

## مدل پویایی سیستم مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و عملکرد تغذیه مصنوعی (مطالعه موردی: دشت نسا بم، کرمان)

مهدي شاهرخي ساردو<sup>۱</sup> و نويد جلال کمالی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

ایران در کمربند منطقه خشک و نیمه‌خشک جهان قرار دارد. اعمال بازتخصیص منابع آب علاوه بر برداشت بیش‌ازحد از چاه‌های غیرمجاز، افزایش دما، شدت تبخیر و تعرق و توسعه کشاورزی بر افت شدید سفره‌های زیرزمینی دامن زده و بحران کم‌آبی به چالش تبدیل شده است. در پژوهش پیش رو، با به‌کارگیری یک مدل پویایی سیستم‌ها، با بررسی پارامترهای مؤثر در ذخایر آب زیرزمینی دشت، شیوه تغذیه مصنوعی به‌عنوان راه حلی مؤثر در حفظ و تقویت تراز سطح آب زیرزمینی، بررسی و به مدیران حوزه مدیریت منابع آب معرفی شد. برای شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مدل تهیه‌شده، از داده‌های دشت نسا بم استفاده شد. در دشت نسا بم، احداث سد مخزنی نسا برای تأمین آب شرب و صنعت شهر بم و در نتیجه، بازتخصیص آب، موجب کمبود شدید منابع آبی در روستاها و در نهایت، افزایش مهاجرت به شهرها شده است. برای ارزیابی نتایج سناریوهای مدیریتی ارائه‌شده، بارش پیش‌بینی‌شده توسط مدل گردش عمومی جو GFDL-ESM2M تحت سناریوی RCP4.5 برای دوره زمانی آینده نزدیک ۲۰ سال، با یک مدل ARMAX به رواناب تبدیل شد. نتایج مدل پویایی سیستم نشان داد ادامه روند برداشت کنونی از منابع زیرزمینی دشت، در سال‌های آینده، افت تراز سطح آب معادل  $\frac{1}{3}$  متر نسبت به وضع موجود و افتی معادل ۴۱ متر نسبت به سال ۱۹۷۹ دارد. همچنین، نتایج نشان داد پخش حدود ۶۰ درصد آب مازاد سد نسا براساس برنامه بهره‌برداری از مخزن، در بیست سال به کاهش روند افت تراز آب زیرزمینی منطقه منجر می‌شود و کسری بودجه زیرزمینی را از  $\frac{65}{48}$  میلیون مترمکعب به حدود  $\frac{35}{17}$  میلیون مترمکعب می‌رساند. سادگی فهم و اصلاح مدل در واکنش به تغییرات سیستم در مقایسه با مدل‌های پیچیده، از دیگر قابلیت‌های مفید مدل ارائه‌شده بوده و بهره‌برداران و برنامه‌ریزان حوزه آب می‌توانند از آن استفاده کنند.

**واژه‌های کلیدی:** پویایی سیستم، تغذیه مصنوعی، دشت نسا بم، مدیریت منابع آب.

**ارجاع:** شاهرخي ساردو م. و جلال کمالی ن. ۱۴۰۰. مدل پویایی سیستم مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و عملکرد تغذیه مصنوعی (مطالعه موردی: دشت نسا بم، کرمان). مجله پژوهش آب ایران. ۱۱۸-۱۰۹:۴۱.

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران - مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، کرمان، ایران.

\* نویسنده مسئول: [njalalkamali@gmail.com](mailto:njalalkamali@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۲

## مقدمه

ایران، کشوری با اقلیمی به‌طور عمده، گرم و خشک است. رشد سریع جمعیت، مهم‌ترین عامل کاهش سرانه آب تجدیدشونده کشور در قرن گذشته بوده است. جمعیت ایران در این هشت دهه، از حدود ۸ میلیون نفر در سال ۱۳۰۶ به ۸۱ میلیون نفر تا پایان سال ۱۳۹۶ رسیده است. بر این اساس، میزان سرانه آب تجدیدپذیر سالانه کشور از میزان حدود ۱۳۰۰ مترمکعب در سال ۱۳۰۰ به حدود ۱۴۰۰ مترمکعب در سال ۱۳۹۲ تقلیل یافته است و در صورت ادامه این روند، وضعیت در آینده، بدتر می‌شود (مدنی، ۲۰۱۴). در دهه‌های اخیر، به تکنیک تحلیل سیستم‌ها در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، توجه جدی شده است. پویایی سیستم، ابزاری مدیریتی است که سیستم‌های پیچیده منابع آب را شبیه‌سازی می‌کند که در آن، ارتباط عناصر سیستم به‌صورت روابط علت و معلولی بیان می‌شود (نیازی و همکاران، ۲۰۱۴). پویایی سیستم در گستره وسیعی از مسائل مورد استفاده واقع شده است که از جمله به راهبرد برنامه‌ریزی و طراحی یکپارچه (فارس‌تر، ۱۹۶۱؛ ولینز، ۱۹۸۰)، رفتارهای اقتصادی (استرمن، ۱۹۸۳) و انرژی و محیط (فورد و لوبر، ۱۹۸۹) می‌توان اشاره کرد (نیازی و همکاران، ۲۰۱۴). روش پویایی سیستم‌ها، روشی براساس روابط بازخوردی است که ضمن ایجاد مشارکت کاربران مدل در توسعه آن، سادگی و سرعت زیادی دارد که به انتخاب این شیوه شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار ونسیم در این پژوهش منجر شده است. در این زمینه، رودیان‌تو و همکاران (۲۰۱۶)، یک مدل پویایی سیستم را برای مدیریت منابع آب پایدار برای منطقه‌ای در اندونزی ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی مدل نشان داد روش پویایی سیستم‌ها می‌تواند برای شبیه‌سازی تعداد زیادی از سناریوهای اعمال سیاست‌های تخصیص آب برای دستیابی به مدیریت پایدار منابع آب با استفاده از منابع در دسترس به کار برده شود. کلیفورد هلمز و همکاران (۲۰۱۴)، مدل پویایی سیستم‌ها را برای تشریح معضلات عرضه و تقاضای آب برای منطقه‌ای شهری در آفریقای جنوبی به کار بردند. در مدل آنها، جمع‌آوری آب باران به‌عنوان جایگزینی برای عرضه، در قالب یک ساختار K-DEM، بر مبنای پویایی سیستم‌ها ارائه شده است. ژيجوان و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل پویایی سیستم را برای مطالعه عرضه و تقاضای

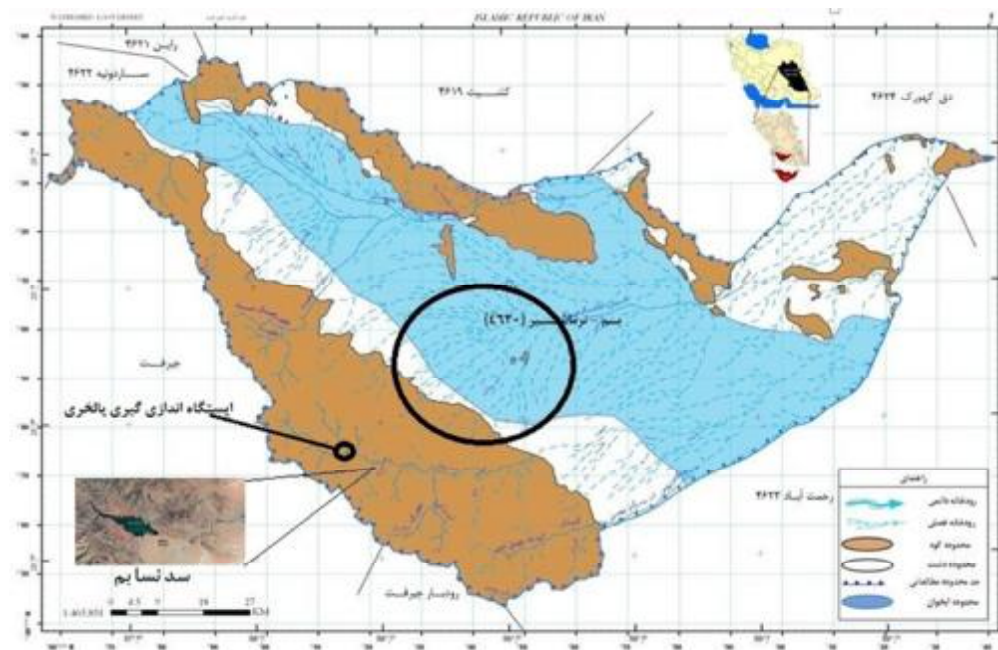
منابع آب در بخشی از استان ژین جیانگ چین با چهار رودخانه اصلی ارائه کردند. نتایج نشان داد ظرفیت منابع آب منطقه، امکان تأمین نیازهای توسعه اقتصادی اجتماعی را در سال‌های اخیر ندارد و باید برای تأمین منابع آب پایدار و توسعه اقتصادی، سیاست‌های حفظ آب افزایش یابد. آراجو و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل پویایی سیستم را برای ارزیابی سیستم منابع آب در منطقه نیمه‌خشک ایالت پارابیا واقع در شمال شرقی برزیل ایجاد کردند. مدل ساخته‌شده ثابت کرد تأمین آب به تعرفه‌های مبتنی بر کمبود، استفاده مجدد از فاضلاب و انتقال آب بین حوضه‌ای حساس است. سوآن و همکاران (۲۰۱۵)، مدلی برپایه پویایی سیستم‌ها برای منطقه‌ای در کره جنوبی توسعه دادند و سناریوهای مختلف، مانند توسعه منابع آب جایگزین را در قالب مدل پویایی سیستم اعمال کردند. ناصری و همکاران (۲۰۱۷)، مدل پویایی سیستم را برای دشت تبریز به‌عنوان ناحیه نیمه‌خشک ایران به کار بردند. مدل ارائه‌شده، میزان عرضه و کسری بیلان صنعت، شرب و کشاورزی را تعیین کرد و راهکارهایی را برای حفظ سطح آب زیرزمینی دشت ارائه داد. مدل‌سازی منابع آب سطحی و اتصال آن به آبخوان در قالب زیرسیستم‌های مجزا با در نظر گرفتن عوامل مؤثر جانبی، ایده‌ای است که این پژوهش برپایه آن استوار شده است؛ به عبارت دیگر، یکی از جنبه‌های نوآوری این پژوهش، مدیریت تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی با روش پویایی سیستم است و با ایجاد یک مدل پویایی سیستم، توازن سفره آب زیرزمینی دشت بم، مدل‌سازی و سیاست‌های تغذیه مصنوعی اعمال و ارزیابی شده است. با توجه به بحران و افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی منطقه، این دشت به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. با توجه به نفوذپذیری زیاد مخروطه‌افکنه‌های واقع در پایین‌دست مخزن سد نسا، سیاست تغذیه مصنوعی با روش پخش سیلاب به مدل معرفی شد.

## خصوصیات منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، قسمتی از حوضه رودخانه نسا واقع در بخش جنوبی آبخوان بم به نام دشت نسا است. موقعیت جغرافیایی آن بین طول ۵۷ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۲۹ دقیقه شرقی و ۲۸ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت

۲۲۸ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است که به‌طور عمده، با زهکشی توسط دشت بم، زمینه تغذیه و آبدهی چاه‌های پایین‌دست را فراهم می‌کند. برای تأمین آب شرب شهرهای بم و نرماشیر به میزان ۴۰ میلیون مترمکعب، تأمین بخشی از آب کشاورزی اراضی پایین‌دست و تأمین آب صنعت، معادل ۲۰ میلیون مترمکعب، سد مخزنی نسا از نوع سنگریزه‌ای احداث شد (وزارت نیرو، ۱۳۹۶). متأسفانه، به‌علت خشکسالی‌های متوالی و اولویت مصارف شرب توأم با افزایش نیاز، زمینه تأمین حقایق زیست‌محیطی فراهم نشده و تغذیه‌نشدن دشت به‌علت جلوگیری از جریان آب به پایین‌دست توسط سد نسا بم، کاهش شدید تراز آب زیرزمینی در دشت را در پی داشته است

کلی این محدوده مطالعاتی، ۹۶۵۸/۱۸ کیلومتر مربع است. محدوده دشت مورد مطالعه، محل سد و ایستگاه اندازه‌گیری دبی رودخانه در شکل ۱ نشان داده شده است. ارتفاع متوسط دشت از سطح دریا حدود ۸۰۰ متر است. منطقه مورد مطالعه، تابستان‌های گرم و طولانی و زمستان‌های نسبتاً معتدل دارد. این منطقه در مناطق کویری ایران قرار دارد و جزء مناطق خشک و نیمه‌گرمسیری به شمار می‌رود. متوسط بارش سالانه در ایستگاه بم، ۵۶/۵ میلی‌متر و در ایستگاه نرماشیر، ۳۵/۵ میلی‌متر است. متوسط تبخیر سالانه محدوده مطالعاتی در پهنه ارتفاعات، ۳۳۶۴/۴۳ میلی‌متر و در پهنه دشت، ۴۲۳۴/۷۸ میلی‌متر محاسبه شده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۶). براساس مطالعات هیدرولوژی، متوسط آبدهی درازمدت رودخانه نسا، ۷/۲۳ مترمکعب بر ثانیه یا حدود

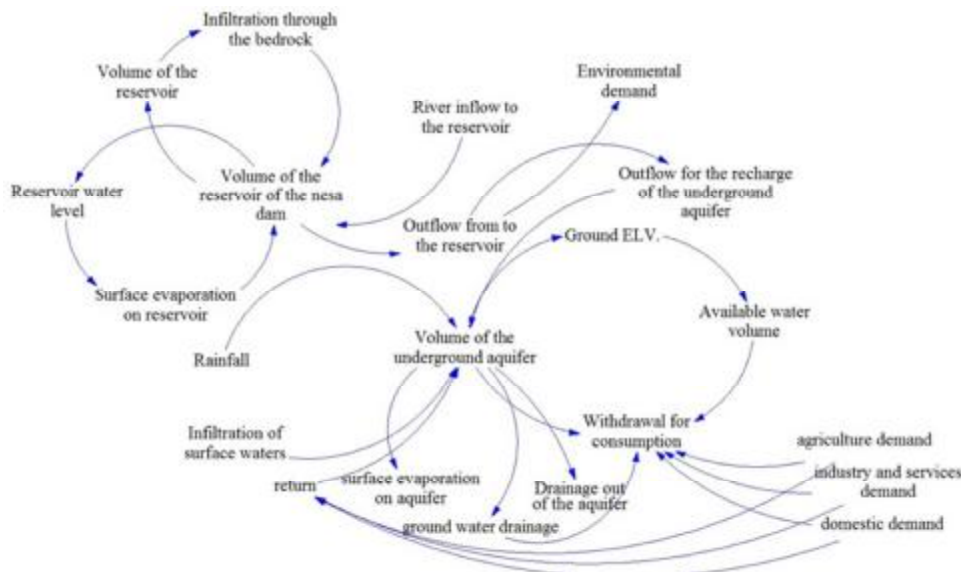


شکل ۱- موقعیت دشت مورد مطالعه و منطقه با قابلیت زهکشی زیاد (وزارت نیرو، ۱۳۹۶)

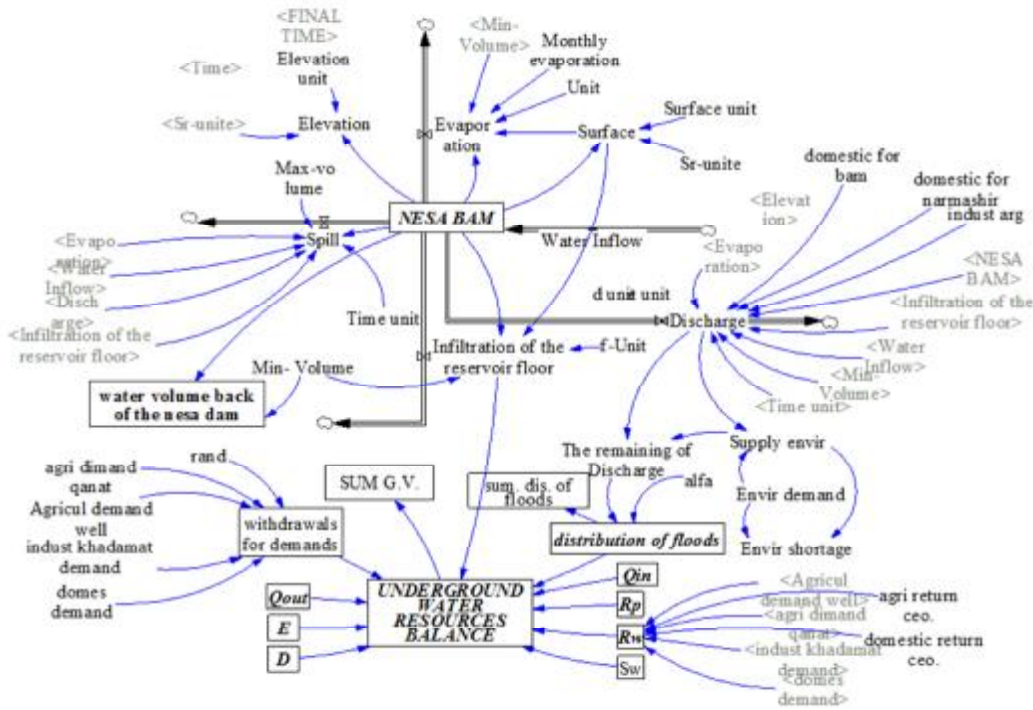
مدل شامل دو بخش مخزن سد و بیلان آب زیرزمینی دشت است که عملیات پخش سیلاب به‌عنوان رابط بین این بخش‌ها عمل می‌کند. در شکل ۳، ساختار مدل ایجادشده در محیط نرم‌افزار VENSIM براساس متغیرهای دیاگرام علی و معلولی نشان داده شده است.

#### مدل مفهومی پویایی سیستم‌ها و فرمول‌بندی

با تعریف متغیرهای حالت و نرخ و سایر پارامترهای مؤثر، دیاگرام علی و معلولی بیلان دشت به‌صورت شکل ۲ در محیط نرم‌افزار ایجاد؛ سپس نمودار علیتی به‌صورت استاندارد در نرم‌افزار پویایی سیستم تبدیل شد.



شکل ۲- دیاگرام روابط علی و معلولی (ساخته شده در محیط نرم‌افزار vensim)



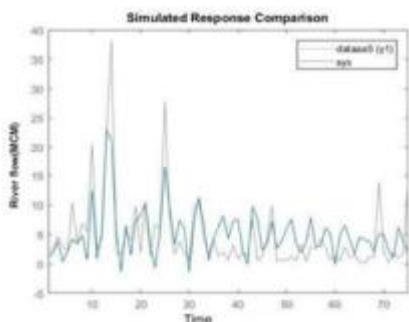
شکل ۳- مدل پویایی سیستم (ساخته شده در محیط Vensim)

### منابع آب سطحی

مهم‌ترین منبع تأمین آب سطحی منطقه، رودخانه ناسات که از دامنه‌های شمالی سلسله‌جبال بارز از ارتفاعات ۳۷۵۰ متری سرچشمه می‌گیرد. برای سنجش سناریوهای مدیریتی، این سناریوها برای آینده اعمال و نتایج بررسی می‌شود تا از این رهگذر، بهترین سناریوی مدیریتی استخراج شود؛ اما از آنجا که در آینده ممکن است شرایط

اقلیمی متفاوتی بر منطقه تحمیل شود، در این پژوهش از نتایج مدل‌های تغییر اقلیم استفاده شد. ابتدا، متغیرهای بارش، حداکثر و حداقل دما با استفاده از مدل GFDL-ESM2M تحت سناریوهای RCP پیش‌بینی شد. علت انتخاب GFDL-ESM2M این بود که به‌تازگی، با NOAA و GGDL برای درک بهتر چرخه بیوشیمیایی زمین، از جمله اقدامات انسان و تعامل با سیستم آب‌وهوا توسعه

(وزارت نیرو، ۱۳۹۶). جدول ۱، توزیع ماهانه نیاز بخش کشاورزی دشت را نشان می‌دهد.

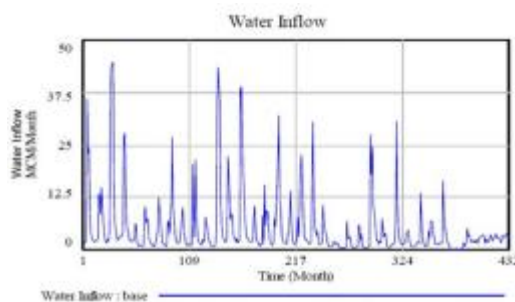


شکل ۴- مقایسه شبیه‌سازی ARMAX و داده‌های واقعی

یافته است (رجبی و همکاران، ۱۳۹۹)؛ سپس براساس سناریوی نسل پنجم در حالت متوسط RCP4.5، اطلاعات پیش‌بینی بارش برای دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۵ استخراج و با یک مدل جعبه سیاه آماری ARMAX با معرفی بارش به‌عنوان متغیر خارجی X به رواناب تبدیل و به‌صورت ورودی به مدل پویایی سیستم فراخوانی شد. شکل ۴، دقت خوب نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تاریخی را برای آورد رودخانه برای یک بازه انتخابی نشان می‌دهد. اراضی دشت نسا معادل ۹۳۲۵ هکتار است که بیشتر از ۵۲/۷ درصد آن، اراضی کشاورزی دایر است. از مجموعه اراضی مذکور، ۴۹/۲۶ درصد کشت گندم و جو، ۲۱ درصد یونجه و بقیه، ذرت، حنا و صیفی جات است.

جدول ۱- توزیع ماهانه نیاز بخش کشاورزی (وزارت نیرو، ۱۳۹۶)

نیاز کشاورزی (میلیون مترمکعب)							
مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	مهر	جمع کل:
۲۹/۲۵	۲۳/۵۹	۲۲/۶۵	۱۷/۹۱	۱۷/۲۹	۱۹/۷۱	۲۹/۲۵	
فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	فروردین	
۲۸/۴۲	۲۸/۱۵	۳۱/۴۰	۳۴/۱۵	۳۸/۴۲	۳۶/۳۰	۲۸/۴۲	۳۲۷/۲



شکل ۵- توزیع نیاز ماهانه زیست‌محیطی رودخانه

### نیاز زیست‌محیط

با توجه به شرایط اقلیمی و زیست‌محیطی منطقه، با استفاده از روش مونتانا، که روشی مبتنی بر شاخص‌های هیدرولوژیکی است، نیاز زیست‌محیطی رودخانه محاسبه شد. ابتدا، متوسط آورد سالانه رودخانه محاسبه و برای ماه‌های تر، ۱۰ درصد و برای ماه‌های خشک، ۳۰ درصد آورد رودخانه به‌عنوان مقدار عرضه مورد نیاز زیست‌محیطی محاسبه شد (اعلمی و همکاران، ۱۳۹۳). شکل ۵، نیاز ماهانه زیست‌محیطی رودخانه را نشان می‌دهد.

### تعریف سناریوها

برای اجرای مدل، متغیرهای تأثیرگذار ذیل در سناریوها در ترکیب با یکدیگر در نظر گرفته شده است:

- افزایش ۱۰ درصد مصارف شرب و صنعت؛
- اعمال برنامه حجمی خروجی از چاه‌ها؛
- کاهش سطح زیر کشت محصولات با مصرف آب زیاد؛
- افزایش بهره‌وری کشاورزی (محدوده ۱۰-۲۰ درصد)؛
- لایروبی قنات‌ها و افزایش حجم خروجی از قنات به میزان ۲۰۰ میلیون مترمکعب در سال و
- تغذیه از طریق پخش سیلاب.

### بیان دشت

در برآورد بیان آب زیرزمینی دشت، نفوذ بارندگی به آبخوان دشت، نفوذ جریان‌های سطحی و برگشت آب از مصارف کشاورزی، آشامیدنی و صنعتی به‌عنوان متغیر ورودی و برداشت از چاه‌ها، قنات، زهکشی‌ها و رواناب‌ها به‌عنوان متغیر خروجی به مدل معرفی شد. جدول ۲، متوسط متغیرهای مذکور را در بیان دشت نشان می‌دهد. همچنین، نیازهای شرب و صنعت برای میزان تعیین‌شده در اهداف طرح، در مدل معرفی شد.

جدول ۲- بیلان آب زیرزمینی آبخوان‌های آبرفتی محدوده مطالعاتی بم-نرماشیر (وزارت نیرو، ۱۳۹۶)

تغییرات حجم ذخیره	برداشت						تغذیه				دشت نساب
	جمع تخلیه	خروجی زیرزمینی	تبخیر از آبخوان	زهکشی	برداشت از چاه‌ها و قیوتات	جمع تغذیه	نفوذ از مصارف شرب و صنعت	نفوذ از مصارف کشاورزی	نفوذ جریان‌های سطحی	نفوذ از بارندگی	
-۶۴/۰۸	۷۴۲/۹۵	۳/۵۶	۰	۰	۷۳۹/۳۰	۶۷۸/۸۷	۵۶/۲۳	۱۸۹/۳۱	۱۷۳/۶۶	۶/۲۱	۱۹۸/۵۶

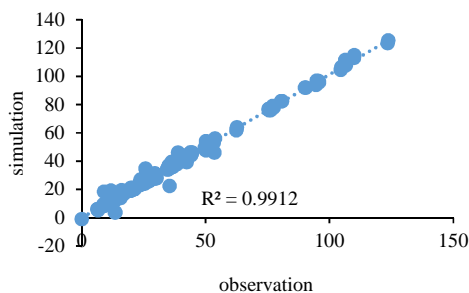
### آزمون مقاومت

آزمون مقاومت، عدم اطمینان مدل را تجزیه و تحلیل می‌کند و حساسیت نتایج برآوردشده را نسبت به تغییر مشخصات مدل نشان می‌دهد. عدم اطمینان درباره اندازه نتایج برآوردشده مدل پایه کاهش می‌یابد؛ اگر مدل آزمون مقاومت، تخمین نقطه مشابه یا مشابه آن را با خطاهای استاندارد کوچک‌تر پیدا کند. برای آزمون مقاومت مدل، مراحل زمانی انجام‌دادن شبیه‌سازی، ۶، ۴ و ۱/۵ ماه کاهش داده شد. شکل ۷ نشان می‌دهد میانگین تغییرات نرخ متغیرهای اصلی، بسیار اندک است. درحقیقت، کوتاه‌کردن مراحل زمانی، تأثیر کمی بر نتایج دارد و این امر، نشان‌دهنده قدرت مدل است.

### جدول ۳- همبستگی بین مقادیر واقعی استخراج‌شده از

#### گزارش مطالعات دشت و مقادیر شبیه‌سازی مدل vensim

متغیر	میانگین خطا	همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی
برداشت از چاه‌ها	۰/۱۹	۰/۸۱
بودجه آب زیرزمینی	۰/۱۵	۰/۹۴
ذخیره مخزن	۰/۱۶	۰/۹۴



شکل ۶- همبستگی خروجی نتایج شبیه‌سازی و داده‌های

واقعی تراز آب زیرزمینی

### مدل‌سازی و شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار

#### VENSIM DSS

در این مرحله، ابتدا، مدل مفهومی در محیط نرم‌افزار ساخته شد. مقادیر مصارف و منابع در حوضه سد مخزنی نسا به صورت ماهانه در قالب فایل اکسل به مدل، فراخوانی و عملکرد حوضه به لحاظ تأمین نیازهای مد نظر و حفظ سطح تعادلی آب زیرزمینی بررسی شد

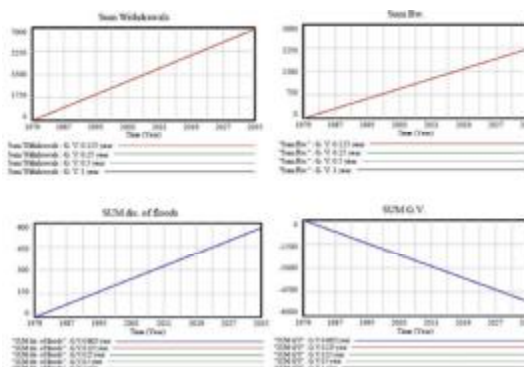
#### واسنجی و صحت‌سنجی مدل

با انتخاب بازه مناسب برای ضرایب نفوذ سیلاب پخش‌شده در پایین‌دست (۰/۷-۰/۳)، برگشت آب کشاورزی (۰/۵-۰/۱۵)، برگشت مصارف شرب و صنعت (۰/۹-۰/۶) و بازده مصارف کشاورزی (۰/۹-۰/۶)، فرایند واسنجی انجام و بهینه‌ترین مقدار برای متغیرهای مذکور انتخاب و به مدل معرفی شد. برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تاریخی، آزمون برازش و آزمون مقاومت روی نتایج انجام شد. برای ارزیابی مدل، معیارهای میانگین خطا، میانگین خطای مطلق و جذر میانگین مربعات خطا به کار رفت. جدول ۳ نشان می‌دهد همبستگی بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و خروجی مطالعات بیلان آبی دشت وجود دارد. در شکل ۶، متوسط تراز آب در دشت براساس حجم آب زیرزمینی محاسبه‌شده در فرایند شبیه‌سازی و نتایج بیلان آبی دشت مقایسه شده است که همبستگی خوبی را نشان می‌دهد. در جدول ۴، نرخ خطای بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های واقعی براساس نتایج بیلان آبی دشت ارائه شده است. با توجه به اینکه درصد خطا در مقادیر ذکرشده، کمتر از ۱۰ درصد است، همبستگی خوبی بین نتایج مدل شبیه‌سازی و نتایج واقعی وجود دارد (سون و همکاران، ۲۰۱۷).

جدول ۴ - نرخ خطای بین مقادیر واقعی و مقادیر شبیه‌سازی مدل ونسیم

بودجه آب زیرزمینی			حجم جریان قابل تغذیه			
مقادیر واقعی (میلیون مترمکعب)	مقادیر شبیه‌سازی (میلیون مترمکعب)	نرخ خطا	مقادیر واقعی (میلیون مترمکعب در سال)	مقادیر شبیه‌سازی (میلیون مترمکعب در سال)	نرخ خطا	
۲۰۱۴	-۶۵	-۸/۹۸	۷	۷/۳۹	+۵/۶۰	
۲۰۱۵	-۶۰	-۴/۴۸	۹/۱	۹/۹۸	+۹/۸۶	
۲۰۱۶	-۷۰	-۸/۰۹	۹/۵	۱۰/۰۸	+۶/۰۹	

(۲۰۳۵-۲۰۱۵) و برای طول دوره شبیه‌سازی (۱۹۷۹-۲۰۳۵) به‌طور متوسط، منفی ۶۰/۹۷ میلیون مترمکعب است. مقایسه خروجی‌های مدل نشان داد از آنجا که در منطقه، اولویت حجم آب ذخیره در مخزن سد نسا به ترتیب، تأمین آب شرب و در مرتبه بعدی، مصارف صنعت و خدمات است، برخی سیاست‌های تقویت آبخوان در قالب سناریوهای اعمال‌شده، جوابگو نیست و تأثیر بسیار ناچیزی در بهبود شرایط آبخوان در دوره شبیه‌سازی از خود نشان می‌دهد؛ در نتیجه، با بررسی پارامترهای مؤثر در مدل پویایی سیستم و شرایط منطقه، سناریوهایی به شرح جدول ۵ در نظر گرفته شد. مقایسه سناریوهای ۱ تا ۴ به‌عنوان سیاست‌های بدون تغذیه مصنوعی نشان می‌دهد، روند افت تراز آب زیرزمینی با اعمال محدودیت‌های برداشت از چاه‌های موجود و افزایش بهره‌وری کشاورزی کاهش می‌یابد؛ به‌گونه‌ای که کسری بیلان آب زیرزمینی دشت در سناریو ۴ به حدود منفی ۴۴/۸۴ میلیون مترمکعب در سال می‌رسد که نشان‌دهنده تأثیر مطلوب سیاست‌هاست. در شکل ۹، بیلان آب زیرزمینی به‌صورت تجمعی برای نتایج شبیه‌سازی مدل در سناریوهای ۱ تا ۴ نشان داده شده است.



شکل ۷- روند متغیرهای اصلی پس از کوتاه کردن مراحل زمانی

## نتایج و بحث

برای پیش‌بینی ذخایر آب زیرزمینی دشت نسا بم تا سال ۲۰۳۵، مدل شبیه‌سازی اجرا شد. برای جلوگیری از ناپایداری حل معادلات در پویایی سیستم ساخته‌شده، یک گام زمانی کوچک، معادل ۰/۱۲۵ ماه برای دقت مطلوب‌تر مدل و جلوگیری از خطاهای سیستمی انتخاب شده است (نیازی و همکاران، ۲۰۱۴). در سناریو پایه مدل در حالت عادی و بدون اعمال هیچ نوع سیاست حفظ آبخوان اجرا شد. دیگرام تغییرات حجم آب زیرزمینی در شکل ۸ نشان داده شده که نشان‌دهنده بیلان متوسط منفی سالانه معادل ۶۵/۴۸ میلیون مترمکعب در بیست سال آینده

جدول ۵- سناریوهای انتخابی نهایی برای شبیه‌سازی بیلان آب دشت نسا

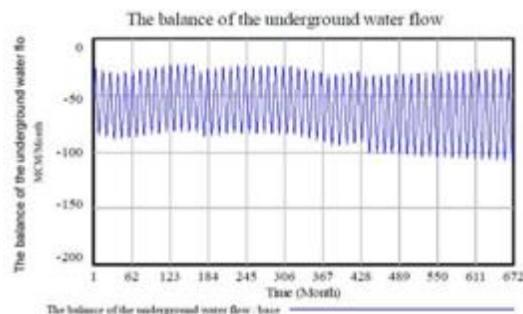
متغیر	سناریو پایه	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ۶	سناریو ۷
مصارف شرب	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد
مصارف صنعت	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد
بهره‌وری آبیاری	ثابت	۵+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۵+ درصد
برداشت از چاه‌ها	ثابت	ثابت	۵+ درصد	۵+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۵+ درصد
لایروبی قنوات	ثابت	ثابت	ثابت	۵+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد	۱۰+ درصد
تغذیه مصنوعی	ثابت	ثابت	ثابت	ثابت	ثابت	۴۰+ درصد	۵۰+ درصد	۶۰+ درصد

احیای سفره آب زیرزمینی منطقه در نظر گرفته شده است. درحقیقت، با توجه به برنامه بهره‌برداری از ذخیره

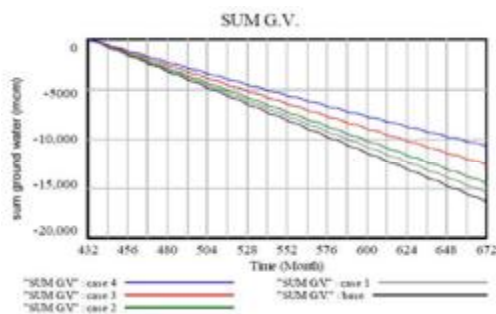
تغذیه مصنوعی دشت با پخش سیلاب در منطقه با قابلیت زهکشی زیاد، به‌عنوان گزینه جایگزین و سیاست اصلی در

الگوی کشت (کاهش سطح زیرکشت یونجه و سوق دادن کشاورزان به کشت محصولات مقاوم به کم‌آبی مانند کلزا) و حذف ارقام پرمصرف و آب‌بر کشاورزی توام با سیاست تغذیه مصنوعی آبخوان، زمینه حفظ و تقویت تراز آب زیرزمینی فراهم خواهد شد. به‌گونه‌ای که با اعمال سناریو ترکیبی (case 7) با تغذیه ماهانه، معادل ۴/۹۲ میلیون مترمکعب از حجم آب مخزن سد، کسری بودجه آب زیرزمینی دشت، حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد و به ۳۵ میلیون مترمکعب می‌رسد.

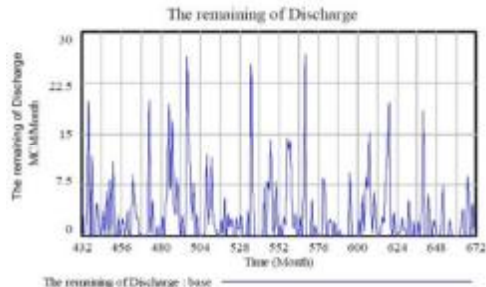
سد، پس از تأمین نیاز شرب و صنعت به‌عنوان اولویت‌های اصلی، حجم قابل انتقال به پایین‌دست سد برای تغذیه مصنوعی محاسبه و در نظر گرفته شده است.



شکل ۸- بیان آب زیرزمینی دشت بدون اعمال سیاست تغذیه برای ۲۰ سال آینده



شکل ۹- مقایسه بودجه آب زیرزمینی به‌صورت تجمعی سناریو ۱ تا ۴



شکل ۱۰- حجم آب در دسترس برای تغذیه مصنوعی

این حجم به‌گونه‌ای انتخاب شده که حتی در ماه‌های با آورد پایین رودخانه و تراز پایین سطح آب مخزن سد، ۱۰۰ درصد نیازهای شرب و صنعت تأمین و باقیمانده حجم مخزن برای تغذیه برنامه‌ریزی شد. در شکل ۱۰، حجم آب در دسترس برای تغذیه مصنوعی نشان داده شده است. با توجه به نبود نتایج پژوهشی مشابه برای منطقه مورد مطالعه، نتایج پژوهش، به‌خوبی موفق‌بودن سیاست‌های اعمالی را نشان می‌دهد و برای کاهش سرعت افت آب زیرزمینی مؤثر است. خروجی مدل شبیه‌سازی نشان می‌دهد متوسط کسری بودجه

آبی دشت از منفی ۶۵/۴۸ میلیون مترمکعب به حدود منفی ۳۵/۱۷ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. در جدول ۶، نتایج خروجی مدل برای بودجه آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف نشان داده شده است. با توجه به کنترل‌نشدن خروجی آب رشته‌قنات‌های منطقه، با اعمال سیاست کاهش ساعت کارکرد چاه‌های کشاورزی، تغییر

جدول ۶- خلاصه نتایج مدل پویایی سیستم برای سناریوهای مربوط به متغیر تعادل آب زیرزمینی در VENSIM

Variable	Min	Max	Mean	Median	StDev	(Norm)
The balance of the underground water flow for Time (Month) from 432 to 672 Runs:						
: case 1	-۱۰۱/۸۰	-۲۲/۹۵	-۶۴/۵۰	-۶۵/۴۸	۲۲/۴۹	-۰/۳۶
: case 2	-۹۶/۱۳	-۱۹/۳۵	-۶۰/۵۷	-۶۲/۱۹	۲۲/۹۹	-۰/۳۷
: case 3	-۸۶/۲۶	-۱۲/۱۶	-۵۲/۷۱	-۵۴/۰۵	۲۲/۰۳	-۰/۴۱
: case 4	-۷۹/۲۲	-۴/۹۷	-۴۴/۸۴	-۴۶/۱۲	۲۱/۱۴	-۰/۴۷
: case 5	-۷۷/۸۲	۰/۹۵	-۴۳/۶۴	-۴۴/۳۲	۲۱/۵۹	-۰/۴۹
: case 6	-۷۷/۵۶	۲/۷۸	-۴۳/۳۴	-۴۳/۷۳	۲۱/۷۳	-۰/۵۰
: case 7	-۷۷/۰۷	۱۱/۵۶	-۳۵/۱۷	-۳۵/۴۷	۲۰/۰۳	-۰/۵۹
: base	-۱۰۷/۵۰	-۲۶/۵۵	-۶۸/۴۴	-۶۹/۵۳	۲۴/۰۱	-۰/۳۵

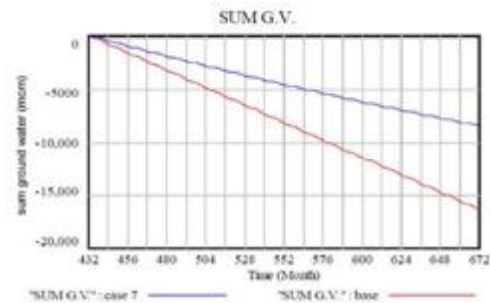


۴۴/۸۴ میلیون مترمکعب می‌رسد. سناریو تغذیه مصنوعی به‌صورت پخش سیلاب، روند کاهش تراز آب زیرزمینی را کنترل می‌کند و کسری بودجه آب دشت را به حدود ۳۵/۱۷ میلیون مترمکعب می‌رساند. حجم آب قابل استفاده برای تغذیه مصنوعی، براساس برنامه بهره‌برداری از مخزن سد محاسبه شد. با توجه به اینکه متوسط تبخیر سالانه محدوده مطالعاتی، ۳۳۶۴/۴۳ میلی‌متر است (وزارت نیرو، ۱۳۹۶)، استفاده از حجم آب مازاد در مخزن سد برای تغذیه مصنوعی دشت، تلفات تبخیری را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. در مجموع، فرایند پخش سیلاب، ضمن داشتن پیامدهای مثبت زیست‌محیطی با بالآمدن سطح ایستابی چاه‌ها، رضایت‌مندی جوامع محلی را در پی دارد و با رونق مجدد کشاورزی منطقه، روند تخلیه روستاها و مهاجرت به شهرها را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

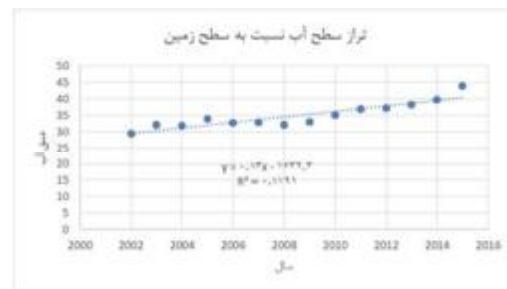
#### منابع

۱. اعلمی م. ت. فرزین س. و احمدی م. ح. ۱۳۹۳. مدل‌سازی پویایی سیستم سد و آب‌های زیرزمینی به‌منظور مدیریت بهینه آب. مجله مهندسی عمران و محیط‌زیست. ۷۴(۴۴.۱): ۱-۱۲.
۲. رجبی م. جلال کمالی ن. و نقی‌زاده م. ۱۳۹۹. ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر برآورد تبخیر-تعرق مرجع و مقایسه آن با داده‌های لایسمتری (مطالعه موردی: دشت بردسیر). مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴(۲): ۶۰۵-۶۱۵.
۳. وزارت نیرو. ۱۳۹۶. مطالعات به‌روزرسانی منابع آب در مناطق مطالعه‌شده حوضه‌های آبریز. ۲۰(۵): ۱۹۰-۱۹۷.
۴. همایون ک. و حافظی س. ۱۳۸۳. به‌کارگیری مدل مادفلو مدیریت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی و ارزیابی طرح تغذیه مصنوعی دشت آب باریک بم. مجله آب و فاضلاب. ۱۵(۲): ۴۵-۵۸.
5. Clifford Holms J. k. Slinger J. H. Musango J. K. Brent A. C. and Palmer C. G. 2014. Using system dynamics to explore the water supply and demand dilemmas of a small South African municipality. In: the 32<sup>nd</sup> International Conference of the System Dynamics Society Delft, Netherlands.
6. De Araujo W. C. Esquerre K. P. O. and Sahin O. 2019. Building a system dynamics

در شکل ۱۱، به‌خوبی به‌بود حجم بودجه آب زیرزمینی دشت برای سناریو ۷ در مقایسه با سایر سیاست‌ها نشان داده شده است. مدل ارائه‌شده نشان می‌دهد با توجه به افت تراز آب زیرزمینی دشت در سال ۲۰۰۲ به حدود ۱۸ متر نسبت به سال ۱۳۵۹ (همایون و حافظی، ۱۳۸۳)، ادامه روند موجود به افت سطح ایستابی معادل ۲۳/۲۴ متر در سال ۲۰۳۰ نسبت به سال ۲۰۰۲ و حدود ۴۱ متر نسبت به تراز سطح ایستابی در سال ۱۳۵۹ می‌شود و این امر در شکل ۱۲ به‌خوبی نمایان است.



شکل ۱۱- مقایسه بودجه آب زیرزمینی به‌صورت تجمعی برای سناریو ۷ با سناریو پایه (میلیون مترمکعب در ماه)



شکل ۱۲- تراز آب زیرزمینی دشت (۱۹۷۹-۲۰۱۵)

#### نتیجه‌گیری

پژوهش پیش رو با هدف ارزیابی وضعیت آبخوان دشت نسا بم و اعمال سناریوهای تغذیه مصنوعی انجام شد. مدل روابط تعاملی پارامترهای مؤثر در بیلان دشت، در محیط نرم‌افزار vensim ساخته شده و ضمن مقایسه خروجی مدل با داده‌های واقعی، پیش‌بینی ادامه روند بهره‌برداری کنونی و تأثیرات تغذیه مصنوعی در تراز آب زیرزمینی دشت بررسی شد. نتایج مدل نشان داد، با ادامه روند برداشت کنونی، کسری بودجه آب زیرزمینی به حدود ۶۵/۴۸ میلیون مترمکعب می‌رسد. با اعمال سیاست کنترلی محدودیت برداشت از چاه‌ها این میزان به حدود

- model to support water management: A case study of the semiarid region in the Brazilian northeast. *Water*. 11(12): 2513.
7. Madani K. 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis. *Journal of Environmental Studies and Sciences Springer*. 4(4): 315-328.
  8. Nassery H. M. Adinehvand R. and Barati R. 2017. Water management using system dynamics modeling in Semi-arid Regions. *Journal of Civil Engineering*. 3(9): 766-778.
  9. Niazi A. Prasher S. O. Adamowski J. and Gleeson T. 2014. A System dynamics model to conserve arid region water resources through aquifer storage and recovery in conjunction with a dam. *Water*. 6: 2300-2321.
  10. Rodyanto A. and Suhardjon O. 2016. Dynamics system modeling of sustainable water resources management due to the regional spatial. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*. 6(2): 15-23.
  11. Sun Y. Liu N. Shang J. and Zhang J. 2017. Sustainable utilization of water resources in China: A system dynamics model. *Journal of Cleaner Production*. 142(2): 613-625.
  12. Suwan P. Sahleh V. and Jung S.Y. 2015. A system dynamics model for the simulation of the management of a water supply system. In: 2nd International Conference on Geological and Civil Engineering V80. 8.
  13. Xijuan L. and Yun L. 2019. The study on supply and demand of water resources in Alar city based on the system dynamics model. In: the second International Conference on physics and Statistics journal of physics: conf. Series. 1324: 012017.