

پیش‌بینی تغییرات نیم‌رخ سطح ایستابی بین زهکش‌های دو عمقی در اراضی شالیزاری

مهدی جعفری تلوکلایی¹، علی شاهنظری^{2*}، میرخالق ضیاتبابار احمدی³، داوود کلاتری⁴

تاریخ دریافت: 1394/12/8 تاریخ پذیرش: 1395/8/19

چکیده

برای بهبود بهره‌وری شالیزارها و فراهم کردن امکان کشت دوم در اراضی شالیزاری شمال کشور، احداث سیستم‌های زهکشی زیرزمینی ضروری می‌باشد. یکی از سیستم‌های زهکشی، زهکش‌های دو عمقی می‌باشند که با توجه به هزینه‌های کم‌تر و امکان زهکشی کنترل شده نصب می‌شوند. کارایی این سیستم‌های زهکشی و نصب آن‌ها، به مقدار زیادی به دانش کافی از جریان آب در خاک و استفاده از روش مناسب طراحی بستگی دارد. در این تحقیق، مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی بین دو زهکش زیرزمینی نصب شده در دو عمق مختلف در اراضی شالیزاری ارایه می‌شود. معادله دیفرانسیل حاکم بر جریان در حالت دو بعدی و حالت اصلاح شده با اعمال بار جریان عمودی (به دلیل لایه‌بندی خاص خاک) حل شد. نتایج حل با مقادیر سطح ایستابی اندازه‌گیری شده در پابلوت اراضی شالیزاری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری و آرسنجی و ارزیابی شدند. روش اصلاح شده با توجه به در نظر گرفتن اثر مقاومت لایه‌ها در مقابل جریان عمودی آب در خاک، پیش‌بینی مناسب و دقیق‌تری نسبت به روش حل دو بعدی داشت. به طور میانگین، این روش، حداکثر ارتفاع و منحنی سطح ایستابی را به ترتیب با 3 و 21 درصد اختلاف نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، پیش‌بینی کرد. بنابراین، برای طراحی مناسب سیستم زهکشی دو عمقی و بهره‌برداری بهتر از آن‌ها در اراضی شالیزاری، استفاده از روش اصلاح شده توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: جریان عمودی، جریان غیرماندگار، حل تحلیلی دو بعدی، لایه کفه شخم، معادله بیر

مقدمه

کار و تولید خارج باشند. این عدم کاربرد، باعث دل‌سردی کشاورزان و تغییر کاربری این اراضی شده است (Darzi et al., 2013). برای حفظ پایداری اراضی شالیزاری و بهبود وضعیت معیشتی کشاورزان، نصب سیستم‌های زهکشی با هدف افزایش و بهبود کیفیت محصول برنج و همچنین فراهم کردن امکان کشت دوم ضروری می‌باشد. سیستم‌های زهکشی با پایین بردن سطح ایستابی، خشک کردن مناسب و به‌موقع خاک محدوده ریشه، میزان بهره‌وری از خاک‌های سنگین در اراضی شالیزاری را افزایش می‌دهند (Jung et al., 2010). با این وجود، یک سیستم زهکشی در صورتی مناسب و کارآمد است که در زمان طراحی، توصیف دقیقی از شرایط خاک و جریان حاکم بر آب در منطقه اشباع را در بر گیرد.

تئوری‌های زیادی برای طراحی سیستم‌های زهکشی زیرزمینی موجود هستند (Kumar et al., 2013). این تئوری‌ها با استفاده از خصوصیات مهم خاک که در طراحی و عملکرد زهکش‌ها موثر هستند فرموله شدند. اکثر فرمول‌های حاصل شده دارای ساده‌سازی‌هایی می‌باشند که تنها پارامترهای موثر بر جریان را در نظر گرفته و یا خاک را حداکثر دو لایه‌ای فرض کرده‌اند (Ritzema, 1994). از طرف دیگر، تمام خاک‌ها حتی خاک‌های لایه‌ای نیز می‌توانند با

اراضی شالیزاری کشور با مساحتی بالغ بر 460 هزار هکتار (FAO., 2014) سهم زیادی در چرخه غذایی و معیشتی مردم دارند. بیش از 75 درصد از این اراضی، در دو استان شمالی مازندران و گیلان واقع می‌باشند (Darzi and Shahnazari., 2014). سطح ایستابی بالا به دلیل بارش زیاد در فصول مرطوب، خاک با بافت سنگین و نبود یا عدم کارایی سیستم‌های زهکشی سطحی در این اراضی باعث شده تا بخش عظیمی از این اراضی تنها در کم‌تر از دو فصل سال تحت کشت قرار گرفته و در بقیه زمان از سال، از چرخه

1- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

2- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

3- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

4- استادیار گروه مکانیک بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

* - نویسنده مسئول: (Email: aliponh@yahoo.com)

فقط مولفه‌ی افقی جریان آب به طرف زهکش لحاظ شده، موقعیت سطح ایستابی را بیش از مقدار واقعی برآورد می‌نماید.

برای طراحی سیستم‌های زهکشی دو عمقی در اراضی شالیزاری نیز، از فرمول‌های ماندگار و غیرماندگار موجود استفاده می‌شود. اما بیش‌تر این فرمول‌ها که هر کدام برای وضعیت خاصی کارایی دارند، از خصوصیات هیدرولیکی و لایه‌ای خاک‌ها، که به آسانی نیز قابل اندازه‌گیری نیستند، چشم‌پوشی می‌کنند، بنابراین نمی‌توانند در شالیزارها کارآمد باشند. چون اراضی شالیزاری دارای لایه‌بندی خاصی از خاک می‌باشند که در زیر لایه سطحی با نفوذپذیری مناسب، یک لایه کفه شخم (هاردپن) وجود دارد که نیمه‌نفوذپذیر است و در زیر آن دوباره لایه‌ای با نفوذپذیری تقریباً مناسب قرار دارد. به طور کلی، لایه کفه شخم، الگوی جریان و مسیر آن را در اراضی شالیزاری کنترل می‌کند (Garg et al., 2009). این لایه‌بندی باعث می‌شود تا عمق و فاصله زهکش‌ها و در پی آن سطح ایستابی، تحت تاثیر قرار بگیرد. در این شرایط، استفاده از روش‌های موجود طراحی و همچنین پیش‌بینی سطح ایستابی با آن‌ها، با دقت قابل قبولی امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین، تئوری حاکم بر زهکش‌های دو عمقی با توجه به شرایط جریان در اراضی شالیزاری نیاز به بازبینی و اصلاح دارد. چون عدم دخیل کردن شرایط حاکم بر اراضی شالیزاری در طراحی‌ها، موجب ناکارآمدی سیستم‌های زهکشی و مشکلاتی در گسترش و بهره‌برداری از آن‌ها می‌شود. در مجموع، پیچیدگی جریان به سمت زهکش‌ها در اراضی شالیزاری، موجود نبودن روش مناسب برای طراحی سیستم زهکشی دو عمقی در این اراضی و همچنین نوین بودن سیستم‌های زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری شمال کشور از مشخصه‌های مهم برای انجام این تحقیق بوده‌اند.

هدف از انجام این تحقیق، ارائه حل تحلیلی معادله بیر (Bear, 1972) در حالت دو بعدی برای طراحی زهکشی دو عمقی در اراضی شالیزاری می‌باشد. این معادله، معادله دیفرانسیل حاکم بر جریان در محیط متخلخل بوده و براساس ترکیبی از معادلات پیوستگی و داری می‌باشد که برای مسایل جریان در محیط اشباع، هیدرولوژی آب زیرزمینی، نشت آب از بندها و جریان آب به سمت زهکش‌ها کاربرد دارد (Ahmad et al., 1991). با توجه به لایه‌ای بودن خاک و شرایط خاص آن در اراضی شالیزاری و اهمیت جریان عمودی، معادله بیر در حالت دو بعدی و اصلاح شده با در نظر گرفتن بار مقاومت در مقابل جریان عمودی حل خواهد شد.

مواد و روش‌ها

داده‌های مزرعه‌ای از پایلوت زهکشی اراضی شالیزاری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری واقع در 9 کیلومتر جاده ساری - دریا در استان مازندران ($36.3^{\circ} N$, $53.04^{\circ} E$)، برای واسنجی و

استفاده از زهکش‌های زیرزمینی، زهکشی شوند اگر طراحی، شرایط حاکم بر فیزیک جریان را در بر گیرد. داگان (Dagan., 1965)، توکسوز و کرکهام (Toksoz and Kirkham., 1971) و دیلمان (Dieleman., 1974) به ترتیب یک حل تقریبی، یک حل تحلیلی و شکل‌های خطی از معادلات را برای حالت ماندگار زهکشی خاک‌های دو و سه لایه‌ای بدست آوردند. در شرایط غیرماندگار نیز، تحقیقی نشان داد که سطح ایستابی تحت تاثیر محل برخورد لایه‌ها قرار دارد. تحقیقات مذکور تنها برای زهکش‌های معمولی انجام شدند. اما گاهی نیاز به نصب زهکش‌های مجاور هم در دو عمق متفاوت می‌باشد. هزینه‌های کم‌تر نسبت به زهکشی معمولی، جلوگیری از تخلیه زیاد آب و مواد غذایی و شیمیایی و بهبود عملکرد سیستم زهکشی از مشخصه‌های مثبت و دلایل اصلی نصب این سیستم‌های زهکشی می‌باشند (Verma et al., 1998; Kirkham et al., 1997). طراحی این زهکش‌ها با توجه به پیچیده بودن تئوری جریان به سمت آن‌ها، دشواری‌های خاص خود را دارد. دی‌بوئر و چو (DeBoer and Chu., 1975) یک معادله طراحی زهکشی در حالت ماندگار و روش بوئر و وان‌شیلفگارد (Bouwer and Van Schilfgaarde., 1963) در حالت غیرماندگار را برای سیستم زهکشی دو عمقی استفاده کردند که همبستگی مناسبی بین مقادیر سطح ایستابی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده مزرعه‌ای مشاهده شد. یک حل تحلیلی و یک حل عددی از معادله غیرخطی بوسینسک برای پیش‌بینی جریان غیرماندگار سطح ایستابی در یک سیستم زهکشی دو عمقی با فرض سطح ایستابی اولیه سهموی ارائه شد (Sabti., 1989). نتایج نشان داد که در حل عددی، مقادیر حداکثر ارتفاع سطح ایستابی نسبت به حل تحلیلی، بیش‌تر برآورد شده‌اند. ورما و همکاران (Verma et al., 1998) نیز یک حل تحلیلی را برای معادله بوسینسک در زهکشی دو عمقی با روش تبدیل لاپلاس ارائه دادند. آن‌ها این روش را با مقادیر مزرعه‌ای گزارش شده توسط (Chu and DeBoer., 1976) اعتبارسنجی کردند. نتایج نشان داد که روش ارائه شده می‌تواند در پیش‌بینی سطح ایستابی بین دو زهکش با عمق متفاوت استفاده شود. در بررسی تغییرات پروفیل سطح ایستابی و دبی خروجی از زهکش‌های دو عمقی در خاک لایه‌ای، نتایج مشاهدات مزرعه‌ای با معادله تحلیلی آپادها و چوهان (2000) ارزیابی شدند (حمزه و همکاران، 1392). نتایج نشان داد با توجه به لایه‌ای بودن خاک، معادلات موجود قادر به شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق پروفیل سطح ایستابی و دبی خروجی از مزرعه نبودند. در تحقیقی، یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی وضعیت سطح ایستابی بین دو زهکش زیرزمینی در شرایط غیرهمگام با حل معادله بیر ارائه شد (بهبهانی و رحیمی‌خوب، 1381). نتایج نشان داد که در خاک‌های همگن در شرایطی که هدایت هیدرولیکی جریان - های عمودی قابل توجه باشد، استفاده از معادلات تحلیلی که در آن

1 ارایه شدند. با توجه به اینکه بارندگی با مقدار کم‌تر از 5 میلی‌متر، خیز قابل ملاحظه‌ای در سطح ایستابی ایجاد نکرد، در مجموع، طی 20 دوره بعد از بارندگی داده‌برداری انجام شد. به طوری که با توقف بارندگی، اندازه‌گیری سطح ایستابی آغاز شده و تا افت کامل آن ادامه یافت.

بررسی عملکرد مدل تحلیلی، جمع‌آوری شدند. براساس داده‌های بلندمدت 10 ساله، میانگین دما و میانگین بارندگی سالانه به ترتیب 17/3 درجه سلسیوس و 616 میلی‌متر می‌باشند که حدود 70 درصد از بارندگی در طول دوره مهر تا فروردین رخ می‌دهد. بازه مهر تا اسفند که در طول فصل کشت دوم (کلزا) می‌باشد به عنوان دوره شبیه‌سازی انتخاب شد. داده‌های روزانه بارندگی از مهر تا اسفند 1393 در جدول

جدول 1- داده‌های روزانه بارندگی (میلی‌متر) در طول دوره مطالعه در پایلوت زهکشی

تاریخ	بارندگی	تاریخ	بارندگی	تاریخ	بارندگی	تاریخ	بارندگی
10 مهر	0/8	27 آبان	2/2	3 بهمن	5/6	4 اسفند	4
15 مهر	17/3	28 آبان	17/5	10 بهمن	6/4	7 اسفند	8/3
18 مهر	4/3	2 آذر	6/1	15 بهمن	2/1	13 اسفند	48/4
19 مهر	2	5 آذر	3/3	16 بهمن	3/4	14 اسفند	8/5
27 مهر	50/9	7 آذر	3/2	22 بهمن	2/3	17 اسفند	9/4
3 آبان	6/6	8 آذر	6/7	23 بهمن	3	24 اسفند	8/6
11 آبان	2/5	11 آذر	28/3	1 اسفند	4/5	26 اسفند	7/9
12 آبان	31/6	25 آذر	7/1	2 اسفند	8		
13 آبان	2/6	18 دی	19/1	3 اسفند	10/7		
مجموع	118/6	مجموع	93/5	مجموع	46	مجموع	95/1

بین 40-55 درصد است. در عمق 2 متری یک لایه نفوذناپذیر مشاهده شد. تشخیص لایه نفوذناپذیر با توجه بار پیژومتر می‌شده و مقایسه هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف انجام شد. به طور کلی اگر یک لایه پایینی با لایه بالایی محصور شود و سطح ایستابی در پیژومتر واقع در لایه پایینی، بالاتر از کف لایه بالایی مشاهده شود به لایه بالایی، نفوذناپذیر می‌گویند (Ahmadi., 1999). هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه‌های مختلف با استفاده از روش چاهک اندازه‌گیری شد. بافت خاک و هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف در جدول 2 ارائه شد.

یک سیستم زهکشی دو عمقی شامل چهار خط زهکش با عمق - های 0/65 و 0/9 متر و فاصله 15 متر در این پایلوت اجرا شد. جزئیات بیش‌تر در مقاله درزی و همکاران (1391) ارایه شده است. چاهک‌های مشاهده‌ای برای اندازه‌گیری سطح ایستابی و بررسی رفتار آن در دوره تحقیق، در فاصله‌های صفر، 0/5، 2/5، 5، 7/5، 10، 12/5، 14/5 و 15 متر از زهکش عمیق نصب شدند. اندازه‌گیری سطح ایستابی به روش دستی با متر و دبی زهکش‌ها به روش حجمی با ظرف مدرج و زمان‌سنج، هر دو به صورت روزانه انجام شد. بافت خاک مزرعه تا عمق 1/5 متری، سیلتی‌رس با مقدار رس

جدول 2- بافت خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های مختلف در پایلوت مورد مطالعه

عمق خاک (cm)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	بافت خاک	هدایت هیدرولیکی (m/day)
0-30	49	44	7	سیلتی‌رس	1/040
30-60	55	42	3	سیلتی‌رس	0/110
60-90	46	46	8	سیلتی‌رس	0/270
90-120	42	52	6	سیلتی‌رس	0/157
120-150	52	42	6	سیلتی‌رس	0/117
150-200	59	35	6	رسی	0/083
200-300	61	34	5	رسی	0/025

تعیین می‌شود (Singh et al., 1999). با توجه به آنکه فاصله بین زهکش‌ها با یک مقدار ثابت تخلخل موثر تعیین می‌شود، بنابراین میانگین مقادیر محاسبه شده تعیین شد. پارامترهای طراحی و مقادیر

با هدف دستیابی به تخلخل قابل زهکشی، این پارامتر با استفاده از روش تیلور محاسبه شد. در روش تیلور، مقادیر تخلخل قابل زهکشی بر مبنای سطح ایستابی اولیه و نهایی و مقدار آب خارج شده

میانگین‌های هدایت هیدرولیکی در جهت‌های مختلف در جدول 3 ارائه شد.

جدول 3- پارامترهای سیستم زهکشی دو عمقی در پابلوت مورد مطالعه

پارامتر	علامت اختصاری	مقدار
فاصله زهکش‌ها (متر)	L	15
عمق لایه نفوذناپذیر (متر)	d	2
عمق زهکش عمیق (متر)	d_d	0/9
فاصله زهکش عمیق تا لایه نفوذناپذیر (متر)	D	1/1
عمق زهکش کم عمق (متر)	$d-h_1$	0/65
میانگین هدایت هیدرولیکی افقی (متر در روز)	k_x	0/275
میانگین هدایت هیدرولیکی عمودی (متر در روز)	k_y	0/137
تخلخل قابل زهکشی (بی بعد)	S_0	0/077
عکس مقاومت (day^{-1})	K_v/D_v	0/332

ایستایی در بالای سطح زهکش عمیق در هر نقطه از مختصات، S_0 تخلخل قابل زهکشی و t زمان می‌باشند.

از آن جایی که معادله بیر غیرخطی می‌باشد برای امکان پذیر کردن حل تحلیلی معادله، فرضیات زیر در نظر گرفته شدند: محدود جریان ایزوتروپ اما غیرهمگن می‌باشد و روی یک لایه نفوذناپذیر قرار گرفته است.

در آکیفرهای نشتی، وقتی هدایت هیدرولیکی آکیفر و همچنین ضخامت آن از لایه نیمه‌نفوذپذیر بیشتر است، جریان در آکیفر عمده افقی است اگرچه در لایه نیمه‌نفوذپذیر بالایی، جریان به صورت عمودی است. براساس این تئوری و با توجه به لایه‌بندی مشابه در اراضی شالیزاری در مقیاس کوچک‌تر، وقتی تخلیه یا نفوذ اتفاق می‌افتد بار هیدرولیکی در لایه‌های بالایی هم‌زمان با لایه‌های پایینی کاهش می‌یابد. این نشان می‌دهد که جریان در لایه‌ی زهکش افقی و در لایه‌های بالایی و به‌طور ویژه در لایه کفه شخم عمودی می‌باشد. فرضیه دوپوئی فورشهایمر در مناطقی که اجزای جریان عمودی قابل ملاحظه هستند کاربردی نیست.

با این فرضیات، معادله 3 برای یک محیط ایزوتروپ، اما غیرهمگن به صورت معادله 4 توصیف می‌شود (Bear., 1979):

$$k_{xx} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = S_0 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

که k_x و k_y به ترتیب میانگین‌های هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف (متر مربع در روز) در مسیرهای x و y می‌باشند. بقیه پارامترها در توضیحات معادله 3 آورده شد. شرایط حاکم بر جریان و فیزیک مساله برای حل تحلیلی در شکل 1 نشان داده شد. برای شرط اولیه، فرض می‌شود که سطح ایستابی به صورت افقی در زمان صفر و در ارتفاع h_0 بالای زهکش عمیق باشد. لایه نفوذناپذیر در عمق D زیر زهکش عمیق و دو زهکش در فاصله L از یکدیگر می‌باشند.

برای پیش‌بینی سطح ایستابی و بررسی حل تحلیلی، چندین محاسبه با استفاده از پارامترهای موجود در جدول 3 انجام شد. نتایج بدست آمده از سطح ایستابی با داده‌های مزرعه‌ای واسنجی شدند. سپس نتایج واسنجی شده با مقادیر سطح ایستابی اندازه‌گیری شده بعد از بارندگی 48 میلی‌متری (جدول 1- روز 13 اسفند) مقایسه شدند. دو شاخص مقایسه جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص توافق (I_a) برای مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده استفاده شدند. مقدار RMSE که دقت پیش‌بینی را اندازه‌گیری می‌کند تا حد امکان باید کوچک باشد (Nash and Sutcliffe., 1970).

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

شاخص توافق که درجه دقت شبیه‌سازی را نسبت به داده‌های مزرعه‌ای بررسی می‌کند مقادیر بین صفر تا یک را اختیار می‌کند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد توافق مناسب‌تری از پیش‌بینی را ارائه می‌کند. این شاخص به صورت معادله 2 می‌باشد (Willmott et al., 2012).

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

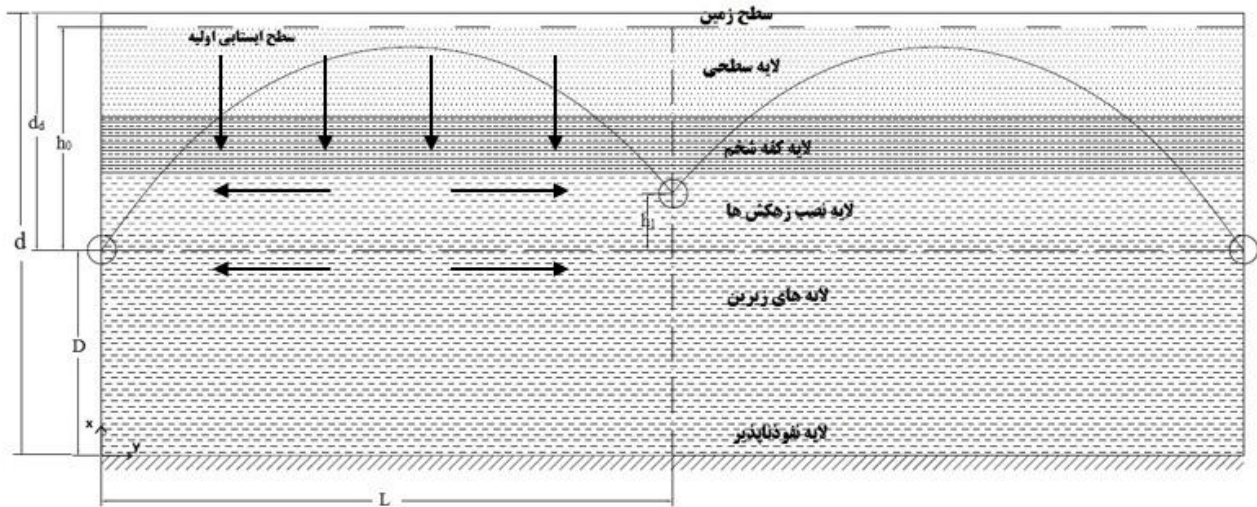
که O_i مقادیر مشاهده شده در زمان i و P_i مقادیر پیش‌بینی شده در همان زمان می‌باشد. \bar{O} میانگین مشاهدات در طول یک دوره و \bar{P} میانگین پیش‌بینی شده‌ها در همان دوره و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

معادله حاکم

معادله دیفرانسیل حاکم بر جریان غیرماندگار دو بعدی (Bear., 1979) در دستگاه مختصات x و y به صورت معادله 3 می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_0 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

که: x و y به ترتیب مختصات افقی و عمودی، k_x و k_y به ترتیب میانگین‌های هدایت هیدرولیکی در مسیرهای x و y ، h ارتفاع سطح



شکل 1- نمایی از سامانه زهکشی دو عمقی و لایه‌بندی خاک در اراضی شالیزاری

شرایط اولیه و مرزی

شرایط اولیه شامل مقدار ارتفاع سطح ایستابی در همه نقاط در محدوده بین دو زهکش در زمان صفر می‌باشد. وقتی بارندگی اتفاق می‌افتد، سطح ایستابی بالا آمده و خاک را اشباع می‌کند. بعد از بارندگی، آب موجود در روی زهکش‌ها تخلیه شده و در واقع ارتفاع سطح ایستابی بالای لوله زهکش عمیق صفر فرض می‌شود. در معادلات 5 تا 9 شرایط اولیه و مرزی حاکم بر زهکشی دو عمقی ارایه شد.

$$t=0 \quad 0 \leq x \leq L \quad 0 \leq y \leq d \quad h(x, y, 0) = h_0 \quad (5)$$

$$t>0 \quad x = 0 \quad h(0, y, t) = 0 \quad (6)$$

$$t>0 \quad x = L \quad h(L, y, t) = h_1 \quad (7)$$

$$t>0 \quad 0 \leq x \leq L \quad y = 0 \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$t>0 \quad 0 \leq x \leq L \quad y = d \quad h(x, d, t) = 0 \quad (9)$$

ر ادامه، حل تحلیلی به روش جداسازی متغیرها با بسط سری فوریه برای معادله 4 ارایه می‌شود. یکی از مزیت‌های حل تحلیلی آن است که می‌تواند برای مقادیر مختلف ورودی به کار برده شود و اثر آن پارامترها را نشان دهد (Bear., 1979).

حل تحلیلی

از آنجایی که شرایط مرزی غیرهمگن است، برای حل معادله، باید آن را به نحوی به همگن تبدیل کرد. از طرفی دیگر، شرایط مرزی مساله مستقل از زمان می‌باشد. بنابراین فرض می‌شود که h مجموع توابع V و W باشد:

$$h(x, y, t) = V(x, y) + W(x, y, t) \quad (10)$$

که V تابع ماندگار و مستقل از زمان و W تابع غیرماندگار و وابسته به زمان می‌باشند. با جایگذاری معادله 10 در معادله 4 مشتق اول V نسبت به زمان و مشتق دوم آن نسبت به مکان صفر می‌شود. بنابراین جواب مساله توزیع خطی از مرز مساله خواهد بود و V تابعی خطی می‌باشد. بنابراین با توجه به شرایط مرزی:

$$V(x, y) = \frac{h_1}{L} x \quad (11)$$

با اعمال این تغییر و جایگذاری معادله 10 در معادله 4، معادله 12 با شرایط مرزی همگن حاصل می‌شود. برای حل، در روش جداسازی متغیرها، فرض می‌شود که W تابعی از x ، y و t باشد:

$$S_0 \frac{\partial W}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \quad (12)$$

$$W(x, y, t) = X(x) \cdot Y(y) \cdot T(t) \quad (13)$$

که X تابعی فقط برحسب x ، Y تابعی فقط برحسب y و T تابعی فقط برحسب t می‌باشند. با جایگذاری معادله 13 در معادله 12، عبارت 14 به دست می‌آید:

$$k_x X'' \cdot Y \cdot T + k_y X \cdot Y'' \cdot T - S_0 X \cdot Y \cdot T' = 0 \quad (14)$$

که X'' و Y'' مشتقات مرتبه دوم نسبت به x و y ، و T' مشتق مرتبه اول نسبت به t می‌باشد. در ادامه، معادله 14 بر معادله 13 تقسیم و به شکل معادله 15 نوشته می‌شود:

$$k_x \frac{X''}{X} + k_y \frac{Y''}{Y} - S_0 \frac{T'}{T} = 0 \quad (15)$$

$$-k_x \frac{X''}{X} = k_y \frac{Y''}{Y} - S_0 \frac{T'}{T} = \lambda_x^2 \quad (16)$$

$$k_x X'' + \lambda_x^2 X(x) = 0 \quad (17)$$

با صرف نظر از جزئیات و مشابه روند معادلات 15 تا 17، معادلات 18 و 19 حاصل می‌شوند:

$$k_y Y'' + \lambda_y^2 Y(y) = 0 \quad (18)$$

می‌باشد. به‌طور کلی، جریان به سمت زهکش‌ها در لایه-های بالای سطح زهکش عمودی است (Ritzema., 1994) و در سطح زهکش و در لایه‌های زیرین، جریان به صورت افقی به سمت زهکش‌ها جریان می‌یابد (Hussein., 2015). بر طبق نوع خاک و لایه‌بندی آن در اراضی شالیزاری، تلفات بار عمودی به دلیل اصطکاک ناشی از نفوذپذیری کم لایه‌های خاک به سمت سطح زهکش‌ها وجود دارد. به‌طور کلی، بخشی از جریان خروجی از زهکش‌ها از لایه‌های بالایی تامین می‌شود. اگر فرض شود مقدار سطح ایستابی مشخص است و افت آن تنها در لایه‌های بالایی و با گذر جریان از آن‌ها اتفاق می‌افتد. بنابراین باید قابلیت افت آن در لایه‌های بالایی را در معادله وارد کرد. با توجه به این شرایط، یک روش اصلاح شده برای وارد کردن بار عمودی به صورت جداگانه در حل تحلیلی ارائه شد. این روش، براساس آن که افت در سطح ایستابی با تخلیه بخشی از آب ذخیره شده در لایه‌ها همراه است، عکس مقاومت یعنی قابلیت خاک در مقابل جریان را در معادله دخیل می‌کند. بنابراین معادله 27 پیشنهاد شد.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - \frac{k_v}{D_v} h = S_0 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (27)$$

که k_v هدایت هیدرولیکی عمودی لایه‌های روی زهکش و D_v ضخامت لایه‌های روی زهکش می‌باشند. بقیه پارامترها در معادلات قبلی توضیح داده شدند. برای حل معادله 27 فرض می‌شود که h تابعی از Q باشد. با مشتق‌گیری نسبت به زمان و مکان، معادله 31 حاصل می‌شود:

$$h(x, t) = Q(x, t) \cdot e^{-\frac{k_v}{S_0 D_v} t} \quad (28)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{k_v}{S_0 D_v} \cdot Q(x, t) \cdot e^{-\frac{k_v}{S_0 D_v} t} + \frac{\partial Q}{\partial t} \cdot e^{-\frac{k_v}{S_0 D_v} t} \quad (29)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \cdot e^{-\frac{k_v}{S_0 D_v} t} \quad (30)$$

$$S_0 \frac{\partial Q}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \quad (31)$$

با توجه به شرایط مرزی حاکم بر زهکش دو عمقی و تابع Q ، فرض می‌شود که این تابع مجموع توابع W و V باشد. بدون وارد شدن به جزئیات و با توجه به روش‌های ارائه شده در معادلات 10 تا 24، حل تابع Q به صورت زیر خواهد شد:

$$Q(x, t) = h_1 \cdot \frac{x}{L} \cdot e^{-\frac{k_v}{S_0 D_v} t} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-2}{n\pi} \cdot (h_0 \cdot \cos(n\pi) - 1 + h_1 \cdot \cos(n\pi)) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \cdot e^{-\left(\frac{1}{S_0}\right) \left(\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 k_x^2 + \frac{k_v^2}{D_v^2}\right) t} \quad (32)$$

که معادله نهایی برای تابع h نیز به صورت معادله 31 خواهد بود.

$$h(x, t) = h_1 \cdot \frac{x}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{-2}{n\pi} \cdot (h_0 \cdot \cos(n\pi) - 1 + h_1 \cdot \cos(n\pi)) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \cdot e^{-\left(\frac{1}{S_0}\right) \left(\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 k_x^2 + \frac{k_v^2}{D_v^2}\right) t} \quad (33)$$

معادلات بدست آمده از حل‌های تحلیلی، برای انجام محاسبات و

$$\frac{T}{F} = -\left(\frac{1}{S_0}\right) \cdot A_T^2 \quad (19)$$

معادلات 17 و 18 با استفاده از بسط سری فوریه و معادله 19 با استفاده از انتگرال‌گیری بدست می‌آیند.

$$X(x) = A \cdot \cos\left(\frac{\lambda_x}{\sqrt{k_x}} \cdot x\right) + B \cdot \sin\left(\frac{\lambda_x}{\sqrt{k_x}} \cdot x\right) \quad (20)$$

$$Y(y) = C \cdot \cos\left(\frac{\lambda_y}{\sqrt{k_y}} \cdot y\right) + D \cdot \sin\left(\frac{\lambda_y}{\sqrt{k_y}} \cdot y\right) \quad (21)$$

$$T = E \cdot e^{-\left(\frac{1}{S_0}\right) \cdot \lambda^2 \cdot t} \quad (22)$$

حال شرایط اولیه و مرزی برای تابع W اعمال می‌شوند. شرایط اولیه و مرزی برای تابع W همان شرایط اولیه و مرزی برای تابع h بوده و تنها با توجه به همگن‌سازی، به‌جای معادله 7 از معادله 23 استفاده می‌شود.

$$t > 0 \quad x = L \quad W(L, y, t) = 0 \quad (23)$$

که، t زمان، x فاصله از زهکش عمیق، L فاصله بین دو زهکش و y عمودی فاصله از لایه غیرقابل نفوذ می‌باشند. با اعمال شرایط اولیه و مرزی، تابع W به صورت رابطه 24 حاصل می‌شود:

$$W(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{2d} y\right) \cdot e^{-\left(\frac{1}{S_0}\right) \left(\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 k_x^2 + \left(\frac{n\pi}{2d}\right)^2 k_y^2\right) t} \quad (24)$$

$$F_n = \frac{2}{dL} \int_0^d \int_0^L (h(x, y, 0) - V(x, y)) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{2d} y\right) \cdot dx dy \quad (25)$$

با جمع معادلات 24 و 11، معادله نهایی برای h به صورت معادله 26 خواهد بود:

$$h(x, y, t) = h_1 \cdot \frac{x}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{(n\pi)^2} \cdot (h_0 (\cos(n\pi) - 1) + h_1 \cos(n\pi)) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{2d} y\right) \cdot e^{-\left(\frac{1}{S_0}\right) \left(\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 k_x^2 + \left(\frac{n\pi}{2d}\right)^2 k_y^2\right) t} \quad (26)$$

که در آن، t زمان، x فاصله از زهکش عمیق، L فاصله بین دو زهکش، d عمق تا لایه نفوذناپذیر، y فاصله عمودی از روی لایه نفوذناپذیر، h_0 سطح ایستابی اولیه از تراز زهکش و h_1 اختلاف عمق دو زهکش می‌باشند.

روش اصلاح شده

مقاومت در برابر جریان عمودی در یک لایه از خاک با توجه به ضخامت اشباع و هدایت هیدرولیکی آن، برابر D_i/k_{vi} است. از آن-جایی که هدایت هیدرولیکی و دبی عبوری از لایه خاک تابعی از زمان است بنابراین مقاومت زهکشی نیز تابعی از زمان است که در مقابل افت سطح ایستابی وجود دارد (Hussein., 2015). کل مقاومت در مقابل جریان در یک خاک، مجموع مقاومت‌های لایه‌های مختلف

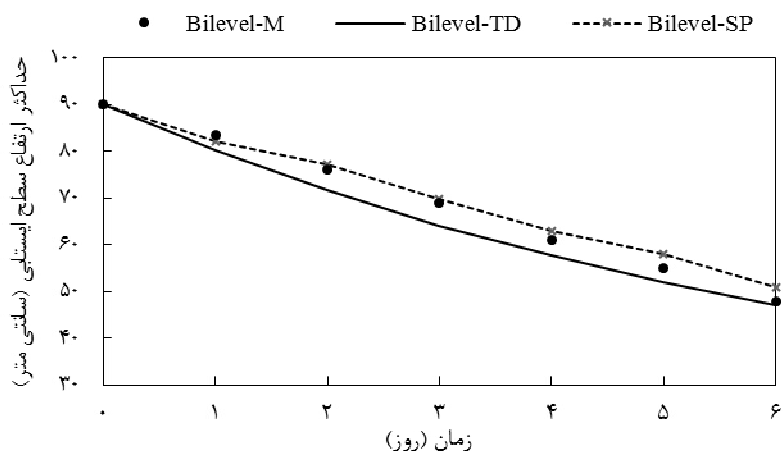
پیش‌بینی‌ها در نرم‌افزار متلب (MATLAB) نوشته شدند.

نتایج و بحث

حداکثر ارتفاع سطح ایستابی مشاهده و پیش‌بینی شده بین دو زهکش با عمق متفاوت شکل 2 ارائه شد. حداکثر ارتفاع سطح ایستابی پیش‌بینی شده توسط مدل دوبعدی کم‌تر از مقادیر مشاهده شده بود. با افت سطح ایستابی، اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با روش دوبعدی افزایش یافت. چون، لایه‌های سنگین بالایی و به ویژه لایه کفه شخم با کاهش سرعت نفوذ عمودی آب، باعث کاهش سرعت افت سطح ایستابی (Liang et al., 2007) در مزرعه شدند. بعد از روز چهارم، اختلاف بین مقادیر حداکثر سطح ایستابی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با حل دو بعدی کاهش یافت. این شرایط می‌تواند به دلیل افت سطح ایستابی به لایه‌های پایین‌تر و کاهش مقاومت خاک در مقابل جریان عمودی باشد که افت سریع‌تر سطح ایستابی در شرایط مزرعه‌ای را به دنبال داشته است. با توجه به نتایج پیش‌بینی، حل دو بعدی نشان داد که تنها در نظر گرفتن بار عمودی در معادلات نمی‌تواند گویای مساله باشد و باید

شرایط لایه‌بندی لحاظ شود.

جریان آب در زهکش‌های زیرزمینی که هم سطح نیستند در مقایسه با حالت هم سطح، حتی در شرایط کم بودن مقدار هدایت هیدرولیکی در جهت عمودی، حالت دو بعدی قوی‌تری دارد (رحیمی - خوب و همکاران، 1385). در تحقیقی (Verma et al., 1998)، در مقایسه سطح ایستابی پیش‌بینی شده به روش یک بعدی و اندازه‌گیری شده نشان داد که اختلاف بین مقادیر، ناشی از چشم‌پوشی کردن از جریان عمودی بوده است. با وارد کردن بار عمودی براساس مقاومت در مقابل جریان به دلیل لایه‌بندی خاص خاک، نتایج روش جدید، پیش‌بینی مناسب‌تری از سطح ایستابی داشتند. از آنجایی که مقاومت در مقابل جریان به صورت تابعی از سطح ایستابی $(\frac{h_p}{h_0})^2$ در مساله وارد شد با افت سطح ایستابی پیش‌بینی‌ها همچنان از دقت کافی برخوردار بودند. این نتایج نشان می‌دهد که لایه‌های مختلف و طبقه‌بندی آن‌ها اثر زیادی روی سطح ایستابی دارند. بنابراین در شرایط خاک‌های لایه‌ای مانند اراضی شالیزاری، نباید از بار عمودی و تعیین دقیق آن صرف نظر کرد.



شکل 2- حداکثر مقدار ارتفاع سطح ایستابی بین دو زهکش عمیق و کم عمق

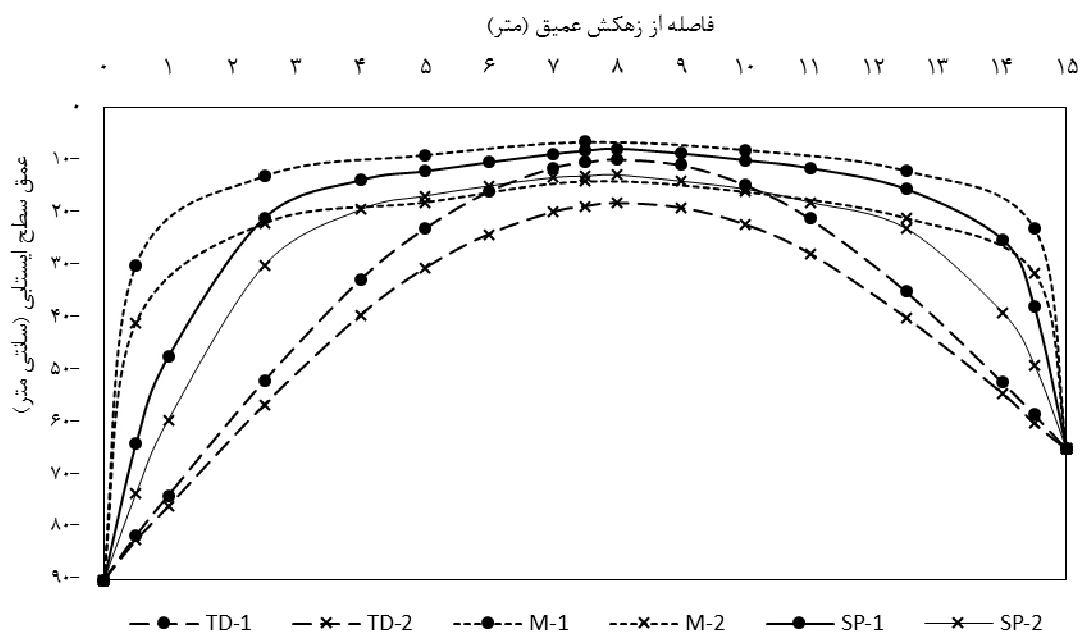
شود. در تحقیقی (Grismer and Tod., 1991)، شکل سطح ایستابی بین زهکش‌های زیرزمینی در خاک‌های رسی به دلیل غیرهم‌روند بودن خاک، نسبتاً مسطح مشاهده شد. در تحقیق حاضر، افت سطح ایستابی در اوایل دوره زهکشی، در نزدیکی هر دو زهکش به مقدار یکسان بوده است. با گذر زمان به دلیل افت سطح ایستابی به لایه‌های پایین‌تر، افت بیش‌تری در نزدیکی زهکش عمیق نسبت به کم عمق مشاهده شد.

در زهکش‌های نصب شده در اعماق مختلف، طول مسیر جریان‌های عمودی نسبتاً بیش‌تر بوده و بار عمودی از نقش حایز اهمیتی

تغییرات پروفیل سطح ایستابی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده طی دو روز بعد از بارندگی برای سیستم زهکشی دو عمقی در شکل 3 ارائه شد. اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده، با نزدیک شدن به زهکش‌ها افزایش یافت. با توجه به وجود لایه کفه شخم، آب در داخل خاک به صورت افقی در بالای این لایه جریان یافته و به سمت زهکش‌ها می‌رود. به طور کلی در خاک‌های دارای لایه‌بندی متعدد، بخش عمده جریان آب در خاک به صورت افقی و موازی با لایه‌بندی خاک صورت می‌گیرد (Ahmad et al., 1991). این شرایط باعث شده است تا سطح ایستابی بین دو زهکش، تقریباً افقی مشاهده

نفوذپذیری کم‌تر قرار می‌گیرد که با نتایج تحقیق حاضر مطابقت دارد. همچنین در زمان‌های اولیه، سطح ایستابی بین زهکش‌های دو عمقی در اراضی شالیزاری شکلی تقریباً شبیه به دو زهکش هم‌عمق داشت که در روش جدید، با دقت قابل قبولی پیش‌بینی شد. اندک اختلاف مشاهده شده بین مقادیر پیش‌بینی شده و مزرعه‌ای می‌تواند متأثر از دلایلی چون فرض سطح ایستابی اولیه افقی و ایزوتروپ بودن لایه‌ها، احتمال مقداری خطا در اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی عمودی و مشخص نبودن دقیق لایه‌بندی‌ها باشد.

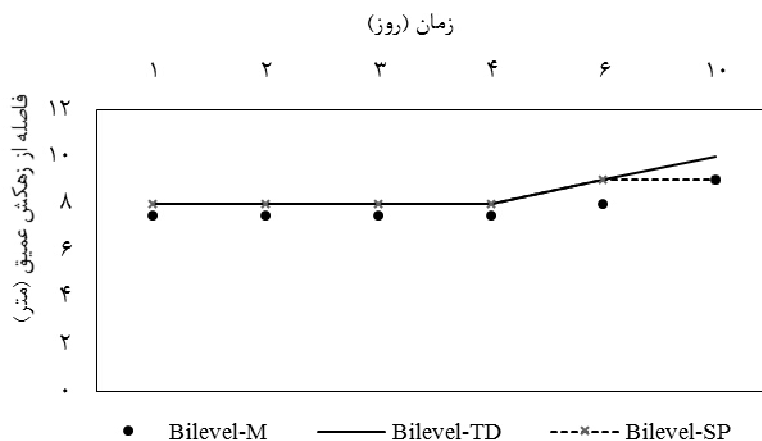
برخوردار است. به‌طور معمول جریان آب از لایه‌های بالای زهکش به صورت عمودی نشت و نفوذ می‌کند (Cooke et al., 2001). اما در خاک‌های با ساختمان نامناسب یا بافت سنگین، مقاومتی در مقابل این جریان وجود دارد که باعث افت کم‌تر سطح ایستابی می‌شود. در روش اصلاح شده، با لحاظ کردن بار عمودی جریان، پیش‌بینی سطح ایستابی بهبود یافت. به‌طور قابل مشاهده، روش جدید همبستگی مناسب‌تری با داده‌های مزرعه‌ای نسبت به روش حل دو بعدی داشت. در تحقیقی (Singh and O'Callaghan., 1978)، نتایج نشان داد که جریان به سمت زهکش‌ها بیش‌تر تحت تاثیر لایه‌های با



شکل 3- نیم‌رخ سطح ایستابی بین دو زهکش عمیق و کم‌عمق در روز اول و دوم بعد از بارندگی (TD: حل دو بعدی، M: اندازه‌گیری مزرعه‌ای، SP: روش اصلاح شده)

ایستابی، این محل به سمت زهکش کم‌عمق نزدیک شد که با نتایج (Verma et al., 1998) مطابقت دارد. ولی در داده‌های مزرعه‌ای متمایل شدن محل حداکثر سطح ایستابی به سمت زهکش کم‌عمق کندتر انجام شده و در واقع تعداد روز بیش‌تری، ثابت باقی ماند. به دلیل افقی بودن جریان و مقاومت در مقابل جریان عمودی در لایه‌های بالایی، افت سطح ایستابی در نزدیکی هر دو زهکش تقریباً با سرعت یکسانی انجام شده تا زمانی که سطح ایستابی به لایه‌های پایین‌تر افت کرد. در روش جدید، با افزودن مقاومت در مقابل جریان، محل حداکثر ارتفاع سطح ایستابی با دقت بیش‌تری پیش‌بینی شد.

شکل 4 فاصله حداکثر ارتفاع سطح ایستابی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده را از زهکش عمیق نشان می‌دهد. به‌طور معمول، حداکثر ارتفاع سطح ایستابی در زهکش‌های زیرزمینی متداول در وسط بین دو زهکش قرار می‌گیرد ولی در سیستم زهکشی دو عمقی، این محل به زهکش کم‌عمق نزدیک‌تر است و موقعیت آن نیز ثابت نیست. حداکثر ارتفاع سطح ایستابی با خروج آب از زهکش‌ها به زهکش کم‌عمق نزدیک‌تر می‌شود و زمانی که این سطح به زهکش کم‌عمق برسد آب فقط از زهکش‌های عمیق خارج می‌شود (Kacimov., 2000). محل حداکثر عمق سطح ایستابی پیش‌بینی شده با مدل دو بعدی تقریباً تا روز چهارم ثابت بود. اما بعد از آن با افت بیش‌تر سطح



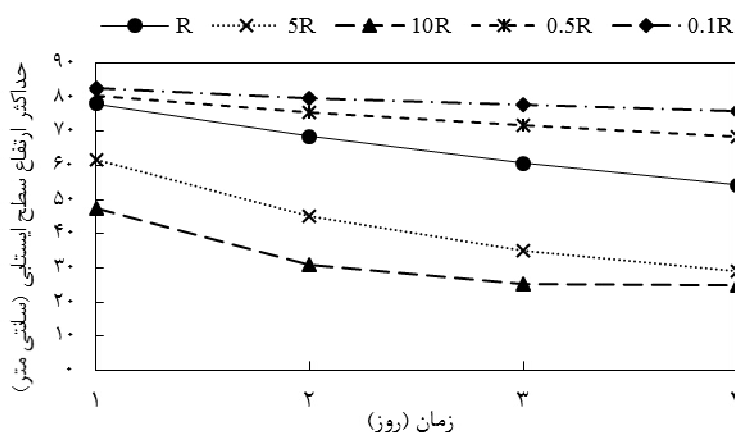
شکل 4- فاصله محل حداکثر ارتفاع سطح ایستابی از زهکش عمیق در زمان‌های مختلف

داده‌ها وجود دارد. همچنین نیم‌رخ سطح ایستابی نیز به طور میانگین با دقت 21 درصد اختلاف پیش‌بینی شد.

جدول 4- نتایج پارامترهای مقایسه و اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده

روش اصلاح شده	روش دو بعدی	روش میانگین
پارامتر مقایسه	میانگین	میانگین
RMSE	19/3 ± 6/3	10/8 ± 2/7
I _a	0/75 ± 0/13	0/95 ± 0/01
اختلاف (درصد)	61 ± 46	21 ± 13

نتایج مقایسه آماری بین مقادیر نیم‌رخ سطح ایستابی پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده و همچنین درصد اختلاف بین آن‌ها در جدول 4 نشان داده شد. کم‌ترین درصد اختلاف در مرزها و ارتفاع سطح ایستابی بیشینه بوده است. در روش دو بعدی، مقدار جذر میانگین مربعات خطا، 19/3 محاسبه شدند که اختلاف قابل ملاحظه‌ای را بین منحنی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهند. همچنین، اختلاف 61 درصدی بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده، گویای عدم دقت کافی در شبیه‌سازی بوده است. اما مقدار خطای جذر میانگین مربعات و شاخص توافق در روش جدید، به‌طور قابل ملاحظه‌ای به ترتیب کم‌تر و بیش‌تر از روش دو بعدی بوده‌اند. شاخص توافق 0/95 نشان می‌دهد که پیش‌بینی سطح ایستابی با روش جدید با دقت قابل قبولی انجام شده و همبستگی مناسبی بین



شکل 5- آنالیز حساسیت پیش‌بینی سطح ایستابی نسبت به عکس مقاومت

حداکثر ارتفاع سطح ایستابی در مقاومت‌های بیش‌تر در لایه‌های بالایی (0.1R) به دلیل کاهش سرعت نفوذ آب، افت کم‌تری داشتند. اما با کاهش مقاومت و افزایش قابلیت انتقال عمودی آب در خاک،

برای ارزیابی تغییرات سطح ایستابی در پاسخ به تغییرات در مقاومت خاک، آنالیز حساسیت مدل نسبت به مقادیر عکس مقاومت در شکل 5 نشان داده شد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر

رحیمی خوب، ع، سامانی، ج.م. و بهبهانی، س.م. 1385. مدل ریاضی جریان ناپایدار دو بعدی آب در زهکش‌های نصب شده در دو عمق مختلف. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز. 8 ص.

Ahmad, S., Kashyap, D., Mathur, B.S. 1991. Numerical modeling of two-dimensional transient flow to ditches. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 117.6: 839-851.

Ahmadi, M.Z. 1999. Use of piezometers to find the depth to impermeable layer in the design of drainage systems. *Hydrological Sciences Journal*. 44.1: 25-31.

Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Elsevier, New York, 764 pp.

Bear, J. 1979. *Hydraulics of ground water*. McGraw-Hill, New York, N.Y. 567 pp.

Bouwer, H., Van Schilfgaarde, J. 1963. Simplified method of predicting fall of water table in drained lands. *Trans. ASAE*. 6.4: 288-291 and 296.

Chu, S.T., De Boer, D.W. 1976. Field and laboratory evaluation of bi-level drainage theory. *Trans. ASAE*. 19.3: 478-481.

Cooke, R.A., Badiger, S., Garcia, A.M. 2001. Drainage equations for random and irregular tile drainage systems. *Agricultural Water Management*. 48: 207-224.

Dagan, G. 1965. Steady drainage of two layered soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division*. ASCE. 91: 51-64.

Darzi-Naftchali, A., Mirlatif, S.M., Shahnazari, A., Ejlali, F., 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. *European Journal of Agronomy*. 56: 1-8.

De Boer, D.W., Chu, S.T. 1975. Bi-level subsurface drainage theory. *Trans. ASAE*. 18.4: 664-667.

Dieleman, P.J. 1974. Deriving soil hydrological constants from field drainage tests. In: *Drainage Principle and Application*, vol. III, Survey and Investigations, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Wageningen, the Netherlands: 329-350.

FAO. 2014. *FAO Statistical Year Book*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Bangkok, 195.

Garg, K.K., Das, B.S., Safeeq, M., Bhadoria, P.B.S. 2009. Measurement and modeling of soil water regime in a lowland paddy field showing preferential transport.

سرعت افت سطح ایستابی افزایش یافته و همچنین حداکثر سطح ایستابی پیش‌بینی شده، مقادیر کم‌تری داشته‌اند. این حاکی از آن است که با افزایش هدایت هیدرولیکی لایه‌های بالایی و یا کاهش ضخامت لایه‌ها، میزان و سرعت افت سطح ایستابی افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

حل تحلیلی معادله بیر در حالت‌های دو بعدی و روش اصلاح شده برای پیش‌بینی سطح ایستابی بین دو زهکش زیرزمینی دو عمقی در اراضی شالیزاری ارایه شد. در حالت دو بعدی با در نظر گرفتن پارامتر عمودی جریان و میانگین وزنی هدایت هیدرولیکی در جهات مختلف به پیش‌بینی سطح ایستابی پرداخته شد. در حالی که در روش اصلاح شده، مقدار بار عمودی به دلیل مقاومت در مقابل جریان به صورت جداگانه به معادله اضافه شده و معادله در حالت غیرهمگن حل شد. نتایج نشان داد که حداکثر ارتفاع سطح ایستابی پیش‌بینی شده با روش اصلاح شده از دقت قابل قبول و بیش‌تری نسبت به روش دو بعدی برخوردار بود. این پیش‌بینی‌ها نشان داد که جریان عمودی باید با توجه به لایه‌بندی خاک بررسی شود و اعمال آن در معادلات برای محاسبه فاصله زهکش‌ها ضروری می‌باشد. همچنین در پیش‌بینی نبرخ سطح ایستابی، به طور کلی روش اصلاح شده پیش‌بینی مناسبی از سطح ایستابی داشت هرچند در کناره‌ها، کمی اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده وجود دارد. با توجه به نتایج روش اصلاح شده و پیش‌بینی سطح ایستابی با دقت قابل قبول در این روش، توصیه می‌شود که در طراحی زهکشی زیرزمینی اراضی شالیزاری، به لایه‌بندی خاک و لایه کفه شخم توجه شود و با در نظر گرفتن جریان عمودی و مقاومت در مقابل آن، تخمین دقیق‌تری از فاصله زهکش‌ها به عمل آید.

منابع

بهبهانی، س.م.، رحیمی خوب، ع. 1381. شبیه‌سازی جریان ناپایدار دو بعدی آب به‌طرف رهکش‌ها. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی*. 9. 1: 167-161.

حمزه، س.، ناصری، ع. و کشکولی، ج.ع. 1392. تغییرات پروفیل سطح ایستابی و دبی خروجی از زهکش‌های پلکانی در یک خاک مطبق. *نشریه آب و خاک (علوم صنایع کشاورزی)*. 27. 1: 13-1.

درزی، ع.، میرلطیفی، س.م.، شاهنظری، ع.، اجاللی، ف. و مهدیان، م.ج. 1391. تاثیر زهکشی سطحی و زیرزمینی بر عملکرد برنج و اجزای آن در اراضی شالیزاری. *مجله پژوهش آب در کشاورزی*. 26. 1: 70-61.

- fate of nitrogen from urea applied to a near-trench paddy field. *Environmental Pollution J.* 150: 313-320.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models-Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology.* 10: 282-290.
- Ritzema, H.P. 1994. *Drainage Principles and Applications.* ILRI Publication 16, Second Edition (Completely Revised). The Netherlands. Chapter 8. Pp 263-304.
- Sabti, N.A. 1989. Linear and nonlinear solution of the Boussinesq equation for the bi-level drainage problem. *Agricultural Water Management.* 16, 269-278.
- Singh, B., O'Callaghan, J.R. 1978. Non-steady Drainage in a Layered Soil. *Journal of agricultural Engineering Research.* 23, 417-427.
- Singh, P.K., Singh, O.P., Jaiswal, C.S., Chauhan, H.S. 1999. Subsurface drainage of a three layered soil with slowly permeable top layer. *Agricultural Water Management.* 42, 97-109.
- Toksoz, S., Kirkham, D. 1971. Steady drainage of layered soils. Part I. Theory. *Journal of Irrigation and Drainage. Division. ASCE.* 97.1: 1-18.
- Verma, A.K., Gupta, S.K., Singh, K.K., Chauhan, H.S. 1998. An analytical solution for design of bi-level drainage systems. *Agricultural Water Management.* 37: 75-92.
- Willmott, C.J., Robeson, S.M., Matsuura, K. 2012. A refined index of model performance. *International Journal of Climatology.* 32: 2088-2094.
- Agricultural Water Management.* 96: 1705-1714.
- Grismer, M.E., Tod, I.C. 1991. Drainage of clay overlaying artesian aquifer. I: Hydrologic assessment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering Division, American Society of Civil Engineers.* 117.2: 255-270.
- Hussein, M.H. 2015. Drainage Design Equation for Egyptian Vertisols. *International Journal of Current Engineering and Technology.* 5.4: 2550-2556.
- Jung, K.Y., Yun, E.S., Park, K.D., Lee, Y.H., Hwang, J.B., Park, C.Y., Ramos, E.P. 2010. Effect of subsurface drainage for multiple land use in sloping paddy fields. In: 19th Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia.
- Kacimov, A.R. 2000. Comment on the paper "An analytical solution for design of bi-level drainage systems" by A.K. Verma, S.K. Gupta, K.K. Singh, H.S. Chauhan. *Agricultural Water Management.* 46:193-200.
- Kirkham, D., Van der Ploeg, R.R., Horton, R. 1997. Potential theory for dual depth subsurface drainage of ponded land. *Water resources research.* 33.7: 1643-1654.
- Kumar, R., Bhakar, S.R., Singh, P.K. 2013. Evaluation of hydraulics characteristics and management strategies of subsurface drainage system in Indira Gandhi Canal Command. *Agric Eng Int: CIGR Journal.* 15.2: 1-9.
- Liang, X.Q., Chen, Y.X., Li, H., Tian, G.M., Ni, W.Z., He, M.M., Zhang, Z.J. 2007. Modeling transport and

Prediction of water table dynamics between bi-level subsurface drains in paddy fields

M. Jafari Talukolae¹, A. Shahnazari^{2*}, M. Z. Ahmadi³, D. Kalantari⁴

Received: Feb.21, 2016

Accepted: Nov.09, 2016

Abstract

Implementation of subsurface drainage in Northern Iran paddy fields is crucial to achieve the feasibility of round-cropping and improve sustainable use of limited soil and water resources. One of the subsurface drainage systems is bi-level system that can be installed because of lower costs than conventional and better control in drains discharge. Installation of this system needs suitable knowledge of designing of subsurface drainage systems due to layered soil of paddy fields. In this study, an analytical solution of two dimensional transient saturated flow of Bear equation to subsurface drainage in a paddy field is presented to investigate the bi-level drainage systems operation. Also, due to importance of vertical head in clay and layered soils, a modified procedure was performed to separately involve vertical head. Validity of the solution has been evaluated by comparing with the field data collected at paddy fields of Northern Iran. The two dimensional solution was not able to reasonably predict the water table profile. But the obtained results indicated that considering the vertical resistance in the media improved the simulated data in the bi-level subsurface drainage systems and provided good representation of water table dynamics. The differences between field data and results were only 21% for modified procedure in comparison with 61% for two dimensional solution. Totally, it would be mentioned that in future work for designing bi-level drainage systems in paddy fields, the vertical head loss should be considered.

Keywords: Bear equation; Hardpan layer, Two dimensional solution, Unsteady flow, Vertical head

1- ph.D. Student of Irrigation and Drainage Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

2- Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

3-Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

4-Assistant Professor, Mechanics Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

(*-Corresponding Author Email: aliponh@yahoo.com)