# ارزیابی صحرایی عملکرد معادلات جریان همگام زهکشی در کشت و صنعت نیشکر خوزستان

محمد مهدی متین‌زاده[۱]، جهانگیر عابدی کوپایی[۱*]، عدنان صادقی لاری[۲]، حامد نوذری[۳] و محمد شایان‌نژاد[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۱۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۱۷)

**چکیده**

**انتخاب یک معادله زهکشی با دقت قابل‌قبول همواره چالش اصلی طراحان برای طراحی سامانه‌های زهکش زیرزمینی است. در این پژوهش برای تخمین شدت روزانه و تجمعی زهاب خروجی از مزرعه‌ای واقع در کشت و صنعت امام خمینی (ره)، از هفت معادله جریان همگام زهکشی شامل معادلات هوخهات، ارنست، کرکهام و داگان که در سالیان گذشته بسط داده شده‌اند و معادلات میشرا و سینگ هناین و یوسفی و همکاران که جدیداً توسعه یافتند، استفاده شد. نتایج ارزیابی عملکرد معادلات زهکشی نشان داد که معادله هوخهات با شاخص‌های آماری P-valu، RMSE، $R^2$ و درصد خطای براورد شدت تجمعی زهکشی به‌ترتیب برابر با ۰/۹۵۰۱، ۱/۴۹ (میلی‌متر بر روز)، ۰/۸۰ و ۰/۱۹- درصد دارای بیشترین دقت در پیش‌بینی شدت‌جریان زهکشی و معادله ارنست با ۰/۰۰۰۱، ۲/۴۶ (میلی‌متر بر روز)، ۰/۳۴ و ۱۶/۹۸ درصد، دارای کمترین دقت در پیش‌بینی شدت‌جریان زهکشی است. همچنین از بین معادلات جدیداً توسعه‌یافته، تنها معادله یوسفی و همکاران با دقت نسبتاً خوبی، شدت‌جریان خروجی از زهکش را پیش‌بینی کرد و در اولویت دوم بعد از معادله هوخهات قرار گرفت. سایر معادلات نیز عملکرد نامطلوبی را نشان دادند. از این‌رو، با انتخاب مناسب شدت‌جریان زهکشی، می‌توان معادله هوخهات را برای طراحی فاصله زهکش‌ها در خاک‌های با بافت متوسط تا سنگین نظیر کشت و صنعت‌های نیشکر خوزستان، پیشنهاد کرد.**

**واژه‌های کلیدی: طراحی سیستم زهکشی، معادلات رایج زهکشی، معادلات جدید زهکشی، جریان همگام، سطح ایستابی**

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس
۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

**مقدمه**

سامانه‌های زهکشی زیرزمینی در حدود ۲۰۰ سال است که برای تهویه ریشه گیاه و ایجاد شرایط مطلوب هوادهی، آب اضافی را از ناحیه ریشه تخلیه می‌کند و با کنترل سطح ایستابی باعث افزایش عملکرد محصول می‌شوند (۱۸). اما تخمین فاصله بهینه زهکش‌ها هنوز به‌عنوان چالش اصلی طراحی سامانه‌های زهکشی زیرزمینی است. تخمین فاصله زیاد بین زهکش‌ها باعث افزایش تراز سطح ایستابی و درنتیجه کاهش عملکرد محصول می‌شود و از طرفی، تخمین فاصله کم بین زهکش‌ها باعث افزایش هزینه‌های نصب و راه‌اندازی سامانه زهکش زیرزمینی و افزایش شدت زهاب خروجی می‌شود بنابراین، برای تخمین فاصله بهینه زهکش‌ها، می‌بایست تراز سطح ایستابی و شدت‌جریان خروجی از زهکش توسط یک معادله مناسب حاکم بر آب‌های زیرزمینی براورد شود (۱۶ و ۱۸).

اگرچه زهکشی امکان تولید محصول را در خاک‌های غرقابی و شور فراهم می‌کند اما زهاب خروجی از زهکش‌ها آلاینده‌هایی مانند مواد مغذی، سموم دفع آفات و سایر مواد آلوده کننده را به آب‌های سطحی و زیرزمینی منتقل می‌سازند. پژوهش‌های پیشین نشان داده است که کل شدت‌جریان خروجی از زهکش عامل تلفات است به‌طوری که هر چه شدت‌جریان زهکشی بیشتر باشد، تلفات نیز بیشتر می‌شود (۴، ۶، ۱۰، ۲۰ و ۲۱). بنابراین، چنانچه فاصله زهکش‌ها کم تخمین زده شود باعث افزایش شدت‌جریان زهکشی و درنتیجه افزایش تلفات و آلودگی محیط‌زیست می‌شود. لذا، در طراحی سامانه‌های زهکشی زیرزمینی نیاز به معادله‌ای است که با دقت قابل‌قبول بتواند شرایط واقعی زهکش‌ها را پیش‌بینی کند.

بیشتر معادلاتی که برای طراحی سامانه‌های زهکشی زیرزمینی به‌کار می‌روند از حل معادله بوسینسک به‌همراه فرضیات دوپویی و فورشهایمر به‌دست آمده‌اند (۲، ۱۳ و ۱۹). اگرچه زهکشی فرایندی غیر ماندگار است اما به‌طور گسترده از معادلات جریان ماندگار به‌علت سهولت کاربردشان برای طراحی سامانه زهکش زیرزمینی استفاده می‌شود (۲۲).

بررسی منابع نشان می‌دهد که کارایی برخی از معادلات زهکشی در شرایط جریان همگام مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. فرامرزی و همکاران (۷) از معادله هوخهات برای براورد تراز سطح ایستابی و شدت‌جریان زهاب خروجی در یک مزرعه آزمایشی دارای سیستم زهکشی به وسعت تقریباً یک هکتار واقع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی رودشت اصفهان استفاده کردند. نتایج آنها حاکی از این بود که با استفاده از معادله شش‌جمله‌ای برازش داده شده برای تخمین ارتفاع سطح ایستابی بالای زهکش‌ها و کاربرد آن در معادله هوخهات، تعیین فاصله زهکش‌ها برای شرایط عملی امکان‌پذیر است. اسمدما و همکاران (۱۷) معادله لاپلاس را با استفاده از روش عناصر محدود برای یک خاک همگن و غیر ایزوتروپ دارای زهکش زیرزمینی حل کردند و فاصله زهکش به‌دست‌آمده از این روش را بافاصله تخمینی به‌دست‌آمده از روش هوخهات مقایسه کردند. نتایج پژوهش نشان داد که معادله هوخهات می‌تواند با حدود اطمینان قابل‌قبولی فاصله زهکش‌ها را در خاک‌های همگن و غیر ایزوتروپ براورد کند. کاستانیرا و لوسیوسانتوس (۱) برای تخمین فاصله بهینه زهکش‌ها، معادله دوبعدی ریچاردز را در حالت جریان ماندگار با استفاده از روش عناصر محدود توسعه دادند و با روش هوخهات و کرکهام مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که هر دو معادله به‌خوبی می‌تواند تراز سطح ایستابی بین دو زهکش را براورد کند اما دقت معادله هوخهات بیشتر است.

در ایران ۱/۵ تا ۲ میلیون هکتار از زمین‌های کشور را زمین‌های زه‌دار بحرانی تشکیل می‌دهد که از حدود ۲۰۰ هزار هکتار زهکش زیرزمینی که تا قبل از طرح ۵۵۰ هزار هکتاری استان خوزستان اجراشده، تقریباً ۸۰ درصد آن یعنی حدود ۱۶۰ هزار هکتار آن در خوزستان اجرا شده و از این مقدار حدود ۱۲۰ هزار هکتار آن مربوط به کشت‌های نیشکر است (۱۵). در همین راستا با توجه به اینکه بیشتر پروژه‌های زهکشی که در دست مطالعه و طراحی قرار دارند مربوط به استان خوزستان و کشت نیشکر است، بنابراین لازم است قبل از انتخاب هر معادله‌ای برای طراحی فاصله زهکش‌ها،

نسبت به‌دقت معادله مورد نظر در شرایط موجود اطمینان حاصل کرد. از طرفی معادلات زهکشی جریان همگام نظیر هوخهات (۹)، ارنست (۵)، کرکهام (۱۱) و داگان (۳) در سالیان گذشته بسط داده شده‌اند اما در چند سال اخیر معادلات جدید جریان همگام زهکشی توسط پژوهشگران توسعه یافتند که شامل معادلات میشرا و سینگ (۱۲)، هناین (۸) و یوسفی و همکاران (۲۲) است که ارزیابی این معادلات جدید در مقیاس مزرعه‌ای به‌ویژه در کشت و صنعت‌های نیشکر خوزستان انجام نگرفته است. لذا هدف از این پژوهش، ارزیابی معادلات اخیراً توسعه‌یافته و رایج (قدیمی) جریان همگام زهکشی برای تخمین شدت‌جریان خروجی از زهکش‌های کشت و صنعت امام خمینی(ره) و اولویت‌بندی دقت معادلات و انتخاب مناسب‌ترین آنها برای طراحی فاصله زهکش‌های زیرزمینی اراضی کشت و صنعت نیشکر است.

## مواد و روش‌ها

### معادلات جریان همگام زهکشی

در این پژوهش از هفت معادله جریان همگام زهکشی شامل هوخهات (۱۹۴۰)، ارنست (۱۹۵۶)، کرکهام (۱۹۵۸)، داگان (۱۹۶۴)، میشرا و سینگ (۲۰۰۷)، هناین (۲۰۱۰) و یوسفی و همکاران (۲۰۱۴) برای براورد شدت‌جریان خروجی از زهکش‌ها استفاده شد که در زیر توضیحاتی راجع به معادلات فوق ارائه شده است.

### معادله هوخهات (۱۹۴۰)

معادله هوخهات به‌طور گسترده توسط طراحان در طراحی سامانه‌های زهکش زیرزمینی به‌کار می‌رود. هوخهات از حل معادله بوسینسک یک‌بعدی به‌همراه فرضیات دوپویی و فورشهایمر، رابطه خود را برای محاسبه شدت زهکشی ارائه کرد. او برای کاهش خطای ناشی از فرضیات دوپویی و فورشهایمر در نزدیکی لوله زهکش، از مفهوم عمق معادل $d_e$ به‌جای D استفاده کرد.

$$q = 8K_2 d_e h / L^2 + 4K_1 h^2 / L^2 \qquad (1)$$

$$d_e = L/8F \qquad (2)$$

$$F = \left[ \frac{1}{\pi} \mathrm{Ln} \frac{D}{r_o \sqrt{2}} + \frac{(1 - \sqrt{2}\, D/L)^2}{8D/L} \right] \qquad (3)$$

که در آن، q شدت‌جریان زهکش (متر بر روز)، $k_1$ و $k_2$ به‌ترتیب ضرایب هدایت هیدرولیکی در قسمت بالایی و پایینی زهکش (متر بر روز)، h حداکثر ارتفاع ستون آب روی لوله زهکش در نقطه وسط بین دو زهکش (متر)، L فاصله بین لوله‌های زهکش (متر)، $r_o$ شعاع لوله زهکش (میلی‌متر)، $d_e$ عمق معادل و D عمق نصب لوله زهکش تا لایه غیرقابل نفوذ است.

### معادله ارنست (۱۹۵۶)

ارنست (۱۹۵۶) جریان آب به سمت زهکش‌ها را به سه قسمت افقی، عمودی و شعاعی تقسیم کرد و برای هر کدام افتی در نظر گرفت و در نهایت روابط زیر را ارائه کرد:

$$h = \frac{qD_V}{K_V} + \frac{qL_h^2}{8K_h D_h} + \frac{qL}{\pi K_r} \ln \frac{aD}{u} \qquad (4)$$

$$D_h = D + \frac{h}{2} \qquad (5)$$

$$L_h = L - 1/4D \qquad (6)$$

$$u = w + 2r_o \qquad (7)$$

که در آن، $D_h$ متوسط طول صفحه عمود بر جریان افقی به سمت لوله زهکش (متر)، $L_h$ طول مسیری که بین دو لوله زهکش جریان افقی اتفاق می‌افتد (متر)، Dv طول مسیری که در آن جریان عمودی اتفاق می‌افتد که برابر با h است (متر)، u محیط خیس شده برای زهکش‌هایی که داخل ترانشه قرار دارد (متر)، w عرض ترانشه (متر)، $a$ فاکتور شکل خطوط جریان شعاعی که برای خاک‌های همگن برابر واحد در نظر گرفته می‌شود (بی‌بعد)، $K_h$، $K_v$ و $K_r$ به‌ترتیب هدایت هیدرولیکی اشباع در جهات افقی، عمودی و شعاعی هستند که در خاک همگن و ایزوتروپ مقادیر آن برابر با هدایت هیدرولیکی اشباع خاک است (متر بر روز)، سایر پارامترها نیز مشابه معادله هوخهات است.

### معادله کرکهام (۱۹۵۸)

کرکهام از حل تحلیلی معادله دوبعدی لاپلاس در حالت همگام، معادله خود را به‌صورت زیر پیشنهاد کرد:

$$h = \frac{qL}{K_2}.\frac{1}{1-q/K_1}.F_k \qquad (8)$$

$$F_k = \frac{1}{\pi}\left[\ln\frac{L}{\pi r_0} + \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}(\cos\frac{2n\pi r_0}{L} - \cos n\pi)(\cosh\frac{2n\pi h}{L} - 1)\right] \qquad (9)$$

که در آن پارامترها همانند معادلات قبل هستند.

### معادله داگان (۱۹۶۴)

داگان همانند روش هوخهات و کرکهام الگوی جریان به سمت زهکش را شامل دو قسمت بالا و پایین زهکش فرض کرد که در قسمت بالا جریان را افقی و در قسمت پایین زهکش جریان را به‌صورت شعاعی در نظر گرفت.

$$h = \frac{qL}{K}.F_D \qquad (8)$$

$$F_D = \frac{1}{4}\left[\frac{L}{2D} - \frac{2}{\pi}\ln(2\cosh\frac{\pi r_0}{D} - 2)\right] \qquad (9)$$

### معادله میشرا و سینگ (۲۰۰۷)

این پژوهشگران معادله خود را با فرض متغیر بودن میزان تأثیر جریان شعاعی به‌صورت رابطه (۱۰) بسط دادند. آنها یک عمق معادل جدید برای معادله هوخهات با تغییر در فرض تأثیر جریان شعاعی از $\frac{D}{\sqrt{2}}$ به ترکیبی از $\frac{2D}{\pi}$ و متغیر بودن ارتفاع آب زیرزمینی در بالای زهکش در منطقه جریان شعاعی ($h(r_r)$) در نظر گرفتند. در شکل (۱) نمای طرح زهکش مورد استفاده برای استخراج معادله میشرا و سینگ آورده شده است.

$$h = h_1 + h(r_r) = \sqrt{(D + h(r_r))^2 + \frac{q}{4K}\left(L - \frac{4D}{\pi}\right)^2} - D \qquad (10)$$

به علت آنکه $h(r_r)$ تابعی از مقدار $q/k$ است، لذا میشرا و سینگ سه رابطه مختلف برای محاسبه $h(r_r)$ توسعه دادند که به‌اختصار تنها یک رابطه در اینجا آورده شده است و برای جزئیات بیشتر می‌توان به این مرجع مراجعه کرد.

$$\frac{1}{2}\ln\left[\left(\frac{h(r_r)+\frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi}-\frac{L}{2}}\right)^2 + \frac{\pi}{2}\left(\frac{h(r_r)+\frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi}-\frac{L}{2}}\right) + \frac{R}{K}\right] -$$

$$\frac{1}{2}\ln\left[\left(\frac{\pi L}{4(r_0-\frac{L}{2})}\right)^2 + \frac{\pi}{2}\left(\frac{\pi L}{4(r_0-\frac{L}{2})}\right) + \frac{R}{K}\right] +$$

$$\frac{\pi}{8\sqrt{(\frac{\pi^2}{16}-\frac{R}{K})}}\left[\ln\left\{\frac{\left(\frac{h(r_r)+\frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi}-\frac{L}{2}}\right)^2 + \frac{\pi}{2}\left(\frac{h(r_r)+\frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi}-\frac{L}{2}}\right) + \frac{R}{K}}{\left(\left(\frac{h(r_r)+\frac{\pi L}{4}}{\frac{2D}{\pi}-\frac{L}{2}}\right) + \frac{\pi}{4} + \sqrt{(\frac{\pi^2}{16}-\frac{R}{K})}\right)^2}\right\} -\right.$$

$$\left.\ln\left\{\frac{\left(\frac{\pi L}{4(r_0-\frac{L}{2})}\right)^2 + \frac{\pi}{2}\left(\frac{\pi L}{4(r_0-\frac{L}{2})}\right) + \frac{R}{K}}{\left(\left(\frac{\pi L}{4(r_0-\frac{L}{2})}\right) + \frac{\pi}{4} + \sqrt{(\frac{\pi^2}{16}-\frac{R}{K})}\right)^2}\right\}\right] -$$

$$\ln\left(\frac{\frac{L}{2}-r_0}{\frac{L}{2}-\frac{2D}{\pi}}\right) = 0 \qquad \text{for} \quad (\frac{\pi^2}{16}-\frac{R}{K}) > 0 \qquad (11)$$

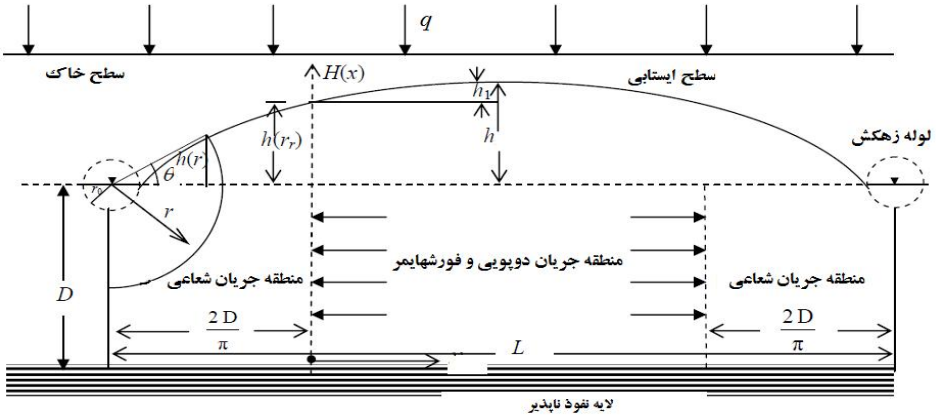
همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، رابطه $h(r_r)$ یک معادله غیرخطی است، بنابراین در این پژوهش برای محاسبه شدت‌جریان زهکشی توسط رابطه (۱۰)، از روش سعی و خطا استفاده شد. به این صورت که ابتدا یک شدت زهکشی فرض شد و مقدار $h(r_r)$ از رابطه (۱۱) به‌دست آمد سپس این $h(r_r)$ به دست‌آمده در رابطه (۱۰) قرار داده شد و شدت‌جریان زهکشی محاسبه شد، چنانچه شدت‌جریان فرض شده و محاسبه‌ای مساوی بودند، آن شدت زهکشی به ازای آن ماکزیمم تراز سطح ایستابی ($h$) در نظر گرفته شد و در غیر این صورت این فرایند تا مساوی شدن شدت‌های زهکشی فرض شده و محاسبه شده ادامه خواهد یافت.

### معادله هنین (۲۰۱۰)

تمام معادلات جریان همگام زهکشی بر این فرض استوار است که ارتفاع آبی روی لوله زهکش وجود ندارد و یا به‌عبارتی دیگر لوله زهکش تحت فشار بار هیدرولیکی و یا مستغرق نیست. هنین با این فرض که لوله زهکش در حالت مستغرق قرار دارد، معادله خود را به‌صورت زیر پیشنهاد کرد:

$$h = \frac{qL}{4\pi K}\ln\left(\frac{h^2(h+2D)^2}{r_0^2(r_0^2+2D)^2}\right) + (Y_d + r_0) \qquad (12)$$

که در آن، $Y_d$ بار فشاری روی لوله زهکش برحسب متر است. چنانچه زهکش به‌صورت مستغرق نباشد، مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود، سایر پارامترها نیز مشابه روابط قبلی است.




**شکل ۱. نمای طرح زهکش مورد استفاده برای استخراج معادله میشرا و سینگ (۲۰۰۷)**

**معادله یوسفی و همکاران (۲۰۱۴)**

تمام معادلات زهکشی فقط سهم جریان اشباع را به داخل زهکش در نظر می‌گیرند و یا به عبارتی اساس توسعه معادلات، تنها جریان اشباع در بالا و پایین لوله زهکش است و سهم جریان غیراشباع را در ناحیه بالای آب زیرزمینی در نظر نمی‌گیرند. یوسفی و همکاران (۲۰۱۴) معادله خود را با فرض مشارکت هر دو جریان اشباع در بالا و پایین زهکش و جریان غیراشباع در ناحیه بالای آب زیرزمینی به داخل زهکش، به‌صورت زیر ارائه کردند:

$$q = \frac{۴K_S h^۲ + ۸K_S h d_e + ۸K_S h \gamma_۰}{L^۲} \qquad (۱۳)$$

که در آن، $K_S$ هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (متر بر روز) و $\gamma_۰$ پارامتر مربوط به جریان عمودی آب در ناحیه انتقالی واقع در منطقه غیراشباع خاک (متر)، که مقدار این پارامتر به بافت خاک و نسبت $q/k$ بستگی دارد. به‌عنوان مثال برای نسبت معمول $q/k = ۰/۰۱$ مقدار $\gamma_۰$ برای خاک‌های با بافت شنی و سیلتی کلی لوم به‌ترتیب برابر با ۰/۲۰۴ و ۰/۰۶۲ متر است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، دو قسمت اول سمت راست رابطه (۱۳)، درواقع همان معادله هوخهات است که شامل جریان اشباع در بالا و پایین زهکش است و قسمت سوم آن یعنی $\frac{۸K_S h \gamma_۰}{L^۲}$ مربوط به سهم مشارکت جریان در ناحیه غیراشباع به داخل زهکش است.

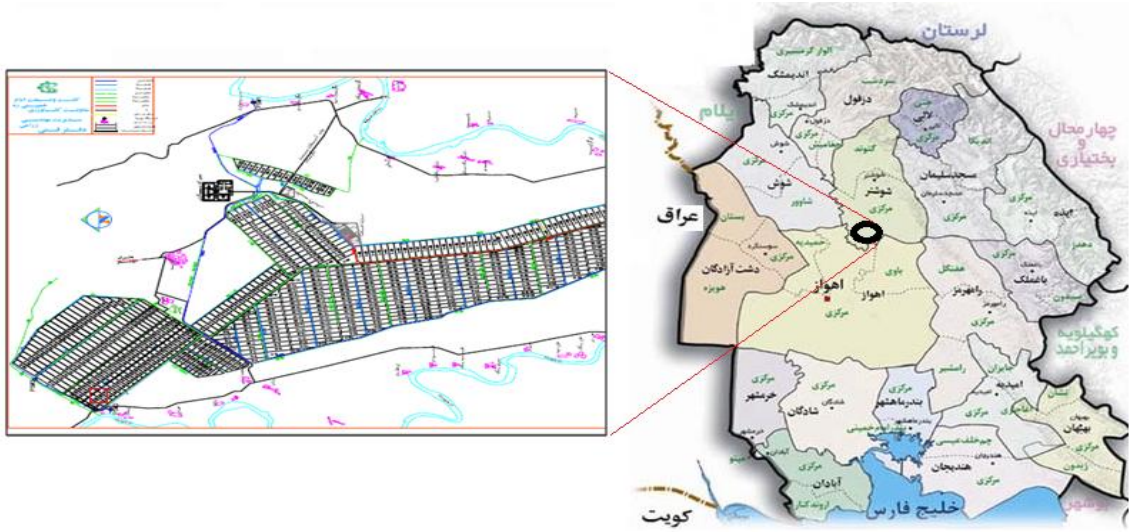
**منطقه مورد پژوهش**

برای ارزیابی دقت معادلات زهکشی از داده‌های اندازه‌گیری شده در سال ۱۳۹۰ از مزرعه B-۱۲۹ با مساحت ۲۱ هکتار، واقع در کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (یکی از واحدهای هفت‌گانه کشت و صنعت نیشکر) در خوزستان استفاده شد (۱۴). این منطقه، بخشی از دشت شعیبیه خوزستان به مساحت ناخالص ۱۵۸۰۰ هکتار است که در ۴۰ کیلومتری جنوب شهرستان شوشتر و ۵۰ کیلومتری شمال اهواز قرارگرفته است. زمین‌های کشاورزی این واحد، به قطعات منظم ۲۰ و ۲۵ هکتاری (۸۰۰ × ۲۵۰) و (۱۰۰۰×۲۵۰) تقسیم شده است و در مجموع دارای ۴۸۰ مزرعه است (شکل ۲). در این منطقه متوسط دمای سالانه ۲۴/۵ درجه سانتی‌گراد، بارندگی متوسط سالیانه ۲۶۶ میلی‌متر، تبخیر متوسط سالیانه ۲۸۰۰ میلی‌متر و ارتفاع متوسط از سطح دریا ۴۲ متر است.

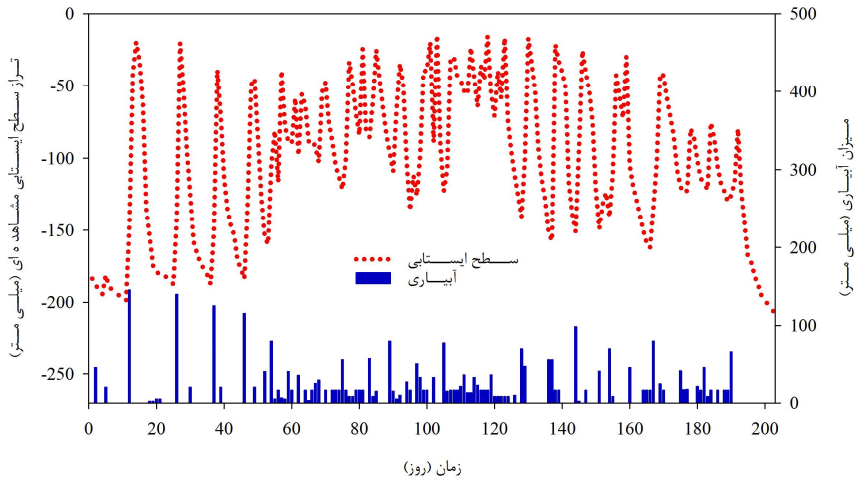
**داده‌های ورودی**

داده‌های ورودی مورد نیاز برای محاسبه شدت‌جریان زهکشی با استفاده از معادلات زهکشی شامل تراز سطح ایستابی (h)، اطلاعات مربوط به سیستم زهکشی و ویژگی‌های خاک است که در شکل (۳) و جدول (۱) ارائه شده است.

آبیاری اراضی نیشکر به مدت شش ماه از سال انجام شد که زمان و مقدار آب آبیاری در ماه‌های مختلف به‌ترتیب برابر با اردیبهشت ۵۱۰ میلی‌متر، خرداد ۶۱۰ میلی‌متر، تیر ۶۲۰ میلی‌متر، مرداد ۶۳۰ میلی‌متر، شهریور ۵۳۰ میلی‌متر و مهر ۴۲۰ میلی‌متر و مقدار تجمعی شدت‌جریان زهکشی در این دوره ۱۶۸۷ میلی‌متر بود.




شکل ۲. موقعیت منطقه مورد پژوهش (کشت و صنعت امام خمینی)




شکل ۳. تراز سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و میزان آب آبیاری اعمال‌شده در مزرعه B-۱۲۹

جدول ۱. پارامترهای سیستم زهکشی و ویژگی‌های خاک مزرعه B-۱۲۹

| پارامتر | مقدار | واحد |
|---|---|---|
| فاصله زهکش | ۷۵ | متر |
| عمق نصب زهکش | ۲/۱ | متر |
| شعاع زهکش | ۱۶۰ | میلی‌متر |
| فاصله تا لایه نفوذناپذیر | ۷/۵ | متر |
| $\gamma_0$ | ۰/۰۶۲ | متر |
| هدایت هیدرولیکی اشباع خاک | ۱/۶۱ | متر بر روز |
| بافت خاک | لوم سیلتی رسی | – |

## نتایج و بحث

از نرم‌افزار MATLAB برای محاسبه شدت روزانه زهکشی از طریق هفت معادله زهکشی استفاده شد. شکل (۴) مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده شدت روزانه زهاب خروجی از زهکش نسبت به زمان را در دوره مورد پژوهش نشان می‌دهد. این شکل به‌خوبی نشان می‌دهد که همه هفت معادله جریان همگام زهکشی قادر به شبیه‌سازی روند شدت روزانه زهاب خروجی از زهکش در مقیاس مزرعه‌ای است. اما بیشترین نوسانات شدت روزانه زهکشی شبیه‌سازی شده مربوط به معادله میشرا و سینگ و کمترین نوسانات مربوط به معادله ارنست است. به‌عبارتی دیگر معادله ارنست با روند ملایم شدت روزانه زهکشی را در دوره مورد پژوهش شبیه‌سازی کرده اما معادله میشرا و سینگ با روند تندتری نسبت به سایر معادلات، شدت زهکشی را شبیه‌سازی کرده است. بر اساس شکل (۴) معادله هوخهات به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی روند تغییرات شدت روزانه زهکشی است.

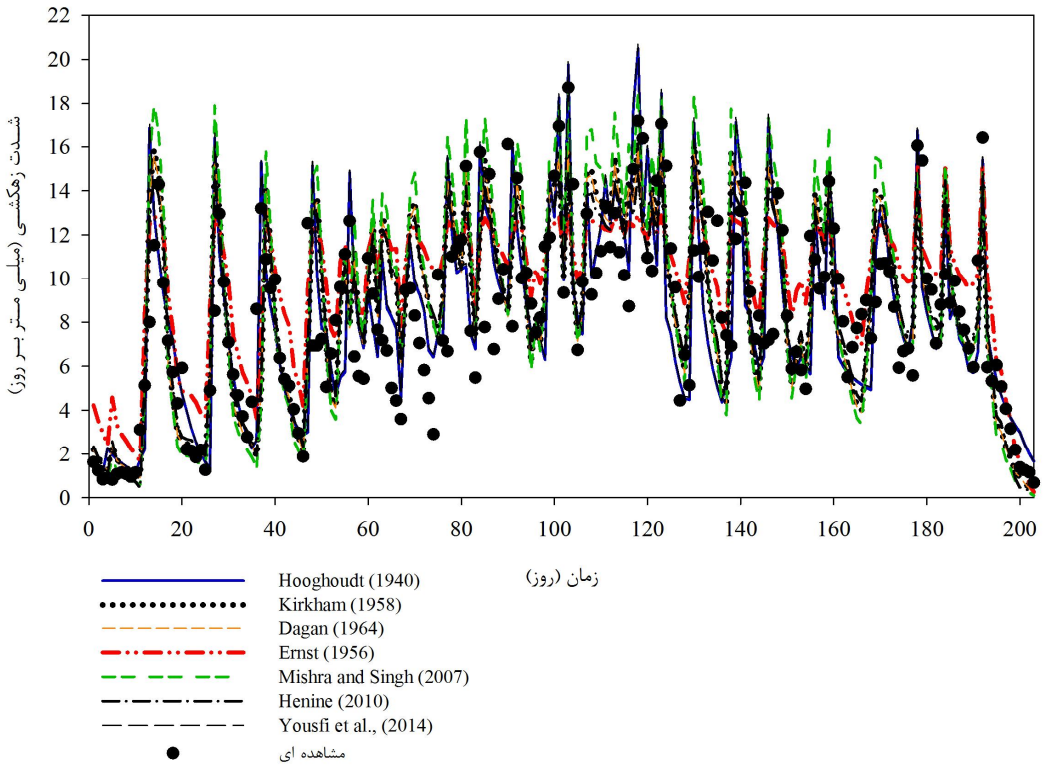
در شکل (۵) مقایسه داده‌های شدت تجمعی زهاب خروجی از زهکش اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده توسط معادلات زهکشی ارائه شده است. مقدار شدت تجمعی زهکشی محاسبه شده در کل دوره پژوهش به‌وسیله معادلات هوخهات، ارنست، کرکهام، داگان، میشرا و سینگ، هناین و یوسفی و همکاران به‌ترتیب برابر با ۱۶۸۳/۸، ۱۹۷۳/۵، ۱۷۸۱/۹، ۱۷۴۸/۵، ۱۸۴۸/۵، ۱۷۵۴/۴ و ۱۷۰۸/۶ میلی‌متر به‌دست آمد. مطابق با شکل (۵) بیشترین پیش‌بینی شدت تجمعی زهکشی مربوط به معادله ارنست با مقدار ۱۹۷۳/۵ میلی‌متر و کمترین پیش‌بینی شدت تجمعی زهکشی مربوط به معادله هوخهات با مقدار ۱۶۸۳/۸ میلی‌متر است.

برای مقایسه دقت معادلات زهکشی و اولویت‌بندی آنها از شاخص‌های آماری P-valu، RMSE، $R^2$ و درصد خطای براورد شدت تجمعی زهکشی استفاده شد که در جدول (۲) آورده شده است. همچنین مقایسه داده‌های شدت روزانه زهکشی اندازه‌گیری شده و براورد شده در مقابل خط ۱:۱ در شکل (۶) ارائه شده است.

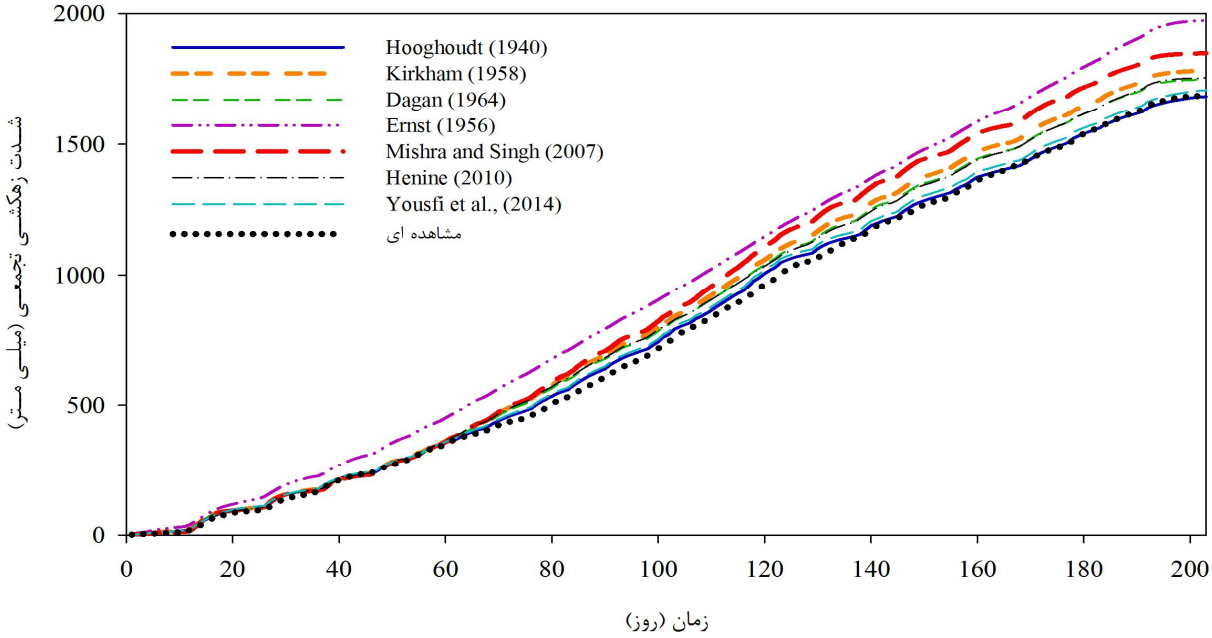
بر طبق جدول (۲) و شکل (۶) معادله هوخهات با شاخص‌های آماری P-valu، RMSE، $R^2$ و درصد خطای شدت تجمعی زهکشی به‌ترتیب برابر با ۰/۹۵۰۱، ۱/۴۹ (میلی‌متر بر روز)، ۰/۸۰ و ۰/۱۹- درصد دارای بیشترین دقت در پیش‌بینی شدت‌جریان زهکشی و معادله ارنست با ۰/۰۰۰۱، ۲/۴۶ (میلی‌متر بر روز)، ۰/۳۴ و ۱۶/۹۸ درصد دارای کمترین دقت در پیش‌بینی شدت‌جریان زهکشی است. بنابراین با توجه به شاخص‌های آماری جدول (۲)، اولویت‌بندی دقت معادلات زهکشی برای پیش‌بینی شدت زهکشی در جدول (۳) ارائه شده است.

بر طبق جدول (۳) اولویت معادلات زهکشی به لحاظ دقت پیش‌بینی شدت‌جریان زهکشی به‌ترتیب برابر با هوخهات، یوسفی و همکاران، داگان، هناین، کرکهام، میشرا و سینگ و ارنست است.

همان‌گونه که از جدول‌های (۲) و (۳) ملاحظه می‌شود، از بین معادلات جدیداً توسعه‌یافته زهکشی، تنها معادله یوسفی و همکاران (۲۰۱۴) با دقت قابل‌قبول توانسته شدت زهکشی را برآورد کند و در اولویت دوم بعد از معادله هوخهات قرار گیرد. در مورد علت این موضوع باید به این نکته اشاره کرد که درواقع معادله یوسفی و همکاران (رابطه ۱۳) همان معادله هوخهات است که تنها عبارت $\frac{8K_s h\gamma_0}{L^2}$ که مربوط به مشارکت جریان در ناحیه غیراشباع به داخل زهکش است به آن اضافه‌شده است. از طرفی با توجه به اینکه در این پژوهش بافت خاک لوم سیلتی رسی است و درنتیجه مقدار $\gamma_0$ کوچک است، مقدار عددی عبارت $\frac{8K_s h\gamma_0}{L^2}$ کوچک و اختلاف زیادی نسبت به معادله هوخهات ایجاد نمی‌کند و درنتیجه باعث می‌شود نتایج معادله هوخهات و یوسفی و همکاران نزدیک به هم باشد. البته این نکته در مرجع یوسفی و همکاران (۲۰۱۴) اشاره شده است که تأثیر مشارکت جریان در ناحیه غیراشباع به سمت زهکش بیشتر در مورد خاک‌های درشت‌بافت و شنی قابل‌ملاحظه است و در خاک‌های متوسط تا ریزبافت سهم مشارکت جریان در ناحیه غیراشباع کم است. معادله هناین




**شکل ۴. مقایسه شدت زهاب خروجی از زهکش اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی نسبت به زمان**



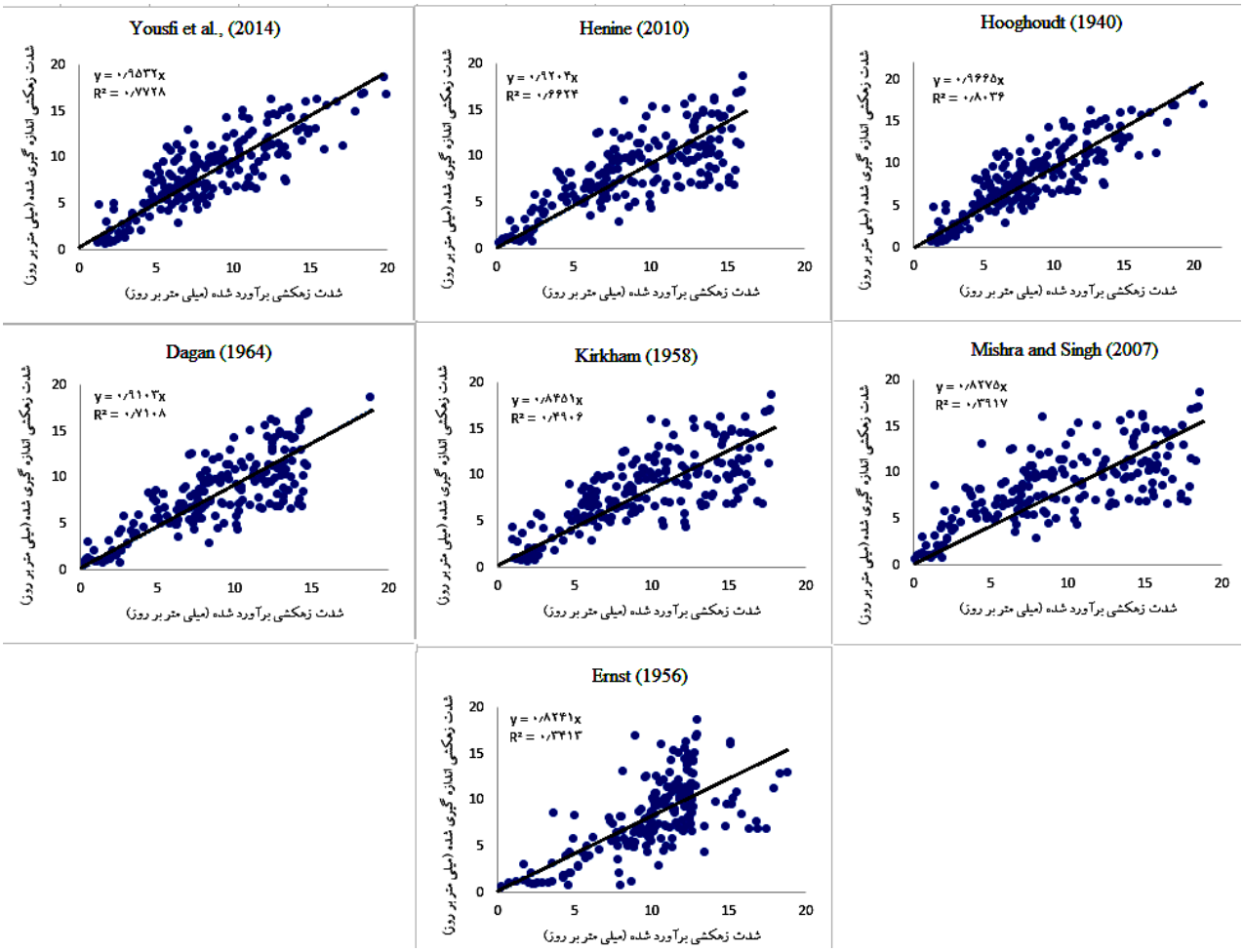

**شکل ۵. مقایسه شدت تجمعی زهاب خروجی از زهکش اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی نسبت به زمان**

**جدول ۲. مقایسه آماری نتایج حاصل از پیش‌بینی شدت‌جریان زهکشی توسط معادلات مختلف زهکشی**

| شاخص آماری | معادله زهکشی | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | هوخهات | ارنست | کرکهام | داگان | میشرا و سینگ | هنین | یوسفی و همکاران |
| P-valu | ۰/۹۵۰۱ | ۰/۰۰۰۱ | ۰/۲۶۶۸ | ۰/۴۶۶۹ | ۰/۰۸۶۵ | ۰/۴۰۶۹ | ۰/۷۹۸۸ |
| RMSE | ۱/۴۹ | ۲/۴۶ | ۲/۱۹ | ۱/۹۹ | ۲/۳۷ | ۲/۰۵ | ۱/۶۶ |
| $R^2$ | ۰/۸۰ | ۰/۳۴ | ۰/۴۹ | ۰/۷۱ | ۰/۳۹ | ۰/۶۶ | ۰/۷۷ |
| درصد خطای براورد | -۰/۱۹ | ۱۶/۹۸ | ۵/۶۲ | ۳/۶۵ | ۹/۵۷ | ۴/۰۰ | ۱/۲۸ |

**جدول ۳. اولویت‌بندی دقت معادلات زهکشی برای پیش‌بینی شدت زهکشی**

| نام معادله | معادلات رایج (قدیمی) | | | | معادلات جدیداً توسعه‌یافته | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | هوخهات (۱۹۴۰) | ارنست (۱۹۵۶) | کرکهام (۱۹۵۸) | داگان (۱۹۶۴) | میشرا و سینگ (۲۰۰۷) | هنین (۲۰۱۰) | یوسفی و همکاران (۲۰۱۴) |
| اولویت | اول | هفتم | پنجم | سوم | ششم | چهارم | دوم |




**شکل ۶. مقایسه نتایج شدت زهاب خروجی از زهکش براورد شده در مقابل شدت‌جریان اندازه‌گیری شده**

(۲۰۱۰) به لحاظ دقت در اولویت چهارم قرار گرفت اما دقت قابل قبولی برای محاسبه شدت زهکشی ارائه نکرد. علت آن این‌گونه به نظر می رسد که اساس توسعه این معادله برای زهکش‌هایی است که زیر فشار بار هیدرولیکی قرار دارند و در این پژوهش مقدار بار فشاری روی لوله زهکش ($y_d$) صفر در نظر گرفته شد و در واقع دقت این معادله نیز باید برای مزرعه‌ای که دارای چنین شرایطی است، بررسی شود. معادله میشرا و سینگ (۲۰۰۷) به‌عنوان کمترین دقت برای پیش‌بینی شدت زهکشی در بین معادلات جدیداً توسعه‌یافته زهکشی شناخته شد. در بیان علت آن چنین به نظر می‌رسد که تغییر در فرضیات معادله هوخهات (مقدار جریان شعاعی) و به‌ویژه عمق معادل، باعث کاهش دقت پیش‌بینی شدت‌جریان زهکشی نسبت به معادله هوخهات شده است. البته میشرا و سینگ (۲۰۰۷) نیز در مقاله خود، برای تخمین تراز سطح ایستابی اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای بین معادله توسعه‌یافته خود و معادله هوخهات مشاهده کردند. دو معادله داگان و کرکهام نیز عملکرد نامطلوبی را برای پیش‌بینی شدت‌جریان خروجی از زهکش نشان دادند.

بر طبق نتایج ارائه شده در بالا، معادله هوخهات دارای بالاترین کارایی و دقت در شرایط مزرعه‌ای به دست آمد که این نتیجه با پژوهش‌های پیشین ازجمله تخمین فاصله مناسب زهکش‌ها و براورد قابل‌قبول ارتفاع سطح ایستابی بالای زهکش‌ها به‌وسیله معادله هوخهات توسط پژوهشگران اسمدما و همکاران (۱۷) و فرامرزی و همکاران (۷)، همچنین دقت بیشتر معادله هوخهات نسبت به معادله کرکهام برای تخمین فاصله بهینه زهکش‌ها در پژوهش کاستانیرا و لوسیوسانتوس (۴) مطابقت دارد.

## نتیجه‌گیری

در طراحی سامانه‌های زهکشی بیشتر از معادلات جریان همگام زهکشی به‌دلیل سهولت کاربردشان استفاده می‌شود اما می‌بایست قبل از استفاده از این معادلات، دقت و کارایی آنها برای منطقه مد نظر ارزیابی شود. در این پژوهش برای تخمین شدت زهاب خروجی از مزرعه‌ای واقع در کشت و صنعت امام خمینی (ره) از هفت معادله جریان همگام زهکشی شامل معادلات هوخهات (۱۹۴۰)، ارنست (۱۹۵۶)، کرکهام (۱۹۵۸) و داگان (۱۹۶۴) که در سالیان گذشته بسط داده شده‌اند و معادلات میشرا و سینگ (۲۰۰۷)، هنین (۲۰۱۰) و یوسفی و همکاران (۲۰۱۴) که جدیداً توسعه یافتند، استفاده شد. نتایج نشان داد که در شرایط مزرعه‌ای معادله هوخهات دارای بیشترین دقت و معادله ارنست دارای کمترین دقت در پیش‌بینی شدت‌جریان زهکشی است. همچنین از بین معادلات جدیداً توسعه‌یافته، تنها معادله یوسفی و همکاران با دقت نسبتاً خوبی، شدت‌جریان خروجی از زهکش را پیش‌بینی کرد و در اولویت دوم بعد از معادله هوخهات قرار گرفت. نکته قابل تأمل این است که برای طراحی فاصله بین زهکش‌ها، تنها انتخاب معادله‌ای با دقت زیاد برای رسیدن به عملکرد خوب سیستم زهکشی در شرایط واقعی مزرعه تأثیرگذار نیست و انتخاب شدت مناسب زهکشی نیز بر کارایی و عملکرد سیستم زهکشی تأثیر بسزایی دارد. به این صورت که در این منطقه شدت‌جریان زهکشی در زمان طراحی ۶ میلی‌متر بر روز در نظر گرفته شد درحالی که تا شدت حدود ۲۰ میلی‌متر بر روز (حدود ۳/۵ برابر) در مزرعه اندازه‌گیری شده است که علت آن آبیاری بیش از حد مزرعه است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که سیستم زهکشی که بر مبنای ۶ میلی‌متر بر روز طراحی شده است،عملکرد مطلوب و مناسبی به‌ازای شدت‌های بیشتر از ۶ میلی‌متر بر روز نداشته باشد که این شرایط به‌طور قطعی باعث تأثیر نامطلوب برای رشد و عملکرد گیاه می‌شود و آلودگی محیط‌زیست می‌شود. بنابراین با توجه به نتایج این پژوهش توصیه می‌شود که تا حد ممکن برای طراحی سامانه‌های زهکشی پروژه‌های بزرگ و ملی نظیر طرح ۵۵۰ هزار هکتاری استان خوزستان، ابتدا اقدام به راه‌اندازی و اجرای مزارع آزمایشی شود و بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده در این مزارع، طراحی صورت گیرد. چنانچه این شرایط مقدور نباشد، استفاده از معادله هوخهات به‌همراه

انتخاب شدت‌جریان زهکشی مناسب و واقع‌گرایانه برای طراحی فاصله زهکش‌ها در خاک‌های با بافت متوسط تا سنگین نظیر کشت و صنعت‌های نیشکر خوزستان، برای نیل به عملکرد مناسب سیستم زهکشی در شرایط مزرعه، پیشنهاد می‌شود.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از مدیران، کارشناسان و کارکنان شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) به‌خاطر فراهم کردن تسهیل داده‌برداری مزرعه‌ای و همکاری‌شان کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

## منابع مورد استفاده

1. Castanheira, P. J. and F. Lucio Santos. 2009. A simple numerical analyses software for predicting water table height in subsurface drainage. *Journal of Irrigation and Drainage Systems* 23: 153–162.
2. Cooke, R. A., S. Badiger and A. M. Garacia. 2001. Drainage equations for random and irregular tile drainage systems. *Journal of Agricultural Water Management* 48: 207–224.
3. Dagan, G. 1964. Spacing of drains by an approximate method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 90: 41–66.
4. Drury, C. F., C. S. Tan, J. D. Gaynor, T.O. Oloya and T. W. Welacky. 1996. Influence of controlled drainage–subirrigation on surface and tile drainage nitrate loss. *Journal of Environmental Quality* 25: 317–324.
5. Ernst, L. F. 1956. Calculation of the steady flow of groundwater in vertical cross-sections. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 4: 126–131.
6. Evans, R. O., R. W. Skaggs and J. W. Gilliam. 1995. Controlled versus conventional drainage effects on water quality. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 121: 271–276.
7. Faramarzi, M., B. Mostafazadeh, S. F. Mousavi and M. Torabi. 2005. Application of Hooghoudt equation for subsurface drains in Roudasht, Isfahan. *Journal of Water and Soil Science* 36(1): 13-19 (In Farsi).
8. Henine, H. 2010. Couplage des processus hydrologiques reliant parcelles agricoles drainées, collecteurs enterrés et emissaire à surface libre: intégration à l'échelle du bassin versant. Thèse de doctorat, Cemagref. (In France).
9. Hooghoudt, S. B. 1940. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van de grond. *Verslagen Van Landboouwkundige Onderzoekinge* 46: 515–707 (In Dutch).
10. Jaynes, D. B. 2013. Nitrate loss in subsurface drainage and corn yield as affected by timing of sidedress nitrogen. *Journal of Agricultural Water Management* 130: 52– 60.
11. Kirkham, D. 1958. Seepage of steady rainfall through soil into drains. *Transactions of the American Geophysical Union* 39: 892–908.
12. Mishra, G. C. and V. Singh. 2007. A new drain spacing formula. *Hydrological Sciences Journal* 52: 338–351.
13. Pali, A. K. 2013. Evaluation of non steady subsurface drainage equations for heterogeneous saline soils: a case study. *Journal of Agriculture and Veterinary Science* 6: 45–52.
14. Sadeghi Lari, A. 2013. Investigation of effects of water table control on amount of leaving flow and N & P from subsurface drains in arid Regions (case study: Shoaibieh of Khuzestan). PhD. Thesis, Shahid Chamran University, Ahvaz, I.R. Iran. (In Farsi).
15. Sakebi, S. A., M. Rostami and SH. Veysi. 2014. Evaluation of subsurface drainage performance with approach of reduced depth of lateral drain and use of artificial filter in the 550,000-hectare plains of Khuzestan plains. *In:* Proceeding of the 4th National Conference on Irrigation and Drainage Management. Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (In Farsi).
16. Shokri, A. and W. E. Bardsley. 2015. Enhancement of the Hooghoudt Drain-Spacing Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 141: 04014070.
17. Smedema, L. K., A. Poelmanand and W. De Haan. 1985. Use of the Hooghoudt formula for drain spacing calculations in homogeneousanisotropic soils. *Journal of Agricultural Water Management* 10: 283–291.
18. Smedema, L. K., W. F. Vlotman and D. Rycroft. 2004. Modern Land Drainage: Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems. Taylor & Francis, Rotterdam, Netherlands.
19. Stilman, J. S., N. W. Haws, R. S. Govindaraju and P. S. C. Rao. 2006. A semi-analytical model for transient flow to a subsurface tile drain. *Journal of Hydrology* 317: 49–62.
20. Williams, M. R., K. W. King and N. R. Fausey. 2015. Drainage water management effects on tile discharge and water quality. *Journal of Agricultural Water Management* 148: 43–51.
21. Yang, C. C., S. O. Prasher, S. Wang, S. H. Kim, C. H. Tan, C. Drury and R. M. Patel. 2007. Simulation of nitrate-N movement in southern Ontario, Canada with DRAINMOD-N. *Journal of Agricultural Water Management* 87: 299–306.
22. Yousfi, A., M. Mechergui and H. Ritzema. 2014. A drain-spacing equation that takes the horizontal flow in the unsaturated zone above the groundwater table into account. *Irrigation and Drainage* 63: 373–382..

**Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)**
**Vol. 23, No. 3, Fall 2019, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.**

# Evaluation of Field Performance of Steady State Drainage Equations for Sugarcane Agro-Industrial Company in Khuzestan

**M. M. Matinzadeh[1], J. Abedi Koupai[1]*, A. Sadeghi-Lari[2], H. Nozari[3] and M. Shayannejad[1]**

(Received: June 5-2016 ; Accepted: September 7-2016)

## Abstract

Selection of drainage equation with acceptable accuracy has always been a challenge for designers to design subsurface drainage systems. In this research, seven steady state drainage equations were used for predicting daily and cumulative drainage rate on a farmland of sugarcane in Imam agro-industrial Company. These drainage equation included Hooghoudt, Ernst, Kirkham and Dagan that have been developed in the past and Mishra and Singh, Henine and Yousfi et al that recently developed. The statistical indices consist of P-value, RMSE, R2 and Percentage Error of estimating cumulative drainage rate were calculated for Hooghoudt equation 0.9501, 1.49 (mm/day), 0.80 and -0.19%, respectively. For Ernst equation 0.0001, 2.46 (mm/day), 0.34 and 16.98%, respectively. The result of performance of drainage equations revealed that Hooghoudt and Ernst equation were as the equations with the highest and lowest accuracy in predicting drainage rate, respectively. Also from the newly developed equations, the Yousfi et al equation was found with relatively well accuracy to predict the drainage rate. This equation was placed in second rank after Hooghoudt equation and other equations showed poor performance. Thus, with selection of the appropriate drainage rate, the Hooghoudt equation is suggested for designing of drain spacing in medium to heavy textured soils such as sugarcane agro-industrial.

**Keywords**: Design of subsurface drainage system, Conventional drainage equations, New drain spacing formulas, Steady state flow, Ground water table

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.
3. Department of Irrigation Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina Hamedan University, Hamedan, Iran.

*: Corresponding Author, Email: koupai@cc.iut.ac.ir