

بررسی تأثیر افت سطح آب زیرزمینی روی فرایند فرسایش خاک و تشکیل پدیده گردوغبار

غلامرضا عزیزیان^{۱*}، سید آرمان هاشمی منفرد^۲، امیرحسین جوان محصل^۳، محسن دهقانی درمیان^۴

۱. استادیار، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۳. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۴. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۷/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۲/۲۵)

چکیده

حفر بی‌رویه چاه‌های عمیق، سبب افت سطح آب زیرزمینی و مسائل ناشی از آن شده است که مهم‌ترین آن نابودی پوشش گیاهی دشت‌ها است که آب مورد نیاز خود را از رطوبت موجود در زمین می‌گیرند. هدف از تحقیق حاضر، تجزیه و تحلیل کاهش رطوبت خاک سطحی و منبع تولید گردوغبار در حوضه هامون- هیرمند از استان سیستان و بلوچستان است. به منظور رسیدن به این اهداف، از نرم‌افزار WEAP برای شبیه‌سازی افت جریان زیرسطحی استفاده شده و سپس با اعمال سناریوهای مدیریتی منابع آب، مقدار افت جریان زیرسطحی تا سال ۲۰۳۱ شبیه‌سازی شد. با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی بهترین گزینه از بین سناریوها انتخاب شد. منطقه مطالعه شده تحت این سناریو در پایان سال هدف، ۲۹ سانتی‌متر افت جریان زیرسطحی دارد و مقدار کل نیاز تأمین نشده برای معیارهای مختلف همچون شرب، کشاورزی و زیست‌محیطی برابر ۱۸۰۴/۸۳ میلیون مترمکعب است. سرعت باد در منطقه مطالعه شده بیش از سرعت آستانه حرکت ذرات است (بیش از ۴۰۰ سانتی‌متر بر ثانیه)، بنابراین منطقه توان تولید گردوغبار دارد. برای تجزیه و تحلیل کاهش رطوبت خاک سطحی از مدل HYDRUS-1D در مقاله حاضر استفاده شده است و نتایج به دست آمده نشان از کاهش مقدار رطوبت خاک در هر سال دارد. در ضمن، ارتباط بین افت جریان زیرسطحی و کاهش مقدار رطوبت خاک در تولید گردوغبار بررسی شد و این نتیجه به دست آمد که کاهش رطوبت خاک سطحی ارتباط نزدیکی با افت جریان زیرسطحی به اندازه حداکثر ۹۳/۸۳ سانتی‌متر و همچنین توان تولید گردوغبار متناسب با آن را دارد.

کلیدواژگان: افت سطح آب زیرزمینی، حوضه هامون- هیرمند، رطوبت خاک، گردوغبار.

مقدمه

مطالعه جریان‌های زیرسطحی اهمیت زیادی دارد چراکه ۲۲ درصد از منابع آبی قابل مصرف به شکل زیرزمینی است و همچنین وجود این منابع باارزش برای حیات گیاهان در مناطق خشک اهمیت بسزایی دارد [۱]. حفر چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق موتوری در مناطق شهری از گذشته‌های دور معمول بوده است، اما در مناطق روستایی از دهه ۱۳۴۰ هجری شمسی رواج پیدا کرد. در گذشته قنات‌ها اهمیت زیادی داشتند و هر جا که امکان حفر قنات وجود داشت، از آنها استفاده می‌شد. همچنین، از چشمه‌ها به عنوان منابع طبیعی آب سطحی استفاده می‌شد، اما متأسفانه به مرور زمان توجه به قنات کمتر و فرهنگ حفر چاه رواج بیشتری یافت [۲]. منابع آب زیرزمینی در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک جهان به طور مضاعف استخراج می‌شود که این برداشت بی‌رویه به ایجاد پدیده گردوغبار جوئی منجر می‌شود، چراکه در اغلب مناطق جهان این پدیده ناشی از میزان برداشت بی‌رویه از منابع آب است. افت سطح آب زیرزمینی آثاری همچون حرکت عمودی نمک از لایه‌های زیرسطحی به سطح خاک، کاهش نگهداشت رطوبت خاک، کاهش پوشش گیاهی و بسیاری مسائل این‌چنینی را پدید می‌آورد. پژوهش و مطالعات نشان داده است بیش از ۵۰ درصد، علل وقوع این پدیده‌ها ناشی از اضافه‌برداشت آب زیرزمینی و نبود تعادل بین مصرف و تغذیه آبخوان است [۳]. گردوغبار از زیان‌بارترین بلایای طبیعی مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است. این پدیده به‌عنوان یکی از بحران‌های محیطی سبب تأثیرات نامطلوب زیست‌محیطی مانند از بین رفتن زمین‌ها و کشتزارها، آلوده شدن آب‌های سطحی، گسترش بیابان‌ها، ایجاد مشکلات به دلیل کاهش دید افقی، بروز تصادفات جاده‌ای، بیماری‌های تنفسی و چشمی، مشکلات اقتصادی و غیره می‌شود. تحقیقات بسیاری روی تأثیر منفی پدیده گردوغبار بر سلامت انسان انجام شده است و بیان می‌کند که با مدیریت مناسب این بحران را می‌توان کنترل کرد [۴-۶]. مناطق مستعد گردوغبار بارندگی سالانه کمتر از ۲۰۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر دارند که به لحاظ ارتفاعی در مناطق پست جهان واقع‌اند. علاوه بر این، عوامل انسانی‌ای که سبب به‌وجود آوردن مناطق مستعد گردوغبار می‌شوند، عبارت‌اند از:

۱. گرم‌شدن جهانی سطح زمین تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم و ۲. کاهش رطوبت خاک سطحی که سبب هرز رفتن بیشتر خاک می‌شود و بستر لازم برای رخ‌دادن پدیده گردوغبار را فراهم می‌کند [۷]. سطوح زمین در اغلب مناطق جهان، خشک^۱ به حساب می‌آیند، چراکه مقدار آبی که از سطح زمین تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند تبخیر از سطح خاک، اضافه برداشت آب از آبخوان، وابستگی پوشش گیاهی به آب زیرزمینی^۲ و سایر عوامل دفع می‌شود از مقدار نزولات آب به درون زمین (خاک) بیشتر است. این عمل سبب می‌شود تا خاک نزدیک به زمین با گذشت زمان خشک‌تر شود، پس این امر می‌تواند آن مناطق را مستعد برای تولید منبع گردوغبار کند [۸]. شایان یادآوری است تا کنون حدود نُه کانون بحرانی در تولید گردوغبار شناسایی شده است و دشت سیستان از دیرباز یکی از مناطق تحت تأثیر فرایند بیابان‌زایی، به‌خصوص فرسایش بادی، است [۹]. به همین منظور، ماهر و همکارانش بیان داشتند که در عصر حاضر توفان‌های گردوغباری در جهان روی آب‌وهوا و ژئوشیمی زیستی اقیانوس‌ها تأثیرگذار هستند، به گونه‌ای که با پراکندگی و جذب تابش‌های خورشیدی سبب تغییر در خواص ابرها و در نتیجه تغییر آب‌وهوا می‌شوند. جابه‌جایی گردوغبارها به سمت اقیانوس‌ها به دلیل داشتن عناصری مانند سیلیس است که می‌توانند جذب کربن در اکوسیستم‌های دریایی و غلظت CO₂ در اتمسفر را افزایش دهند [۱۰]. ثروتی و یوسفی‌روشن معتقد بودند که جابه‌جایی شن، ماسه و ذرات ریز (گردوخاک) به‌وسیله باد در بسیاری از محیط‌های زیستی رخ می‌دهد، اما این پدیده به‌صورت پر قدرت‌تر و در مقیاس وسیع‌تری در سرزمین‌های خشک و کم‌آب رخ می‌دهد و از مهم‌ترین بحران‌هایی است که سرزمین‌های خشک با آن درگیرند. نتیجه تحقیق آنها بیان می‌کند که کنترل ذرات گردوخاک در مناطق خشک با نواحی مرطوب متفاوت است، چراکه نواحی خشک وسیع هستند، مشکلاتشان جدی، وضعیت اقتصادیشان مشروط و ضعیف و حوزه دخالت انسان به‌خصوص در حوزه پوشش گیاهی آنها بسیار محدودتر است [۱۱]. نتایج مدل گیاهی سلمی و همکارانش نشان دهنده اهمیت عوامل خاکی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی خاک است. دو عامل از پارامترهای

1. Arid
2. GDV

کشاورزی، مسائل مربوط به نشست زمین و از همه مهم‌تر ایجاد پدیده گردوغبار در محدوده آبخوان وارد می‌شود که لزوم مطالعات کمی و کیفی آب‌های زیرسطحی را در دشت‌های کشور نشان می‌دهد [۱۶]. مدل‌های مختلفی مانند SWAP و HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی رطوبت و انتقال آلودگی در خاک استفاده شد و این نتیجه به دست آمد که مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی رطوبت و پیش‌بینی غلظت آلاینده‌ها نسبت به مدل SWAP کارایی زیادی دارد و می‌تواند در مدیریت آبیاری استفاده شود [۱۷]. همچنین، عصاره و همکارانش در شبیه‌سازی رطوبت خاک در تحقیق خود از مدل HYDRUS-1D استفاده کردند که نتایج تحلیل حساسیت تحقیقشان نشان داد مدل یادشده نسبت به ضریب رطوبتی خاک در حالت اشباع، بیش از ضرایب دیگر حساس است. همچنین، با تغییر دادن جزئی از این ضرایب، تغییرات بسزایی را در خروجی خود مشاهده کردند و به این نتیجه دست یافتند که مدل HYDRUS-1D کارایی زیادی در شبیه‌سازی رطوبت خاک دارد [۱۸]. رابطه‌ای بین گردوغبار ناشی از فعالیت‌های انسان در مناطق نیمه‌خشک جهان، که مورد توجه جوامع پژوهشی آب و هواست، ارائه شد. در پژوهش یادشده چهار منطقه نیمه‌خشک جهان از جمله شرق چین، هند، شمال آمریکا و شمال آفریقا ارزیابی شد. نتیجه تحقیق یادشده نشان داد رابطه معناداری بین گردوغبار و تراکم جمعیتی در این مناطق وجود دارد [۱۹]. سونگ و همکارانش متغیرهای هواشناسی بر انتشار گردوغبار را با استفاده از مدل تحقیق و پیش‌بینی آب و هوا ارزیابی کرده و ارتباط بین انتشار گردوغبار و متغیرهای هواشناسی (سرعت باد، بارش و دما) را روی شرق آسیا طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۵ بررسی کردند. تغییرات فضایی و زمانی از انتشار گردوغبار در چین مغولستان نشان داد شار گردوغبار سالانه در مناطق بیابانی چین و مغولستان افزایش یافته، اما در بیشتر مناطق چین کاهش یافته بود. نتایج تحقیقات نشان می‌داد انتشار گازهای گلخانه‌ای ارتباط درخور توجهی با سرعت باد و بارش در مقیاس منطقه‌ای دارد. الگوهای فضایی همبستگی فصلی بین جریان گردوغبار و آب و هوا طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ بسیار متفاوت است [۲۰]. شن و همکارانش در تحقیقشان دریافتند به‌جز بیابان‌های طبیعی، بیابان‌هایی ناشی از فعالیت‌های انسانی در بستر دریاچه‌هایی مانند دریای خزر،

مدل احتساب‌کننده رطوبت خاک، شامل مقادیر ذخیره خاک و ذخیره کششی، بیشترین حساسیت را در تحلیل حساسیت دستی نشان دادند. پژوهشگران یادشده پارامترهای مدل HEC-HMS را به‌صورت دستی واسنجی کردند و در همه مطالعاتشان داده‌های مربوط به این مدل را با روش سعی و خطا و از مطالعات قبلی آنها به دست آوردند. همچنین، تحقیق آنها نشان داد شناخت پارامترهای حساس به واسنجی می‌تواند تأکیدی بر رطوبت پیشین خاک و اهمیت فاکتورهای خاکی باشد [۱۲]. پوینتینگ و بلنپ در مقاله خود بیان داشتند که پوشش بیولوژیکی خاک برای تثبیت خاک بیابان یک امر حیاتی است. همچنین، از آنجا که حدود ۳۳ درصد سطح کره زمین را بیابان تشکیل داده است، اختلال در اکوسیستم آنها سبب می‌شود که خاک بی‌ثبات شود و منبع عظیمی را برای تولید گردوغبار ایجاد کند. آنها نشان دادند رسوبات ناشی از گردوغبار در ارتفاعات سبب می‌شود که در تابش‌های خورشیدی اختلال ایجاد شده و روند تغییر در پارامترهای هیدرولوژیکی سبب تغییر در کیفیت آب شیرین شود [۱۳]. رجب‌پور و محمودآبادی فرسایش بادی را یکی از پدیده‌های زیست‌محیطی مخرب در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌حساب آوردند و بیان داشتند که در سال‌های اخیر شدت آن، رو به افزایش است. نتایج پژوهش آنها نشان داد با افزایش سرعت باد، شدت فرسایش بادی افزایش می‌یابد به طوری که در سرعت زیادتر، میزان افزایش شدت فرسایش، بیشتر است. همچنین، افزایش اندازه ذرات کارکرد مهمی در کنترل فرسایش دارد، به طوری که با افزایش آن، شدت فرسایش بادی به‌طور معناداری کاهش می‌یابد [۱۴]. صالحی و همکارانش بیان داشتند که میزان فرسایش خاک در ایران بیش از مقدار متوسط جهانی است به طوری که تلفات خاک بر اثر فرسایش در کشور ما چندین برابر میانگین آن در کشورهای آمریکایی و اروپایی است. بنابراین، باید این بحران را مدیریت کرد تا از آسیب‌های بیشتر آن به اکوسیستم جلوگیری شود [۱۵]. رشد روزافزون جمعیت و پیشرفت فناوری، عامل اصلی افزایش بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و در نتیجه افت سطح ایستایی این منابع ارزشمند است. سالانه در ایران حدود ۳۱ میلیارد مترمکعب آب اضافی برداشت می‌شود که با این برداشت غیراصولی و کاهش آب زیرزمینی، لطمه‌های جبران‌ناپذیری به صنعت،

درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی از خط استوا و ۵۸ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۱ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ، از نظر جمعیتی از کم‌تراکم‌ترین استان‌های کشور است. منطقه مطالعه شده در موقعیت جغرافیایی ۶۰ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۶۱ درجه و ۴۸ دقیقه طول شرقی و نیز ۳۰ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. منطقه مطالعه شده در حوضه آبریز هامون - هیرمند واقع شده است که جزئیات دقیق این حوضه آبریز و منطقه مطالعه شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

مواد و روش‌ها

یکی از نرم‌افزارهایی که برای مدل‌سازی مدیریت یکپارچه منابع آب استفاده می‌شود، نرم‌افزار WEAP^۱ است. مزیت اصلی نرم‌افزار WEAP در رویکرد یکپارچه در شبیه‌سازی سیستم‌های آبی و جهت‌گیری آن، در راستای سیاست‌هاست. WEAP از یک مدل برنامه‌ریزی خطی استاندارد برای حل مسائل تخصیص آب در هر گام زمانی استفاده می‌کند که تابع هدف آن حداکثر کردن درصد تأمین نیازهای مراکز تقاضا با توجه به اولویت عرضه و تقاضا، تعادل جرمی و سایر قیود است. WEAP آزمایشگاهی برای امتحان کردن راهبردهای متنوع توسعه و مدیریت منابع آب است. این نرم‌افزار جامع، صریح و آسان است و بیشتر از اینکه جایگزین یک برنامه‌ریز ماهر باشد، به کاربر کمک می‌کند [۲۴]. مدل WEAP در کشورهای مختلف جهان در طرح‌های مختلف تحقیقاتی و کاربردی استفاده شده است، این مدل در سال ۱۹۹۰ توسط مؤسسه محیط زیست استکهلم (SEI)^۲ به طراحی شده است. WEAP با دخیل کردن مقادیر مصرف، کیفیت، حفظ محیط زیست و اکوسیستم در یک ابزار کاربردی برای برنامه‌ریزی منابع آب توسعه داده شده است [۲۵].

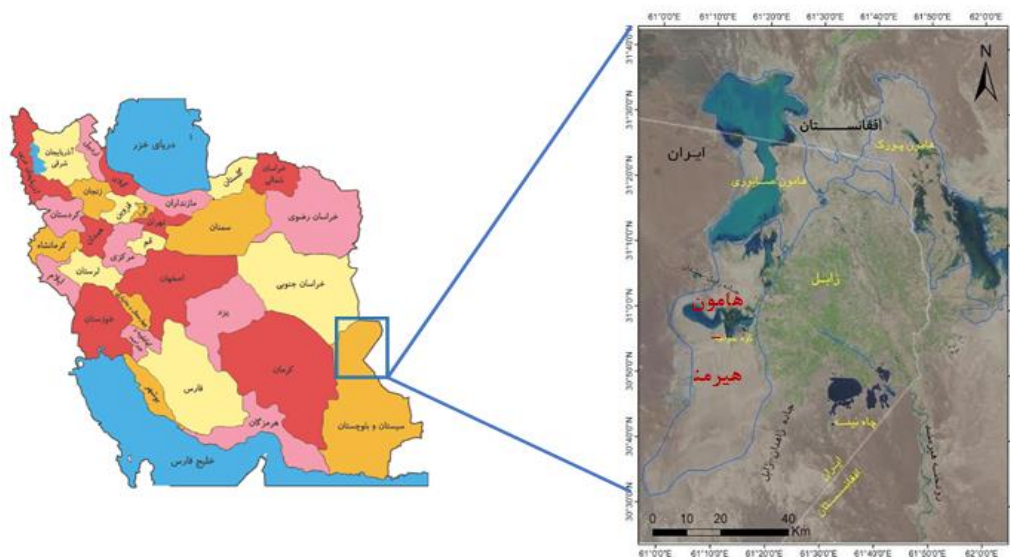
در تحقیق حاضر از مدل WEAP برای شبیه‌سازی افت سطح آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی استفاده شده است.

دریای آرال و سایر دریا‌های مشابه در حال شکل‌گیری هستند که مستعد ایجاد پدیده گردوغبارند. آنها در تحقیق خود لزوم نگارش آیین‌نامه‌ای برای ارزیابی اثر زیست‌محیطی گردوغبار را توصیه کردند [۲۱]. در پژوهشی دیگر، مدیریت کمی روی آب‌های سطحی و زیرسطحی به‌صورت هم‌زمان در حوضه رودخانه سرباز به کمک مدل WEAP انجام گرفت. در مطالعه یادشده با در نظر گرفتن هم‌زمان نیازهای آبی شهری، صنعت، زیست‌محیطی (برای تأمین آب تمساح پوزه‌کوتاه ایرانی) و نیاز کشاورزی (با معرفی الگوی بهینه کشت برای منطقه)، مدیریت صحیح کمی آب‌های سطحی و زیرسطحی صورت پذیرفت. با مقایسه نتایج تحقیق و با مقادیر واقعی در مرحله صحت‌سنجی، دقت و کارایی زیاد مدل WEAP تأیید شد [۲۲]. همچنین، در تحقیقی دیگر مدیریت هم‌زمان کمی-کیفی برای پیش‌بینی میزان شوری آب زیرزمینی توسط مدل WEAP صورت پذیرفت که باز هم دقت زیاد مدل در مقایسه با داده‌های موجود روشن شد [۲۳].

در هیچ‌یک از تحقیقات یادشده به مدل‌سازی تغییرات سطح آب زیرزمینی و تأثیر آن بر رطوبت خاک سطحی و در پی آن توان تولید گردوغبار پرداخته نشده است. بنابراین، در تحقیق حاضر تغییرات تراز آب زیرسطحی در منطقه و افت آن توسط مدل WEAP تحت سناریوهای مختلف مدیریتی شبیه‌سازی شد. سپس، رطوبت سطحی خاک در نرم‌افزار HYDRUS-ID مدل‌سازی شده و در نهایت پیرامون امکان‌سنجی توان تولید گردوغبار تحلیل و آنالیز صورت پذیرفت.

منطقه مطالعه شده

استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی ایران واقع است. این استان با حدود ۱۷۷۲۷۲ کیلومتر مربع وسعت، کم و بیش اندازه کشور سوریه بزرگی دارد و بیش از ۱۱ درصد وسعت ایران را در برمی‌گیرد. سیستان شامل زابل و شهرهای اطرافش است و بلوچستان دربرگیرنده بقیه شهرها از زاهدان تا چابهار است. این استان، ۱۲۴۰ کیلومتر مرز با کشورهای پاکستان و افغانستان و ۳۰۰ کیلومتر مرز آبی با دریای عمان دارد و به دلیل قرار گرفتن در موقعیت راهبردی و ترانزیتی از اهمیت فراوانی برخوردار است. استان سیستان و بلوچستان با قرار گرفتن بین ۲۵



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده در حوضه آبریز هامون-هیرومن

که S_m و S_{im} عبارت‌های تخلیه را نشان می‌دهند و T_w نشان‌دهنده انتقال آب از درون منافذ خاک‌دانه‌ها به بیرون است [۲۶].

درخور یادآوری است که برای شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک سطحی در تحقیق حاضر از مدل HYDRUS 1D - استفاده شده است.

مدل‌سازی منطقه مطالعه شده

با توجه به کارایی، برتری و دقت زیاد دو مدل WEAP و HYDRUS-1D نسبت به سایر مدل‌ها که در تحقیقات پیشین به اثبات رسید [۱۷، ۱۸، ۲۲ و ۲۳]، در تحقیق حاضر نیز از این دو مدل به منظور شبیه‌سازی در منطقه مطالعاتی استفاده شد. برای مدل‌سازی منطقه ابتدا از مدل نرم‌افزاری WEAP برای شبیه‌سازی افت سطح آب زیرزمینی استفاده شد و سپس نتایج به دست آمده از این مدل، که همان مقدار افت سطح آب زیرزمینی است، به عنوان نوعی از داده ورودی، که وضعیت جریان پایین‌دستی پروفیل خاک را مشخص می‌کند، وارد مدل HYDRUS-1D شده است. داده‌های ورودی به مدل نرم‌افزاری WEAP شامل بخش‌های زیر می‌شود:

۱. داده‌های مربوط به اطلاعات جریان سطحی مانند رودخانه در حوضه مد نظر؛
۲. اطلاعات مربوط به مخزن سد (مانند حجم ذخیره، حجم غیرفعال، نمودار حجم-ارتفاع)؛

معادله حاکم بر جریان آب در خاک مدل HYDRUS - 1D مدل هایدروس از معادله ریچاردز برای حل معادلات جریان در محیط متخلخل استفاده می‌کند. این معادله در رابطه ۱ نشان داده شده است.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} - S_a \quad (1)$$

$C\left(\frac{d\theta}{dh}\right)$: ظرفیت ویژه آب (L^{-1})؛

θ : رطوبت حجمی خاک ($L^3.L^{-3}$)؛

t : زمان (T)؛

S_a : میزان جذب آب توسط ریشه ($L^3.L^{-3}.T^{-1}$)؛

K : هدایت هیدرولیکی ($L.T^{-1}$)؛

h : بار فشاری آب خاک (L).

در این مدل می‌توان محیط متخلخل را به صورت تخلخل دوگانه فرض کرد. به این صورت که بخشی از رطوبت در محیط متخلخل جریان دارد (θ_m) و بخش دیگر به صورت غیر متحرک (θ_{im}) است، بنابراین میزان رطوبت خاک با استفاده از رابطه ۲ تعیین می‌شود:

$$\theta = \theta_m + \theta_{im} \quad (2)$$

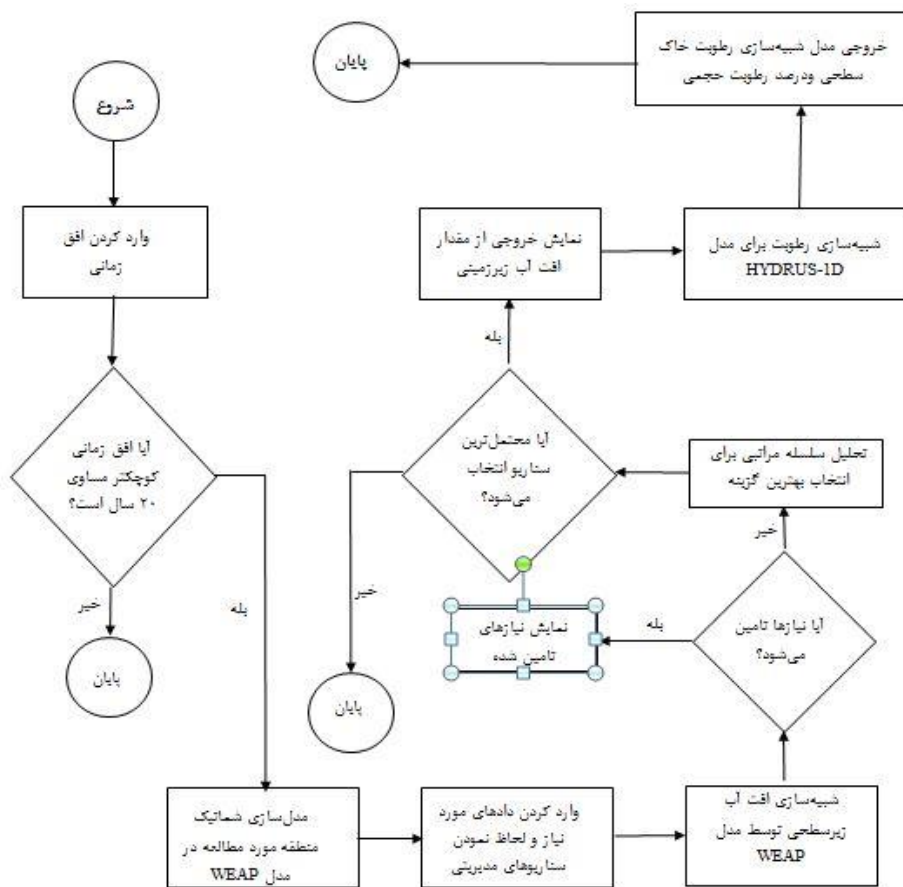
محاسبه جریان در محیط با تخلخل دوگانه از فرمول ریچاردز مشتق و به صورت روابط ۳ و ۴ تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial x} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial y}{\partial x} + K_{iz}^A \right) \right] - S_m - T_w \quad (3)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_{im} - T_w \quad (4)$$

۳. مشخصات هیدرولیکی خاک؛
 ۴. اطلاعات مربوط به گام زمانی برای حل عددی معادله ریچاردز؛
 ۵. تعیین شرایط مرزی در مدل HYDRUS-1D.
 پس از وارد کردن داده‌ها در مدل HYDRUS-1D باید شرایط مرزی در مدل مشخص شوند. شرایط مرزی در مدل به دو دسته شرایط پایین‌دست و بالادست تقسیم می‌شود. شرایط بالادست مدل وابسته به شرایط اقلیمی (پارامترهای هواشناسی) و شرایط پایین‌دست، تابع تغییرات جریان آب زیرزمینی انتخاب شده است. با داشتن مقدار شبیه‌سازی شده افت جریان آب زیرزمینی که خروجی مدل WEAP است، این مقدار در هر سال به‌عنوان ورودی به مدل HYDRUS-1D و به‌منزله شرایط پایین‌دست در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، درصد تغییرات رطوبت حجمی خاک سطحی در هر سال محاسبه می‌شود. شکل ۲ فلوجارت کلی مدل‌سازی تحقیق را نشان می‌دهد.

۳. داده‌های مربوط به جریان آب زیرسطحی (مانند تعداد چاهک‌ها، حجم ذخیره آب زیرسطحی)؛
 ۴. مشخص کردن گره‌های نیازها در منطقه مطالعه شده (که منطقه نسبت به تأمین نیازهایی مانند زیست‌محیطی، شهری، کشاورزی، صنعتی مدل‌سازی شده است)؛
 ۵. داده‌های هواشناسی (مانند بارندگی، دمای ماهانه، وضعیت باد و غیره).
 بنابراین، با توجه به دسته‌بندی داده‌ها در مدل نرم‌افزاری WEAP، منطقه مطالعه‌شده به لحاظ مشخص کردن وضعیت جریان زیرزمینی تحت تأثیر محتمل‌ترین سناریوهای مدیریت منابع آب مدل‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده از خروجی مدل WEAP وارد مدل نرم‌افزاری HYDRUS-1D می‌شود تا بتوان شبیه‌سازی رطوبت خاک سطحی را انجام داد. داده‌های استفاده‌شده در مدل نرم‌افزاری HYDRUS-1D به شرح زیر است:
 ۱. داده‌های هواشناسی؛
 ۲. اطلاعات مربوط به مشخصات خاک سطحی؛



شکل ۲. فلوجارت کلی چگونگی مدل‌سازی منطقه مطالعه‌شده

داده‌های ورودی مدل

بر اساس مطالعات بیلان عمومی حوضه آبریز هامون - هیرمند، وضعیت تبادلات آب سطحی در حوضه یادشده به این ترتیب است که جریانات سطحی ورودی به آن از طریق محدوده‌های زابل و هامون - هیرمند واقع در استان صورت می‌گیرد. به این ترتیب که متوسط حجم جریانات ورودی سالانه رودخانه هیرمند از طریق محدوده زابل حدود ۳/۶ میلیارد مترمکعب تخمین زده می‌شود (بر اساس آمارهای قدیمی ایستگاه هیدرومتری چهاربرجک در خاک افغانستان) که پس از ورود به محدوده زابل در خاک ایران، در دو رودخانه سیستان به میزان ۱/۶ میلیارد مترمکعب و رود مرزی پریان مشترک به میزان دو میلیارد مترمکعب جاری می‌شوند. طبق آماربرداری‌های بلندمدت ایستگاه هیدرومتری سد کهک روی رودخانه سیستان (بالادست سد کهک) حدود ۱/۶ میلیارد مترمکعب در سال آبدهی این رودخانه در محل ورودی به مخزن سد اندازه‌گیری شده است که پس از مصارف پایین دست سد، حدود ۱۳۸۳ میلیون مترمکعب در سال از طریق رودخانه سیستان وارد محدوده هامون - هیرمند می‌شود. همچنین، جریان سطحی

خروجی از حوضه هیرمند در استان سیستان و بلوچستان، از محدوده‌های هرمک و زاهدان حدود ۳/۴ میلیون مترمکعب در سال است که از حوضه خارج و به کشور افغانستان وارد می‌شوند. سالانه ۱/۴ میلیون مترمکعب از محدوده هرمک و حدود دو میلیون مترمکعب از محدوده زاهدان از کشور خارج می‌شوند. هم‌اکنون در این محدوده مخازن چاه نیمه ۱ - ۴ (با مجموع حجم مخزن ۱۴۵۴ میلیون مترمکعب) در حال بهره‌برداری هستند. بنابراین، مشخصات سدهای بهره‌برداری شده در حوضه آبریز هامون - هیرمند در استان سیستان و بلوچستان مطابق جدول ۱ است [۲۷].

هامون‌ها

با توجه به شیب هامون‌ها، آب مازاد هامون پوزک به هامون صابری، آب مازاد هامون صابری به هامون هیرمند و مازاد آب هامون هیرمند نیز از طریق رودخانه شیله به گودزره تخلیه می‌شود (در سال‌های پرآب گذشته به طور معمول این هامون‌ها به هم متصل بودند). بنابراین، در جدول ۲ آخرین اطلاعات مربوط به عمق، مساحت و حجم هامون‌ها در سال ۲۰۱۱ برآورد شده است [۲۸].

جدول ۱. مشخصات سدهای بهره‌برداری شده در محدوده مطالعاتی

ردیف	نام سد	محل سد	طول تاج (متر)	عرض تاج (متر)	ارتفاع از پی (متر)	ظرفیت آبدگیری (m ³ /s)	هدف
۱	سد مخزنی چاه نیمه ۱-۳	روستای چاه نیمه	۱۷۰	۶	۱۶	-	تأمین نیازهای آبی کشاورزی و شرب
۲	سد انحرافی سیستان	شمال قریه جزینک	۱۵۴	۶/۵	۱۱	۶۰	تأمین نیاز آبی کشاورزی
۳	سد انحرافی زهک	روستای زهک	۵۸	۴	۱۴	۴۵	تأمین نیاز آبی کشاورزی
۴	چاه نیمه ۴	روستای چاه نیمه	۱۵۲۵۰	۸	۱۵/۵	-	تأمین نیازهای آبی کشاورزی، شرب و کنترل سیلاب

جدول ۲. اطلاعات مربوط به عمق، مساحت و حجم هامون‌ها در سال ۲۰۱۱

هامون	عمق متوسط (متر)	مساحت (مترمربع)	حجم (مترمکعب)
هیرمند	۲	۲۳۸۸/۸	۴۷۷۷/۶
صابری	۳	۱۱۶۱/۵	۳۴۸۴/۵
پوزک (ایران)	۲	۶۱	۱۲۲
پوزک (افغانستان)	۳	۱۴۵۳/۴	۴۳۶۰/۲

کشاورزی

یافته‌های به‌دست‌آمده از منطقه مطالعه شده پیرامون سطح زیر کشت اراضی زراعی و باغی در جدول‌های ۳ و ۴ به تفکیک آورده شده است.

اجتماعی

توزیع جمعیت در محدوده مطالعه شده بر اساس آخرین نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن در سال ۱۳۹۰ و

۱۳۹۵ در جدول ۵ گردآوری شده است. به منظور مطالعات جمعیتی، داشتن رقم کل جمعیت یک کشور و یا یک ناحیه به‌طور مطلق هر چند لازم است ولی کافی نیست و باید رابطه‌ای بین این رقم و بعضی عوامل دیگر، مانند مساحت منطقه‌ای که جمعیت مد نظر روی آن زندگی می‌کنند، برقرار شود تا فشار جمعیت روی زمین و امکانات اقتصادی منطقه مشخص شود.

جدول ۳. تفکیک سطح زیر کشت اراضی زراعی منطقه مطالعه شده

نام محصول	شهرستان زابل		شهرستان زهک		شهرستان هامون		شهرستان هیرمند
	سطح زیر کشت (هکتار)	آبی	سطح زیر کشت (هکتار)	آبی	سطح زیر کشت (هکتار)	آبی	
غلات	۸۲۰۲/۸	۲۲/۴	۱۵۹۷۶	۱۴۶۱۰/۹	۰	۱۱۹۲۲	۰
حبوبات	۳۲	۰	۱۱۵/۴	۲۵	۰	۲۵	۰
محصولات صنعتی	۱۸	۰	۳۴/۴	۱۰	۰	۰	۰
سبزیجات	۷۳	۰	۹۸	۶۶/۵	۰	۱۳۵	۰
نباتات علوفه‌ای	۸۲۹/۵	۰	۱۴۶۳/۹	۶۰۸/۳	۰	۳۰۸۰/۵	۰

جدول ۴. تفکیک سطح زیر کشت اراضی باغی منطقه مطالعه شده

نام محصول	شهرستان زابل		شهرستان زهک		شهرستان هامون		شهرستان هیرمند
	سطح زیر کشت (هکتار)	آبی	سطح زیر کشت (هکتار)	آبی	سطح زیر کشت (هکتار)	آبی	
میوه‌های دانه‌دار	۰	۰/۵۷	۰	۰	۰	۰	۰
میوه‌های هسته‌دار	۱	۱۰/۲۱	۰/۵	۰	۰	۰	۰
میوه‌های دانه‌ریز	۱۸۱/۸۶	۷۲۰/۳۵	۴۷۰/۷۰	۲۸۴/۲۰	۰	۰	۰
میوه‌های خشک	۳	۷/۴۱	۲/۹۷	۰	۰	۰	۰
میوه‌های نیمه‌گرمسیری	۳۶	۷۲/۵۴	۶۱/۵۰	۱۰	۰	۰	۰
میوه‌های گرمسیری	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سایر محصولات	۳۷/۷	۲/۵	۵/۱۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۵. جمعیت به تفکیک شهرستان

نام شهرستان	مساحت (کیلومتر مربع)	جمعیت (نفر) در سال ۱۳۹۰	تراکم نسبی (نفر در کیلومتر مربع) در سال ۱۳۹۰	تراکم نسبی (نفر در کیلومتر مربع) در سال ۱۳۹۵	میزان رشد جمعیت
زابل	۱۳۱۵۲	۲۵۹۳۵۶	۲۰	۲۴	۱/۱۷
زهک	۹۴۵	۷۵۴۱۹	۸۰	۹۴	۱/۱۷
هامون	۴۹۸۷	۴۱۵۲۰	۹	۱۰	۱/۱۸
هیرمند	۱۱۰۰	۶۵۴۷۱	۶۰	۶۵	۱/۰۷

مشخصات خاک

مشخصات خاک منطقه مطالعه شده به صورت جدول ۶ ارائه شده است و نمونه خاکها از عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰، ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری با فرض یکنواختی مشخصات خاک برداشته شده است.

زیست‌محیطی

باد یکی از چند پارامتر اساسی و تعیین‌کننده هواشناسی است که در مطالعات کشاورزی، شهرسازی، محیط زیست و حمل‌ونقل از اهمیت خاصی برخوردار است. بادهای ۱۲۰ روزه سیستان که در فصل گرم (۱۵ خردادماه تا ۱۵ مهرماه) شکل می‌گیرند [۲۹-۳۲]، در زابل به باد لوار معروف بوده و به معنای گرم و خشک است. همچنین، به علت قرار گرفتن ارتفاعات پلنگان در غرب و ارتفاعات بابائی در شمال شرق دشت زابل، کانالی طبیعی ایجاد شده و سبب تشدید سرعت باد می‌شود. وزش این باد در منطقه سبب ایجاد توفان گردوغبار، انتقال شن‌های روان، فرسایش خاک‌های سطحی قابل کشت، پرشدن نهرها و کانال‌های

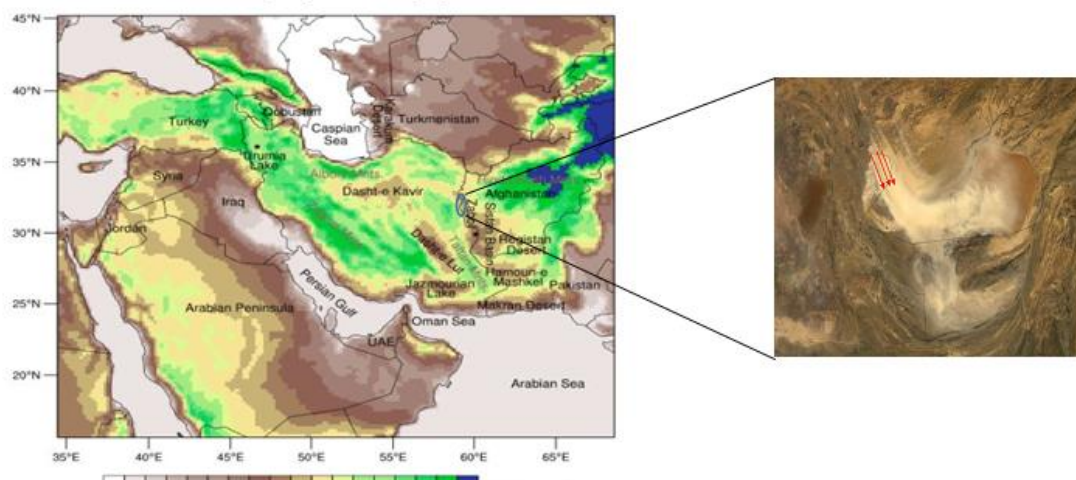
آبرسانی و تعدیل دما در فصل تابستان می‌شود. در شکل ۳ جهت بادهای ۱۲۰ روزه قابل مشاهده است [۳۳ و ۳۴].

موقعیت آب زیرسطحی (چاهک)

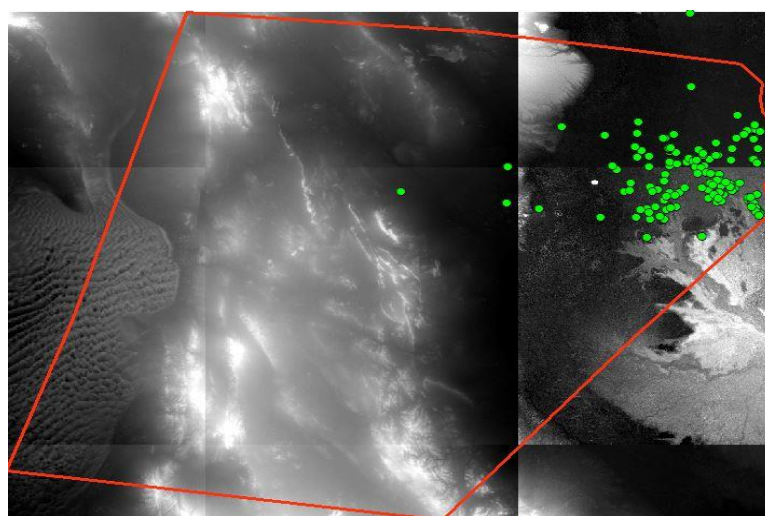
در مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک (قسمت عمده‌ای از کشور ایران با توجه به موقعیت خاص جغرافیایی خود اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارد، به طوری که ۷۵ درصد از سطح کشور دارای بارندگی کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر است) به علت کمبود نزولات جوئی و تبخیر زیاد، آب سطحی فقط در دوره کوتاهی از سال جریان دارد. همچنین، با توجه به نبود توزیع یکنواخت بارندگی از نظر زمانی و مکانی در سطح کره زمین و اوضاع جوئی و زمین‌ساختی مناطق خشک و نیمه‌خشک، ساکنان این مناطق مجبور به بهره‌برداری بیشتر از آب‌های زیرسطحی هستند، به طوری که پایه‌های بسیاری از اجتماعات در این مناطق، بر این منابع ارزشمند، استوار شده است [۳۵]. شکل ۴ موقعیت مکانی منابع آب زیرزمینی در منطقه مطالعاتی مشخص شده است.

جدول ۶. مشخصات خاک منطقه مطالعه شده

عمق	ساختمان بافت خاک (درصد)			کلاس بافت خاک	چگالی ظاهری خاک (gr/cm ³)	رطوبت حجمی خاک (درصد)
	رس	سیلت	شن			
۰-۲۰	۲۸/۲	۳۴	۳۷/۸	لوم رسی	۱/۴۶	۲۶/۲
۲۰-۴۰	۲۸/۳	۳۷/۹	۳۳/۸	لوم رسی	۱/۴۳	۲۷
۴۰-۶۰	۳۲/۲	۳۴	۳۳/۸	لوم رسی	۱/۴۵	۲۷/۵
۶۰-۸۰	۴۴	۳۳	۲۳	رسی	۱/۳۶	۳۱/۴
۸۰-۱۰۰	۴۵/۲	۳۶	۱۸/۸	رسی	۱/۳۷	۳۲/۲



شکل ۳. نمای فوقانی جهت بادهای ۱۲۰ روزه سیستان



شکل ۴. موقعیت منابع زیرسطحی منطقه مطالعه شده در مدل رقوم ارتفاعی (DEM)

جدول ۷. داده‌های هواشناسی برای منطقه مطالعه شده

ماه	بیشترین دما (سلسیوس)	کمترین دما (سلسیوس)	بیشترین رطوبت (درصد)	کمترین رطوبت (درصد)	میزان تبخیر (میلی‌متر)	سمت باد حداکثر (درجه)	بیشترین سرعت باد (m/s)
فروردین	۳۶/۴	۹/۲	۵۴	۱۷	۲۹۰/۷۰	۳۵۰	۲۰
اردیبهشت	۴۵/۴	۱۳/۷	۴۵	۱۱	۳۷۳	۳۴۰	۲۵
خرداد	۴۷/۴	۲۲/۲	۲۶	۹	۶۴۷/۸۰	۳۲۰	۲۶
تیر	۴۸	۲۴/۶	۱۸	۷	۸۶۱/۳۰	۳۳۰	۳۴
مرداد	۴۶/۸	۲۷/۵	۱۷	۷	۸۰۹/۴۰	۳۲۰	۲۷
شهریور	۴۴/۸	۲۰/۹	۲۲	۹	۶۴۰/۴۰	۳۳۰	۲۵
مهر	۴۱/۶	۱۱/۶	۳۶	۱۲	۳۳۱/۶۰	۳۳۰	۲۳
آبان	۳۲/۲	۲	۵۲	۲۲	۱۷۲	۳۴۰	۲۴
آذر	۲۶/۵	-۳/۸	۵۶	۲۱	۵۸/۹۰	۳۲۰	۳۳
دی	۲۵/۹	-۸/۴	۵۳	۱۵	۵۸	۳۳۰	۱۹
بهمن	۲۲	-۶/۲	۷۰	۲۶	۴۵/۴۰	۳۲۰	۲۴
اسفند	۳۶	-۳	۵۷	۱۴	۱۶۰/۲۰	۳۵۰	۲۸

هواشناسی

داده‌های استفاده شده برای منطقه مطالعاتی در جدول ۷ ارائه شده است. این داده‌ها از ایستگاه هواشناسی در موقعیت طول جغرافیایی ۶۱ درجه و ۲۹ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی با ارتفاع ۴۸۹/۲ از سطح دریا برداشت شده است [۳۶].

سناریوهای مدیریتی استفاده شده در تحقیق

سناریوها بر اساس مجموعه اطلاعات وارد شده در شرایط موجود ساخته می‌شوند و در واقع تغییرات احتمالی

سیستم در سال‌های آینده و بعد از شرایط موجود را بررسی می‌کنند. به بیان دیگر، سناریو نشان می‌دهد چگونه سیستم در آینده و طی زمان و مکان، در قالب یک سری مشخصات اقتصادی-اجتماعی و در یک شرایط مشخصی از سیاست‌گذاری درگیر می‌شود [۳۷]. همه سناریوها از یک سال پایه (که در مقاله حاضر ۲۰۱۱ به عنوان سال پایه برگزیده شده است، چراکه کلیه داده‌های موثق در دسترس از منطقه که مهم‌ترین آن مربوط به عمق، مساحت و حجم هامون‌ها است، مربوط به این سال است) شروع می‌شوند. در این مسئله افق زمانی مد

سناریوی ۵: سناریوی «افزایش مصرف آب به دلیل بازپیرایی زمین‌های کشاورزی ازدست‌رفته بر اثر بادبردگی» در نظر گرفته شده است. این سناریو به دلیل تأثیرپذیری منطقه از بادهای ۱۲۰ روزه مد نظر قرار گرفته است که می‌تواند در آینده سبب بروز این افزایش مصرف شود (مقدار افزایش مصرف ۱۰ درصد فرض شده است).

سناریوی ۶: سناریوی «ترکیبی» شامل ترکیب سناریوی ۲ و ۳ است.

نتایج و بحث

سناریوهای بررسی‌شده، توسط یک تحلیل سلسله‌مراتبی به کمک نرم‌افزار Expert Choice ورژن ۱۱ ارزیابی شدند. با توجه به هدف تعیین‌شده در نرم‌افزار Expert Choice، که محاسبه بیشترین مقدار افت سطح آب زیرزمینی ناشی از اعمال سناریوها با توجه به در نظر گرفتن معیارهایی همچون زیست‌محیطی، شرب، کشاورزی و صنعت بود، ارزیابی‌ها صورت گرفت. شکل ۵ مجموع نیازهای تأمین‌نشده در سناریوها را نشان می‌دهد که این مقدار در سناریوی افزایش راندمان کمترین مقدار و در سناریوی بازپیرایی، بیشترین مقدار را دارد.

شکل ۶ میزان افت سطح آب زیرزمینی محاسبه‌شده در تحلیل سلسله‌مراتبی را نشان می‌دهد که به‌عنوان ورودی برای مدل‌سازی رطوبت خاک در مدل HYDRUS 1D - منظور می‌شود.

نظر ۲۰ سال است که یک افق بلندمدت در برنامه‌ریزی منابع آب است. سناریوهای ساخته‌شده در این مسئله که به منظور بررسی روند افت سطح آب زیرزمینی ارزیابی شدند به شرح زیر ارائه می‌شوند:

سناریوی ۱: سناریوی «مرجع» است و وضع موجود را بیان می‌کند و چگونگی الگوی مصرف آب و شرایط برداشت از آب زیرزمینی را در غیاب هرگونه سیاست توسعه‌ای و یا طرح‌های توسعه منابع آب برای آینده آزمایش خواهد کرد. سناریوی مرجع یک سناریوی پایه برای دیگر سناریوهایی است که در آنها سیاست‌گذاری‌های خاصی به کار گرفته شده است.

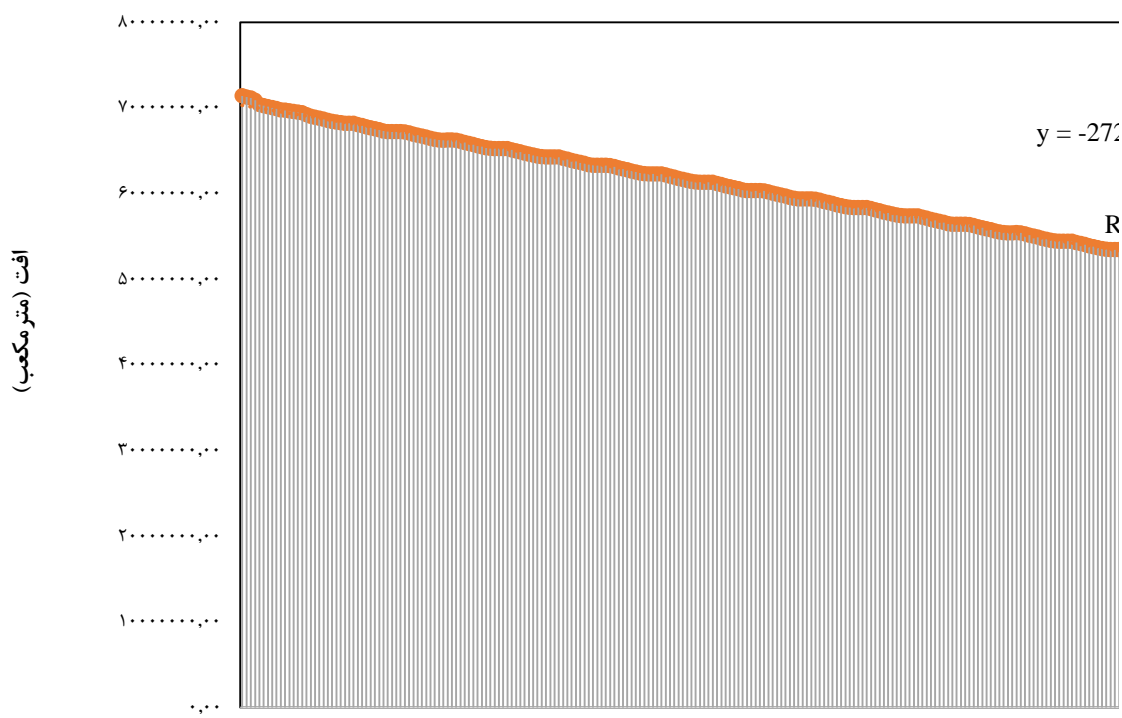
سناریوی ۲: سناریوی «کاهش میزان رشد جمعیت» است. در این سناریو فرض شده است که میزان رشد جمعیت در این منطقه از ۱/۱۵ درصد به ۰/۸ درصد رسیده است.

سناریوی ۳: سناریوی «کاهش سرانه مصرف شرب» است. در این سناریو فرض شده است که سرانه مصرف آب شرب از ۱۷۵ لیتر به ازای هر شخص طی شبانه‌روز به ۱۳۰ لیتر در روز برسد که مقدار سرانه استاندارد شرب جهانی است.

سناریوی ۴: سناریوی «افزایش راندمان آبیاری زمین‌های کشاورزی وابسته به آب زیرزمینی» است. در این سناریو فرض بر آن است که با ثابت ماندن سطح زیر کشت، راندمان آبیاری در اراضی کشاورزی به کمک استفاده از توسعه روش‌های نوین آبیاری و روش‌های دیگر به میزان ۲۰ درصد افزایش یابد.



شکل ۵. مجموع نیازهای تأمین‌نشده در سناریوها



شکل ۶. افت سطح آب زیرزمینی در نظر گرفته شده در افق ۲۰ ساله

این مقدار کاهش درصد رطوبت در فصل تابستان نسبت به بقیه فصل‌های سال بیشتر است. همچنین، با شروع فصل پاییز و تقریباً از اواسط فصل پاییز به درصد رطوبت خاک اضافه می‌شود.

سرعتی که مواد را در سطح خاک منتقل می‌کند، سرعت برشی نامیده می‌شود که قدرت فرسایش‌پذیری باد را نشان می‌دهد. هرچه سرعت باد زیادتر باشد، نیروی برشی به دست آمده از آن بیشتر خواهد بود. سرعت برشی باد را سرعت کششی، سرعت بحرانی یا سرعت آستانه سیال نیز می‌گویند و با U^* نشان می‌دهند.

شدت فرسایش بادی با سرعت برشی باد رابطه مستقیم دارد، بنابراین سرعت برشی باد، قدرت فرسایش بادی را به صورت کمی تعیین می‌کند [۳۸]. مقدار سرعت برشی باد از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$U_* = \sqrt{\frac{T_0}{P_a}} \quad (5)$$

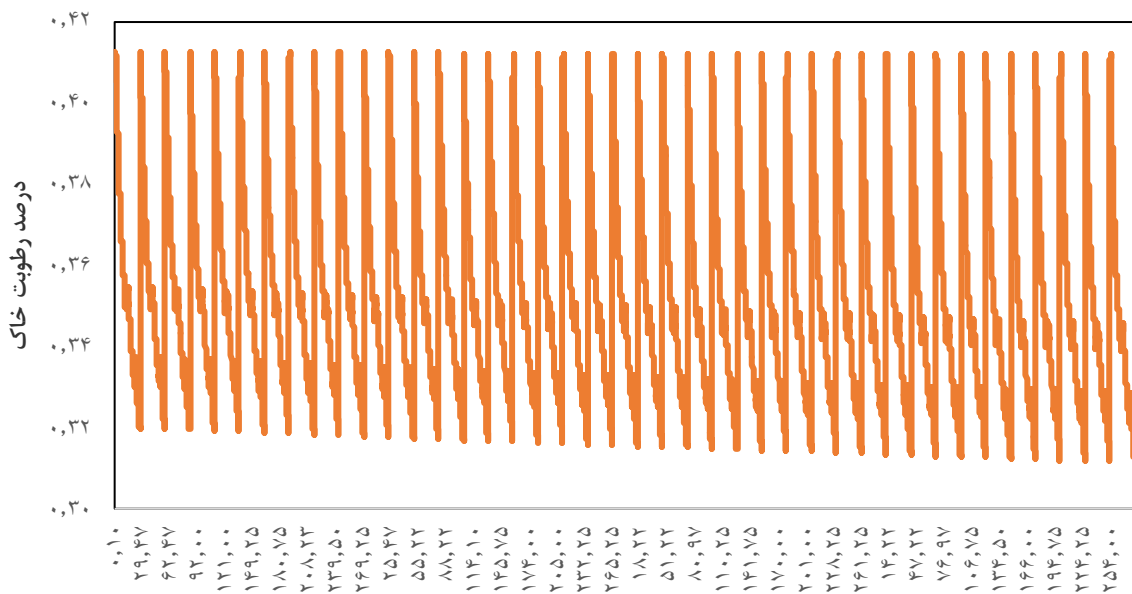
U^* : سرعت برشی باد بر حسب متر بر ثانیه؛

T_0 : نیروی برشی در واحد سطح زمین بر حسب $\text{gcm}^{-1}\text{sec}^{-2}$ ؛

P_a : چگالی هوا بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب.

از آنجا که ذرات خاک به هنگام مرطوب‌بودن به یکدیگر می‌چسبند و اجازه بادبردگی توسط نیروی باد را نمی‌دهند، پیش‌بینی اینکه رطوبت خاک در منطقه مطالعه شده چگونه تغییر می‌کند، اهمیت دارد. برای وقوع گردوغبار در سطوح وسیع دو شرط اصلی لازم است: اول اینکه خاک، رطوبت لازم را نداشته باشد و یا به بیانی خشک باشد، اصولاً در مناطقی این شرط را داریم که میانگین بارندگی سالانه در آنها کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر است. شرط دوم این است که بادهای یکنواخت و مداوم در همه سطوح این مناطق وجود داشته باشد. برای مدل‌سازی منطقه مطالعه شده تحت نرم‌افزار HYDRUS - 1D ابتدا باید مشخصات خاک منطقه را وارد مدل کنیم که در جدول ۶ به این مشخصات اشاره شده است. این مدل به حل عددی معادله ریچاردز می‌پردازد. در مسائل عددی برای شروع شبیه‌سازی ابتدا یک گام زمانی حدس زده شده و سپس با توجه به دامنه تعیین شده برای گام‌های زمانی مسئله حل می‌شود.

شکل ۷ تغییرات ماهانه درصد رطوبت خاک را نشان می‌دهد. این نمودار بیان می‌کند که پس از پایان سه‌ماهه بهار در هر سال، درصد رطوبت خاک روند کاهشی دارد و



روزهای سال در افق ۲۰ ساله

شکل ۷. تغییرات روزانه درصد رطوبت خاک در افق ۲۰ ساله

ماه سال را نشان می‌دهد و از فروردین‌ماه آغاز می‌شود. همان‌طور که مشخص است، چون سرعت باد در ماه‌های خرداد تا مهر بیشتر است، سرعت برشی باد هم در این ماه‌ها نسبت به بقیه ماه‌های سال بیشتر بوده و قدرت فرساینده‌گی یا پتانسیل تولید گردوغبار روند افزایشی دارد. برای اندازه‌گیری مقدار گردوغبار انتقال‌یافته توسط باد در منطقه‌ای که قابلیت تولید آن را دارد، از دبی مواد منتقل‌شده باد استفاده شده است. چپیل رابطه ۷ را برای پیش‌بینی مقدار گردوغبار منتقل شده، به صورت زیر ارائه کرده است:

$$Q_s = B \times (V - V_t)^2 \quad (7)$$

در رابطه یادشده:

Q_s : دبی گردوغبار منتقل‌شده بر حسب $g \cdot cm^{-1} \cdot sec^{-1}$ ؛

V : سرعت باد بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه در ارتفاع

یک‌متری؛

V_t : سرعت آستانه فرسایش بادی بر حسب سانتی‌متر

بر ثانیه در همان ارتفاع یک متری که مقدار آن ۴۰۰

سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود [۳۹].

همچنین، رابطه بین سرعت باد و سرعت برشی به صورت معادله ۶ بیان می‌شود:

$$\overline{U_z} = \frac{U_*}{K} \times \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (6)$$

که در رابطه ۶، پارامترهای آن به شرح زیر توضیح داده شده است:

$\overline{U_z}$: متوسط سرعت باد بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه در ارتفاع Z بر حسب سانتی‌متر؛

U_* : سرعت برشی باد بر حسب سانتی‌متر بر ثانیه؛

K : ضریب ثابت وان کارمن که مقدار آن برابر ۰/۴

است؛

Z : ارتفاعی که در آن باد اندازه‌گیری شده است و بر

حسب سانتی‌متر لحاظ می‌شود؛

Z_0 : ارتفاع مؤثر زبری سطح زمین بر حسب سانتی‌متر

(ارتفاعی که در آن سرعت باد صفر است).

توماس در سال ۱۹۷۵ نشان داد مقدار Z_0 بین ۰/۱

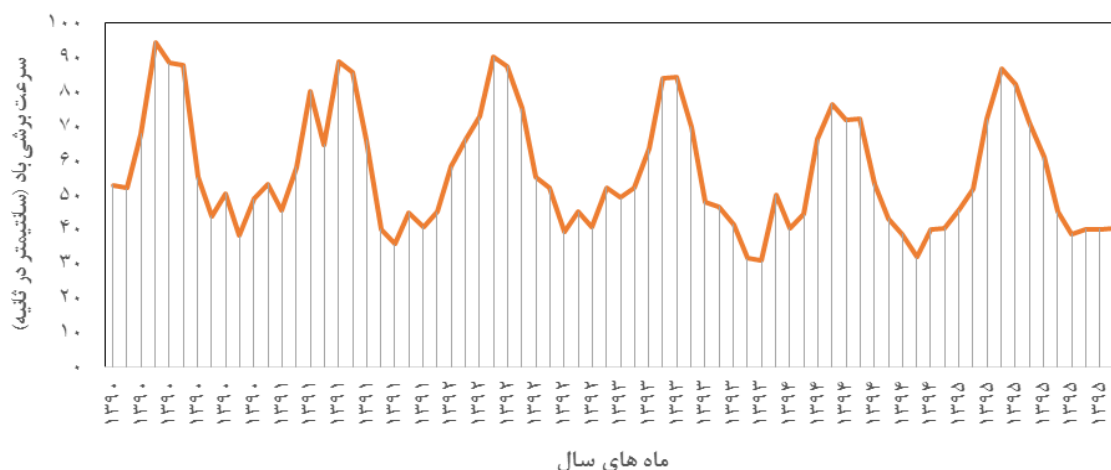
سانتی‌متر (برای علوفه به ارتفاع یک سانتی‌متر) تا نه

سانتی‌متر (برای علوفه به ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر) تغییر

می‌کند. شکل ۸ میانگین تغییرات ماهیانه سرعت برشی باد

را نشان می‌دهد که محور افقی بیان‌کننده ماه‌ها به تفکیک

هر سال است. هر سال شامل ۱۲ خط عمودی است که ۱۲



شکل ۸. میانگین تغییرات ماهیانه سرعت باد

را داشته باشد. مقدار رطوبت اولیه خاک در گزارش ژئوتکنیک خاک منطقه در خاک سطحی برابر با ۲/۰۴ گرم در سانتی‌متر مکعب آورده شده است. همان طور که از نتایج جدول ۸ مشخص است، خاک منطقه مطالعه شده تقریباً تا سال ۲۰۲۶ به طور کامل خشک شده است و قابلیت تولید گردوغبار را دارد.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی رطوبت خاک بیان می‌کند که تا سال ۲۰۲۶ میلادی خاک منطقه مطالعه شده خشک می‌شود و از سوی دیگر، داده‌های مربوط به باد در منطقه مطالعه شده اعدادی بزرگ‌تر از سرعت آستانه حرکت ذرات را نشان می‌دهد. بنابراین، با توجه به همه این مطالب، منطقه مطالعه شده پتانسیل کافی برای تولید گردوغبار دارد و این مقدار تولید گردوغبار در سال‌های مختلف به صورت جدول ۹ ارائه شده است.

می‌توان بین رطوبت باقی‌مانده در خاک و افت جریان زیرسطحی رابطه‌ای را مطابق شکل ۹ برقرار کرد که این رابطه نشان‌دهنده ارتباط لگاریتمی بین از دست رفتن رطوبت خاک با کاهش سطح آب زیرسطحی است.

تغییرات مقاومت برشی خاک منطقه مطالعه شده از گزارش ژئوتکنیک خاک به صورت شکل ۱۰ قابل ارائه است. با توجه به این نمودار هر چه قدر بر رطوبت خاک افزوده می‌شود، بر مقاومت برشی خاک اضافه می‌شود که نشان می‌دهد این پارامتر می‌تواند تأثیری کلیدی در تولید گردوغبار داشته باشد.

چپیل مقدار B را برابر ۵۲ به دست آورد، اما فینکل در مطالعه خود در تپه‌های ماسه‌ای مقدار B را از رابطه ۸ به دست آورد.

$$B = \left(\frac{0.174}{\log\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \right)^2 \times C \times \left(\frac{dP^{0.5}}{Dg} \right) \quad (8)$$

که پارامترهای رابطه ۸ به صورت زیر تعریف می‌شوند:
Z: ارتفاعی که باد اندازه‌گیری شده است (بر حسب سانتی‌متر)؛

Z₀: عامل زبری سطح زمین بر حسب سانتی‌متر؛
C: ضریبی است که بستگی به اندازه ذرات خاک دارد و مقدار آن به طور تجربی توسط رابطه ۹ به دست آورده شده است [۳۹].

$$\ln C = 4 / 79d - 0 / 47 \quad (9)$$

d: متوسط قطر ذرات خاک بر حسب میلی‌متر؛
P: چگالی هوا بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب؛
D: قطر استاندارد دانه‌های خاک که مقدار آن ۰/۲۵ تعیین شده است؛

g: شتاب گرانشی زمین که مقدار آن ۹۸۰ سانتی‌متر در مجذور ثانیه در نظر گرفته شده است.

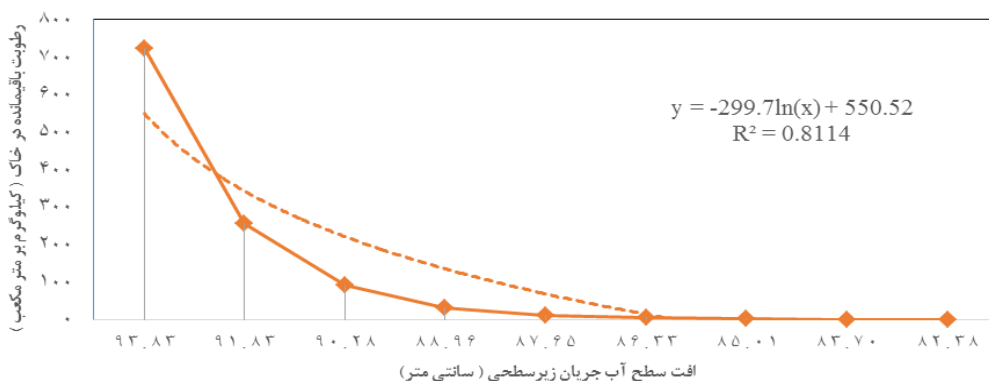
با داشتن مقدار رطوبت اولیه خاک که از آزمایشگاه خاک (طبق گزارش عملیات و مطالعات خاک) قابل به دست آوردن است و با توجه به فرض شدن شرایط اقلیمی ثابت، می‌توان دریافت که تا چه سالی خاک سطحی منطقه بدون رطوبت شده (خشک شده) تا قابلیت تولید گردوغبار

جدول ۸. پیش‌بینی مقدار رطوبت باقی‌مانده در خاک (چگالی مرطوب خاک) بر حسب kg/m^3

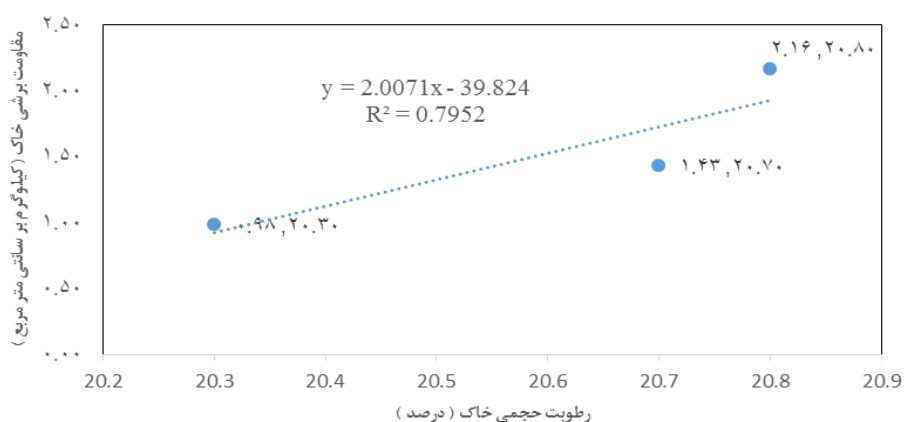
سال	تغییرات سالانه درصد رطوبت حجمی خاک	مقدار رطوبت باقی‌مانده در خاک kg/m^3 (چگالی مرطوب خاک) بر حسب
۲۰۱۱	۰/۳۵۴۲	۷۲۲/۵۶۸
۲۰۱۲	۰/۳۵۴۲۳	۲۵۵/۹۶۰۹
۲۰۱۳	۰/۳۵۴۰	۹۰/۶۱۰۱۵
۲۰۱۴	۰/۳۵۳۷	۳۲/۰۴۸۸۱
۲۰۱۵	۰/۳۵۳۵	۱۱/۳۲۹۲
۲۰۱۶	۰/۳۵۳۲	۴/۰۰۱۴
۲۰۱۷	۰/۳۵۳۰۱	۱/۴۱۲۵
۲۰۱۸	۰/۳۵۲۸	۰/۴۹۸۳
۲۰۱۹	۰/۳۵۲۵	۰/۱۷۵۶
۲۰۲۰	۰/۳۵۲۳۱	۰/۰۶۱۸۸
۲۰۲۱	۰/۳۵۲۱	۰/۰۲۱
۲۰۲۲	۰/۳۵۱۸	۰/۰۰۷
۲۰۲۶	۰/۳۵۱۶	۰/۰۰۲۶
۲۰۲۴	۰/۳۵۱۴۲	۰/۰۰۰۹۴۷
۲۰۲۵	۰/۳۵۱۲	۰/۰۰۰۳۳
۲۰۲۶	۰/۳۵۰۹	۰/۰۰۰۱۱۷

جدول ۹. متوسط تغییرات سالانه توان تولید گردوغبار

سال	تغییرات سالانه سرعت باد (سانتی‌متر بر ثانیه)	متوسط تغییرات سالانه توان تولید گردوغبار (کیلوگرم بر متر در روز)
۲۰۱۱	۶۱/۱۷۶۱	۱۴۸/۹۳۳
۲۰۱۲	۵۸/۰۲۱۱	۱۳۲/۲۵۰۱
۲۰۱۳	۶۱/۳۱۱۰	۱۴۱/۶۵۳۴
۲۰۱۴	۵۴/۳۷۸۶	۱۰۷/۷۳۹۴
۲۰۱۵	۵۱/۶۸۸۷	۸۵/۳۵۲۶
۲۰۱۶	۵۶/۳۳۶۷	۱۰۲/۷۴۹۷
۲۰۱۷	۶۷/۲۹۳۸	۱۴۸/۹۳۳۱
۲۰۱۸	۶۳/۸۲۳۲	۱۳۲/۲۵۰۱
۲۰۱۹	۶۷/۴۴۲۱	۱۴۱/۶۵۳۴
۲۰۲۰	۵۹/۸۱۶۵	۱۰۷/۷۳۹۴
۲۰۲۱	۵۶/۸۵۷۵	۸۵/۳۵۲۹
۲۰۲۲	۶۱/۹۷۰۴	۱۰۲/۷۴۹۷۹
۲۰۲۶	۷۰/۳۵۲۶	۱۴۸/۹۳۳
۲۰۲۴	۷۴/۴۳۲۴	۱۷۵/۲۳۷۴
۲۰۲۵	۶۵/۰۶۵۳	۱۲۲/۸۹۶۴
۲۰۲۶	۷۰/۳۴۰۷	۱۴۱/۴۱۱۴



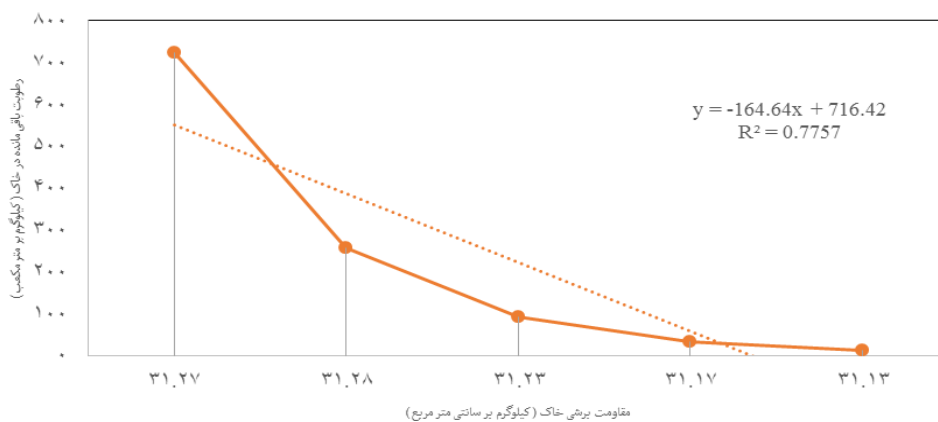
شکل ۹. رابطه بین افت جریان زیر سطحی و رطوبت باقی مانده در خاک



شکل ۱۰. رابطه بین مقاومت برشی و درصد رطوبت خاک منطقه مطالعه شده

یا به بیانی خاک به مرز خشک شدن برسد، از میزان مقاومت برشی خاک منطقه (با توجه به بافت و ساختمان خاک که در تحقیق حاضر به آن اشاره شد) کاسته می شود و در نتیجه خاک پتانسیل تولید گردوغبار را دارد.

با توجه به نتایج به دست آمده از مدل سازی می توان بین رطوبت باقی مانده در خاک و مقاومت برشی آن رابطه ای مطابق شکل ۱۱ ایجاد کرد و این رابطه بیان می کند که هر چقدر از رطوبت باقی مانده در خاک کم شود



شکل ۱۱. رابطه بین مقاومت برشی و رطوبت باقی مانده در خاک

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی یافتن ارتباط بین تغییرات سطح آب زیرزمینی با پتانسیل تولید گردوغبار در حوضه آبریز هامون - هیرمند پرداخته شد. به این منظور، تعداد شش سناریو با توجه به شرایط منطقه و در نظر گرفتن معیارهایی همچون زیست‌محیطی، شرب، کشاورزی و صنعت در نرم‌افزار WEAP ارزیابی شد. پس از انجام تحلیل‌های مربوط به آن، سناریوی برتر و سناریوی افزایش راندمان تجهیزات کشاورزی وابسته به آب زیرزمینی انتخاب شد. پس از به‌کارگیری سناریوی یادشده، در پایان افق طرح، مقدار حجم آب ذخیره چاهک به مقدار ۲۱۶۶۲۲۹/۸ مترمکعب کاهش یافت که این مقدار افت تقریباً برابر با ۲۹ سانتی‌متری بود. همچنین، مقدار کل نیاز تأمین‌نشده در این سناریو برابر با ۱۸۰۴/۸۳ میلیون مترمکعب تعیین شد و نتایج نشان داد بیشترین پاسخگویی را نسبت به بخش زیست‌محیطی اعمال کرده است. علاوه بر این، مقدار افت سطح آب زیرزمینی به عنوان حالت بحرانی به مدل HYDRUS - 1D برای مدل‌سازی رطوبت خاک منطقه وارد شد. در قسمت شبیه‌سازی رطوبت خاک منطقه مشاهده شد که رطوبت خاک تا پایان سال افق طرح کاهش می‌یابد. سال پایه شبیه‌سازی، ۲۰۱۱ در نظر گرفته شد چراکه مقدار کل پارامترهای شبیه‌سازی لازم، در این سال موجود بود. افق زمانی طراحی، ۲۰ سال در نظر گرفته شد و ملاحظه شد که بیشترین مقدار کاهش رطوبت در سال ۲۰۱۹ خواهد بود و در سال ۲۰۲۶ خاک سطحی منطقه کاملاً خشک می‌شود و چسبندگی بین ذرات خاک کم و در نتیجه مقاومت برشی خاک به مقدار ۳۰/۶۵۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع کاهش می‌یابد. از آنجا که در منطقه مطالعاتی یادشده سرعت باد از سرعت آستانه حرکت ذرات خاک بیشتر است، منطقه توان تولید گردوغبار را دارد. درخور یادآوری است که توان تولید گردوغبار با سرعت باد و نیز زبری سطح زمین رابطه مستقیم دارد و برای آنکه بتوان با تولید گردوغبار مقابله کرد، باید هر یک از پارامترهای سرعت باد و زبری سطح زمین را مدیریت کرد. مدیریت افت سطح آب زیرسطحی به منظور نگهداشت رطوبت خاک، یکی از راهکارهای کارآمد در افزایش زبری زمین با افزایش شاخص پوشش گیاهی در منطقه است. با توجه به اینکه در منطقه مطالعاتی توان تولید گردوغبار در ماه‌های تابستان بیشتر از بقیه ماه‌ها است، بنابراین در ماه‌های یادشده با توجه به

غالب‌شدن بادهای ۱۲۰ روزه سیستان پیش‌بینی شد تا سال ۲۰۲۶ مقدار پدیده گردوغبار بیش از ۸۸۰ کیلوگرم در متر در روز باشد.

منابع

- [1]. Subramanya, K. Engineering Hydrology. 1st ed. Mashhad: Hashemi, S, R; 2003. [Persian]
- [2]. Kardvani, P. The desert (salt) of central Iran and its neighboring areas. 1st ed. Tehran: Tehran University Press; 2007. [Persian]
- [3]. Elmore, A. Kaste, J. Okin, G. Fantle, M. Groundwater influences on atmospheric dust generation in deserts. *Journal of Arid Environments*. 2008; 72(1): 1753– 1765.
- [4]. Maki T, Hara K, Iwata A, Lee KC, Kawai K, Kai K, Kobayashi F, Pointing SB, Archer S, Hasegawa H, Iwasaka Y. Variations in airborne bacterial communities at high altitudes over the Noto Peninsula (Japan) in response to Asian dust events. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017 Oct 9;17(19):11877-97.
- [5]. Maki T, Kurosaki Y, Onishi K, Lee KC, Pointing SB, Jugder D, Yamanaka N, Hasegawa H, Shinoda M. Variations in the structure of airborne bacterial communities in Tsogt-Ovoo of Gobi desert area during dust events. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2017 Apr 1;10(3):249-60.
- [6]. Bi J, Huang J, Shi J, Hu Z, Zhou T, Zhang G, Huang Z, Wang X, Jin H. Measurement of scattering and absorption properties of dust aerosol in a Gobi farmland region of northwestern China—a potential anthropogenic influence. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017 Jun 15;17(12):7775.
- [7]. Zangane, M. Meteorology of dust storms in Iran. *Two Applied Meteorological Quarterly*. 2014; (1): 1-12. [Persian]
- [8]. Yasrebi, S. Unsaturated soil mechanics. 1st ed. Tehran: Knowledge Shape; 2007. [Persian]
- [9]. Abbasi, H, R. Baranizade, M, R. Khaksarian, F. Gohardost, A. A simple method for determining the susceptibility of land to wind on the basis of field data of the sampling center of Sistan. *Third National Conference on Wind Erosion and Dust Hurricanes*. 2013; (1):1-10. [Persian]
- [10]. Maher, B, A. Prospero, J, M. Mackie, D. Gaiero, D. Hesse, P, P. Balkanski, F. Global connections between aeolian dust, climate and ocean biogeochemistry at the present day and at the last glacial maximum. *Earth-Science Reviews*. 2010; (1): 61–97.

- [11]. Servati, M, R. Yosefiroshan, M, R. Issues related to the transfer of sand and fine particles (dust) (by wind in dry and low water areas. *Geographical Information (Sepehr)*.2011; (21):16-35. [Persian]
- [12]. Kyaniselmy, E. Honarbakhsh, A. Abdolahi, KH. Sensitivity analysis of soil moisture model for continuous simulation in Beheshtabad Basin. *Journal of Ecohydrology*. 2017; (4): 1117-1127. [Persian]
- [13]. Pointing, S, B. Belnap, J. Disturbance to desert soil ecosystems contributes to dust-mediated impacts at regional scales, *Biodivers Conserv*. 2014; 1659–1667.
- [14]. Ragabpor, H. Mahmoodabadi, M. Study of the severity of wind erosion in two soils with different particle size. *International Conference on Plant, Water, Soil, and Soil Modeling*.2013; ;(2):18-28. [Persian]
- [15]. Salehi, M, H. Sfandyarpor, A. Mohajer, R. Bagheri, M. *Water and soil protection*. 1nd ed. Tehran: Payam Noor university; 2013.
- [16]. Ghobadyan, R. Bahrami, Z. DabaghBaghry, S. Application of management scenario in prediction of groundwater fluctuations with MODFLOW conceptual and mathematical model (Case Study: Khazal Plain - Nahavand). *Journal of Ecohydrology*. 2016; (3): 303-319. [Persian]
- [17]. Mohammadi, A. Delbari, M. Chari, M, M. Comparison of SWAP and HYDRUS-1D models in simulating water movement and salt concentration in soil. *National Conference on Irrigation and Reduction of Evaporation*.2013 ; (12):12-22. [Persian]
- [18]. Asar, A. Derakhshannegad, Z. Soltanimohammadi, A. Goshe, M. Soil moisture simulation with HYDRUS-1D model in wheat cultivation conditions. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 2014 ; (37):81-92. [Persian]
- [19]. X. Guan, J. Huang¹, Y. Zhang¹, Y. Xie¹ and J. Liu , The relationship between anthropogenic dust and population over global semi-arid regions. *Atmos Chem. Phys.*, , 5159–5169, 2016.
- [20]. Song H, Wang K, Zhang Y, Hong C, Zhou S. Simulation and evaluation of dust emissions with WRF-Chem (v3. 7.1) and its relationship to the changing climate over East Asia from 1980 to 2015. *Atmospheric Environment*. 2017 Oct 1;167:511-22.
- [21]. H. Shen, J. Abuduwail, A. Samat. L. Ma, A review on the research of modern aeolian dust in Central Asia, *Arab J Geosci* (2016) 9: 625.
- [22]. Nakhaei S. Water resources allocation considering the effects of climate change in the catchment area (Case study: Sarbaz River). Master's Thesis in Civil Engineering. 2017 July. [Persian]
- [23]. Alizadeh A. Investigation of groundwater drawdown effect on salinity in close sub-basins with different qualities and surface/groundwater management to control this phenomena. Master's Thesis in Civil Engineering. 2015 Sep. [Persian]
- [24]. Ajamzade, A. *WEAP model application guide*. 1nd ed. Tehran: Islamic Azad University; 2015. [Persian]
- [25]. Ramrodi, H, A. Ajdarimoghadam, M. Management of water resources of Pearsarab Uorki region of Sistan and Baluchestan province in case of increasing water requirements by assessing WEAP model. *Research in Civil Engineering, Architecture, Urbanism and Sustainable Environment*.2015; 1-13. [Persian]
- [26]. Shahidi, A. Ahmadi, M. *Video tutorial model HYDRUS*. 1nd ed. Tehran: Kalk Zarin; 2014. [Persian]
- [27]. *Water Resources Development Report*. 1nd ed. Tehran: Sistan and Baluchestan Regional Water Company; 2015. [Persian]
- [28]. Khosravi, M. Long-Term Spatial Analysis of Lake Hamoon. *Iranian Water Resources Research Journal*.2010 ;(6):68-79. [Persian]
- [29]. Mirakzehi K, Pahlavan-Rad MR, Shahriari A, Bameri A. Digital soil mapping of deltaic soils: A case of study from Hirmand (Helmand) river delta. *Geoderma*. 2018 Mar 1;313:233-40.
- [30]. Ashrafi ZN, Ghasemian M, Shahrestani MI, Khodabandeh E, Sedaghat A. Evaluation of hydrogen production from harvesting wind energy at high altitudes in Iran by three extrapolating Weibull methods. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018 Jan 17.
- [31]. Kamali S, Mofidi A, Zarrin A, Nazaripour H. Sensitivity studies of the forth-generation regional climate model simulation of dust storms in the Sistan plain, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2017 Jun 1;3(2):769-81.
- [32]. Ashrafi K, Motlagh MS, Neyestani SE. Dust storms modeling and their impacts on air quality and radiation budget over Iran using WRF-Chem. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2017 Nov 1;10(9):1059-76.
- [33]. Alizadeh-Choobari O, Zavar-Reza P, Sturman A. The “wind of 120 days” and dust storm activity over the Sistan Basin. *Atmospheric research*. 2014;143:328-41.

- [34]. Zamani, Y. Managing the utilization of water resources, taking into account the need for stabilization of the microstates and evaluating different scenarios. Master's Thesis in Civil Engineering. 2015. [Persian]
- [35]. Report of first phase water supply studies in Sistan Plain (Sistan Subsoil Water Resources. Regional water company in Sistan and Baluchestan province.2013[Persian]
- [36]. Meteorological Organization of Sistan and Baluchestan Province, 1395. [Persian]
- [37]. Amiri, Sh. Mahdavamoghadam, M. Investigation of water resources management in the catchment area using WEAP model (Case study of Hamoon Hearmand Basin). National Conference on Water Crisis Advances in Iran and the Middle East.2014 ;(2):1-9. [Persian]
- [38]. Chepil, W, S. Woodruff, N, P. The Phsics of Wind Erosion and Its Control. 1nd ed. United States: Department of Agriculture; 2010.
- [39]. Operations Report and Soil Mechanics Studies of Sistan Regional Administrative Park Project.2014. [Persian]