. این مدل حدود ۸۹ درصد از تغییرات نفوذ تجمعی از سطح مزرعه را توجیه می‌کند.

واژه‌های کلیدی

رطوبت اولیه خاک، عمق جریان، فرصت نفوذ، محیط خیس‌شده، نفوذ تجمعی، نفوذسنجی با روش جویچه مسدود

مقدمه

آبیاری سطحی از قدیمی‌ترین و رایج‌ترین شیوه‌های آبیاری اراضی کشاورزی در ایران است. آبیاری جویچه‌ای نوعی آبیاری سطحی و روشی بسیار مناسب برای آبیاری گیاهان ردیفی است. یکی از عواملی که در طرح، ارزیابی، و مدیریت این روش آبیاری نقش اساسی دارد، ویژگی‌های نفوذپذیری خاک است. نفوذ آب از جویچه که شامل نفوذ موضعی و نفوذ در سطح مزرعه است می‌تواند زمان‌های پیشروی و پسروی جریان، حجم رواناب، حجم آب نفوذ یافته، و یکنواختی توزیع آب را در یک نوبت آبیاری تحت تاثیر قرار دهد (Jobling & Turner, 1973). از سوی دیگر، بازده کاربرد آب به تغییرات پارامترهای معادلهٔ نفوذ

© 2011,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

بسیار حساسیت دارد. با توجه به پیچیده‌بودن فرایند نفوذ آب از جویچه، مدل‌سازی قطعی[1] آن مشکل است و برای کمی‌کردن تغییرات نفوذتجمعی معمولاً از روابط تجربی استفاده می‌شود که تابعی از فرصت نفوذ است (Fonteh & Podmore, 1993; Trout, 1992) ضرائب روابط تجربی مفهوم فیزیکی ندارند و معمولاً با تحلیل رگرسیون یا روش دو نقطه‌ای برازش می‌شوند. از معادلات تجربی پرکاربرد در آبیاری جویچه‌ای، می‌توان معادلات کوستیاکف و کوستیاکف - لوئیس را نام برد. عیب معادله کوستیاکف در این است که کوواریت‌هایی مانند رطوبت اولیهٔ خاک و میزان تراکم خاک را نمی‌توان در این معادله دخالت داد و به نظر بعضی از محققان تعدیل معادلهٔ کوستیاکف- لوئیس با یک متغیر مکانی مانند محیط خیس‌شده، ضرورت دارد. همچنین، فرض اساسی اغلب روش‌های براورد پارامترهای نفوذ این است که تمام سطح مزرعه از نظر خصوصیات خاک همگن است و هیچ تغییرات مکانی در آن وجود ندارد. هنگامی که تغییرات خصوصیات خاک روندی معنی‌دار داشته باشد اعمال این فرض می‌تواند نتایج گمراه‌کننده‌ای به بار آورد (Clemmens *et al*., 2001).

نتایج پژوهش‌ها در خصوص نفوذ آب از جویچه نشان می‌دهد که تغییرات نفوذ تابع متغیرهایی مختلف است. طبق یافته‌های فانگمیر و رامسی (Fangmeier & Ramsey, 1978)، تغییرات سرعت نفوذ آب نسبت به محیط خیس‌شده خطی است. بر اساس نتایج آزمایش‌های ایزدی و والندر (Izadi & Wallender, 1985) بیانگر آن است که در جویچه‌های با جریان ثابت سرعت نفوذ آب با محیط خیس‌شده همبستگی دارد و تغییرات محیط خیس‌شده یک سوم از تغییرات نفوذ آب از جویچه را توجیه می‌کند و دو سوم باقیمانده از تغییرات نفوذ شامل تغییرات خصوصیات خاک و خطاهای اندازه‌گیری است. میزان مشارکت سایر متغیرهای موثر در تغییرات نفوذ بررسی نشده است (Tarboton & Wallender, 1989). در معادلهٔ نفوذ کوستیاکف اصلاح‌شده، فرض می‌شود محیط خیس‌شده ثابت باشد؛ برای براورد سرعت نفوذ آب از جویچه به صورت تابعی از محیط خیس‌شده موضعی، استرلکف[2] و سوزا[3] به نقل از باتیستا و والندر (Bautista & Wallender, 1993) روش ساده‌ای را به کار بردند. معادلهٔ بسط‌یافتهٔ اخیر به همراه معادلهٔ کوستیاکف اصلاح‌شده به منظور براورد سرعت نفوذ با مدلی شبیه‌سازی اینرسی صفر به‌وسیله شوانکل[4] و والندر[5] به نقل از باتیستا و والندر (Bautista & Wallender, 1993) به کار برده شد و نتیجهٔ حاصل دلالت بر این دارد که معادلهٔ کوستیاکف اصلاح‌شده زمان پیشروی را بیش از زمان واقعی براورد می‌کند و آب نفوذ یافته در بالادست جویچه وقتی که محیط خیس‌شده ثابت باشد کمتر است و وقتی محیط خیس‌شده متغیر در نظر گرفته شود آب نفوذیافته در پایین‌دست بیشتر است. بر اساس یافته چیلدز و همکاران (Childs *et al*., 1993) هنگامی که پارامترهای نفوذ متغیر و فرصت نفوذ ثابت باشد، ضریب تغییرات عمق نفوذ بین ۱/۵ تا ۵ برابر بزرگ‌تر از وقتی است که پارامترها ثابت و فرصت نفوذ متغیر باشد. برابر یافتهٔ انسیزو مدیان و همکاران (Enciso-Median *et al*., 1998)، میزان رطوبت اولیهٔ خاک و سلهٔ سطحی بر نفوذ موثر هستند. بررسی منابع مشخص می‌کند که میزان مشارکت همزمان متغیرهای مختلف از جمله فرصت نفوذ، رطوبت اولیهٔ خاک، عمق جریان، سطح مقطع جریان، و محیط خیس‌شده در تغییرات نفوذ در جویچه‌های آبیاری به طور دقیق بررسی نشده است. از این رو، هدف اصلی از این تحقیق بررسی اثرهای مستقیم و غیرمستقیم متغیرهای

1- Deterministic 2- Strelkoff 3- Souza 4- Schwankl 5- Wallender

فرصت نفوذ، رطوبت اولیهٔ خاک، عمق جریان، سطح مقطع جریان، محیط خیس‌شده، و کمّی‌کردن میزان تاثیر این متغیرها در تغییرات نفوذ آب از جویچه‌های آبیاری است.

مواد و روش‌ها

تحلیل علیت[1]

تحلیل علیت شیوه‌ای برای بررسی روابط سببی متغیرها با استفاده از رگرسیون است. این روش را در سال ۱۹۳۰ سوال‌رایت[2] به نقل از دیلون و گلدیستین (Dillon & Goldstein, 1984) پیشنهاد کرد. تحلیل علیت، اغلب برای آگاهی از ماهیت همبستگی متغیرهای استاندارد شده به کار می‌رود (Moghaddam, 1999). در فرایند تحلیل علیت از دو نوع متغیر برون‌رو[3] و متغیر درون‌رو[4] استفاده می‌شود (Dillon & Goldstein, 1984). متغیر برون‌رو متغیری است که تغییرات آن با متغیرهای بیرونی مدل تعیین می‌شود. متغیر درون‌رو متغیری است که تغییرات آن یا با متغیرهای برون‌رو یا دیگر متغیرهای درون‌رو در مدل تعیین می‌شود. در مدل رگرسیون چندگانه استاندارد، متغیر پاسخ (یا متغیر وابسته) درون‌رو و متغیر براوردگر برون‌رو است. فرضیات تحلیل علیت عبارت‌اند از:

الف- رابطهٔ بین متغیرهای مدل به‌صورت خطی و جمعی[5] است و روابط منحنی‌الخط و ضربی[6] را شامل نمی‌شود،

ب- همهٔ باقیمانده‌ها با همدیگر ناهمبسته‌اند،

ج- مدلی برگشتی یک‌طرفه، مورد نظر است،

د- متغیرهای درون‌رو در یک مقیاس فاصله‌ای اندازه‌گیری شده‌اند،

هـ- متغیرهای مشاهداتی بدون اشتباه اندازه‌گیری شده‌اند،

در این تحقیق، تحلیل علیت برای نفوذ تجمعی در جویچه‌های آبیاری که در آن نفوذ تجمعی به عنوان متغیر درون‌رو و فرصت نفوذ، سطح مقطع جریان، رطوبت اولیهٔ خاک، محیط خیس‌شده و عمق جریان آب در جویچه‌ها به عنوان متغیرهای برون‌رو در نظر گرفته شده است. با استفاده از شکل ۱ می‌توان رابطهٔ بین متغیرهای درون‌رو و برون‌رو استانداردشده را به صورت زیر نوشت:

$$Z^* = P_{Z^*\tau^*}\tau^* + P_{Z^*A^*}A^* + P_{Z^*\theta_i^*}Q_i^* + P_{Z^*Wp^*}Wp^* + P_{Z^*Dg^*}D_{g^*} + e_{z^*} \qquad (۱)$$

که در آن، τ^*، A^*، θ_i^*، W_p^*، و D_g^* = به ترتیب شکل استاندارد متغیرهای فرصت نفوذ، سطح مقطع جریان، رطوبت اولیهٔ خاک، محیط خیس‌شده، و عمق جریان در جویچه‌هاست. کمیت‌های $P_{z^*\tau^*}$، $P_{Z^*A^*}$، $P_{Z^*\theta_i}$، $P_{Z^*wp^*}$ و $P_{Z^*Dg^*}$ = ضرایب علیت هستند؛ و e_{Z^*}= باقیماندهٔ علیت است.

ضریب همبستگی (r_{kZ^*}) بین نفوذ تجمعی استانداردشده با یکی از متغیرهای برون‌رو به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$r_{kz^*} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} k_j z_j^* \qquad (۲)$$

که در آن،

N= تعداد مشاهدات؛ و k می‌تواند فرصت نفوذ و سطح مقطع جریان، رطوبت اولیهٔ خاک، محیط خیس‌شده و عمق جریان آب در جویچه باشد. از جانشینی رابطهٔ ۱ و ۲ برای فرصت نفوذ می‌توان نوشت:

1- Path Analysis
2- Sewal Wright
3- Exgenous Variable
4- Endogenous Variable
5- Additive
6- Multiplied

$$r_{\tau^*z^*} = P_{z^*\tau^*} + P_{z^*A^*}r_{\tau^*A^*} + P_{Z^*\theta_i^*}r_{\tau^*\theta i^*} + P_{z^*wp^*}r_{\tau^*wp^*} + P_{z^*Dg^*}r_{\tau^*Dg^*} \quad (۳)$$

که در استنتاج رابطهٔ فوق از روابط زیر استفاده شد.

$$E(\tau^* e_{Z^*}) = 0 \quad (۴)$$

$$E(\tau^* \tau^*) = 1 \quad (۵)$$

E در رابطه‌های ۴ و ۵ نمایندهٔ امید ریاضی مقادیر است.

بنابراین خواهیم داشت:

$$r_{\tau^*A^*} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \tau_j^* A_j^* \quad (۶)$$

$$r_{\tau^*\theta_i^*} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \tau_j^* \theta_{ij}^* \quad (۷)$$

$$r_{\tau^*Wp^*} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \tau_j^* Wp_j^* \quad (۸)$$

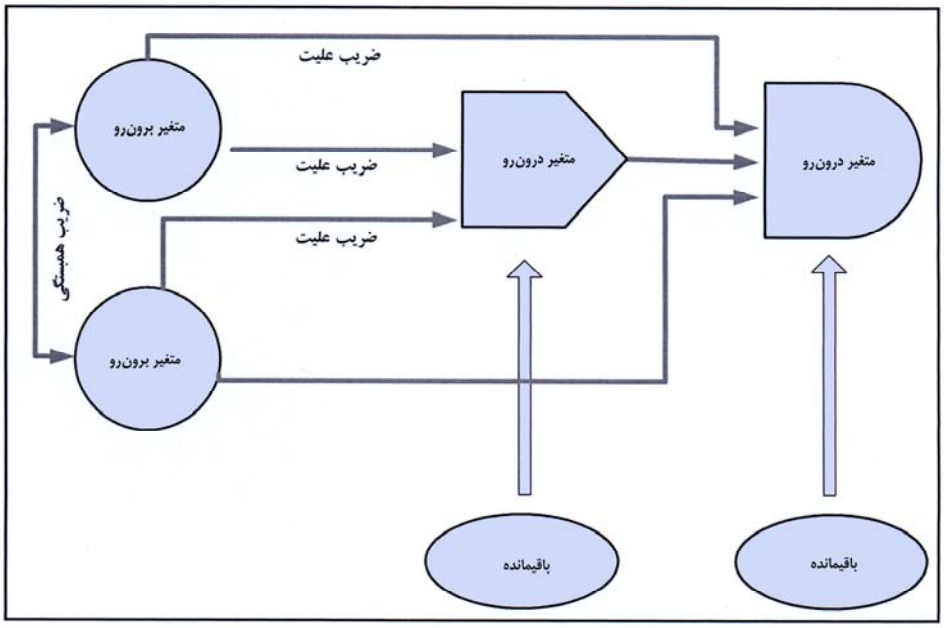
$$r_{\tau^*Dg^*} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} \tau_j^* Dg_j^* \quad (۹)$$

در روابط ۳ و ۶ تا ۹، $r_{\tau^*Z^*}$، $r_{\tau^*A^*}$، $r_{\tau^*\theta_i^*}$، $r_{\tau^*Wp^*}$، و $r_{\tau^*Dg^*}$ = ضریب همبستگی فرصت نفوذ با Z^*، A^*، Wp^* و D_g^* است. با استفاده از این روش ضریب همبستگی بین متغیرهای درون‌رو و برون‌رو به صورت کلی و عمومی زیر ارائه می‌شود:

$$r_{\lambda Z^*} = \sum P_{Z^*k} r_{k\lambda} \quad (۱۰)$$

که در آن،

λ= متغیر استاندارد برون‌رو؛ و r_{kk} برابر یک است. در رابطهٔ اخیر، P_{Z^*k}= اثر مستقیم k روی Z^*؛ و $P_{Z^*k}r_{k\lambda}$= اثر غیر مستقیم k روی Z^* از طریق متغیرهای درون‌رو است. اثر کل برابر مجموع اثرهای مستقیم و غیرمستقیم است.



شکل ۱- مدل تحلیل علیت با دو متغیر درون‌رو و دو متغیر برون‌رو

عبارت‌های باقیمانده علیت را می‌توان از رابطهٔ زیر براورد کرد:

$$Pe_{Z^*} = (1 - R^2_{Z^*.\tau^*A^*\theta_i^*Wp^*Dg^*})^{0.5} \qquad (۱۱)$$

که درآن، $R^2_{Z^*.\tau^*A^*\theta_i^*Wp^*Dg^*}$ = مربع همبستگی چندگانه متغیر برون‌رو با همه متغیرهایی که بر آن موثرند (هم متغیر درون‌رو و هم متغیر برون‌رو)؛ و Pe_{Z^*} = اثرهای باقیمانده است.

مواد

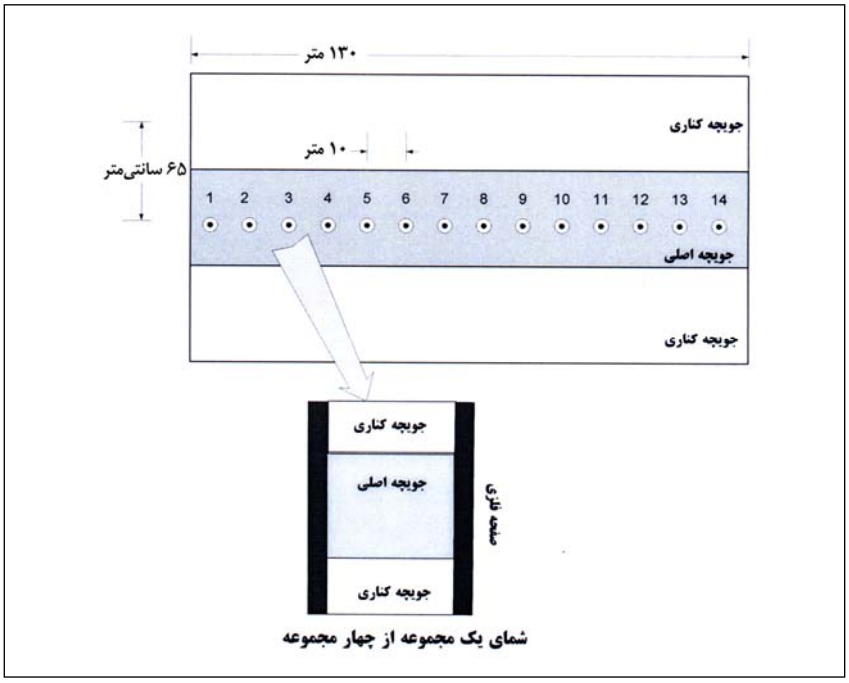
آزمایش‌های مزرعه‌ای در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دانشگاه تبریز واقع در اراضی کرکج با موقعیت جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۷ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۵ دقیقه عرض شمالی و با ارتفاع ۱۳۶۰ متر از سطح دریا در تابستان ۱۳۸۱به اجرا درآمد. مزرعه‌ای به ابعاد ۱۳۰×۷۰ متر با میانگین شیب طولی برابر با ۱/۵۶ درصد انتخاب شد. در این مزرعه جویچه‌هایی به طول ۱۳۰ متر و به فاصله ۶۵ سانتی‌متر و در چهار دسته سه‌تایی ایجاد شد. جویچه‌های وسطی از هر دسته سه تایی، به عنوان جویچهٔ اصلی و دو جویچه کناری به عنوان جویچه‌های محافظ بودند. خاک مزرعه تا عمق ۶۵ سانتی‌متر لوم شنی و سطح خاک عاری از پوشش گیاهی بود. مشخصه‌های فیزیکی خاک مزرعه در جدول ۱ ارائه شده است (Nasseri *et al*., 2004). آزمایش‌ها در مقطعی از سه جویچه به طول ۸۵ سانتی‌متر به تعداد ۵۸ و به فواصل ۱۰ متر انجام گرفت. مدت زمان اجرای هر آزمایش نفوذپذیری در هر مقطع، ۲۴۰ دقیقه بود. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده شامل نفوذپذیری با روش جویچه‌های مسدود و رطوبت اولیهٔ خاک با روش اشتعال با الکل (Gardner, 1976)، و حجم آب نفوذیافته در هر مقطع آزمایشی طی زمان بود؛ و مقادیر رطوبت اولیهٔ خاک، جرم مخصوص ظاهری مرطوب، سطح مقطع جویچه، محیط خیس‌شده، و ارتفاع ناخالص آب آبیاری به عنوان عامل‌های کوواریت در هر مقطع اندازه‌گیری و ثبت شد. رطوبت اولیهٔ خاک و جرم مخصوص ظاهری مرطوب خاک تا عمق ۲۰ سانتی‌متری از خاک تعیین شد. عمق ناخالص آب آبیاری بر اساس ظرفیت زراعی خاک، رطوبت اولیهٔ خاک، جرم مخصوص خاک، و بازده کاربرد براورد گردید و در هنگام آزمایش نفوذپذیری اعمال شد. بازده کاربرد آب و عمق فعال ریشه برای جذب آب در اولین آبیاری به ترتیب برابر ۷۰ درصد و ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Walker & Skogerboe, 1987).

روش‌ها

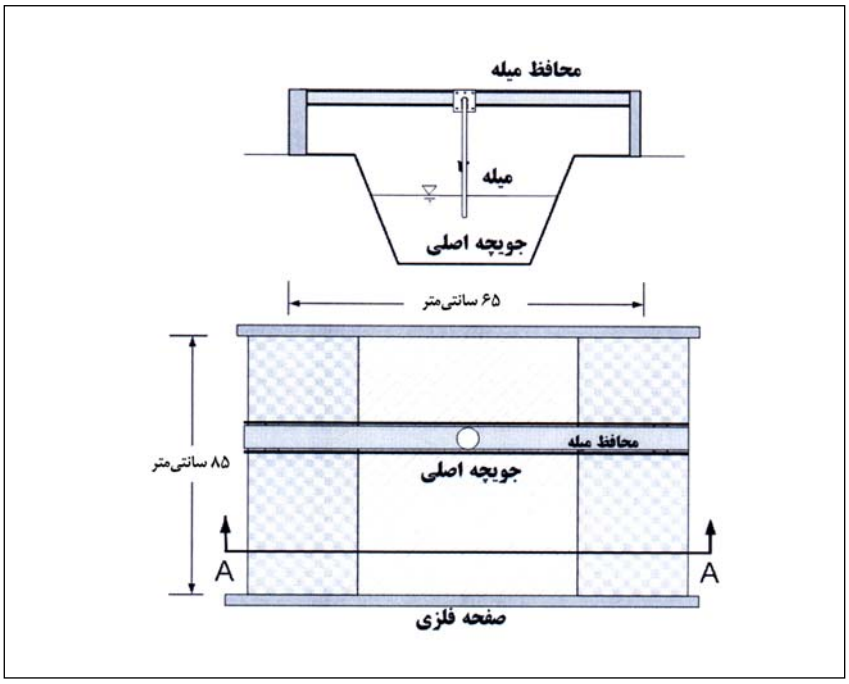
روش اجرای آزمایش‌های نفوذپذیری با روش جویچه‌های مسدود[1] و برابر توصیه‌های تاربوتون و والندر (Tarboton & Wallender, 1989)، واکر (Walker, 1989)، تروت (Trout,1992)، اویون آرتی و همکاران (Oyonarte *et al*., 2002)، واکر و اسکوگربو (Walker & Skogerboe, 1987) به شرح زیر بود. مقطع مسدود با یک صفحه پلاستیکی پوشانده شد. دو صفحهٔ لبه تیز در هر دو طرف جویچه در جهت عمود بر سوی جویچه‌ها به فاصلهٔ ۸۵ سانتی‌متر از هم، با چکش به زمین کوبیده شد. شاخص سطح آب و پایهٔ نگهدارندهٔ آن در جهت عمود بر مقطع جویچه کار گذاشته شد. به هر سه جویچهٔ اصلی و فرعی حجم معلومی از آب ریخته شد. مشاهدات اصلی پس از کشیدن سریع صفحهٔ پلاستیک از واحد آزمایشی آغاز شد. از این زمان به بعد به آب اجازهٔ ورود به خاک داده شد. برای جایگزینی آب نفوذیافته به طور منظم، آب به هر سه جویچه افزوده شد. پس از ۲۴۰

1- Blocked Furrow Infiltration

دقیقه، آزمایش خاتمه یافت و نتـایج بـه‌صـورت حجـم آب نفوذیافتـه بـه ازای زمـان مرتـب شـد. ایـن آزمـایش در ۵۸ واحد آزمایشی در سطح مزرعه اجرا شد. در شکل‌های ۲ و ۳، آرایش کلی مزرعه، جویچه‌ها و واحدهای آزمایـشی و نیز شمای اندازه‌گیری نفوذ بـا روش جویچـۀ مـسدود در هر واحد آزمایشی ارائه شده است.



شکل ۲- آرایش کلی مزرعۀ آزمایشی با جویچه‌ها و مقطع آزمایشی



شکل ۳- شمای اندازه‌گیری نفوذ با روش جویچه مسدود در هر واحد آزمایشی

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های فیزیکی خاک مزرعه محل اجرای آزمایش (Nasseri *et al.*, 2004)

	دانه‌بندی خاک						پارامترهای فیزیکی خاک			پارامترهای هیدرولیکی خاک		
افق	عمق (سانتی‌متر)	سنگریزه (درصد)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	جرم مخصوص حقیقی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	تخلخل کل (درصد)	رطوبت اشباع (درصد وزنی)	رطوبت در حد ظرفیت مزرعه (درصد وزنی)
A_P	۰-۲۵	۸/۴	۶۹/۵	۲۴/۰	۶/۵	لوم شنی	۱/۶۱	۲/۵۰	۳۵/۶	۲۱/۷	۱۲/۲
BK_1	۲۵-۳۸	۱۴/۳	۵۵/۵	۲۹/۷	۱۴/۸	لوم شنی	۱/۳۷	۲/۵۶	۴۶/۵	۳۵/۱	۱۸/۲
BK_2	۳۸-۶۵	-	۶۳/۸	۲۷/۸	۸/۴	لوم شنی	۱/۲۸	۲/۵۶	۵۰	۳۹/۳	۲۳/۲
C_1	۶۵-۹۰	۱۲/۰	۸۰/۴	۱۶/۲	۳/۴	شنی لوم	۱/۵۷	۲/۵۰	۳۷/۲	۲۵/۷	۱۷/۱
C_2	>۹۰	۳۹/۵	۹۳/۱	۶/۶	۰/۳	شنی	-	۲/۵۰	-	-	-

نتایج و بحث

در جدول ۲ مقادیر میانگین و انحراف معیار متغیرهای مستقل اندازه‌گیری‌شده و در شکل ۴ نحوهٔ تغییرات رطوبت اولیهٔ خاک، محیط خیس‌شده، جرم مخصوص ظاهری مرطوب، عمق جریان آب در جویچه‌ها، سطح مقطع جریان و نفوذ تجمعی در طول و عرض جویچه نشان داده شده است.

جدول ۲- میانگین و انحراف معیار متغیرهای مستقل

	رطوبت اولیهٔ خاک (درصد وزنی)	جرم مخصوص ظاهری مرطوب (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	عمق جریان آب در جویچه (سانتی‌متر)	سطح مقطع جریان (سانتی‌متر مربع)	محیط خیس‌شده (سانتی‌متر)
میانگین	۸/۶۱	۱/۴۲	۲/۴۷	۱۰/۹۶	۱۱/۰۴
انحراف معیار	۳/۴۵	۰/۰۸	۰/۸۳	۵/۸۶	۴/۲۵

به منظور کمّی‌کردن میزان مشارکت متغیرهای مستقل و بررسی اثرهای مستقیم و غیرمستقیم این متغیرها بر نفوذ تجمعی از جویچه در سطح مزرعه از تحلیل علیت استفاده شد. برای تنظیم مدل اولیه که شامل متغیرهای مستقل باشد از تحلیل رگرسیون چندگانه با روش حداقل مربعات و فن‌های "انتخاب پیشرو" و "حذف پسرو" استفاده شد (Kohler, 2002; Moghaddam, 1999). در این مدل‌سازی‌ها شکل استانداردشدهٔ متغیرها به کار رفت. تفاضل هر مشاهده نفوذ تجمعی از میانگین آن تقسیم بر انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتی به عنوان صورت استاندارد داده‌ها در نظر گرفته شد (Kohler, 2002; Moghaddam, 1999). در تنظیم مدل‌ها، نفوذ تجمعی در سطح مزرعه به پنج متغیر مستقل فرصت نفوذ (T)، رطوبت اولیهٔ خاک (W_0)، سطح مقطع جویچه (A)، محیط خیس‌شده (W_P)، و عمق جریان آب در جویچه (D_g) ارتباط داده شد. مدل حاصل به صورت زیر بود:

$$Z^* = 0.5869T^* + 0.5271A^* - 0.2787Dg^* + 1225Wp^* + 0.00202Wo^* \quad (۱۲)$$

ضریب تبیین رابطهٔ فوق برابر ۷۱/۷۱ درصد و تعداد مشاهدات برابر ۲۳۶۵ داده بود. در این مدل، صورت استاندارد متغیرها با علامت ستاره (*) نشان داده شد. تحلیل واریانس این مدل در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس این جدول مدل براوردشده در سطح احتمال کمتر از یک درصد معنی‌دار است. تحلیل علیت بر مبنای این مدل صورت گرفت و نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. دیاگرام تحلیل علیت نفوذ تجمعی از جویچه‌های مزرعه در شکل ۵ ارائه شده است.

جدول ۳- تحلیل واریانس مدل نفوذ تجمعی استاندارد

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات	F	مقدارP
مدل	۲۵۲/۷۶۹	۵	۵۰/۵۵۴	۲۹۶/۶۳	۰/۰۰۰
باقیمانده	۹۹/۷۰۰	۵۸۵	۰/۱۷۰		

نتایج تحلیل علیت نشان می‌دهد که اثر مستقیم فرصت نفوذ بر نفوذ تجمعی، در مقایسه با سایر متغیرها، بیشترین است. اثرهای مستقیم فرصت نفوذ و سطح مقطع جریان مثبت و اثر مستقیم رطوبت اولیه منفی است.

اثرهای مستقیم عمق آب و محیط خیس‌شده بر نفوذ تجمعی قابل توجه نیست. برابر یافته‌ها، اثر مستقیم فرصت نفوذ ۹۷/۶ درصد از کل اثرهای فرصت نفوذ (حاصل نسبت اثر مستقیم به جمع اثرها یعنی ۰/۷۷۱ به ۰/۷۹) را شامل می‌شود. با افزایش فرصت نفوذ، مقدار نفوذ تجمعی افزایش می‌یابد. اثر غیرمستقیم فرصت نفوذ از طریق سایر متغیرها قابل توجه نیست.

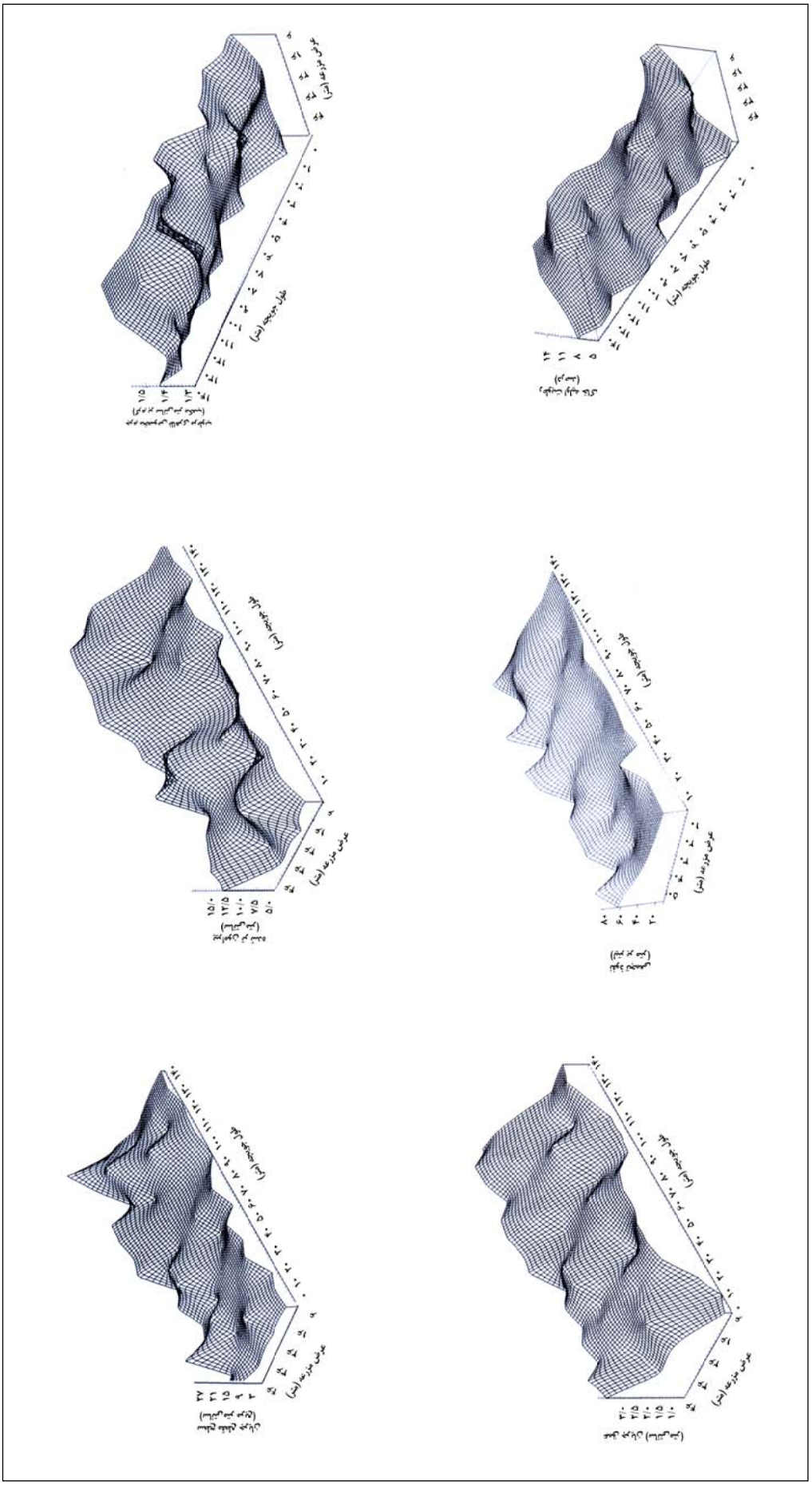
اثر مستقیم سطح مقطع جریان نزدیک به ۴۲ درصد از کل اثرهای آن را شامل می‌شود. به عبارت دیگر، از کل اثر سطح مقطع جریان بر تغییرات نفوذ، ۴۲ درصد مستقیم و ۵۸ درصد غیر مستقیم است. از بین عوامل غیر مستقیم در مشخصهٔ سطح مقطع جریان، رطوبت اولیهٔ خاک بیشترین اثر را داشته است و مقدار آن حدود ۲۷/۲ درصد از کل اثرهای سطح مقطع جریان را شامل می‌شود. اثر غیرمستقیم سطح مقطع جریان از طریق فرصت نفوذ و محیط خیس‌شده تقریباً یکسان بوده است و اثر از طریق عمق جریان در مرتبهٔ دوم، پس از رطوبت اولیه خاک، قرار دارد.

جدول ۴- تجزیهٔ ضرائب همبستگی به اثرهای مستقیم و غیرمستقیم برای نفوذ تجمعی در سطح مزرعه

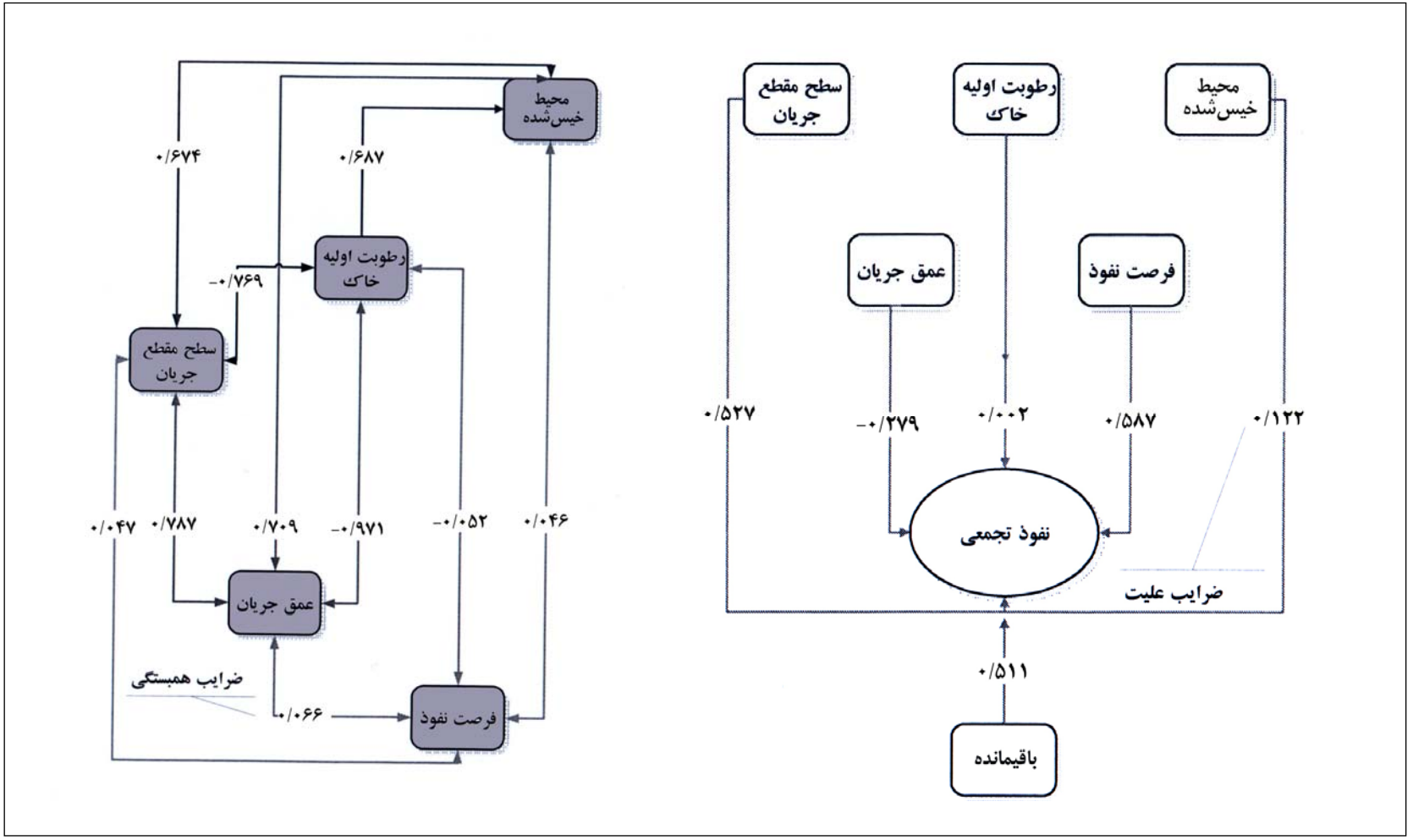
اثرهای مستقیم و غیرمستقیم	مقدار اثر
۱- مشخصه: فرصت نفوذ	
اثر مستقیم	۰/۷۷۱
اثر غیر مستقیم از طریق:	
سطح مقطع جریان	۰/۰۶۰
عمق جریان آب در جویچه	۰/۰۰۳
محیط خیس‌شده	۰/۰۰۲
رطوبت اولیه خاک	۰/۰۰۶
جمع اثرها	۰/۷۹
۲- مشخصه: سطح مقطع جریان	
اثر مستقیم	۰/۱۴۶
اثر غیر مستقیم از طریق:	
رطوبت اولیه خاک	۰/۰۹۵

ادامه جدول ۴-

اثرهای مستقیم و غیرمستقیم	مقدار اثر
فرصت نفوذ	۰/۰۳۴
عمق جریان آب در جویچه	۰/۰۴۲
محیط خیس شده	۰/۰۳۰
جمع اثرها	۰/۳۴۹
۳- مشخصه: رطوبت اولیه خاک	
اثر مستقیم	-۰/۱۳۱
اثر غیر مستقیم از طریق:	
سطح مقطع جریان	-۰/۱۱۳
عمق جریان آب در جویچه	-۰/۰۴۵
محیط خیس‌شده	-۰/۰۳۲
فرصت نفوذ	-۰/۰۴۱
جمع اثرها	-۰/۳۵۹
۴- مشخصه: محیط خیس شده	
اثر مستقیم	۰/۰۴۵
اثر غیر مستقیم از طریق:	
سطح مقطع جریان	۰/۰۹۹
عمق جریان آب در جویچه	۰/۰۳۸
رطوبت اولیه خاک	۰/۰۸۵
فرصت نفوذ	۰/۰۳۴
جمع اثرها	۰/۳۰۱
۵- مشخصه: عمق جریان آب در جویچه	
اثر مستقیم	۰/۰۴۵
اثر غیر مستقیم از طریق:	
سطح مقطع جریان	۰/۱۱۵
رطوبت اولیه خاک	۰/۱۲۶
محیط خیس‌شده	۰/۰۳۲
فرصت نفوذ	۰/۰۵
جمع اثرها	۰/۳۷
اثرهای باقیمانده	۰/۵۱۱
R^2 تصحیح‌شده	۰/۷۱۵



شکل ۴- رطوبت اولیه خاک، محیط خیس‌شده، جرم مخصوص ظاهری مرطوب، عمق جریان آب در جویچه، سطح مقطع جریان، و نفوذ تجمعی در طول جویچه‌ها و عرض مزرعه



شکل ۵- دیاگرام علیت نفوذ تجمعی از جویچه آبیاری در مزرعه

اثر مستقیم رطوبت اولیهٔ خاک بر تغییرات نفوذ تجمعی از جویچه منفی است و با ثابت‌بودن سایر متغیرها بالابودن رطوبت اولیهٔ خاک موجب کاهش نفوذ تجمعی از جویچه می‌شود. از بین عوامل مختلف، اثر غیرمستقیم رطوبت اولیه از طریق سطح مقطع جریان قابل توجه است و حدود ۳۱/۵ درصد از کل اثرها آن را شامل می‌شود. اثر غیر مستقیم رطوبت اولیه از طریق محیط خیس‌شده و عمق جریان و فرصت نفوذ تقریباً یکسان بوده است.

اثر مستقیم محیط خیس‌شده بر نفوذ تجمعی ۱۵ درصد از کل اثرهای آن بوده و اثر غیرمستقیم آن از طریق سطح مقطع جریان و رطوبت اولیهٔ خاک قابل توجه است. اثر غیر مستقیم آن از طریق عمق جریان و فرصت نفوذ تقریباً یکسان بوده است. اثر مستقیم عمق جریان آب در جویچه حدود ۱۲/۲ درصد اثرها را شامل می‌شود و اثر غیر مستقیم آن از طریق سطح مقطع جریان و رطوبت اولیهٔ خاک قابل توجه است. تأثیر از طریق عوامل اثر غیر مستقیم فرصت نفوذ و محیط خیس‌شده در مرتبه بعدی اهمیت قرار دارد.

بنابراین فرصت نفوذ و رطوبت اولیهٔ خاک و سطح مقطع جریان، مولفه‌های اصلی نفوذ تجمعی از جویچه آبیاری تشخیص داده شدند. تغییرپذیری مکانی رطوبت اولیهٔ خاک یا سطح مقطع جریان در سطح مزرعه حتی در زمانی مشخص و ثابت، موجب غیریکنواختی در توزیع آب و براوردهای مبتنی بر مکان برای بازده کاربرد آب خواهد شد.

ترتیب اثرها کل (مستقیم و غیر مستقیم) مولفه‌ها یا متغیرها بر نفوذ تجمعی از جویچه در سطح مزرعه به صورت فرصت نفوذ با اثر کل برابر با ۰/۷۹ و عمق جریان آب در جویچه با اثر کل برابر با ۰/۳۷ و رطوبت اولیه خاک با اثر کل برابر با ۰/۳۵۹- و سطح مقطع جریان با اثرکل برابر با ۰/۳۴۹ و محیط خیس‌شده با اثرکل برابر با ۰/۳۰۱ است.

معمولاً برای تعدیل معادلهٔ کاستیاکف لوئیس از یک متغیر مکانی و اغلب نیز از محیط خیس‌شده استفاده می‌شود. به‌دلیل کم‌بودن اثر کل آن نسبت به سایر مولفه‌ها و نیز اثر مستقیم غیر قابل توجه آن بر نفوذ تجمعی، ضرورت اعمال یا واردکردن سایر مولفه‌ها را در معادلات تجربی به جای محیط خیس‌شده پدیدار می‌کند.

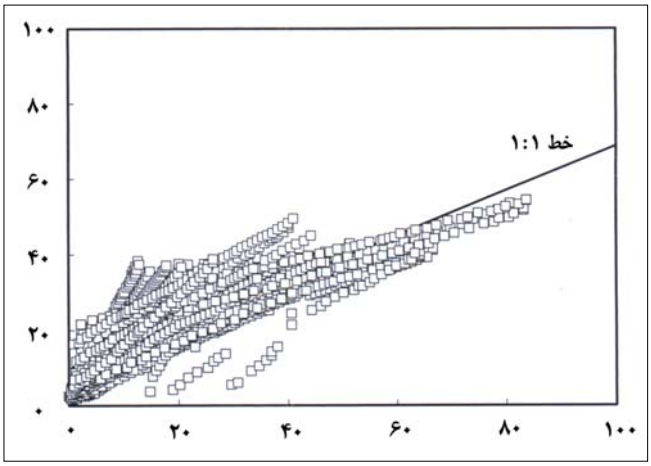
بنابراین با داده‌های مشاهداتی، مدل به صورت زیر که تابعی از مولفه‌های مؤثر در نفوذ تجمعی از جویچه باشد با تحلیل رگرسیون به دست آمد:

$$Z = 418.078T^{0.8} + 108173.00Wo^{-1.56} + 0.062665A^{3.32} \quad (۱۳)$$

ضریب تبیین این مدل برابر ۸۸/۶۱ به دست آمد. این به آن معنی است که حدود ۸۹ درصد از تغییرات نفوذ تجمعی در سطح مزرعه با مدل حاصل قابل توجیه است. نتایج تحلیل واریانس بر این دلالت دارد که اثر $T^{۰/۸}$ و $Wo^{-۱/۵۶}$ و $A^{۳/۳۲}$ در سطح احتمال کمتر از ۲ درصد معنی‌دار است. بنابراین، از اثربخشی آنها در توجیه تغییرات نفوذ تجمعی در سطح مزرعه اطمینان حاصل است. در جدول ۵، تحلیل واریانس مدل پیشنهادی ارائه شده است. بر اساس این جدول مدل براوردشده در سطح احتمال کمتر از ۱ درصد معنی‌دار است. داده‌های براوردشده با این مدل با داده‌های مشاهده شده در یک مختصات ترسیم و در شکل ۶ نشان داده شده است. همخوانی نسبتاً خوبی بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و براوردشده مشاهده می‌شود.

جدول ۵- تحلیل واریانس مدل نفوذ تجمعی

منابع تغییر	مجموع مربعات	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات	F	مقدارP
مدل	۱/۴۱۲ E۱۲	۳	۴/۱۰۷E۱۱	۵۹۵۳/۸۷	۰/۰۰۰
باقیمانده	۱/۸۱۴ E۱۱	۲۲۹۵	۷/۱۰۷E ۷		



شکل ۶- مقایسهٔ داده‌های مشاهده و براوردشده نفوذ تجمعی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور کمّی‌سازی میزان مشارکت متغیرهای مستقل از جمله: فرصت نفوذ، رطوبت اولیهٔ خاک، عمق جریان آب در جویچه، سطح مقطع جریان، و محیط خیس‌شده و بررسی اثرهای مستقیم و غیرمستقیم این متغیرها روی نفوذ تجمعی، از تحلیل علیت استفاده شد. نتایج این تحلیل نشان داد:

- اثرهای مستقیم فرصت نفوذ و سطح مقطع جریان مثبت و اثرمستقیم رطوبت اولیه منفی است. اثرهای مستقیم عمق جریان آب در جویچه و محیط خیس‌شده بر نفوذ تجمعی قابل توجه نیست. بر اساس یافته‌های این تحقیق سهم اثر مستقیم فرصت نفوذ، سطح مقطع جریان، رطوبت اولیهٔ خاک، محیط خیس‌شده، و عمق جریان آب در جویچه به ترتیب برابر ۹۷/۴، ۴۲/۰، ۵/ ۳۶، ۱۵/۰، و ۱۲/۰ درصد اثرهای کل این متغیرها است.
- ترتیب اثرهای کل متغیرها بر نفوذ تجمعی به صورت فرصت نفوذ (با ۰/۷۹) و عمق جریان آب در جویچه (با ۰/۳۷)، رطوبت اولیهٔ خاک با ۰/۳۵۹-)، سطح مقطع جریان (با ۰/۳۴۹) و محیط خیس‌شده (با ۰/۳۰۱) است.
- بنابر یافته‌های تحقیق فرصت نفوذ و رطوبت اولیهٔ خاک و سطح مقطع جریان مولفه‌های اصلی نفوذ تجمعی از جویچه آبیاری تشخیص داده شدند. بنابراین، بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری‌شده یک مدل جمعی غیرخطی به صورت تابعی از فرصت نفوذ، رطوبت اولیه و سطح مقطع جریان برای توصیف نفوذ تجمعی از سطح مزرعه به دست آمد. این مدل حدود به ۸۹ درصد از تغییرات نفوذ تجمعی از سطح مزرعه را توجیه می‌کند.
- برای فعالیت‌های تحقیقاتی و طراحی، ضرورت دارد به‌جای استفاده از روابط تجربی نفوذ تجمعی که فقط

تابعی از فرصت نفوذ هستند از رابطه‌ای استفاده شود که ترکیبی از سه مولفهٔ فرصت نفوذ و رطوبت اولیهٔ خاک و سطح مقطع جریان باشد. نباید از نظر دور داشت اندازه‌گیری این سه مولفه، در مقایسه با یک مولفه، مستلزم وجود امکانات و زمان است.

- آزمون نتایج تحقیق حاضر برای سایر بافت‌های دیگر خاک و دارای گیاهان با ریشه‌های سطحی گسترده و ریشه‌های عمیق مفید به نظر می‌رسد.

مراجع

Bautista, E. and Wallender, W. W. 1993. Numerical calculation of infiltration in furrow irrigation simulation Models. J. Irrig. Drain. Eng. 119(2): 286-294.

Childs, J. I., Wallender, W. W. and Hopmans, J. W. 1993. Spatial and seasonal variation of furrow irrigation. J. Irrig. Drain. Eng.119(1): 74-90.

Clemmens, A. J., Eisenhaure, D. E. and Maheswari, B. I. 2001. Infiltration and roughness equations for irrigation: How form influences estimation. ASAE Annual International Meeting.

Dillon, W. R. and Goldstein, M. 1984. Multivariate Analysis: Methods and Applications. John Wiley & Sons, Inc.

Elliott, R. I. and Walker, W. R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Trans. ASAE. 25(2): 396-400.

Enciso-Median, J. Martin, D. and Eisenhauer, D., 1998. Infiltration model for furrow irrigation. J. Irrig. Drain Eng. 124(2): 73-80.

Fangmeier, D. D. and Ramsey. M. K. 1978. Intake characteristics of irrigation furrows. Trans. ASAE. 21(4): 696-700.

Fonteh, M. F. and Podmore, T. 1993. A physically based infiltration models for furrow irrigation. Agric. Water Manage. 23, 271-284.

Gardner, W. H. 1976. Water Content. In Methods of Soil Analysis. In: Black, C. A., Evans, D. D., Ensminger, L. E., White, J. L., Clark, F. E. and Dinauer, R. C. (Eds.). Physical and Mineralogical Properties. 4th Ed. Madison, WI: Agronomy Society.

Izadi, B. and Wallender, W. W. 1985. Furrow hydraulic characteristics and infiltration. Trans. ASAE. 28(6): 1901-1908.

Jobling, G. A. and Turner, A. K. 1973. Physical model study of border irrigation. ASCE J. Irrig. Drain Eng. 99, 493-510.

Kohler, H. 2002. Statistics for Business and Economics. Thomson Learning, Inc.

Moghaddam, M. 1999. Advanced Engineering Statistics. Faculty of Agriculture. Universirty of Tabriz. Tabriz. Iran. (in Farsi)

Nasseri, A., Neyshabori, M. R., Fakherifard, A., Mogaddam, M. and Nazemi, A. H. 2004. Field-measured furrow infiltration functions. Turkish J. Agric. Forestry. 28(2): 93-101.

Oyonarte, N. A., Mateos, L. and Palomo, M. J. 2002. Infiltration variability in furrow irrigation. J. Irrig. Drain. Eng. 128(1): 26-33.

Tarboton, K. C. and Wallender, W. W. 1989. Field-wide furrow infiltration variability. Trans. ASAE. 32(3): 913-918.

Trout, T. J. 1992. Flow velocity and wetted perimeter effects on furrow infiltration. Trans. ASAE. 35(3): 855-862.

Walker, W. R. 1989. Guidelines for desiging and evaluating surface irrigation systems. Irrigation and Drainage paper No. 45. FAO. Rome. Italy.

Walker, W. R. and Skogerboe, G. V. 1987. Surface Irrigation: Theory and Practice. Prentice-Hall, Inc. New Jersey.

AERI JAER *Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.9/No.2/Summer 2008/P: 137-152*

Path Analysis of Cumulative Infiltration in Furrows

A. Nasseri[*] and M. R. Neyshabori

[*] Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Agricultural and Natural Resources Research Center, P. O. Box: 53555-141, Tabriz, Iran. E-mail: ab-nasseri@azaran.org.ir

Soil infiltration characteristics affect the design, evaluation and management of furrow irrigation over a field. On the other hand, different variables influence furrow infiltration, making infiltration modeling for a field a complex process. This study was conducted to investigate the direct and indirect effects of all variables affecting furrow infiltration. The blocked furrow method was used to measure furrow infiltration for a field with soil of sandy loam. Results showed that infiltration time was the most effective variable affecting cumulative infiltration by directly and significantly affecting furrow infiltration. The relative contribution of the filtration time to the furrow infiltration was seven times more than the contribution of the wetted perimeter and 2.5 times that of the flow section area. An additive and nonlinear model was proposed to describe field-wide cumulative infiltration using the observed data. The proposed model described approximately 89% of the variation in field-wide cumulative infiltration.

Key Words: Cumulative Infiltration, Furrows, Opportunity Time