مدل‌سازی سیستم پویای مخزن سدهای چند منظوره متوالی با استفاده از نرم‌افزار Vensim

سمیه زارعی دودجی[۱]، رحیم باقری[۲*]، هادی جعفری[۳]

۱. استادیار، گروه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست محیطی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۲. دانشیار، گروه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست محیطی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
۳. دانشیار، گروه آب‌شناسی و زمین‌شناسی زیست محیطی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱ تاریخ **پذیرش:** ۱۴۰۲/۰۶/۰۹

چکیده

طرح‌های سدسازی، از جمله طرح‌های مهم مهندسی هستند که نقش انکارناپذیری در اقتصاد ملی ایفا می‌نمایند. علم پویایی سیستم یک ابزار مدیریتی است که قادر به شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب می‌باشد. این مدل در شبیه سازی منابع آب دارای قابلیت‌های مختلف از قبیل افزایش سرعت در توسعه مدل، قابلیت توسعه گروهی مدل، ارتباط مؤثر با نتایج و افزایش اعتماد به مدل در اثر مشارکت کاربر می‌باشد. در این تحقیق مدل سیستم پویای سدهای چند منظوره متوالی کاردنه-سنا واقع در استان بوشهر شبیه‌سازی شده است. هدف از این مدل‌سازی تحقق نیازهای مختلف از سد (شرب، محیط زیست و کشاورزی صنعتی) پیش از ساخت آن و همچنین بررسی اثر ساخت سد در بالادست بر تأمین نیازهای سد پایین‌دست می‌باشد. همچنین با استفاده از این مدل می‌توان تغییرات رواناب پایین‌دست سد در صورت احداث آن و تغییر درصدهای تأمین حجمی-زمانی سد پایین‌دست را تعیین نمود. مطالعه نتایج پس از محاسبه درصد سالانه و ماهانه تأمین حجمی و زمانی نیازهای مختلف و منبع تأمین آن‌ها و همچنین در نظر گرفتن دو چاه آب شرب جهت تأمین آب شرب در ماه‌هایی که سد قادر به تأمین آب شرب نمی‌باشد و حداکثر دبی خط لوله انتقال آب شرب کنونی منطقه، انجام گرفت. جهت مدلسازی ۶ سناریو مدیریتی در نظر گرفته شد که در نهایت سناریو ششم به عنوان بهینه‌ترین سناریو در نظر گرفته شد. جهت ارزیابی مدل، مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده حجم آب سد سنا مقایسه گردید. نتایج حاکی از آن است که درصد تأمین حجمی نیازهای شرب، محیط زیست و کشاورزی صنعتی سد کاردنه به ترتیب ۹۷/۶۶، ۹۶/۵۹ و ۸۲/۷۶ و همچنین درصد تأمین حجمی نیازهای محیط زیست و کشاورزی از سد سنا به ترتیب ۱۰۰، ۸۳/۴۸ درصد می‌باشد که در محدوده قابل قبول وزارت نیرو می‌باشند. بر اساس این پژوهش مشخص گردید، با مدل‌سازی بر اساس شاخص‌های ارزیابی مدل شامل درصد تأمین حجمی و درصد تأمین زمانی نیازهای مختلف، به راحتی می‌توان اثر سیاست‌های بهره‌برداری و مدیریتی را بر نحوه تعیین و تخصیص منابع آب مشاهده و بهینه‌ترین تصمیم را اتخاذ نمود.

کلید واژه‌ها: مدل‌سازی، سدهای چند منظوره، سیستم پویا، سدهای متوالی، نرم‌افزارVensim

* نویسنده مسئول: s.zarei@shahroodut.ac.ir

DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.2.1019711

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

مقدمه

آب عامل حرکت، حیات و کالایی با ارزش و غیرقابل جایگزین در توسعه اقتصادی و اجتماعی کشورهاست و نقش محوری آن در آمایش سرزمین، توسعه زیرساخت‌ها و حفظ، تعادل و پایداری اکوسیستم و محیط زیست را نمی‌توان انکار نمود. کمبود آب در ایران، تأمین آن را در بسیاری از مناطق کشور مشکل ساخته و به تدریج بر ابعاد آن افزوده است. از طرفی بروز خشکسالی‌های اخیر به این بحران، بیشتر دامن زده است. در مناطق خشک ایران سدها به عنوان بزرگ‌ترین سازه‌های ساخت دست بشر و بزرگ‌ترین دریاچه‌های مصنوعی از مهم‌ترین راه‌های دسترسی به حجم عظیم آب شیرین هستند که پیامدهای مثبت احداث آن‌ها به صورت‌های گوناگون از جمله رونق اقتصادی، صنعتی، کشاورزی و یا حتی توسعه و رشد اجتماعی برای مردم یک ناحیه یا یک کشور و یا در پاره‌ای از موارد بر گستره‌ی وسیعی از چند کشور می‌باشد (Sterman, 2000) علاوه بر آن احداث سد بدون مطالعات دقیق اولیه می‌تواند اثرات منفی از جمله برآورده نکردن نیازهای شرب، صنعت و کشاورزی منطقه، تخریب کیفیت آب در مخزن سد و یا اثرات زیست‌محیطی ناشی از کاهش یا حذف رواناب در پایین‌دست سد را به همراه داشته باشد (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹). یکی از ابزارهای قوی مدیریتی که در سال‌های اخیر بسیاری از آن برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب استفاده کرده‌اند، روش پویایی سیستم (Dynamic System) است. این روش که یک مدل فکری و یک روش شبیه‌سازی است و برای مطالعه رفتار دینامیک سیستم‌های پیچیده مختلف در زمینه‌های مهندسی عمران، منابع آب و آب زیرزمینی به کار گرفته می‌شود، روشی شیئ‌گرا و بر پایه بازخورد است (Sterman, 2000) . در واقع روش پویایی سیستم به روابط دینامیکی بین خصوصیات کمی و کیفی آب و حتی مسائل اجتماعی- اقتصادی توجه کرده و سیستم مورد نظر بدون نیاز به ریاضیات پیچیده به سهولت قابل شبیه‌سازی می‌گردد Keyes and Palmer (1993) .روش پویایی سیستم را در مطالعات خشکسالی در نظر گرفتند Simonovic and Fahmy (1999) .از روش پویایی سیستم برای ارزیابی درازمدت منابع آبی و تحلیل سیاست‌های اعمالی در حوضه رودخانه نیل در مصر بهره بردند Ahmad and . Simonovic (2000)عملکرد مخزن چند منظوره شلمونت در کشور کانادا را به صورت جداگانه، با هدف مدیریت و کنترل سیلاب به کمک مدل پویایی سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آن‌ها پس از ساخت مدل، شبیه‌سازی برای ۵ سیلاب عمده با تجدید نظر در قوانین بهره‌برداری و ایجاد تغییر در سرریز سد انجام دادند که نتایج آن‌ها، کنترل سیلاب در بالادست و پایین دست مخزن را مفید ارزیابی کرد Simonovic and Rajasekaram (2004) . منابع آب کشور کانادا را با رویکرد پویایی سیستم‌ها مورد بررسی قرار دادند. در بررسی آن‌ها، دوازده سناریو در بخش‌های جمعیت، توسعه کشاورزی، تولید غذا، سرمایه‌گذاری مالی، تولید انرژی، منابع تجدید ناپذیر و آلودگی اعمال گردید که نتایج، وابستگی شدید توسعه آینده کانادا را به نگهداری کیفیت و تراز آب در سطح قابل قبول نشان دادند Chen et al. (2005) .پژوهشی را تحت عنوان توسعه تئوری و سیستم برنامه‌ریزی دینامیک به منظور مدیریت پایدار در سطح حوضه‌های آبریز رودخانه ارائه دادند که در این کار هدف، تعیین نحوه ایجاد مدیریت یکپارچه منابع آب‌زمینی و آب و هوا در سطح حوضه‌های آبریز می‌باشد Salavitabar et al. . (2006)مدل تأمین و مصارف آب شهر تهران را با روش پویایی سیستم، جهت ارزیابی روند تأمین، مصارف و عوامل مؤثر بر آن، تهیه و توسعه دادند Madani and Marino (2009) .مدیریت در حوضه آبریز زاینده‌رود واقع در بخش مرکزی ایران که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

دارای آب و هوای نیمه‌خشک است را به کمک مدل پویایی سیستم مورد بررسی قرار دادند. در نهایت پس از بررسی سناریوهای مختلف، تصمیم بر تغییر در سیاست‌های اصلی اتخاذ شده در چند دهه اخیرگرفته شد که به طرح‌ریزان منابع آب منطقه پیشنهاد گردید Sheikh Khozani et al. (2011).از مدل پویایی سیستم جهت بررسی بهره‌برداری از مخزن چند منظوره دامغان واقع در استان سمنان برای افق ۱۴۱۰ استفاده کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان دادند که با اجرای سیاست‌های مناسب بهره‌برداری نه تنها می‌توان نیازهای مورد نظر در حالت موجود را در حد قابل قبول تأمین نمود بلکه می‌توان توسعه نیازها را در بهره‌برداری استاندارد از مخزن نیز در نظر گرفت Ghashghaie et al. (2014) .تأثیر اولویت نیازها بر جریان پایین دست در چهار سد چراغ‌ویس، مرخز، کردکند و سنات در استان کردستان را به کمک مدل پویایی سیستم جهت درک تقابل عوامل ایجادکننده مشکل در حوضه زاینده‌رود مورد بررسی قرار دادند Zarghami and AmirRahmani (2015).با استفاده از مدل پویایی سیستم، راهکارهای احیای دریاچه ارومیه را مورد بررسی قرار دادند Yang et al. (2015) .یک روش ارزیابی جهت تعیین ظرفیت حوضه آبریز بر مبنای پویایی سیستم‌ها در شهر تیلینگ واقع در چین ارائه کردند که ترکیبی از اثرات و بازخوردهای مؤلفه‌های اقتصادی، اجتماعی و آب می‌باشد Kotir et al (2016) .مدیریت پایدار منابع آبی و توسعه کشاورزی حوضه رودخانه ولتا در کشور غنا را با استفاده از مدل پویایی سیستم‌ها در محیط نرم‌افزارSTELLA انجام دادند که آن‌ها سه سناریو توسعه زیرساخت‌های آبی، توسعه زمین‌های کشاورزی و اعمال شرایط خشکسالی برای مدل در نظر گرفتند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد، علی‌رغم تأثیر مثبت سناریو اول، در نهایت همه سناریوها با محدودیت رشد مواجه خواهند شد که حاکی از توانایی و کاربرد گسترده مدلسازی به کمک پویایی سیستم‌ها در عرصه مدیریت منابع آب می‌باشد . Sadeghi et al., (1383)مدلسازی بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره چاه نیمه سیستان بر روی رودخانه سیستان به منظور کنترل سیلاب را با استفاده از پویایی سیستم انجام داده‌اند که در نهایت اعتبار مدل به روش‌های مختلفی چون تحلیل حساسیت، آزمون‌های حدی و غیره سنجیده شده است Jalali and Afshar, (1383) .مدلی بر اساس پویایی سیستم برای بهره‌برداری از سدهای برقابی ارائه کرده‌اند. در مدل آن‌ها سناریوهای مدیریتی و منحنی‌های فرمان اعمال شده و قابلیت حل مسئله با سرعت بالا را دارا است Salvitabar et al., (1385) .به کمک سیستم پویا مدل مدیریت آب شهری تهران را تهیه کرده و رفتار متغیر آب زیرزمینی را تا سال ۱۴۰۰ شبیه‌سازی کرده‌اند Gelian et al., (1384) .سیاست بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز آجیچای را با استفاده از روش سیستم پویا با توجه به منافع کلیه کاربران و کاربری‌ها تحلیل کرده و مناسب‌ترین سیاست که منافع همه کاربری‌ها و اهداف توسعه را ارضاء کند، را معرفی نموده‌اند Fotookian et al. (1396) . مدلسازی پویای سد مخزنی یامچی با اعمال الگوی بهینه کشت جهت تدوین سیاست بهره‌برداری را انجام دادند. در مطالعه آن‌ها ابتدا الگوی بهینه کشت تعیین گردید، سپس مدلسازی عملکرد سد بر اساس سه شاخص آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد اعمال سیاست الگوی بهینه کشت سبب کاهش مصرف آب کشاورزی منطقه گردیده است Mohammadi et al. (1397) .مدلسازی اندرکنش منابع آب و ارزش افزوده دشت بیرجند را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از یک مدل مفهومی، ارتباط بین فعالیت‌های اقتصادی منطقه و منابع آب دشت بیرجند را با استفاده از رویکرد سیستمی، شناسایی و سپس در محیط نرم‌افزار Vensim شبیه‌سازی نمودند. سپس شش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

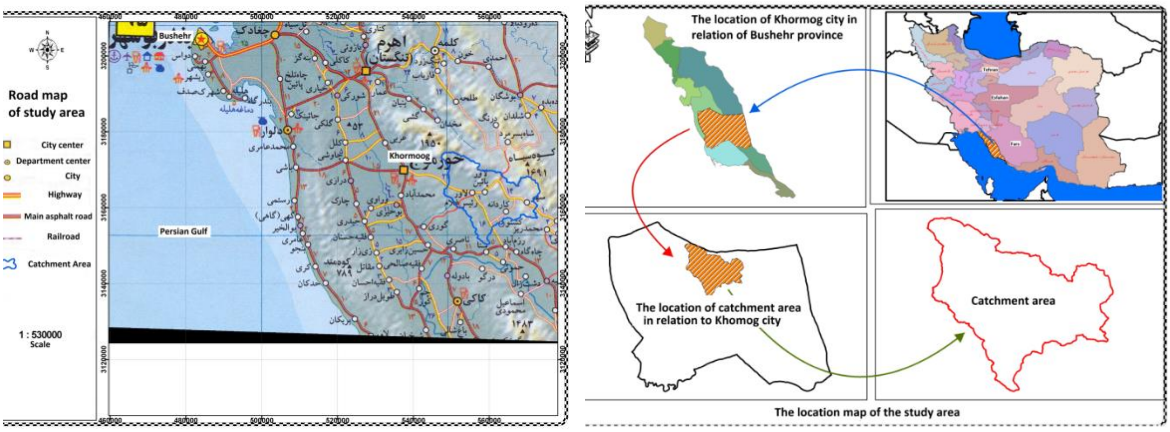
سناریوی مختلف در نظر گرفته شد و میزان حجم منابع آب و میزان ارزش افزوده در گزینه‌های مختلف مقایسه گردید. نتایج آن‌ها نشان داد که با ادامه روند موجود در منطقه، وضعیت منابع آب زیرزمینی، بدتر خواهد شد(Alami et al., 1393) .
مدلسازی پویای سیستم سد گلک و آب‌های زیرزمینی به منظور مدیریت بهینه آب را انجام دادند. آن‌ها اثرات سد مخزنی گلک در جمع‌آوری جریان‌های سیلابی، تأمین نیازهای منطقه و تغذیه آبخوان آبرفتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات نشان داد با تأمین نیازهای مختلف از سد، تغذیه منابع آب زیرزمینی از طریق تزریق سالانه ۲ میلیون متر مکعب آب سیلاب امکان‌پذیر می‌باشد.
احداث یک سد همیشه با چالش‌های فراوانی روبرو است. این چالش‌ها می‌تواند شامل تأمین نیازهای در نظر گرفته شده برای یک سد و یا تأثیر احداث آن سد بر سدهای پایین‌دست باشد. احداث یا بهره‌برداری از سدها بدون در نظر گرفتن این پارامترها باعث عدم تأمین اهداف در نظر گرفته شده یا آسیب به برداشت سد دیگری در پایین‌دست می‌شود. در این مطالعه سعی شده اثر احداث سد کاردنه در تأمین نیازهای در نظر گرفته شده برای احداث آن و همچنین تأثیر آن بر روی سد سنا، موجود در پایین دست سد کاردنه، بررسی شود. بر این اساس شبیه‌سازی سدهای متوالی کاردنه-سنا با استفاده از پویایی سیستم و نرم‌افزار Vensim با در نظر گرفتن نیازهای شرب، کشاورزی و محیط زیست و درصد تأمین هر یک از این نیازها انجام شد و بر این اساس ۶ سناریو مدیریتی در نظر گرفته شد که در نهایت بهینه‌ترین سناریو مدیریتی به عنوان سناریو برتر انتخاب شد. بعلاوه مقادیر پیش بینی شده و مشاهده شده در سد سنا جهت ارزیابی عملکرد مدل مقایسه گردید.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه سدهای کاردنه و سنا در شهرستان خورموج در ۸۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر بوشهر واقع در استان بوشهر و شهرستان خورموج می‌باشد. مختصات جغرافیایی حوضه آبریز سد شامل ′۳۵ °۵۱ تا ′۴۵ °۵۱ طول شرقی و ′۳۱ °۲۸ تا ′۳۸ °۲۸ عرض شمالی ، با مساحت در حدود ۹۲۹۱ هکتار است. ارتفاع متوسط محدوده در حدود ۸۱۷ متری از سطح دریای آزاد قرار گرفته است. فاصله این محدوده از شهرستان خورموج ۴۵ کیلومتر و از شهر بوشهر حدود ۹۵ کیلومتر می‌باشد. اقلیم محدوده خشک و بیابانی و فاقد پوشش گیاهی منسجم است. متوسط بارندگی سالانه منطقه ۲۵۰ میلی‌متر و حداقل و حداکثر دمای سالانه منطقه به ترتیب برابر ۷ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد است. شهرها و روستاهای موجود در محدوده، شامل خرموج، لاور و کاردنه است. دسترسی به محدوده از طریق بزرگراه سیراف، محدوده خورموج-کنگان و جاده آسفالته شنبه امکان‌پذیر است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه و راه دسترسی به آن
Fig 1. Geographical location of the study area and access to it

روش پویایی سیستم

مدیریت جامع منابع آب نیازمند تصمیم‌گیری‌های آینده‌نگر با لحاظ کردن کلیه نتایج مطلوب و یا نامطلوب یک پروژه و یا اثرات پروژه‌های مختلف بر یکدیگر می‌باشد. علم پویایی سیستم در واقع یک ابزار مدیریتی برای انجام بهینه این نگرش می‌باشد (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹). این علم قادر به شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب برای پشتیبانی تصمیم-گیری‌های بهینه در منابع آب است. هدف اصلی این روش شبیه‌سازی، تسریع و تسهیل یادگیری رفتار سیستم‌های پیچیده منابع آب در شرایط کنونی و در آینده است (Sterman, 2000). روش پویایی سیستم یک روش شبیه‌سازی شیءگرا است که بر اساس روابط بازخورد ضمن ایجاد مشارکت کاربران هر مدل در توسعه آن، سهولت و سرعت قابل توجهی را در تعریف سیستم، توسعه مدل و بهینه‌سازی آن ایجاد می‌نماید. امکان توسعه گروهی مدل‌های یک منطقه و یا یک حوضه و قابلیت و سادگی اصلاح مدل با تغییرات سیستم نیز از جمله قابلیت‌های این روش است. به عبارت دیگر پس از ساخت مدل، در صورت تغییر اجزای سیستم، می‌توان با به روز کردن آن اطلاعات خروجی جدید از مدل دریافت نمود که بر اساس اطلاعات بروز شده سیستم است. در سال‌های اخیر استفاده از پویایی سیستم‌ها (SD) در شاخه‌های مختلفی از علوم مدیریت منابع آب مورد استفاده واقع شده است که می‌توان به موارد تحلیل منطقه‌ای و برنامه‌ریزی حوضه آبریز رودخانه، آب شهری، سیلاب، آبیاری و مدل‌های فرآیند تصفیه آب اشاره نمود (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹). بهره‌برداری از مخازن سدها از موضوعات مهم و پیچیده‌ای است که طراحان سیستم‌های منابع آب با آن مواجه هستند. از موارد بسیار مهم در این مورد انتخاب تکنیک مناسب جهت برآورد حجم و نحوه بهره‌برداری از مخزن می‌باشد. روش‌های مورد استفاده در تعیین حجم مخزن شامل: روش‌های دوره بحرانی[1]، روش‌های مهندسی سیستم‌ها[2] و روش‌های شبیه‌سازی[3] می‌باشد (فقیه، ۱۳۹۳). بهینه‌سازی روشی است که با توجه به هدف معین و محدودیت‌های مشخص که به صورت توابع و روابط ریاضی تعریف می‌گردد بهترین جواب

[1] - Critical Period Methods
[2] - Systems Engineering Techniques
[3] - Simulation Techniques

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

ممکن را برای یک مسئله مشخص می‌نماید. معمولاً دو نوع مدل ریاضی در بهینه‌سازی بکار می‌رود که شامل مدل برنامه‌ریزی خطی[۴] (LP) و مدل برنامه‌ریزی پویا[۵] (DP) می‌باشد. مدل برنامه‌ریزی خطی برای اولین بار در جنگ دوم جهانی به منظور اهداف نظامی مورد استفاده قرار گرفت و پس از جنگ مذکور جایگاه ویژه‌ای در مدیریت صنعتی پیدا نمود (فقیه، ۱۳۹۳). شروع بهره‌برداری از این مدل در مسائل منابع آب به اوایل دهه ۱۹۶۰ می‌گردد و متعاقب آن در طراحی و بهره‌برداری از سدها به‌طور وسیع مورد استفاده قرار گرفت. در این مدل تابع هدف و توابع محدود کننده همگی خطی می‌باشند. مدل دینامیک یا برنامه‌ریزی پویا به دلیل حل توابع و روابط غیر خطی به‌طور وسیع در طراحی و بهره‌برداری از مخازن استفاده می‌شود (فقیه، ۱۳۹۳) .

روش‌های شبیه‌سازی، به دلیل برخورداری از منطق ریاضی ساده و قابل درک، قابلیت چشمگیر و سریع در پیش‌بینی و ارزیابی نحوه عملکرد سیستم و انتخاب گزینه‌ها دارند. در این روش نحوه عملکرد سیستم را از نظر سیاست‌های مختلف بهره‌برداری می‌توان مورد ارزیابی قرار داد. شبیه‌سازی به دو روش کلی انجام می‌شود که شامل: الف- شبیه‌سازی قطعی (بر اساس مشاهدات و داده‌های واقعی صورت می‌گیرد) و ب- شبیه‌سازی احتمالی (بر اساس داده‌های آماری صورت می‌گیرد (فقیه، ۱۳۹۳) . در این مطالعه شبیه‌سازی مخزن سد کاردنه به این دلیل که هنوز ساخته نشده و در مرحله مطالعه است، بر اساس روش احتمالی و شبیه‌سازی مخزن سد سنا با صحت سنجی با داده‌های واقعی انجام شده است.

از جمله مفاهیم مهم در روش پویایی سیستم، قانون پیوستگی است که مفهوم اساسی روندیابی در مخازن سدها است. این روش مدل‌سازی از چهار ابزار ذخیره[۶]، جریان[۷]، رابط‌ها[۸] و تبدیل کننده‌ها[۹] استفاده می‌کند و به وسیله آن‌ها مدل مفهومی را به نمودارهای علت و معلولی و در نهایت به نمودار ذخیره و جریان تبدیل می‌نماید (فقیه، ۱۳۹۳) . در واقع مدل‌سازی به روش پویایی سیستم‌ها شامل نمایش فرآیند بازخورد است که همراه با ساختار ذخیره و جریان، تأخیر زمانی[۱۰] و توابع غیرخطی[۱۱] ، دینامیک سیستم را تعریف می‌کند (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹).

نمودارهای حلقه علّی[۱۲] ابزار مهمی برای نمایش ساختار بازخورد سیستم‌ها هستند (Sterman, 2000). نمودار علّی متشکل از متغیرهایی است که با فلش‌هایی به هم متصل شده‌اند که تأثیرات علی بین متغیرها را نشان می‌دهد. متغیرهایی که در مدل، با فلش نشان داده شده باشند، با پیوندهای علّی مرتبط هستند. به هر پیوند علّی یک علامت، مثبت (+) یا منفی (-) اختصاص می‌یابد تا نشان دهد که متغیر وابسته به زمان با تغییر متغیر مستقل چگونه تغییر می‌کند. حلقه‌های مهم با یک شناسه حلقه مشخص می‌شوند که نشان می‌دهد حلقه بازخورد مثبت (خود تقویت کننده) یا منفی (تعادل کننده) است (Sterman, 2000). ابزار ذخیره[۱۳] در مدلسازی با انباشته شدن تفاوت بین جریان ورودی به یک فرآیند و خروجی آن تأخیر

4 - Linear Programming Model
5 - Dynamic Programming Model
6 - Stock
7 - Flow
8 - Interfaces
9 - Convertors
10 - Delay Time
11 - Nonlinear Function
12 - Causal loop diagrams (CLDs)
13 - Stock

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

ایجاد می‌کند. آن‌ها وضعیت سیستم را مشخص می‌کنند و اطلاعاتی را تولید می‌کنند که تصمیمات و اقدامات مبتنی بر آن است (Sterman, 2000). در مدلسازی به این روش، ابتدا بایستی تعریف روشن و کاملی از مسئله مورد نظر داشته باشیم و سپس فرضیات دینامیکی مورد نظر را فرموله کنیم (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹).

نرم‌افزار Vensim یک نرم‌افزار شبیه‌سازی و یک محیط مدل‌سازی گرافیکی شیءگرا می‌باشد .در این نرم‌افزار نمودارها با یک سری از زوج معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول(اغلب غیرخطی)که با روش اولر یا رانگ کوتا حل می‌شوند، ساخته می‌شود (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹).

شاخص‌های ارزیابی مدل شامل درصد تأمین حجمی و درصد تأمین زمانی نیازهای مختلف تعریف شده برای یک سد است. درصد تأمین حجمی از تقسیم مجموع میزان تأمین‌های ماهانه بخش مورد نظر به مجموع نیازهای تعریف شده از سد به دست می‌آید. درصد تأمین زمانی از تقسیم تعداد ماه‌هایی که سد میزان نیاز مورد نظر را تأمین نموده است به تعداد ماه‌های شبیه‌سازی بدست می‌آید. در این پژوهش جهت ارزیابی مدل از این دو شاخص استفاده می‌گردد و با مقادیر مورد قبول وزارت نیرو مقایسه می‌گردد.

ساختار مدل

هدف از مدل‌سازی در این تحقیق، ایجاد و توسعه یک مدل شبیه‌سازی برای شناخت رفتار سدهای متوالی و دینامیک آن و همچنین ارائه راه‌حل‌هایی برای بهینه کردن بهره‌برداری از دو سد متوالی است. سدهای کاردنه و سنا در استان بوشهر و شهرستان خوموج قرار دارند. سد کاردنه در مرحله مطالعه و در بالادست و سد سنا در حال بهره‌برداری و در پایین دست سد کاردنه می‌باشد. هدف از ساخت سد کاردنه، ذخیره‌سازی و کنترل سیلاب رودخانه و انتقال و توزیع آن جهت مصارف شرب و کشاورزی صنعتی منطقه با رهاسازی آب مورد نیاز محیط زیست می‌باشد. هدف از این تحقیق، مدلسازی سدهای متوالی کاردنه و سنا جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری از آن‌ها است به گونه‌ای که کمبود نیاز شرب شهر خورموج و مجتمع روستایی لاور در افق سال ۱۴۲۵ از سد کاردنه تأمین گردد، بعلاوه نیاز زیست محیطی رودخانه و کشاورزی صنعتی (گلخانه) پایین دست نیز از حجم مخزن سد کاردنه در نظر گرفته شود. همچنین با توجه به این موضوع که سد کاردنه در بالادست سد سنا احداث خواهد شد و برداشت آب از آن بر ورودی سد سنا و تأمین نیازهای آن تأثیرگذار است، اثرات برداشت آب از سد کاردنه در تأمین نیازهای سد سنا در پایین‌دست آن نیز مورد بررسی قرار گرفته است.لازم به ذکر است سد سنا با حجم مخزن ۱/۲ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۸۱ ساخته و به بهره‌برداری رسیده است. ارتفاع این سد ۲۰ متر بوده و طول تاج آن ۲۰۰ متر می‌باشد. سد کاردنه بر روی یکی از انشعابات رواناب ورودی سد سنا و در بالادست آن در نظر گرفته شده و در مرحله مطالعات می‌باشد. جهت انتقال آب سد کاردنه به محل مصرف یک خط لوله از قبل وجود دارد که قابلیت انتقال آب حداکثر ۷۳ لیتر بر ثانیه را دارد. به دلیل صرفه‌جویی در هزینه‌ها و استفاده از همین خط انتقال موجود، ظرفیت این خط لوله بصورت حداکثر برداشت آب از سد کاردنه به مدل اضافه گردید .

در این تحقیق، ابتدا مدلسازی سد سنا به تنهایی انجام و صحت سنجی گردید و سپس مدل سد کاردنه جهت پیش بینی عملکرد سد کاردنه و تأثیر آن بر روی مخزن سد سنا به آن اضافه گردید. در نهایت سناریوهای مختلف مدیریتی در نظر گرفته شد و نتایج مدلسازی در هر سناریو مورد ارزیابی قرار گرفت .

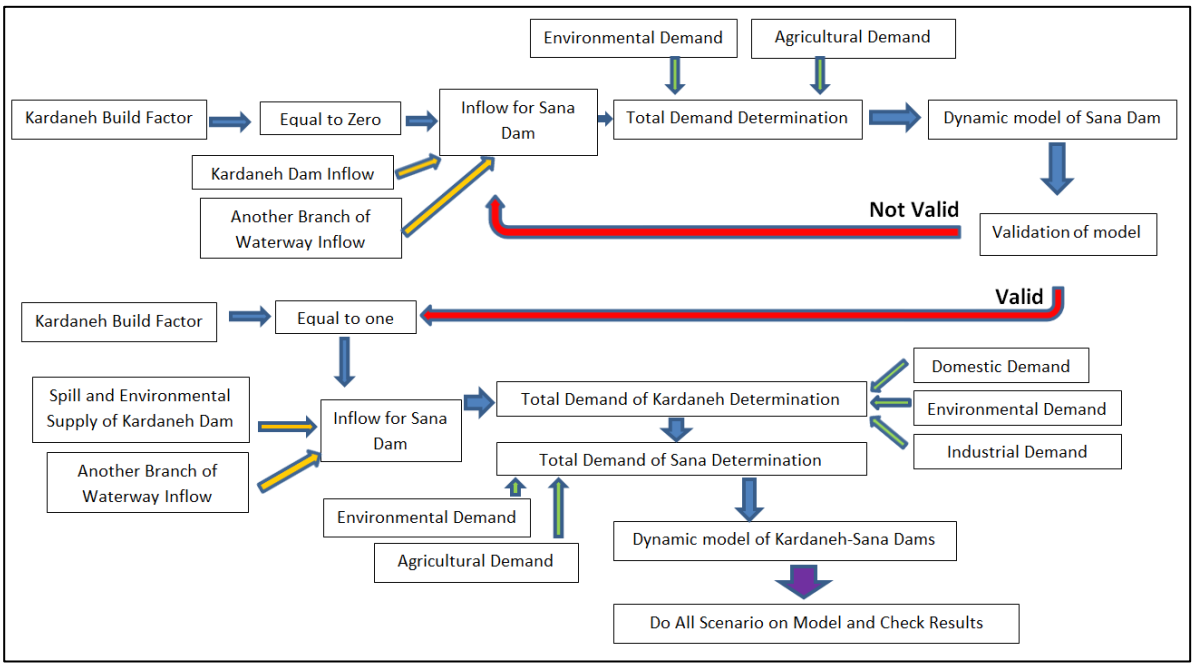
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

بر اساس اطلاعات موجود رواناب در دوره آماری ۳۹ ساله (از سال ۱۳۶۱-۱۳۶۲ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰) موجود می‌باشد که در محاسبات مربوط به مدلسازی منابع آب سدهای کاردنه-سنا از این دوره آماری استفاده گردید. با توجه به طراحی‌های سد و حجم آورد سالیانه، حجم نرمال سد سنا ۱/۲ میلیون متر مکعب و سد کاردنه ۴/۲۸ میلیون مترمکعب، جهت اعمال در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب می‌باشد.

رواناب ورودی سد سنا بر اساس شکل ۵ شامل دو شاخه اصلی می‌باشد. یکی آبراهه کاردنه و دیگری آبراهه دوم (به دلیل عدم وجود نام خاص به عنوان آبراهه دوم نامگذاری گردید) که مجموع این دو آبراهه به سد سنا می‌ریزند. ساختار کلی مدلسازی سدهای کاردنه-سنا در شکل ۲ آورده شده است. همانگونه که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد و قبلا نیز عنوان گردید، در ابتدا بدون در نظر گرفتن ساخت سد کاردنه، سد سنا به تنهایی مدلسازی می‌گردد. بنابراین در مدل، فاکتور ساخت سد کاردنه (این فاکتور باینری بوده و دو حالت صفر و یک دارد) صفر در نظر گرفته می‌شود. فاکتور ساخت سد کاردنه صفر به معنی عدم ساخت سد کاردنه و تنها حضور سد سنا است که این موضوع در رواناب ورودی به سد سنا تأثیر گذاشته و کل رواناب هر دو شاخه آبراهه که به سد سنا می‌رسند به عنوان ورودی سد سنا در نظر گرفته می‌شود (شکل ۵). در صورتی که فاکتور ساخت سد کاردنه یک باشد به معنی وجود هر دو سد کاردنه و سنا است که در این حالت رواناب ورودی سد سنا برابر مجموع سرریز سد کاردنه به همراه حجم آب تأمین شده محیط زیست سد کاردنه (که برای حیات آبزیان در پایین دست رهاسازی می‌گردد) و رواناب حاصل از آبراهه دوم است (شکل ۵). بنابراین در حالت اول فاکتور ساخت سد کاردنه صفر در نظر گرفته شده و سد سنا به تنهایی شبیه‌سازی می‌گردد. نتایج این شبیه‌سازی با اطلاعات مشاهده شده حجم مخزن سد مقایسه گردیده و اعتبار سنجی مدل بررسی می‌گردد. در صورتی که نتایج مدل با اطلاعات مشاهده شده حجم مخزن سد سنا همخوانی نداشت دوباره این مرحله تکرار می‌گردد تا مدل در نهایت به نتیجه مطلوب رسیده و معتبر گردد (نتایج مدلسازی با مشاهداتی همخوانی داشته باشند). سپس فاکتور ساخت سد کاردنه برابر یک در نظر گرفته شده و مدلسازی سدهای کاردنه-سنا به صورت همزمان انجام شده و در نهایت سناریوهای مختلف مدیریتی این سدها در مدل اعمال شده و نتایج آن‌ها مقایسه شده و برای تصمیم-گیری مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]



شکل ۲. فلوچارت کلی مدلسازی سدهای کاردنه-سنا

Fig 2. General flowchart of Kardeneh-Sana dams modeling

اطلاعات ورودی به مدل

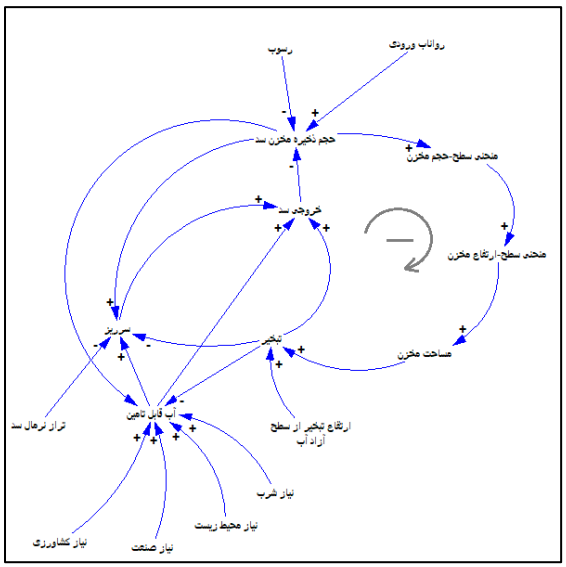
اطلاعات شبیه‌سازی مخزن شامل اطلاعات هواشناسی و هیدرولوژی (مشتمل بر تبخیر، منابع آب سطحی و رسوب ورودی به مخزن)، اطلاعات نیازها و مصارف آب (مشتمل بر مصارف در بخش شرب، کشاورزی با الگوهای کشت در نظر گرفته شده) و نیاز زیست محیطی و همچنین اطلاعات سد و مخزن (مشتمل بر منحنی‌های سطح - حجم - ارتفاع) می‌باشد که به عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته شده و در شبیه‌سازی استفاده شده است.

تعیین جریان خروجی از مخزن سد

مهم‌ترین بخش در مدل‌سازی یک سد، تعیین جریان خروجی از مخزن سد بر اساس ورودی‌های آن و همچنین برداشت‌ها از مخزن سد می‌باشد. شکل ۳ نشان دهنده حلقه علّی و معلولی مخزن یک سد می‌باشد. در این مدل حجم مخزن توسط متغیر ذخیره (حالت) نشان داده شده است و جریان ورودی، مقادیر تبخیر، جریان خروجی و مقادیر سرریز هر کدام با یک متغیر جریان نمایش داده شده است. مقادیر سرریز از مخزن سد با توجه به مقادیر ورودی، خروجی و ارتفاع معادل حجم حداکثر مخزن سد بدین گونه محاسبه می‌شود که در صورتی که ورودی بیشتر از خروجی و بیشتر از ارتفاع معادل حداکثر حجم مخزن سد (تراز نرمال سد) باشد، با در نظر گرفتن خروجی‌ها و همچنین تلفات آب از مخزن (تبخیر)، سد سرریز خواهد داد. مقادیر جریان خروجی بر اساس سیاست‌های بهره‌برداری از سد و نیازهای پایین‌دست تعیین می‌شود (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹). به عنوان مثال برای سد کاردنه نیازهای به ترتیب شرب، محیط زیست و صنعت (کشاورزی صنعتی) در نظر گرفته شد که نمودار علی-معلولی آن در شکل ۴ موجود می‌باشد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، جهت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

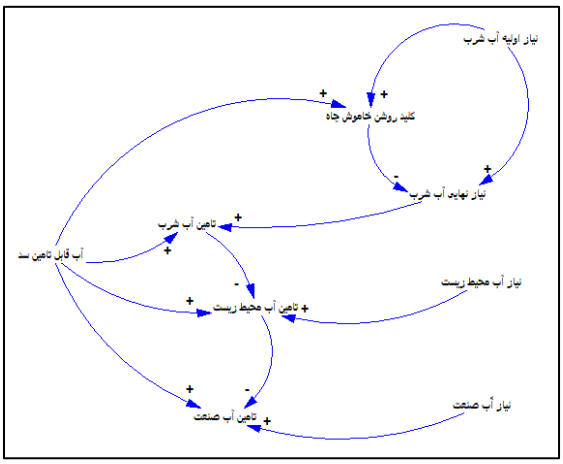
تأمین آب شرب، کلید روشن/خاموشی چاه‌های آب شرب در مدل در نظر گرفته شده است که در صورتی که در یک مرحله زمانی[۱۴] (در این مدل مرحله زمانی ماهانه در نظر گرفته شده است)حجم آب قابل تأمین مخزن سد قادر به تأمین نیاز آب شرب باشد، کلید روشن/خاموشی چاه‌های آب شرب موجود به حالت خاموش درآمده و تمامی آب شرب مورد نیاز از مخزن سد تأمین می‌گردد. در غیر این صورت (در صورتی که حجم آب قابل تأمین مخزن سد کمتر از نیاز آب شرب باشد) کلید روشن/خاموشی چاه‌های آب شرب به حالت روشن درآمده و حجم نیاز آب شرب در آن مرحله زمانی (آن ماه) برابر با نیاز اولیه آب شرب منهای حجم آب قابل برداشت از طریق چاه‌های آب شرب می‌گردد. به این صورت نیاز نهایی آب شرب محاسبه و از حجم آب قابل تأمین سد برداشت می‌گردد و در آن مرحله زمانی چاه‌های آب شرب روشن در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس اولویت‌ها، پس از تأمین آب شرب، به ترتیب، آب محیط زیست و آب صنعت از مخزن سد برداشت می‌گردند (شکل ۴). با توجه به اینکه سد سنا با هدف برداشت آب جهت کشاورزی احداث شده است، اولویت‌های برداشت از مخزن سد سنا ابتدا آب مورد نیاز محیط زیست و سپس کشاورزی است که در ادامه هر یک از این نیازها به تفصیل توضیح داده می‌شود.



شکل ۳. نمودار علی-معلولی بخش اصلی هر یک از سدها
Fig 3. Cause and effect diagram of the main part of each dam

[14] - time step

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]



شکل ۴. نمودار علی-معلولی تأمین نیازها از سد کاردنه

Fig. 4. Cause and effect diagram of meeting the needs of the Kardeneh dam

سد کاردنه

بر اساس مطالعات هواشناسی، متوسط تبخیر سالانه از مخزن سد، برابر با ۳۳۸۷ میلی‌متر است که بیشترین مقدار آن به‌طور متوسط ۴۹۳ میلی‌متر در خرداد ماه و کمترین مقدار آن ۸۲ میلی‌متر در دی ماه است. اطلاعات میانگین ماهانه و سالانه تبخیر از مخزن سد در جدول ۱ موجود می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات هیدرولوژی، متوسط بلند مدت (۳۹ ساله) حجم آورد سالانه رودخانه در محل ساختگاه سد ۵/۱۴۳ میلیون مترمکعب می‌باشد. میانگین ماهانه و سالانه رواناب سد کاردنه در جدول ۲ موجود می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج مطالعات هیدرولوژی و رسوب در زمینه برآورد بار رسوبی در موقعیت سد، حجم رسوب ۵۰ ساله در محل سد ۰/۷۰۶ میلیون مترمکعب مشخص گردید. میزان نیاز شرب سالانه شهر خورموج در افق ۱۴۲۵ برابر با ۳/۴۳ میلیون متر مکعب است که میزان سالانه ۲/۰۹ میلیون متر مکعب آن در شرایط کنونی تأمین می‌گردد و به اندازه سالانه ۱/۰۴ میلیون متر مکعب کمبود آب شرب برای شهر خورموج تا سال ۱۴۲۵ وجود دارد که می‌بایست از طریق سد کاردنه تأمین گردد. مقادیر میانگین ماهانه و سالانه نیاز آب شرب سد کاردنه در جدول ۶ آورده شده است. مجتمع روستایی لاور نیز در نزدیکی شهر خورموج قرار دارد که به میزان ۰/۴ میلیون مترمکعب تا سال ۱۴۲۵ کمبود آب شرب دارد و در سناریوهای مدیریتی که در ادامه توضیح داده می‌شود، پیش‌بینی شده که در صورت امکان آب شرب آن از طریق سد کاردنه تأمین گردد. همچنین دو حلقه چاه آب شرب با دبی ۲۵۹ متر مکعب بر روز در منطقه وجود دارد که در مدلسازی جهت رفع کمبود آب شرب در ماه‌هایی که سد کاردنه قادر به تأمین نیاز آب شرب نیست وارد گردیده و تعداد ماه‌های مورد نیاز جهت استفاده از این چاه‌ها بهینه گردیده است (توضیحات شکل ۳). جهت صرفه‌جویی در هزینه‌ها و برای تأمین آب شرب از طریق سد کاردنه، می‌بایست از خط انتقال موجود تا مخزن شهر خورموج استفاده نمود که ظرفیت این خط انتقال ۷۳ لیتر بر ثانیه معادل ۲/۳ میلیون متر مکعب در سال است، لذا این موضوع ملاک عمل شبیه‌سازی در بخش سد کاردنه قرار گرفته است. این موضوع بدین صورت در مدل مشخص گردید که حداکثر تأمین آب شرب از سد کاردنه باید ۷۳ لیتر بر ثانیه باشد تا خط انتقال موجود جهت انتقال آب شرب از محل سد قابل استفاده باشد. مصارف کشاورزی صنعتی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

(گلخانه) منطقه بر اساس وسعت اراضی زیر کشت آبی تعیین گردید. بر این اساس نیاز آبی ناخالص ماهانه و سالانه کشاورزی صنعتی سد، برای سطح کشتی معادل ۵۰ هکتار جهت کشت گلخانه‌ای معادل ۰/۲۵۷ میلیون مترمکعب در سال در نظر گرفته شده است. مقادیر میانگین ماهانه و سالانه نیاز کشاورزی صنعتی سد کاردنه در جدول ۸ آورده شده است. حجم میانگین سالانه هر یک از نیازها از سد کاردنه در طول ۳۹ سال دوره آماری و همچنین میانگین دراز مدت سالانه آن‌ها در جدول ۱۲ آورده شده است.

جدول ۱. مقادیر میانگین ماهانه تبخیر از سطح آزاد آب در محل سد بر حسب میلی‌متر

Table 1. Average monthly values of evaporation from the free surface of water at the dam site in millimeters

month	Evaporation (mm)
Oct	299
Nov	184
Dec	120
Jan	82
Feb	100
Mar	151
Apr	233
May	371
Jun	493
Jul	492
Aug	472
Sep	390
Annual	3387

جدول ۲. مقادیر میانگین ماهانه رواناب در محل سد کاردنه بر حسب میلیون متر مکعب

Table 2. Average monthly runoff values at the Kardeneh dam site in million cubic meters

month	Rounoff (MCM)
Oct	0.0000
Nov	0.3595
Dec	1.5068
Jan	1.4819
Feb	1.3155
Mar	0.2945
Apr	0.1844
May	0.0000
Jun	0.0000
Jul	0.0000
Aug	0.0000
Sep	0.0000
Annual	5.1427

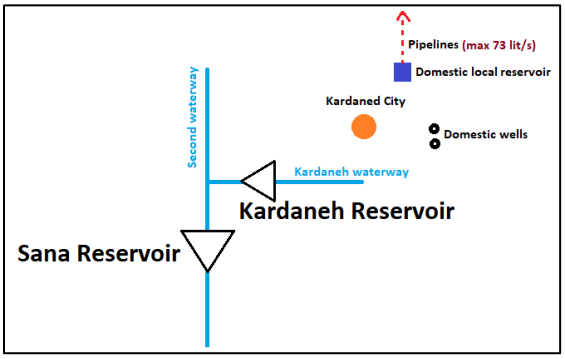
سد سنا

بر اساس مطالعات هواشناسی، متوسط تبخیر سالانه از مخزن سد سنا معادل سد کاردنه (به دلیل نزدیکی دو سد) و برابر ۳۳۸۷ میلی‌متر می‌باشد (جدول ۱). با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات هیدرولوژی، آورد رودخانه در محل ساختگاه سد سنا از طریق دو آبراهه تأمین می‌گردد (آبراهه کاردنه و آبراهه دوم) که بر روی یکی از این آبراهه‌ها قرار است سد کاردنه احداث گردد (شکل ۵). جدول ۳ نشان دهنده میانگین رواناب سد سنا است. ستون اول این جدول مربوط به میانگین رواناب آبراهه کاردنه (در واقع همان رواناب ورودی سد کاردنه موجود در جدول ۲) است. ستون دوم مربوط به میانگین رواناب آبراهه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

دوم و ستون سوم که جمع این دو ستون است، میانگین رواناب سد سنا بدون احداث سد کاردنه در بالادست آن می‌باشد. با توجه به این موضوع رواناب ورودی سد سنا بدون در نظر گرفتن سد کاردنه در بالادست ۱۱/۶۱ میلیون متر مکعب می‌باشد که از مجموع هر دو آبراهه دریافت می‌گردد. همانگونه که قبلا نیز عنوان شد، در صورت احداث سد کاردنه، رواناب ورودی به سد سنا برابر با رواناب آبراهه دوم بعلاوه مجموع سرریز و آب تأمین شده محیط زیست سد کاردنه است که از مخزن سد کاردنه رها می‌گردد. بر اساس نتایج مطالعات هیدرولوژی و رسوب در زمینه برآورد بار رسوبی در موقعیت سد، حجم رسوب ۵۰ ساله ۰/۴۳۹ میلیون مترمکعب مشخص گردید. نیاز آبی کشاورزی سد سنا جهت صرفاً جهت اراضی دارای پروانه موقت آبیاری یا حقابه دار در نظر گرفته شده که معادل ۰/۴۹۶۶ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. مقادیر میانگین ماهانه و سالانه نیاز کشاورزی سد سنا در جدول ۱۰ آورده شده است.

با توجه به نیاز اکولوژی انواع گونه‌های آبزی رودخانه و همچنین لزوم تأمین حداقل جریان پس از تأمین اهداف اولیه سد، برآورد نیاز محیط‌زیست رودخانه جهت حفظ پایداری جریان پایین دست ضروری می‌باشد. برای محاسبه نیاز زیست محیطی و پایداری جریان در محل سد از روش مونتانا (تنانت) استفاده شده است. در این روش، نیاز زیست محیطی رودخانه بصورت درصدی از متوسط رواناب سالانه در یک منطقه برای تعیین کیفیت زیستگاه ماهیان در نظر گرفته می‌شود (نظری و همکاران، ۱۳۹۱). جدول ۴ نشان دهنده استاندارد روش مونتانا برای انتخاب درصدی از میانگین رواناب سالانه بر اساس اهداف مختلف می‌باشد (نظری و همکاران، ۱۳۹۱). همانگونه که در جدول مشاهده می‌شود، در این روش کل طول سال به دو بخش خشک (بهار و تابستان) و تر(پاییز و زمستان) تقسیم شده است که در صورتی که به عنوان مثال ۴۰ درصد از میانگین رواناب فصل تر و ۶۰ درصد از میانگین رواناب فصل خشک به عنوان نیاز زیست محیطی رهاسازی شود بر اساس جدول ۴ بسیار عالی است. در این تحقیق، ابتدا بر اساس احجام میانگین آبدهی در محل سد، ماه‌های خشک و تر مشخص شده است. در مرحله بعد مقادیر ماهانه آبدهی در محل سد در ضرایب ۰/۳ و ۰/۱ به ترتیب برای ماه‌های خشک و تر ضرب شده‌اند (بر اساس جدول ۱، هدف عادلانه۱۵ در نظر گرفته شده است). بر این اساس، کل نیاز زیست محیطی سالانه رودخانه در محل سد سنا ۰/۷۹۲ و در محل سد کاردنه ۰/۵۵۱میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است. مقادیر میانگین ماهانه و سالانه نیاز محیط زیست سدهای کاردنه و سنا به ترتیب در جداول ۷ و ۹ آورده شده است. حجم میانگین سالانه هر یک از نیازها از سد سنا در طول ۳۹ سال دوره آماری و همچنین میانگین دراز مدت سالانه آن‌ها در جدول ۱۳ آورده شده است.



[15] - Fairly

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

شکل ۵. نمای شماتیک موقعیت سدها، آبراهه‌های موجود، چاه‌های آب شرب و خط انتقال موجود
Fig. 5. Schematic view of the location of dams, existing waterways, drinking water wells and existing transmission lines

جدول ۳. مقادیر میانگین ماهانه رواناب در محل سد سنا بر حسب میلیون متر مکعب
Table 3. Average monthly runoff values at the Sana Dam site in million cubic meters

month	Average Runoff		
	Kardeneh waterway	Second waterway	Sana Dam alone
Oct	0.0000	0.0000	0.0000
Nov	0.3595	0.5300	0.8895
Dec	1.5068	2.1500	3.6569
Jan	1.4819	1.6413	3.1233
Feb	1.3155	1.7763	3.0918
Mar	0.2945	0.2444	0.5389
Apr	0.1844	0.1241	0.3085
May	0.0000	0.0000	0.0000
Jun	0.0000	0.0000	0.0000
Jul	0.0000	0.0000	0.0000
Aug	0.0000	0.0000	0.0000
Sep	0.0000	0.0000	0.0000
Annual	5.1427	6.4662	11.6090

جدول ۴. روش مونتانا، درصدی از میانگین جریان سالانه برای حفظ شرایط رودخانه بر اساس اهداف مختلف
Table 4. Montana method, percentage of average annual flow to maintain river conditions based on different objectives

Purpose	Suggested percentage of average annual flow	
	Aautumn-Winter	Spring-Summer
Very excellent	40	60
Excellent	30	50
Good	20	40
Fairly	10	30
Weak	10	10
Severe destruction	0-10	0-10

صحت سنجی مدل

به منظور تعیین صحت مدل و نشان دادن این موضوع که آیا مدل شبیه‌سازی شده نمونه معتبری از عملکرد مخزن سد بوده و توانایی تحلیل سناریوهای مورد نظر را دارد، بایستی نتایج شبیه‌سازی مدل با اطلاعات واقعی سد مقایسه گردیده و مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرد. در مدلسازی دینامیک مخازن سد تعیین بیلان‌های زمانی و مکانی آب از موارد بسیار مهم و تأثیرگذار در مدیریت منابع آب می‌باشند. یکی از مهم‌ترین داده‌های موجود سد که در این راستا می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد حجم ذخیره مخزن سد می‌باشد (شیخ خوزانی و همکاران، ۱۳۸۹). بر این اساس از اطلاعات اندازه‌گیری حجم مخزن سد سنا طی دوره ۳۹ ساله (از سال ۱۳۶۱-۱۳۶۲ تا ۱۳۹۹-۱۴۰۰) استفاده گردید (به این دلیل که سد کاردنه در مرحله مطالعه می‌باشد و هنوز احداث نگردیده است، اندازه‌گیری حجم مخزن ندارد و قابل صحت سنجی نمی‌باشد). شکل ۷ نشان دهنده مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده سد سنا (بدون در نظر گرفتن سد کاردنه) است. به منظور ارزیابی عملکرد سد سنا، از تابع خود همبستگی (R^2)، خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) و معیار مش-ساتکلیف استفاده شده است (Ashofteh at al., 2014).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

$$R^2 = \frac{[\sum(y_{m,i}-\bar{y}_{m,i})(y_{s,i}-\bar{y}_{s,i})]^2}{\sum(y_{m,i}-\bar{y}_{m,i})^2 \sum(y_{s,i}-\bar{y}_{s,i})^2} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}[y_{m,i}(t) - y_{s,i}(t)]^2} \quad (۲)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(y_{m,i}-y_{s,i})^2}{\sum(y_{s,i}-\bar{y}_{s,i})^2} \quad (۳)$$

که در آن $y_{m,i}$ مقادیر مدلسازی شده و $y_{s,i}$ مقادیر مشاهده شده می‌باشند. مقادیر $\bar{y}_{m,i}$ و $\bar{y}_{s,i}$ نشان دهنده میانگین مقادیر مدلسازی شده و مشاهده شده می‌باشند.

تابع خود همبستگی بیانگر میزان همبستگی بین دو دسته داده می‌باشد که همیشه مقداری بین صفر و یک است (رابطه ۱). مقدار صفر به معنی عدم خودهمبستگی داده‌ها و مقدار یک به معنی خود همبستگی کامل داده‌ها است.

خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) از پرکاربردترین معیارهای مورد استفاده در تحلیل رگرسیون است (رابطه ۲) تا ببینند آیا نقاط پرت با پیش‌بینی‌های مدل تداخل دارند یا خیر. اگر مقدار این شاخص کوچک‌تر از ۰/۱ باشد برازندگی مدل بسیار عالی است. اگر بین ۰/۱ و ۰/۵ باشد برازندگی مدل خوب است و اگر بین ۰/۵ و ۰/۸ باشد برازندگی مدل متوسط است.

معیار مش-ساتکلیف (رابطه ۳) از منفی بی‌نهایت تا یک قابل تغییر بوده و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد صحت سنجی مدل دقیق‌تر خواهد بود. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵ نشان دهنده عملکرد قابل قبول مدل می‌باشد.

این مقادیر برای سد سنا محاسبه شده است که در بخش نتایج آورده خواهد شد.

نتایج و بحث

در این تحقیق، مدلسازی دو سد سنا و کاردنه با توجه به این موضوع که سد سنا ساخته شده و دارای داده حجم مخزن می‌باشد اما سد کاردنه در مرحله مطالعات است و ساخته نشده، در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول سد سنا به تنهایی مدلسازی شد و نتایج مدل با اطلاعات واقعی مورد ارزیابی و صحت سنجی قرار گرفت. در مرحله دوم، سد کاردنه نیز به مدلسازی اضافه گردید و هر دو سد بصورت پیوسته مدلسازی شدند.

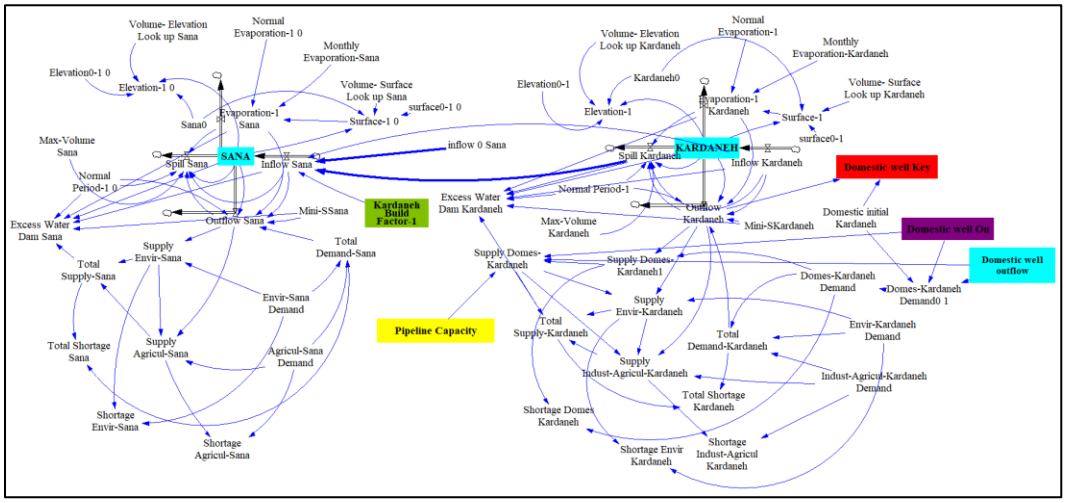
شبیه‌سازی هر دو سد در دوره آماری ۳۹ ساله و با Time Step ماهانه (در ۸۶۴ ماه) انجام شده است که نمای کلی آن در نرم‌افزار Vensim در شکل ۶ آورده شده است. اولویت‌های تخصیص آب سد سنا شامل: ۱) محیط زیست و ۲) کشاورزی بوده و اولویت‌های تخصیص آب سد کاردنه شامل: ۱) شرب، ۲) محیط زیست و ۳) کشاورزی صنعتی (گلخانه) می‌باشد. شکل ۶ نشان دهنده نمای کلی مدلسازی سدهای کاردنه و سنا در محیط نرم‌افزاری Vensim می‌باشد. این مدل قابلیت مدلسازی پیوسته هر دو سد کاردنه و سنا و همچنین مدلسازی هر کدام از این سدها به تنهایی با در نظر گرفتن فاکتور ساخت سد کاردنه[16] در شکل ۶ می‌باشد. در صورتی که فاکتور ساخت سد کاردنه در مدل، مقدار صفر گذاشته شود، مدل سد کاردنه را

[16] - Kardaneh build factor

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

حذف و فقط سد سنا مدلسازی می‌شود و چنانچه فاکتور ساخت سد کاردنه در مدل یک گذاشته شود، مدل هر دو سد را بصورت پیوسته مدلسازی می‌کند.

همانگونه که قبلاً عنوان شد، جهت صحت سنجی مدل، ابتدا در مدلسازی فاکتور ساخت سد کاردنه صفر در نظر گرفته شده و سد سنا به تنهایی مدلسازی شد (بر اساس فلوچارت شکل ۲). سپس نتایج حجم مخزن مدلسازی شده با حجم مخزن مشاهده شده سد سنا مقایسه شده و مورد صحت سنجی قرار می‌گیرد. برای صحت سنجی همانگونه که قبلا عنوان شد از تابع خود همبستگی، خطای ریشه میانگین مربعات و معیار مش-ساتکلیف استفاده شد که مقادیر آن‌ها به ترتیب ۰/۹۱۳۷، ۰/۰۴۹۲ و ۰/۹۰۹۹ می‌باشد که نشانگر برازندگی بسیار عالی مدل می‌باشد. یکی از دلایل این برازندگی بالا عدم رؤیت نشت (یا نشت بسیار کم) از مخزن سد می‌باشد. پس از تعیین صحت مدل، فاکتور ساخت سد کاردنه یک در نظر گرفته شده و هر دو سد بصورت پیوسته مدلسازی می‌گردند. نتایج صحت سنجی حجم آب مخزن سد سنا (در مرحله اول، بدون در نظر گرفتن سد کاردنه در بالادست) در شکل ۷ و ۸ موجود می‌باشد. همانگونه که در شکل ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، مدل قادر به شبیه‌سازی سد سنا با دقت بیش از ۹۰ درصد (شکل ۸) می‌باشد. در شکل ۷، میانگین سالانه رواناب و سرریز مخزن سد سنا نیز آورده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، سد سنا به دلیل حجم مخزن کم و رسوب زیاد، قادر به ذخیره‌سازی بخش بسیار کوچکی از رواناب ورودی است و بخش عمده رواناب بصورت سرریز از سد خارج می‌شود. بنابراین، پیشنهاد می‌گردد جهت بهره‌برداری بهتر از رواناب عبوری در مقاطع پایین دست سد سنا پتانسیل‌یابی احداث سد جدید انجام گردد.

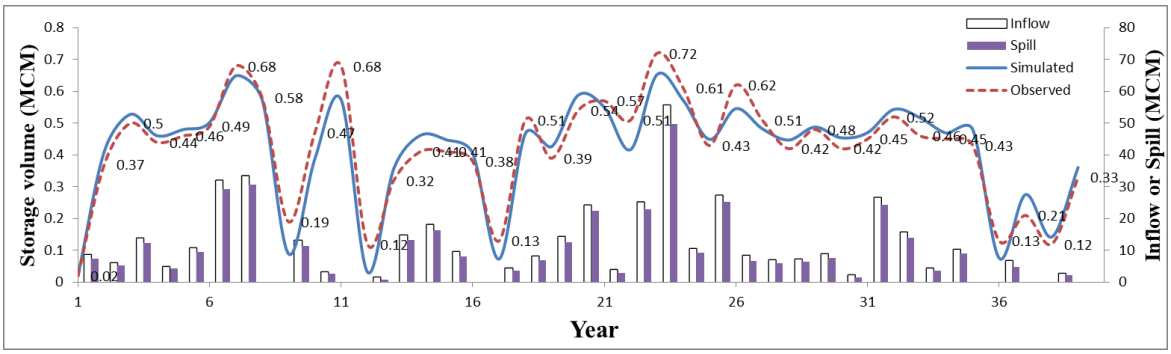


شکل ۶. نمای کلی مدلسازی سدهای متوالی کاردنه و سنا در محیط نرم‌افزار Vensim

Fig. 6. An overview of the modeling of successive Kardeneh and Sena dams in the Vensim software environment

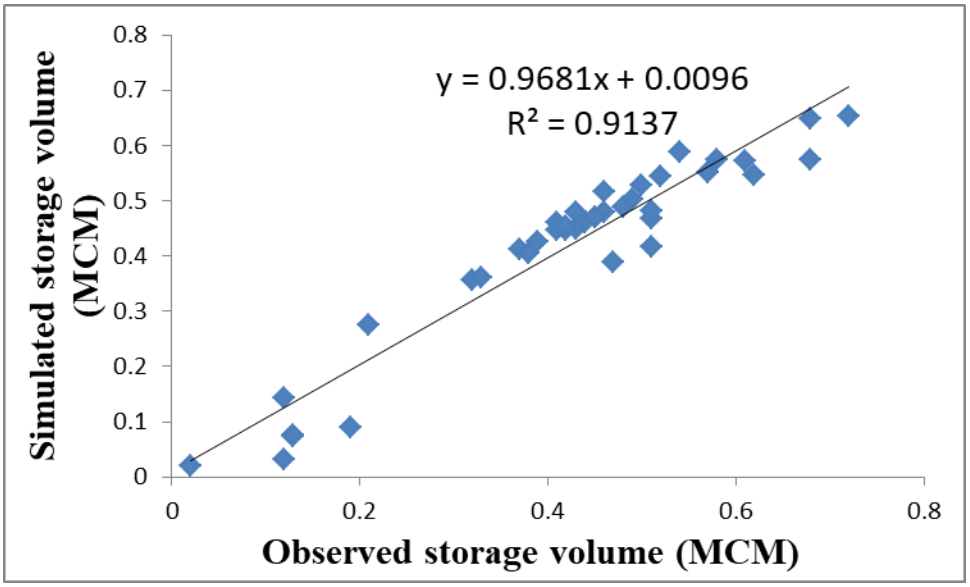
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]



شکل ۷. نمودار صحت سنجی حجم آب مخزن سد سنا به تنهایی (بدون در نظر گرفتن سد کاردنه در بالادست آن)

Fig. 7. The validation chart of the water volume of the Sena dam reservoir alone (without considering the Kardeneh dam upstream of it)



شکل ۸. مقایسه حجم آب مخزن سد سنا در حالت شبیه‌سازی شده و مشاهده شده

Fig. 8. Comparison of water volume of Sena dam reservoir in simulated and observed state

پس از صحت‌سنجی نتایج مدلسازی، فاکتور ساخت سد کاردنه در مدل یک قرار داده می‌شود تا هر دو سد بصورت پیوسته مدلسازی گردند. شکل ۶ نشان دهنده شمای کلی مدلسازی سدها می‌باشد.

معرفی سناریوهای مدیریتی و انتخاب بهترین گزینه

جهت بهره‌برداری بهینه از سدهای کاردنه و سنا، بر اساس نیازهای موجود، شش سناریو مدیریتی در نظر گرفته شد. نتایج این سناریوها در جدول ۵ موجود می‌باشد. در **سناریو اول**: هر دو سد کاردنه و سنا بصورت پیوسته بدون در نظر گرفتن چاه‌های آب شرب کاردنه و با در نظر گرفتن کمبود نیاز آب شرب شهرهای خورموج و مجتمع روستایی لاور تا سال ۱۴۲۵، شبیه‌سازی گردید. در **سناریو دوم**: هر دو سد کاردنه و سنا به همراه یک چاه آب شرب به همراه کمبود نیاز شرب شهر خورموج و مجتمع روستایی لاور شبیه‌سازی گردید. در **سناریو سوم**: هر دو سد کاردنه و سنا به همراه دو چاه آب شرب به

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

همراه کمبود نیاز شرب شهر خورموج و مجتمع روستایی لاور شبیه‌سازی گردید. در **سناریو چهارم**: هر دو سد کاردنه و سنا به همراه یک چاه آب شرب و کمبود نیاز آب شرب خورموج شبیه‌سازی گردید. در **سناریو پنجم**: هر دو سد کاردنه و سنا به همراه دو چاه آب شرب و کمبود نیاز آب شرب خورموج شبیه‌سازی گردید و در نهایت در **سناریو ششم**: هر دو سد کاردنه و سنا به همراه دو چاه آب شرب و کمبود نیاز آب شرب خورموج با در نظر گرفتن حداکثر ظرفیت خط انتقال (۷۳ لیتر بر ثانیه) شبیه‌سازی گردید. بر اساس نظام‌نامه تخصیص شماره ۲ وزارت نیرو (تیر ماه ۱۳۸۸) محدوده قابل قبول درصد تأمین حجمی-زمانی آب شرب ۹۵-۱۰۰ درصد، صنعت و محیط زیست ۹۰-۱۰۰ درصد و کشاورزی ۸۰-۱۰۰ درصد می‌باشد .

نتایج شبیه‌سازی در جدول ۵ موجود می‌باشد که نشان می‌دهد، سناریوهای اول تا سوم به دلیل عدم تأمین نیاز آب شرب از سد کاردنه در محدوده قابل قبول وزارت نیرو (بایستی درصد تأمین حجمی و زمانی بالای ۹۵ درصد باشد)، حذف گردیدند. بنابراین این سیستم سد حتی با در نظر گرفتن هر دو چاه آب شرب قادر به تأمین کمبود آب شرب مورد نیاز شهر خورموج و مجتمع روستایی لاور تا سال ۱۴۲۵ نمی‌باشد. به همین دلیل، در سناریو چهارم، نیاز آب شرب مجتمع روستایی لاور حذف گردید و سیستم سد با در نظر گرفتن یک چاه آب شرب شبیه‌سازی گردید. در این حالت نیز به دلیل عدم تأمین نیاز آب شرب از سد کاردنه در محدود قابل قبول وزارت نیرو این سناریو قابل قبول نبوده و حذف گردید. تنها در سناریوهای پنجم و ششم درصدهای تأمین حجمی و زمانی تمامی نیازها از سدهای کاردنه و سنا در محدوده قابل قبول وزارت نیرو قرار می‌گیرند که از این بین سناریو ششم به دلیل لحاظ کردن حداکثر ظرفیت خط انتقال آب (صرفه‌جویی در هزینه‌ها به دلیل استفاده از خط انتقال کنونی) به عنوان سناریو برتر انتخاب می‌شود. همچنین سد سنا در سناریوهای اول تا چهارم قادر به تأمین نیاز کشاورزی در محدوده قابل قبول وزارت نیرو نمی‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که در صورت تخصیص آب از سد کاردنه بر اساس این سناریوها، علاوه بر اینکه درصد تأمین نیازهای شرب و کشاورزی سد کاردنه در محدوده قابل‌قبول نمی‌باشد، باعث کمبود آب پشت سد سنا و عدم تأمین نیاز آب کشاورزی از سد سنا در محدوده قابل‌قبول وزارت نیرو می‌باشد. بنابراین تخصیص آب سد کاردنه بسیار مهم و تأثیرگذار است، هم از نظر تأمین نیازها از خود سد و هم تأمین نیازهای سد سنا در پایین دست آن که متأثر از آن خواهد بود. بر این اساس، سدهای کاردنه و سنا، تنها با لحاظ کردن هر دو چاه آب شرب قادر به تأمین کمبود آب شرب شهر خورموج به تنهایی با در نظر گرفتن حداکثر ظرفیت خط انتقال موجود آب و همچنین نیازهای تعریف شده خود می‌باشند. از بین سناریوهای پنجم و ششم، سناریو ششم به عنوان سناریو برتر (به دلیل در نظر گرفتن حداکثر ظرفیت خط انتقال) در نظر گرفته می‌شود.

بر اساس شبیه‌سازی صورت گرفته و شاخص‌های ارزیابی مدل و بر اساس سناریو ششم (جدول ۵)،درصد تأمین حجمی آب شرب، محیط زیست و کشاورزی صنعتی از سد کاردنه به ترتیب ۹۷/۶۶، ۹۶/۵۹، ۸۲/۷۶ درصد بوده و همچنین درصد تأمین زمانی این نیازها از سد به ترتیب ۹۷/۳۶، ۹۶/۵۹، ۸۲/۳۴ درصد می‌باشد که همگی در محدوده قابل قبول وزارت نیرو می-باشند. همچنین، درصد تأمین حجمی آب محیط زیست و کشاورزی از سد سنا به ترتیب ۱۰۰ و ۸۳/۴۸ درصد بوده و درصد تأمین زمانی این نیازها از سد سنا به ترتیب ۱۰۰، ۸۱/۴۱ درصد می-باشد. بر این اساس، هر دو سد کاردنه و سنا، طبق سناریو ششم، قادر به تأمین کلیه نیازها در محدوده قابل قبول نظام‌نامه تخصیص شماره ۲ وزارت نیرو می‌باشند. همچنین در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

این شبیه‌سازی حداکثر آب برداشتی از سد کاردنه با حداکثر ظرفیت خط انتقال مطابقت دارد و بنابراین می‌توان از این خط انتقال موجود جهت انتقال آب سد کاردنه استفاده نمود .

جدول ۶ تا ۸ نشان دهنده میانگین ماهانه و سالانه نیاز، تأمین و کمبود آب به ترتیب شرب، محیط زیست و کشاورزی صنعتی سد کاردنه می‌باشند و جدول ۹ و ۱۰ نشان دهنده میانگین ماهانه و سالانه نیاز، تأمین و کمبود آب به ترتیب محیط زیست و کشاورزی سد سنا می‌باشند.

همانگونه که در جداول ۶ تا ۸ مشاهده می‌گردد، کمبود آب شرب سد کاردنه فقط در مهر ماه، کمبود آب محیط زیست عمدتاً در دی ماه و کمبود آب کشاورزی صنعتی نیز عمدتاً در مهر ماه و آبان ماه اتفاق می‌افتد. همچنین بر اساس جداول ۹ و ۱۰، در هیچ ماهی کمبود آب محیط زیست از سد سنا وجود ندارد اما در ماه‌های آبان و مهر بیشترین کمبود آب کشاورزی از سد سنا وجود دارد. بنابراین، این جداول نشان می‌دهند عمدتاً مهر و آبان ماه بحرانی‌ترین ماه سال در منطقه جهت تأمین نیازهای سد کاردنه و سنا می‌باشد.

جدول ۱۱ نشان دهنده حجم سالانه نیاز، تأمین، تبخیر و سرریز آب سد کاردنه برحسب میلیون متر مکعب در طول دوره زمانی ۳۹ ساله مدل می‌باشد. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌گردد، در ۱۹ سال از ۳۹ سال، سد سرریز دارد که به‌طور سالانه حدود ۲ میلیون مترمکعب را شامل می‌شود. همچنین بصورت میانگین ۱/۲۹ میلیون متر مکعب از آب سد کاردنه، سالانه تبخیر می‌شود که حدود ۲۱ درصد از حجم نرمال سد کاردنه می‌باشد. جدول ۱۲ نشان دهنده حجم سالانه نیاز، تأمین، تبخیر و سرریز آب سد سنا برحسب میلیون متر مکعب در طول دوره زمانی ۳۹ ساله مدل می‌باشد. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌گردد، تنها در ۸ سال از ۳۹ سال، سد سنا سرریز ندارد که ناشی از حجم مخزن کم این سد نسبت به رواناب ورودی آن است. به‌طور سالانه حدود ۷ میلیون مترمکعب سرریز از سد سنا اتفاق می‌افتد که نسبت به حجم مخزن این سد، مقدار قابل توجهی است. همچنین بصورت میانگین ۰/۳۳ میلیون متر مکعب از آب سد سنا، بصورت سالانه تبخیر می‌شود که حدود ۲۷ درصد از حجم نرمال سد سنا می‌باشد.

همانگونه که قبلا عنوان گردید، بر اساس سناریو ششم، چاه‌های آب شرب کاردنه در مدلسازی لحاظ گردید و تعداد ماه‌های مورد نیاز به آب این چاه‌ها جهت تأمین آب شرب منطقه تعیین گردید. شکل ۹ نشان دهنده ماه‌های روشن یا خاموش بودن چاه‌های آب شرب سد کاردنه در طول دوره ۳۹ ساله مدل‌سازی می‌باشد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، در مجموع در ۱۰۱ ماه از ۴۶۸ ماه مدلسازی (۳۹ سال) این چاه‌ها نیاز است که روشن باشند و در سایر ماه‌ها نیازی به آب این چاه‌ها وجود ندارد و آن‌ها خاموش هستند .

شکل ۱۰ نشان دهنده میانگین ماهانه درصد تأمین حجمی آب شرب، زیست محیطی و کشاورزی صنعتی از سد کاردنه می‌باشد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، درصد تأمین حجمی آب شرب در تمامی ماه‌ها بجز مهر ماه ۱۰۰ درصد می‌باشد. همچنین بیشترین درصد تأمین آب کشاورزی صنعتی در بهمن ماه می‌باشد. شکل ۱۱ نیز مشابه شکل ۱۰، البته برای سد سنا می‌باشد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌گردد، درصد تأمین حجمی آب زیست محیطی در تمامی ماه‌های مورد نیاز ۱۰۰ درصد بوده اما درصد تأمین حجمی آب کشاورزی در ماه‌های آذر و آبان حداقل می‌باشد. شکل ۱۲ و ۱۳ نشان دهنده میانگین ماهانه حجم رواناب، سرریز و حجم کل تأمین آب سد به ترتیب کاردنه و سنا بر حسب میلیون متر مکعب

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌گردد بیشترین حجم رواناب سد کاردنه در آذر ماه و بیشترین حجم سرریز سد در دی ماه رخ می‌دهد. بیشترین حجم تأمین آب از سد نیز در آذر ماه اتفاق می‌افتد. همچنین در شکل ۱۳ مشاهده می‌گردد که بیشترین حجم رواناب سد سنا در آذر ماه و بیشترین حجم سرریز سد در آذر ماه رخ می‌دهد. بیشترین حجم تأمین آب از سد نیز در دی ماه اتفاق می‌افتد.

جدول ۵. سناریوهای مدیریتی سدهای کاردنه و سنا (اعداد قرمز رنگ درصدهای غیر قابل قبول توسط وزارت نیرو می‌باشند)

Table 5- Management scenarios of Kardeneh and Sena dams
(The red numbers are the unacceptable percentages by the Ministry of Energy)

scenario	Dam	Supply percentage	Needs		
			Domestic	Environmental	Agricultural
First	Kardaneh	volumetric	**77.41**	92.04	**73.03**
		Temporal	**75.85**	92.04	**73.93**
	Sana	volumetric	--	97.14	**49.53**
		Temporal	--	97.14	**48.5**
Second	Kardaneh	volumetric	**79.06**	93.24	**74.37**
		Temporal	**77.87**	93.18	**74.07**
	Sana	volumetric	--	97.14	**49.53**
		Temporal	--	97.14	**48.5**
Third	Kardaneh	volumetric	**89.77**	95.45	**75.99**
		Temporal	**88.46**	95.45	**75.78**
	Sana	volumetric	--	97.14	**49.53**
		Temporal	--	97.14	**48.5**
Fourth	Kardaneh	volumetric	**84.34**	96.59	81.13
		Temporal	**83.73**	96.59	80.91
	Sana	volumetric	--	97.14	**49.53**
		Temporal	--	97.14	**48.5**
Fifth	Kardaneh	volumetric	97.67	96.59	82.76
		Temporal	97.37	96.59	82.34
	Sana	volumetric	--	100	83.48
		Temporal	--	100	81.41
Sixth	Kardaneh	volumetric	97.66	96.59	82.76
		Temporal	97.36	96.59	82.34
	Sana	volumetric	--	100	83.48
		Temporal	--	100	81.41

جدول ۶. میانگین ماهانه و سالانه نیاز، تأمین و کمبود آب شرب سد کاردنه برحسب میلیون متر مکعب

Average monthly and annual demand, supply and shortage of drinking water of Kardeneh dam in .Table 6
million cubic meters

Month	Average demand	Average supply	Average shortage	Standard deviation
Oct	0.139785	0.132493	0.007292	0.005156
Nov	0.099334	0.099334	0	0
Dec	0.087725	0.087725	0	0
Jan	0.076615	0.076615	0	0
Feb	0.075167	0.075167	0	0
Mar	0.036445	0.036445	0	0
Apr	0.074315	0.074315	0	0
May	0.079346	0.079346	0	0
Jun	0.086629	0.086629	0	0
Jul	0.08647	0.08647	0	0
Aug	0.086148	0.086148	0	0
Sep	0.115242	0.115242	0	0

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

Month	Average demand	Average supply	Average shortage	Standard deviation
Annual	1.043221	1.035929	0.007292	0.005156

جدول ۷. میانگین ماهانه و سالانه نیاز، تأمین و کمبود آب محیط زیست سد کاردنه برحسب میلیون متر مکعب

Table 7. Average monthly and annual water demand, supply and shortage of the Kardeneh Dam environment in terms of million cubic meters

Month	Average demand	Average supply	Average shortage	Standard deviation
Oct	0	0	0	0
Nov	0.035954	0.035954	0	0
Dec	0.150685	0.150685	0	0
Jan	0.148194	0.146616	0.001579	0.001116
Feb	0.13155	0.131544	6.07E-06	4.29E-06
Mar	0.029452	0.029452	0	0
Apr	0.055313	0.055313	0	0
May	6.23E-06	6.23E-06	0	0
Jun	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0
Aug	0	0	0	0
Sep	0	0	0	0
Annual	0.55115423	0.54957023	0.00158507	0.00112029

جدول ۸. میانگین ماهانه و سالانه نیاز، تأمین و کمبود آب کشاورزی صنعتی سد کاردنه برحسب میلیون متر مکعب

Table 8. Monthly and annual average demand, supply and shortage of industrial agricultural water of Kardeneh Dam in million cubic meters

Month	Average demand	Average supply	Average shortage	Standard deviation
Oct	0.071049	0.052831	0.018218	0.012882
Nov	0.049379	0.035452	0.013928	0.009848
Dec	0.028513	0.02392	0.004593	0.003248
Jan	0.015683	0.013672	0.002011	0.001422
Feb	0.013978	0.013185	0.000792	0.00056
Mar	0.012567	0.0116	0.000967	0.000684
Apr	0	0	0	0
May	0	0	0	0
Jun	0	0	0	0
Jul	0.003862	0.003168	0.000693	0.00049
Aug	0.01908	0.015656	0.003425	0.002422
Sep	0.042661	0.032816	0.009845	0.006961
Annual	0.256772	0.2023	0.054472	0.038517

جدول ۹. میانگین ماهانه و سالانه نیاز، تأمین و کمبود آب محیط زیست سد سنا برحسب میلیون متر مکعب

Table 9. Monthly and annual average of water demand, supply and shortage of Sena dam environment in million cubic meters

Month	*Average demand*	*Average supply*	*Average shortage*	*Standard deviation*
Oct	0	0	0	0
Nov	0.052998	0.052998	0	0
Dec	0.215003	0.215003	0	0
Jan	0.236166	0.236166	0	0
Feb	0.177635	0.177635	0	0
Mar	0.073326	0.073326	0	0
Apr	0.037238	0.037238	0	0
May	0	0	0	0
Jun	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

Month	*Average demand*	*Average supply*	*Average shortage*	*Standard deviation*
Aug	0	0	0	0
Sep	0	0	0	0
Annual	**0.792366**	**0.066031**	**0**	**0**

جدول ۱۰. میانگین ماهانه و سالانه نیاز، تأمین و کمبود آب کشاورزی سد سنا برحسب میلیون متر مکعب

Table 10. Monthly and annual average demand, supply and shortage of agricultural water of Sena Dam in terms of million cubic meters

Month	Average demand	Average supply	Average shortage	Standard deviation
Oct	0.092266	0.075431	0.016835	0.011904
Nov	0.096578	0.07361	0.022968	0.01624
Dec	0.050536	0.037955	0.012581	0.008896
Jan	0.032311	0.025207	0.007104	0.005023
Feb	0.041124	0.037818	0.003306	0.002338
Mar	0.061959	0.054109	0.007849	0.00555
Apr	0.057295	0.04995	0.007346	0.005194
May	0.008424	0.007344	0.00108	0.000764
Jun	0.003846	0.003255	0.000592	0.000418
Jul	0.005127	0.004338	0.000789	0.000558
Aug	0.010062	0.008514	0.001548	0.001095
Sep	0.037095	0.030861	0.006233	0.004408
Annual	**0.496623**	**0.408392**	**0.088231**	**0.062388**

جدول ۱۱. حجم میانگین سالانه نیاز، تأمین، تبخیر و سرریز آب سد کاردنه برحسب میلیون متر مکعب

(در طول دوره زمانی ۳۹ ساله مدل)

Table 11. Annual average volume of water demand, supply, evaporation and overflow of Kardeneh dam in million cubic meters

(During the 39-year period of the model)

Year	Domestic (MCM)		Environmental (MCM)		Industrial (MCM)		Evaporation (MCM)	Spill (MCM)
	Demand	Supply	Demand	Supply	Demand	Supply		
1	0.447002	0.447002	0	0	0.256772	0.140892	0.561796	0
2	0.925666	0.893549	0.401626	0.401626	0.256772	0.10783	1.222088	0
3	1.340551	1.340551	0.359827	0.359827	0.256772	0.256772	1.440457	0
4	1.240952	1.240952	1.214644	1.214644	0.256772	0.256772	1.599963	2.112751
5	1.340551	1.340551	0.281983	0.281983	0.256772	0.256772	1.509622	0
6	1.340551	1.340551	0.517993	0.517993	0.256772	0.256772	1.259388	1.094073
7	1.340551	1.340551	1.295298	1.295298	0.256772	0.256772	1.432671	8.752688
8	1.340551	1.340551	1.270475	1.270475	0.256772	0.256772	1.213861	8.584212
9	0.969959	0.969959	0	0	0.256772	0.214112	0.705921	0
10	0.826067	0.79395	0.561642	0.561642	0.256772	0.092147	1.340099	1.083345
11	1.340551	1.340551	0.328645	0.328645	0.256772	0.256772	1.728087	0.083234
12	0.447002	0.447002	0	0	0.256772	0.19117	0.875741	0
13	0.032117	0	0.054943	0.023029	0.256772	0.026545	0.517917	0
14	1.03603	1.003914	0.562626	0.562626	0.256772	0.136344	1.381481	0.986783
15	1.340551	1.340551	0.672179	0.672179	0.256772	0.256772	1.536981	2.953622
16	1.340551	1.340551	0.426641	0.426641	0.256772	0.256772	1.5296	0.339379
17	0.767678	0.767678	0	0	0.256772	0.19117	0.774393	0
18	1.03603	1.003914	0.260001	0.260001	0.256772	0.136344	1.007224	0
19	0.12095	0.094136	0.033767	0.033767	0.256772	0.042228	0.514707	0
20	1.03603	1.003914	0.873856	0.873856	0.256772	0.136344	1.576139	1.266418
21	1.340551	1.340551	0.98877	0.98877	0.256772	0.256772	1.637063	5.932558
22	1.340551	1.340551	0.231258	0.231258	0.256772	0.256772	1.394285	0
23	1.340551	1.340551	1.07141	1.07141	0.256772	0.256772	1.605513	4.507872
24	1.340551	1.340551	3.1438	3.1438	0.256772	0.256772	1.522963	25.32321

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

Year	Domestic (MCM)		Environmental (MCM)		Industrial (MCM)		Evaporation (MCM)	Spill (MCM)
	Demand	Supply	Demand	Supply	Demand	Supply		
25	1.340551	1.340551	0.462793	0.462793	0.256772	0.256772	1.634256	0.930881
26	1.340551	1.340551	1.227909	1.227909	0.256772	0.256772	1.540425	7.953026
27	1.340551	1.340551	0.489902	0.489902	0.256772	0.256772	1.769264	1.171823
28	1.340551	1.340551	0.332031	0.332031	0.256772	0.256772	1.652615	0
29	1.340551	1.340551	0.307547	0.307547	0.256772	0.256772	1.682522	0
30	1.081186	1.081186	0.443556	0.443556	0.256772	0.256772	1.586649	0.142184
31	1.340551	1.340551	0.254079	0.254079	0.256772	0.256772	1.200982	0
32	1.03603	1.035405	1.057369	1.057369	0.256772	0.136344	1.624939	5.419122
33	1.340551	1.340551	0.668513	0.668513	0.256772	0.256772	1.695043	2.681584
34	1.340551	1.340551	0.208422	0.208422	0.256772	0.256772	1.380601	0
35	1.03603	1.03603	0.441692	0.441692	0.256772	0.256772	1.644799	0
36	0.546601	0.546601	0.00225	0.00225	0.256772	0.19117	0.827523	0
37	0.692817	0.6607	0.8519	0.851663	0.256772	0.065603	0.907927	0
38	0.032117	0.032117	0.013757	0.013757	0.256772	0.126274	0.514112	0
39	0.564261	0.532144	0.181918	0.152266	0.256772	0.049487	0.765454	0
Annual	**1.043**	**1.036**	**0.551**	**0.549**	**0.257**	**0.202**	**1.29**	**2.085**

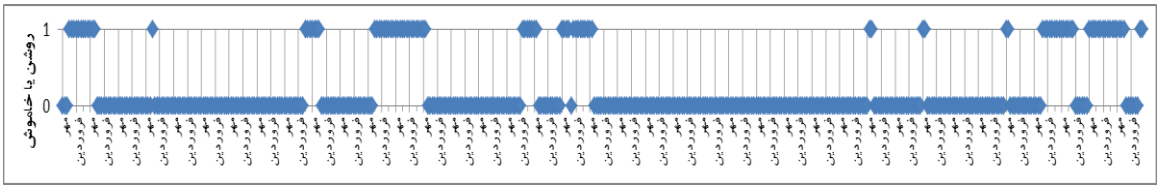
جدول ۱۲. حجم میانگین سالانه نیاز، تأمین، تبخیر و سرریز آب سد سنا برحسب میلیون متر مکعب
(در طول دوره زمانی ۳۹ ساله مدل)

Table 12. Annual average volume of water demand, supply, evaporation and overflow of Sena Dam in million cubic meters
(During the 39-year period of the model)

Year	Environmental (MCM)		Agricultural (MCM)		Evaporation	Spill
	Demand	Supply	Demand	Supply	(MCM)	(MCM)
1	0	0	0.496623	0.14657	0.031786	0
2	0.481873	0.481873	0.496623	0.257243	0.334758	3.440364
3	0.278166	0.278166	0.496623	0.496623	0.397288	1.604936
4	0.711612	0.711612	0.496623	0.483117	0.406377	7.492525
5	0.239269	0.239269	0.496623	0.496623	0.390696	1.43705
6	0.581979	0.581979	0.496623	0.476012	0.315967	5.360244
7	2.137074	2.137074	0.496623	0.496623	0.363046	24.99201
8	2.084471	2.084471	0.496623	0.496623	0.300045	26.57746
9	0	0	0.496623	0.341605	0.05147	0
10	1.056149	1.056149	0.496623	0.224932	0.305936	6.822792
11	0.030018	0.030018	0.496623	0.476096	0.271872	0
12	0	0	0.496623	0	0	0
13	0.134825	0.134825	0.496623	0.224932	0.343109	0.360049
14	0.93679	0.93679	0.496623	0.496623	0.372739	8.601196
15	1.15804	1.15804	0.496623	0.496623	0.371751	12.5174
16	0.786133	0.786133	0.496623	0.410536	0.372907	4.185241
17	0	0	0.496623	0.307251	0.064564	0
18	0.21499	0.21499	0.496623	0.307779	0.362806	0.980055
19	0.82164	0.82164	0.496623	0.495432	0.359305	6.550195
20	0.895778	0.895778	0.496623	0.496623	0.434835	7.020033
21	1.467016	1.467016	0.496623	0.496623	0.407753	18.36274
22	0.405692	0.405692	0.496623	0.467995	0.432769	0.568353
23	1.573187	1.573187	0.496623	0.496623	0.413214	17.51986
24	5.247626	5.247626	0.496623	0.496623	0.376256	43.62955
25	0.748618	0.748618	0.496623	0.496124	0.403671	5.444978

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

Year	Environmental (MCM)		Agricultural (MCM)		Evaporation	Spill
	Demand	Supply	Demand	Supply	(MCM)	(MCM)
26	1.529959	1.529959	0.496623	0.496623	0.381905	20.89052
27	1.078605	1.078605	0.496623	0.488394	0.432666	2.944008
28	0.382981	0.382981	0.496623	0.496623	0.429255	2.570579
29	0.445616	0.445616	0.496623	0.496623	0.428954	3.260957
30	0.595155	0.595155	0.496623	0.338792	0.383901	3.187033
31	0.089047	0.089047	0.496623	0.496623	0.417173	0
32	1.614864	1.614864	0.496623	0.496623	0.419048	19.00465
33	0.917919	0.917919	0.496623	0.496623	0.415896	10.02028
34	0.255203	0.255203	0.496623	0.496623	0.409767	1.544052
35	0.606796	0.606796	0.496623	0.419026	0.400561	4.503299
36	0.02635	0.02635	0.496623	0.394155	0.122825	0
37	1.238486	1.238486	0.496623	0.121849	0.322403	2.017865
38	0.000621	0.000621	0.496623	0.349649	0.081232	0
39	0.129738	0.129738	0.496623	0.257243	0.346066	0.279404
Annual	**0.792**	**0.792**	**0.497**	**0.408**	**0.33**	**7.018**

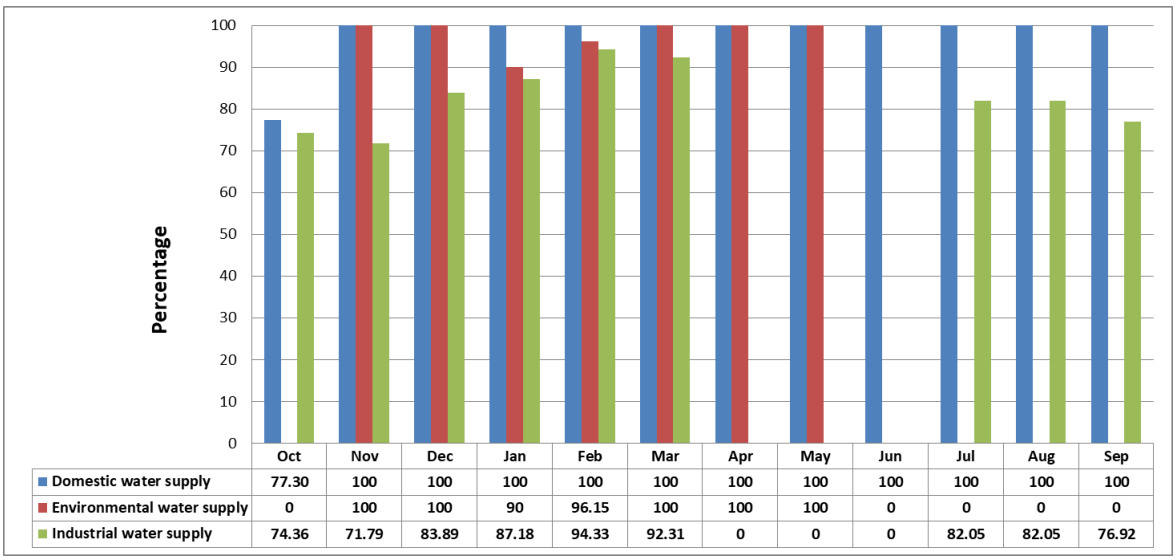


شکل ۹. ماه‌های روشن یا خاموش بودن چاه‌های آب شرب کاردنه در طول دوره آماری ۳۹ ساله

(هر دو چاه روشن=۱ و هر دو چاه خاموش=۰)

Fig. 9. The months of the Kardeneh drinking water wells being on or off during the statistical period of 39 years

(both wells on = 1 and both wells off = 0)

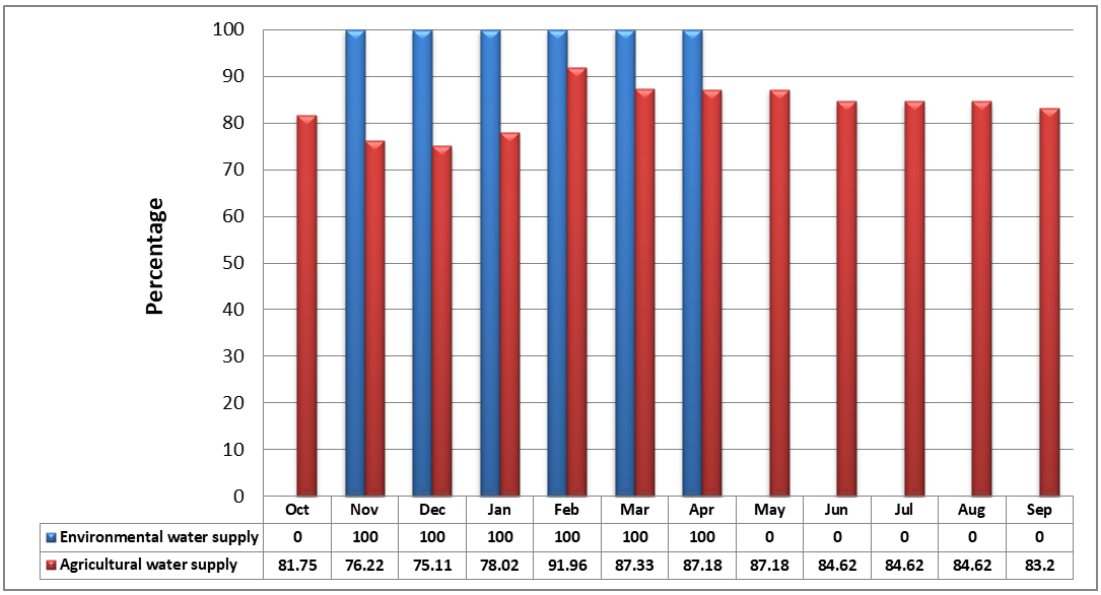


[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

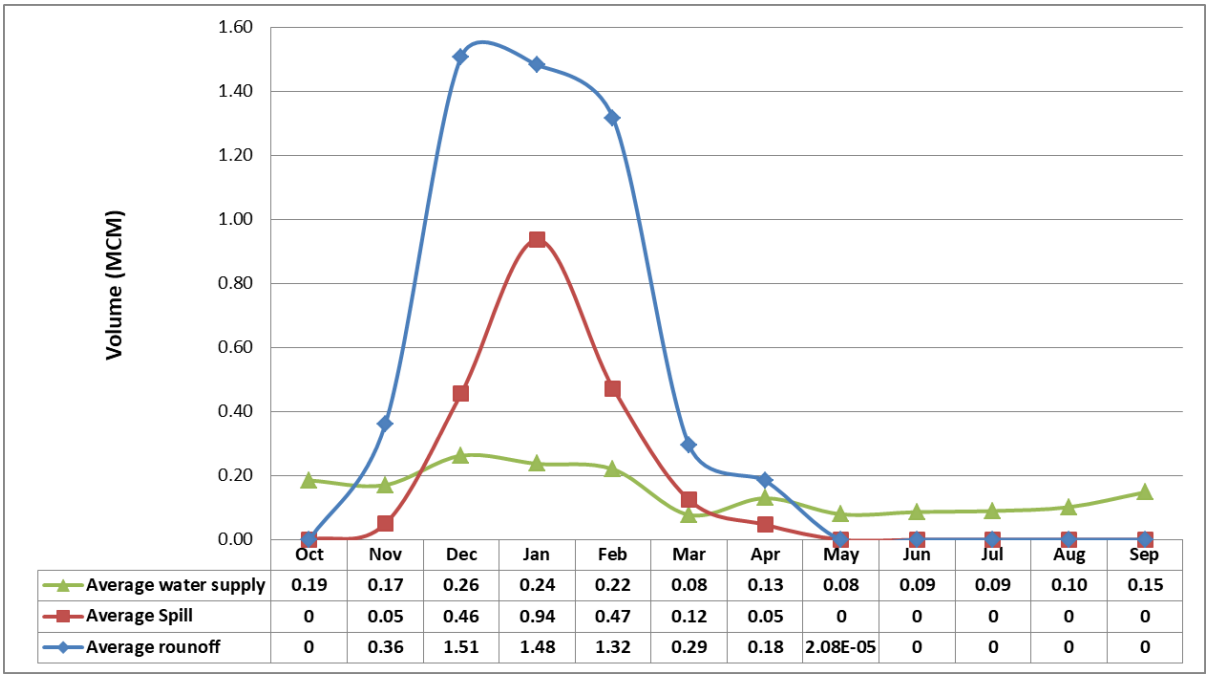
شکل ۱۰. میانگین ماهانه درصد تأمین حجمی آب شرب، زیست محیطی و کشاورزی صنعتی از سد کاردنه

Fig. 10. Monthly average percentage of volume supply of drinking, environmental and industrial agricultural water from Kardeneh dam



شکل ۱۱. میانگین ماهانه درصد تأمین حجمی آب زیست محیطی و کشاورزی از سد سنا

Fig. 11. Monthly average percentage of volume supply of environmental and agricultural water from Sena Dam

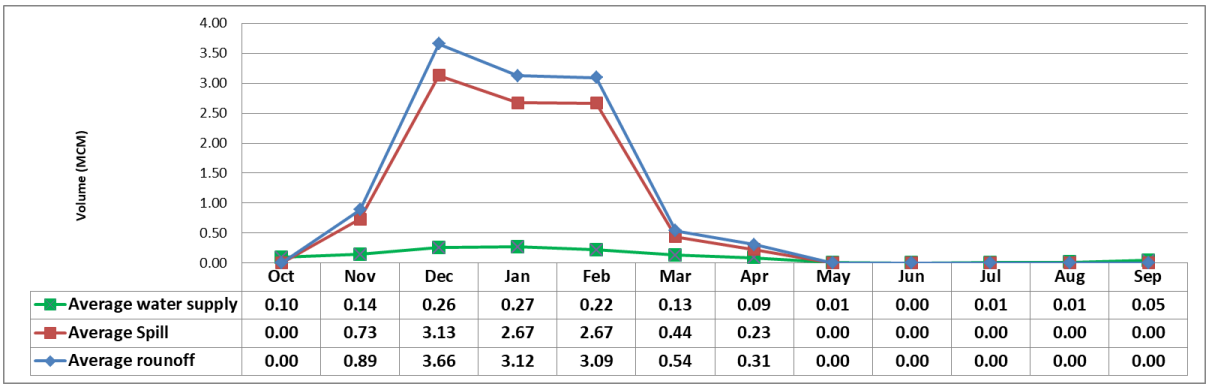


شکل ۱۲. میانگین ماهانه حجم رواناب، سرریز و حجم کل تأمین آب سد کاردنه بر حسب میلیون متر مکعب

Fig. 12. Monthly average volume of runoff, overflow and total water supply volume of Kardeneh dam in million cubic meters

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]



	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep
Average water supply	0.10	0.14	0.26	0.27	0.22	0.13	0.09	0.01	0.00	0.01	0.01	0.05
Average Spill	0.00	0.73	3.13	2.67	2.67	0.44	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Average rounoff	0.00	0.89	3.66	3.12	3.09	0.54	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

شکل ۱۳. میانگین ماهانه حجم رواناب، سرریز و حجم کل تأمین آب سد سنا بر حسب میلیون متر مکعب

Fig. 13. Monthly average volume of runoff, overflow and total water supply volume of Sena dam in million cubic meters

نتیجه گیری

محدوده مورد مطالعه سد کاردنه و سنا واقع در شهرستان خورموج جنوب شرقی شهر بوشهر واقع در استان بوشهر می‌باشد. سد کاردنه با حجم نرمال ۴/۲۸ میلیون مترمکعب در مرحله مطالعه و جهت ذخیره‌سازی و کنترل سیلاب رودخانه و انتقال و توزیع آن جهت مصارف شرب و کشاورزی منطقه می‌باشد. در پایین دست سد کاردنه، سد سنا با حجم نرمال ۱/۲ میلیون متر مکعب جهت ذخیره‌سازی و کنترل سیلاب رودخانه و انتقال و توزیع آن جهت مصارف کشاورزی منطقه موجود می‌باشد. جهت برنامه‌ریزی منابع آب این دو سد متوالی، ابتدا نیازهای آبی هر یک از سدها تعیین گردید. بر این اساس نیازهای آبی سد کاردنه به ترتیب اولویت ۱) شرب، ۲) محیط زیست و ۳) کشاورزی صنعتی (گلخانه) می‌باشد. این سد می‌بایست کمبود آب شرب شهر خورموج تا سال ۱۴۲۵ را نیز تأمین نماید. همچنین نیازهای آبی سد سنا به ترتیب اولویت ۱) محیط زیست و ۲) کشاورزی می‌باشد. مدل‌سازی سد با استفاده از نرم‌افزار Vensim و برای هر دو سد، بصورت پیوسته انجام گردید. جهت تعیین صحت مدل، ابتدا سد سنا به تنهایی مدلسازی شد و نتایج شبیه‌سازی با اطلاعات مشاهده شده حجم مخزن مقایسه گردید. پس از اطمینان از صحت مدل (بالای ۹۰ درصد شباهت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده حجم مخزن سد سنا وجود داشت)، هر دو سد بصورت پیوسته مدلسازی شدند. حداکثر تأمین آب شرب از سد کاردنه به اندازه حداکثر کشش خط لوله موجود آب شرب (۷۳ lit/sec) در مدل لحاظ گردیده است. همچنین دو حلقه چاه آب شرب با دبی ۲۵۹ متر مکعب بر روز در مدلسازی جهت رفع کمبود آب شرب در ماه‌هایی که سد کاردنه قادر به تأمین نیاز آب شرب نیست وارد گردیده است. بر این اساس، شش سناریو مدیریتی در نظر گرفته شد و برای هر شش سناریو مدلسازی انجام گرفت که در نهایت سناریو ششم به عنوان سناریو برتر در نظر گرفته شد. بر این اساس درصد تأمین حجمی نیازهای شرب، محیط زیست و کشاورزی صنعتی سد کاردنه به ترتیب ۹۷/۶۶، ۹۶/۵۹ و ۸۲/۷۶ و همچنین درصد تأمین زمانی این نیازها از سد کاردنه به ترتیب ۹۷/۳۶، ۹۶/۵۹، ۸۲/۳۴ درصد می‌باشد. همچنین درصد تأمین حجمی نیازهای محیط زیست و کشاورزی سد سنا به ترتیب ۱۰۰ و ۸۳/۴۸ و درصد تأمین زمانی این نیازها از سد سنا به ترتیب ۱۰۰، ۸۴/۴۱ درصد می‌باشد که در محدوده قابل قبول وزارت نیرو بر اساس نظام‌نامه تخصیص شماره ۲ می‌باشند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

قدردانی

نویسندگان این مقاله از همکاری شرکت مهندسین مشاور پورآب فارس جهت تهیه اطلاعات تحقیق و سایر همکاری‌های ایشان در راستای این تحقیق بویژه جناب آقایان دکتر ده‌بزرگی و دکتر قادری کمال تشکر و قدردانی را دارند. همچنین از شرکت سهامی آب منطقه‌ای بوشهر جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات اولیه این پژوهش بسیار سپاسگزاریم.

منابع

شیخ خوزانی، ز.، حسینی، خ.، رحیمیان، م.، مدل‌سازی بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره به روش پویایی سیستم . مجله مدل¬سازی در مهندسی، سال هشتم، شماره ۲۱. ۱۳۸۹، صفحه ۵۷-۶۵.

صادقی،ن. ، ابریشمچی، ا. و تجریشی، م، مدلسازی بهره‌برداری از مخزن به منظور کنترل سیلاب با استفاده از روش تحلیل دینامیک سیستم . اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳.

جلالی، م. ر.، افشار، ع.، شبیه‌سازی پویایی سیستم تولید انرژی برقابی . اولین کنفرانس سالانه مدیریت منابع آب ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ۱۳۸۳ . ۲۶-۲۷ آبان، ایران .

صلوی تبار، ع.، ضرغامی، م.، ابریشمچی، ا.، مدل پویایی سیستم در مدیریت آب شهری تهران ،۵۹ ، فصل نامه علمی پژوهشی آب و فاضلاب، ۱۳۸۵، صفحه ۱۲-۲۸.

گلیان، س.، ابریشمچی، ا.، تجریشی، م.، تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منابع آب در حوضه آبریز با روش پویایی سیستم ، فصلنامه علمی-پژوهشی آب و فاضلاب، ۱۳۸۴، صفحه ۶۳-۷۰ .

فتوکیان، م.ر.، صفاری، ن.، ضرغامی، م.، مدلسازی پویای سیستم سد مخزنی یامچی با اعمال الگوی بهینه کشت جهت تدوین سیاست بهره‌برداری ، تحقیقات منابع آب ایران، شماره ۳، ۱۳۹۶، صفحه ۱-۱۶ .

محمدی، ح.، اکبرپور، ا.، باقری، ع.، مدلسازی اندرکنش منابع آب و ارزش افزوده دشت بیرجند ، مجله مدلسازی در مهندسی، سال شانزدهم، شماره ۵۵، ۱۳۹۷، صفحه ۲۷۹-۲۹۸.

اعلمی، م.ت.، فرزین، س.، احمدی، م.ح.، آقابالایی، ب.، دل سازی پویای سیستم سد و آب‌های زیرزمینی به منظور مدیریت بهینه آب (مطالعه موردی: سد گلک) ، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۴، شماره ۱، ۱۳۹۳، صفحه ۱-۱۱ .

نظری، ع.، سید موسوی، س. م.، ویسی، س.، مددی، م. ر.، شاه‌نوریان، م. م.، بررسی روش‌های محاسبه دبی زیست محیطی رودخانه‌ها؛ مطالعه موردی رودخانه پسیخان واقع در استان گیلان ، سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۱۳۹۱. ۲۰-۲۱ شهریور، ایران.

فقیه، ن.، سیستم‌های پویا: اصول و تعیین هویت ، سازمان مطالعه و تدوین سمت، ۱۳۹۳.

Ahmad, S., Simonovic, S.P. System dynamics modeling of reservoir operation for flood management, Journal of Computing in Civil Engineering, vol. 3, 2000, pp. 190-198.

Ashofteh, P.S., Bozorg Haddad, O., Akbari-Alashti, H., Marino, M.A. Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming. American Society of Civil Engineers, 2014, 04014059, pp. 1-12.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

Chen, C. H., Liu, W. L., Liaw, S. L. Development of a Dynamic Strategy Planning Theory and System for Sustainable River Basin Land Use Management. Science of the total Environment, 2005, vol. 346 (1), pp. 17-37.

Ghashghaie, M., Marofi, S., Marofi, H. Using system dynamics method to determine the effect of water demand priorities on downstream flow. Water Resource Management, vol. 28, 2014, pp. 5055-5072.

Keyes, A. M. and Palmer, P.N. The role of object-oriented simulation models in the drought preparedness studies. Proc., 20thAnnu. Int. Conf., Water Resources Plan. And Manage. ASCE, Seattle, Washington, 1993, pp. 479-482.

Kotir, JH. Smith, C., Brown, G., Marshall, N., Johnstone, R.. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agriculture development in the Volta river basin, Ghana. Science of the Total Environment, vol. 573, 2016, pp.444-457.

Madani, K., Marino, M.A. System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. Water Resources Management, vol. 23, 2009, pp. 2163-2187.

Sterman, J. D. Business Dynamics. McGraw-Hill, Boston, 2000.

Simonovic, S.P., and Fahmy, H. A new modeling approach for water resources policy analysis. J.Water Resources Research, vol. 35(1), 1999, pp. 295-304.

Simonovic, S. P., Rajasekaram, V. Integrated analyses of Canada's water resources: A system dynamics approach. Canadian Water Resources Journal, vol. 29(4), 2004, pp. 223-250.

Yang, J., Lei, K., Khu, S., Meng, W., Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model. Water Resource Management, vol. 29, 2015, pp. 885-899.

Zarghami, M., Amir Rahmani, M., Toward effective water diplomacy by using system dynamics: Case study. The 33rd International Conference of the System Dynamics Society, Cambridge, Massachusetts, USA, 2015.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

Dynamic systems modeling of consecutive multi-purpose reservoir dam by using Vensim software

Somayeh Zarei Doudeji*[1], Rahim Bagheri[2], Hadi Jafari[3]

1. Assistant professor, hydrogeology and environmental geology group, Earth science faculty, Shahrood University of technology, Iran
2. Associated professor, hydrogeology and environmental geology group, Earth science faculty, Shahrood .University of technology, Iran
3. Associated professor, hydrogeology and environmental geology group, Earth science faculty, Shahrood .University of technology, Iran

Received: 12 Jul 2023 Accepted: 31 Aug 2023

Abstract

The science of system dynamics is a management tool capable of simulating complex systems in water resources. In this research, the model of the dynamic system of multi-purpose consecutive Kardeneh-Sana dams located in Bushehr province has been simulated. The purpose of this modeling is to realize the different needs of the dam (drinking, environment and industrial agriculture) before its construction and also to investigate the effect of construction of the upstream dam on the supply of the downstream dam. The results were studied after calculating the annual and monthly percentage of volume and time supply of the different needs and source of supply, as well as considering two drinking water wells to provide drinking water in the months when the dam is not able to provide drinking water and the maximum The discharge of the current drinking water pipeline of the region was carried out. Six management scenarios were considered for modeling, and finally the sixth scenario was considered as the most optimal scenario. In order to evaluate the model, the simulated values were compared with the observed values of the water volume of Sana Dam. The results indicate that the volume supply of drinking, environment and industrial agriculture needs of Kardeneh Dam is 97.66, 96.59 and 82.76 respectively, and also the volume supply of environment and agriculture needs from Sana Dam is 100, 48 respectively. It is 83.0%, which is within the acceptable range of the Ministry of Energy. Based on this research, it was determined that by modeling based on model evaluation indicators including percentage of volume supply and percentage of time supply of different needs, it is easy to determine the effect of management and exploitation policies on the way of determining and allocating resources. Water observed and made the most optimal decision.

Keywords: modeling, multi-purpose dams, dynamic system, successive dams, Vensim .software

Introduction

Water is the source of movement, life, a valuable and irreplaceable agent in the economic and social development of countries, and its central role in land preparation, infrastructure development and preservation, balance and stability of the ecosystem and environment cannot be denied. The lack of water in Iran has made its supply difficult in many areas of the country and has gradually increased its dimensions. On the other hand, the occurrence of recent droughts has further fueled this crisis. In

*Corresponding author: s.zarei@shahroodut.ac.ir
DOI: http://doi.org/10.22034/JEG.2023.17.2.1019711

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

the arid regions of Iran, dams, as the largest man-made structures and the largest artificial lakes, are one of the most important ways to access a huge volume of fresh water, and the positive consequences of their construction are in various forms, including economic, industrial, agricultural prosperity or Even the social development and growth for the people of a region or a country or in some cases is over a wide area of several countries (Sterman, 2000). In addition, the construction of the dam without preliminary detailed studies can have negative effects such as not meeting the needs of drinking, industry and agriculture in the region, the destruction of water quality in the dam reservoir, or the environmental effects caused by the reduction or elimination of runoff downstream of the dam (Sheikh Khozani et al., 2010). One of the powerful management tools that many have used in recent years to simulate complex water resource systems is the dynamic system method. This method, which is a mental model and a simulation method, and is used to study the dynamic behavior of various complex systems in the fields of civil engineering, water resources, and groundwater, is an object-oriented and feedback-based method (Sterman, 2000). In fact, the system dynamics method pays attention to the dynamic relationships between the quantitative and qualitative characteristics of water and even socio-economic issues, and the desired system can be easily simulated without the need for complex mathematics (Sterman, 2000).

Materials and Methods

Study area

The study area is Kardeneh and Sena dams close to Khormoj city, 80 km southeast of Bushehr city, located in Bushehr province and Khormoj city. The geographical coordinates of the dam catchment area include 35 ◦ 51 ′ to 45 ◦ 51 ′ east longitude and 31 ◦ 28 ′ to 28 ′ north latitude, with an area of about 9291 hectares. The average height of the area is about 817 meters above the open sea level. The distance of this area is 45 km from Khormoj city and 95 km from Bushehr city. The climate of the area is dry and desert and lacks coherent vegetation. The average annual rainfall of the region is 250 mm and the minimum and maximum annual temperature of the region is 7 and 50 degrees Celsius, respectively. The cities and villages in the area include Khormouj, Lawer and Kardeneh. Access to the area is possible through the Siraf highway, Khormouj-Kangan area, and the asphalted road on Shabaneh.

Model structure

The purpose of modeling in this research is to create and develop a simulation model to understand the behavior of consecutive dams and its dynamics, and also to provide solutions to optimize the use of two consecutive dams. Kardeneh and Sena dams are located in Bushehr province and Khomoj city. The Kardeneh Dam is in the study phase and upstream of the Kardeneh Dam and the Sena Dam is in operation and downstream of the Kardeneh Dam. The purpose of the construction of the Kardeneh Dam is to store and control the flood of the river and to transfer and distribute it for drinking purposes and industrial agriculture in the region by releasing the water needed by the environment. The purpose of this research is to model the consecutive dams of Kardeneh and Sena in order to optimize their exploitation in such a way that the lack of drinking needs of Khormouj city and Laver village complex in the horizon of 1425 will be provided from the Kardeneh dam, in addition to the environmental needs of the river and industrial agriculture. (greenhouse) downstream should also be considered from the volume of the reservoir of the Kardeneh dam. Also, considering the fact that the Kardeneh Dam

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

will be built upstream of the Sena Dam and the water withdrawal from it affects the entrance of the Sena Dam and meeting its needs, the effects of water withdrawal from the Kardeneh Dam in meeting the needs of the Sena Dam in its downstream should also be considered. It should be noted that the Sena dam with a reservoir volume of 1.2 million cubic meters was built and put into operation in 2013. The height of this dam is 20 meters and the length of its crest is 200 meters. Kardeneh Dam is considered to be on one of the branches of the inlet runoff of Sena Dam and upstream of it, and it is in the study stage. There is already a pipeline to transfer the water from the Kardeneh Dam to the place of consumption, which is capable of transferring water at a maximum of 73 liters per second. Due to saving costs and using the same existing transmission line, the capacity of this pipeline was added to the model as a maximum water withdrawal from the Kardeneh Dam.

In this research, the modeling of Sena dam was done alone and validated, and then the model of Kardeneh dam was added to predict the performance of Kardeneh dam and its effect on the reservoir of Sena dam. Finally, different management scenarios were considered and the modeling results were evaluated in each scenario.

Based on the available information, runoff is available in the statistical period of 39 years (from 1361-1362 to 1400-1399), which was used in the calculations related to the modeling of the water resources of the Kardeneh-Sena dams. According to the dam designs and the annual flow volume, the normal volume of the Sena dam is 1.2 million cubic meters and the Kardeneh dam is 28.4 million cubic meters, in order to be applied in the planning and management of water resources.

According to Figure 5, the inlet runoff of Sena Dam includes two main branches. One is the Kardeneh aqueduct and the other is the second aqueduct. The general structure of Kardeneh-Sena dams modeling is shown in Figure 2. As can be seen in Figure 2 and mentioned earlier, at first, without considering the construction of Kardeneh Dam, Sena Dam is modeled alone. Therefore, in the model, the construction factor of Kardaneh Dam (this factor is binary and has two states of zero and one) is considered zero. The construction factor of Kardeneh Safar means no construction of Kardeneh Dam and only the presence of Sena Dam, which has affected the runoff entering Sena Dam, and the entire runoff of both branches of the waterway that reach Sena Dam is considered as the entrance to Sena Dam. (Figure 5) If the construction factor of the Kardeneh dam is one, it means the presence of both the Kardeneh and Sena dams, in which case the inflow of the Sena dam is equal to the total overflow of the Kardeneh dam along with the volume of water supplied to the environment of the Kardeneh dam (which is for aquatic life in the downstream release) and the runoff is from the second waterway (Figure 5). Therefore, in the first case, the construction factor of the Kardeneh dam is considered zero and the Sena dam is simulated alone. The results of this simulation are compared with the observed data of the reservoir volume of the dam and the validation of the model is checked. If the model results do not agree with the observed information on the volume of the Sena dam reservoir, this step is repeated again until the model finally reaches the desired result and becomes valid (modeling results are consistent with observations). Then, the construction factor of Kardeneh dam is considered equal to one, and the modeling of Kardeneh-Sena dams is done simultaneously, and finally, different management scenarios of these dams are applied in the model, and their results are compared and evaluated for decision making.

Results and Discussion

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

In this research, the modeling of the Sena and Kardeneh dams was done in two stages, considering that the Sena dam has been built and has reservoir volume data, but the Kardeneh dam is in the study stage and has not been built. In the first stage, the Sena dam was modeled alone and the model results were evaluated and validated with real data. In the second stage, Kardeneh dam was also added to the modeling and both dams were continuously modeled.

The simulation of both dams has been done in a statistical period of 39 years and with a monthly time step (in 864 months), the overview of which is given in Vensim software in Figure 6. The water allocation priorities of Sena dam include: 1) environment and 2) agriculture, and the water allocation priorities of Kardeneh dam include: 1) drinking, 2) environment and 3) industrial agriculture (greenhouse). Figure 6 shows an overview of the modeling of Kardeneh and Sena dams in the Vensim software environment. This model is capable of continuous modeling of both Kardeneh and Sena dams, as well as modeling of each of these dams alone, considering the construction factor of Kardeneh dam in Figure 6. If the construction factor of the Kardaneh dam is set to zero in the model, the Kardaneh dam model is removed and only the Sena dam is modeled, and if the construction factor of the Kardaneh dam is set to one in the model, the model models both dams continuously. slow

As mentioned earlier, in order to validate the model, first, in the modeling, the construction factor of the Kardeneh Dam was considered zero and the Sena Dam was modeled alone (based on the flowchart in Figure 2). Then, the modeled reservoir volume results are compared with the observed reservoir volume of Sena Dam and verified. As mentioned earlier, autocorrelation function, root mean square error and Mesh-Sutcliffe criterion were used for validation, and their values are 0.9137, 0.0492 and 0.9099, respectively, which indicate the excellent suitability of the model. be One of the reasons for this high efficiency is the lack of visibility of leakage (or very little leakage) from the reservoir of the dam. After determining the correctness of the model, the construction factor of Kardaneh dam is considered one and both dams are modeled continuously. The results of verification of the water volume of the Sena Dam reservoir (in the first stage, without considering the Kardeneh Dam upstream) are available in Figures 7 and 8. As seen in Figures 7 and 8, the model is capable of simulating the Sena dam with an accuracy of more than 90% (Figure 8). In Figure 7, the annual average runoff and overflow of the Sena dam reservoir is also given. As can be seen, Sena dam is able to store a very small part of the incoming runoff due to the small volume of the reservoir and large amount of sediment, and the major part of the runoff exits the dam as an overflow. Therefore, it is suggested that in order to make better use of the passing runoff in the downstream sections of the Sena Dam, the feasibility of building a new dam should be done.

After validating the modeling results, the construction factor of Kardaneh dam is placed in model one so that both dams are continuously modeled. Figure 6 shows the general scheme of dam modeling.

Conclusions

The study area consists of Kardeneh and Sena dams located in Khormouj city, south-east of Bushehr city, Bushehr province. The Kardeneh Dam, with a normal volume of 4.28 million cubic metres, is under study for the storage and control of river floods and their transfer and distribution for drinking and agricultural purposes in the region. Downstream of the Kardeneh Dam is the Sena Dam with a normal volume of 1.2 million cubic meters for storage and control of river flood and its transfer and distribution for agricultural purposes in the region.In order to plan the water resources of these two

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]

successive dams, the water needs of each dam were first determined. Based on this, the water needs of Kardeneh dam are prioritized in order of 1) drinking, 2) environment and 3) industrial agriculture (greenhouse). This dam should supply the drinking water shortage of Khormouj until 1425. Also, the water needs of Sena Dam are prioritized in the order of 1) environment and 2) agriculture. Dam modeling was done continuously using Vensim software for both dams. In order to determine the accuracy of the model, first the Sena dam was modeled alone and the simulation results were compared with the observed information of the reservoir volume. After ensuring the correctness of the model (there was more than 90% similarity between the simulated and observed values of the reservoir volume of the Sena Dam), both dams were continuously modeled. The maximum supply of drinking water from the Kardeneh dam is included in the model as the maximum tension of the existing drinking water pipeline (73 lit/sec). Also, two drinking water wells with a flow rate of 259 cubic meters per day have been included in the modeling to solve the lack of drinking water in the months when the Kardeneh dam is not able to meet the drinking water needs. Based on this, six management scenarios were considered and modeling was done for all six scenarios, and finally the sixth scenario was considered as the best scenario. Based on this, the volume supply percentage of drinking, environment and industrial agriculture needs of Kardeneh dam is 97.66, 96.59 and 82.76, respectively, as well as the time supply percentage of these needs from Kardeneh dam is 97.36, 96.59, 34 respectively. It is 82%. Also, the volume supply percentage of environmental and agricultural needs of Sena dam is 83.48 and 100, respectively, and the time supply percentage of these needs from Sena dam is 84.41 and 100 percent, respectively, which is within the acceptable range of the Ministry of Energy based on the allocation system.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]

[DOI: 10.22034/JEG.2023.17.2.1019711]