

## ارزیابی مالی تأثیر پیش‌بینی کوتاه‌مدت آبدھی (هشدار سیلاب) در بهره‌برداری نیروگاه‌های آبی (مطالعه موردی: سد و نیروگاه کارون ۴)

حمیدرضا اسلامی<sup>۱</sup>

سید جابر موسوی کانی<sup>۲</sup>

معصومه عیوضی<sup>۳\*</sup>

کامیاب اسلامی<sup>۴</sup>

### چکیده:

سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل در زمرة روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیل به حساب می‌آیند که با پیش‌بینی زودهنگام و هشدارهای به موقع، علاوه بر کاهش خسارت‌های زمین‌های تحت خطر سیل، باعث افزایش میزان تولید برق در نیروگاه‌های آبی می‌شوند. هدف از پژوهش حاضر، بررسی کارایی سیستم هشدار سیل بر روی مدیریت نیروگاه آبی سد کارون ۴، طی سال‌های آبی ۱۳۹۰-۹۱ تا ۱۴۰۱-۰۰ است. در این پژوهش، جریان رودخانه‌ی منتهی به سد کارون ۴، با استفاده از مدل شبیه‌سازی NAM توسعه داده شده و پارامترهای بارش، دما و تبخیر، مدل‌سازی شد. سپس برای پیش‌بینی آبدھی روزهای آتی، از نقشه‌های پیش‌بینی مدل COLA استفاده شد. در نهایت، از سامانه‌ی هشدار سیل برای مدیریت نیروگاه آبی سد کارون ۴ استفاده شد. نتایج تحقیق، نشان داد که با اتکا به سامانه‌ی هشدار سیل، می‌توان حتی در فصول سیلابی، حجم مخزن را برای بالابدن راندمان و تولید برق، در تراز بالا نگه داشته و در صورت اعلام هشدار در صورت لزوم، حجم مخزن را برای تله‌اندازی سیل به ترازهای پایین‌تر کاهش داد (پویایی قواعد بهره‌برداری). همچنین با توجه به کارکرد دقیق پیش‌بینی‌های شش روزه در سال‌های کم آب، مانند سال آبی ۱۳۹۴-۹۵، آبگیری زود هنگام در دستور کار قرار گرفت، به‌گونه‌ای که آبگیری در اسفند انجام شد. آبگیری زودهنگام در این سال آبی باعث ذخیره ۴۰۰ میلیون مترمکعب آب شد. ذخیره این حجم آب باعث شد که در فصول تولید برق، مشکلی مواجه نشود.

**کلمات کلیدی:** سامانه‌ی هشدار سیل، نیروگاه آبی، بازار برق، مدل بارش-رواناب، COLA

<sup>۱</sup> مدیر عامل شرکت پایشگر تدبیر افزار (دانش بنیان) و فوق لیسانس منابع آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران.

<sup>۲</sup> مدیر امور برنامه ریزی تولید و بازار آب و برق - شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران

<sup>۳\*</sup> نویسنده مسئول، کارشناس بخش منابع آب شرکت پایشگر تدبیر افزار (دانش بنیان) و فوق لیسانس منابع آب، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان، ایران پست الکترونیک: [masoomeh.civazi@gmail.com](mailto:masoomeh.civazi@gmail.com)

<sup>۴</sup> کارشناس بخش نرم افزار شرکت پایشگر تدبیر افزار (دانش بنیان)

مقدمه	
امروزه بدون شک، رشد صنعتی و اقتصادی و نیز ارتقای کیفیت زندگی در هر کشور، در گرو صنعت برق است و بی‌دلیل نیست که پژوهش‌گران زیادی بر روی روش‌های نوین تولید برق، پژوهش می‌کنند. در بیشتر کشورهای جهان، یکی از روش‌های مهم و ایمن تولید برق، استفاده از سدها است. ایران هم از این فناوری بی‌بهره نیست (تجاری و ارجمند <sup>۱</sup> ، ۱۳۹۵).	(کوسیس <sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۳؛ هومک <sup>۸</sup> و همکاران، ۱۹۹۸)
و پیش‌بینی جریان ورودی برای بهینه‌سازی مخازن اشاره کرد (تورکوت <sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۴).	و پیش‌بینی جریان ورودی برای بهینه‌سازی مخازن اشاره کرد (تورکوت <sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۴).
کمبود آب، سبب شده است سدسازی به عنوان شیوه‌ای مهندسی برای تنظیم جریان آب توسعه یابد. مهمترین هدف سازندگان سدها، مهار سیلابها و ذخیره آب‌های سطحی، برای تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت و در کنار آن، تولید برق است (هیمن و همکاران، ۱۳۹۲). نیروگاههای برق آبی یکی از منابع مهم تولید برق هستند و در حال حاضر حدود ۲۰ درصد برق جهان توسط انرژی آبی تأمین می‌شود و حدود ۶۰ کشور جهان بیش از ۵۰ درصد نیازهای برق خود را با استفاده از نیروی آب تأمین می‌کنند (جنگاور <sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۸).	جردن <sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۰۸ به پیش‌بینی سیل برای مدیریت سیل و بهینه‌سازی بهره‌برداری از نیروگاههای آبی در حوضه رودخانه رون پرداختند. آن‌ها بر اساس یک پیش‌بینی قطعی شبکه رودخانه‌ها را پیش‌بینی کردند. نتایج آن‌ها نشان از پیش‌بینی دیگری با کیفیت بالا بوده است. چالش دیگری که در این مطالعه ارائه شده است، بهینه‌سازی بهره‌برداری از نیروگاههای آبی موجود در هنگام وقوع سیل است. پیش‌بینی و مدیریت سیل نشان داد که تأثیر قابل توجهی بر کاهش پیک سیل داشته است، به طوری که کاهش مشاهده شده در دی اوج حدود ۱۰ درصد در خروجی حوضه آبریز برای سیل سال‌های ۱۹۹۳ و ۲۰۰۰ بود و حداقل کاهش می‌توانست با بهره‌برداری بهینه از نیروگاههای آبی در همان سیل به ۲۵ درصد برسد. آثار <sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹ پیش‌بینی جریان آبدی ورودی به مخازن را روشنی مناسب برای کاهش خطر احتمالی سیل و استفاده بهینه از نیروی برق آبی دانستند. آن‌ها در تحقیق خود، با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی <sup>۱۲</sup> آبدی ورودی به سد را برای تله‌اندازی سیل پیش‌بینی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پیش‌بینی ورودی به سد، علاوه بر کاهش خطر ناشی از سیل، استفاده بهینه از آب خروجی در تولید برق خواهد داشت. اسلامی <sup>۱۳</sup> و همکاران، ۱۴۰۱ برای پیش‌بینی جریان در ۵ حوضه کارون <sup>۱۴</sup> ، سیمره، رودبار، سردوشت و آزاد طی هفت سال از نقشه‌های هواشناسی دو مدل پیش‌بینی بارش COLA و WRF برای پیش‌بینی بارش استفاده کردند که در نهایت خروجی آن در مدل شبیه‌سازی NAM توسعه داده شده منجر به پیش‌بینی جریان و سیلاب در روزهای آینده حوضه شد. نتایج حاصل از گزارش‌ها، بیانگر قرارگیری ۷۰ درصد پیش‌بینی‌ها در بازه سیلاب مشاهداتی است. کاسانگول <sup>۱۵</sup> و
برق آبی که از آب جاری یا در حال سقوط به عنوان ورودی اصلی تولید برق استفاده می‌کند، منبع تجدیدپذیر برای تولید برق در سطح جهان است. اگرچه برق آبی به عنوان یک منبع انرژی تجدید پذیر ارزان، بادوام، انعطاف‌پذیر و کم آلاینده، جذاب است ولی به تغییرات هیدرولوژیکی در نتیجه تغییر در شرایط آب و هوایی به ویژه بارندگی و دما حساس است. برای ارزیابی و مدیریت وضعیت یک سیستم برق آبی در روزهای آتی نیاز است که از آورد ورودی به سدها در روزهای آتی مطلع بود (نگوین <sup>۱۶</sup> و همکاران، ۲۰۱۸).	پیش‌بینی آبدی، دانش مهمی برای مدیریت زمان واقعی حوضه‌های رودخانه و مخازن ذخیره‌سازی دارد (آندراده <sup>۱۷</sup> و همکاران، ۲۰۰۲؛ بارچی <sup>۱۸</sup> ، ۲۰۰۲؛ جاسبر <sup>۱۹</sup> و همکاران، ۲۰۰۲). از کاربردهای معمول پیش‌بینی سیل در حوضه‌های رودخانه‌های بزرگ می‌توان به برنامه‌ریزی در زمان اضطرار

<sup>8</sup> Homagk<sup>9</sup> Turcotte<sup>10</sup> Jordan<sup>11</sup> Anuar<sup>12</sup> Artificial Neural Network (ANN)<sup>13</sup> Eslami<sup>14</sup> Cassagnole<sup>1</sup> Najari and Arjmand<sup>2</sup> Jangavar<sup>3</sup> Nguyen<sup>4</sup> Andrade<sup>5</sup> Bürgi<sup>6</sup> Jasper<sup>7</sup> Koussis

## مواد و روش‌ها

### مدل بارش-رواناب NAM توسعه داده شده

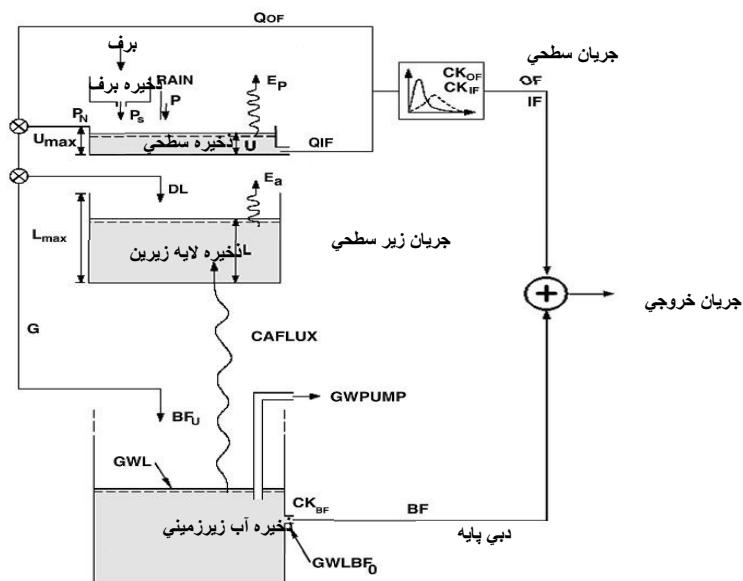
مدل بارش-رواناب NAM را می‌توان به عنوان مدلی قطعی، یکپارچه و مفهومی با تعداد داده مورد نیاز متوسط در نظر گرفت (سجادی بمی<sup>۳</sup>، ۲۰۲۰). ساختار مدل NAM اقتباسی از فاز خشکی چرخه هیدرولوژیکی است. NAM مؤلفه‌های مختلف فرآیند بارش-رواناب را با محاسبه مداوم محتوای آب در چهار مخزن مرتبط نشان می‌دهد، این مخازن نشان دهنده عناصر فیزیکی مختلف حوضه هستند. این چهار مخزن عبارتند از: ذخیره‌ی برف، ذخیره‌ی سطحی، ذخیره‌ی ناچیه‌ی ریشه و ذخیره‌ی آب زیرزمینی. مدل، رواناب حوضه را به شکل مفهومی به مؤلفه‌های جریان سطحی، جریان زیرپوسته‌ای و جریان پایه تقسیم می‌کند. همچنین مدول برف مدل بارش-رواناب NAM، قادر است با تقسیم حوضه آبخیز به مناطق کوچک‌تر، حجم ناشی از ذوب برف را در محل خروجی حوضه نیز مدل‌سازی نماید. این مدل توزیعی ارتفاعی برف، ذوب برف را در مناطق مرتفع با استفاده از رویکرد درجه-رزو محاسبه می‌کند. در شکل (۱)، ساختار مدل با اضافه کردن مدول برف نشان داده شده است. داده‌های ورودی مدل NAM شامل ۴ گروه داده: ۱-داده‌های هواشناسی، ۲-داده‌های جریان، ۳-پارامترهای مدل و ۴-شرایط مدل می‌باشند. داده‌های هواشناسی اصلی مورد نیاز مدل شامل بارندگی، تبخیر و تعرق پتانسیل است، که با توجه به اضافه شدن مدول برف به مدل، دما هم به آن اضافه می‌شود (DHI, 2004). در قسمت‌های روندیابی مخزن خطی جریان زیرسطحی و جریان سطحی مدل بارش-رواناب NAM استفاده شده در این تحقیق، تغییراتی داده شد. همچنین جهت برآورد بارش و دمای متوسط حوضه از تغییرات بارش و دما نسبت به تغییرات ارتفاع استفاده شد. لذا با توجه به تغییرات داده شده در مدل NAM، در این تحقیق از عبارت مدل بارش-رواناب NAM توسعه داده شده استفاده شده است.

همکاران، ۲۰۲۰ به بررسی پیش‌بینی‌های ۷ روزه جریان با کیفیت‌های مختلف بر مدیریت مخازن برق آبی و سود اقتصادی حاصل از یک مدل بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد در صورتی که آبدهی بیش از مقادیر مشاهده‌ای پیش‌بینی شود، ضرر اقتصادی بیشتری را نسبت به موقعی که آبدهی کمتر از مقادیر مشاهده‌ای پیش‌بینی شود دارد. آرسنالت و کته<sup>۱</sup>، ۲۰۱۹ به بررسی تأثیر پیش‌بینی فصلی بر روی مدیریت برق آبی در کبک پرداختند. آنها از سری‌های زمانی بارش و دما برای ایجاد سناریوهای احتمالی اقلیمی آینده و ایجاد یک مدل هیدرولوژیکی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که سیستم‌هایی با قیود بیشتر به دلیل کاهش درجه آزادی برای بهینه‌سازی زمان‌بندی رهاسازی/ذخیره جریان بهتر بوده است. اسلامی<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۴۰۰ به ارزیابی کارایی دو مدل پیش‌بینی بارش COLA و WRF در هشدار سیل در حوضه آبریز کارون<sup>۴</sup> پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در کل مدل COLA نسبت به مدل WRF نتایج بهتری را در مقایسه با مقادیر مشاهداتی ارائه کرده است.

سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل، در زمرة روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیل هستند که در ترکیب با روش‌های سازه‌ای می‌توانند کارائی مدیریت سیل را افزایش دهند. این سامانه‌ها با پیش‌بینی‌ها، هشدارها و مدیریت مخازنی که انجام می‌دهند، منافع گسترده‌ای را در کاهش خسارات اراضی تحت خطر سیل همراه دارند. همچنین در کنار این منافع، بخش دیگری از آثار مثبت این سامانه‌ها افزایش میزان تولید برق در نیروگاه‌های آبی است که با این سامانه مدیریتی مخزن، خود را هماهنگ می‌کنند. هدف از انجام مقاله حاضر بررسی و برآورد منافع اقتصادی و درآمدی استفاده از سامانه هشدار سیل در نیروگاه آبی کارون<sup>۴</sup> می‌باشد.

<sup>3</sup> SajadiBami

<sup>1</sup> Arsenault and Côté  
<sup>2</sup> Eslami



شکل (۱): مدل NAM و ارتباط بین لایه‌های مختلف آن (DHI, 2004).

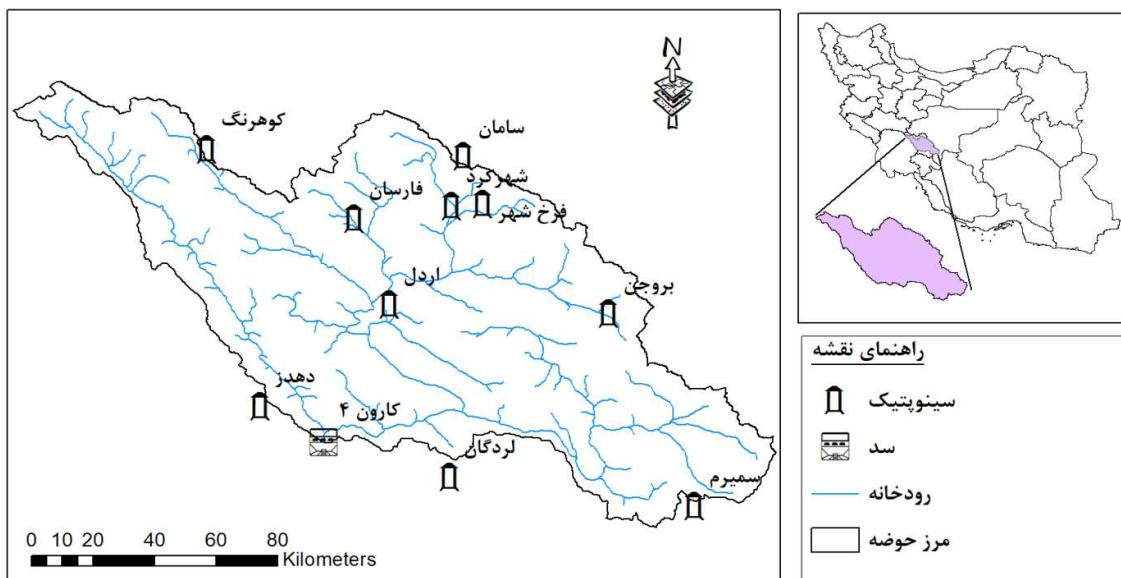
#### منطقه مورد مطالعه

سد و نیروگاه کارون ۴ در استان چهارمحال و بختیاری در فاصله ۱۸۰ کیلومتری جنوب غربی شهر کرد و چهار کیلومتری پایین دست محل تلاقی رودخانه‌های ارمند و بازفت واقع شده است. حوضه آبریز رودخانه کارون، در محدوده سد کارون ۴ در قسمت جنوب غربی ایران در محدوده بین عرض شمالی  $31^{\circ}-20'$  تا  $32^{\circ}-40'$  و طول شرقی  $49^{\circ}-33'$  تا  $45^{\circ}-51'$  می‌باشد. در سلسله جبال زاگرس واقع شده است. حوضه آبریز مذکور تقریباً کوهستانی بوده، ارتفاع متوسط آن ۲۳۵۴ متر است. مساحت حوضه آبریز رودخانه کارون در محدوده سد کارون حدود ۱۲۸۱۳ کیلومترمربع بوده و رشته کوه‌های مرتفع سلسله جبال زاگرس شرایط مناسبی را برای بارش در حوضه آبریز این رودخانه (بهخصوص نواحی غربی و شمال غربی) به وجود آورده است، ارتفاع متوسط بارندگی سالانه حوضه حدود ۶۸۰ میلیمتر برآورد می‌شود. متوسط آورد سالانه رودخانه ۴۹۲۷.۴ میلیون مترمکعب بوده و حداکثر سیلاب محتمل حوضه در حدود ۱۰۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه برآورده است. شکل (۲)، موقعیت حوضه آبریز منتهی به سد کارون ۴ را نشان می‌دهد.

#### مدل COLA

سامانه پیش‌بینی جهانی (COLA)، مدل پیش‌بینی آب و هوایی است که در دهه ۱۹۹۰ توسط مرکز ملی پیش‌بینی محیط‌زیست (NCEP) تهیه شده است. داده‌های متغیر جوی و زمین-خاک از جمله درجه حرارت، باد، بارش، رطوبت خاک و... از طریق این مجموعه داده در دسترس قرار دارد. کل جهان توسط مدل COLA تحت روزگار پایه افقی ۱۸ مایل (۲۸ کیلومتر) بین نقاط شبکه پوشیده شده است که در پیش‌بینی‌های عملیانی تا ۱۶ روز آینده استفاده می‌گردد. مدل COLA، مدلی ترکیبی است که از چهار مدل جداگانه تشکیل شده است (مدل جوی، مدل اقیانوسی، زمین‌خاک و مدل بخش دریا) که با یکدیگر همکاری می‌کنند تا تصویر دقیق شرایط آب و هوایی را ارائه دهند. برای بهبود عملکرد و دقت پیش‌بینی مدل COLA، تغییرات به طور منظم به آن اعمال می‌شود (کریمن<sup>۱</sup> و همکاران، ۱۹۹۷).

<sup>۱</sup> Kirtman



شکل (۲): موقعیت حوضه آبریز منتهی به سد کارون ۴

آتی پیش‌بینی و در مدل قرار داده شود. با توجه به کارایی و برتری پیش‌بینی مدل COLA در منطقه کارون ۴ (اسلامی<sup>۴</sup> و همکاران، ۱۴۰۰)، در این تحقیق از نقشه‌های مدل COLA که بارش و دمای ۶ روز آتی را پیش‌بینی می‌کند استفاده شد. در زمان ارائه گزارش پیش‌بینی سیلاب با توجه به میزان بارش و دمای پیش‌بینی شده دو مقدار پیش‌بینی معمول بارش و پیش‌بینی بالاتر از معمول بارش (حالت بدینانه) و همچنین برای دما پیش‌بینی معمول دما و پیش‌بینی بالاتر از معمول دما (حالت بدینانه) در نظر گرفته شد. حالت بدینانه، در واقع میزان خطای مدل‌های پیش‌بینی COLA را کاهش داده تا در صورت افزایش مقادیر بارش تأثیر آن در سیلاب مشخص شده باشد و از طرفی افزایش دما باعث ذوب حجم بیشتری از برف شده و جریان رودخانه حوضه افزایش می‌یابد. در نهایت آتی برش و دمای بارش و در مدل NAM توسعه داده شده استفاده گردید که چهار ستون دبی به عنوان خروجی گزارش شده که در نهایت مجموع حجم سیلاب محاسبه می‌شود (اسلامی<sup>۵</sup> و همکاران، ۱۴۰۱).

بعد از پیش‌بینی آبدی ورودی در طوفان محتمل در روزهای آتی برای مدیریت مخزن و تولید برق نیاز است که تعداد

### روش تحقیق

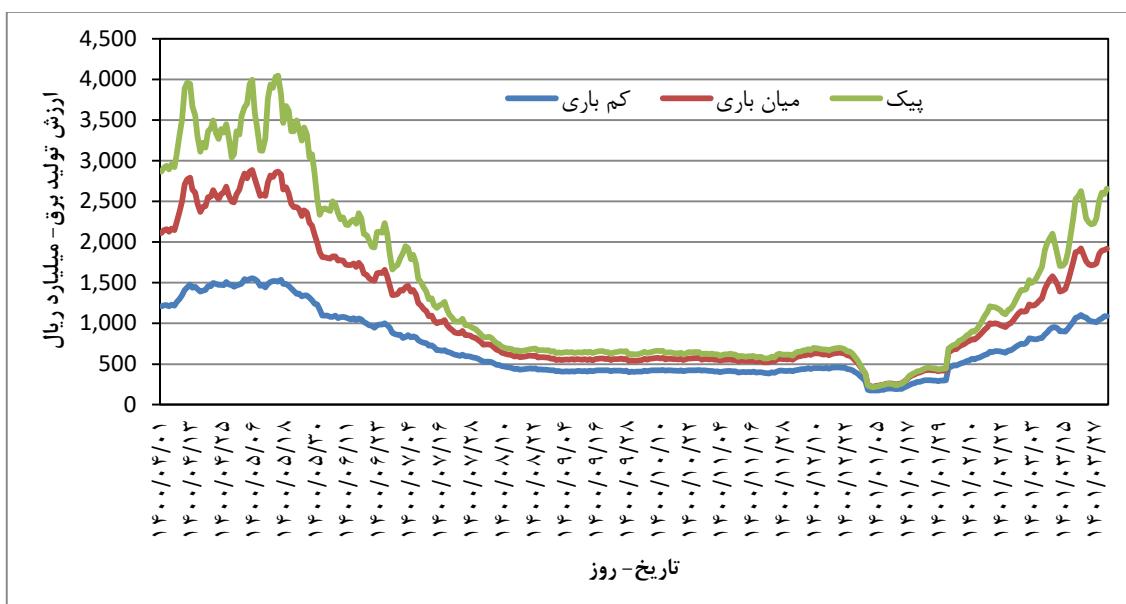
در این پژوهش، از مدل توسعه داده شده NAM برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در گام زمانی روزانه استفاده گردید. دوره‌ی واسنجی از اول مهر ۱۳۸۵ تا آخر شهریور ۱۳۸۹ و دوره‌ی صحتسنجی از اول مهر ۱۳۸۹ تا آخر شهریور ۱۳۹۱ در نظر گرفته شد. داده‌ی روزانه بارش و دما، ایستگاه سینوپتیک کوهنهنگ و داده روزانه تبخیر، ایستگاه تبخیرسنجی دزک آباد مورد استفاده قرار گرفت. برای شبیه‌سازی ذوب برف براساس نقشه تغییرات ارتفاعی، حوضه آبریز به رده‌های ارتفاعی تقسیم شد. در مدل توسعه داده شده NAM برای واسنجی مدل بارش-رواناب از الگوریتم SCE<sup>۱</sup> استفاده شده است. مدل استفاده شده در این پژوهش، ترکیبی از الگوریتم ارائه شده توسط دوان<sup>۲</sup> و همکاران، ۱۹۹۲ همراه با روش‌های ارائه شده توسط لیونگ<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۴ است (اسلامی<sup>۴</sup> و همکاران ۱۴۰۵).

بارش و دما، از پارامترهای اصلی ورودی در مدل سازی بارش-رواناب NAM هستند. برای همین منظور، برای پیش‌بینی آبدی در زمان واقعی، نیاز است که بارش و دما برای روزهای

<sup>4</sup> Eslami<sup>5</sup> Eslami<sup>6</sup> Eslami<sup>1</sup> Shuffled Complex Evolution (SCE)<sup>2</sup> Duan<sup>3</sup> Nguyen

تقسیم شد. در نهایت ضریب محاسبه شده در اعداد اولیه ضریب ارزش تولید برق هر دسته ضرب و ارزش هر دسته برای هر روز به صورت جدا محاسبه شد. شکل (۳)، ارزش تولید برق در ساعت پیک، میان باری و کم باری نیروگاه کارون ۴ طی ۱ تیرماه سال ۱۴۰۰ لغایت ۳۱ خرداد ۱۴۰۱ را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، ارزش ریالی برق در ساعت پیک و میان باری نسبت به کم باری بیشتر بوده و تولید برق در ساعت پیک و میان باری ارزش ریالی بیشتری را نسبت به کم باری خواهد داشت. لذا در این تحقیق نیروگاه ابتدا برق ساعت پیک را تأمین خواهد کرد. در صورت وجود مازاد، برق ساعت میان باری و در نهایت اگر حجم مخزن به گونه‌ای باشد که بتواند بیش از ساعت پیک و ساعت میان باری برق تولید کند در ساعت کم باری هم برق تولید خواهد کرد. برای محاسبه ارزش ریالی تولید برق، میزان برق تولید شده در ضریب ارزش ریالی تولید برق مربوطه ضرب شده و میزان ارزش ریالی تعیین شد.

ساعت تولید برق در طی ۲۴ ساعت شبانه روز تعیین شود. برای این منظور برای بازه یازده ساله (سال‌های آبی ۱۳۹۰-۹۱ ۱۴۰۰-۱۴۰۱) از ارزش ریالی تولید برق ساعتی سال لغایت ۱۴۰۰ و تلفیق میانگین سه سال ضریب ارزش تولید برق ساعتی (CPF) در سال‌های ۱۳۹۸، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ استفاده شد (www.igmc.ir). همچنین برای کل دوره، از تبدیل ضریب ارزش تولید برق روزانه به ساعتی حاصل شده از سه سال منتخب به ساعتی استفاده شده است. بدین منظور ساعت تولید برق بر اساس ساعت کم باری، میان باری و پیک بار دسته بندی شد که ۶ ساعت اول را کم باری، ۱۲ ساعت دوم را میان باری و ۶ ساعت آخر تولید در دسته پیک بار قرار داده شد. برای محاسبه ارزش تولید برق سال ۱۴۰۰ براساس ضریب ارزش تولید برق ساعتی سال ۱۴۰۰، ضریب ارزش تولید برق هر دسته (کم باری، میان باری و پیک بار) محاسبه و در میانگین ارزش تولید برق سال ۱۴۰۰ ضرب شد. بعد از محاسبه ارزش تولید در هر دسته میانگین ارزش تولید برق سال ۱۴۰۰ بر میانگین ارزش تولید برق واقعی سال ۱۴۰۰

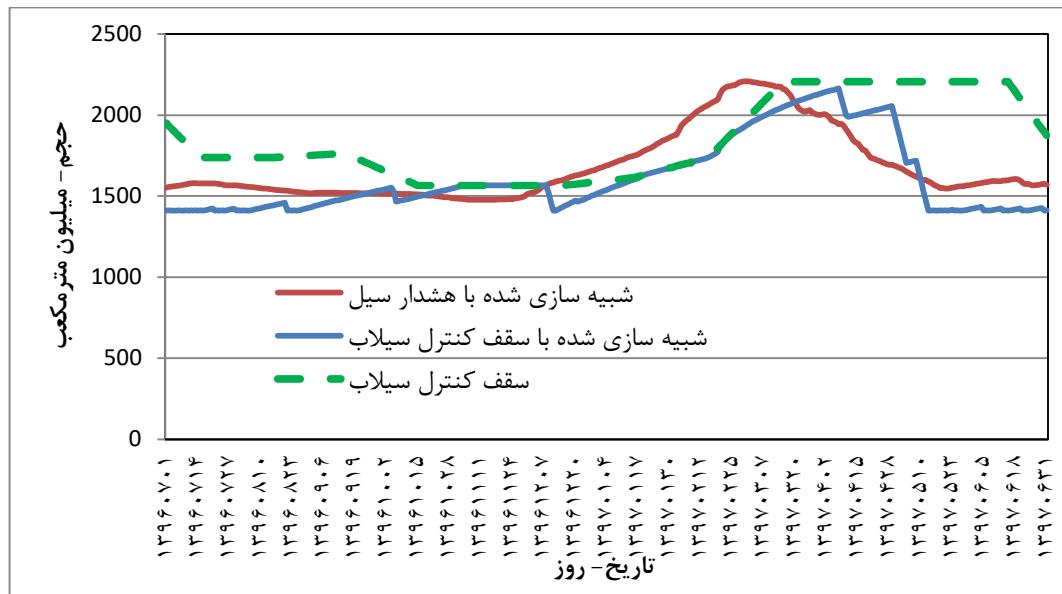


شکل (۳): ارزش تولید برق در ساعت پیک، میان باری و کم باری نیروگاه کارون ۴

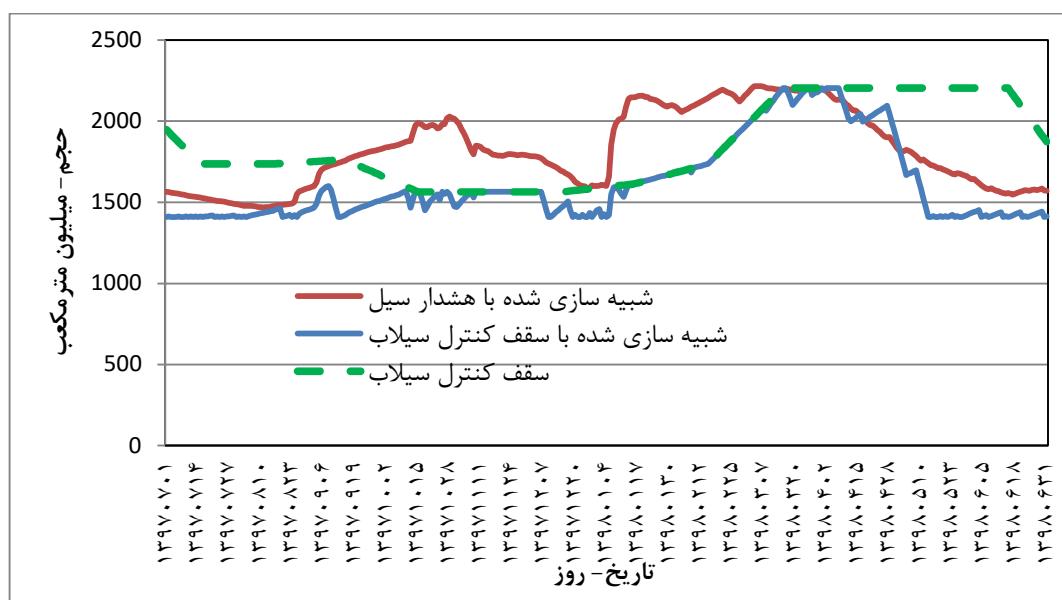
کارون ۴ را در دو حالت استفاده از سامانه‌ی هشدار سیل و استفاده از سقف کنترل سیلاب به همراه سقف کنترل سیلاب در سال آبی ۱۳۹۶-۹۷ (خشک‌ترین سال در دوره مورد بررسی) و شکل ۵، حجم مخزن کارون ۴ را در دو حالت

**نتایج و بحث**  
در زمانی که از سامانه هشدار سیل برای مدیریت نیروگاه استفاده نشود از سقف کنترل سیلاب سد برای مدیریت و تنظیم حجم مخزن استفاده می‌شود. شکل (۴)، حجم مخزن

استفاده از سامانه‌ی هشدار سیل و استفاده از سقف کنترل سیلاب به همراه سقف کنترل سیلاب در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ (سال تر) به ترتیب ۱۷۸۵ و ۱۸۲۸ میلیون متر مکعب بوده است. این در حالی است که حجم شبیه‌سازی شده بدون هشدار سیل در این دو سال به ترتیب ۱۶۱۲ و ۱۶۱۹ میلیون متر مکعب بوده است. این دو شکل، حجم رخ داده شده با هشدار سیل در آکثر اوقات بیشتر از حجم شبیه‌سازی شده بدون هشدار سیل بوده است. حجم متوسط رخ داده شده با هشدار سیل در سال آبی ۹۷-۹۸



شکل (۴): مقایسه حجم مخزن رخ داده شده با سامانه‌ی هشدار سیل با حجم شبیه‌سازی شده بدون سامانه‌ی هشدار سیل در سال آبی ۱۳۹۶-۹۷ خشک



شکل (۵): مقایسه حجم مخزن رخ داده شده با سامانه‌ی هشدار سیل با حجم شبیه‌سازی شده بدون سامانه‌ی هشدار سیل در سال آبی تر ۹۸-۱۳۹۷

گیگاوات برآورد شده است که اختلافی حدود ۲۶۱ گیگاوات ساعت در سال بوده است. همچنین مطابق با این جدول ارزش برق شبیه‌سازی شده با سامانه هشدار سیل به طور متوسط ۲۲۷۰ میلیارد ریال و ارزش برق شبیه‌سازی شده با سقف کنترل سیلاب ۱۸۳۲ میلیارد ریال بوده است که اختلافی حدود ۴۳۸ میلیارد ریال در هر سال بوده است. به عبارتی، ارزش برق شبیه‌سازی شده با سقف کنترل سیلاب ۱۹ درصد کمتر از سامانه هشدار بوده است. این بررسی نشان می‌دهد که سامانه هشدار سیل در نیروگاه کارون ۴، در افزایش تولید برق و ارزش ریالی برق کارایی موثری را طی این ۱۱ سال داشته است.

جدول (۱)، تولید و ارزش برق شبیه‌سازی شده با سامانه هشدار سیل و تولید و ارزش برق شبیه‌سازی شده با سقف کنترل سیلاب طی سال‌های آبی ۱۳۹۰-۹۱ لغايت ۰۱-۱۴۰۰ در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴ را نشان می‌دهد. مطابق با این جدول در تمام سال‌های آبی مورد مطالعه، برق شبیه‌سازی شده با سامانه هشدار سیل نسبت به برق شبیه‌سازی شده با سقف کنترل سیلاب بیشتر بوده است. به طوری که برق شبیه‌سازی شده با سامانه هشدار سیل در طی ۱۱ سال به طور متوسط ۱۵۵۵ گیگاوات ساعت بوده است. این در حالی است که برق شبیه‌سازی شده با سقف کنترل سیلاب طی این ۱۱ سال، به طور متوسط ۱۲۹۳

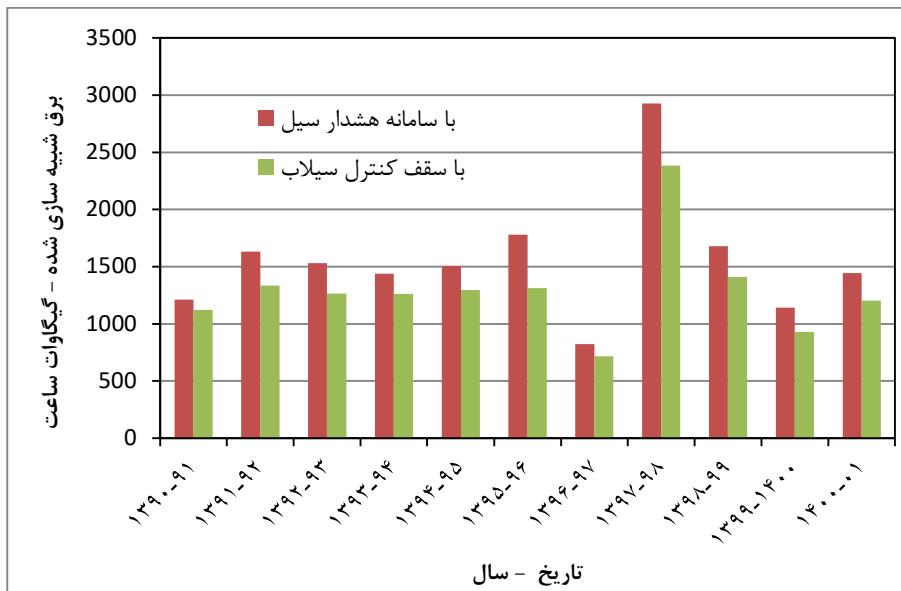
جدول (۱): تولید و ارزش برق شبیه‌سازی شده با سامانه هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴ در بازه‌ی

زمانی سالانه

سال آبی	وروودی (میلیون متر مکعب)	سامانه هشدار سیل	برق شبیه‌سازی شده با (گیگاوات ساعت)	ارزش برق شبیه‌سازی شده با (میلیارد ریال)	سامانه هشدار سیل	سقف کنترل سیلاب	سقف کنترل سیلاب	سامانه هشدار سیل
۱۳۹۰-۹۱	۲۸۴۲	۱۲۱۰	۱۱۲۱	۱۷۹۹	۱۷۳۱	۲۳۰۷	۱۳۳۴	۱۹۰۰
۱۳۹۱-۹۲	۳۵۳۹	۱۶۳۱	۱۲۶۶	۲۲۵۵	۱۸۲۶	۲۱۸۳	۱۲۶۰	۱۸۲۵
۱۳۹۲-۹۳	۳۲۸۳	۱۵۳۲	۱۴۳۶	۲۰۶۰	۱۸۹۷	۲۰۰۶	۱۲۹۳	۱۸۰۹
۱۳۹۳-۹۴	۳۳۶۳	۱۴۳۶	۱۷۷۷	۲۵۷۳	۱۲۹۴	۱۵۸۰	۷۱۵	۲۵۸۰
۱۳۹۴-۹۵	۳۴۴۳	۱۵۰۶	۸۲۰	۲۳۸۳	۲۹۱۸	۳۸۶۱	۲۳۶۰	۲۰۲۹
۱۳۹۵-۹۶	۳۵۰۹	۱۷۷۷	۱۶۷۸	۱۴۱۰	۱۲۹۹	۱۵۹۰	۹۲۸	۱۵۹۰
۱۳۹۶-۹۷	۱۹۰۲	۸۲۰	۱۱۴۱	۱۲۰۳	۱۶۲۴	۲۳۹۸	۱۲۹۳	۱۸۲۲
۱۳۹۷-۹۸	۶۳۵۱	۲۹۲۵	۱۴۴۴	۱۲۹۳	۱۸۳۲	۲۲۷۰	۱۵۵۵	۲۴۴۰
متوسط		۱۵۵۵						

با شکل، در تمام سال‌های مورد بررسی، تولید برق شبیه‌سازی شده با سامانه هشدار سیل نسبت به تولید برق شبیه‌سازی شده با سقف کنترل سیلاب بیشتر بوده است به طوری که در سال‌های آبی ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۵-۹۶ اختلاف بیشتر بوده و در سال‌های آبی ۱۳۹۶-۹۷ و ۱۳۹۰-۹۱ کمتر بوده است.

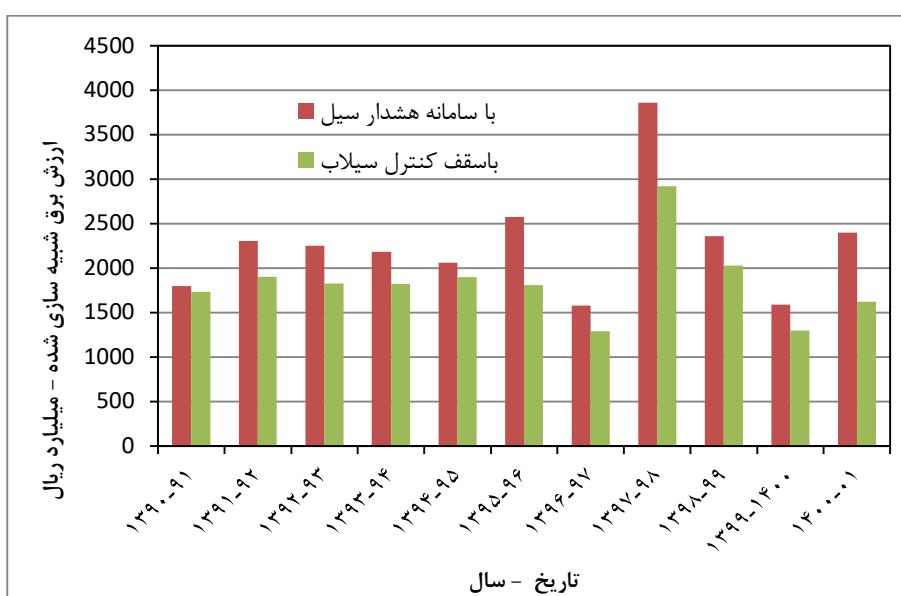
شکل (۶)، تولید برق شبیه‌سازی شده با سامانه هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب طی سال‌های آبی ۱۳۹۰-۹۱ لغايت ۰۱-۱۴۰۰ در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴ را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، بیشترین و کمترین تولید به ترتیب در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۶-۹۷ بوده است. همچنین مطابق



شکل (۶): تولید برق شبیه‌سازی شده با سامانه‌ی هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴

برق شبیه‌سازی شده با سامانه‌ی هشدار سیل نسبت به تولید برق شبیه‌سازی شده با سقف کنترل سیلاب بیشتر بوده است به طوری که در سال‌های آبی ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۵-۹۶ اختلاف بیشتر بوده و در سال‌های آبی ۱۳۹۶-۹۷ و ۱۳۹۰-۹۱ کمتر بوده است.

شکل (۷)، ارزش تولید برق شبیه‌سازی شده با سامانه‌ی هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب طی سال‌های آبی ۱۳۹۰-۹۱ تا ۱۴۰۰-۱۴۰۱ در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴ را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل بیشترین و کمترین ارزش تولید به ترتیب در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ و ۱۳۹۶-۹۷ بوده است. همچنین مطابق با شکل، در تمام سال‌های مورد بررسی ارزش



شکل (۷): ارزش برق با سامانه‌ی هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴

ترتیب، در ماههای مهر، شهریور و مرداد بوده است. همچنین مطابق با این شکل، بیشترین و کمترین تولید با سقف کنترل سیلاب به ترتیب، در ماههای فروردین و خرداد بوده است. در حالی که بیشترین و کمترین تولید با سامانه‌ی هشدار، به ترتیب، در ماههای اردیبهشت و مهر بوده است. تولید با سامانه‌ی هشدار سیل متناسب با ورودی سد است.

جدول (۲)، تولید و ارزش برق شبیه‌سازی شده با سامانه‌ی هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب به صورت ماهانه طی سال‌های آبی ۹۱-۹۰ لغایت ۱۴۰۰-۰۱ در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴ را نشان می‌دهد. مطابق با این جدول، بیشترین ورودی سد در طی ۱۱ سال مورد بررسی، به ترتیب، در ماههای فروردین، اردیبهشت و اسفند و کمترین میزان ورودی سد، به

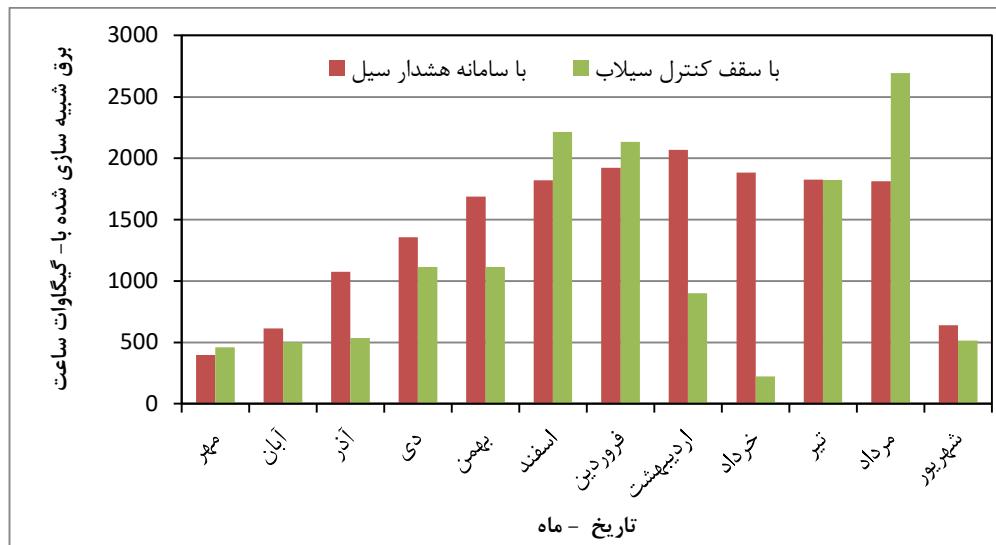
جدول (۲): تولید و ارزش برق شبیه‌سازی شده با سامانه‌ی هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴ در بازه‌ی

زمانی ماهانه

سال آبی	(میلیون متر مکعب)	برق شبیه‌سازی شده با			
		ارزش برق شبیه‌سازی شده با (میلیارد ریال)	سامانه‌ی هشدار سیل	سقف کنترل سیلاب	سامانه‌ی هشدار سیل
		برق شبیه‌سازی شده با (گیگاوات ساعت)	سقف کنترل سیلاب	سامانه‌ی هشدار سیل	ورودی
مهر	۱۱۶۶	۳۹۶	۴۶۰	۴۸۴	۶۶۴
آبان	۱۶۵۸	۶۱۴	۵۰۳	۴۰۶	۳۸۳
آذر	۲۶۰۴	۱۰۷۶	۵۳۷	۶۶۲	۳۲۰
دی	۳۰۴۴	۱۳۵۶	۱۱۱۵	۸۷۴	۶۸۱
بهمن	۳۲۰۵	۱۶۸۸	۱۱۱۳	۱۱۲۴	۷۶۰
اسفند	۵۱۳۴	۱۸۱۹	۲۲۱۴	۱۳۸۲	۱۴۵۵
فروردین	۷۹۴۲	۱۹۲۲	۲۱۳۴	۷۵۵	۹۴۳
اردیبهشت	۵۲۳۳	۲۰۶۷	۹۰۱	۲۳۳۲	۹۶۶
خرداد	۳۰۵۱	۱۸۸۵	۲۲۲	۳۸۷۶	۴۸۹
تیر	۱۹۵۶	۱۸۲۵	۱۸۲۲	۵۷۶۷	۴۷۶۴
مرداد	۱۵۷۲	۱۸۱۲	۲۶۹۳	۵۹۴۷	۷۴۴۰
شهریور	۱۲۷۵	۶۴۰	۵۱۴	۱۳۵۹	۱۲۸۷

کارون ۴ را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، به استثنای ماههای مهر، اسفند، فروردین و مرداد میزان تولید برق با سامانه‌ی هشدار سیل نسبت به سقف کنترل سیلاب بیشتر بوده است.

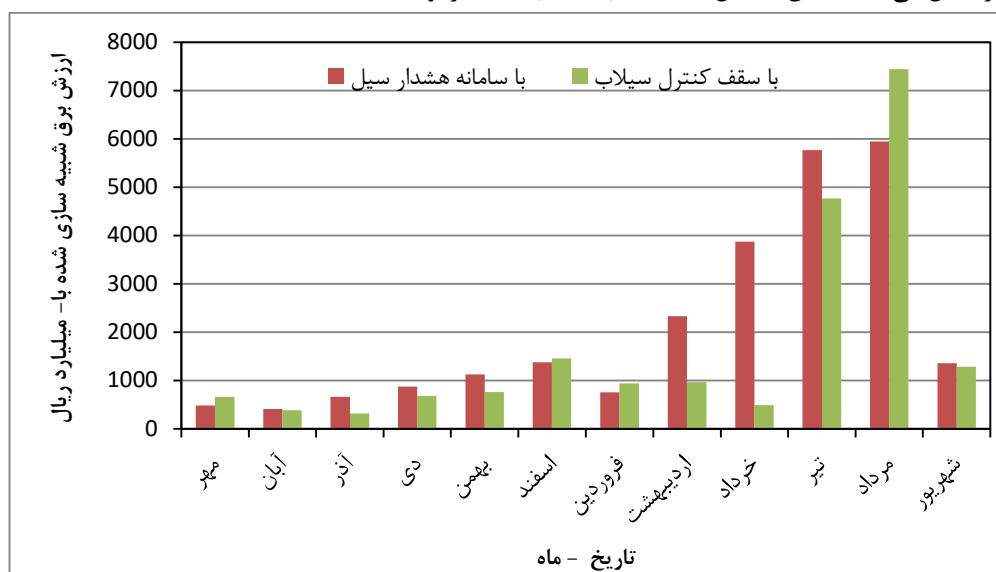
شکل (۸)، تولید برق شبیه‌سازی شده با سامانه‌ی هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب در بازه‌ی زمانی ماهانه طی سال‌های آبی ۹۱-۹۰ لغایت ۱۴۰۰-۰۱ در نیروگاه برق آبی سد



شکل (۸): تولید برق شبیه‌سازی شده با سامانه هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴ در بازه زمانی ماهانه

مهر، اسفند، فروردین و مرداد، میزان ارزش برق شبیه‌سازی شده با سامانه‌ی هشدار سیل بیشتر بوده است. لازم به ذکر است که در هر دو روش سرریزی کارون ۴ را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، به استثنای ماه‌های

شکل (۹)، ارزش برق شبیه‌سازی شده با سامانه‌ی هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب در بازه زمانی ماهانه طی سال‌های آبی ۱۳۹۰-۹۱ تا ۱۴۰۰-۰۱ در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴ را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، به استثنای ماه‌های



شکل (۹): ارزش برق شبیه‌سازی شده با سامانه‌ی هشدار سیل و سقف کنترل سیلاب در نیروگاه برق آبی سد کارون ۴ در بازه زمانی ماهانه

روش سقف کنترل سیلاب در اختیار مدیران قرار دهد. با اتکا به سامانه‌ی هشدار سیل، می‌توان حتی در فصول سیلابی، حجم مخزن را برای بالابردن راندمان و تولید برق، در تراز بالا نگه داشته و در صورت اعلام هشدار در صورت لزوم، حجم

### نتیجه گیری

با بررسی دو روش، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مدل هشدار سیل می‌تواند در ذخیره آب سدها و تولید به موقع و بهینه و افزایش ارزش ریالی تولید برق نتایج بهتری نسبت به

- Bürgi, T. (2002). "Wasserstands- und Abflussvorhersagen für den Rhein", Wasser Energie Luft – Eau Energie Air, 7/8.
- Cassagnole, M., Ramos, M.H., Zalachori, I., Thirel, G., Garcon, R., Gailhard, J., & Ouillon, T. (2020). "Impact of the Quality of Hydrological Forecasts on the Management and Revenue of Hydroelectric Reservoirs- a Conceptual Approach", *Hydrology and Earth System Sciences*, 1-36.
- DHI S. (2004), "MIKE 11 User & Reference Manual", Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Vijan, G. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models", *Water Resources Research*, 28(4), 1015-1031.
- Eslami, H.R., & Qaderi, K. (2005). "Combin catchments flood forecasting using shuffled complex evolution (SCE) method". In: Proc. Of International conference on innovation, advances and implementation of flood forecasting technology, Tromsø, Norway.
- Eslami, H.R., Anbari, M. J., Jaberzade, M., & Eslami. K. (2022). "Evaluating the effectiveness of rainfall forecasting in flood warning", 8th comprehensive conference on flood management and engineering, October 27-29. (In Persian)
- Eslami, H.R., Jamali, S., Ayoubikia, R., & Eslami. K. (2023). "Evaluating the performance of rainfall forecasting models in estimating discharge and flood volume with the developed NAM model (area of study: West basin)", *Journal of New approaches in Water Engineering and Environment*. (In Persian)
- Heyman, N., Kikha, A. A., Sabohi Saboni, M. (2013). "Fuzzy hierarchical design to determine the priority of water allocation of Mahabad Dam". *Water and Soil Journal*, 22(4): 159-147. (In Persian)
- Homagk, P., & Ludwig, K. (1998). "Operationeller Einsatz von Flussgebietsmodellen bei der Hochwasser-Vorhersage-Zentrale Baden-Württemberg", *Wasserwirtschaft*, 88(4), 160-167.
- Jangavar H, Noorollahi Y, Emami Meybodi A. (2018). "Economic and Environmental Analysis of the Small hydropower Plants Development. Ecohydrology", 4(4): 1255-1268. (In Persian)
- Jasper, K., Gurtz, J., & Lang, H. (2002). "Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model", *Journal of Hydrology*, 267, 40-52
- Jordan, F., Hernandez, J. G., Boillat, J., & Schleiss, A. (2008). "Flood Forecast and Flood Management Model Optimization of the
- مخزن را برای تله اندازی سیل به ترازهای پایین تر کاهش داد. با توجه به سامانه هشدار سیل، می توان ۶ روز قبل از شروع طوفان، حجم ورودی به مخزن سد را به صورت تخمینی، محاسبه و پیش بینی نمود تا در صورت نیاز به طور منظم مقداری از حجم سد را تخلیه نموده و با توجه به ساعت پیک بار، تولید برق انجام داد. در روش سامانه هشدار سیل، علاوه بر تخلیه ای سد، بر اساس گزارش پیش بینی حجم ورودی به سد در طوفان جدید می توان تولید برق را با توجه به زمان پیک تولید نموده و حجم سد نیز در طوفان بعدی افزایش یابد. همچنین با توجه به کار کرد دقیق پیش بینی های شش روزه در سال های کم آب مانند سال آبی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، آبکریز زود هنگام در دستور کار قرار گرفت و نتایج تحقیق نشان داد که تولید برق با مدل هشدار سیل در این سال ۳۰ درصد افزایش نسبت به روش سقف کنترل سیلاب دارد.
- استفاده از سامانه هشدار سیل برای مدیریت نیروگاه آبی سد کارون ۴ منافع اقتصادی و درآمدهای مالی بیشتری را در پی داشته است. نتایج تحقیق نشان داد که در سال های ترسالی که ورودی آب به سد افزایش داشته میزان درآمد حاصل از تولید برق نیروگاه در بازه مورد بررسی حداقل ۱۸ درصد بهبود و به طور متوسط ۲۸ درصد ارزش ریالی بیشتری نسبت به حالت سقف کنترل سیلاب ایجاد کرده است.

## منابع

- Andrade-Leal, R. N., Bachhiesel, M., Drabek, U., Gutknecht, D., Haiden, T., Holzmann, H., Hebenstreit, K., Kirnbauer, R., Nachtnebel, H. P., & Precht, J. (2002). "Hydrologische Vorhersagemodelle im operationellen Betrieb der Wasserkraftwirtschaft", Österreiche Wasser- und Abfallwirtschaft, 9-10.
- Anuar, N. N., Bashir Khan, R., Pasupuleti, J., & Faiz Ramli, A. (2019). "Flood Risk Prediction for a Hydropower System using Artificial Neural Network", *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8, 1-6.
- Arsenault, R., & Côté, P. (2019). "Analysis of the effects of biases in ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts on electricity production in hydropower reservoir management", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 2735–2750, <https://doi.org/10.5194/hess-23-2735-2019>, 2019.

- Scientific Research Journal, 3rd year, 9th issue.  
(In Persian)
- Nguyen-Tien , V., Robert. J.R., Eric. A. 2018. Hydropower generation, flood control and dam cascades: Anational Assessment for Vietnam. Journal of Hydrology, Vol. 560,pp. 109-126
  - SajadiBami, Y. Porhemmat, J. Sedghi, H. and JalalKamali, N. 2020. Comparison of MIKE NAM and AWBM models performance in simulation of daily runoff in mountainous regions, Journal of Soil and Water Resources Protection, 10(3):1-14.(In Persian)
  - Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnik, C., & Villeneuve, J. P. (2004). “Distributed hydrological forecast for the management of public dams in Quebec”, Canadian Journal of Civil Engineering, 31(2), 308-320.
  - Kirtman, B. P., Shukla, J., Huang, B., Zhu., Z & Schneider, E. K. (1997). “Multiseasonal predictions with a coupled tropical ocean global atmosphere system”. Mon. Wea. Rev., 125, 789-808.
  - Kouassis, A. D., Buzzi, A. & Malguzzi, P. (2003). “Flood Forecasts for Urban Basin with Integrated Hydro-Meteorological Model”, Journal of Hydrologic Engineering, 8(1), 1-11.
  - Lioung. S. Y., & Muttil, N. (2004). “Shuffled Complex Evolution Coupled with Experimental Design Technique”, National University of Singapore, Singapore 119260.
  - Najari, V., & Arjmand, M. (2015). “Review of 32 Iranian dams and hydroelectric power plants installed on them in 2013”, Dam and Hydropower

## Financial evaluation of the use of short-term flood forecasting in the operation of electric power plants (case study: Karun Dam 4)

H.R.Eslami<sup>1</sup>

S.J.Mosavi kani<sup>2</sup>

M.Eivazi<sup>3</sup>

K.Eslami<sup>4</sup>

### Abstract

Flood forecasting and warning systems are among the non-structural methods of flood management, which, with early forecasting and timely warnings, in addition to reducing the damage of lands under the risk of flooding, increase the amount of electricity production in hydropower plants. The purpose of this research is to investigate the effectiveness of the flood warning system on the management of the Karun 4 dam hydropower plant during the water years of 2010-2016 to 2016-2018. In this research, the flow of the river leading to the Karun 4 Dam was developed using the NAM simulation model and precipitation, temperature and evaporation parameters were modeled. Then, COLA model prediction maps were used to predict the rainfall in the coming days. Finally, the flood warning system was used to manage the Karun 4 dam hydropower plant. The results of the research showed that by relying on the flood warning system, even in flood seasons, the volume of the tank can be kept at a high level to increase efficiency and electricity production, and in case of warning, if necessary, the volume of the tank can be reduced to lower levels to trap the flood. (Dynamics of exploitation rules). Also, due to the accurate functioning of six-day forecasts in low water years such as the water year 2015-2016, early water extraction was put on the agenda so that water extraction was done in March. Early water withdrawal in this water year saved 400 million cubic meters of water. The storage of this volume of water made it possible to face no problems during the electricity generation seasons.

Keywords: Flood Warning System, Hydroelectric Power Plant, Rain-Runoff, COLA

<sup>1</sup> Managing Director of Paishgar Tadbir Azar Company (Danesh Basian) and Master of Water Resources, Faculty of Water Engineering, University of Agriculture and Natural Resources, Gorgan, Iran.

<sup>2</sup> Director of production planning and water and electricity market, Iran Water and Power Resources Development Company

<sup>3</sup> Corresponding author, expert in the water resources department of Paishgar Tadbir Azar company (Danesh Banyan) and a master's degree in water resources, Faculty of Water Engineering, University of Agriculture and Natural Resources, Gorgan, Iran masoomeh.eivazi@gmail.com

<sup>4</sup> Software expert – Payeshgar Tadbir Afzar Company (Knowledge Base)