

## یکنواختی توزیع آب و نیتрат در آبیاری جویچه‌ای از طریق جریان موجی

حسن اوجاقلو<sup>۱\*</sup>، تیمور سهرابی<sup>۲</sup>، فریبرز عباسی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۵/۰۲ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۲۰

<sup>۱</sup> - استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زنجان

<sup>۲</sup> - استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران

<sup>۳</sup> - استاد مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کرج

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ojaghloo@alumni.ut.ac.ir

### چکیده

تعیین معیارهای کودآبیاری در روش‌های جدید آبیاری سطحی از جمله آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی به‌منظور افزایش کارایی مصرف آب و کود ضروری است. از مهم‌ترین شاخص‌های کودآبیاری، میزان یکنواختی توزیع آب و کود هست. به‌همین منظور در تحقیق حاضر، شاخص‌های یکنواختی توزیع آب و نیترات در کودآبیاری جویچه‌ای با جریان موجی و پیوسته با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمایش در یک خاک با بافت لوم رسی در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در سال ۱۳۹۱ انجام شد. مدیریت‌های کودآبیاری مختلف در آزمایش‌های با جریان موجی شامل تزریق کود نیترات آمونیوم در تمامی موج‌های مرحله پیشروی، مرحله پس از پیشروی و ترکیب موج انتهایی فاز پیشروی و ابتدای مرحله پس از پیشروی مورد آزمایش قرار گرفت. برای جریان پیوسته نیز تزریق کود در نیمه دوم مرحله پیشروی و پس از مرحله پیشروی اعمال گردید. یکنواختی توزیع چارک پایین نیترات در آزمایش‌های کودآبیاری با جریان موجی و پیوسته به‌ترتیب در محدوده ۵۴/۴ تا ۹۳/۸ و ۷۷/۷ تا ۹۳/۶ درصد به‌دست آمد. همچنین یکنواختی توزیع چارک پایین آب در آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته به‌ترتیب در محدوده ۸۸/۰ تا ۹۳/۷ و ۷۸/۰ تا ۹۰/۵ درصد به‌دست آمد. تلفات نیترات در آزمایش‌های مختلف عمدتاً از طریق رواناب بود و مقدار آن در آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته به‌ترتیب ۵/۱ تا ۴۷/۱ و ۳/۷ و ۲۷/۲ درصد محاسبه شد. شاخص راندمان توزیع چارک پایین به‌منظور بررسی راندمان کاربرد و یکنواختی توزیع آب و نیترات مورد استفاده قرار گرفت. مقدار این شاخص برای نیترات در آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته به‌ترتیب در محدوده ۴۵/۰ تا ۸۰/۵ و ۶۸/۲ تا ۷۹/۵ درصد محاسبه گردید. نتایج نشان داد، گزینه مناسب در مدیریت کودآبیاری جویچه‌ای با جریان موجی و پیوسته به‌ترتیب تزریق کود در تمام موج‌های مرحله پیشروی و نیمه دوم مرحله پیشروی بود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری موجی، تلفات نیترات، راندمان، مدیریت کودآبیاری، یکنواختی توزیع آب

## Uniformity of Water and Nitrate Distribution under Furrow Irrigation through Surge Flow

H Ojaghloo<sup>1\*</sup>, T Sohrabi<sup>2</sup>, F Abbasi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>- Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, University of Zanjan, Iran

<sup>2</sup>- Prof., Depat. of Irrigation and Reclamation, University of Tehran, Karaj, Iran

<sup>3</sup>- Prof., Agricultural Engineering Research Institute, AERI, Karaj, Iran

\* Corresponding Author, Email: ojaghloo@alumni.ut.ac.ir

### Abstract

Determination of fertigation criteria in new surface irrigation methods, especially furrow irrigation through surge flow, is necessary in order to increase water and fertigation use efficiency. Distribution uniformities of the water and nitrate are the most important indicators of the surface irrigation fertigation. For this purpose in this research, water and nitrate distribution uniformity indicators in furrow fertigation with surge and continuous flow regimes were evaluated using field experiments. The study was conducted in a soil with clay loam texture at the experimental station of the College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran in June, 2012. Fertigation management strategies in experiments with surge flow included injecting fertilizer during all advancing cycles, wetting phase and last advancing cycle plus start of wetting phase. Fertilizer injection for continuous flow was applied in the second half of advancing and wetting phases. Low quarter distribution uniformity of the nitrate in experiments with surge and continuous flow amounted to 54.4-93.8% and 77.7-93.6%, respectively. Also, low quarter distribution uniformity of the water for the same experiments amounted to 88.0-93.7% and 78.0-90.5%, respectively. Nitrate losses in all experiments were through runoff and its values in these experiments amounted to 5.1-47.1% and 3.7-27.2%, respectively. Low quarter concept was also used as an index for evaluating the water and nitrate application efficiency and distribution uniformity. The values of these indices for nitrate in experiments with surge and continuous flow regimes were calculated to be 45.0-80.5% and 68.2-79.5%, respectively. Overall, fertilizer injections in all surges and second half of advancing phase, respectively in furrow fertigation with surge and continuous flow regimes stand at the proper management practices for water and fertilizer.

**Keywords:** Efficiency, Fertigation management, Nitrate losses, Surge irrigation, Water distribution uniformity

### مقدمه

(۱۳۸۱) با استفاده از آبیاری بارانی در ذرت علوفه‌ای

آغاز گردید. این تحقیق نشان داد که همیاری دو عامل آب و کود موجب افزایش چشمگیر کارایی هر دو می‌گردد. کودآبیاری از دو دهه اخیر و بیشتر در روش-های آبیاری تحت فشار توسعه قابل قبولی پیدا کرده است. اما تصور موجود که آبیاری سطحی از راندمان و یکنواختی توزیع آب پایینی برخوردار است از یک سو و عدم وجود راهنمای عملی در خصوص کاربرد کود به همراه آب آبیاری در این روش از سوی دیگر، سبب شده تا کودآبیاری در روش سطحی محدود گردد

کاربرد کود به همراه آب آبیاری تحت عنوان کودآبیاری یکی از روش‌های مدیریتی برای کاهش مصرف کود است که می‌تواند به عنوان یکی از راه‌حل‌های کاهش آلودگی منابع آب که عمدتاً ناشی از مصرف بی‌رویه و یا مصرف نادرست کود است، مطرح گردد. کودآبیاری اولین بار توسط بریان و توماس در سال ۱۹۵۸ مطرح گردید (تریدهیل و همکاران ۱۹۹۰). کودآبیاری در ایران با تحقیقات واعظی و همکاران

کودآبیاری در آبیاری جویچه‌ای را در یک خاک لومی در کرج ارزیابی نمودند. نتایج ایشان نشان داد، این روش از یکنواختی توزیع بالایی برخوردار بوده و در صورت مدیریت صحیح، آبتشویی و تلفات کود به صورت نفوذ عمقی عامل تهدیدکننده‌ای در این روش کوددهی نیست. جلینی و عباسی (۱۳۸۸) نیز در آزمایشی مشابه در مشهد نشان دادند که یکنواختی توزیع نیمه پایین کود در جویچه‌های انتها باز بین ۸۸ تا ۹۷ درصد متغیر بود. نتایج این تحقیقات نشان داد که تزریق کود در تمام مدت زمان آبیاری و یا تزریق کود در نیمه دوم آبیاری و یا در زمان‌های انتهایی آبیاری یکنواختی بیشتری را ایجاد می‌نمایند. عزیززاده و همکاران (۱۳۸۹)، یکنواختی توزیع و تلفات نیترات در کودآبیاری جویچه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد، یکنواختی توزیع در محدوده ۸۹/۷ تا ۹۶ درصد و تلفات نیترات به صورت رواناب سطحی بسته به مدت زمان تزریق و دبی خروجی بین ۵/۷ تا ۴۲ بود. پناهی (۱۳۹۱)، مدل کودآبیاری جویچه‌ای با در نظر گرفتن نفوذ جانبی را توسعه و مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد، تزریق کود در نیمه اول آبیاری به عنوان گزینه مناسب مدیریتی از نظر کاهش تلفات رواناب و یکنواختی توزیع کود شناخته شد. مدیریت جریان ورودی جویچه از عوامل مؤثر بر راندمان و یکنواختی توزیع آب در روش آبیاری سطحی است (آلازبا ۱۹۹۵، باتیستا و والندر ۱۹۹۳). در نتیجه شکل و نحوه ورود جریان به جویچه بر تلفات و یکنواختی توزیع آب و کود مؤثر خواهد بود. یکی از روش‌های مدیریت آبیاری سطحی، روش آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی است. از مهم‌ترین مزایای این روش نسبت به آبیاری با جریان پیوسته (معمولی) می‌توان به امکان افزایش راندمان کاربرد آب آبیاری، افزایش یکنواختی توزیع رطوبت و کنترل مقدار رواناب انتهایی اشاره داشت (استرینگهام و کلر ۱۹۷۹، هورست و همکاران ۲۰۰۷). ایزدی و همکاران (۱۳۸۴)، اثر تغییر پارامترهای موج بر یکنواختی و راندمان آبیاری موجی را مورد بررسی و بیشترین یکنواختی و راندمان را به ترتیب در نسبت موج‌های ۰/۶۶ و ۰/۷۵ گزارش نمودند.

(عباسی و همکاران ۲۰۰۳). این در حالی است که مطالعات محققان در سال‌های اخیر نشان می‌دهد، کودآبیاری در روش‌های آبیاری سطحی سبب کاهش تلفات کود، مصرف کم و مکرر عناصر غذایی در طول دوره رشد و همچنین توزیع یکنواخت کود در خاک می‌گردد (سبیلون و مرکلی ۲۰۰۴). در نهایت بالا بودن یکنواختی توزیع آب و کود و کاهش تلفات آن منجر به افزایش کارایی مصرف آب و کود خواهد شد. یکنواختی توزیع کود در مزرعه از شاخص‌های مهم ارزیابی کودآبیاری با روش‌های مختلف آبیاری سطحی هست. تحقیقات زیادی به منظور بالا بردن این شاخص با مدیریت‌های مختلف آب و کود انجام یافته است. نتایج آزمایش‌های پلایان و فاسی (۱۹۹۷) نشان داد، ضریب توزیع یکنواختی نیمه‌پایین کود بین ۳ تا ۵۲ درصد متغیر بوده و تزریق کود در تمام مدت زمان آبیاری بیشترین یکنواختی توزیع و تزریق به صورت پالس‌های کوتاه کمترین یکنواختی را داشته است. عباسی و همکاران (۲۰۰۳) اظهار داشتند که تزریق کود در کل زمان آبیاری یا نیمه دوم آبیاری برای جویچه انتهایی بسته به دبی ورودی مناسب، سبب یکنواختی بالاتر نسبت به حالت تزریق کود در نیمه اول آبیاری شده است. نتایج سبیلون و مرکلی (۲۰۰۴) نشان داد که بهترین مدت زمان تزریق کود در حدود ۵ تا ۱۵ درصد زمان قطع جریان و بهترین زمان شروع تزریق کود در محدوده ۵ تا ۹۵ درصد زمان پیشروی حاصل شده است. مروج الاحکامی و همکاران (۲۰۱۲)، عملکرد هیدرولیکی آبیاری و کودآبیاری سطحی تحت تأثیر الگوهای متفاوت هیدروگراف جریان ورودی در آبیاری جویچه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. بیشترین یکنواختی توزیع کود در شرایط یکسان از نظر حجم آب کاربردی، در الگوهای پلکانی و افزایش - کاهش به دست آمد. ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۴) کودآبیاری جویچه‌ای معمولی و یکدرمیان را به منظور کاهش تلفات نیترات با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی نمودند. نتایج ایشان نشان داد، تزریق در نیمه اول آبیاری با مقدار جریان ورودی کم منجر به کاهش تلفات نیترات خواهد شد. عباسی و همکاران (۱۳۸۷) یکنواختی

عملکرد کودآبیاری با این روش تاکنون مطالعه مزرعه-ای انجام نشده است و تنها مطالعه موجود در این زمینه مربوط به مطالعه (بولت و همکاران ۱۹۹۴) هست که هدف تحقیق ایشان توسعه مدل ریاضی به منظور شبیه-سازی کودآبیاری در جریان موجی بود. لذا هدف از این تحقیق، تعیین شاخص‌های یکنواختی توزیع آب و کود در کودآبیاری جویچه‌ای با جریان موجی و مقایسه آن با روش معمول (جریان پیوسته) با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای هست.

### مواد و روش‌ها

#### آزمایش‌های مزرعه‌ای

آزمایش‌های مزرعه‌ای در مزرعه آموزشی و پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در کرج در تابستان سال ۱۳۹۱ انجام شد. برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه در جدول ۱ آورده شده است. آزمایش‌ها در شرایط بدون کشت گیاه انجام شد و کود نیترات آمونیوم به عنوان کود ازته و بر اساس محاسبات انجام گرفته برای گیاه فرضی ذرت (۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) در دو آزمایش کودآبیاری و در هر نوبت به میزان ۳۰ درصد کود موردنیاز بر اساس توصیه کودی (ملکوتی و غیبی ۱۳۷۹) به همراه آب آبیاری به داخل جویچه‌ها تزریق شد. شکل‌های ۱ و ۲ تصویری از مراحل مختلف انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای را نشان می‌دهد.

صدرالدینی و همکاران (۱۳۸۵) با استفاده از روش بهینه‌سازی جستجوی ممنوع و تلفیق آن با مدل هیدرودینامیک کامل، بهینه‌سازی آبیاری موجی را با تأکید بر مهم‌ترین عناصر آن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد، مدل بهینه‌سازی تهیه شده بر اساس روش جستجوی ممنوع و تابع هدف تعریف شده قادر است بهترین ترکیب متغیرهای تصمیم‌گیری در آبیاری موجی را برای طول مشخصی از جویچه تعیین نماید. با کاربرد کود در روش آبیاری موجی امکان رسیدن به پتانسیل بالای توزیع کود در طول جویچه و کاهش تلفات رواناب نیترات وجود خواهد داشت. به همین منظور راهنمای عملی برای کاربرد کود در این تکنیک جدید آبیاری سطحی موردنیاز است. بولت و همکاران (۱۹۹۴) مدل کامپیوتری را به منظور شبیه‌سازی مقدار کود و آب نفوذ یافته، یکنواختی توزیع کود و تلفات کود را در روش آبیاری موجی ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد، در خاک‌های با نفوذپذیری بالا برای رسیدن به بیشترین توزیع یکنواختی و بازده کاربرد کود، کودآبیاری باید در تمامی موج‌ها انجام گردد و در خاک‌های با نفوذپذیری متوسط و کم، کودآبیاری در تمامی موج‌ها و یا فقط موج‌های فاز پیشروی می‌تواند انجام پذیرد ولی تزریق کود باید در طول کل زمان وصل جریان انجام پذیرد. مطالعات پیشین در زمینه آبیاری موجی عمدتاً مربوط به بررسی هیدرولیک جریان آب بوده و در خصوص

جدول ۱- برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی.

عمق (cm)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری ( $\text{g cm}^{-3}$ )	ظرفیت زراعی (% حجمی)	نقطه پژمردگی دائم (% حجمی)	شوری ( $\text{dS m}^{-1}$ )	ماده آلی (% میانگی)	غلظت نیترات ( $\text{mg l}^{-1}$ )
۰-۲۰	لوم رسی	۱/۵۰	۲۸/۵	۱۲/۳	۲/۴۰	۱/۸۶	۱/۷۱
۲۰-۴۰	لوم رسی	۱/۴۴	۲۶/۳	۱۱/۴	۱/۳۵	۱/۴۱	۲/۳۰
۴۰-۶۰	لوم شنی	۱/۴۶	۲۱/۸	۱۰/۲	۱/۳۸	۰/۸۴	۱/۹۱

۱۵۰ متر و فواصل آن‌ها ۰/۷۵ متر اندازه‌گیری گردید. شیب طولی مزرعه متغیر بود به طوری که مقدار شیب در ۶۰ متر ابتدایی برابر با ۰/۹ درصد و ادامه آن تا انتهای جویچه‌ها برابر با ۰/۴ درصد اندازه‌گیری گردید. تعداد شش نوبت آبیاری به فواصل هفت روز انجام شد که در آبیاری سوم و ششم همراه با کود بود (آزمایش‌های کودآبیاری). زمان قطع جریان طوری انتخاب می‌شد تا آزمایش‌ها به شرایط واقعی مزرعه نزدیک و کمینه عمق آب نفوذ یافته در انتهای مزرعه در حدود ۴۰ میلی‌متر باشد. زمان‌های پیشروی و پسروی به فواصل ۱۰ متر یادداشت‌برداری و جریان ورودی و خروجی از جویچه‌ها با استفاده از فلوم‌های WSC تپ ۲ اندازه‌گیری شد. بیشینه دبی غیرفرسایشی جویچه‌ها حدود ۰/۶۶ لیتر بر ثانیه بود و در تمامی آزمایش‌ها دبی ورودی به جویچه‌ها کمتر از مقدار مذکور بود. در آزمایش‌های با جریان موجی، زمان چرخه ۴۵ دقیقه و نسبت چرخه ۰/۶۶ در نظر گرفته شد. در تمامی آزمایش‌ها مقدار بار ورودی نیترات یکسان به هر کدام از جویچه‌های آزمایشی تزریق شد. به‌همین منظور دبی کود ورودی به جویچه‌ها متناسب با مدت‌زمان تزریق کود متفاوت بود. با شروع تزریق کود، از جویچه اصلی در هفت ایستگاه و در فواصل زمانی مختلف نمونه‌های آب حاوی کود برداشت و به‌منظور تعیین غلظت نیترات به آزمایشگاه منتقل می‌شد. برای تعیین غلظت نیترات در نمونه آب‌ها از روش رنگ سنجی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر استفاده شد (بی‌نام ۲۰۱۲). با توجه به اینکه متوسط عمق خاک زراعی مزرعه آزمایش ۶۰ سانتی‌متر و در زیر آن لایه متشکل از سنگ‌ریزه و شن درشت قرار داشت در نتیجه عمق ۶۰ سانتی‌متری به‌عنوان مبنای محاسبات مقدار تلفات نفوذ عمقی آب و نیترات قرار گرفت. نمونه‌های خاک از سه عمق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری از سطح و در سه نقطه ابتدا، وسط و انتهای جویچه و در زمان‌های قبل، دو، چهار و شش روز پس از آزمایش کودآبیاری به‌منظور تعیین رطوبت و نیترات برداشت شد. تعداد نه نمونه خاک از هر کدام از پنج جویچه آزمایشی در چهار زمان مختلف و برای دو نوبت کودآبیاری (در مجموع



شکل ۱- اندازه‌گیری سرعت پیشروی.



شکل ۲- سیستم تزریق کود به داخل جویچه‌ها.

آب آبیاری از کانال توسط پمپ به داخل مخزن آب تخلیه و برای ثابت ماندن دبی ورودی به جویچه، یک سرریز در مخزن آب برای ایجاد ارتفاع ثابت آب تعبیه گردید. کود نیز از مخزن اصلی وارد مخازن کوچک‌تری که بر روی جویچه‌ها نصب شده بودند، وارد می‌شد. این مخازن دارای شناور برای تثبیت ارتفاع کود برای کودآبیاری با جریان موجی با مدیریت‌های مختلف تزریق کود شامل تزریق کود در موج انتهایی مرحله پیشروی و ابتدای فاز پس از پیشروی جریان (آزمایش اول موجی)، تزریق کود در مرحله پس از پیشروی جریان (آزمایش دوم موجی) و تزریق کود در تمامی موج‌های مرحله پیشروی جریان (آزمایش سوم موجی) در نظر گرفته شد. همچنین برای جریان پیوسته نیز دو آزمایش شامل تزریق کود در نیمه دوم مرحله پیشروی (آزمایش اول پیوسته) و تزریق کود در مرحله پس از پیشروی جریان (آزمایش دوم پیوسته) اعمال گردید. در همه آزمایش‌ها انتهای جویچه‌ها باز و بدون سیستم برگشت رواناب انتهایی بود. در مجموع تعداد ۱۸ جویچه آزمایشی شامل پنج جویچه اصلی و مابقی به‌عنوان جویچه‌های محافظ ایجاد شد. طول جویچه‌ها

آب نفوذ یافته با استفاده از رابطه ۱ محاسبه گردید (عباسی ۱۳۸۶):

$$F_z = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_i^{t+\Delta t} - Z_i^t) \times \left(\frac{C_i^{t+\Delta t} + C_i^t}{2}\right) \times \Delta x_i}{L} \quad [1]$$

در رابطه فوق،  $F_z$  جرم کود نفوذ یافته در واحد طول  $(ML^{-1})$ ،  $C_i^t$ ،  $C_i^{t+\Delta t}$  و  $Z_i^t$  به ترتیب غلظت کود ( $ML^{-3}$ ) و حجم آب نفوذ یافته در واحد طول  $(L^3L^{-1})$  در گره  $i$  ام و در زمان‌های  $t$  و  $t+\Delta t$ ،  $\Delta x_i$  اندازه گام مکانی  $(L)$ ،  $n$  تعداد نقاط نمونه‌برداری در طول مزرعه و  $L$  طول مزرعه است. شاخص‌های یکنواختی توزیع نیمه پایین<sup>۱</sup> ( $DU_{LH}$ ) و چارک پایین<sup>۲</sup> ( $DU_{LQ}$ ) برای آب و کود در آزمایش‌های مختلف با استفاده از غلظت‌های تعیین‌شده نیترات و مقدار آب نفوذ یافته در هر ایستگاه مطابق روابط ۲ و ۳ تعیین گردید:

$$DU_{LH} = \frac{\bar{D}_{1/2}}{\bar{D}} \quad [2]$$

$$DU_{LQ} = \frac{\bar{D}_{1/4}}{\bar{D}} \quad [3]$$

جرم کود تلف‌شده به‌صورت رواناب از انتهای مزرعه با استفاده از غلظت و حجم رواناب خروجی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (عباسی ۱۳۸۶):

$$F_R = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_R^{t+\Delta t} + Q_R^t)}{2} \times \left(\frac{C_i^{t+\Delta t} + C_i^t}{2}\right) \times \Delta t \quad [4]$$

در رابطه ۴،  $F_R$  جرم کود تلف‌شده همراه رواناب ( $M$ )،  $C_R$  و  $Q_R$  به‌ترتیب غلظت کود ( $ML^{-3}$ ) و شدت جریان خروجی ( $L^3T^{-1}$ ) از انتهای مزرعه و  $t$  زمان کل آبیاری ( $T$ ) هستند. مقدار تلفات نفوذ عمقی نیترات با استفاده از بیلان جرمی بین مقدار نیترات ورودی به جویچه، اولیه خاک، ذخیره‌شده در خاک و خروجی از انتهای جویچه-ها به‌صورت رواناب محاسبه گردید. مقدار راندمان کاربرد نیترات با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد:

تعداد  $(۳۶۰=۲ \times ۴ \times ۵ \times ۹)$  نمونه خاک به‌منظور اندازه‌گیری نیترات برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. برای اندازه‌گیری نیترات خاک نیز ابتدا اقدام به تهیه عصاره ۱ به ۵ خاک و آب گردید و پس از مخلوط کردن آن در دستگاه شیکر به‌مدت سه ساعت، عصاره‌گیری از نمونه‌ها انجام و در نهایت مقدار نیترات خاک با استفاده از روش رنگ سنجی با بروسین در دستگاه اسپکتوفتومتر به‌دست آمد.

شاخص‌های ارزیابی کودآبیاری

به‌منظور تخمین مقدار آب نفوذ یافته باید معادلات نفوذ در هر آزمایش تعیین گردد. تعیین معادله نفوذ در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی از پیچیدگی خاصی نسبت به جریان پیوسته برخوردار هست. عملکرد قابل‌قبول معادله تجربی کوستیاکوف در برآورد مقدار آب نفوذ یافته در آبیاری جویچه‌ای با جریان موجی در نتایج محققین قبلی ارائه‌شده است (بلایر و اسمردن ۱۹۸۷، بنهام و همکاران ۲۰۰۰). لذا در این تحقیق نیز از این معادله به‌منظور تخمین مقدار آب نفوذ یافته در آزمایش‌های با جریان موجی استفاده شد. در هر کدام از آزمایش‌های کودآبیاری با جریان موجی، سه معادله نفوذ برای سه فاز جداگانه خشک (موج اول)، خیس شده (موج سوم به بعد) و انتقالی (موج دوم) طبق توصیه والکر و هامفریس (۱۹۸۳) با استفاده از اطلاعات جریان و منحنی پیشروی در هر موج از طریق حل گام‌به‌گام معادله بیلان حجم تعیین شد. در آزمایش‌های با جریان پیوسته معادله کوستیاکوف لوئیس مورد استفاده قرار گرفت. به‌همین منظور ابتدا مقدار نفوذ پایه از طریق داده‌های هیدروگراف‌های جریان ورودی و خروجی محاسبه و سپس مشابه جریان موجی، با استفاده از اطلاعات جریان و منحنی پیشروی و حل معادله بیلان حجم پارامترهای معادله نفوذ تعیین شد. پس از محاسبه مقدار آب نفوذ یافته، جرم کود نفوذ یافته در واحد طول بین دو گام زمانی متوالی با استفاده از غلظت املاح محلول در آب و مقدار

<sup>1</sup> - Distribution uniformity of low half

<sup>2</sup> - Distribution uniformity of low quarter

معادله‌های کوستیاکف و کوستیاکف لوئیس بودند، لذا ضرایب به‌دست‌آمده برای موج اول و پیوسته یکسان نبود.

### یکنواختی توزیع آب

مقادیر ضرایب یکنواختی توزیع آب و نیترات برای آزمایش‌های کودآبیاری اول و دوم در جدول ۴ ارائه شده است. یکنواختی توزیع نیمه پایین عمق‌های آبیاری در آزمایش‌های کودآبیاری اول و دوم و برای هر دو جریان موجی و پیوسته در حد قابل‌قبول و بالای ۹۰ درصد به‌دست آمد. درحالی‌که یکنواختی توزیع چارک پایین عمق‌های آبیاری بیشتر تحت تأثیر نوع الگوی جریان ورودی و نوبت کودآبیاری قرار داشت. یکنواختی توزیع چارک پایین عمق‌های آبیاری در آزمایش‌های کودآبیاری اول و دوم با جریان موجی به‌ترتیب در محدوده ۸۸/۰ تا ۹۲/۵ و ۹۱/۵ تا ۹۳/۷ و جریان پیوسته به‌ترتیب ۷۸/۰ تا ۸۲/۳ و ۸۸/۷ تا ۹۰/۵ درصد به‌دست آمد. نتایج توزیع یکنواختی به‌دست‌آمده از مطالعات مزرعه‌ای در تحقیق حاضر همسو با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی ایزدی و همکاران (۱۳۸۴) و میرزایی و همکاران (۱۳۹۰) بود. به‌طورکلی یکنواختی توزیع آب در آزمایش‌های با جریان موجی بیشتر از پیوسته بود. بیشینه اختلاف بین مقادیر یکنواختی توزیع آب با جریان موجی و پیوسته در کودآبیاری اول بود به‌طوری‌که در نوبت دوم کودآبیاری از میزان این اختلاف کاسته شد. دلیل این موضوع کاهش اثر موج در آزمایش‌های نوبت دوم کودآبیاری بود. در آزمایش‌های با جریان موجی، بیشترین مقادیر یکنواختی توزیع آب در آزمایش دوم حاصل شد که دلیل آن بالا بودن دبی ورودی (نزدیک به بیشینه دبی غیر فرسایشی) به جویچه بود.

### یکنواختی توزیع نیترات

مطابق جدول ۴ ملاحظه می‌گردد، یکنواختی توزیع نیمه پایین مقادیر نیترات در آزمایش‌های نوبت اول کودآبیاری و با جریان موجی و پیوسته به‌ترتیب ۵۶/۱ تا ۹۲/۵ و ۸۴/۱ تا ۹۵/۱ و در نوبت دوم کودآبیاری به‌ترتیب ۶۸/۱ تا ۹۵/۵ و ۹۰/۲ تا ۹۵/۲ درصد به‌دست

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^J M_j}{\int_{T_i}^{T_s} Q_0(t)C_0(t)dt} \times 100 \quad [5]$$

در رابطه ۵،  $M_j$  مقدار مؤثر کود در بازه  $j$  از  $(M)$ ،  $Q_0$  دبی ورودی ( $L^3T^{-1}$ )،  $C_0$  غلظت کود در ورودی مزرعه ( $ML$ )،  $t$  زمان ( $T$ )،  $T_i$  زمان شروع تزریق کود ( $T$ )،  $T_s$  زمان قطع تزریق کود ( $T$ )،  $z$  تعداد نقاط یا گره‌های محاسباتی در طول مزرعه هست. به‌منظور مقایسه مدیریت‌های مختلف کودآبیاری با جریان موجی و پیوسته، شاخص راندمان کاربرد چارک پایین  $AE_{LQ}$  از حاصل‌ضرب مقادیر راندمان کاربرد  $AE$  و یکنواختی توزیع چارک پایین تعیین شد. توضیح اینکه به‌دلیل حجم زیاد داده‌ها، نتایج مربوط به تلفات آب و نیترات در آزمایش‌های فوق در یک مقاله دیگر قبلاً ارائه شده است.

### نتایج و بحث

#### پارامترهای تجربی معادلات نفوذ

مقادیر پارامترهای تجربی معادلات نفوذ کوستیاکوف و کوستیاکوف - لوئیس برای آزمایش‌های کودآبیاری مختلف با جریان موجی و پیوسته به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. در آزمایش‌های با جریان موجی بیشترین مقادیر سرعت نفوذ متوسط در موج اول (شرایط خشک) بود که در موج‌های دوم و سوم به بعد به‌دلیل تحکیم خاک، انسداد سطحی و کاهش سطح مقطع جریان، کاهش می‌یافت. مقدار نفوذ جمعی در آزمایش‌های موجی کمتر از پیوسته بود. به‌طوری‌که نسبت مقدار آب نفوذ یافته جمعی در ابتدای جویچه و در آزمایش نوبت اول کودآبیاری با جریان موجی کمتر از نصف مقدار آن در جریان پیوسته بود. این اختلاف در آزمایش‌های نوبت دوم به‌دلیل بالا بودن رطوبت قبل از آزمایش‌ها و تثبیت هیدرولیکی بستر جویچه‌ها کمتر شد. با توجه به اینکه معادله‌های نفوذ مورد استفاده در روش موجی و پیوسته به‌ترتیب

3 - Application efficiency of low quarter

4 - Application efficiency

موضوع سبب شد تا کود ورودی به همراه جریان آب به سرعت به قسمت انتهایی جویچه رسیده و در آنجا نفوذ نماید. برعکس بیشترین مقادیر یکنواختی توزیع نیترات در آزمایش‌های موجی دوم و پیوسته دوم مشاهده گردید. تزریق کود در فاز پس از پیشروی (زمان‌های انتهایی آبیاری) و زمانی که کمترین تغییرات مکانی نفوذ در طول جویچه وجود داشت، عامل اصلی این موضوع بود.

آمد. روند تغییرات یکنواختی توزیع چارک پایین در آزمایش‌های مختلف مشابه یکنواختی توزیع نیمه پایین بود. کمترین مقدار یکنواختی توزیع نیترات مربوط به آزمایش اول موجی (تزریق در موج انتهایی پیشروی و ابتدای فاز پس از پیشروی جریان) می‌شد. در این آزمایش به هنگام تزریق کود، بیشترین تغییرات مکانی نفوذ در طول جویچه وجود داشت به طوری که نیمه اول طول جویچه شرایط خیس خورده، چارک سوم شرایط انتقالی و چارک انتهایی شرایط خشک را داشت. همین

جدول ۲- ضرایب تجربی معادله نفوذ کوستیاکوف ( $I = kt^a$ ) برای آزمایش‌های کودآبیاری اول و دوم با جریان موجی.

کودآبیاری دوم		کودآبیاری اول		شماره موج	آزمایش
k ( $m^2 \min^{-a}$ )	a	k ( $m^2 \min^{-a}$ )	a		
۰/۰۰۶۸۲	۰/۲۰۱	۰/۰۰۸۲۸	۰/۲۲۱	اول	
۰/۰۰۲۵۲	۰/۱۵۱	۰/۰۰۲۶۴	۰/۲۰۳	دوم	اول
۰/۰۰۱۶۰	۰/۱۴۰	۰/۰۰۲۵۴	۰/۱۷۵	سوم	
۰/۰۰۵۲۳	۰/۲۳۸	۰/۰۰۷۵۴	۰/۲۶۹	اول	
۰/۰۰۲۴۶	۰/۱۷۰	۰/۰۰۱۸۱	۰/۲۲۰	دوم	دوم
-	-	۰/۰۰۱۷۸	۰/۱۷۱	سوم	
۰/۰۰۶۶۰	۰/۲۲۳	۰/۰۰۶۵۲	۰/۲۵۴	اول	
۰/۰۰۲۴۵	۰/۱۷۱	۰/۰۰۲۴۳	۰/۲۱۰	دوم	سوم
۰/۰۰۱۸۱	۰/۱۵۵	۰/۰۰۲۳۵	۰/۱۸۴	سوم	

جدول ۳- ضرایب تجربی معادله نفوذ کوستیاکوف لوئیز ( $I = kt^a + f_0 t$ ) برای آزمایش‌های کودآبیاری اول و دوم با جریان پیوسته.

کودآبیاری دوم			کودآبیاری اول			آزمایش
$f_0$ ( $m^2 \min^{-1}$ )	k ( $m^2 \min^{-a}$ )	a	$f_0$ ( $m^2 \min^{-1}$ )	k ( $m^2 \min^{-a}$ )	a	
۰/۰۰۰۰۹۰	۰/۰۰۵۵۵	۰/۱۵۲	۰/۰۰۰۱۲۴	۰/۰۰۸۹۶	۰/۱۷۷	اول
۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۵۳۰	۰/۱۴۱	۰/۰۰۰۱۳۳	۰/۰۰۹۱۶	۰/۱۵۸	دوم

\*a توان معادله نفوذ کوستیاکوف- لوئیز، k ضریب و  $f_0$  سرعت نفوذ نهایی هست.

یکنواختی توزیع نیترات در آزمایش سوم موجی (تزریق در تمام موج‌های فاز پیشروی) تقریباً نزدیک به نتایج آزمایش پیوسته اول (تزریق در نیمه دوم فاز پیشروی) حاصل شد. تزریق در تمام موج‌های پیشروی جریان سبب گردید تا تمام نقاط طول جویچه به هنگام تزریق کود، شرایط خشک (بیشترین نفوذ) را داشته باشند.

نتایج مطالعه مزرعه‌ای عباسی و همکاران (۱۳۸۷) نشان داد، تزریق کود در زمان‌های انتهایی آبیاری منجر به یکنواختی توزیع کود بین ۹۳ تا ۹۶ درصد گردید. نتیجه به دست آمده از مطالعه علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) نیز نشان داد، تزریق کود در مرحله پس از پیشروی منجر به یکنواختی توزیع بالای کود خواهد شد. مقادیر



کودآبیاری با جریان موجی توسط بولت و همکاران (۱۹۹۴) داشت. در هر دو رژیم جریان ورودی، به دلیل افزایش سرعت پیشروی جریان در اثر کاهش ضریب زبری مانینگ، مقادیر یکنواختی توزیع آب و نیترات در آزمایش‌های کودآبیاری نوبت دوم بیشتر از نوبت اول بود.

اختلاف مقدار کود نفوذ کرده بین نقاط ابتدایی و انتهایی طول جویچه برابر با مقدار کود نفوذ کرده در شرایط خیس‌خورده بود که این اختلاف نسبت به آزمایش اول موجی کمتر بود. مقدار ضریب یکنواختی توزیع چارک پایین به دست آمده در آزمایش‌های با جریان موجی تطابق قابل قبولی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی

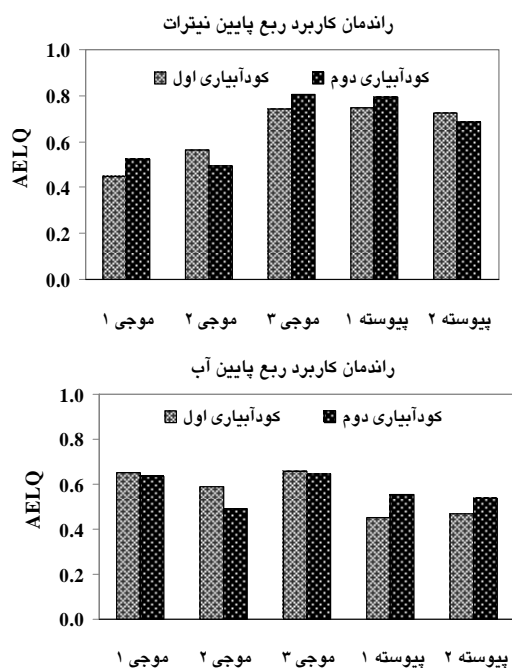
جدول ۴- مقادیر شاخص‌های توزیع یکنواختی آب و نیترات در آزمایش‌های مزرعه‌ای (درصد).

نوبت کودآبیاری		کودآبیاری اول		کودآبیاری دوم	
توزیع یکنواختی آب		توزیع یکنواختی نیترات		توزیع یکنواختی نیترات	
DU <sub>LQ</sub>	DU <sub>LH</sub>	DU <sub>LQ</sub>	DU <sub>LH</sub>	DU <sub>LQ</sub>	DU <sub>LH</sub>
۶۵/۹	۶۸/۱	۹۱/۵	۹۳/۸	۵۴/۴	۵۶/۱
۹۳/۸	۹۵/۵	۹۳/۷	۹۴/۹	۹۰/۸	۹۲/۵
۸۵/۱	۸۸/۶	۹۱/۷	۹۳/۰	۷۷/۹	۸۲/۶
۸۴/۶	۹۰/۲	۸۸/۷	۹۲/۰	۷۷/۷	۸۴/۱
۹۳/۶	۹۵/۲	۹۰/۵	۹۲/۸	۹۰/۹	۹۵/۱

۷۳/۹ و ۷۲/۵ تا ۷۴/۸ درصد و در نوبت دوم کودآبیاری به ترتیب ۴۹/۷ تا ۸۰/۵ و ۶۸/۲ تا ۷۹/۵ درصد به دست آمد. کمترین و بیشترین مقدار راندمان کاربرد چارک پایین مقادیر نیترات به ترتیب در آزمایش‌های اول موجی (کودآبیاری اول) و سوم موجی (کودآبیاری دوم) مشاهده شد. پایین بودن یکنواختی توزیع در آزمایش اول موجی و تلفات بالای مقادیر نیترات در آزمایش دوم موجی سبب پایین آمدن راندمان کاربرد چارک پایین مقادیر نیترات در این آزمایش‌ها گردید. در آزمایش موجی سوم، تزریق در تمام موج‌های فاز پیشروی سبب شد تا یکنواختی توزیع قابل قبول و راندمان کاربرد بالای مقادیر نیترات حاصل شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بولت و همکاران (۱۹۹۴) نیز نشان داد، کمترین و بیشترین مقادیر یکنواختی توزیع نیترات به ترتیب مربوط به مدیریت‌های تزریق کود در مرحله پس از پیشروی و موج انتهایی مرحله پیشروی می‌شد. اختلاف مقادیر شاخص فوق در

#### راندمان کاربرد چارک پایین آب و نیترات ( $AE_{LQ}$ )

بررسی راندمان کاربرد نیترات همزمان با نتایج یکنواختی توزیع نیترات به منظور نتیجه‌گیری قطعی جهت انتخاب مدیریت کودآبیاری برتر ضروری است. تلفات نیترات در آزمایش‌های مختلف عمدتاً از طریق رواناب بود و مقدار آن در آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته به ترتیب ۵/۱ تا ۴۷/۱ و ۳/۷ و ۲۷/۲ درصد محاسبه شد. به‌طور کلی تزریق قبل از اتمام مرحله پیشروی و پس از آن به ترتیب منجر به تلفات کم و زیاد می‌شد. با محاسبه مقادیر راندمان کاربرد و یکنواختی توزیع چارک پایین، مقادیر شاخص  $AE_{LQ}$  به دست آمد. شکل ۲ مقادیر راندمان کاربرد چارک پایین عمق‌های آبیاری و مقادیر نیترات را در آزمایش‌های مختلف نشان می‌دهد. راندمان کاربرد چارک پایین مقادیر نیترات در نوبت کودآبیاری اول و در آزمایش‌های با جریان موجی پیوسته به ترتیب در محدوده ۴۵/۰ تا



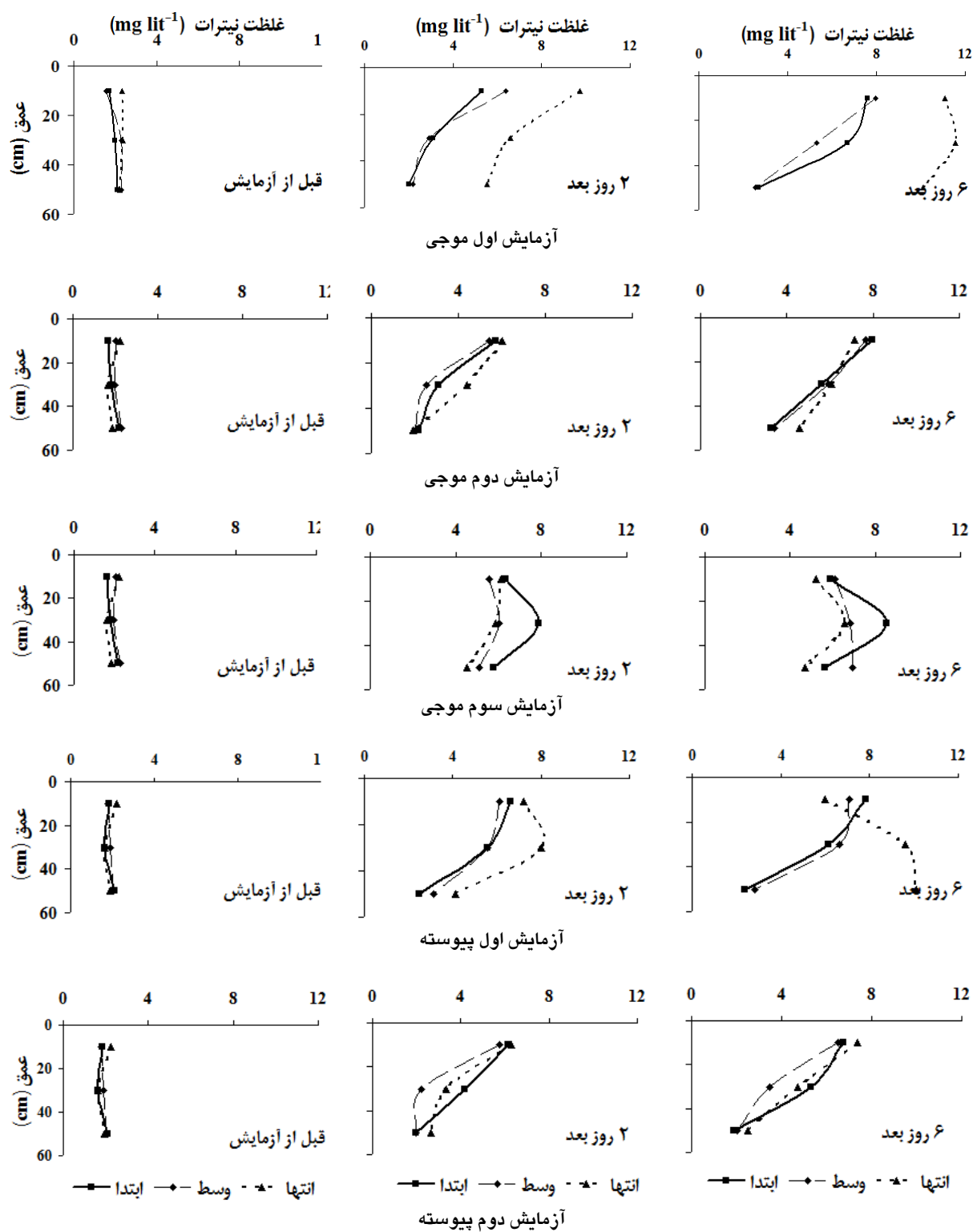
شکل ۲- مقادیر راندمان کاربرد چارک پایین آب و نیترات در آزمایش‌های مختلف.

تزریق کود در زمان‌های انتهایی آبیاری و پس از مرحله پیشروی جریان منجر به یکنواختی توزیع بالا گردید. هرچند یکنواختی توزیع در آزمایش موجی سوم که تزریق در تمام موج‌های پیشروی جریان صورت می‌گرفت، نیز قابل قبول بود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نیترات خاک به‌خوبی مؤید نتایج به‌دست‌آمده در قسمت قبل بود. ملاحظه می‌گردد، کود تزریق‌شده تا عمق ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متری نفوذ کرده به‌طوری‌که بیشترین تغییرات غلظت نیترات در سطح خاک و در عمق‌های پایین‌تر از ۴۰ سانتی‌متری ناچیز بود. در نتیجه در تمامی آزمایش‌ها با توجه به نوع مدیریت کودآبیاری اعمال‌شده خطر آبشویی نیترات وجود نداشت.

آزمایش‌های با جریان پیوسته کم بود و مقدار آن در آزمایش اول پیوسته (تزریق در نیمه دوم پیشروی) بیشتر از آزمایش دوم (تزریق پس از مرحله پیشروی) به‌دست آمد. تزریق کود در نیمه دوم مرحله پیشروی منجر به راندمان کاربرد بالا و تزریق پس از مرحله پیشروی منجر به یکنواختی توزیع بالای مقادیر نیترات گردید. به‌طورکلی، تزریق کود در طول مرحله پیشروی منجر به راندمان کاربرد بالا و یکنواختی توزیع پایین و برعکس آن تزریق در مرحله پس از پیشروی جریان منجر به راندمان کاربرد پایین و یکنواختی توزیع بالا می‌شد. همچنین مقدار راندمان کاربرد چارک پایین عمق‌های آبیاری در آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته به‌ترتیب در محدوده ۴۹ تا ۶۶ و ۴۵ تا ۵۵ درصد به‌دست آمد. عمده تلفات آب در آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته به‌ترتیب به‌صورت رواناب و نفوذ عمقی بود. متوسط اختلاف مقادیر شاخص فوق بین آزمایش‌های با جریان موجی و پیوسته ۱۷/۴ درصد در کودآبیاری اول و ۴/۱ درصد در کودآبیاری دوم به‌دست آمد.

#### غلظت نیترات در پروفیل خاک

غلظت نیترات در پروفیل خاک در زمان‌های قبل، دو، چهار و شش روز پس از آزمایش در سه نقطه و سه عمق از جوچه اصلی اندازه‌گیری شد. شکل ۳ تغییرات غلظت نیترات برای آزمایش‌های مختلف در کودآبیاری نوبت اول زمان‌های قبل، دو و شش روز بعد از هر آزمایش را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، در آزمایش‌های با جریان موجی کمترین و بیشترین یکنواختی توزیع نیترات، به‌ترتیب مربوط به آزمایش اول و دوم می‌شود. در آزمایش‌های با جریان پیوسته نیز، یکنواختی توزیع در آزمایش دوم بیشتر از اول مشاهده شد.



شکل ۳- پروفیل نیترات نفوذ یافته در آزمایش‌های کودآبیاری اول.

### نتیجه‌گیری کلی

شد (آزمایش دوم موجی و پیوسته). بیشترین مقادیر شاخص راندمان کاربرد چارک پایین به ترتیب در آزمایش‌های سوم موجی و اول پیوسته به دست آمد. کود تزریق شده تا عمق ۵۰ تا ۶۰ سانتی‌متری نفوذ کرده به طوری که بیشترین تغییرات غلظت نیترات در سطح خاک بود و در عمق‌های پایین‌تر از ۴۰ سانتی‌متری ناچیز بود. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی در کودآبیاری جویچه‌ای با جریان موجی، تزریق کود در تمام موج‌های مرحله پیشروی و در کودآبیاری با جریان پیوسته، تزریق در نیمه دوم مرحله پیشروی جریان به منظور افزایش راندمان و یکنواختی توزیع کود پیشنهاد می‌گردد.

در این تحقیق یکنواختی توزیع آب و نیترات در کودآبیاری جویچه‌ای با جریان موجی و پیوسته در شرایط مزرعه‌ای در دو نوبت کودآبیاری اول و دوم مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد، یکنواختی توزیع آب در آزمایش‌های با جریان موجی به طور متوسط ۱۰ تا ۱۵ درصد بیشتر از پیوسته بود. یکنواختی توزیع نیترات علاوه بر نوع جریان ورودی به مدیریت تزریق کود نیز بستگی داشت. تزریق کود در طول مرحله پیشروی منجر به راندمان کاربرد بالا و یکنواختی توزیع پایین (آزمایش اول موجی و پیوسته) و تزریق در مرحله پس از پیشروی جریان منجر به راندمان کاربرد پایین و یکنواختی توزیع بالای نیترات

### منابع مورد استفاده

- ایزدی م، کوچکزاده م، سامانی م و شهابی فر م، ۱۳۸۴. بررسی اثر تغییر پارامترهای موج بر روی یکنواختی و راندمان آبیاری موجی. مجله علوم آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۲، صفحه‌های ۲۷۱ تا ۲۷۹.
- پنای م، ۱۳۹۱. ارائه و ارزیابی مدل مدیریت کود آبیاری جویچه‌ای با در نظر گرفتن نفوذ جانبی. پایان‌نامه دکتری آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس.
- جلینی م و عباسی ف، ۱۳۸۸. ارزیابی یکنواختی کود آبیاری و تلفات کود در آبیاری جویچه‌ای. مجله علوم و صنایع کشاورزی (ویژه آب و خاک)، جلد ۲۳، شماره ۲، صفحه‌های ۷۵ تا ۸۶.
- صدرالدینی سع، منعم، م ج و ناظمی اح، ۱۳۸۵. بهینه‌سازی آبیاری موجی با روش جستجوی ممنوع. مجله علوم کشاورزی ایران، جلد ۳۷، شماره ۱، صفحه‌های ۱۱۷ تا ۱۲۹.
- عباسی ف، ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته (تألیف). انتشارات دانشگاه تهران.
- عباسی ف، لیاقت ع و گنجه ۱، ۱۳۸۷. ارزیابی یکنواختی کودآبیاری در آبیاری جویچه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، شماره ۳۹، صفحه‌های ۱۱۷ تا ۱۲۷.
- علیزاده ح، عباسی ف و لیاقت ع، ۱۳۸۹. ارزیابی یکنواختی توزیع و تلفات نیترات در کودآبیاری جویچه‌ای. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره ۵۱، صفحه‌های ۴۵ تا ۵۵.
- ملکوتی ج و غیبی من، ۱۳۷۹. تعیین حد بحرانی عناصر غذایی مؤثر در خاک، گیاه و میوه در راستای افزایش عملکرد کمی و کیفی محصولات استراتژیک کشور. نشر آموزش کشاورزی، چاپ دوم، ۹۲ صفحه.
- میرزایی ع، صدرالدینی سع و ناظمی اح، ۱۳۹۰. شبیه‌سازی آبیاری موجی و مقایسه آن با جریان پیوسته. مجله مهندسی منابع آب، تابستان سال ۴، صفحه‌های ۷۵ تا ۸۵.
- واعظی ع، همایی م و ملکوتی م، ۱۳۸۱. اثر کودآبیاری بر کارایی مصرف کود و آب در ذرت علوفه‌ای. مجله علوم خاک و آب، شماره ۱۶، صفحه‌های ۱۵۲ تا ۱۶۰.

Anonymous, 2012. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association. APHA, Washington.

Abbasi F, Simunek J, van Genuchten MTh, Feyen J, Adamsen FJ, Hunsaker DJ, Strelkoff TS and Shouse P, 2003. Overland water flow and solute transport: model development and field-data analysis. J Irrig Drain Engin 129(2): 71–81.

Alazba AA, 1995. Hydrograph shape and border irrigation efficiency. J Irrig Drain Engin 121(6): 452-457.

- Bautista, E and Wallender WW, 1993. Optimal management strategies for cutback furrow irrigation. *J Irrig Drain Engin* 119(6): 1099-1114.
- Benham BL, Reddel DL and Marek TH, 2000. Performance of three infiltration model under surge irrigation. *Irrig Sci* 20: 37-43.
- Bishop A, Walker A, Allen WR and Poole GJ, 1981. Furrow advance rates under surge flow systems. *J Irrig and Drain Engin* 107(3): 257-265.
- Blair AW and Smerdon ET, 1987. Modeling surge irrigation infiltration. *J Irrig and Drain Engin* 113(4): 497-515.
- Boldt AL, Watts DG, Eisenhauer DE and Schepers JS, 1994. Simulation of water applied nitrogen distribution under surge irrigation. *Trans ASAE* 37 (4): 1157-1165.
- Ebrahimian H and Playan E, 2014. Optimum management of furrow fertigation to maximize water and fertilizer application efficiency and uniformity. *J Agric Sci and Tec* 16 (3): 591-607
- Horst MG, Shamutalov SS, Goncalves JM and Pereira LS, 2007. Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. *Agric Water Manag* 87: 115 – 127.
- Izuno FT, Podmore TH and Duke HR, 1985. Infiltration under surge irrigation. *ASAE* 28(2): 517-521.
- Moravejalahkami B, Mostafazadeh B, Heidarpour M and Abbasi F, 2012. The effects of different inflow hydrograph shapes on furrow irrigation fertigation. *Bio Engin (III)*: 186-194.
- Playan E and Faci JM, 1997. Border fertigation: field experiment and a simple model. *Irrig Sci* 17: 163-171.
- Sabillón GN and Merkley GP, 2004. Fertigation guidelines for furrow irrigation. *Spanish J Agric Res* 2: 576-587.
- Stringham GE and Keller J, 1979. Surge flow for automatic irrigation. Pp: 132-142. *Proceedings of the ASCE Irrig and Drain Div Special Conference*. Albuquerque, US.
- Threadgill ED, Eisenhauer DE, Young JR and Bar-Yosef B, 1990. Chemigation. Hoffman GJ, Howell TA and Solomon KH (eds). *Management of farm irrigation systems*. ASAE St. Joseph, Mich, Pp. 747-780.
- Walker WR and Humpherys AS, 1983. Kinematic-wave furrow irrigation model. *J Irrig Drain Engin* 109(4): 377-392.
- Zerihun D, Furman A, Warrick AW and Sanchez CA. 2005. Coupled surface-subsurface flow model for improved basin irrigation. *J Irrig Drain Engin* 131(2):111-128.