

شبیه سازی الگوی توزیع نیترات در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی به روش آنالیز ابعادی

بختیار کریمی^{۱*}، فرهاد میرزایی و تیمور سهرابی

استادیار گروه مهندسی علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

Bakhtiar.karimi@gmail.com

دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

fmirzaei@ut.ac.ir

استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

tmsohrabi@yahoo.com

چکیده

سیستم آبیاری قطره‌ای از ابتدا به علت کاربرد دقیق کود و آب به عنوان یک روش آبیاری مناسب در مناطق خشک و نیمه خشک شناخته شده است. مدیریت و طراحی درست سیستم کود آبیاری در این روش تا حد زیادی بستگی به فهم درست توزیع رطوبت و کود که به نوبه خود تابع بافت و لایه بندی خاک، دبی قطره‌چکان، حجم آب کاربردی و غلظت کود آبیاری دارد. در این تحقیق، آزمایش‌ها در یک مدل پلکسی گلاس شفاف با ابعاد $3 \times 1/22 \times 0/5$ متر و روی سه نوع بافت خاک (متوسط، سنگین و سبک) به انجام رسید. دبی قطره‌چکان‌ها با زمان آبیاری ۶ ساعت و با مقادیر Q_1 ، Q_2 و Q_3 (۶، ۴ و ۲ لیتر در ساعت اعمال گردید. همچنین تیمارهای کود آبیاری شامل سه تیمار با غلظت نیترات ۱۲۵، ۲۵۰ و ۳۷۵ میلی گرم در لیتر بود. به منظور اعمال تیمارهای کود آبیاری، از کود اوره (CH_4N_2O) (۴۶ درصد نیتروژن) استفاده گردید. سپس، به کمک قضیه π باکینگهام و با استفاده از آنالیز ابعادی روابطی به منظور شبیه‌سازی توزیع نیترات در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و برای سه نوع بافت مورد بررسی ارائه گردید که تابعی از غلظت نیترات اولیه خاک، غلظت نیترات در کود آبیاری، رطوبت اولیه خاک، فاصله شعاعی نقاط مورد نظر، حجم آب کاربردی در زمان آبیاری، هدایت هیدرولیکی خاک و دبی قطره‌چکان می‌باشد. نتایج مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان داد که این مدل‌ها با دقت بالایی نیترات را پیش‌بینی نموده می‌کنند. و همچنین متوسط مقادیر شاخص میانگین ریشه دوم خطا (RMSE) برای خاک رسی و برای دبی‌های مورد استفاده Q_1 ، Q_2 و Q_3 به ترتیب مقادیر ۰/۰۲۵، ۰/۱۰۵ و ۰/۰۹۳ برآورد گردید و این مقادیر برای خاک لومی به ترتیب مقادیر ۰/۰۳۲، ۰/۰۵۲ و ۰/۰۵۵ و برای خاک شنی به ترتیب مقادیر ۰/۰۲۳، ۰/۰۳۸ و ۰/۰۳۵ می‌باشد. با به کارگیری این روابط در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی، می‌توان عملکرد این سیستم‌ها را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید.

واژه های کلیدی: کود آبیاری، مدیریت آبیاری، کود اوره، مدل فیزیکی.

۱- آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

* - دریافت: آبان ۱۳۹۴ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۴

مقدمه

اجرای یک برنامه‌ریزی آبیاری مناسب به منظور بیشینه کردن جذب نیتروژن توسط گیاه و همچنین کاهش تلفات نترات به وسیله آبیاری، لازم و ضروری به نظر می‌رسد. نگهداری آب در خاک، جذب نیتروژن به وسیله گیاه را آسان ساخته و باعث می‌شود که جریانات سرشار از مواد نیتروژن‌دار به وسیله گیاه جذب شده و تأثیرات زیست محیطی آنها از بین برود. اکثر ترکیبات نیتروژن به صورت اوره، نترات و نیتريت می‌باشند و در اکثر خاک‌ها به مقدار زیاد وجود دارند. نترات، آزادانه در خاک حرکت می‌کند و ممکن است در اثر آبیاری وارد آب‌های زیرزمینی شود. آبیاری نترات هم از لحاظ اقتصادی و هم از لحاظ زیست محیطی (در صورتی که این آب در پایین‌دست مزرعه مصرف شود) خساراتی را به دنبال دارد (لام و همکاران، ۲۰۰۷). کریمی و همکاران (۱۳۹۴ (b)) مناسبترین عمق نصب لاترالها را با استفاده از توزیع همزمان رطوبت و نترات ارزیابی کردند و همچنین پارامترهای طراحی در سیستم آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با توجه به الگوی توزیع رطوبت و نترات پیشنهاد گردید. لام و همکاران (۲۰۰۴) در تحقیقات خود که روی سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و خاک لومی-سیلتی انجام دادند، به بررسی تعیین مقدار بهینه کود نیتروژن برای ذرت پرداختند و دریافتند که مقدار بهینه کود بین ۲۲۵ و ۲۷۵ کیلوگرم در هکتار بوده و به ازای آن تلفات نفوذ عمقی نترات ناچیز می‌باشد. لی و همکاران (۲۰۰۳) توزیع کود نترات را در آبیاری قطره‌ای سطحی با دبی‌های مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که مقدار نترات در کناره‌های پياز رطوبتی حدود پنج برابر بیشتر از مرکز پياز رطوبتی بوده و همچنین دریافتند که مدیریت نامناسب آبیاری باعث افزایش عمق حرکت نترات و متناسب با آن آلودگی منابع آب‌های زیرزمینی شده و اثرات زیست محیطی جبران‌ناپذیری ایجاد می‌کند. لی و همکاران (۲۰۰۷) به توزیع همزمان رطوبت و نترات در خاکهای لایه لایه و یکنواخت پرداختند و جبهه توزیع

رطوبت و نترات در سناریوهای مختلف طراحی مورد ارزیابی قرار دادند و راهکارهای مدیریتی متناسب با آن برای مدیریت بهینه کود آبیاری ارائه کردند. بلاین و همکاران (۲۰۰۶) به شبیه‌سازی توزیع کودهای پرکاربرد نترات، اوره و آمونیوم با استفاده از نرم افزار هایدروس دو بعدی پرداختند. نتایج این مطالعه که برای چهار سیستم آبیاری قطره‌ای و برای پنج سناریوی مختلف کود آبیاری انجام گرفت، نشان داد که مدل هایدروس عملکرد بالایی در شبیه‌سازی کودهای مورد استفاده دارد. هر چند که در زمینه توزیع رطوبت مطالعات زیادی به انجام رسیده است (از جمله کریمی و همکاران ۱۳۹۳ و (a,c) ۱۳۹۴، کوک و همکاران (۲۰۰۶)، میرزایی و همکاران (۲۰۰۵)، بوفن (۲۰۱۰)، لی و همکاران (۲۰۰۴)، بشارت (۱۳۸۸)، کندلوس و سیمونک (۲۰۱۰)، لازارویچ و همکاران (۲۰۰۷)، سینگ و همکاران (۲۰۰۶)، پروونزانو (۲۰۰۷)، سیال و اسکگر (۲۰۰۹)) اما اکثر تحقیقات انجام شده در زمینه توزیع نترات در آبیاری قطره‌ای مربوط به ارزیابی توزیع این یون پرکاربرد در خاک بوده و تحقیقات اندکی روی مدلسازی توزیع نترات در خاک به انجام رسیده است.

در اکثر مطالعات مدل HYDRUS برای شبیه‌سازی استفاده شده است که این هر چند مدل دقیق و پرکاربردی می‌باشد اما نیاز به پارامترهای ورودی زیادی دارد که اندازه‌گیری آنها هزینه‌بر و مشکل می‌باشد. از معیارهای مهمی که برای طراحی سیستم آبیاری قطره‌ای باید در نظر گرفته شود، توزیع رطوبت و نترات در ناحیه توسعه ریشه می‌باشد. بسته به نوع خاک، دبی قطره‌چکان، رطوبت اولیه خاک، هدایت هیدرولیکی، حجم آب کاربردی و غلظت کود آبیاری، مقادیر رطوبت و نترات در تمام نقاط اطراف پياز رطوبتی قابل بررسی است. بنابراین، هدف از این تحقیق، ارائه روابطی با استفاده از آنالیز ابعادی و به منظور تخمین توزیع نترات در سیستم

آبیاری قطره‌ای سطحی در شرایط مختلف بهره‌برداری می‌باشد.

می‌شوند می‌توان آنها را به n-m گروه بدون بعد تقسیم کرد. از جمله متغیرهای به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f(N, \theta, F, q, K_s, V, t, R, \theta_0, N_0) = 0 \quad (1)$$

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2)$$

که در آن:

$N_0, \theta_0, R, V, t, K_s, q, F, \theta, X, Y$ به ترتیب از سمت راست نیترات اولیه خاک، رطوبت اولیه خاک، شعاع جبهه رطوبتی نسبت به محل خروجی، زمان آبیاری، حجم آب کاربردی، هدایت هیدرولیکی خاک، دبی خروجی از قطره‌چکان، غلظت نیترات در آب آبیاری، رطوبت خاک، مقادیر نیترات خاک، مختصات افقی نقاط، مختصات عمودی نقاط می‌باشد. در معادله فوق ده متغیر بعد دار $N_0, \theta_0, R, V, t, K_s, q, F, \theta$ و سه متغیر اصلی (T, M, L) وجود دارد. لذا هفت ($n-m=7$) عدد بی بعد خواهیم داشت.

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (3)$$

روش تعیین پارامترهای π بدین صورت است که اگر از n متغیر فوق به تعداد m (در اینجا ۳) متغیر انتخاب شود، برای هر π مربوط به متغیرهای فوق، از سه متغیر تکراری همراه با یک متغیر غیر تکراری استفاده می‌شود و در نهایت معادلات بدون بعد به شکل روابط زیر حاصل می‌شوند:

مواد و روش‌ها

تئوری آنالیز ابعادی

مطالعات زیادی در زمینه توزیع جبهه رطوبتی در حین آبیاری با استفاده از آنالیز ابعادی صورت گرفته است. اما تاکنون معادله برای توزیع نیترات در ناحیه پیاز رطوبتی ارائه نشده است. هدف اصلی این مطالعه، ارائه معادله کلی در ارزیابی توزیع نیترات در سیستم آبیاری قطره‌ای به روش آنالیز ابعادی می‌باشد (میرزایی و همکاران، ۲۰۰۵، سینگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ لازارویچ و همکاران، ۲۰۰۷) و بر اساس قوانین حاکم بر حرکت آب در خاک استنباط این است که پروفیل توزیع رطوبت و نیترات اطراف لاترالها به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. با شناخت بهتر پارامترهایی که در این ارتباط تأثیر دارند و یا روابط بین این پارامترها استفاده از آنالیز ابعادی روش مناسبی می‌باشد. یکی از قضایای مهم آنالیز ابعادی در مکانیک سیالات قضیه π باکینگهام می‌باشد. این قضیه بیان می‌کند که اگر n متغیر بعددار در یک معادله همگن ابعادی وجود داشته باشد که به وسیله m متغیر اصلی توصیف

$$\pi_1 = q^{a_1} K_s^{b_1} F^{c_1} V = (L^3 T^{-1})^{a_1} (L T^{-1})^{b_1} (M L^{-3})^{c_1} L^3 = \begin{cases} a_1 = -\frac{3}{2} \\ b_1 = \frac{3}{2} \\ c_1 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\pi_2 = q^{a_2} K_s^{b_2} F^{c_2} R = (L^3 T^{-1})^{a_2} (L T^{-1})^{b_2} (M L^{-3})^{c_2} L^1 = \begin{cases} a_2 = -\frac{1}{2} \\ b_2 = \frac{1}{2} \\ c_2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\pi_3 = q^{a_3} K_s^{b_3} F^{c_3} N = (L^3 T^{-1})^{a_3} (L T^{-1})^{b_3} (M L^{-3})^{c_3} M L^{-3} = \begin{cases} a_3 = 0 \\ b_3 = 0 \\ c_3 = -1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\pi_4 = q^{a_4} K_s^{b_4} F^{c_4} \theta = (L^3 T^{-1})^{a_4} (L T^{-1})^{b_4} (M L^{-3})^{c_4} = \begin{cases} a_4 = 0 \\ b_4 = 0 \\ c_4 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\pi_5 = q^{a_5} K_s^{b_5} F^{c_5} t = (L^3 T^{-1})^{a_5} (L T^{-1})^{b_5} (M L^{-3})^{c_5} T = \begin{cases} a_5 = -\frac{1}{2} \\ b_5 = \frac{3}{2} \\ c_5 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\pi_6 = q^{a_6} K_s^{b_6} F^{c_6} N_0 = (L^3 T^{-1})^{a_6} (L T^{-1})^{b_6} (M L^{-3})^{c_6} M L^{-3} = \begin{cases} a_6 = 0 \\ b_6 = 0 \\ c_6 = -1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\pi_7 = q^{a_7} K_s^{b_7} F^{c_7} \theta_0 = (L^3 T^{-1})^{a_7} (L T^{-1})^{b_7} (M L^{-3})^{c_7} = \begin{cases} a_7 = 0 \\ b_7 = 0 \\ c_7 = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$t^* = \frac{K_s^{\frac{3}{2}}}{q^{\frac{1}{2}}} \cdot t \quad (22)$$

$$N_0^* = \frac{N_0}{F} \quad (23)$$

$$\theta_0^* = \theta_0 \quad (24)$$

با برقراری روابطی بین پارامترهای بدون بعد، ضرایب این معادلات بصورت بالا مشخص شدند. با توجه به اینکه این اعداد بدون بعد قابلیت ضرب و تقسیم را دارند پس توابع N^* و V^* به صورت ترکیبی از چند π مختلف ارائه می‌گردد که به صورت زیر می‌باشد:

$$N^* = \pi_3 \cdot \pi_7 \cdot \sqrt{\pi_6}$$

$$\xrightarrow{\text{جایگزینی}} N^* = \frac{N \theta_0}{F} \sqrt{\frac{N_0}{F}} = \frac{N N_0^{0.5} \theta_0}{F^{1.5}} \quad (25)$$

$$V^* = \sqrt{\pi_1^2 \cdot \pi_2}$$

$$\xrightarrow{\text{جایگزینی}} V^* = \left(\frac{K_s}{q}\right)^{\frac{7}{4}} R^{0.5} V \quad (26)$$

پس از جایگزینی روابط و ساده کردن آن روابط به صورت زیر در می‌آید:

$$N^* = F(V^*) \quad (27)$$

$$N = \frac{N^* F^{1.5}}{\theta_0 N_0^{0.5}} \quad (28)$$

پس با جایگزینی نهایی روابط به صورت زیر ساده می‌شود:

$$N = \frac{F^{1.5}}{\theta_0 N_0^{0.5}} F(V^*) = \frac{F^{1.5}}{\theta_0 N_0^{0.5}} \cdot m_1 \cdot V^{*n_1} \quad (29)$$

که در معادلات فوق m_1 و n_1 ضرایب ثابت می‌باشند. برای برگرداندن روابط بدون بعد به شکل ابعادی

پس از حل معادلات و تعیین ضرایب a_1, a_2, a_3, \dots و b_1, b_2, b_3, \dots توان‌های π_1 تا π_7 از روابط زیر مشخص خواهند شد:

$$\pi_1 = \left(\frac{K_s}{q}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot V \quad (11)$$

$$\pi_2 = \left(\frac{K_s}{q}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot R \quad (12)$$

$$\pi_3 = \frac{N}{F} \quad (13)$$

$$\pi_4 = \theta \quad (14)$$

$$\pi_5 = \frac{K_s^{\frac{3}{2}}}{q^{\frac{1}{2}}} \cdot t \quad (15)$$

$$\pi_6 = \frac{N_0}{F} \quad (16)$$

$$\pi_7 = \theta_0 \quad (17)$$

اعداد π_1 تا π_7 بدون بعد و توابعی از $R, \theta_0, N_0, N, \theta, F, q, K_s, V, t$ ، اندیس ستاره از خود آن متغیرها نشان داده می‌شوند. بنابراین این معادلات به صورت زیر تغییر پیدا خواهد کرد:

$$V^* = \left(\frac{K_s}{q}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot V \quad (18)$$

$$R^* = \left(\frac{K_s}{q}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot R \quad (19)$$

$$N^* = \frac{N}{F} \quad (20)$$

$$\theta^* = \theta \quad (21)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (35)$$

که در آن:

P_i : مقادیر پیش‌بینی شده، O_i : مقادیر اندازه‌گیری شده، n : تعداد نمونه‌های بکار رفته و \bar{O} میانگین مقادیر متوسط اندازه‌گیریها می‌باشد. حداقل مقدار ME ، $RMSE$ و CD صفر است. حداکثر مقدار EF برابر یک می‌باشد. EF و CRM می‌توانند مقدار منفی داشته باشند مقادیر زیاد ME نشانگر بدترین حالت کارکرد مدل است، در حالی که مقدار زیاد $RMSE$ نشان می‌دهد که برآورد بیش از حد و یا کمتر از حد مدل در مقایسه با مشاهدات چقدر است. آماره CD نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیریها، نشان می‌دهد. مقدار آماره EF ، مقادیر پیش‌بینیها را با میانگین اندازه‌گیریها مقایسه می‌کند. مقدار منفی EF بیانگر آن است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، برآوردی بهتری از مقادیر پیش‌بینی شده دارد. آماره CRM نیز نشانگر تمایل مدل به مقادیر اندازه‌گیریها می‌باشد. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی این آماره‌ها برابر با $CRM=0$ ، $EF=0$ ، $CD=1$ ، $RMSE=0$ ، $ME=0$ خواهد شد.

روش انجام آزمایش

این آزمایشها در یک مدل پلکسی گلاس با ابعاد $3m \times 1/22m \times 0/5m$ و در آزمایشگاه مرکزی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران به انجام رسید. این محفظه شفاف به سه بخش مجزا تفکیک شده (شکل ۱) و امکان انجام همزمان سه آزمایش همزمان فراهم شده بود. در این مطالعه از سه نوع بافت (متوسط، سنگین و سبک) استفاده گردید (جدول ۱). طراحی مدل آزمایشگاهی به گونه‌ای انجام گرفت که هر قسمت مربوط به یک نوع خاک باشد. با توجه به اینکه توزیع افقی آب در خاک‌های سنگین بیشتر است، عرض محفظه مربوط به

آن، بایستی بجای θ^* ، V^* مقادیر آنها را جایگزین کنیم که معادلات به صورت زیر خواهد شد:

$$N^* = m_2 \cdot V^{*n_2}$$

$$\xrightarrow{\text{جایگزینی معادلات}} \frac{N N_0^{0.5} \theta_0}{F^{1.5}} = m_2 \cdot \left(\left(\frac{K_s}{q} \right)^{\frac{7}{4}} R^{0.5} V \right)^{n_2}$$

$$\xrightarrow{\text{جایگزینی}} N = m_2 \cdot \frac{F^{1.5}}{\theta_0 N_0^{0.5}} \cdot \left(\frac{K_s}{q} \right)^{\frac{7}{4} n_2} R^{0.5 n_2} V^{n_2} \quad (30)$$

با در نظر گرفتن توابع بالا و برازش روابط توانی بین اعداد بدون بعد، ضرایب معادلات (m_2 ، n_2) بدون بعد محاسبه گردید. این محاسبات برای هر سه نوع بافت خاک جداگانه انجام گرفت. همچنین ضریب همبستگی بین اعداد بدون با دقت قابل قبول برازش داده شد. سپس در مرحله بعد برای ارزیابی اعتبار مدل، از تحلیل خطاهای باقیمانده و اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده استفاده شد. آماره‌های لازم شامل، حداکثر خطا، میانگین ریشه دوم خطا، ضریب تبیین^۳، کارایی مدل^۴ و ضریب باقیمانده^۵ هستند که تعریف ریاضی این آماره‌ها به صورت زیر است.

$$ME = \text{MAX} |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (31)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (32)$$

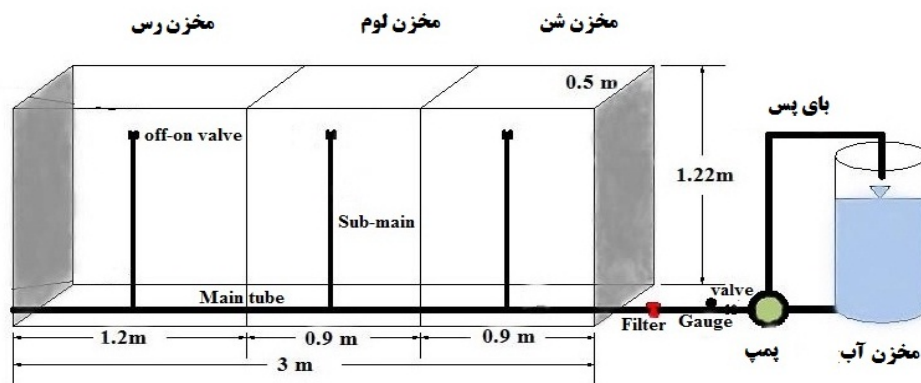
$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (33)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (34)$$

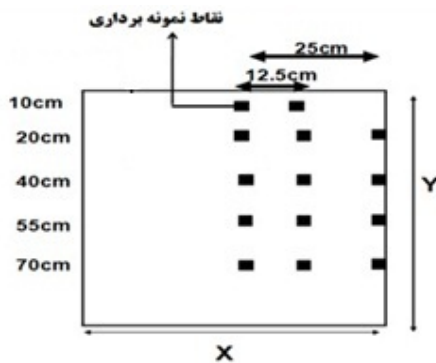
¹ - ME
² - RMSE
³ - CD
⁴ - EF
⁵ - CRM

سطح نسبتاً زیر ایجاد گردید؛ به گونه‌ای این چسب شفافیت بدنه مدل را حفظ کرده بود (کندلوس و سیمونک، ۲۰۱۰a و ۲۰۱۰b). همچنین پس از پایان آزمایش‌ها و در هنگام تخلیه خاک از محفظه‌ها، از نقاط مشخص شده در شکل ۲ نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده و به آزمایشگاه منتقل گردید تا رطوبت و نترات خاک اندازه‌گیری شود. تخلیه محفظه‌ها بایستی به صورت کاملاً دقیق انجام گیرد و در هنگام تخلیه آن نمونه‌های رطوبت و نترات به وسیله بیلچه جمع‌آوری (مطابق شکل ۲) و در داخل محفظه پلاستیکی شماره گذاری شده قرار گرفت. به منظور اندازه‌گیری نترات ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در هوای آزمایشگاه نگهداری گردید تا خشک شوند سپس با تهیه نسبت‌های مشخص عصاره اشباع و قرار دادن در داخل شیکر این نمونه‌ها کاملاً مخلوط می‌گردید. سپس این عصاره با عبور از کاغذ صافی در داخل ظرف‌های مخصوص قرار گرفته و آماده اندازه‌گیری می‌شد. سپس نترات با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر با طول موج ۴۱۰ اندازه‌گیری شد.

خاک سنگین (۱/۲ متر) بزرگتر از خاک‌های با بافت سبک و متوسط (هر کدام ۰/۹ متر) طراحی شد (شکل ۱). دبی قطره‌چکان‌ها (نتافیم ساخت کشور امریکا)، Q_1 ، ۴ و Q_2 ۶ لیتر در ساعت اعمال گردید. مدت زمان آبیاری در کلیه تیمارها شش ساعت بود. نمای کاملی از موقعیت نصب تجهیزات در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین تیمارهای کود آبیاری شامل سه تیمار با غلظت نترات ۱۲۵، ۲۵۰ و ۳۷۵ میلی گرم در لیتر بود. به منظور اعمال تیمارهای کود آبیاری در این تحقیق از کود اوره (CH_4N_2O) (۴۶ درصد ازت) استفاده گردید. دلیل انتخاب کود اوره این است که این کود در بین کشاورزان عمومیت دارد و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد و همچنین به عنوان یک ترکیب مطمئن که دارای حلالیت کامل می‌باشد شناخته شده است. اما سایر ترکیبات ممکن است انحلال کامل را پیدا نکنند و موجبات گرفتگی قطره‌چکانها را فراهم کنند. در تحقیق حاضر تیمارهای کود آبیاری در یک سوم انتهایی زمان آبیاری انجام شد. همچنین به منظور جلوگیری از ایجاد جریان‌ات ترجیحی در حین آزمایش، با استفاده از چسب و پاشیدن شن، یک



شکل ۱- لایسیمتر آزمایشگاهی و اتصالات مربوط برای انجام آزمایشات



شکل ۲- نمایی از نقاط اندازه‌گیری نیترات در هر محفظه و نمایی از نمونه برداری خاک در نقاط مشخص شده پس از انجام آزمایش.

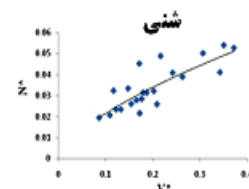
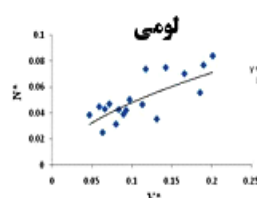
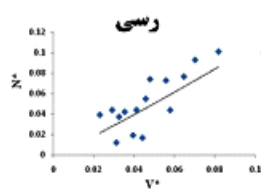
جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده

نمونه خاک	بافت خاک	درصد رس	درصد سیلت	درصد شن	درصد رطوبت وزنی اشباع	درصد رطوبت وزنی F.C	چگالی حقیقی	چگالی ظاهری
بافت سنگین	رسی-شنی	۳۶	۱۸	۴۶	۳۷/۵	۲۱/۶	۲/۶۵	۱/۲
بافت متوسط	لومی-رسی-شنی	۲۳	۲۲	۵۵	۳۴/۵	۱۸/۷	۲/۶۵	۱/۳۵
بافت سبک	شنی-لومی	۱۱	۱۳	۷۶	۳۰/۱	۱۴/۱	۲/۵۹	۱/۴۵

نتایج و بحث

توزیع نیترات در خاک جاگذاری گردد. به همین ترتیب ضرایب مربوط به توزیع نیترات در خاک لومی محاسبه گردید که این ضرایب به ترتیب ۰/۱۷۶ و ۰/۵۶۴ با ضریب همبستگی ۵۳/۱ می‌باشد. نتایج در خاک شن نشان می‌دهد که ضریب معادله و توان معادله و ضریب همبستگی مربوط به این برازش برای سیستم آبیاری سطحی به ترتیب ۰/۰۹۸، ۰/۶۵۹ و ۶۶/۸ می‌باشد.

نتایج برازش معادلات ضرایب بدون بعد نشان می‌دهد که اعداد بدون بعد همبستگی نسبتاً مناسبی دارند. با توجه به شکل ۳ ضریب همبستگی بین N^* و V^* در خاک رسی ۳۸/۴ درصد می‌باشد و متناسب با آن ضریب معادله برازش داده شده ۱/۳۱۶ و توان معادله ۱/۰۸۸ می‌باشد که بایستی این ضرایب در معادلات اصلی مربوط به



شکل ۳- برازش رابطه بین اعداد بدون بعد N^* و V^* در سیستم آبیاری سطحی برای سه نوع بافت خاک مورد بررسی .

می‌شوند (رابطه ۱۹ بعنوان نمونه‌ای از روند تعیین ضرایب و توان‌ها ارائه شده است):

حال با جاگذاری ضرایب و توان‌ها در معادلات قبلی، روابط مربوط به توزیع نیترات به شکل زیر نوشته

$$N^* = m_2 \cdot V^{*n_2} \xrightarrow{\text{جابگزینی}} \frac{N N_0^{0.5} \theta_0}{F^{1.5}} = m_2 \cdot \left(\left(\frac{K_s}{q} \right)^{\frac{7}{4}} R^{0.5} V \right)^{n_2} \xrightarrow{\text{جابگزینی}} N$$

$$= m_2 \frac{F^{1.5}}{\theta_0 N_0^{0.5}} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{\frac{7}{4} n_2} R^{0.5 n_2} V^{n_2} \xrightarrow{m_2=1.316 \quad n_2=1.088} \quad \text{رس (۳۶)}$$

$$N(x, y) = 1.316 \frac{F^{1.5}}{\theta_0 N_0^{0.5}} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{1.904} R^{0.544} V^{1.088}$$

$$N(x, y) = 0.176 \frac{F^{1.5}}{\theta_0 N_0^{0.5}} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.987} R^{0.282} V^{0.564} \quad \text{لومی (۳۷)}$$

$$N(x, y) = 0.098 \frac{F^{1.5}}{\theta_0 N_0^{0.5}} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{1.153} R^{0.329} V^{0.659} \quad \text{شنی (۳۸)}$$

مختصات خود قطره‌چکان در نظر گرفته شد. نتایج ارزیابی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای مدل‌های توزیع نیترات در خاک بیانگر آن است که این مدل‌ها علی‌رغم پیچیدگی خاص توزیع یون نیترات (به دلیل فعل و انفعالات و واکنشهایی که نیترات در خاک انجام می‌دهد که شامل پدیده نیتریفیکاسیون و دی-نیتریفیکاسیون می‌باشد) در خاک، دارای عملکرد مناسبی می‌باشد. نتایج ارزیابی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در خاک رسی نشان می‌دهد که این مدل‌ها دارای برآورد خوبی بوده و همچنین پارامترهای آماری مربوط به این ارزیابی (جدول ۲) نشان داد که این پارامترها در دامنه قابل قبولی بوده و ضرایب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در خاک رسی برای دبی‌های Q_1 ، Q_2 ، Q_3 و Q_4 به ترتیب ۷۵، $69/7$ و $99/4$ درصد می‌باشد. همچنین همانطور که از شکل ۴ پیداست که این مدل‌ها کارایی بالایی در تخمین نیترات در خاک دارند فقط در تیمار مربوط به دبی Q_2 و در عمق ۲۰ سانتیمتری (با فاصله افقی ۱۲/۵ سانتیمتر) مقادیر برآورد شده مدل کمتر از مقدار اندازه‌گیری می‌باشد و یا به عبارتی در این نقطه جهش نیترات داریم که این ممکن است به دلیل واکنشهای ناشناخته داخل خاک باشد که مدل قادر به تشخیص این رفتارها نمی‌باشد.

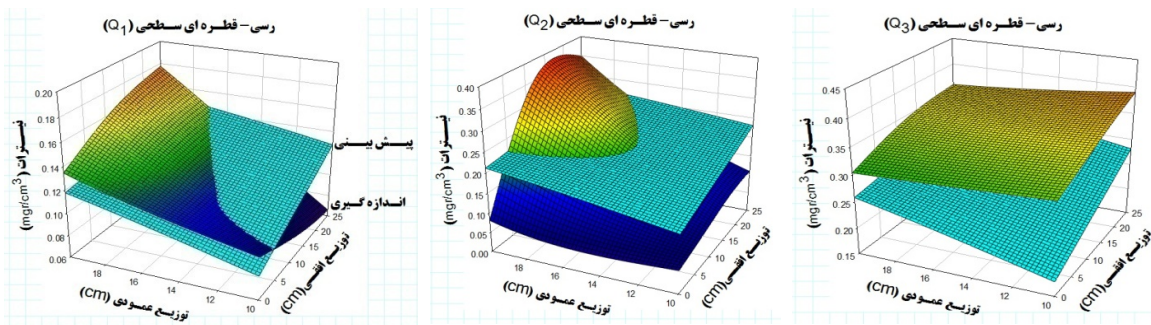
در این شکل علت جهش نیترات در خاک ممکن است به دلیل پدیده نیتریفیکاسیون در خاک باشد که باعث می‌شود نیترات در خاک به وجود بیاید. ولی در کل با وجود این چنین شرایطی و اینکه یون نیترات خیلی

در معادلات فوق ابعاد پارامترهای این معادلات به صورت زیر می‌باشد که در آن توزیع نیترات در خاک $(N(x, y))$ در نقطه‌ای به مختصات x و y بر حسب میلی‌گرم بر سانتیمتر مکعب، رطوبت اولیه خاک (θ_0) بر حسب مقدار حجمی، دبی خروجی از قطره‌چکانها (q) بر حسب لیتر در ساعت، هدایت هیدرولیکی خاک (K_s) بر حسب متر بر ساعت، غلظت نیترات در آب آبیاری و مربوط به دوره زمانی یک سوم انتهایی زمان آبیاری (F) بر حسب میلی‌گرم بر سانتیمتر مکعب، نیترات اولیه خاک (N_0) بر حسب میلی‌گرم بر سانتیمتر مکعب، شعاع نقاط مورد نظر در پیاز رطوبتی (R) بر حسب سانتیمتر و حجم آب کاربردی مورد استفاده در زمان آبیاری (V) بر حسب لیتر می‌باشد.

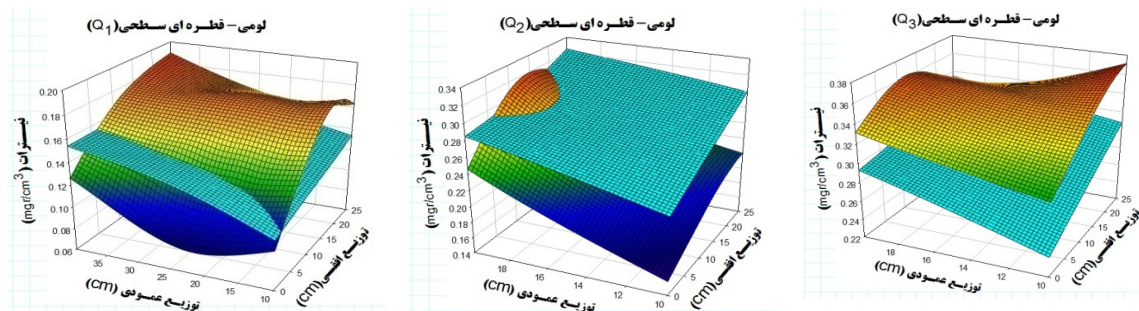
پس از ارزیابی معادلات برازش داده شده، برای رسم مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده از نرم افزار Sigma Plot استفاده گردید تا مقایسه بین این دو پارامتر به آسانی صورت گیرد. که در این نمودارها (شکل ۴ تا ۶) گراف‌های رنگین‌کمانی مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده و گراف‌های آبی رنگ مربوط مقادیر پیش‌بینی شده می‌باشد. در این گراف‌ها محور Z مربوط به مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده می‌باشد و محور X مربوط به مختصات افقی نقاط و محور Y مربوط به مختصات عمودی نقاط در پیاز رطوبتی می‌باشد. یادآور می‌شوم که در این تحقیق با فرض متقارن شکل پیاز رطوبتی، نمونه‌برداری از سمت راست پیاز رطوبتی صورت گرفت و متناسب با آن قطره-چکان در وسط مبدا مختصات فرضی قرار گرفته و مبدا

خاک شنی نیز به انجام رسید که نتایج این مقایسه در شکل ۶ آورده شده است. نتایج این گرافها نشان می‌دهد که مدل دارای کارای بالای برای تخمین نترات می‌باشد. همچنین نتایج پارامترهای آماری نیز نشان می‌دهد که این مدلها دارای خطای کمی می‌باشند (جدول ۲) و ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در این خاک و برای دبی مورد استفاده به ترتیب مقادیر ۸۶/۳، ۵۵/۱ و ۷۲/۲ می‌باشد.

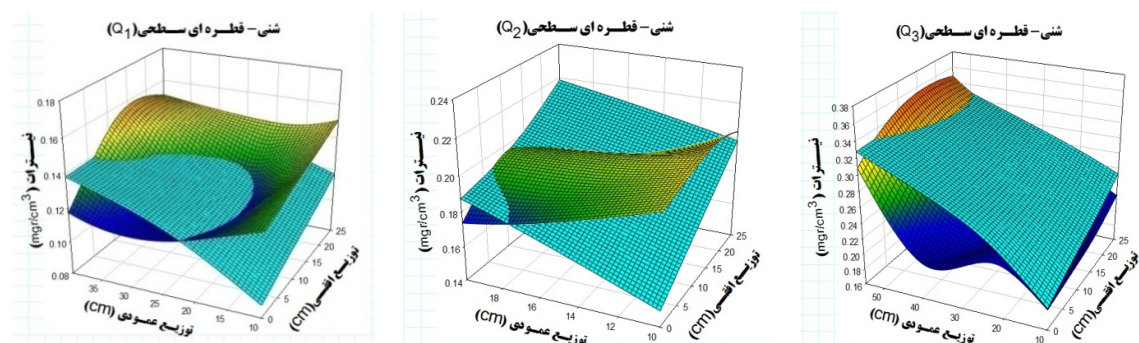
پویا و فعال می‌باشد، این مدلها ارزیابی مناسبی از توزیع این یون در خاک دارند. همچنین ارزیابی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در خاک لومی نشان می‌دهد که مدل ارزیابی دقیقی از توزیع نترات در خاک دارد. نتایج آنالیز پارامترهای آماری نیز در دامنه معقولی می‌باشد. همچنین ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش-بینی شده هم برای تیمارهای دبی اعمال شده به ترتیب مقادیر ۶۵/۴، ۸۲/۳ و ۸۰ می‌باشد (جدول ۲). همچنین مقایسه بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توزیع دو بعدی نترات در خاک رسی برای دبی‌های مورد بررسی



شکل ۵- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توزیع دو بعدی نترات در خاک لومی برای دبی‌های مورد بررسی



شکل ۶- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده توزیع دو بعدی نترات در خاک شنی برای دبی‌های مورد بررسی

نتیجه گیری

نترات در خاک در جهات افقی و عمودی را شبیه‌سازی نمایند. همچنین نتایج این تحقیق با مطالعه کریمی و همکاران (کریمی و همکاران ۱۳۹۳ و (a,c) ۱۳۹۴) که با استفاده از آنالیز ابعادی به ترتیب به شبیه‌سازی توزیع مجدد رطوبتی، سرعت جبهه پیشروی، الگوی سطح خیس شده در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی پرداخته بودند، مقایسه گردید و همه این تحقیقات عملکرد بالای آنالیز ابعادی را برای شبیه‌سازی تایید می‌نمایند. کاربرد این معادلات در طراحی سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی می‌تواند منجر به بهبود عملکرد این سیستم‌ها گردد.

پیش‌بینی توزیع نترات در خاک می‌تواند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد و برای طراحی بهینه سیستم‌های آبیاری قطره‌ای مورد استفاده قرار بگیرد. در این مطالعه، به منظور شبیه‌سازی آن، آزمایش‌هایی بر روی سه نوع بافت مختلف خاک و با هدف ارائه معادلاتی به منظور تخمین توزیع نترات در خاک در جهات مختلف در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای سطحی انجام پذیرفت. به منظور تعیین ضرائب و توان‌های معادلات، از روش آنالیز ابعادی استفاده شد. نتایج تحقیق نشان داد که معادلات حاصل شده در این مطالعه، قادرند با دقت مناسبی، توزیع

جدول ۲- پارامترهای آماری مربوط به مقایسه داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده برای نترات در خاک لومی

نوع خاک	دبی	CRM	CD	RMSE	ME	R ²
رسی	Q ₁	۰/۱۰۲	۱/۹۴	۰/۰۲۵	۰/۰۳۴	۷۵
	Q ₂	-۰/۱۲	۷/۷۲	۰/۱۰۵	۰/۱۳۱	۶۹/۷
	Q ₃	۰/۲۴	-۰/۰۵۱	۰/۰۹۳	۰/۱۴۳	۹۹/۴
لومی	Q ₁	۰/۰۵۳	۳/۳۹	۰/۰۳۲	۰/۰۴۸	۶۵/۴
	Q ₂	-۰/۱۶۳	۱/۳۹	۰/۰۵۲	۰/۰۷۷	۸۲/۳
	Q ₃	۰/۱۲۸	-۰/۱۶۸	۰/۰۵	۰/۰۷	۸۰
شنی	Q ₁	۰/۰۸۸	-۰/۴۷۱	۰/۰۲۳	۰/۰۴۲	۸۶/۳
	Q ₂	۰/۰۱۷	۰/۵۸۸	۰/۰۳۸	۰/۰۵۷	۵۵/۱
	Q ₃	-۰/۱۰۶	۰/۶۶۴	۰/۰۳۵	۰/۰۸۹	۷۲/۲

فهرست منابع

۱. بشارت، س. ۱۳۸۸. بررسی انتقال آب در خاک با جذب آن توسط گیاه بر اساس مطالعات میدانی و حل معادلات حاکم. پایان نامه دکتری آبیاری و زهکشی. دانشگاه تبریز.
۲. کریمی، ب.، سهرابی، ت.، میرزایی، ف.، آبابایی، ب. (a) ۱۳۹۴. استخراج روابط تخمین سرعت پیشروی جبهه حرکت آب در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی با کمک آنالیز ابعادی. مجله دانش آب و خاک. جلد ۲۵، شماره ۱، صفحه ۱۰۱-۱۱۲.
۳. کریمی، ب.، سهرابی، ت.، میرزایی، ف.، آبابایی، ب. (b) ۱۳۹۴. بررسی توزیع رطوبت- نترات و عمق نصب لاترالها در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی. مجله پژوهش آب ایران، جلد ۹، شماره ۳، صفحه ۸۱-۹۴.
۴. کریمی، ب.، سهرابی، ت.، میرزایی، ف.، آبابایی، ب. ۱۳۹۳. ارائه روابطی برای پیش‌بینی الگوی توزیع مجدد رطوبت خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به روش آنالیز ابعادی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۲۱، شماره ۶، صفحه ۲۲۳-۲۳۷.

۵. کریمی، ب.، میرزایی، ف.، سهرابی، ت. (۱۳۹۴). بسط معادلاتی برای برآورد الگوی سطح خیس شده در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی به روش تحلیل ابعادی. مجله دانش آب و خاک. جلد ۲۵، شماره ۳، صفحه ۲۴۱-۲۵۲.

6. Bresler, E. 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrig. Sci.* 1: 13- 17.
7. Blaine R. H, Jirka Simunek, Jan W. Hopmans. 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural water management* Vol: 86, pp: 102 – 113.
8. Bufon, V.B. 2010. Optimizing Subsurface Drip Irrigation Design and Management with Hydrus-2D/3D Model. Ph.D thesis in Texas Tech University.
9. Cook, F.J., Thorburn, P.J., Fitch, P., Charlesworth, P.B., and Bristow, K.L. 2006. Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environ Model Softw* 21:1353–1359.
10. Cote, C. M., Bristow K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., and Thorburn, P. J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 22: 143-156.
11. Dirksen, C. 1978. Transient and steady flow from subsurface line sources at constant hydraulic head in anisotropic soil. *Trans. ASAE* 21(5): 913- 919.
12. Gilley, J. R. and Allred, E. R. 1974. Infiltration and root extraction from subsurface irrigation laterals. *Trans. ASAE.* 17 (5): 927- 933.
13. Kandelous, M.M., and Simunek, J. 2010(a). Comparison of numerical, analytical and empirical models to estimate wetting pattern for surface and subsurface drip irrigation. *Irrig. Sci.* 28: 435-444.
14. Kandelous, M.M., and Simunek, J. 2010(b). Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agri. Water mang.* 97: 1070-1076.
15. Lamm, F.R., Ayars, J.E., and Nakayama, F.S. 2007. *Micro Irrigation for Crop Production (Design, Operation and Management)*. Elsevier book.
16. Lazarovitch, N., Warrick, A.W., Furman, A., and Simunek, J. 2007. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. *Vadose Zone J.* 6:116–123.
17. Li, J., Zhang, J., and Rao, M. 2004. Wetting Pattern and Nitrogen Distribution as Affected by Fertilization Strategies from a Surface Point Source. *Agri. Water mang.* 67: 89-104.
18. Li Jiu-sheng, Ji Hong-yan, Li Bei and Liu Y. 2007. Wetting patterns and nitrate distributions in layered-textural soils under drip irrigation. *Agricultural Sciences in China.* 6 : (8). Pp: 970-980.
19. Meshkat, M., Warner, R.C., and Workman, S.R. 1999. Modeling of Evaporation Reduction in Drip Irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 125 (6): 315- 323.
20. Mirzaei, F., Liaghat, A.M., Sohrabi, T.M., and Omid, M. 2005. Simulation of the wetting front from a linear source in tape irrigation systems. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 6(23):53-66.
21. Philip, J. R. 1991. Effects of root and subirrigation depth on evaporation and percolation losses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1520- 1523.
22. Siyal A.A., Skaggs T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural water management* Vol: 96, pp: 893 – 904.

23. Singh, D.K., Rajput, T.B.S., Singh, D.K., Sikarwar, H.S., Sahoo, R.N., and Ahmad, T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Journal of Agricultural Water Management* . 83: 130- 134.
24. Thorburn, P. J., Cook, F. J., and Bristow, K. L. 2003. Soil- dependant wetting from trickle emitters: Implications for system design and management. *Irrig. Sci.* 22: 121-127.