

تقریب نیمه تحلیلی توزیع دو بعدی رطوبت در آبیاری قطره ای - نواری

فرهاد میرزایی^{۱*}، عبدالحسین هورفر^۲ و مجتبی حاتمی^۳

چکیده

تعیین قطر و عمق خاک مرطوب شده و نیز رطوبت توزیع شده در فواصل مختلف نسبت به منبع تغذیه پس از پایان آبیاری از اهمیت ویژه‌ای در طراحی آبیاری قطره‌ای برخوردار هستند. حرکت آب در خاک در منبع تغذیه خطی در دو بعد (X,Z) صورت می‌گیرد. در این پژوهش یک مدل فیزیکی طراحی شد و آزمایش‌های پیشروی جبهه رطوبتی در خاک در دبی‌های مختلف و در زمان‌های مختلف صورت گرفت و رطوبت خاک پس از پایان آبیاری به صورت مستقیم تعیین گردید. از بسط و ساده سازی معادله واریک و رساندن به مرحله‌ای قابل حل و سپس تقریب تحلیلی آن در دو بعد (X,Z) رطوبت خاک برآورد گردید و مقادیر رطوبت برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از حل معادله با مقدار اندازه‌گیری شده همخوانی بسیار خوبی نشان داد و این حقیقت تقویت شد که بحثی که در این مقاله توسعه یافته است عموماً در یک محدوده وسیعی از خاک معتبر هستند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، تقریب نیمه تحلیلی، جبهه رطوبتی، منبع تغذیه خطی، توزیع رطوبت

۱ و ۲. به ترتیب استادیار و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج
۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه مازندران

*: نویسنده مسوول

منبع تغذیه در زیر خاک) پرداخت ولی آنرا با مدل آزمایشگاهی و یا نتایج مزرعه‌ای مورد مقایسه قرار نداد بلکه دیگران بعداً معادله ریاضی وی را به صورت کاربردی حل و آنرا با مدل‌های آزمایشگاهی و یا مزرعه‌ای مورد مقایسه قرار دادند. واریک با ارائه فرضیاتی با استفاده از معادله فیلیپ برای حالت دو بعدی جریان معادله‌ای ریاضی ارائه کرد (واریک، ۱۹۸۵). توربون و همکاران معادلات فوق را برای ارزیابی روش آبیاری قطره‌ای مزارع نیشکر و محصولات باغی شمال شرقی استرالیا به کار بردند (توربون، ۲۰۰۳). سازمان تحقیقات استرالیا (CSIRO) از ۲۹ نمونه خاک با محدوده وسیعی از هدایت هیدرولیکی و خصوصیات دیگر خاک به منظور تاثیر بافت و تیپ خاک بر روی شکل و ابعاد حجم مرطوب استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که معادلات فوق ابعاد خاک مرطوب را کمی بیشتر از مقدار اندازه‌گیری برآورد می‌کنند. اف لافولی و همکاران (۱۹۸۹) به روش عددی به حل معادله حرکت آب در خاک در روش آبیاری قطره ای در دو بعد پرداختند در روش حل آن‌ها برای دبی‌های ۰/۵، ۱/۵ و ۳ لیتر بر ساعت را به مدت ۱۶ ساعت در خاک لوس (Loes soil) حداکثر شعاع مرطوب نسبت به منبع تغذیه را ۳۸ سانتی‌متر و حداکثر عمق مرطوب را حدود ۳۰ سانتی-متر برآورد گردید

مواد و روش‌ها

الف- بخش تئوریک و حل ریاضی

برای حالتی که تغذیه آب به خاک توسط چند خروجی نزدیک و پشت سر هم در طول لوله یا نوار آبیاری صورت می‌گیرد (شکل شماره ۱)، بخش مرطوب خروجی‌های مجاور (همسایه) به هم رسیده و نوار مرطوب ممتدی را در طول لوله آبد (نوار) تشکیل می‌دهند. در چنین شرایطی جریانی در داخل خاک به صورت دو بعدی قابل تفکیک است. واریک با ارائه فرضیاتی با استفاده از معادله فیلیپ برای حالت دو بعدی جریان معادله‌ای ارائه کرد (واریک ۱۹۸۵). در پژوهش حاضر، با استفاده از معادله ریچاردز و با استفاده از یک سری تبدیل‌ها معادله واریک به دست آمد. سپس با بسط

در سال‌های اخیر کاربرد آبیاری قطره‌ای برای بسیاری از محصولات و در گستره وسیعی از بافت و ساختمان و خصوصیات متنوع خاک به نحو چشم‌گیری افزایش نشان می‌دهد. رسیدن به راندمان مطلوب در این روش بستگی به طراحی صحیح و اجرای درست سیستم دارد. عدم فهم درست توزیع آب در خاک سبب پایین آمدن راندمان می‌شود وقتی خروجی‌های روی لوله به هم نزدیک باشند، نوار مرطوب ممتدی را در طول ردیف‌ها سبب می‌شوند (شوارتزمن، ۱۹۸۶). فاصله بین خروجی‌ها روی لوله آبد و فاصله لوله‌های آبد از یک-دیگر بایستی بر اساس درجه هم‌پوشانی قطر خاک مرطوب شده توسط خروجی‌های مجاور (همسایه) تعیین شود (بی‌زور، ۱۹۹۶). طول مدت آبیاری به فاصله زمانی رسیدن جبهه رطوبتی به عمق توسعه ریشه گیاه و یا مضرری از آن بستگی دارد.

کفایت آبیاری نیز وقتی تامین می‌شود که توزیع کافی رطوبت در خاک صورت گرفته و یا به عبارت دیگر رطوبت ذخیره شده در منطقه ریشه گیاه به اندازه‌ای باشد که کمبود رطوبت خاک را جبران نماید.

در حالی که نتایج آزمایشگاهی برای فهم فیزیکی و بیان آب در خاک خیلی مهم هستند، ولی مهم‌تر از آن این است که از این نتایج آزمایشگاهی برای حرکت آب در خاک و توزیع رطوبت مدل‌های کاربردی تدوین گردد (زازواتا، ۱۹۸۵). تعداد زیادی از مدل‌های حرکت آب در خاک غیر اشباع در آبیاری قطره‌ای متمرکز شده‌اند که اغلب مدل‌های تحلیلی و نیمه عددی هستند. مدل‌های تحلیلی معمولاً با جریان دائمی و یا بینابینی نفوذ از منبع تغذیه نقطه‌ای یا خطی سر و کار دارند (المالوگ-یو، ۱۹۹۷). مدل‌های فیلیپ، واریک، لومن، بن‌آشر و ودن در این گروه قرار دارند. فیلیپ معادله‌ای شبه خطی در شرایط جریان دائمی و در محیط غیر اشباع در سه بعد ارائه کرد. وی پس از ارائه یک سری فرضیات ساده کننده معادله فوق را به صورت تحلیلی حل کرد (فیلیپ ۱۹۷۲). فیلیپ به حل ریاضی معادله نفوذ در حالت ماندگار و در خاک هم‌وزن برای منبع تغذیه نقطه-ای و خطی در دو حالت (منبع تغذیه روی سطح خاک و

قرار گرفت. در زیر چگونگی این مراحل به تفصیل تشریح می‌گردد.

و ساده کردن معادله واریک و رساندن آن به مرحله‌ای قابل حل، و با تقریب نیمه تحلیلی آن در دو بعد (X,Z) رطوبت خاک بر آورد گردید و رطوبت بر آورد شده با مقادیر اندازه گیری شده مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل



شکل ۱: لوله آبیاری قطره‌ای نواری (Tape)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot (k_{(\theta)} \nabla h) + \frac{\partial k}{\partial z} \quad (1)$$

یا

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial h}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial h}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial h}{\partial z}) + \frac{\partial k}{\partial z} \quad (2)$$

معادله (۲) در شرایط دائمی و با لحاظ تبدیل (فلیپ (۱۹۷۲

$$k = k_0 e^{\alpha h} \quad (3)$$

به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_0 e^{\alpha h} \frac{\partial h}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (k_0 e^{\alpha h} \frac{\partial h}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (k_0 e^{\alpha h} \frac{\partial h}{\partial z}) + \frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

که در آن: k_0 : مقدار ثابت است که از برآزش مقادیر پتانسیل ماتریک خاک (h) با هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک به دست می‌آید. $k(\theta)$: هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک (LT^{-1}). α : ثابت تجربی است و بعد آن (L^{-1}) است و عکس آن معادل مکش خاک درهنگام ورود هوا به خاک و h پتانسیل آب خاک است (L). برای سادگی مسئله، یک جمله از معادله (۴) را در نظر می‌گیریم و آن را بسط می‌دهیم.

(۵)

$$-\frac{\partial}{\partial x} (k_0 e^{\alpha h} \frac{\partial h}{\partial x}) = -\frac{\partial}{\partial x} (k_0 \frac{\partial}{\partial x} (e^{\alpha h})) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_0 e^{\alpha h}}{\alpha} \right) \right) = -\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{k_0 e^{\alpha h}}{\alpha} \right)$$

حال اگر تبدیل $\phi = \frac{k_0}{\alpha} e^{\alpha h}$ را در سمت راست معادله

(۵) جای‌گزین کنیم خواهیم داشت:

مواد ورودی‌ها

الف- بخش تئوریک و حل ریاضی

برای حالتی که تغذیه آب به خاک توسط چند خروجی نزدیک و پشت سر هم در طول لوله یا نوار آبیاری صورت می‌گیرد (شکل شماره ۱) بخش مرطوب خروجی‌های مجاور (همسایه) به هم رسیده و نوار مرطوب ممتدی را در طول لوله آبد (نوار) تشکیل می‌دهند. در چنین شرایطی جریان آب در داخل خاک به صورت دو بعدی قابل تفکیک است. واریک با ارائه فرضیاتی با استفاده از معادله فلیپ برای حالت دو بعدی جریان معادله‌ای ارائه کرد (واریک ۱۹۸۵). در پژوهش حاضر معادله واریک با استفاده از معادله ریچاردز و لحاظ تبدیلی به دست آمد سپس با بسط و ساده کردن معادله واریک و رساندن آن به مرحله‌ای قابل حل، و با تقریب نیمه تحلیلی آن در دو بعد (X,Z) رطوبت خاک برآورد گردید رطوبت برآورد شده با مقادیر اندازه گیری شده مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفت در زیر چگونگی این مراحل به تفصیل تشریح می‌گردد.

معادله ریچاردز از ترکیب معادله پیوستگی و معادله دارسی به دست می‌آید. برای یک خاک ایزوتروپ می‌توان معادله ریچاردز را به صورت زیر نوشت. (دانیل و همکاران، ۱۹۹۸)

تقریب نیمه تحلیلی توزیع دو بعدی رطوبت در آبیاری قطره ای - نواری

انتگرال فوق برای شرایط مختلف یعنی این که قطره چکان در سطح خاک و یا زیر خاک باشد و نیز اینکه به صورت یک خروجی تنها و یا به صورت یک تعداد خروجی نزدیک به هم با فاصله کم عمل تغذیه را انجام دهند قابل تفکیک است.

که در آن: ϕ_{3s} : تابع $(\phi = \frac{k_0}{\alpha} e^{\alpha h})$ در سه بعد و

خروجی در سطح خاک، ϕ_{3B} : تابع $(\phi = \frac{k_0}{\alpha} e^{\alpha h})$ در

سه بعد و خروجی در زیر خاک، Z : برابر است با

$Z = \alpha \frac{Z}{2}$ که Z فاصله قائم جبهه پیشروی از منبع

تغذیه است و R : برابر است با $R = \alpha \frac{r}{2}$ که r فاصله

افقی جبهه پیشروی از منبع تغذیه و α : نیز قبلاً تعریف شده است.

معادله فیلیپ نیز براساس معادله (۱۰) بنا شده

است. به طوری که قبلاً گفته شد واریک این معادله را به صورت زیر حل کرده است.

(۱۲)

$$\phi_{3s} = 2 \left[\phi_{3B} - \exp(2z) \int_z^{\infty} \exp(-2z) (\phi_{3B}) dz \right]$$

که پارامترهای معادله فوق در معادله (۱۱) تعریف شده‌اند. معادله فوق برای حالتی است که تغذیه آب به خاک توسط چند خروجی نزدیک و پشت سر هم در طول لوله یا نوار آبیاری صورت می‌گیرد. در چنین شرایطی جریان آب در داخل خاک به شکل دو بعدی و به صورت زیر قابل تفکیک است.

$$\phi_{2s} = 2 \left\{ \phi_{2B} - \exp(2z) \int_z^{\infty} \exp(-2z) \phi_{2B} dz \right\} \quad (۱۳)$$

که در آن ϕ_{2s} : تابع $(\phi = \frac{k_0}{\alpha} e^{\alpha h})$ در دو بعد و

خروجی در سطح خاک، ϕ_{2B} : تابع $(\phi = \frac{k_0}{\alpha} e^{\alpha h})$ در

دو بعد و خروجی در زیر خاک و Z : برابر است با

$Z = \alpha \frac{Z}{2}$ که Z فاصله قائم جبهه پیشروی رطوبتی از

منبع تغذیه است.

ϕ_{2B} عبارت است از:

$$\phi_{2B} = \left(\frac{q_L}{2\pi} \right) \exp(z) k_0 [(R^2 + Z^2)^{0.5}] \quad (۱۴)$$

که در آن q_L : دبی در واحد طول نوار، R : برابر

$R = \alpha r / 2$ که r فاصله افقی جبهه پیشروی رطوبتی از

$$-\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{k_0}{\alpha} e^{\alpha h} \right) = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad (۶)$$

و اگر جمله آخر معادله (۴) را بسط دهیم داریم:

$$\frac{\partial k}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_0}{\alpha} e^{\alpha h} \right) = \alpha \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_0}{\alpha} e^{\alpha h} \right) = \alpha \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (۷)$$

حال اگر به جای تمام جملات معادله (۴) بسط‌های

معادل آن‌ها را جای‌گزین نمائیم داریم:

$$-\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (۸)$$

یا

$$-\nabla^2 \phi + \alpha \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (۹)$$

یا

$$\nabla^2 \phi - \alpha \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad (۱۰)$$

معادله (۱۰) یک معادله خطی است که روش‌های

تحلیلی برای حل آن وجود دارد (واریک، ۱۹۸۵). معادله

فوق برای استفاده در آبیاری قطره‌ای مناسب است و

برای تعیین رطوبت اطراف خروجی‌ها می‌توان از آن

استفاده کرد. واریک معادله فوق را با فرضیاتی حل کرد.

شکل ۲ نحوه جریان را برای خروجی نقطه‌ای که منطقه

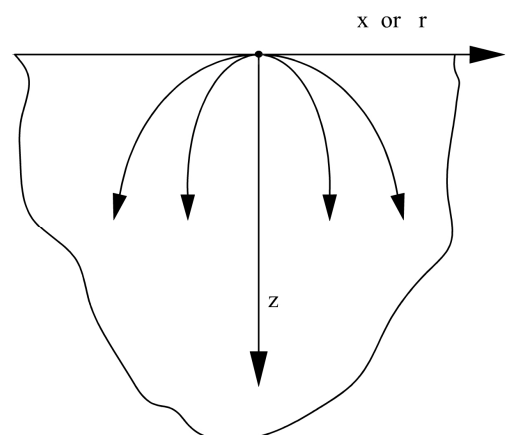
جریان برای آن نیمه محدود است نشان می‌دهد. اگر

هیچ جریانی به جز جریان از سطح خاک وارد و یا خارج

نشود.

جواب معادله (۱۰) عبارت است از:

$$\phi_{3s} = \left\{ \phi_{3B} - \exp(2z) \int_z^{\infty} \exp(-2z) [\phi_{3B}] dz \right\} \quad (۱۱)$$



شکل ۲: شکل هندسی جریان از یک قطره چکان (ناکایاما

و باکس ۱۹۶۸)

وجود دارد، حد بالای انتگرال فوق بی نهایت است. از آن جایی که روش های عددی برای محاسبه انتگرال ها با حدود متناهی به کار گرفته می شوند و در این جا با انتگرالی سر و کار داریم که حد بالایی آن بی نهایت است، معادله (۱۹) به فرم زیر بازنویسی می شود.

$$I = \int_z^\infty \frac{q_L A}{2\pi} e^{-z-b(R^2+Z^2)^{0.5}} dz = \underbrace{\int_z^\ell \frac{q_L A}{2\pi} e^{-z-b(R^2+Z^2)^{0.5}} dz}_{I_1} +$$

$$\underbrace{\int_\ell^\infty \frac{q_L A}{2\pi} e^{-z-b(R^2+Z^2)^{0.5}} dz}_{I_2}$$

اگر منظور محاسبه I با خطایی کمتر از مقدار مفروض ε (مثلاً $\varepsilon = 10^{-5}$) باشد ابتدا کمترین ℓ را برای این که $0 < I_2 < \frac{\varepsilon}{2}$ باشد تعیین می شود. این امکان از آن جا ناشی می شود که:

$$\lim_{\ell \rightarrow \infty} \int_\ell^\infty \frac{q_L A}{2\pi} e^{-z-b(R^2+Z^2)^{0.5}} dz = 0 \quad (21)$$

پس از محاسبه ℓ با به کارگیری یکی از روش های عددی انتگرال I_1 را که دارای حدود متناهی است با خطایی کمتر از $\frac{\varepsilon}{2}$ محاسبه می شود.

واضح است که:

$$e^{-z-b(R^2+Z^2)^{0.5}} < e^{-(1+b)z} \quad (22)$$

پس

$$(23)$$

$$\frac{Aq_L}{2\pi} \int_\ell^\infty e^{-z-b(R^2+Z^2)^{0.5}} dz < \frac{Aq_L}{2\pi} \int_\ell^\infty e^{-(1+b)z} dz = \frac{Aq_L}{2\pi} \frac{e^{-(1+b)\ell}}{1+b}$$

بنا بر این اگر

$$\frac{Aq_L}{2\pi} \cdot \frac{e^{-(1+b)\ell}}{1+b} \leq \frac{\varepsilon}{2} \quad (24)$$

یعنی

$$\ell \geq \frac{1}{1+b} \text{Ln} \frac{Aq_L}{2\pi(b+1)\varepsilon} \quad (25)$$

آن گاه به طریق اولی

$$(26)$$

لذا در معادله (۲۵) ℓ برابر سمت راست قرار داده می شود.

منبع تغذیه، α : پارامتر ثابت تجربی خاک که قبلاً تعریف شده است، k_0 : تابع بسیل تبدیل یافته از نوع دوم

توابع بسیل

توابع بسیل تبدیل یافته به اندیس n نوع اول و دوم که به ترتیب با $I_n(x)$ و $k_n(x)$ نشان داده می شوند. جواب های معادله دیفرانسیل $x^2 y'' + xy' - (x^2 + n^2)y = 0$ می باشند (آبرامو و یتز، ۱۹۶۵).

مقادیر $k_1(x)$ و $I_1(x)$, $k_0(x)$, $I_0(x)$ به صورت نمودارهایی در کتب ریاضی آمده است. همچنین به صورت جدول در کتب ریاضی وجود دارد (اشپینگل، ۱۹۸۱).

برای محاسبه عددی انتگرال (۱۳) ابتدا با توجه به شکل نمودار تابع $k_0(x)$ که به شکل تابع نمایی با توان منفی است به کمک جدول مقادیر این تابع با بکارگیری روش حداقل مربعات به صورت تابع $k_0(x) \approx Ae^{-bx}$ تقریب می زنیم.

$$k_0(x) = 1.69433 e^{-1.30(x)} \quad (15)$$

$$R^2 = 0.9962$$

معادله (۱۵) را می توان به صورت کلی زیر نوشت:

$$k_0(x) = A e^{-b(x)} \quad (16)$$

اگر در معادله (۱۳) به جای ϕ_{2B} مقدار مساوی آن را از معادله (۱۴) قرار دهیم، داریم:

$$(17)$$

$$\phi_{2s} = 2 \left\{ \underbrace{\left(\frac{q_L}{2\pi} \right) \exp(z) k_0(x) [(R^2 + Z^2)^{0.5}] - \exp(2z)}_{(i)} \int_z^\infty \exp(-2z) \left(\frac{q_L}{2\pi} \right) \exp(z) k_0(x) [(R^2 + z^2)^{0.5}] dz \right\}_{(2)}$$

اگر بخش دوم معادله یعنی فقط مقدار انتگرال معادله را جدا کنیم، داریم:

$$\int_z^\infty \exp(-2z) \left(\frac{q_L}{2\pi} \right) \exp(z) k_0(x) [(R^2 + Z^2)^{0.5}] dz \quad (18)$$

حال اگر به جای $k_0(x)$ معادله فوق مقدار آن را از معادله (۱۵) قرار دهیم و آن را ساده کنیم، داریم:

$$(19)$$

$$\int_z^\infty \frac{q_L}{2\pi} e^{-z} \cdot A e^{-b(R^2+Z^2)^{0.5}} dz = \int_z^\infty \frac{Aq_L}{2\pi} e^{-z-b(R^2+Z^2)^{0.5}} dz$$

ملاحظه می شود گام های خیلی مثبتی برای حل معادله (۱۳) برداشته شده و بخش انتگرال آن ساده شده است. مشکل $k_0(x)$ برطرف شده است، اما یک مشکل دیگر

تقریب نیمه تحلیلی توزیع دو بعدی رطوبت در آبیاری قطره ای - نواری

$$\phi_{2s} = 2 \left[\left(\frac{q_L}{2\pi} \right) e^z k_0 [(R^2 + Z^2)^{0.5}] - e^{2z} (I) \right] \quad (37)$$

در معادله (۳۷) با محاسبه (I) و با معلوم بودن مقدار q_L ، دبی در واحد طول نوار، هم‌چنین محاسبه k_0 با استفاده از معادله (۱۵)، مقدار ϕ_{2s} (یا ϕ) در هر عمق (Z) و شعاع (r) نسبت به منبع تغذیه خطی قابل محاسبه است. با به‌دست آمدن مقدار ϕ با استفاده از تبدیل معادله ریچاردز $\phi = \left(\frac{k_0}{\alpha} \right) e^{\alpha h}$ و با معلوم بودن

k_0 (که نایستی با مقدار تابع بسط اشتباه شود) و α ، مقدار h به‌دست می‌آید.

با داشتن مقدار h با استفاده از معادله وانگنختن،

$$\theta = \frac{\theta_v - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (\alpha h)^{1 - \frac{1}{n}} \right]^{-n}$$

مقدار رطوبت (θ_v) در

هر عمق (Z) و شعاع (r) نسبت به منبع تغذیه قابل محاسبه است.

لذا در این تحقیق با استفاده از معادله فوق و به ترتیبی که ذکر شد رطوبت نقاط مختلف حجم خاک مرطوب شده در زیر نوار آبیاری پس از پایان آبیاری برای بافت‌های مختلف مورد آزمایش محاسبه شده است.

ب- بخش ساخت مدل فیزیکی و انجام آزمایشات

در این تحقیق یک مدل فیزیکی به ابعاد $180 \times 120 \times 90$ سانتی‌متر از جنس ورقه‌های شفاف پلکسی‌گلاس ساخته شد. این مدل روی شاسی از جنس نبشی‌های فلزی با مقاومت زیاد که تحمل وزن زیاد را بنماید مستقر شد. با نصب چرخ‌های فلزی مناسب در زیر شاسی امکان جابه‌جایی مجموعه در زمانی که خالی از خاک باشد میسر شد. در بخش تحتانی محفظه درهای کشویی برای خارج کردن سریع خاک تعبیه شده بود. شکل ۳ نمای کلی مدل فیزیکی را نشان می‌دهد.

با استفاده از یک میزهدریولیکی دو پمپ نصب شده روی آن و دو فشارسنج امکان انتقال و اندازه‌گیری دقیق جریان در طول زمان آبیاری فراهم آمد.

در این پژوهش از یک حلقه نوار (TAPE) با فواصل خروجی ۳۰ سانتی‌متر که بیشتر از انواع دیگر نوارها مورد مصرف دارد استفاده شد. در این پژوهش بار فشار کارکرد قطره چکان ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، و ۱/۰ اتمسفر جبهه

$$\ell = \frac{1}{1+b} \text{Ln} \frac{A q_L}{\pi (b+1) \varepsilon} \quad (27)$$

پس با خطایی کمتر از $\frac{\varepsilon}{2}$ داریم:

$$I = \frac{A q_L}{2\pi} \int_z^\ell e^{-z-b(R^2+Z^2)^{0.5}} dz \quad (28)$$

حال با به‌کارگیری یکی از روش‌های عددی این انتگرال را با خطایی که کمتر از $\frac{\varepsilon}{2}$ باشد حساب می‌کنیم.

در این پژوهش از میان روش‌های عددی موجود از روش رومبرگ^۲ که اصلاح یافته قاعده دوزنقه می‌باشد استفاده شده است. با توجه به قانون دوزنقه مقدار عددی انتگرال $I = \int_a^b f(x) dx$ را می‌توان به صورت زیر برآورد نمود.

$$I = \frac{h}{2} [f(a) + 2f(a+h) + \dots + f(b)] \quad (29)$$

که در آن، h برابر با نسبت تفاضل حدود بالا و پایین انتگرال به تعداد گام‌های انتخاب شده $\left(h = \frac{b-a}{n} \right)$ می‌باشد. بر پایه روش رومبرگ:

$$I_1 = \frac{h_1}{2} [f(a) + f(b)] \quad (30)$$

و

$$h_1 = (b - a) \quad (31)$$

و

$$I_2 = \frac{h_2}{2} [f(a) + 2f(a+h_2) + f(b)] \quad (32)$$

و

$$h_2 = (b - a) / 2 \quad (33)$$

و

$$I_3 = \frac{h_3}{2} [f(a) + 2f(a+h_3) + 2f(a+2h_3) + 2f(a+3h_3) + f(b)] \quad (34)$$

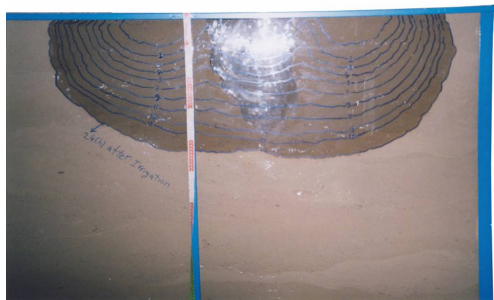
و

$$I_3 = \frac{h_3}{2} [f(a) + 2f(a+h_3) + 2f(a+2h_3) + 2f(a+3h_3) + f(b)] \quad (35)$$

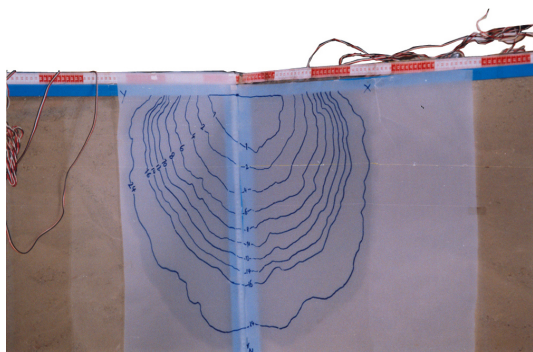
مقدار انتگرال I عبارت خواهد بود از:

$$I = \frac{1}{45} (I_1 - 20I_2 + 64I_3) \quad (36)$$

با قراردادن مقدار انتگرال فوق در معادله (۱۷) خواهیم داشت.



شکل ۵: پیشروی جبهه رطوبتی خاک با سه خروجی در انتهای آزمایش



شکل ۶: نحوه انتقال جبهه پیشروی رطوبت در مدل به کاغذ کالک

نتایج

در تعیین توزیع رطوبت خاک در دو بعد از روش تقریب نیمه تحلیلی حل معادله A.W. Warricke استفاده شد. حل معادله فوق الذکر پتانسیل ماتریک خاک (h) را در دو بعد Z و T معین می‌کند که با استفاده از معادله وان گنوختن، رطوبت معادل پتانسیل‌های فوق تعیین می‌شود. مقادیر رطوبت برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در دو بعد برای خاک‌های مختلف مورد آزمایش در شکل‌های ۷ تا ۹ نمایش داده شده است. مقایسه بین رطوبت اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده از مدل در خاک‌های مختلف پس از پایان آبیاری مشخص می‌کند که مقادیر فوق در خاک‌های رسی - شنی و لومی شنی به هم نزدیک بوده و بین رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده در خاک لوم حدود ۵ درصد اختلاف وجود دارد.

پیشروی رطوبتی در زمان‌های ۱ تا ۱۴ ساعت و رطوبت باقی‌مانده در خاک، ۲۴ ساعت پس از پایان آبیاری تعیین گردید که در بخش نتایج ارائه شده است. شکل ۴ جبهه رطوبتی از سه خروجی به فاصله ۳۰ سانتی‌متر پس از گذشت ۴ ساعت را نشان می‌دهد که هنوز جبهه رطوبتی خروجی‌های مجاور (همسایه) به یکدیگر نرسیده‌اند و در شکل شماره ۵ جبهه رطوبتی همان سه خروجی را در پایان آزمایش (۱۴ ساعت) که جبهه رطوبتی کاملاً یک‌نواختی را ایجاد کرده‌اند را نشان می‌دهد. شکل ۶ نحوه انتقال جبهه پیشروی رطوبتی از مدل فیزیکی به کاغذ کالک جهت استخراج داده‌ها به منظور تجزیه و تحلیل و ارائه معادلات را نشان می‌دهد.



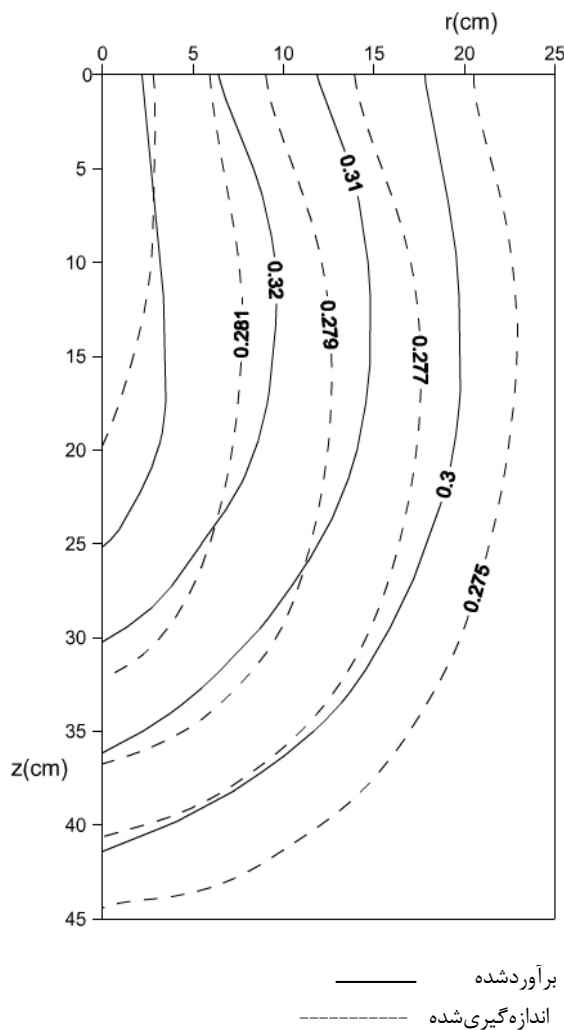
شکل ۳: مدل فیزیکی در حین آزمایش



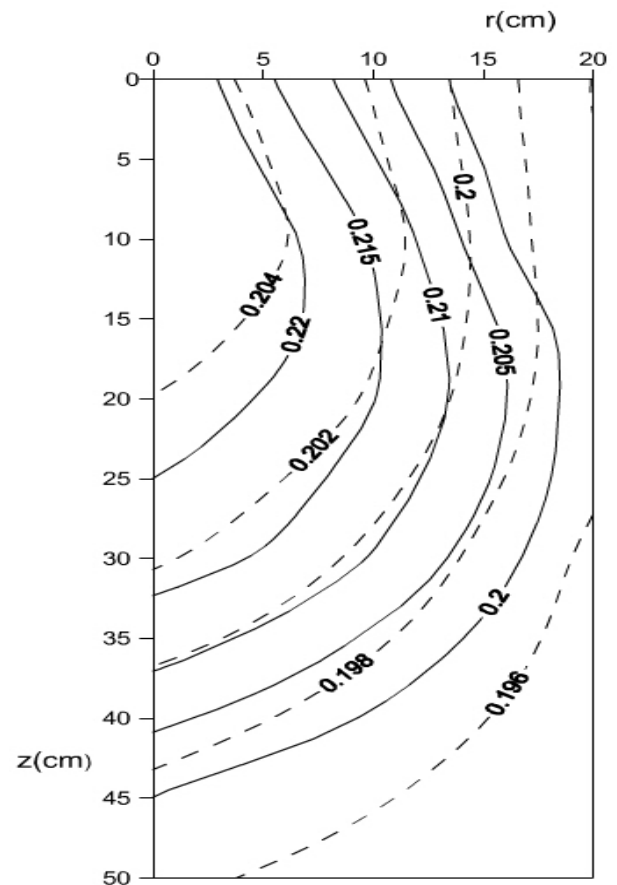
شکل ۴: جبهه پیشروی رطوبت خاک با سه خروجی در ابتدای آزمایش

تقریب نیمه تحلیلی توزیع دو بعدی رطوبت در آبیاری قطره ای - نواری

متر برآورد گردید چون روش‌های دیگر از جمله روش عددی اف و همکاران برای خاکی غیر از خاک‌های مورد آزمایش در پژوهش حاضر است. لذا امکان مقایسه وجود ندارد چون نتایج حل از معادله با نتایج آزمایش از مدل فیزیکی در خاک‌های مختلف همخوانی خوبی نشان می‌دهد. لذا می‌توان از مدل با دقت خوبی رطوبت خاک را پس از پایان آبیاری که برای برنامه‌ریزی آبیاری ضروری است برآورد کرد.



شکل ۸: خطوط هم رطوبت اندازه‌گیری و برآورد شده از حل معادله پس از پایان آبیاری در خاک رسی - شنی
($T = 14 \text{ h}$ و $q = 2/59 \text{ L/h.m}$)



شکل ۷: خطوط هم رطوبت اندازه‌گیری و برآورد شده از حل معادله A. W. Warricke پس از پایان آبیاری در خاک شنی ($T = 14 \text{ h}$ و $q = 2/59 \text{ L/h.m}$)

از طرف دیگر حداکثر شعاع مرطوب برای دبی ۲/۵۹ لیتر در ساعت بر متر و برای مدت زمان آبیاری ۱۴ ساعت در خاک شنی حدود ۱۶ سانتی‌متر. در خاک رسی - شنی ۲۰ سانتی‌متر و در خاک لوم ۱۸ سانتی‌متر برآورد گردیده است. و نیز عمق خاک مرطوب در خاک شنی حدود ۵۴ سانتی‌متر. در خاک رسی - شنی ۴۵ و در خاک لوم نیز حدود ۴۰ سانتی‌متر برآورد گردیده است که با مقادیر اندازه‌گیری شده همخوانی خوبی را نشان می‌دهند. اف لافولی و همکاران به روش عددی به حل معادله حرکت آب در خاک در روش آبیاری قطره‌ای در دو بعد پرداختند در روش حل آن‌ها برای دبی ۳۰ لیتر بر ساعت را به مدت ۱۶ ساعت در خاک لوس (Loes soil) حداکثر شعاع مرطوب نسبت به منبع تغذیه را ۳۸ سانتی‌متر و حداکثر عمق مرطوب را حدود ۳۰ سانتی-

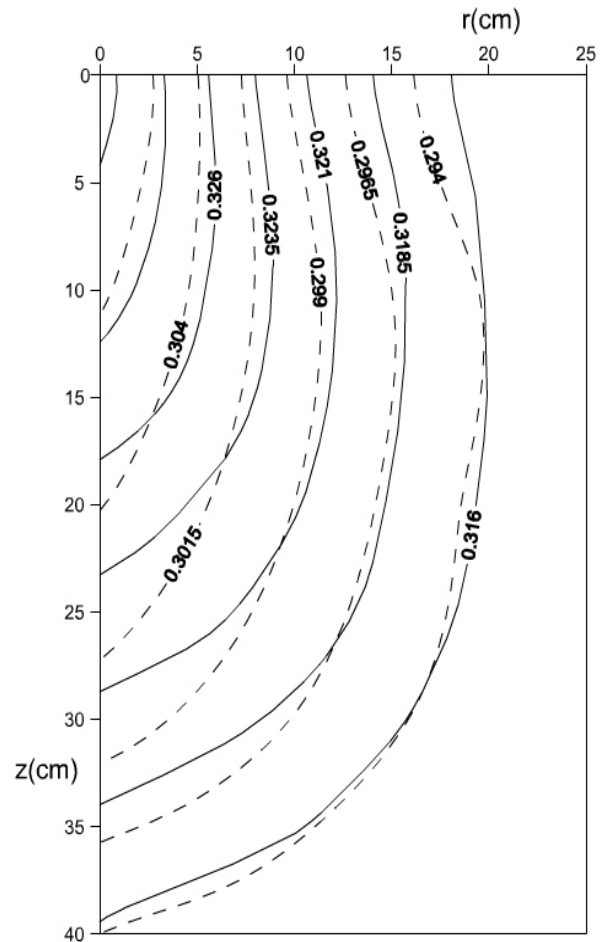
حساسیت رطوبت پروفیل خاک که توسط مدل محاسبه شده است مورد ملاحظه قرار گرفت. جدول ۱ حساسیت رطوبت محاسبه شده از مدل را در مقابل پارامترهای موثر در آن نشان می‌دهد. مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش رطوبت و مقادیر منفی نشان‌دهنده کاهش رطوبت محاسبه شده در مدل در ازاء ده درصد افزایش یا کاهش پارامترهای هیدرولیکی مهم خاک می‌باشد.

جدول ۱: حساسیت تغییرات رطوبت پروفیل خاک محاسبه شده از مدل مقابل پارامترهای موثر در آن

پارامترهای موثر	k_0	n	α	θ_r	θ_s
افزایش ۱۰ درصد	-۱/۸	-۲/۴۳	۱/۳۴	۲/۱۵	۱/۴۵
کاهش ۱۰ درصد	۲/۴۵	۲/۶۹	-۱/۴۴	۲/۰۵	-۱/۸۵

بحث

در این پژوهش به روش تقریب نیمه تحلیلی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره ای-نواری در دو بعد Z و T برآورد شده و به همراه مقادیر اندازه گیری شده به صورت خطوط هم رطوبت در شکل‌های شماره ۸ و ۹ نشان داده شده است. به طوری که در شکل‌ها ملاحظه می‌گردد، مقادیر رطوبت برآورد شده و اندازه گیری شده در سه خاک و در اعماق مختلف خیلی به هم نزدیک می‌باشند که البته در خاک لومی-شنی هم‌خوانی بیشتری ملاحظه می‌گردد. مقایسه بین رطوبت اندازه-گیری شده و برآورد شده از حل تقریبی نشان می‌دهد که بین آن دو حداکثر حدود ۵ درصد اختلاف وجود دارد. وجود مقدار ناچیز خطا طبیعی است. در خصوص این مقدار ناچیز خطا استدلال این است که به جهت این که در مرحله نهایی حل، پتانسیل ماتریک حاصل از حل معادله فوق توسط معادله وان گنوختن به رطوبت خاک تبدیل می‌شود. پارامترهای معادله وان گنوختن یعنی α ، n و θ_r ، θ_s توسط مدل روزتا محاسبه می‌شوند. میزان دقت در برآورد این پارامترها در برآورد رطوبت در روش تقریب نیمه تحلیلی نقش دارند و این



برآورد شده
اندازه‌گیری شده

شکل ۹: خطوط هم رطوبت اندازه‌گیری و برآورد شده از حل معادله A. W. Warrike در خاک لوم ($L/h.m$)
($T = 14 h$ و $q = 2/59$)

آنالیز حساسیت

به طوری که قبلاً ذکر شده است پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل θ_s ، θ_r ، n ، α با استفاده از نرم‌افزار روزتا برآورد گردیده‌اند و نیز هدایت هیدرولیکی خاک (k_0) اندازه‌گیری شده است. به جهت تخمینی بودن پارامترهای فوق‌الذکر و نیز عدم اطمینان خیلی بالا در تعیین هدایت هیدرولیکی خاک، شاید آنالیز حساسیت را ضروری نماید. در روش معمول آنالیز حساسیت یک فاکتور را تغییر داده و بقیه فاکتورها ثابت نگه‌داشته می‌شوند و مقدار تغییر تابع به ازاء متغیر مورد نظر محاسبه می‌شود. لذا در این قسمت با تغییر کمی پارامترهای فوق در جهت افزایشی و یا کاهش، میزان

پیشنهادات و توصیه ها

حل نیمه تحلیلی و نیمه عددی معادله واریک در برآورد توزیع رطوبت پس از پایان آبیاری برای همه خاکها توصیه می شود. پیشنهاد می شود مطالعاتی در سطح مزرعه و در شرایط واقعی تر برای خاکهای مختلف با به کارگیری نتایج پژوهش حاضر صورت پذیرد.

سپاس گذاری

از قطب علمی گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران که با تامین اعتبار لازم، ساخت و راه اندازی مدل فیزیکی و... انجام این پژوهش را امکان پذیر ساخت، تقدیر و تشکر می گردد.

مسئله در قسمت آنالیز حساسیت نیز مشخص شده است که میزان دقت در برآورد پارامترهای فوق در مقدار رطوبت برآورد شده نقش عمده ای ایفاء می کنند. لذا یکی از عوامل خطا را می توان وجود خطا در برآورد پارامترهای مورد نیاز در فرمول وان گنوختن دانست. از آنجائی که فرضیاتی برای ساده کردن معادله در روش های تقریبی به کار می رود آن نیز می تواند منشاء دیگر خطا باشد. در مجموع مقادیر خطا خیلی کم است. لذا نتایج این پژوهش صحت روش تقریب نیمه تحلیلی در تعیین رطوبت خاک در روش آبیاری قطره ای - نواری در دو بعد را به وضوح نشان می دهد.

منابع

- Abramowitz, M., and I. A. Stegun. 1965. Handbook of mathematical function. Fourth printing. Applied Math. Ser. US. Government printing office, Washington DC. 944pp. 375 – 377.
- Daniel, H., A. W. Warrick, R. S. Baker., C. Rosenzweig. 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press, 37-12.
- Elmaloglou. S., q. Grigorakis. 1997. Linear and nonlinear models of infiltrations from surface line source of trickle irrigation. ICID Journal, V. 46 (2): 81-91
- Lafolie, F., Guennelon, R. and van Genuchten, M. Th. 1989. Analysis of water flow under Trickle, Irrigation: 1.theory and, Numerical Solution. Soil. Sci. Soc. j., vol.53, September_october.
- Nakayama F. S. and D. A. Bucks. 1968. Trickle irrigation for crop production, design, operation and management. Elsevier Science publishers B. V. pp: 93-116. p. 383.
- Philip J. R. 1972. Steady infiltration from buried, surface, and perched point and line sources in heterogeneous soils: I. Analysis of Soil. Sci. Amer. Proc., Vol. 36, 1972.
- Schwartzman, M. and B. Zur, 1986. Emitter spacing and Geometry of wetted soil volume. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol,112, No: 3.
- Spiegel, M. R., 1981. Mathematical Handbook of Formula and Tables. McGraw. Hill Book Company. 246-248.
- Streeter, Victor Lyle, Wylie. E. Benjamin., K. W. Bedford. 1998. Fluid mechanics. McGraw-Hill.
- Thorburn, P. J., F. J. Cook and K. L. Bristow. 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: Implications for system design and management. CSIRO Sustainable Ecosystems.
- Warrick, A. W. 1985. Point and line infiltration calculation of the wetted soil surface, Sci. Soc. M. J., Vol. 49. 1581-1583.
- Zazueta, F. S., G. A. Clark, A. G. Smajstrla, and M. Carrillo, 1995. A simple equation to estimate soil-water movement from a drip irrigation source. Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress. 851-856.
- Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. Irrigation Sci, 16: 101-105.

Semi Analytical Approximate of Soil Water Two Dimensions Distribution in Drip Tape Irrigation

Mirzaei^{1*}, F., Hoorfar², A. and Hatami³, M.

Abstract

Determination of wetted soil diameter and depth and distributed humidity in different spaces to line source after irrigation is very important for drip irrigation designed. The flow regime moves in a line source under trickle irrigation in two dimensions (x, z). In this study, physical model was constructed and wetting front experiment were carried out in soils at deferent times with various discharge. The water content of soil was directly determined after each irrigation. By developing and simplification of Warrick,s equation to solvable and semi-analytical approximate equation, soil moisture was determined. Estimated moisture compared with the measured moisture and analyzed. The results were approximately the same as the measured data. This fact strengthened our views in this thesis which are developed are generally in wide range of soils.

Keywords: Drip irrigation, Semi analytical, Approximation, Wetting front, Line source, Moisture distribution

1 & 2. Assistant Professor and Associate Professor respectively, Water and Soil Eng.College, Faculty of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj

3. Former Graduate student of Water Eng, Vollege of Agricultural, University of Mazanderan, Sari

*. *Corresponding Author*
