

## شبیه‌سازی پیشروی شوری در بالادست زهکش حائل شوره‌زار دشت قزوین در شرایط برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی مهدیه لطیفی<sup>۱</sup>، هادی رضانی اعتدالی<sup>۲</sup>، مسعود سلطانی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۶)</sup>، قزوین، ایران
۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۶)</sup>، قزوین، ایران
۳. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۶)</sup>، قزوین، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۰/۲۹، تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۳/۲۶)

### چکیده

بخش زیادی از اراضی کشور تحت تأثیر شوری است که کشاورزی پایدار و امنیت غذایی را به خطر می‌اندازد. همچنین، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در دشت‌هایی که آبخوان شور و شیرین در مجاورت هم قرار دارند، باعث ایجاد گرادیان هیدرولیکی از سمت آب شور به آب شیرین و افزایش شوری می‌شود. شوری در شوره‌زار مرکزی قزوین تحت مکانیزم یادشده، در حال پیشروی به سمت اراضی بالادست بوده است. برای حل این مشکل، زهکش حایلی در منطقه احداث شده است تا با ایجاد افت سطح آب زیرزمینی شور، از گسترش شوری جلوگیری کند. هدف این مطالعه، بررسی عملکرد زهکش حایل در کنترل شوری و تأثیر افزایش و کاهش گرادیان هیدرولیکی منطقه، در گسترش شوری است. به این منظور، با استفاده از داده‌های مشاهداتی، مدل HYDRUS-2D واسنجی و صحت‌سنجی شد. سپس، در شش تیمار اثر افزایش و کاهش جریان آب زیرزمینی ورودی از بالادست (۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد) بر عملکرد زهکش در بازه‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ساله شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد در تمام بازه‌های زمانی، هرچه جریان آب زیرزمینی ورودی از بالادست بیشتر باشد، املاح بیشتری آب‌شویی شده و توسط زهکش حائل از منطقه خارج می‌شود. همچنین، بر اساس نتایج شوری اولیه خاک در تراز کف زهکش ۲۰ سال بعد از احداث زهکش حایل در تیمار شاهد ۱۶/۱ds/m کاهش می‌یابد. کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی ورودی از بالادست این مقدار (۱۶/۱ds/m) را به ترتیب ۱۱، ۱۷ و ۲۵ درصد کاهش داده در حالی که افزایش دبی به اندازه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد این مقدار (۱۶/۱ds/m) را ۲۲، ۲۸ و ۴۰ درصد افزایش می‌دهد. بنابراین، برداشت بی‌رویه از آبخوان در بالادست زهکش موجب کاهش دبی ورودی به منطقه می‌شود و از کاهش بیشتر شوری جلوگیری می‌کند.

**کلیدواژگان:** آبخوان شور، آبخوان شیرین، آب زیرزمینی، گرادیان معکوس شوری، گسترش شوری.

## مقدمه

بخش زیادی از اراضی کشور تحت تأثیر شوری و ماندابی قرار دارد. آمار دقیقی از وسعت و پراکنش شوری در کشور وجود ندارد، اما بر اساس گزارش‌های زابلکس در سال ۱۹۸۵، حدود ۱۴/۲ درصد از اراضی کشور و ۳۰ درصد از دشت‌ها تحت تأثیر شوری بوده‌اند. شوری در استان‌های مختلف کشور نامنظم بوده و از ۳۲/۸ درصد در خوزستان تا ۱/۳۶ درصد در آذربایجان شرقی متفاوت است [۱ و ۲].

شوری روزافزون آب و خاک، تهدیدی جدی برای کشاورزی پایدار به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران محسوب می‌شود. همچنین، رشد روزافزون جمعیت و نیاز به تأمین نیاز غذایی این جمعیت موجب مصرف روزافزون منابع آب زیرزمینی کشور شده است. تخلیه بیش از اندازه منابع آب زیرزمینی شیرین در مناطقی که سفره آب شور و شیرین در همسایگی هم قرار دارند، موجب بروز مشکلات زیادی از جمله خشک شدن چاه‌های نیمه‌عمیق، کاهش ضریب ذخیره سفره، کاهش جریان آب زیرزمینی و کاهش میزان خروجی دشت‌ها، افزایش گرادیان آب شور به سمت آب شیرین و افزایش شوری آب زیرزمینی می‌شود. آب شور موجود در آبخوان که نمی‌تواند از دشت خارج شود، بالا می‌آید و باعث افزایش شوری می‌شود [۳]. تا کنون راهکارهای متفاوتی برای حل این معضل پیشنهاد شده است، اما این راهکارها از لحاظ قابلیت اجرا، میزان فایده و هزینه‌های اجرایی، بسیار متنوع و متفاوت بوده‌اند. این راهکارها می‌تواند شامل راهکارهای سازه‌ای مانند به‌کارگیری لایه‌های ژئوممبراین،<sup>۱</sup> GSL، قشر رس و یا احداث زهکش‌های حایل باشد.

## پیشینه تحقیق

شریفان و خزینه‌نژاد (۱۳۹۸) در تحقیقی افت آب زیرزمینی در دشت سرایان را بررسی کردند. بررسی کمی و کیفی آبخوان با روش درون‌یابی IDW به وسیله Arc GIS نشان داده است در یک بازه زمانی ۳۱ ساله، سطح آب زیرزمینی ۲۰ متر افت کرده و در نتیجه این افت، کیفیت آن نیز به شدت کاهش یافته است [۴]. تقی‌زاده و همکاران (۱۳۹۶) نیز با استفاده از GIS اقدام به شناسایی و پهنه‌بندی میزان شوری آب زیرزمینی در دشت نمدان شهرستان اقلید کردند. آنها با پذیرش این موضوع که برداشت بی‌رویه از منابع آب

زیرزمینی و کاهش سطح آب موجب افزایش شوری می‌شود، اقدام به تعیین میزان شوری در چاه‌های با اعماق متفاوت کردند. طبق نتایج پژوهش یادشده میزان شوری در چاه‌های عمیق بیشتر از چاه‌های نیمه‌عمیق است [۵]. امیری و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی افت سطح آب زیرزمینی دشت زرنده- استان مرکزی و ارتباط آن با کیفیت آب را بررسی کردند. با استفاده از Arc GIS آنها نتیجه گرفتند، طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ سطح آب زیرزمینی به شدت دچار افت شده و این افت موجب افزایش هدایت الکتریکی شده و کیفیت آب شرب و کشاورزی را تحت تأثیر قرار داده است [۶]. میرزایی و معرفی (۱۳۸۹) اثر افت سطح آب زیرزمینی در شوری را در دشت کیوردآهنگ بررسی کردند. آنها در یک دوره سه‌ساله (۱۳۸۳-۱۳۸۷)، سطح ایستابی و شوری را در ۱۵ چاه پیژومتری بررسی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد در سه سال بررسی‌شده سطح ایستابی روند نزولی و شوری آب زیرزمینی در دشت روند صعودی داشته است [۷]. چراغی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در دشت سروستان استان فارس تغییرات کمی و کیفی آب زیرزمینی را بررسی کردند. بررسی‌ها در پژوهش یادشده از سال ۱۳۷۰ نشان داده است که سطح ایستابی در این دشت هر ساله حدود ۴۷ سانتی‌متر افت داشته و در برخی نقاط این افت بیشتر نیز بوده است. همچنین، با افزایش افت آب زیرزمینی شوری نیز افزایش خواهد یافت و میزان این افزایش سالیانه حدود ۱۰۰ میکروموس بر سانتی‌متر بوده است [۸]. همچنین، در پژوهش‌های زیادی برای بررسی روند گسترش شوری و شبیه‌سازی آن از نرم‌افزار HYDRUS استفاده شده است. جوادی و رنجبر (۱۳۹۳) در پژوهشی قابلیت‌های مدل HYDRUS در شبیه‌سازی انتقال املاح را بررسی کردند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد این مدل توانایی زیادی در شبیه‌سازی انتقال املاح دارد و از نتایج این مدل می‌توان برای مدیریت آبیاری و آبشویی استفاده کرد. البته، در بعضی موارد عملکرد مدل در شبیه‌سازی پایین بوده که علت آن نیز نیاز به کالیبراسیون برای منطقه‌ای خاص است [۹].

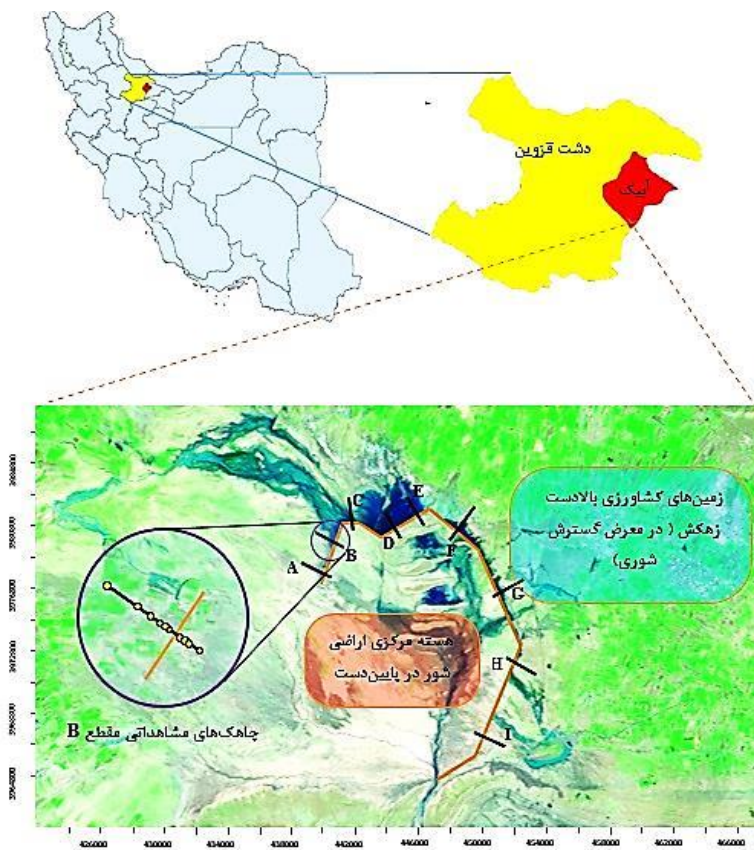
محمدی و همکاران (۱۳۹۲) در مطالعه‌ای برای بررسی حرکت آب و املاح و شبیه‌سازی آن، از نرم‌افزار HYDRUS-ID استفاده کردند. آنها بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه‌شده نشان دادند مدل HYDRUS توانایی زیادی در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح دارد و می‌تواند برای مدیریت آبیاری استفاده شود [۱۰].

**مواد و روش‌ها**

شوره‌زار مرکزی قزوین در جنوب شرقی دشت قرار گرفته و مساحتی به اندازه ۶۴۴۰۰ هکتار را اشغال کرده است (طول شرقی ۳۸۰ تا ۴۲۰ هزار و عرض شمالی ۳۹۲۰ تا ۳۹۸۰ هزار (UTM)). ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا ۱۱۴۰ متر است. دمای میانگین سالانه ۱۲/۲ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۳۲۰ میلی‌متر بوده و بنا بر طبقه‌بندی دومارتن منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد است. همچنین، این شوره‌زار در پایانه زیرحوضه‌های حاجی عرب، خرورد، ابهرود و آجی‌چای قرار گرفته و ۷/۶ درصد از مساحت دشت قزوین را در بر می‌گیرد. بنا به نظر مهندسیین مشاور سراب، راز وسعت هسته مرکزی شوره‌زار طی سال‌های گذشته دو برابر شده و از ۱۰ به ۲۰ هزار هکتار افزایش پیدا کرده است. علت این پدیده، پایین رفتن کلی سطح ایستابی شیرین در دشت و کاهش پتانسیل رانش آب به سمت مرکز است [۳].

در مطالعه حاضر هدف بررسی و پایش عملکرد زهکش حایل در کنترل شوری و جلوگیری از توسعه آن در شوره‌زار قزوین و همچنین، بررسی اثر کاهش یا افزایش دبی ورودی به منطقه در عملکرد زهکش حایل است و به این منظور از نرم‌افزار HYDRUS-2D استفاده شده است.

از نوآوری‌های این مطالعه نسبت به سایر پژوهش‌های انجام‌شده در این منطقه می‌توان به شبیه‌سازی هم‌زمان محیط اشباع و غیراشباع اشاره کرد، در صورتی که در سایر تحقیقات فقط بخش اشباع شبیه‌سازی شده است، علت انتخاب نرم‌افزار HYDRUS-2D نیز توانایی شبیه‌سازی هم‌زمان این دو ناحیه است. به‌علاوه، شبیه‌سازی مقادیر بسیار زیاد شوری با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D نیز از تفاوت‌های این مطالعه با سایر مطالعات انجام‌شده به وسیله نرم‌افزار HYDRUS-2D است. همچنین، قبل از احداث زهکش حایل پیشروی شوری در اراضی بالادست شوره‌زار قزوین موجب تخریب زمین‌های کشاورزی و از بین رفتن روستاها شده است، بنابراین، ضرورت انجام این تحقیق، یافتن راهی است تا عملکرد زهکش حایل در منطقه را شدید کرده و به کنترل و جلوگیری از گسترش شوری کمک کند.

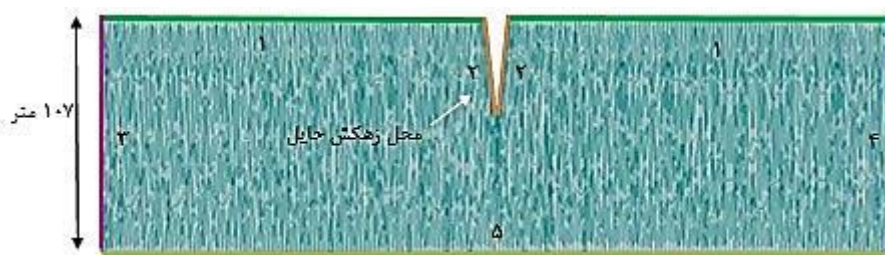


شکل ۱. محل شوره‌زار مرکزی قزوین، زهکش حائل و چاهک‌های مشاهداتی

### نرم‌افزار HYDRUS-2D

HYDRUS، بسته‌ای نرم‌افزاری تحت سیستم عامل ویندوز است. از این نرم‌افزار برای شبیه‌سازی انتقال آب و املاح و حرارت در خاک استفاده می‌شود، به‌علاوه این نرم‌افزار قادر است جذب آب از ریشه و رشد ریشه را نیز شبیه‌سازی کند. دارای سه نسخه یک‌بعدی، دو‌بعدی و سه‌بعدی بوده و در سال ۲۰۰۶ در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا توسط شیمونک و همکارانش توسعه یافته است. دو بخش گرافیکی و محاسباتی دارد و از معادله ریچاردز برای شبیه‌سازی حرکت آب و از معادلات انتقال-انتشار برای شبیه‌سازی انتقال گرما و املاح استفاده می‌کند. همچنین، HYDRUS نوعی مدل اجزای محدود است و می‌تواند خصوصیات خاک را به روش حل معکوس تخمین بزند [۱۱]. به این منظور، روش اجزای محدود خطی گالرکین و برای بهینه‌سازی پارامترها روش لونیبرگ-مارکوارت به کار می‌رود [۱۲]. در این پژوهش نرم‌افزار HYDRUS-2D برای منطقه مطالعه‌شده واسنجی و صحت‌سنجی شده و سپس، با استفاده از مدل واسنجی‌شده تأثیر افزایش و یا کاهش برداشت از آبخوان بالادست زهکش، بر عملکرد زهکش در شش تیمار بررسی شده است.

ده سال پیش به منظور کنترل شوری و جلوگیری از پیشروی آن به سمت بالادست زهکش حایلی در منطقه احداث شده است. زهکش با پایین انداختن سطح آب زیرزمینی شور، پیشروی شوری را کنترل می‌کند. هم‌زمان اراضی بالادست بر اثر بارش و جریان آب زیرزمینی آبشویی می‌شوند و زه‌آب حاصل از آبشویی توسط زهکش از منطقه خارج می‌شود و به این ترتیب، شوری به تدریج اصلاح خواهد شد. زهکش شوره‌زار ۳۰ کیلومتر بوده و برای کنترل و پایش آن ۹۹ چاهک مشاهداتی در مقاطع A تا I عمود بر زهکش حفر شده‌اند و جهت جریان از مقطع A به I است. مقطع B به دلیل قرارگیری در ابتدای مسیر زهکش و تأثیرپذیری کمتر از جریان‌های بالادستی مطالعه و بررسی شده است. ۴ چاهک به فواصل ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۲۵۰ متری در پایین‌دست مقطع B و ۷ چاهک به فواصل ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری در بالادست زهکش قرار گرفته‌اند. عمق تمامی چاهک‌ها به جز چاهک‌های واقع در فاصله ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری از زهکش، ۳ متر بوده و عمق چاهک‌های یادشده ۵ متر است (با توجه به اینکه شعاع تأثیر زهکش ۲۵۰ متر از هر طرف آن است، شبیه‌سازی در همین بازه انجام گرفته است). در شکل ۱ محل دشت قزوین، شوره‌زار، زهکش و مقاطع و چاهک‌های مشاهداتی حفرشده نشان داده شده است.



شکل ۲. هندسه جریان تعریف‌شده در سناریوی افزایش و کاهش تغذیه و تخلیه (\*۱: مرز اتمسفری، ۲: سطح نشت، ۳: جریان ورودی بالادست، ۴: جریان ورودی پایین‌دست، ۵: بدون جریان)

چاهک‌های مشاهداتی نیز در عمق ۳ متری و در فواصل ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۲۵۰ متری پایین‌دست و ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ متری بالادست و به عنوان نقاط مشاهداتی برای نرم‌افزار تعریف شده‌اند. سپس، مرز بالادست منطقه که در شکل ۲ با شماره ۱ مشخص شده، به عنوان مرز اتمسفری<sup>۱</sup> برای مدل تعریف شده است تا ورودی‌های بارش و خروجی‌های تبخیر

### روش انجام کار

هندسه جریان شامل آبخوانی با عمق ۱۰۷ متر است که در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۳]. آب زیرزمینی به طور متوسط در ۱/۵ متری سطح زمین قرار گرفته و زهکش دوزنقه‌ای با عرض کف ۲ متر، شیب جداره ۱ به ۲ و ارتفاع ۳ متر در منطقه تعریف شده و ۲۵۰ متر بالادست آن و ۲۵۰ متر پایین‌دست آن نیز در هندسه جریان ترسیم شده است.

مشاهداتی به عنوان ورودی حل معکوس مدل استفاده شده و پارامترهای هیدرولیکی و انتقال شوری حساس تخمین زده شده‌اند. پارامترهای هیدرولیکی حساس شامل  $\theta_s(-)$ ،  $\alpha$  ( $m^{-1}$ )،  $n(-)$ ،  $K_s$  ( $m\ day^{-1}$ ) و پارامترهای انتقال املاح حساس شامل  $Disp.L(m)$ ،  $Disp.T(m)$  هستند که به ترتیب عبارت‌اند از: رطوبت اشباع خاک، پارامتر مرتبط با عکس مکش در نقطه ورود هوا، پارامتر شکل منحنی مشخصه رطوبتی، هدایت هیدرولیکی اشباع و پخشیدگی طولی، پخشیدگی عرضی. سپس، دقت مدل با استفاده از شاخص‌های آماری از جمله  $ME$ ،  $NRMSE$ ،  $R^2$  و  $CRM$  ارزیابی شد. در گام بعدی از ۳۰ درصد داده‌های باقی‌مانده برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد.

#### سناریوی تأثیر افزایش و کاهش دبی ورودی از بالادست (کاهش و افزایش گرادیان هیدرولیکی آب شور) بر عملکرد زهکش

در این سناریو هدف بررسی این موضوع است که اگر تخلیه یا تغذیه آب زیرزمینی شیرین از بالاست افزایش و یا کاهش یابد، تأثیر زهکش در منطقه به چه صورت تغییر خواهد کرد. به منظور بررسی این موضوع در مدل واسنجی شده و هندسه جریان مطابق با شکل ۲ نرم‌افزار برای ۶ تیمار اجرا شده است. در هر یک از تیمارها جریان ورودی از پایین دست ثابت باقی مانده، ولی جریان ورودی از بالادست متغیر بوده است. برای بررسی اثر افزایش تخلیه آب شیرین (افزایش گرادیان آب شور) بر عملکرد زهکش در سه سناریوی جریان ورودی از بالادست زهکش به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش یافته است. همچنین، برای بررسی اثر کاهش تخلیه (کاهش گرادیان آب شور) بر عملکرد زهکش نیز در سه سناریوی جریان ورودی از بالادست زهکش به ترتیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد افزایش یافته است. تمامی سناریوهای یادشده برای بازه‌های زمانی پنج، ده، پانزده و بیست ساله انجام شده‌اند تا تأثیر آنها بر عملکرد زهکش در کوتاه‌مدت و بلندمدت مشخص شود. در این سناریوها شرایط اقلیمی با یکدیگر یکسان بوده و در تمام آنها شوری اولیه معادل شوری میانگین چاهک‌های مشاهداتی (۲۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) بوده است.

#### یافته‌ها

##### واسنجی و صحت‌سنجی

نتایج شاخص‌های آماری محاسبه شده پس از واسنجی و

بر این مرز اعمال شود. دیواره‌های کانال زهکش و کف آن مشخص شده با شماره ۲ به عنوان سطح نشت<sup>۱</sup> در نرم‌افزار تعریف شده است تا این سطح همانند زهکش حایل عمل کرده و جریان ورودی از پایین دست و بالادست را حایل کند. مرزهای بالادست و پایین دست هندسه جریان که در شکل ۲ با شماره‌های ۳ و ۴ مشخص شده‌اند، هر دو به عنوان جریان ورودی متغیر<sup>۲</sup> برای نرم‌افزار تعریف شده‌اند و با توجه به هدایت هیدرولیکی مشخص و هد فشاری در اولین و آخرین چاهک در هر دو سمت زهکش (معلوم بودن شرایط مرزی بالادست و پایین دست)، با استفاده از معادله بوسینسک، رابطه ۱ برای شرایط آبخوان آزاد، همگن و ایزوتروپ و با وجود ترم تغذیه و تخلیه (تبخیر)، تعیین شده است. این کار به وسیله حل عمومی معادله ۱ و انتگرال‌گیری نسبت به  $x$  انجام شده است (پیش از کالیبراسیون مدل، هدایت هیدرولیکی با توجه به بافت خاک و پیش فرض نرم‌افزار بوده است. در نتیجه، جریان‌های ورودی پس از حل معکوس و با توجه به میزان هدایت هیدرولیکی تخمین زده شده برای منطقه اصلاح شده‌اند.) بافت خاک منطقه تا عمق ۲/۵ متری به روش مثلث بافت خاک و از ۲/۵ تا ۵ متری نیز به روش لمسی تعیین شده و با توجه به اینکه در عمق یادشده بافت خاک تقریباً ثابت بوده است، بافت خاک برای کل ناحیه تحت شبیه‌سازی به صورت همگن رسی در نظر گرفته شده است.

$$-\nabla^2 h^2 = \frac{2s}{k} + \frac{2N_r^*}{k} \quad (1)$$

$$h^2 = -\frac{N_r^*}{k} x^2 + c_1 x + c_2 \quad (2)$$

$$q = \frac{-N_r^*}{h} x + \frac{c_1 k}{2h} \quad (3)$$

در معادله ۱،  $h$  هد پیزومتري در چاهک‌ها ( $L$ )،  $s$  ضریب ذخیره آبخوان (-)،  $N_r^*$  جمع جبری ورودی و خروجی آبخوان ( $LT^{-1}$ )،  $k$  هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $LT^{-1}$ )،  $x$  فاصله نقطه مورد نظر از زهکش ( $L$ )،  $c_1$  و  $c_2$  ثوابت انتگرال‌گیری و  $q$  فلاکس جریان ورودی ( $L^3L^{-2}T^{-1}$ ) است [۱۴]. مرز پایین دست هندسه جریان نیز به عنوان لایه نفوذناپذیر و بدون جریان ورودی و خروجی<sup>۳</sup> برای نرم‌افزار تعریف شده است.

سپس، نرم‌افزار برای منطقه مطالعه شده کالیبره شده است. برای این منظور، از ۷۰ درصد از داده‌های اندازه‌گیری شده تراز سطح ایستابی و شوری در چاهک‌های

1. Seepage face
2. Variable flux
3. No Flux

واسنجی و صحت‌سنجی مدل شاخص‌هایی مانند  $R^2$  و NRMSE برای مدل محاسبه شدند. نتایج این شاخص‌ها به‌ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل نسبت به انتقال رطوبت ۰/۸۸، ۳/۷۱٪ و ۰/۷۷ و ۴/۳۷٪ بوده است. طبق این نتایج و با توجه به مقادیر NRMSE دقت مدل در شبیه‌سازی انتقال رطوبت بیشتر از دقت آن در شبیه‌سازی انتقال املاح است [۱۵]. نتایج مطالعه حاضر نیز منطبق با نتایج همین مقاله است و HYDRUS-2D انتقال رطوبت را با دقت بیشتری نسبت به انتقال املاح شبیه‌سازی می‌کند.

صحت‌سنجی مدل در جدول ۱ آورده شده است. مدل یک‌بار برای پارامترهای هیدرولیکی و بار دیگر برای پارامترهای انتقال املاح واسنجی و صحت‌سنجی شده است. برای ارزیابی نتایج واسنجی و صحت‌سنجی از شاخص‌های آماری از جمله ME، NRMSE،  $R^2$  و CRM استفاده شد. رنجبر و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D به صورت هم‌زمان به شبیه‌سازی انتقال رطوبت و املاح (آمونیم و نترات)، در آبیاری جویچه‌ای پرداختند. آنها مدل را از لحاظ انتقال رطوبت و انتقال املاح به صورت جداگانه واسنجی و صحت‌سنجی کردند. سپس، برای اطمینان از

جدول ۱. شاخص‌های آماری محاسبه‌شده بعد از کالیبراسیون و واسنجی مدل

شاخص‌ها	ME	NRMSE (%)	$R^2$	CRM
پارامترهای هیدرولیکی	۰/۱۱۴	۰/۱	۰/۷	-۰/۰۰۰۵
واسنجی	۰/۱۶۶	۰/۱	۰/۷۰۵	-۰/۰۰۰۴
صحت‌سنجی				
پارامترهای انتقال املاح	۰/۲۹	۶/۷	۰/۸۷۵	-۰/۰۰۱
واسنجی	۰/۱۹	۶/۱	۰/۹۱	-۰/۰۰۹
صحت‌سنجی				

پس از ده سال از احداث زهکش و در وضع کنونی (تیمار شاهد) در کف زهکش، شوری از ۲۱۰ دسی‌زیمنس بر متر به ۲۰۳/۴ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یافته است. اگر میزان دبی ورودی از بالادست به ۹۰ درصد دبی اولیه کاهش یابد، شوری به ۲۰۶ دسی‌زیمنس بر متر کاهش می‌یابد که به معنای افزایش ۳۹ درصدی شوری نسبت به شوری در تیمار شاهد است. اگر دبی ورودی تا ۸۰ درصد کاهش یابد شوری به ۲۰۸ دسی‌زیمنس بر متر می‌رسد و نسبت به شوری در تیمار شاهد، ۷۰ درصد افزایش می‌یابد. کاهش دبی ورودی به ۷۰ درصد دبی اولیه، شوری را نسبت به ۲۰۳/۴ دسی‌زیمنس بر متر تا ۸۵ درصد افزایش می‌دهد و به ۲۰۹ دسی‌زیمنس بر متر می‌رساند. در حالی که افزایش دبی ورودی به اندازه ۱۰ درصد شوری را تا ۱۹۹/۲ دسی‌زیمنس بر متر کاهش می‌دهد و موجب کاهش ۶۴ درصدی شوری نسبت به شوری در حالت تیمار شاهد می‌شود. افزایش دبی به اندازه ۲۰ درصد نیز موجب کاهش ۷۱ درصدی شوری نسبت به کاهش شوری در تیمار شاهد می‌شود و آن را به ۱۹۸/۷ دسی‌زیمنس بر متر می‌رساند همچنین، ۳۰ درصد افزایش در دبی ورودی از بالادست نیز دوباره موجب کاهش ۹۷ درصدی شوری شده و آن را به ۱۹۷ دسی‌زیمنس بر متر رسانده است.

#### سناریوی افزایش و کاهش دبی ورودی (کاهش و افزایش گرادیان آب شور)

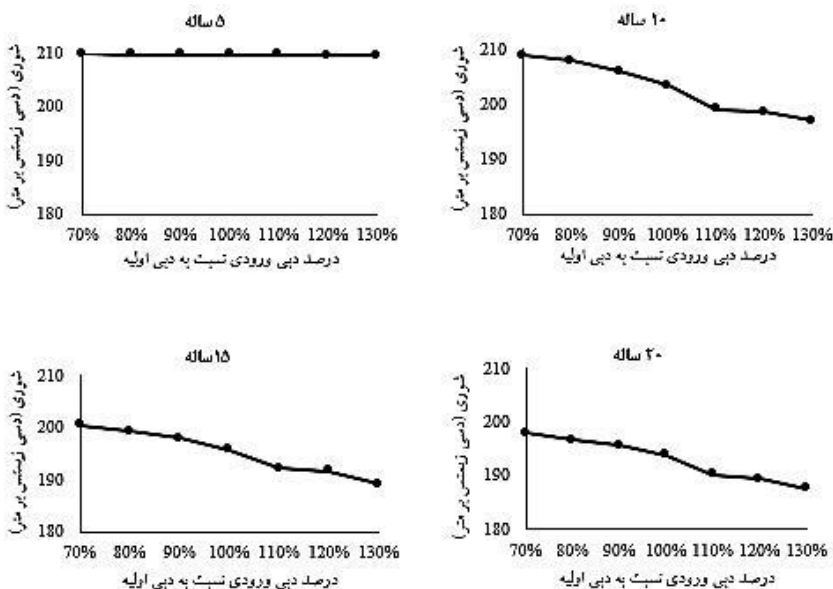
در این سناریو میزان دبی ورودی از مرز بالادست ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد افزایش و کاهش یافته و اثر آن روی عملکرد زهکش در کاهش شوری در بازه‌های زمانی پنج، ده، پانزده و بیست ساله بررسی شده است. کاهش دبی ورودی از بالادست به معنای افزایش تخلیه از طریق برداشت از چاه‌ها و یا کاهش تغذیه و افزایش دبی ورودی از بالادست به معنای کاهش برداشت و یا افزایش تغذیه است.

با توجه به شکل ۳ اگرچه پس از پنج سال از احداث زهکش، زهکش تأثیر چندانی در کاهش شوری نداشته است، ولی همچنان تغییرات دبی ورودی از بالادست تأثیر اندکی بر میزان کاهش شوری داشته است. در وضع کنونی (تیمار شاهد) شوری در کف زهکش فقط ۰/۱ درصد کاهش یافته و به ۲۰۹/۷۹ دسی‌زیمنس بر متر رسیده است. کاهش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی دبی ورودی از بالادست، به‌ترتیب موجب کاهش این درصد تا ۰/۰۹، ۰/۰۷ و ۰/۰۵ درصد شده است، در حالی که افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی دبی ورودی از بالادست باعث افزایش درصد کاهش شوری به ۰/۱۱، ۰/۱۴ و ۰/۱۵ درصد شده است.

شوری اولیه در کف زهکش به ۱۹۳/۹ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یافته است. اگر دبی ورودی از بالادست ۱۰ درصد کاهش یابد، شوری ۱۱ درصد کمتر از وضع کنونی کاهش یافته و در کف زهکش به ۱۹۵/۶ دسی‌زیمنس بر متر رسیده است. در حالی که افزایش ۱۰ درصدی دبی ورودی از بالادست موجب افزایش ۲۲ درصدی کاهش شوری نسبت به وضع کنونی شده و آن را به ۱۹۰/۳ دسی‌زیمنس بر متر می‌رساند. همچنین، اگر دبی ورودی از بالادست به اندازه ۲۰ درصد کاهش یابد شوری ۱۷ درصد کمتر از تیمار شاهد کاهش یافته و افزایش ۲۰ درصدی آن باعث افزایش ۲۸ درصدی کاهش شوری نسبت به تیمار شاهد شده است. در هر یک از حالت‌های یادشده شوری به ترتیب به ۱۹۶/۷ و ۱۸۹/۴ دسی‌زیمنس بر متر رسیده است. بررسی کاهش و افزایش دبی ورودی به اندازه ۳۰ درصد نیز نشان داده است که با کاهش ۳۰ درصدی دبی ورودی از بالادست شوری ۲۵ درصد کمتر کاهش یافته و به ۱۹۸ دسی‌زیمنس بر متر می‌رسد، در حالی که افزایش ۳۰ درصدی آن موجب افزایش ۴۰ درصدی کاهش شوری نسبت به حالت اولیه شده و آن را به ۱۸۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر رسانده است.

پانزده سال بعد از احداث زهکش شوری در کف زهکش و در وضع کنونی (تیمار شاهد) به ۱۹۵/۸ دسی‌زیمنس بر متر کاهش یابد. در همین نقطه با کاهش ۱۰ درصدی دبی ورودی از بالادست و با ثابت ماندن سایر عوامل شوری ۱۵ درصد کمتر از حالت قبل کاهش یافته و معادل با ۱۹۸ دسی‌زیمنس بر متر خواهد شد. اگر دبی ورودی از بالادست ۲۰ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یابد شوری ۲۵ درصد کمتر کاهش یافته و به ۱۹۹/۳ دسی‌زیمنس بر متر می‌رسد. همچنین، کاهش ۳۰ درصدی دبی ورودی نیز درصد کاهش شوری را تا ۳۳ درصد نسبت به حالت اولیه کاهش داده و شوری را به ۲۰۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر رسانده است، در حالی که ۱۰ درصد افزایش در میزان دبی ورودی از بالادست شوری را ۲۵ درصد نسبت به حالت اولیه بیشتر کاهش داده و به ۱۹۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر رسانده است، افزایش ۲۰ و ۳۰ درصدی دبی ورودی از بالادست نیز به ترتیب شوری را ۳۰ و ۴۶ درصد بیشتر کاهش داده و آنها را به ترتیب به ۱۹۱/۶ و ۱۸۹/۲ دسی‌زیمنس بر متر رسانده است.

در سناریوی بیست‌ساله نیز مقادیر شوری در دبی‌های ورودی مختلف، متفاوت است. در وضع کنونی (تیمار شاهد)



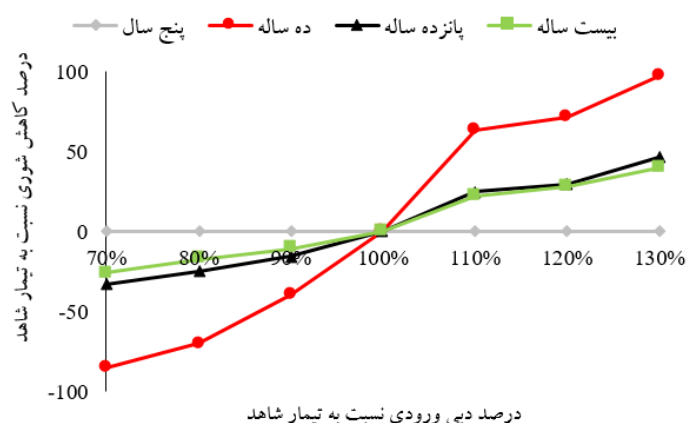
شکل ۳. نمودارهای روند تغییرات شوری در اثر تغییر دبی ورودی از بالادست

زهکش، تأثیر آن در کاهش شوری اولیه (۲۱۰ دسی‌زیمنس بر متر) تقریباً ناچیز بوده است، ولی به طور کلی با افزایش دبی ورودی از بالادست، درصد کاهش شوری در تمامی سناریوها افزایش می‌یابد، در حالی که کاهش دبی ورودی از

همچنین، شکل ۴ درصد کاهش شوری در دبی‌های ورودی متفاوت را نسبت به تیمار شاهد (دبی ۱۰۰ درصد) در بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل یادشده مشخص است، پس از گذشت پنج سال از احداث

درصد دبی تیمار شاهد، درصد کاهش شوری نسبت به تیمار شاهد در سناریوهای ده، پانزده و بیست ساله به ترتیب ۸۵، ۳۳ و ۲۵ درصد بوده است. همچنین، درصد کاهش شوری در دبی ورودی معادل با ۱۳۰ درصد دبی تیمار شاهد و در سناریوهای ده، پانزده و بیست ساله نیز به ترتیب برابر با ۹۷، ۴۶ و ۴۰ بوده است. با توجه به شکل ۴، رابطه یادشده در تمامی درصدهای دبی‌های ورودی برقرار است.

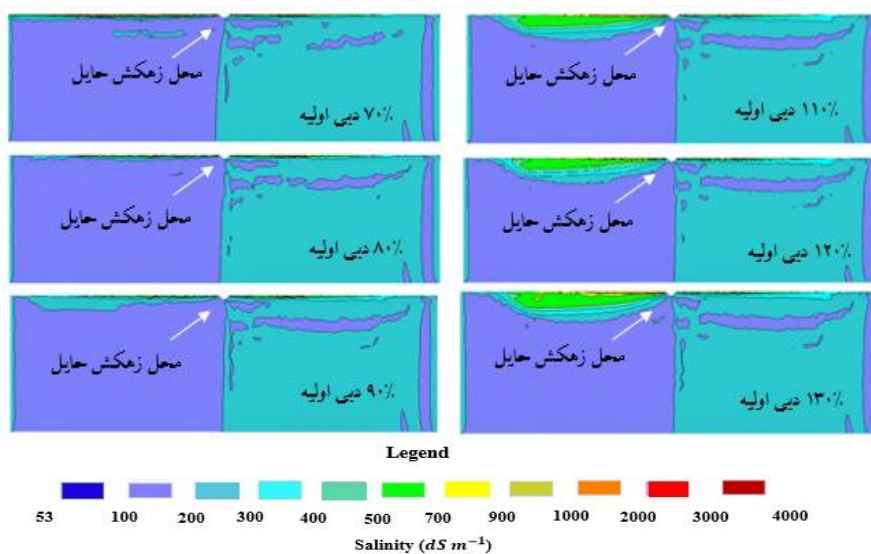
بالادست موجب نزول درصد کاهش شوری نسبت به تیمار شاهد (دبی ۱۰۰ درصد) می‌شود که در این شکل با اعداد منفی نشان داده شده است. به علاوه، اگرچه طبق شکل ۴ میزان شوری در تمامی دبی‌های ورودی در سناریوی بیست‌ساله کمتر از سایر سناریوهاست، ولی آهنگ تغییرات شوری در ده سال ابتدایی احداث زهکش بیشتر بوده و به مرور کم می‌شود، به طوری که در دبی ورودی معادل با ۷۰



شکل ۴. مقایسه کاهش شوری در سناریوهای زمانی متفاوت

شست‌وشوی بیشتر نمک‌ها و حرکت آنها به سمت زهکش است، هرچه دبی ورودی بیشتر افزایش یابد شست‌وشوی شوری بیشتر انجام شده در نتیجه، میزان نمک‌هایی که به سمت زهکش حرکت می‌کنند نیز بیشتر می‌شود.

همچنین، نقشه تغییرات شوری در منطقه با تغییر دبی ورودی از بالادست در بازه زمانی بیست‌ساله در شکل ۵ آورده شده است. با توجه به این نقشه‌ها، با افزایش دبی ورودی از بالادست طی بیست سال، شوری کلی منطقه کاهش می‌یابد و علت افزایش شوری در برخی نقاط بالادست نیز

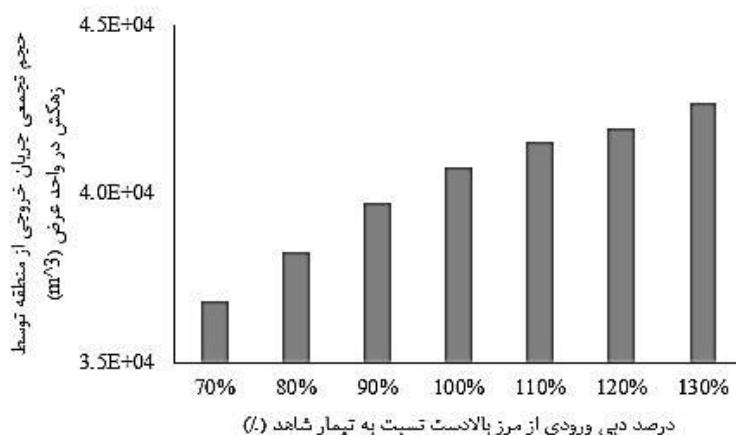


شکل ۵. نقشه شوری منطقه تحت مدل‌سازی پس از بیست سال در دبی‌های ورودی مختلف (در هر شکل سمت راست پایین دست زهکش و سمت راست بالادست آن است)



حجم را ۱۰۶۱ مترمکعب کاهش داده و به ۳۹۶۹۶ متر مکعب می‌رساند. به همین ترتیب، کاهش ۲۰ و ۳۰ درصدی دبی ورودی از بالادست حجم جریان تجمعی خروجی در تیمار شاهد را ۲۴۷۶ و ۳۹۶۴ مترمکعب کاهش داده و به ۳۸۲۸۱ و ۳۶۷۹۳ مترمکعب رسانده است. در حالی که افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی دبی ورودی از بالادست میزان جریان شور خروجی از منطقه توسط زهکش را به ترتیب ۷۵۶، ۱۱۵۹ و ۱۹۲۰ متر مکعب افزایش داده و به ۴۱۵۱۳، ۴۱۹۱۶ و ۴۲۶۷۷ مترمکعب رسانده است. هرچه میزان جریان شور خروجی از منطقه بیشتر باشد، املاح بیشتری از منطقه خارج می‌شود و شوری منطقه بیشتر کاهش می‌یابد.

همچنین، در شکل ۶ حجم جریان شور خروجی از منطقه توسط زهکش در بازه زمانی بیست‌ساله و در دبی‌های ورودی مختلف نشان داده شده است. براساس این شکل، در تمامی بازه‌های زمانی هر چه میزان دبی ورودی از بالادست کم شود، میزان جریان شور خروجی از منطقه توسط زهکش نیز کم می‌شود و به عکس، هرچه میزان جریان ورودی از بالادست زهکش بیشتر باشد، جریان حاوی نمک‌های آبشویی شده بیشتری از منطقه خارج می‌شود. برای مثال، بیست سال پس از احداث زهکش در وضعیت کنونی (تیمار شاهد)، در مجموع ۴۰۷۵۷ مترمکعب آب شور توسط زهکش از منطقه خارج می‌شود، کاهش ۱۰ درصدی دبی ورودی از بالادست این



شکل ۶. حجم تجمعی جریان شور خروجی توسط زهکش طی بیست سال در دبی‌های ورودی مختلف

در منطقه را تشدید می‌کند و از توانایی زهکش در کنترل و کاهش شوری منطقه می‌کاهد. به علاوه، هرچه میزان دبی ورودی از بالادست نسبت به تیمار شاهد بیشتر افزایش یابد، گرادیان معکوس شوری بیشتر کاهش می‌یابد و عملکرد زهکش در کنترل شوری نیز مؤثرتر خواهد بود؛ همان‌طور که در این مطالعه عملکرد زهکش در کنترل شوری در تیمار افزایش ۳۰ درصدی دبی ورودی از بالادست بهتر از عملکرد آن در تیمار افزایش ۲۰ درصدی دبی و در تیمار افزایش ۲۰ درصدی دبی ورودی بهتر از تیمار افزایش ۱۰ درصدی دبی ورودی بوده است. همچنین، هرچه دبی ورودی از بالادست نسبت به تیمار شاهد بیشتر کاهش یابد، گرادیان معکوس شوری بیشتر افزایش می‌یابد و عملکرد زهکش در کنترل شوری کمتر خواهد شد. در این مطالعه عملکرد زهکش در کنترل شوری در تیمار کاهش ۱۰ درصدی دبی ورودی از بالادست بیشتر از عملکرد آن در تیمار کاهش ۲۰ درصدی

### بحث و نتیجه‌گیری

در منطقه شوره‌زار مرکزی دشت قزوین اضافه برداشت از آب زیرزمینی شیرین موجب ایجاد گرادیان معکوس شوری، حرکت آب شور به سمت آب شیرین و افزایش شوری شده است، همانند اتفاقی که در آبخوان‌های نزدیک دریا در مناطق ساحلی می‌افتد. با توجه به این مطالعه زهکش حایل احداث شده در منطقه شوره‌زار، توانایی کنترل شوری منطقه را خواهد داشت (طبق تیمار شاهد) ولی افزایش و کاهش دبی ورودی از بالادست آبخوان، عملکرد زهکش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طوری که افزایش دبی ورودی از بالادست به آبخوان، گرادیان شوری موجود در منطقه را کاهش می‌دهد و در بازه‌های زمانی مختلف عملکرد زهکش در کنترل شوری را تشدید می‌کند، در حالی که کاهش دبی ورودی از مرز بالادست آبخوان که به معنای افزایش برداشت از آب زیرزمینی و یا کاهش تغذیه آن است، گرادیان شوری موجود

- [5]. Engineers of Saman Abrah- Kamab pars companies. Qazvin's interceptor Drain studies-authorized report. 2010[Persian].
- [6]. Jafari M, Sotoodehnia A. Monitoring and modeling Qazvin central saltmarsh interception drain in order to control salinity. Thesis. 2011[Persian].
- [7]. Javadi A, Ranjbar A. Investigating the capability of HYDRUS model in solute transfer simulation. 13<sup>th</sup> national Hydraulc conference. 2014 [Persian].
- [8]. Mirzayi M, Moarefi S. Investigating the effect of water table loss on groundwater salinity case study: Kabodar ahang plain. National Conference on Water with a Clean Water Approach. 2010 [Persian].
- [9]. Mohammadi A, Delbari M, Mohammadi M. HYDRUS-1D model and simulation of water and solute movement in soil. Second International Plant, Soil, Climate Conference. 2013 [Persian].
- [10]. Ranjbar A, Rahimikhob A, Ebrahimian H, Ravipour M. Simultaneous simulation of moisture, nitrate and ammonium transfer in soil in corn furrow irrigation using HYDRUS-2D model. 2017;31(2):259-276 [Persian].
- [11]. Ranjbar Q, Piraste anooshe H. A look at salinity research in Iran with emphasis on improving crop production. Iranian journal of crop sciences. 2015;17(2):165-17 [Persian].
- [12]. Sejna M., Jiří Šimůnek, Van Genuchten M. User manual. Springer refrence. 2011.
- [13]. Shamsayi A. Hydraulic of water flow in porous media - Groundwater Engineering. 2<sup>nd</sup> vol. Tehran: Amir Kabir University of Technology Publishing Center (Polytechnic). 1998. p.100-102.
- [14]. Sharifan F, Khazimenezhad H. Zoning and investigation of hazards due to uncontrolled abstraction of groundwater resources case study: Sarayan plain. Journal of Irrigation and water engineering. 2019;10(38):146-162 [Persian].
- [15]. Taqizade M, Halabian A, Alipour M, Kiyomarsi H. Identification and zoning groundwater salinity by means of GIS case study: Namdan plain. Journal of Geography and Environmental planning. 2017; 28(3):133-146 [Persian].

دبی و در تیمار کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی بیشتر از عملکرد آن در تیمار کاهش ۳۰ درصدی دبی ورودی از بالادست بوده است. به علاوه، هرچه جریان ورودی از مرز بالادست آبخوان بیشتر افزایش یابد، حجم جریان شور خروجی از منطقه نیز بیشتر می شود که به معنای خروج املاح بیشتر از منطقه است. بنابراین، یکی از عوامل اصلی در گسترش شوری در منطقه، برداشت بی رویه از آب زیرزمینی توسط چاه های بالادست زهکش است که موجب کاهش دبی ورودی به منطقه می شود و عملکرد زهکش را تضعیف می کند. کاهش برداشت از این چاه ها و یا تغذیه آنها به روش های مختلف می تواند تأثیرات مثبت زهکشی را بهبود دهد، از گسترش بیشتر شوری جلوگیری کند و شوری منطقه را تا حد بیشتری کاهش دهد. همچنین، انجام کارهای آبخیزداری مانند کشت گیاهان شورزی می تواند به عنوان زهکش زیستی عمل کرده و با تشدید عملکرد زهکش حایل به کنترل شوری منطقه و جلوگیری از گسترش آن کمک کند.

#### منابع

- [1]. Abbasi F, Tajik F. Estimation of hydraulic and solute transfer parameters in soil by in reverse solution method (field scale). Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources. 2007; 11(1):111-122 [Persian].
- [2]. Amiri S, Moradi M, Izadbakhsh M, Yaqubi B. Investigating the effects of groundwater level loss on groundwater Hydraulic conductivity by means of GIS. Fourth National Conference on the Application of GIS Spatial Information System in Water and Electricity Industry. 2017 [Persian].
- [3]. Cheraqi M, Najafi B, Shajari Sh, Javan M. Investigating the process of quantitative and qualitative change of groundwater in Sarvestan plain-Fars. Journal of watershed management research. 2020;33(2):82-96 [Persian].
- [4]. Darabi H, Asadi S, Sarai Tabrizi M, Esmaeilzadeh hanjani A. Evaluating Irrigation and Drainage Sub-Network Management (Case Study: Khodaafarin Network). Water Productivity Journal (WPJ). 2020; 1 (1): 73-84.