

ارزیابی و مقایسه دو مدل کودآبیاری جویچه‌ای در تخمین غلظت نیتрат رواناب

ابراهیم وطن‌خواه^۱ و حامد ابراهیمیان^{۲*}

چکیده

کودآبیاری از جمله روش‌هایی است که نسبت به روش‌های سنتی پخش کود دارای مزیت‌هایی از جمله انعطاف‌پذیری، توانایی توزیع یکنواخت و راندمان کاربرد بالا است. به دلیل محدودیت‌های زمانی و هزینه‌های اجرای مزارع آزمایشی، مدل‌های شبیه‌سازی کودآبیاری برای رسیدن به وضعیت مطلوب مدیریتی توسعه داده شدند. هدف این مطالعه شبیه‌سازی غلظت نیترات در رواناب انتهای مزرعه در سامانه آبیاری جویچه‌ای معمولی، یک در میان ثابت و متغیر با مدل کودآبیاری جویچه‌ای SURCOS و مدل عباسی و همکاران و مقایسه این دو مدل بود. بدین منظور از داده‌های مزرعه در دو واقعه کودآبیاری در طول فصل رشد ذرت استفاده شد. مقدار R^2 ، RMSE و NRMSE در شبیه‌سازی غلظت نیترات رواناب برای مدل عباسی و همکاران و مدل SURCOS به ترتیب $۰/۹۸۹$ ، $۱۳/۵$ میلی‌گرم بر لیتر و $۴/۳$ درصد و $۰/۹۱۳$ ، $۱۷/۰$ میلی‌گرم بر لیتر و $۵/۴۵$ درصد به دست آمد. نتایج نشان داد که هر دو مدل توانستند غلظت نیترات در رواناب را به طور موفقیت‌آمیزی شبیه‌سازی کنند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، جریان آب، شبیه‌سازی، نیترات، SURCOS.

ارجاع: وطن‌خواه ا. و ابراهیمیان ح. ۱۳۹۶. ارزیابی و مقایسه دو مدل کودآبیاری جویچه‌ای در تخمین غلظت نیترات رواناب. مجله پژوهش آب ایران. ۲۵: ۴۳-۵۰.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.
۲- استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج.

نویسنده مسئول: ebrahimian@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۰۲

مقدمه

کشاورزی پایدار با جلوگیری از صدمات زیست‌محیطی، کارآمدی اقتصادی و قابل قبول بودن از دیدگاه اجتماعی، محافظت از زمین، آب، گیاهان و ژنتیک حیوانات را بر عهده دارد. کشاورزی به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شیرین در مقیاس جهانی و به عنوان عامل تنزل کیفیت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی از طریق فرسایش خاک و مواد شیمیایی (مانند کودها و سموم)، سبب شده تا به عنوان یکی از عوامل دخیل در کیفیت و کمیت آب مورد توجه قرار گیرد. کود به عنوان تأمین کننده مواد غذایی گیاهان زراعی به شمار می‌رود و تلفات آن به عنوان تهدیدی برای محیط‌زیست است. بنابراین باید از ابزارهای مطلوب مدیریتی برای کاربرد کود استفاده کرد. کودآبیاری از جمله روش‌هایی است که نسبت به روش پخش سنتی کود دارای مزیت‌هایی از جمله انعطاف‌پذیری، توانایی توزیع یکنواخت و راندمان کاربرد بالا (که نتیجه آن رشد بیشتر گیاهان زراعی در طول مزرعه است)، تلفات کمتر به دلیل افزایش فشار اسمزی (کاهش تمرکز کود) و امکان اضافه کردن مواد غذایی در چند مرحله از فصل رشد است. استفاده از کودآبیاری تلفات کود و خطرات مربوط به محیط‌زیست را کنترل می‌کند (ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۴).

کودآبیاری سطحی هم برای کود مایع و هم برای کود جامد می‌تواند اجرا شود (پلایان و فاسی، ۱۹۹۷). آزمایش راندمان کاربرد کود در آبیاری سطحی به دلیل سختی کار در مزرعه فقط در تعدادی از پژوهش‌های استفاده شد (سبیلون و مرکلی، ۲۰۰۴؛ ابراهیمیان و پلایان، ۲۰۱۴). به دلیل محدودیت‌های زمانی و هزینه‌ای اجرای مزارع آزمایشی؛ مدل‌های شبیه‌سازی کودآبیاری برای رسیدن به وضعیت مطلوب مدیریتی توسعه داده شدند. اولین مدل کودآبیاری سطحی مدل SIFUM بود که از سوی بولت و همکاران (۱۹۹۴) برای آبیاری موی توسعه داده شد. پلایان و فاسی (۱۹۹۷) و گارسیا-ناوارو و همکاران (۲۰۰۰) یک مدل بعدی برای کودآبیاری سامانه نواری توسعه دادند که انتقال املاح را به ترتیب بر اساس انتقال و انتقال - انتشار شبیه‌سازی کردند. آنها گزارش دادند که زمانی افزایش زمان تزریق کود، تأثیر زیادی روی انتشار آن داشت. عباسی و همکاران (۲۰۰۳) یک مدل بعدی کودآبیاری جویچه‌ای را توسعه دادند. آنها

از مدل اینرسی صفر در آبیاری جویچه‌ای و معادله انتقال - انتشار استفاده کردند. مدل نتایج رضایت‌بخشی در جویچه‌های انتهایی باز و بسته ارائه داد. در شبیه‌سازی آبیاری جویچه‌ای یک درمیان نیز مدل به خوبی نتایج را شبیه‌سازی کرد (ابراهیمیان و همکاران، ۲۰۱۳). سبیلون و مرکلی (۲۰۰۴) یک مدل کودآبیاری جویچه‌ای را بر اساس مدل هیدرودینامیک در آبیاری سطحی توسعه داده و از معادلات انتقال - انتشار در انتقال املاح استفاده کردند. آنها گفتند که انتشار، تأثیر بسیار کمی روی انتقال املاح داشت. دو شاخص راندمان کاربرد املاح و یکنواختی را برای شناسایی بهتر زمان شروع تزریق کود و مدت آن برای خاک‌های متفاوت پیشنهاد کردند. بورگته و همکاران (۲۰۰۷) دو روش عددی که در یکی انتقال جریان و املاح را با هم و دیگری جدا از هم شبیه‌سازی می‌کند را با یکدیگر مقایسه و گزارش کردند که در نظر گرفتن توأم انتقال جریان و املاح سبب نتایج بهتری می‌شود. بورگته و همکاران (۲۰۰۹) یک مدل کودآبیاری جویچه‌ای با در نظر گرفتن انتقال توأم املاح و جریان را توسعه دادند. پریا و همکاران (۲۰۱۰) یک مدل انتقال - انتشار را برای کودآبیاری جویچه‌ای برای انتقال کود توسعه و اعتبارسنجی کردند.

مدل‌های مختلف کودآبیاری از سوی پژوهش‌گران مختلف در سال‌های اخیر ارائه شده است. اما این مدل‌ها با یکدیگر مورد مقایسه و ارزیابی نشده‌اند. بنابراین هدف از این بررسی مقایسه مدل کود آبیاری جویچه‌ای SURCOS (بورگته و همکاران، ۲۰۰۹) با مدل کودآبیاری جویچه‌ای عباسی و همکاران (۲۰۰۳) در شبیه‌سازی غلظت نترات در رواناب در آبیاری جویچه‌ای معمولی و یک در میان بود. مدل‌های مذکور از نظر معادله حاکم بر انتقال املاح و حل آن، معادله نفوذ و ضریب انتشار با هم متفاوت هستند که از این‌رو مقایسه شدند.

مواد و روش‌ها

مدل کودآبیاری SURCOS

بورگته و همکاران (۲۰۱۴) مدل کودآبیاری جویچه‌ای SURCOS را ارائه دادند. معادلات حاکم بر جریان آب و انتقال املاح از سامانه یک بعدی از متوسط سطح مقطع عرضی مایع و بقای جرم محلول، موازنه مومنوم در جریان مستقیم، نفوذ و انتقال املاح در کانال‌های ذوزنقه‌ای شکل،

در این مدل شیب اصطکاکی با معادله قانون گاکلر-مانینگ محاسبه می‌شود (بورگته و همکاران، ۲۰۱۴). شیب اصطکاکی برای یک جویچه با مقطع عرضی دوزنقه ای به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S_f = \frac{n^2 Q |Q| (B_0 + 2h\sqrt{1+Z^2})^{4/3}}{(B_0 h + Z h^2)^{10/3}} \quad (۵)$$

که در آن S_f شیب اصطکاکی، n ضریب زبری مانینگ Q دبی جریان ($L^3 T^{-1}$), B_0 عرض پایینی جویچه (L), h عمق جویچه (L) و Z شیب افقی بدنه جویچه است. ضریب انتشار (K_l) از رابطه رادرفورد (۱۹۹۴) محاسبه می‌شود:

$$K_l = 10\sqrt{gPA|S_f|} \quad (۶)$$

مدل کودآبیاری عباسی و همکاران

برای شبیه‌سازی رواناب سطحی و انتقال املاح روی سطح خاک از مدل عباسی و همکاران (۲۰۰۳) برای کودآبیاری جویچه‌ای استفاده شد. معادلات حاکم بر جریان آب از روش اینرسی- صفر بر اساس معادلات سنت-ونانت (معادلات (۷) و (۸)) با در نظر گرفتن یک حجم کنترل و محاسبه عددی به روش نیوتن-رافسون حل شد. این مدل می‌تواند برای سامانه‌های آبیاری جویچه‌ای و نواری در شرایط انتها باز و انتها بسته اجرا شود (عباسی و همکاران، ۲۰۰۳).

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (۷)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (۸)$$

که در آن Q دبی جریان ($L^3 L^{-1}$), A مساحت جریان (L^2), Z حجم آب نفوذ کرده در واحد طول مزرعه ($L^3 L^{-1}$), y عمق جریان (L), S_0 شیب مزرعه (بی‌بعد)، S_f شیب اصطکاکی هیدرولیکی (بی‌بعد)، t زمان (T), x مکان (L), است.

از معادله کوستیاکوف- لوییس برای تخمین نفوذ آب در خاک استفاده شد.

$$Z = kt^a + f_0 t \quad (۹)$$

که در آن Z حجم آب نفوذ کرده در واحد طول مزرعه (L^2), τ فرصت زمان نفوذ (T), a و K (L^2/min^a) است. برای مدل‌سازی انتقال املاح از معادله یک بعدی (کونگ و همکاران، ۱۹۸۰) استفاده شد:

تشکیل می‌شود که به صورت زیر می‌تواند بیان شود:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial l} = \vec{I} + \vec{S}^c + \frac{\partial D}{\partial l} \quad (۱)$$

که در آن U بردار متغیر قانون بقاء، t زمان، F بردار شار جریان، l مختصات طولی، I بردار نفوذ، S^c بردار ترم منبع و D انتشار املاح است که این پارامترهای برداری به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\vec{I} = \begin{pmatrix} -PI \\ 0 \\ PI \end{pmatrix}, \vec{u} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ K_l A \frac{ds}{dl} \end{pmatrix} \quad (۲)$$

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} Q \\ gI_1 + \frac{Q^2}{A} \\ Qs \end{pmatrix}, \vec{S}^c = \begin{pmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{u} = \begin{pmatrix} A \\ Q \\ AS \end{pmatrix}$$

A سطح مقطع عرضی خیس شده، Q دبی، S سطح مقطع عرضی غلظت کود، g شتاب جاذبه زمین، S_0 شیب طولی زمین، S_f شیب طولی اصطکاکی طولی، K_l ضریب طولی انتشار املاح، I سرعت نفوذ، P مقطع عرضی محیط خیس شده و I_1 نیروی فشار را نشان می‌دهد. معادلات زیر اساس محاسبه حجم نفوذ یافته در طول جویچه قرار گرفت:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = PI, \frac{\partial f}{\partial t} = PIs \quad (۳)$$

که در آن a حجم آب نفوذ کرده در واحد طول جویچه و Φ جرم املاح نفوذ کرده در واحد طول جویچه است. t و I در بالا تعریف شد.

سرعت نفوذ با استفاده از معادله کوستیاکوف- لوییس اصلاح شده از سوی بورگته و همکاران (۲۰۰۹) محاسبه می‌شود:

$$I = I_c + Ka \left(\frac{a}{KW} \right)^{\frac{a-1}{a}} \quad (۴)$$

که در آن K ثابت کوستیاکوف و a توان معادله کوستیاکوف-لوییس، هردو پارامترهای تجربی بوده که با توجه به نوع خاک، آب خاک و تراکم خاک به دست می‌آیند و W فاصله جویچه‌ها و I_c سرعت نفوذ نهایی در خاک اشباع برای مدت زمان طولانی است.

سه رژیم آبیاری جویچه‌ای معمولی، یک در میان ثابت و متغیر (به ترتیب CFI، FFI و AFI) اعمال شد. مشخصات کودآبیاری مانند دبی ورودی، زمان قطع جریان، زمان شروع تزریق و مدت زمان تزریق کود به مدل داده شد. در همه موارد قابلیت حلالیت کود ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. مقدار I_c با استفاده از جریان ورودی و خروجی مشخص شد (واکر و اسکوگرو، ۱۹۸۷). مقادیر a و k با استفاده از روش دو نقطه‌ای (الیوت و واکر، ۱۹۸۲) به دست آمد (جدول ۱). ضریب زبری مانینگ برای جویچه‌های بدون پوشش گیاهی برای مدل عباسی و همکاران ۰/۰۴ فرض شد (واکر و اسکوگرو، ۱۹۸۷) و برای مدل SURCOS ضریب گاکلر- مانینگ براساس پیشنهاد ارائه دهنده این مدل ۰/۰۱۵ در نظر گرفته شد. برای مشخص شدن تأثیر ضریب انتشارپذیری (D_x) روی غلظت نیترات در رواناب در مدل عباسی و همکاران (۲۰۰۳) با مقادیر مختلفی اجرا شد (۱ تا ۱۰۰ سانتی‌متر). تأثیر ضریب انتشارپذیری روی غلظت نیترات قابل چشم‌پوشی بود. در این پژوهش مقدار ۰/۱ متر بر اساس معادله گزارش شده از سوی عباسی و همکاران (۲۰۰۳) در نظر گرفته شد. برای بهتر شدن نتایج شبیه‌سازی، مقادیر پارامترهای نفوذ کوستیاکوف- لوییس برای هر تیمار آبیاری و هر کودآبیاری مشخص شد. غلظت نیترات نمونه‌های آب به روش اسپکتروفتومتری در آزمایشگاه کیفیت آب گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران تعیین شد. همه‌ی پارامترها در جدول ۱ آورده شد.

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(AUC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (AK_x \frac{\partial C}{\partial x}) \quad (10)$$

که در آن C و U به ترتیب متوسط سطح مقطع عرضی غلظت ($L^3 T^{-1}$) و سرعت ($L T^{-1}$)، K_x ضریب انتشار طولی ($L^2 T^{-1}$) است. ضریب انتشار برای انتقال املاح در جریان‌های درون جویچه به صورت زیر عنوان شد:

$$K_x = D_x U_x + D_d \quad (11)$$

که در آن D_x ضریب انتشارپذیری (L)، D_d ضریب پخشیدگی ملکولی در آب ($L^2 T^{-1}$) و U_x سرعت جریان درون جویچه در مکان x ($L T^{-1}$) است. در حل معادله یک بعدی از روش تفاضل محدود کرانک- نیکلسون استفاده شد. حداکثر گام‌های زمانی و مکانی با استفاده از عددهای بی‌بعد پکلت (P_e) و کورانت (C_r) برای از بین بردن ناپایداری عددی محاسبه شد. بیشینه این عددها به ترتیب ۵ و ۱ توصیه شد. شرایط مرزی بالادست دبی جریان ورودی برای آب و غلظت نیترات برای کود بود. شرایط مرزی پایین دست جریان یکنواخت رواناب برای آب و شیب صفر غلظت برای کود بود. برای شرایط مرزی اولیه عمق و سرعت جریان و غلظت کود صفر در نظر گرفته شد.

پارامترهای ورودی به مدل‌ها

در این پژوهش برای ارزیابی مدل‌های کودآبیاری جویچه‌ای از داده‌های بررسی‌های مزرعه‌ای ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۲) استفاده شد. آزمایش‌های مزرعه‌ای در مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در کرج انجام شد. کودآبیاری در

جدول ۱- مقدار پارامترهای ورودی به مدل‌های کودآبیاری عباسی و همکاران و SURCOS

کودآبیاری دوم			کودآبیاری اول			پارامترها
CFI	FFI	AFI	CFI	FFI	AFI	
۰/۳۳۸	۰/۳۳۸	۰/۳۳۸	۰/۲۶۲	۰/۲۶۲	۰/۲۶۲	جریان ورودی (لیتر بر ثانیه)
۳۶۰	۳۶۰	۳۶۰	۲۴۰	۲۴۰	۲۴۰	زمان قطع جریان (دقیقه)
.	.	.	۴۸/۲	۴۹/۷	۵۱/۳	شروع زمان تزریق (دقیقه)
۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰	مدت تزریق (دقیقه)
						پارامترهای هیدرولیکی ^۱
۰/۱۹۲	۰/۳۰۲	۰/۲۶	۰/۱۹۲	۰/۳۰۲	۰/۳۱۱	$r_1 (m^{3.33-2r_1})$
۲/۶۲۸	۲/۷۳۳	۲/۶۹۴	۲/۶۲۸	۲/۷۳۳	۲/۷۳۳	s_2 (بی‌بعد)
						پارامترهای هندسی جویچه ^۲
۱/۰۷۵	۱/۰۶۴	۰/۸۹۸	۱/۰۷۵	۱/۰۶۴	۰/۹۳۴	$s_1 (m^{1/2s})$
۱/۵۸۴	۱/۵۸۷	۱/۴۹۱	۱/۵۸۴	۱/۵۸۷	۱/۵۴۴	s_2 (بی‌بعد)
						پارامترهای کوستیاکوف-لوییس
۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۶۱	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۳۷	$K (m^3 min^{-a} m^{-1})$
۰/۰۶۶	۰/۱۳۷	۰/۰۹۴	۰/۱۷۴	۰/۱۲۵	۰/۱۳۷	a (بی‌بعد)
۰/۰۰۰۶۸	۰/۰۰۰۱۳۲	۰/۰۰۰۱۴۰	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۱۰۶	۰/۰۰۰۱۱۲	$I_c (m^3 min^{-1} m^{-1})$

ارزیابی مدل‌ها

که در آن P_i مقادیر پیش‌بینی شده، Q_i مقادیر واقعی است، n تعداد نمونه‌ها و m میانگین مقادیر مشاهده شده است. از بین پارامترهای آماری ذکر شده RMSE میزان خطای مدل و NRMSE سطح تخمین را نشان می‌دهد. مقدار NRMSE کمتر از ۱۰ نشان دهنده عملکرد عالی مدل، بین ۱۰ تا ۲۰ نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل و بیشتر از ۲۰ نشان از عملکرد ضعیف مدل است (جامیسون و همکاران، ۱۹۹۱).

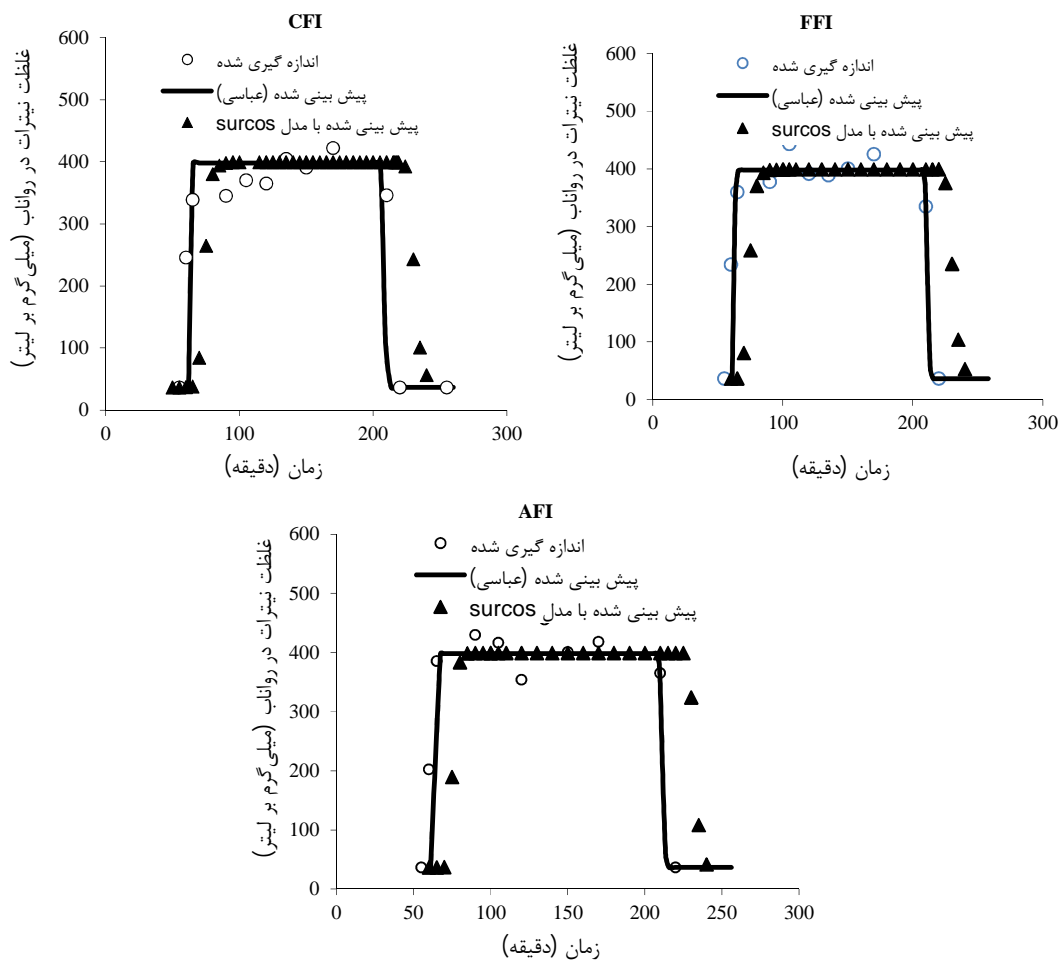
نتایج و بحث

دو مدل برای هر سه رژیم آبیاری در کودآبیاری‌های اول و دوم اجرا شد. مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده غلظت نیترات در رواناب در هر دو مدل با هم مقایسه شد (شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب برای کودآبیاری اول و دوم).

در این بررسی برای ارزیابی و مقایسه مدل‌ها از سه شاخص ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال ($NRMSE$) استفاده شد. برای تشخیص قابل قبول بودن تخمین نرم‌افزار باید از برخی از پارامترهای آماری استفاده کرده که مهم‌ترین این پارامترها مقادیر $RMSE$ و $NRMSE$ است که به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

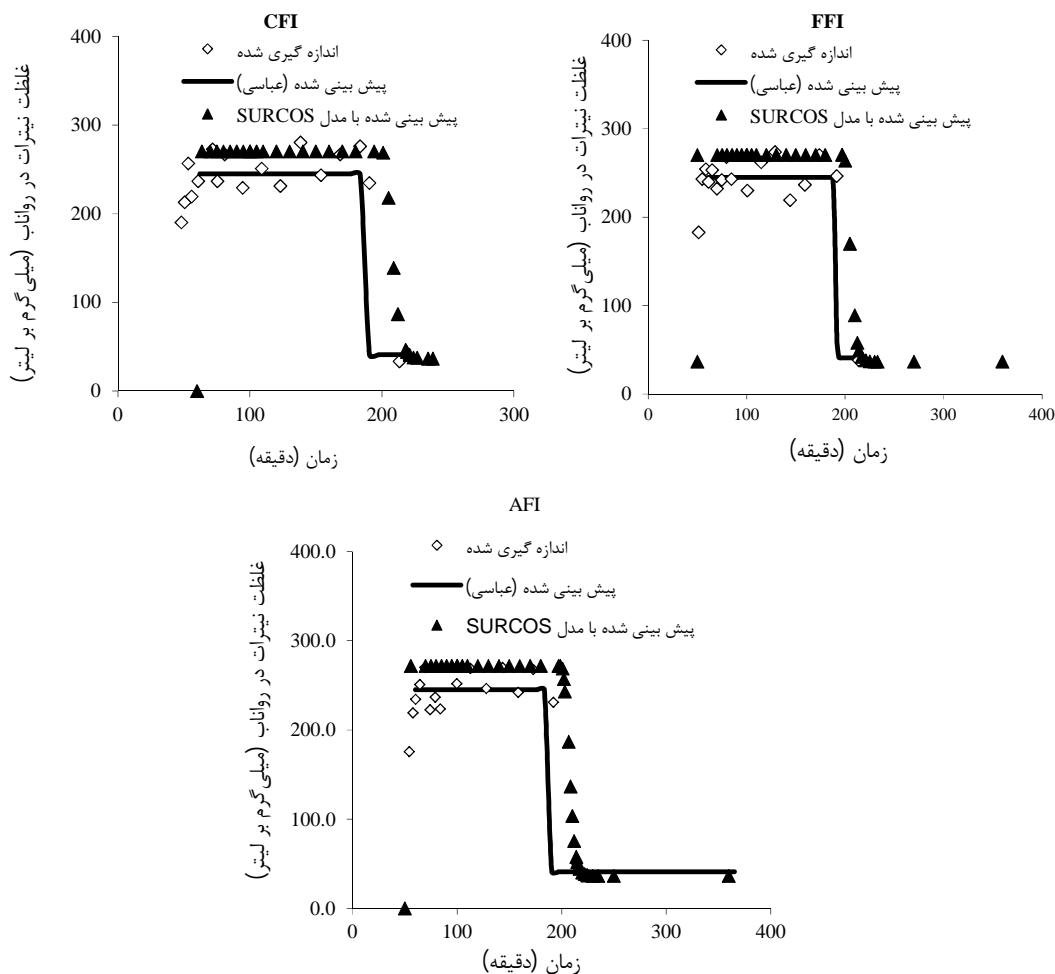
$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - P_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (12)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{m} \quad (13)$$



شکل ۱- مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده غلظت نیترات در رواناب از سوی مدل‌های عباسی و همکاران و SURCOS در کودآبیاری

اول



شکل ۲- مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده غلظت نیترات در رواناب از سوی مدل‌های عباسی و همکاران و SURCOS در کودآبیاری دوم

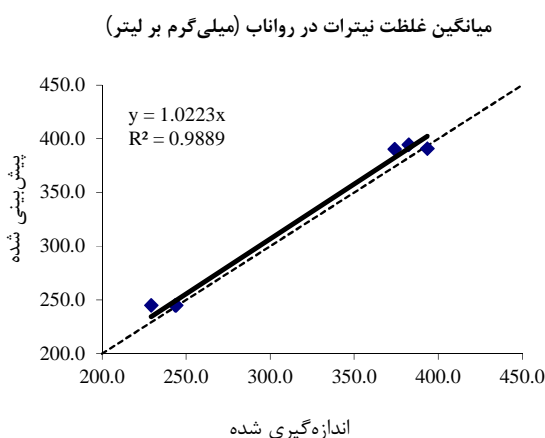
آسانی همراه آب حرکت می‌کند. مقادیر تخمینی غلظت نیترات در رواناب در هنگام کودآبیاری ثابت است در حالی که مقادیر مشاهده‌ای آن دارای نوسانات بود. این نوسانات می‌تواند ناشی از تغییرات مکانی ویژگی‌های نفوذپذیری و زبری خاک و تغییرات جزئی در شدت آب و کود ورودی به مزرعه باشد (عباسی و همکاران، ۲۰۰۳). تغییرات مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت نیترات در رواناب به دلیل ثابت بودن شدت تزریق کود و دبی ورودی آب به جویچه کم بود. مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده غلظت نیترات در رواناب در زمان‌های مختلف در شکل‌های ۱ و ۲ برای کودآبیاری اول و دوم نشان دهنده توانایی این مدل در شبیه‌سازی انتقال سطحی املاح بود. همستگی خوبی بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی غلظت نیترات در رواناب وجود داشت (شکل ۳). میانگین غلظت خروجی برای

مدل عباسی و همکاران (۲۰۰۳)

روند خوبی بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی، وجود داشت. دلیل عملکرد خوب مدل را می‌توان در تخمین مناسب پارامترهای نفوذ که براساس داده‌های مزرعه‌ای شامل هیدروگراف دبی ورودی و خروجی و منحنی پیشروی برای هر رژیم آبیاری و هر کود آبیاری به‌دست آمدند، دانست. در کودآبیاری اول، مقدار غلظت نیترات رواناب خیلی زود بعد از تزریق کود در ابتدای مزرعه افزایش یافت. فاصله زمانی از لحظه تزریق کود تا رسیدن آن به انتهای مزرعه حدود ۱۰ دقیقه بود. غلظت نیترات رواناب در کودآبیاری دوم به دلیل سرعت بالای جریان آب (ناشی از شیب زیاد جویچه) در فاصله زمانی کوتاهی که آب به انتهای جویچه پیشروی کرد به حداکثر مقدار خود رسید. نیترات به دلیل داشتن حلالیت و تحرک بالا به

شد (شکل ۴). شیب خط معادلات خطی برازش داده شده $(y=ax+b)$ نزدیک به یک است. مقادیر R^2 ، RMSE و NRMSE به ترتیب ۰/۹۱۲۶، ۱۷/۰ میلی گرم بر لیتر و ۵/۴۵ به دست آمد.

خطای کمتر از شش درصد در شبیه‌سازی غلظت نیترات نشان از عملکرد مطلوب مدل SURCOS است. مدل عباسی و همکاران بلافاصله بعد از رسیدن نیترات به انتهای جویچه با شیب تندی به مقدار بیشینه‌ی خود رسید و پس از اتمام کودآبیاری با شیب تندی کم شد که این شیب برای مدل SURCOS کمتر مشاهده شد. برای تیمارهای مختلف آبیاری (FFI، AFI، CFI) مدل شبیه به مقادیر اندازه‌گیری شده عمل کرد و در حقیقت تفاوت بین تیمارهای آبیاری را بهتر از مدل عباسی و همکاران نشان داد.



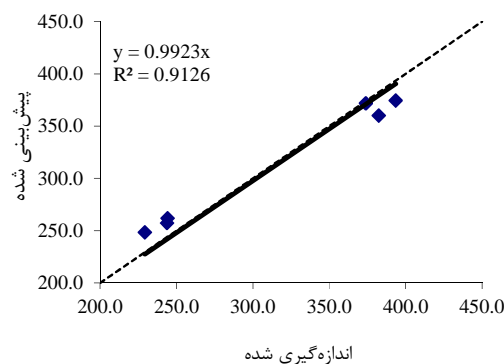
شکل ۴- مقادیر غلظت نیترات در رواناب اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده با مدل SURCOS در دو کودآبیاری

نتیجه‌گیری

در این پژوهش دو مدل کودآبیاری جویچه‌ای برای شبیه‌سازی غلظت نیترات در دبی خروجی از مزرعه برای سه رژیم آبیاری جویچه‌ای و دو واقعه کودآبیاری ارزیابی شد. همبستگی خوبی در هر دو مدل بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده مشاهده شد. خطای کمی در هر دو مدل در شبیه‌سازی غلظت نیترات در رواناب به دست آمد (کمتر از شش درصد). مدل SURCOS تفاوت بین تیمارهای آبیاری را بهتر نشان داد. اگرچه خطای مدل عباسی و همکاران کمتر از مدل SURCOS در شبیه‌سازی غلظت نیترات در رواناب به

رواناب برای سه شیوه آبیاری در مقادیر اندازه‌گیری شده نوسان داشت. در کودآبیاری اول بیشترین و کمترین غلظت نیترات به ترتیب در رواناب خروجی AFI و CFI و برای کودآبیاری دوم به ترتیب CFI و AFI به دست آمد. در حالی که مدل عباسی و همکاران برای شیوه‌های مختلف آبیاری تفاوت معنی‌داری را ارائه نداد. شیب خط معادلات خطی برازش داده شده $(y=ax+b)$ نزدیک به یک است. مقادیر R^2 ، RMSE و NRMSE به ترتیب ۰/۹۸۹، ۱۳/۵ میلی گرم بر لیتر و ۳/۴ به دست آمد. نتایج نشان‌دهنده شبیه‌سازی مناسب مدل عباسی و همکاران است.

میانگین غلظت نیترات در رواناب (میلی گرم بر لیتر)



شکل ۳- مقادیر غلظت نیترات در رواناب اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده از سوی مدل عباسی و همکاران در دو کودآبیاری

مدل SURCOS

در کودآبیاری اول مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت نیترات در رواناب با این مدل شبیه و در کودآبیاری دوم بیشتر از مقادیر شبیه‌سازی شده از سوی مدل عباسی و همکاران بود.

همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ دیده می‌شود تفاوت پیش‌بینی این مدل با مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده از سوی مدل عباسی و همکاران تأخیر زمانی در رسیدن نیترات به انتهای زمین است. در حقیقت می‌توان گفت که در پیشروی جریان آب و نیترات مدل عباسی و همکاران دارای عملکرد بهتری بود و همبستگی بهتری بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده ایجاد کرد. در مدل SURCOS نیز همبستگی خوبی بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی غلظت نیترات در رواناب مشاهده

- Irrigation and Drainage Engineering. 126(1): 33-40.
12. Jamieson PD, Porter JR, and Wilson DR. 1991. A test of computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*. 27: 337-350.
 13. Perea H, Strelkoff TS, Adamsen FJ, Hunsaker DJ, and Clemmens AJ. 2010. Nonuniform and unsteady solute transport in furrow irrigation. I: Model development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 136(6): 365-375.
 14. Playan E, and Faci JM. 1997. Border fertigation: Field experiments and a simple model. *Irrigation Science*. 17(4): 163-171.
 15. Rutherford JC. 1994. River mixing. John Wiley & Sons. 347 p.
 16. Sabillón GN, and Merkle GP. 2004. Fertigation guidelines for furrow irrigation. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 2(4): 576-587.
 17. Smith M. 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management (No. 46). Food & Agriculture ORG.
 18. Walker WR, and Skogerboe G. 1987. Surface irrigation: theory and practice. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 524 p.
- دست آمد. نتایج نشان داد که می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی برای طراحی و مدیریت کودآبیاری جویچه‌ای در مزرعه استفاده کرد.

منابع

1. Abbasi F, Simunek J, van Genuchten MT, Feyen J, Adamse FJ, Hunsaker DJ, Strelkoff TS, and Shouse P. 2003. Overland water flow and solute transport: model development and field-data analysis. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129(2): 71-81.
2. Boldt AL, Watts DG, Eisenhauer DE, and Schepers JS. 1994. Simulation of water applied nitrogen distribution under surge irrigation. *Transactions ASAE*. 37(4): 1157-1165.
3. Burguete J, García-Navarro P, Murillo J, and García-Palacin I. 2007. Analysis of the friction term in the one-dimensional shallow water model. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133(9): 1048-1063.
4. Burguete J, Zapata N, García-Navarro P, Mañkaka M, Playán E, and Murillo J. 2009. Fertigation in furrows and level furrow systems. I: model description and numerical tests. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 135(4): 401-412.
5. Burguete J, Lacasta A, and García-Navarro P. 2014. SURCOS: A software tool to simulate irrigation and fertigation in isolated furrows and furrow networks. *Computers and Electronics in Agriculture*. 103: 91-103.
6. Cunge JA, Holly FM, and Verwey A. 1980. Practical aspects of computational river hydraulics. Pitman, London.
7. Ebrahimian H, Liaghat A, Parsinejad M, Playán E, Abbasi F, and Navabian M. 2013. Simulation of 1D surface and 2D subsurface water flow and nitrate transport in alternate and conventional furrow fertigation. *Irrigation Science*. 31(3): 310-316.
8. Ebrahimian H, Keshavarz MR, and Playán E. 2014. Surface fertigation: a review, gaps and needs. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 12(3): 820-837.
9. Ebrahimian H, and Playán E. 2014. Optimum management of furrow fertigation to maximize water and fertilizer efficiency and uniformity. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 16(3): 591-607.
10. Elliott RL, and Walker WR. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans ASAE*. 25(2): 396-400.
11. García-Navarro P, Playán E, and Zapata N. 2000. Solute transport modeling in overland flow applied to fertigation. *Journal of*