

## ارزیابی معادله‌های غیرماندگار زهکشی برای تعیین فاصله زهکش‌های زیرزمینی در اراضی شالیزاری

عبداله درزی نفت‌چالی<sup>1\*</sup>، علی شاهنظری<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 1393/12/2 تاریخ پذیرش: 1394/5/14

### چکیده

رفع کامل مشکلات زهکشی و فراهم نمودن شرایط کشت مناسب در کلیه فصول سال در بخش وسیعی از شالیزارهای شمال کشور، مستلزم اجرای زهکشی زیرزمینی است. با توجه به شرایط خاص این اراضی، مانند وجود لایه سخت رسی در عمق کم و بارندگی زیاد در فصول مرطوب، استفاده از معادله مناسب برای طراحی سیستم‌های زهکشی زیرزمینی اهمیت بسیار زیادی دارد. در این تحقیق، کاربرد برخی روابط غیرماندگار زهکشی شامل معادله‌های گلوور-دام، باور-وان شیلفگارد، کراچنهوف-ماسلند و دزو-هلینگا برای تعیین فاصله زهکش‌های زیرزمینی در اراضی شالیزاری مورد ارزیابی قرار گرفت. در طول یک فصل کشت کلزا، از آذر 1390 تا فروردین 1391، عمق سطح ایستایی در تیمارهای مختلف پایلوت زهکشی زیرزمینی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اندازه‌گیری شد. عملکرد هر یک از معادله‌ها با استفاده از آماره‌های راندمان (EF)، درصد خطا (PE)، ضریب تعیین (R<sup>2</sup>)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف (AD) ارزیابی شد. از میان معادله‌های مختلف، معادله دزو-هلینگا عملکرد مناسب‌تری برای برآورد سطح ایستایی در کل دوره مطالعه داشت.

واژه‌های کلیدی: شالیزار، عمق سطح ایستایی، کلزا، معادله‌های زهکشی

### مقدمه<sup>1</sup>

بیش از 75 درصد شالیزارهای کشور در دو استان شمالی گیلان و مازندران قرار دارد (جواهردشتی و اصفهانی، 1381) که حدود 75/44 درصد شلتوک کشور را تولید می‌کنند (وزارت جهاد کشاورزی، 1389). بیش‌ترین سطح زیرکشت برنج کشور در استان مازندران قرار دارد، به طوری که حدود 210 هزار هکتار از 470 هزار هکتار سطح زیر کشت (بانک کشاورزی، 1388) از مساحت 23833 کیلومترمربعی این استان (بانک کشاورزی، 1389)، به شالیزارها اختصاص دارد. علی‌رغم اختصاص بخش وسیعی از اراضی حاصلخیز استان مازندران به اراضی شالیزاری، عدم سرمایه‌گذاری کافی در گذشته و فراهم نکردن زیرساخت‌های مناسب سبب شد که نه تنها بهره‌وری این اراضی افزایش نیابد، بلکه به دلایل مختلف بخشی از شالیزارها از حیز ارتفاع ساقط شده و دچار تغییر کاربری شوند. نتیجه این وضعیت، فراهم نشدن فرصت‌های مناسب برای تنوع درآمد و در سطح کلان تضعیف رشد اقتصادی می‌باشد. با این وجود، در سال‌های اخیر تغییرات ساختاری مهمی در اراضی شالیزاری ایجاد شده است که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، اجرای طرح‌های تجهیز و یکپارچه‌سازی است. در این طرح‌ها در قالب یکپارچه‌سازی اراضی، جاده‌های دسترسی و زهکش-های سطحی نیز احداث می‌شوند. به دلیل عدم قابلیت زهکش‌های سطحی در تخلیه سریع آب از منطقه ریشه، طرح‌های یکپارچه‌سازی

سرانه سطح قابل کشت در ایران 0/15 تا 0/3 هکتار (FAO, 2012) و جمعیت کشور نیز بر اساس آخرین سرشماری سال 1390، حدود 75 میلیون نفر می‌باشد. با توجه به روند رشد جمعیت و به تبع آن کاهش سرانه سطح قابل کشت، تأمین امنیت غذایی برای همگان که به صورت دسترسی منظم به غذای کافی و با کیفیت بالا برای برقراری زندگی پویا و سالم تعریف می‌شود، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی کشور می‌باشد. با این روند، توجه بیش‌تر به راهکارهای افزایش عملکرد به‌ویژه در زمینه محصولات استراتژیک ضروری به نظر می‌رسد. شالیزارها که یک سوم سطح زیر کشت دنیا را اشغال نموده‌اند، نقش مهمی در تغذیه نیمی از مردم جهان دارند (Guerra et al, 1998). در مورد وسعت اراضی شالیزاری ایران آمار متفاوتی موجود می‌باشد که عبارتند از: بیش از 640 هزار هکتار (کریمی، 1387)، 536 هزار هکتار (وزارت جهاد کشاورزی، 1389) و 564 هزار هکتار (FAO, 2012).

1 - استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
2- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
(\* - نویسنده مسئول: Email: abdullahdarzi@yahoo.com)

برای اراضی شالیزاری مرکز توسعه منابع انسانی-کشاورزی هراز محاسبه شد (Darzi-Naftchali et al, 2014). ارزیابی فواصل محاسبه شده با استفاده از مفهوم تعادل دینامیکی و مدل DRAINMOD نشان دهنده کارایی بهتر معادله های غیرماندگار برای اراضی مورد مطالعه بود.

مرور منابع مختلف نشان داد که تاکنون کارایی معادله های غیرماندگار زهکشی برای پیش بینی نوسانات سطح ایستابی در اراضی شالیزاری مورد ارزیابی قرار نگرفته است. با توجه به اینکه تشخیص معادله قابل استفاده برای هر منطقه، منوط به ارزیابی آن براساس نتایج تحقیقات مزرعه ای است، در این تحقیق کاربرد برخی معادله های غیرماندگار زهکشی برای طراحی سیستم های زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری بررسی خواهد شد.

## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه و مشخصات پایلوت زهکشی

داده های مورد نیاز این تحقیق از پایلوت زهکشی زیرزمینی اراضی شالیزاری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تهیه شد. این پایلوت در سال 1390 در حدود 4/5 هکتار از اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شده این دانشگاه واقع در 9 کیلومتر جاده ساری-دریا اجرا شد. عرض و طول جغرافیایی منطقه به ترتیب 36/39 درجه شمالی و 53/04 درجه شرقی بوده و ارتفاع آن از سطح دریا 15- متر می باشد. متوسط بارندگی و متوسط، حداقل و حداکثر دمای هوای ثبت شده در ایستگاه هواشناسی دانشگاه به ترتیب 616 میلی متر و 17/3، 6- و 38/9 درجه سانتی گراد می باشد. اقلیم منطقه براساس روش تعیین اقلیم دومارتن، از نوع مرطوب است (بخت فیروز، 1390). بخش اعظم بارندگی ها (بیش از 70 درصد)، در فصل های پاییز و زمستان رخ می دهد (Darzi-Naftchali and shahnazari, 2014). علاوه بر این، در ماه های آبان تا اسفند مقدار متوسط بارندگی از میانگین تبخیر ماهانه بیش تر می باشد. بافت خاک لایه های مختلف اراضی مورد مطالعه تا عمق 200 سانتی متری غالباً از نوع سیلتی رس و از 200 تا 300 سانتی متر، رسی می باشد. هم چنین، عمق رویه بالایی لایه نفوذناپذیر حدود دو متر می باشد (درزی و همکاران، 1392).

به جز آذر 1390 و فروردین 1391، در طول مدت مطالعه (10 آذر 1390 تا 12 فروردین 1391)، مقدار بارندگی ماهانه بیش تر از میانگین بلند مدت بارندگی دوره متناظر بود. از نظر دما، ماه های فروردین و دی گرم تر از وضعیت نرمال و سایر ماه ها سردتر از وضعیت نرمال بودند. در 0، برخی پارامترهای هواشناسی مربوط به دوره مطالعه ذکر شد.

قادر به برقراری شرایط مناسب برای کشت دوم در اراضی شالیزاری نشد (Darzi-Naftchali et al, 2013). مؤثرترین راهکار برای ایجاد این شرایط، نصب سیستم های زهکشی زیرزمینی، علاوه بر زهکش سطحی که جزء لاینفک طرح های یکپارچه سازی اراضی شالیزاری است، می باشد.

عمق و فاصله زهکش ها، دو مؤلفه اساسی سیستم های زهکشی زیرزمینی می باشند که تعیین بهینه آن ها نقش مهمی در کارایی این نوع زهکشی دارد. فاصله زهکش ها را می توان در دو حالت ماندگار و غیرماندگار به دست آورد. در حالت ماندگار، ویژگی های هیدرولیکی در طول زمان تغییر نمی کند، در زهکشی زیرزمینی میزان تغذیه با تخلیه برابر است و سطح آب در داخل خاک ثابت باقی می ماند و میزان تغذیه یا تخلیه در طول زمان ثابت است. چنین حالتی در عمل پیش نمی آید ولی در مناطقی که باران های با تناوب زیاد دارند، مانند شمال اروپا یا شرق ایالات متحده، می توان جریان را نزدیک به حالت ماندگار فرض کرد (Ritzema, 1994). در جریان های غیر ماندگار، مقدار جریان تابعی از زمان بوده و در نتیجه سطح ایستابی درون خاک نیز نوسان می کند. معادله های گلوور-دام، باور-وان شیلفگارد، دزو-هلینگا و کراجنهوف-ماسلند برخی از معادله های غیرماندگار زهکشی می باشند.

کاربرد معادله کراجنهوف-ماسلند برای تعیین فاصله زهکش ها در شرایط جریان غیرماندگار (Djurovic and Stricevic, 2003) نشان داد که این معادله فاصله زهکش ها را بسیار بیش تر از مقدار واقعی برآورد می کند که دلیل آن عدم توجه به سایر منابع تغذیه غیر از بارندگی و آبیاری عنوان شد. در تحقیقی (Tripathi et al, 2008)، قابلیت معادله های گلوور-دام، دزو-هلینگا و کراجنهوف-ماسلند برای طراحی سیستم زهکشی زیرزمینی در مناطق خشک هند بررسی شد. براساس نتایج، معادله گلوور-دام مناسب ترین معادله برای ارزیابی بار آبی و دبی زهکش بود و برای پیش بینی روزانه بار آبی و دبی زهکش جهت طراحی سازه های زهکشی نظیر حوضچه های تبخیر توصیه شد. هالباک کوتورا با استفاده از مدل WaSim فاصله زهکش ها را برآورد نمود و نتیجه گرفت که فواصل زهکش ها در شرایط غیر ماندگار کم تر از مقادیر متناظر در حالت ماندگار می باشد (Halbac-Cotoara, 2009). راندمان دفع آب مازاد به وسیله سیستم های زهکشی زیرزمینی، در شرایط استفاده از چهار معادله غیرماندگار زهکشی شامل گلوور-دام، وان شیلفگارد، هوخهات تلفیقی و گلوور-دام اصلاح شده ارزیابی شد (Kumar et al, 2013). براساس نتایج، درصد انحراف بین فواصل زهکش واقعی و برآورد شده برای معادلات مذکور، به ترتیب 33/31- تا 31/55- درصد، 9/4 تا 17/7 درصد، 11/84 تا 20/83 درصد و 6/1 تا 14/62 درصد بود که نشان دهنده درصد خطای کم تر معادله گلوور-دام اصلاح شده می باشد. به وسیله برخی از معادله های ماندگار و غیرماندگار زهکشی، فواصل زهکش زیرزمینی

جدول 1- بارندگی و دمای ثبت شده از آذر 1390 تا فروردین 1391

ماه	بارندگی (mm)	میانگین بلند مدت بارندگی (mm)	حد اقل دما (°C)	حد اکثر دما (°C)	میانگین دما (°C)	میانگین بلند مدت دما (°C)
آذر	47/3	89/7	-1	16	7/8	10/6
دی	80/5	77	-1	22/6	9/2	7/5
بهمن	146/3	55/5	-1/4	11/2	5/2	7/3
اسفند	125/6	63	-1/6	27/6	8/2	9/6
فروردین	13/6	47/7	1/4	36/2	15/5	13/2

$$L = \pi \left[ \frac{\frac{Kdt}{\mu}}{\ln 1.16 \frac{h_0}{h_t}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

که در آن‌ها؛  $h_0$  (متر) و  $h_t$  (متر) بار آبی در نقطه وسط دو زهکش در زمان اولیه و زمان  $t$ ،  $L$  فاصله بین زهکش‌ها (متر)،  $d$  عمق معادل تا لایه غیر قابل نفوذ (متر)،  $K$  ضریب هدایت هیدرولیکی (متر بر روز)،  $T$  دور آبیاری (روز) و  $\mu$  تخلخل مؤثر (متر مکعب بر متر مکعب) می‌باشد.

اگر فرض شود زمانی که تغذیه صورت نمی‌گیرد، مقدار دبی خروجی از زهکش‌ها ( $q$ ) بستگی به سرعت افت سطح ایستابی ( $dh/dt$ ) دارد، معادله باور - وان شیلفگارد به دست می‌آید که به صورت‌های زیر بیان می‌شود (علیزاده، 1382):

$$L^2 = \frac{10Ktd}{\mu} \left[ \ln \frac{h_0(2d+h_t)}{h_t(2d+h_0)} \right]^{-1} \quad (3)$$

$$L^2 = \frac{10Ktd}{\mu} \left[ \ln \frac{h_0}{h_t} \right]^{-1} \quad (4)$$

در معادله (3) جریان از بالا و پایین زهکش لحاظ شده و در معادله (4) تنها جریان از زیر زهکش‌ها در نظر گرفته می‌شود. معادلات مربوط به سطح ایستابی متغیر اولین بار توسط دزو-هلینگا (1958) ارائه شد که شکل معرف تغییرات سطح ایستابی آن، به صورت معادله (5) می‌باشد:

$$h_t = h_{t-1} e^{-\alpha \Delta t} + \frac{R_{\Delta t}}{0.8\mu\alpha} (1 - e^{-\alpha \Delta t}) \quad (5)$$

که در آن؛  $q$  دبی خروجی از زهکش‌ها (متر در روز)،  $R$  تغذیه آب زیرزمینی از بارندگی یا منبع دیگری مانند آبیاری ( $R\Delta t$ ) متوسط مقدار تغذیه در بازه زمانی  $\Delta t$  می‌باشد برحسب متر در روز،  $h$  عمق سطح ایستابی در نقطه میانی فاصله بین دو زهکش (متر) و  $\Delta t$  دوره زمانی مورد نظر (روز) می‌باشد. در این معادله‌ها، فقط جریان از زیر زهکش‌ها لحاظ می‌شود (Singh et al, 1999). معادله کراجنهوف-ماسلند برای

سه سیستم زهکشی زیرزمینی موجود در مزرعه که در این مطالعه استفاده شدند عبارتند از سیستم زهکشی با عمق 0/9 متر با فاصله 30 متر ( $D_{0.9}L_{30}$ )، سیستم زهکشی با عمق 0/65 متر با فاصله 15 متر ( $D_{0.65}L_{15}$ ) و سیستم زهکشی با عمق 0/65 متر با فاصله 30 متر ( $D_{0.65}L_{30}$ ). مشخصات کامل این سیستم‌های زهکشی و نحوه انتخاب آن‌ها، به تفصیل در گزارش‌های قبلی مربوط به این پایلوت زهکشی ارائه شد (درزی و همکاران 1391 و 1392). برای بررسی اثر سیستم‌های زهکشی بر عمق سطح ایستابی، چاهک‌هایی به عمق یک متر در نقطه میانی فاصله بین دو زهکش در هر سه سیستم زهکشی حفر شد. برای حفظ پایداری دیواره چاهک‌ها و اندازه‌گیری آسان‌تر عمق سطح ایستابی، کلیه چاهک‌ها با استفاده از لوله‌های پی-وی سی مشبک تجهیز شدند. تراز سطح کلیه چاهک‌های مشاهده‌ای با استفاده از دوربین نقشه‌برداری تعیین شد. در بخشی از یک فصل کشت کلزا که شرایط زهکشی آزاد برقرار بود (از هشت آذر 1390 تا 14 فروردین 1391) عمق سطح ایستابی در این چاهک‌های مشاهده‌ای اندازه‌گیری شد.

#### معادله‌های غیر ماندگار زهکشی

برخی از مهم‌ترین معادله‌های غیرماندگار زهکشی شامل معادله‌های گلوور-دام، باور-وان شیلفگارد، دزو-هلینگا، و کراجنهوف-ماسلند در این تحقیق استفاده شدند. در روش گلوور-دام، تنها نوبتی از آبیاری مورد توجه قرار می‌گیرد که در آن یا میزان عمق آبیاری بیش‌ترین مقدار را دارد و یا فاصله آبیاری کم‌ترین است به‌طوری‌که بحرانی‌ترین حالت ممکن در این دوره اتفاق می‌افتد. این رابطه برای سطح ایستابی اولیه تخت و سهمی درجه چهار به ترتیب به صورت معادله‌های (1) و (2) نشان داده می‌شود (Kahlowan and Khan, 2004):

$$L = \pi \left[ \frac{\frac{Kdt}{\mu}}{\ln \frac{4h_0}{\pi h_t}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

متوسط مقادیر مشاهده ای و  $\bar{P}$  متوسط مقادیر پیش بینی شده در طول دوره زمانی است. بهترین مقدار EF و  $R^2$  برابر یک و برای SE، PE و AD برابر صفر است.

### نتایج و بحث

با استفاده از معادله دزو-هلینگا مقادیر عمق سطح ایستابی برای روزهای مختلف مدت مطالعه برآورد و نتایج حاصله برای تیمارهای  $D_{0.65}L_{15}$  و  $D_{0.65}L_{30}$ ،  $D_{0.9}L_{30}$ ، برای هر سه تیمار روند تغییرات سطح ایستابی را همانند مقادیر واقعی پیش بینی نمود. با این وجود، تغییرات زیادی بین مقادیر واقعی و برآورد شده در تیمارهای  $D_{0.65}L_{30}$  و  $D_{0.9}L_{30}$  مشاهده شد. در تیمار  $D_{0.9}L_{30}$ ، در اوایل مدت مطالعه، سطح ایستابی کمتر از مقادیر واقعی و سپس بیش تر از آن برآورد شد و در انتها به مقادیر واقعی نزدیک شد. بررسی روند تغییرات سطح ایستابی به همراه بارندگی نشان می-دهد که تناوب زیاد بارندگی ها از 29 دی 1390 سبب صعود سطح ایستابی و قرار گرفتن آن در بالا یا نزدیک سطح زمین در تیمار  $D_{0.9}L_{30}$  شد. در این شرایط، معادله دزو-هلینگا سطح ایستابی را خیلی بیش تر از مقادیر واقعی برآورد نمود درحالی که در شرایط تناوب و مقادیر کمتر بارندگی، این معادله غالباً سطح ایستابی را خیلی کم تر از مقادیر واقعی برآورد کرد.

تیمار  $D_{0.65}L_{30}$  علی رغم این که در ظاهر باید توانایی کمتری از نظر زهکشی در مقایسه با تیمار  $D_{0.9}L_{30}$  داشته باشد ولی در عمل شرایط بهتری از نظر کنترل سطح ایستابی ایجاد نمود. وقوع بارندگی زیاد در دوره مطالعه (کل بارندگی در دوره نمونه برداری، تقریباً 40 درصد بیش تر از مقدار متوسط طولانی مدت بارندگی منطقه در این دوره بود) را می توان یکی از دلایل عدم افت زیاد سطح ایستابی و در نتیجه، ناکارآمدی سیستم های زهکشی دارای عمق و فاصله بیش تر در کنترل سطح ایستابی دانست. با توجه به عمق کم تر زهکش ها در این تیمار، واکنش معادله دزو-هلینگا به بارندگی غالباً بیش تر از وضعیت مذکور در تیمار  $D_{0.9}L_{30}$  بود و در اکثر مواقع مقادیر سطح ایستابی خیلی بیش تر از مقادیر واقعی برآورد شد. این شرایط، با افزایش تکرار و مقادیر بارندگی ها تشدید شد به گونه ای که در برخی مواقع اختلاف سطح ایستابی واقعی و برآورد شده به بیش از 60 سانتی متر رسید. برخلاف دو تیمار  $D_{0.9}L_{30}$  و  $D_{0.65}L_{30}$ ، در تیمار  $D_{0.65}L_{15}$ ، معادله دزو-هلینگا تقریباً همیشه سطح ایستابی را کم تر از مقدار واقعی برآورد نمود. در این تیمار، اختلاف مقادیر واقعی و برآورد شده کم تر از مقادیر آن در دو تیمار  $D_{0.9}L_{30}$  و  $D_{0.65}L_{30}$  بود. به طور کلی، به نظر می رسد که افزایش شدت زهکشی یا افزایش ضریب عکس العمل در این تیمار، سبب بهبود قابل توجه کارایی معادله دزو-هلینگا در برآورد سطح ایستابی شد. نتایج آزمایش های جعفری و

شرایط تغذیه متناوب به صورت زیر می باشد (Tripathi et al, 2008):

$$h_t = \frac{1}{\mu} (C_1 R_t + C_2 R_{t-1} + C_3 R_{t-2} + \dots + C_t R_1) \quad (6)$$

که در آن؛  $\mu$  تخلخل مؤثر و

$$C_1 = c_1 j$$

$$C_2 = (c_2 - c_1) j$$

$$C_t = (c_t - c_{t-1}) j$$

$$c_t = \frac{4}{\pi} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^3} (1 - e^{-\frac{n^2 t}{1/\alpha}})$$

### معیارهای ارزیابی

عملکرد هر یک از معادله ها با استفاده از آماره های راندمان 1 (Nash and Sutcliffe, 1970) (EF)، درصد خطا 2 (PE)، ضریب تعیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (Wang et al, 2006) یا میانگین انحراف (AD) یا میانگین خطای مطلق (Legates and McCabe, 1999) ارزیابی شد. این آماره ها به صورت زیر تعریف می شوند:

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

$$PE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (9)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (10)$$

$$AD = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (11)$$

که در آن ها؛  $O_i$  و  $P_i$  به ترتیب مقدار مشاهده ای و پیش بینی شده به وسیله معادله های مختلف در زمان  $t$ ،  $n$  تعداد مشاهده ها،  $\bar{O}$

<sup>1</sup>-Nash-Sutcliffe Efficiency

<sup>2</sup>-Percent Error

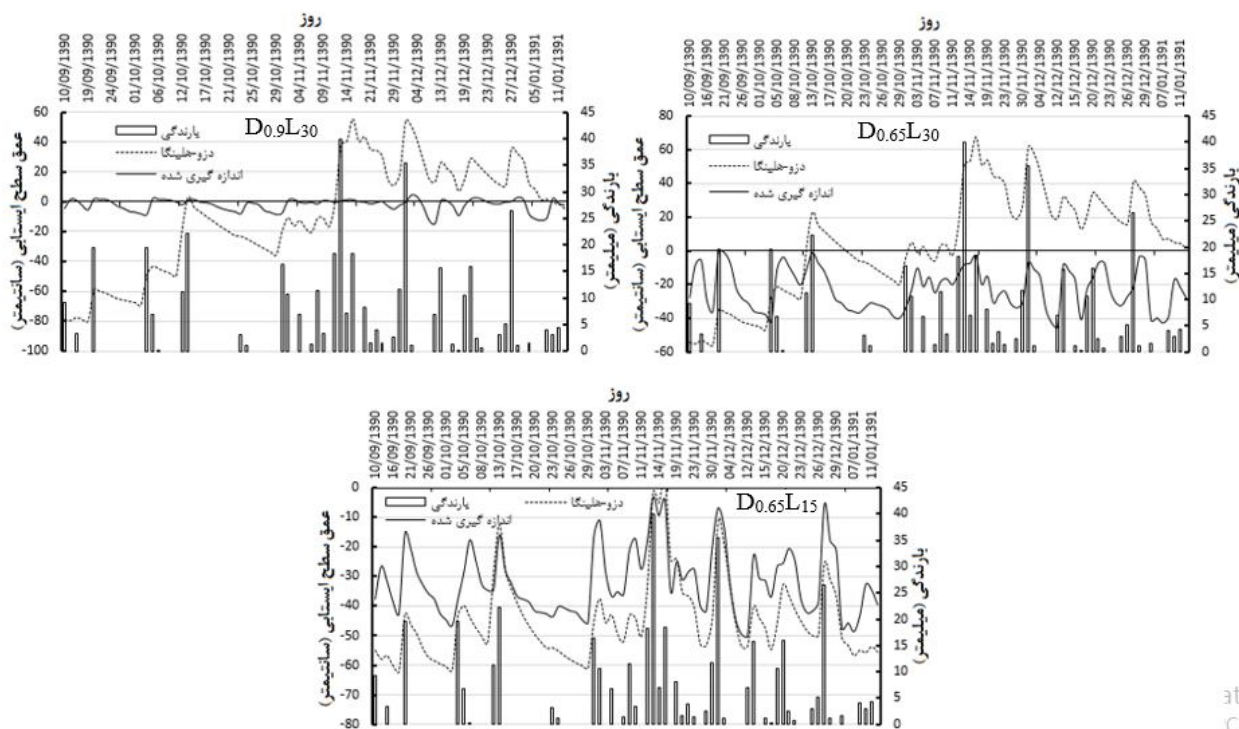
بیشترین اختلاف بین مقادیر برآورد شده و واقعی در تیمار  $D_{0.9}L_{30}$  مشاهده شد که دلیل اصلی آن ناکارایی این سیستم زهکشی در کنترل سطح ایستابی در مقایسه با دو تیمار دیگر بود. جعفری و همکاران (1391) نشان دادند که معادله کراجنهوف-ماسلند در شرایط خیزان، سطح ایستابی را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد نمود. در تحقیقی (Djurovic and Stricevic, 2003)، دلیل برآورد نامناسب فاصله زهکش‌ها به‌وسیله معادله کراجنهوف-ماسلند، عدم ملاحظه سایر منابع تغذیه به غیر از بارندگی و آبیاری عنوان شد.

معادله باور-وان شیلفگارد برای برآورد سطح ایستابی در دو حالت جریان از زیر زهکش‌ها و جریان از بالا و پایین زهکش‌ها مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حاصله برای تیمارهای  $D_{0.65}L_{30}$ ،  $D_{0.9}L_{30}$  و  $D_{0.65}L_{15}$  در شکل (3) ارائه شد. برای وضعیت جریان از بالا و پایین زهکش‌ها، این معادله برای هر سه تیمار عملکرد بسیار نامناسبی داشت به‌طوری‌که در کل مدت مطالعه تغییر محسوسی در مقادیر سطح ایستابی برآورد شده مشاهده نمی‌شود. عدم خیز سطح ایستابی، حتی پس از وقوع بارندگی‌های زیاد نیز مؤید نامناسب بودن شرایط حاکم در این فرم از معادله باور-وان شیلفگارد برای اراضی مورد مطالعه است.

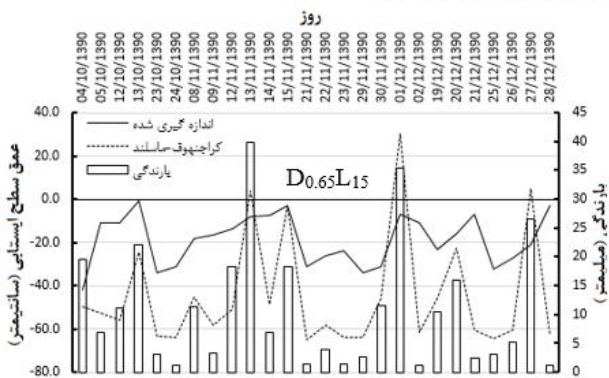
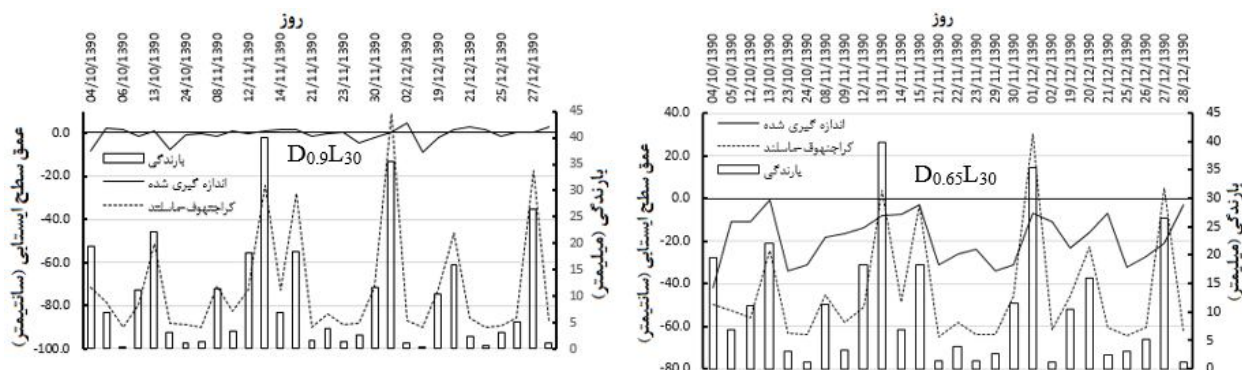
همکاران (1391) که در یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی انجام شد، نشان داد که معادله دزو-هلینگا در شرایط خیزان، سطح ایستابی را کم‌تر از مقادیر واقعی و در شرایط افتان، برخی مواقع بیش‌تر و در برخی مواقع کم‌تر برآورد می‌کند. مقایسه مقادیر دبی اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده به‌وسیله معادله دزو-هلینگا (Stibinger, 2009)، نشان داد که می‌توان از این معادله برای برآورد دبی غیرماندگار زهکش‌ها در خاک‌های رسی استفاده کرد. هم‌چنین، گزارش شد که این معادله برای اراضی شالیزاری کارایی بهتری در مقایسه با معادله‌های ماندگار و معادله باور-وان شیلفگارد دارد (Darzi-Naftchali et al., 2014).

**Error! Reference source not found.** مقادیر عمق سطح

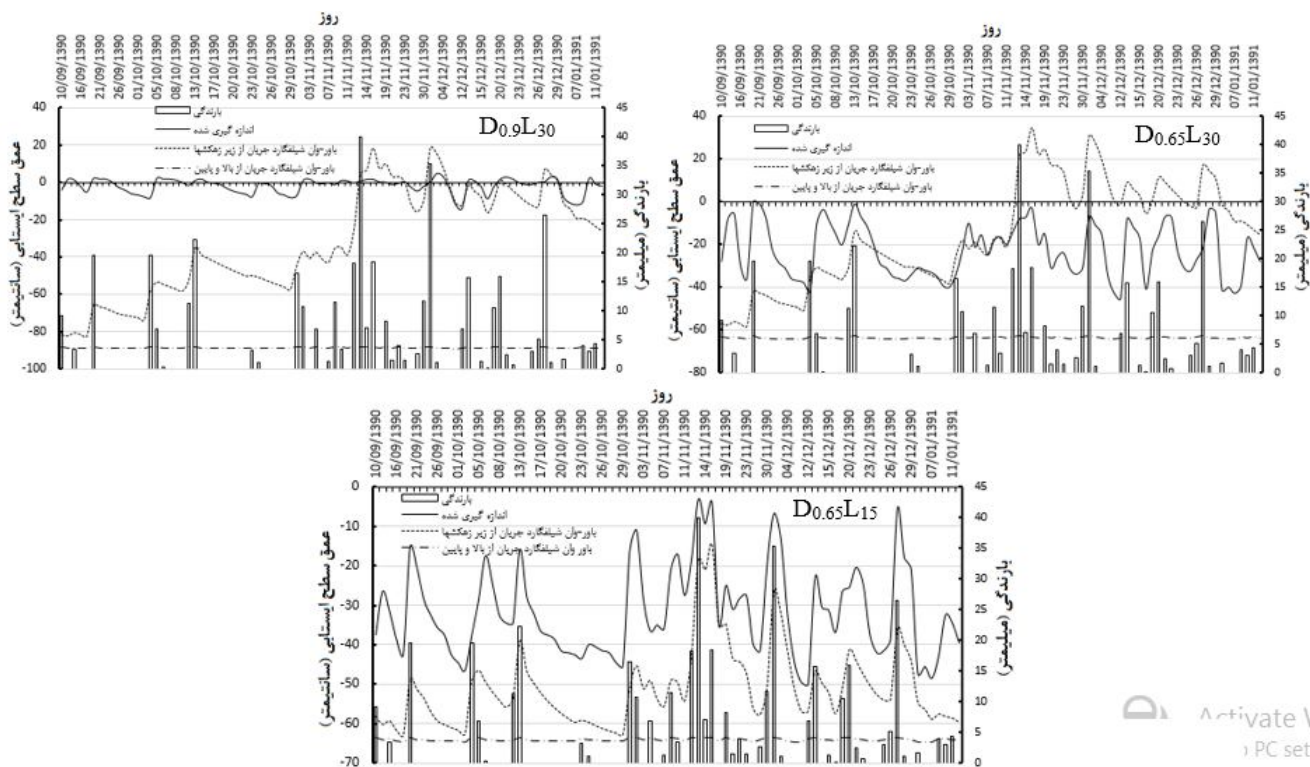
ایستابی برآورد شده به‌وسیله معادله کراجنهوف-ماسلند را به‌ترتیب برای تیمارهای  $D_{0.65}L_{30}$ ،  $D_{0.9}L_{30}$  و  $D_{0.65}L_{15}$  نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در این تحقیق از فرمی از این معادله استفاده شد که متناسب با وضعیت تغذیه غیرماندگار است. نتایج ارایه شده در شکل (2) برای دوره‌های متشکل از چند روز بارندگی متوالی است. در هر سه تیمار، معادله کراجنهوف-ماسلند عمق سطح ایستابی را تقریباً همیشه کم‌تر از مقدار واقعی برآورد نمود. از میان تیمارهای مختلف،



شکل 1- مقادیر عمق سطح ایستابی برآورد شده با استفاده از معادله دزو-هلینگا برای تیمارهای مختلف



شکل 2- مقادیر عمق سطح ایستابی برآورد شده با استفاده از معادله کراجنهوف-ماسلند برای تیمارهای مختلف



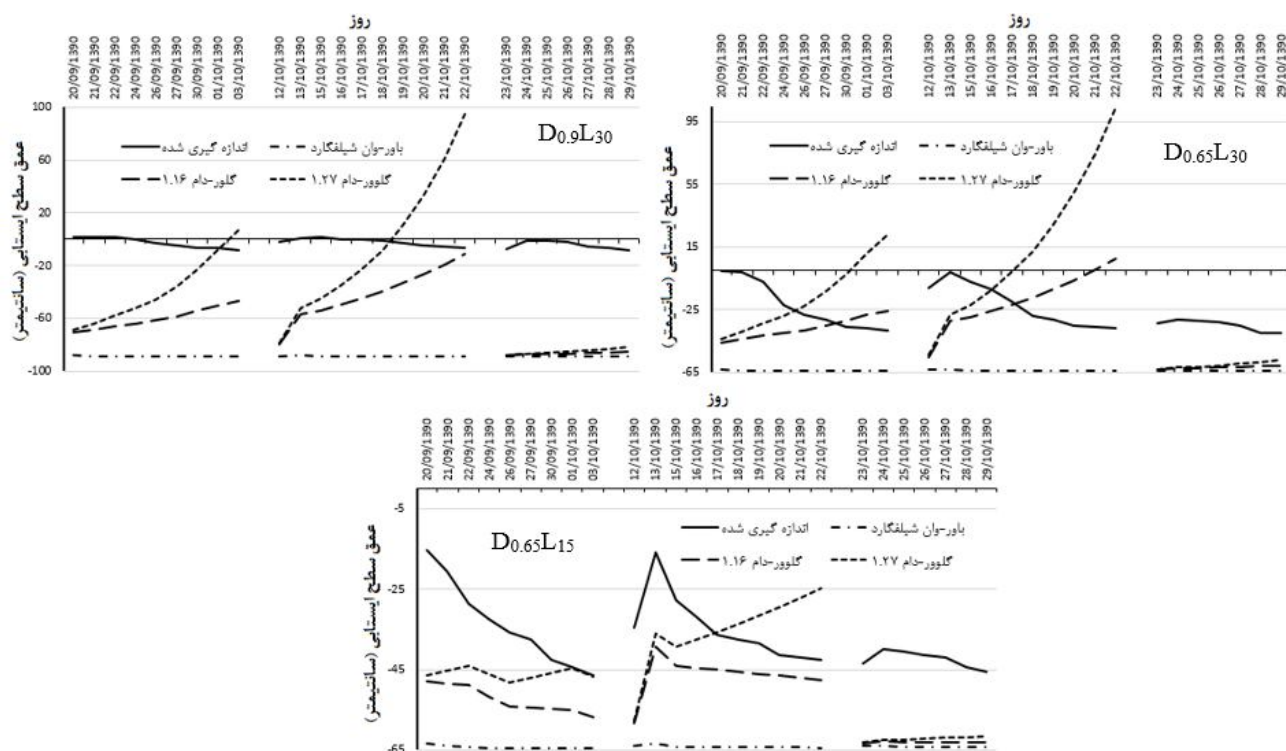
شکل 3- مقادیر عمق سطح ایستابی برآورد شده با استفاده از معادله باور-وان شیلفگارد برای تیمارهای مختلف



ایستایی با استفاده از این معادله خواهد شد.

با توجه به این که معادله‌های گلوور-دام و باور-وان شیلفگارد برای دوره‌های افت سطح ایستایی پس از وقوع بارندگی یا آبیاری ارایه شدند، با استفاده از این معادله‌ها مقادیر عمق سطح ایستایی برای سه دوره افت محاسبه شد و نتایج حاصله در شکل (4) ارایه شد. همانند وضعیت مذکور برای کل دوره مطالعه، معادله باور-وان شیلفگارد با ملاحظه جریان از بالا و پایین زهکش‌ها، علی‌رغم پیش-بینی روند افت سطح ایستایی، برآوردهای بسیار نامناسبی حاصل نمود. معادله گلوور-دام با ضریب  $1/27$  (با فرض سطح ایستایی اولیه تخت)، روند تغییرات سطح ایستایی را کاملاً عکس روند واقعی برآورد نمود. کاهش ضریب عکس‌العمل سیستم زهکشی منجر به بدتر شدن کارایی این معادله در برآورد سطح ایستایی شد. معادله گلوور-دام با ضریب  $1/16$  نیز تنها برآوردهای نسبتاً مناسبی در تیمار  $D_{0.65}L_{15}$  ارایه داد و برای دو تیمار  $D_{0.65}L_{30}$  و  $D_{0.9}L_{30}$  عملکردی مشابه دو معادله دیگر داشت. جعفری و همکاران (1391) نشان دادند که در شرایط افتان، معادله گلوور-دام سطح ایستایی را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد نمود.

در شرایطی که مقادیر عمق سطح ایستایی فقط با ملاحظه جریان از زیر زهکش‌ها برآورد شد، روند تغییرات عمق سطح ایستایی در کلیه تیمارها تا حد زیادی به روند واقعی آن نزدیک شد. با این وجود، این روند در تیمارهای  $D_{0.9}L_{30}$  و  $D_{0.65}L_{30}$  تا حدودی متفاوت بود. در ابتدای دوره مطالعه که تناوب و میزان بارندگی‌ها کم‌تر بود، در این تیمارها عمق سطح ایستایی کم‌تر از مقدار واقعی برآورد شد در حالی-که با افزایش مقدار و تناوب بارندگی‌ها، عمق سطح ایستایی در تیمار  $D_{0.9}L_{30}$  تقریباً مشابه مقادیر واقعی و در تیمار  $D_{0.65}L_{30}$  بیش‌تر از مقادیر واقعی برآورد شد. دلیل این تفاوت، عملکرد بهتر تیمار  $D_{0.65}L_{30}$  در مقایسه با تیمار  $D_{0.9}L_{30}$  می‌باشد. در شرایط ملاحظه جریان از زیر زهکش‌ها، برای تیمار  $D_{0.65}L_{15}$  معادله باور-وان شیلفگارد عمق سطح ایستایی را همواره کم‌تر از مقادیر واقعی آن برآورد کرد. مقایسه عملکرد این معادله در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که افزایش شدت زهکشی و به تبع آن ضریب عکس‌العمل سیستم زهکشی تا حد مشخصی، می‌تواند سبب بهبود کارایی معادله باور-وان شیلفگارد در پیش‌بینی سطح ایستایی شود. با این حال، به نظر می‌رسد که کاهش بیش از حد فاصله زهکش‌ها یا افزایش بیش از حد عمق زهکش‌ها منجر به برآورد بیش از حد مقادیر عمق سطح



شکل 4- مقادیر عمق سطح ایستایی برآورد شده با استفاده از معادله‌های گلوور-دام و باور-وان شیلفگارد برای دوره‌های افت

مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن تیمار  $D_{0.65}L_{30}$ ، معادله دزو-هلینگا کارایی بهتری در مقایسه با معادله‌های باور-وان شیلفگارد برای کل مدت مطالعه داشت. ملاحظه آماره‌های ارزیابی نیز مؤید این وضعیت می‌باشد. صرفنظر کردن از ورود آب از روی زهکش‌ها به‌درون آن، سبب بهبود قابل توجهی در برآوردهای معادله باور-وان شیلفگارد شد.

متوسط عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در دوره تغذیه مورد استفاده در معادله کراجنهوف-ماسلند برای تیمارهای  $D_{0.9}L_{30}$ ،  $D_{0.65}L_{30}$  و  $D_{0.65}L_{15}$  به ترتیب برابر 0/6، 18/9 و 23/7 سانتی‌متر بود در حالی که مقادیر برآورد شده به وسیله این معادله به ترتیب 71/8، 44/3 و 45/8 سانتی‌متر بود. مقایسه این مقادیر و آماره‌های ارزیابی تیمارهای مختلف نشان می‌دهد که با افزایش شدت زهکشی، کارایی معادله کراجنهوف ماسلند بهبود یافت.

در جدول (2) متوسط مقادیر عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری و برآورد شده و آماره‌های ارزیابی معادله‌های مختلف ارائه شد. با توجه به ماهیت توسعه معادله‌های مختلف، هر یک از معادله‌ها تحت شرایط مختلف مورد استفاده قرار گرفتند. معادله‌های باور-وان شیلفگارد یک‌بار برای کل دوره مطالعه و یک‌بار برای شرایط افت سطح ایستابی استفاده شدند. معادله دزو-هلینگا برای کل دوره مطالعه، معادله کراجنهوف-ماسلند برای دوره خیز سطح ایستابی و معادله گلوور-دام برای سه دوره مختلف افت سطح ایستابی به کار برده شد. در کل مدت مطالعه، میانگین عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در تیمارهای  $D_{0.9}L_{30}$ ،  $D_{0.65}L_{30}$  و  $D_{0.65}L_{15}$  به ترتیب برابر 2، 22/8 و 31/7 سانتی‌متر بود در حالی که مقادیر متناظر به دست آمده از معادله-های باور-وان شیلفگارد با ملاحظه جریان از بالا و پایین، باور-وان شیلفگارد با ملاحظه فقط جریان از پایین و دزو-هلینگا به ترتیب 88/8، 63/7 و 64/1؛ 32/3، 15/3 و 51/1؛ 9/8، 4/2 و 44/5 بود.

جدول 2- متوسط مقادیر عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری و برآورد شده (سانتی‌متر) و آماره‌های ارزیابی معادله‌ها

AD	SE	R <sup>2</sup>	EF	PE	برآورد شده	اندازه‌گیری	تیمار	معادله
86/8	87	0/11	-455	-4418	88/8	2	$D_{0.9}L_{30}$	باور-وان شیلفگارد از بالا و پایین
40/9	42/7	0/21	-10/7	-179	63/7	22/8	$D_{0.65}L_{15}$	
32/4	34/3	0/5	-8/1	-102	64/1	31/7	$D_{0.65}L_{30}$	
32/5	41/2	0/03	-102	-1544	32/3	2	$D_{0.9}L_{30}$	باور-وان شیلفگارد از پایین
21/2	25/7	0/04	-3/2	32/8	15/3	22/8	$D_{0.65}L_{30}$	
19/4	20/6	0/63	-2/3	-61/3	51/1	31/7	$D_{0.65}L_{15}$	
30/4	36/7	0/03	-80	-399	9/8	2	$D_{0.9}L_{30}$	دزو-هلینگا
36/3	41	0/04	-9/8	118	4/2	22/8	$D_{0.65}L_{30}$	
13/6	15/6	0/58	-0/9	-40	44/5	31/7	$D_{0.65}L_{15}$	
71/8	75/4	0/02	-562	-12063	71/8	0/6	$D_{0.9}L_{30}$	کراجنهوف ماسلند
31/2	34/3	0/19	-8/1	-135	44/3	18/9	$D_{0.65}L_{30}$	
27/7	27/9	0/48	-4/2	-93	45/8	23/7	$D_{0.65}L_{15}$	
58/9	61/2	0/23	-327	-2009	61/8	2/93	$D_{0.9}L_{30}$	باور-وان شیلفگارد از بالا و پایین (افت)
38/4	40/5	0/59	-8/5	-150	64	25/6	$D_{0.65}L_{30}$	
27/8	29	0/54	-10/6	-76	64/3	36/5	$D_{0.65}L_{15}$	
53	60	0/09	-314	-1194	37/9	2/93	$D_{0.9}L_{30}$	گلوور-دام با ضریب 1/27 (افت)
38/4	49/6	0/07	-13	36/7	16/2	25/6	$D_{0.65}L_{30}$	
14/1	16/3	0/05	-2/7	-26/7	46/3	36/5	$D_{0.65}L_{15}$	
57/1	61/4	0/01	330	1949	60	2/93	$D_{0.9}L_{30}$	گلوور-دام با ضریب 1/16 (افت)
23/9	27/1	0/002	-3/3	43/8	36/7	25/6	$D_{0.65}L_{30}$	
16/5	18	0/35	-3/5	-45/2	53	36/5	$D_{0.65}L_{15}$	



ارشد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، 50 ص. جعفری، ج.، ناظمی، ا.ح.، اشرف صدرالدینی، س.ع. و افروزی، ع. 1391. اندازه‌گیری و برآورد تراز سطح ایستابی و میزان تخلیه زهکشی در جریان غیرماندگار. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال سوم 11: 115-125.

جواهردشتی، م. و اصفهانی، م. 1381. برنج دیم (ترجمه). نشر علوم کشاورزی، 128 ص.

درزی، ع.، میرلطیفی، س.م.، شاهنظری، ع.اجلالی، ف. و مهدیان، م.ح. 1391. تأثیر زهکشی سطحی و زیرزمینی بر تلفات فسفر از اراضی شالیزاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، 3: 6. 225-215.

درزی، ع.، میرلطیفی، س.م.، شاهنظری، ع.اجلالی، ف. و مهدیان، م.ح. 1392. تأثیر زهکشی سطحی و زیرزمینی بر تلفات نیتروژن از اراضی شالیزاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، 3: 7. 305-294.

علیزاده، ا. 1382. زهکشی اراضی، طرح و برنامه‌ریزی سیستم‌های زهکشی در کشاورزی. چاپ پنجم، انتشارات آستان قدس رضوی، 448 ص.

کریمی، و. 1387. مدیریت آب در دوره گل‌آب کردن اراضی شالیزاری. مجموعه مقالات دومین کنفرانس راهکارهای بهبود و اصلاح سامانه‌های آبیاری سطحی.

وزارت جهاد کشاورزی، 1389. آمارنامه کشاورزی (جلد اول): محصولات زراعی، سال زراعی 88-1388.

Darzi- Naftchali, A., Mirlatifi, S.M. and Asgari, A. 2014. Comparison of steady and unsteady state drainage equations for determination of subsurface drain spacing in paddy fields- A case study in Northern Iran. *Paddy and Water Environment*. 12: 103-111.

Darzi- Naftchali, A., Mirlatifi, S.M., Shahnazari, A., Ejlali, F. and Mahdian, M.H., 2013. Effect of subsurface drainage on water balance and water table in poorly drained paddy fields. *Agricultural Water Management*, 130: 61-68.

Darzi- Naftchali, A. and Shahnazari, A. 2014. Influence of Subsurface drainage on the productivity of poorly drained paddy fields. *Europ. Journal of Agronomy*. 56: 1-8.

Djurovic, N. and Stricevic, R. 2003. Application of Krajinhoff van de Leur- Massland's method in drainage. *Journal of Agricultural Sciences*. 48.2: 159-170.

Guerra, L.C., Bhuiyan, S.I., Tuong, T.P. and Tuong, R. 1998. Producing more rice with less water. SWIM Paper 5. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.

Halbac-Cotoara, R. 2009. Results obtained in drainage arrangements designed by using drain space

در شرایط افت سطح ایستابی، متوسط مقادیر عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری شده برای تیمارهای  $D_{0.65}L_{30}$ ،  $D_{0.9}L_{30}$  و  $D_{0.65}L_{15}$  به ترتیب 2/93، 25/6 و 36/5 بود. مقایسه مقادیر عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای این شرایط نشان می‌دهد که معادله باور-وان شیلفگارد عملکرد مناسبی نداشت. همچنین، معادله گلوور-دام با ضریب 1/27 کارایی نسبتاً مشابهی با معادله گلوور-دام با ضریب 1/16 داشت. با این وجود، همان‌طور که در شکل (4) مشاهده شد، این معادله‌ها روند تغییرات سطح ایستابی در دوره‌های افت را مناسب پیش‌بینی نکردند.

## نتیجه‌گیری

مقایسه مقادیر عمق سطح ایستابی اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده به‌وسیله برخی از معادله‌های غیرماندگار زهکشی نشان داد که معادله‌های دزو-هلینگا و باور-وان شیلفگارد بدون در نظر گرفتن جریان از بالای زهکش‌ها، روند تغییرات عمق سطح ایستابی را به خوبی برآورد کردند. افزایش تناوب و میزان بارندگی، باعث افزایش خطای معادله دزو-هلینگا در برآورد مقادیر عمق سطح ایستابی برای تیمارهای  $D_{0.65}L_{30}$  و  $D_{0.9}L_{30}$  شد. همچنین، افزایش شدت زهکشی یا ضریب عکس‌العمل سیستم زهکشی تا حد معینی، سبب بهبود قابل توجه عملکرد معادله‌های دزو-هلینگا و باور-وان شیلفگارد بدون ملاحظه جریان از روی زهکش‌ها شد. معادله کراجنهوف-ماسلند تقریباً همیشه عمق سطح ایستابی را کم‌تر از مقادیر واقعی برآورد کرد و معادله‌های که فقط برای وضعیت افت سطح ایستابی استفاده شدند، کارایی نامناسبی در برآورد سطح ایستابی داشتند.

## سپاسگزاری

مؤلفان از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به دلیل به‌دلیل مساعدت‌های مالی، کمال تشکر را دارند.

## منابع

بانک کشاورزی (اداره کل مطالعات و بررسی‌های اقتصادی)، 1388. خلاصه سیمای آب و هوا، اقلیم و منابع آب استان مازندران، 11 ص.

بانک کشاورزی (اداره کل مطالعات و بررسی‌های اقتصادی)، 1389. وضعیت بخش کشاورزی در استان مازندران، 42 ص.

بای بوردی، م. 1378. اصول مهندسی زهکشی و بهسازی خاک. چاپ هشتم، انتشارات دانشگاه تهران، 641 ص.

بخت‌فیروز، ع. 1390. بررسی اثر سامانه‌های زهکشی بر گسیل گاز متان و دی‌اکسید کربن از شالیزارها. پایان‌نامه کارشناسی

- Netherlands: 283–294.
- Singh, P.K., Singh, O.P., Jaiswal, C.S and Chauhan, H.S. 1999. Subsurface drainage of a three layered soil with slowly permeable top layer. *Agricultural Water Management*. 42: 97-109.
- Stibinger, J. 2009. Terrain experimental measurement of saturated hydraulic conductivity on paddy fields in Taoyuan (Taiwan) during the cycling of flooded period. *Agricultura tropica et subtropica*, 42 (2): 82-89.
- Tripathi, V.K. Gupta, S.K and Kumar, P. 2008. Performance Evaluation of Subsurface Drainage System with the Strategy to Reuse and Disposal of its Effluent for Arid Region of India. *Journal of Agriculture. Physics*. 8: 43-50.
- Wang, X., Mosley, C.T., Frankenberger, J.R and Klavivko, E.J. 2006. Subsurface drain flow and crop yield predictions for different drain spacings using DRAINMOD. *Agricultural Water Management*, 79: 113–136.
- application. *Research Journal of Agricultural Science*. 41.1:426-431.
- Kahlowan, M.A and Khan, A.D. 2004. *Tile drainage manual*, Pakistan council of research in water resources. 145 p.
- Kumar, R., Bhakar, S.R and Singh, P.K. 2013. Evaluation of hydraulics characteristics and management strategies of subsurface drainage system in Indira Gandhi Canal Command. *Agriculture Engineering International: CIGR Journal*. 15 .2: 1-9. Open access at <http://www.cigrjournal.org>.
- Legates, D.R and McCabe, G.J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*. 35: 233-241.
- Nash, J.E and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10: 282-290.
- Ritzema, H.P. 1994. Subsurface flows to drains. In: Ritzema H.P. *Drainage principles and applications* ILRI Publ. 16, Wageningen, The

## Assessment of Unsteady- State Drainage Equations to Determine the Spacing of Subsurface Drains in Paddy Fields

A. Darzi-Naftchali\*<sup>1</sup>, A. Shahnazari<sup>2</sup>

Received: Feb.21, 2015

Accepted: Aug.05, 2015

### Abstract

Subsurface drainage is required to eliminate drainage problems and to provide year-round cropping conditions in large areas of the Northern Iran's paddy fields. With regard to the specific characteristics of these fields such as presence of hard layer of clay at shallow depth and high rainfall in the wet seasons, using an appropriate equation is important for the design of subsurface drainage systems. In this research, the applicability of four unsteady- state drainage equations including Glover–Dumm, Van-Shilfgard, Dezeeuw– Hellinga, and Kraijenhoff– Maasland was evaluated to determine subsurface drain spacing in paddy fields. Measurement of water table depth was made daily during a canola growing season, from November 2011 to April 2012, in different treatments of subsurface drainage pilot of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University. Performance of each equation was evaluated using the statistics including efficiency (EF), percent error (PE), coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE) and mean deviation (AD). Among different equations, the Dezeeuw– Hellinga was the best equation for estimating water table depth during the study period.

**Keywords:** Paddy field, Water table depth, Canola, Drainage equations.

---

1- Assistant professor, Water Engineering Department., Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University  
2- Associate professor, Water Engineering Department., Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University  
(\*-Corresponding Author Email: [abdullahdarzi@yahoo.com](mailto:abdullahdarzi@yahoo.com))