

## ارزیابی اقتصادی و مالی پیامدهای پیش آگاهی آبدھی در طرح‌های سد و نیروگاه‌های آبی (مورد مطالعه: سد و نیروگاه‌های کارون ۴ و رودبار لرستان)

حمدیرضا اسلامی<sup>۱</sup>  
سعید جمالی<sup>۲</sup>  
رضا ایوبی کیا\*<sup>۳</sup>  
کامیاب اسلامی<sup>۴</sup>

### چکیده

افزایش تقاضای انرژی، بهبود مدیریت بهره‌برداری از منابع و انرژی را گریز ناپذیر کرده است. هدف از این مقاله، مقایسه میزان تولید برق نیروگاه‌های آبی سدهای کارون ۴ و رودبار، در بازه زمانی سال ۱۳۹۷-۹۸ در دو حالت با پیش‌بینی و هشدار سیلاب و بدون توجه به هشدار سیلاب و در نهایت، برآورد منافع اقتصادی و درآمدهای ناشی از استفاده سامانه‌های پیش‌بینی است. سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیل در زمرة روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیل به حساب می‌آیند که در ترکیب با روش‌های سازه‌ای می‌توانند کارائی مدیریت سیل را افزایش دهند. این سامانه با پیش‌بینی زودهنگام و هشدارهای به موقع از طریق برنامه‌ریزی و مدیریت بهره‌برداری مخزن سدها در کاهش خسارات اراضی تحت خطر سیل اهمیت دارد. همچنین از آثار مثبت این سامانه‌ها، افزایش میزان تولید برق در نیروگاه‌های آبی است که با این سامانه مدیریتی مخزن، خود را هماهنگ می‌کنند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار تولید برق در نیروگاه‌های سد کارون ۴ و رودبار در حالت فعالیت هشدار سیل با افزایش رهاسازی از توربین نیروگاه‌ها پیش از رخداد سیلاب و جلوگیری از سرریز به ترتیب ۳/۹ و ۴/۸ درصد بیشتر از حالت بدون هشدار سیل در طول بازه سالانه مورد نظر است.

### واژه‌های کلیدی

هشدار سیل، پیش آگاهی آبدھی، نیروگاه برق‌آبی، کارون ۴، رودبار لرستان.

<sup>۱</sup> مدیر عامل، شرکت پایشگر تدبیر افزار (دانش بنیان).

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.

<sup>۳</sup> کارشناس بخش منابع آب، شرکت پایشگر تدبیر افزار (دانش بنیان)، pta\_data@yahoo.com.

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

علمی-پژوهشی

## مقدمه

بررسی پیامدهای منفی پدیده‌های اقلیمی بر میزان کاهش بارندگی و تولید برق نیروگاههای آبی ضروری است. یکی از این راهکارها، پیش‌بینی جریان رودخانه است. برای این منظور، الگوهای مختلف رواناب باران تحت تأثیر تغییرات اقلیمی محلی و شاخصهای اقلیمی جهانی پیش‌بینی می‌شود. این پیش‌بینی جریان، منجر به برنامه‌ریزی و مدیریت بهتر منابع آب در نیروگاههای آبی برای تولید برق خواهد شد (دولابیان<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین برای مقابله با هشدارها و محدودیت‌های تولید برق، پیش‌بینی جریان می‌تواند به مدیریت محدودیت‌ها کمک کند (سلام<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۰). اولین و بارزترین اهمیت پیش‌بینی جریان این است که تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر ذخیره و رهاسازی آب، منجر به بهره‌وری بیشتر تولید برق آبی می‌شود. پیش‌بینی جریان به طور مؤثر به مدیران و بهره‌برداران نیروگاههای آبی کمک می‌کند تا به‌توانند به درستی تولید برق را مدیریت و تأمین کنند. تشدید پیامدهای تغییر اقلیم اهمیت موضوع را دو چندان کرده است (کین<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). یکی از مهم‌ترین عوامل تولید برق آبی، پیش‌بینی جریان است. بنابراین یکی از عواملی که در این زمینه باید مورد توجه قرار گیرد مدیریت منابع آب است. یکی از مهمترین راهبردهای حفظ آب، مدیریت یکپارچه منابع آب است. این شامل شاخص‌های کلان اقتصادی، اکوسیستم‌های مختلف، ملاحظات اقتصادی و اجتماعی است (احمد و حسین<sup>۱۲</sup>، ۲۰۲۰). روش‌های پیش‌بینی جریان، شامل روابط تجربی ساده و روابط همبستگی و استفاده از مدل‌های پیچیده است. فناوری جمع‌آوری، انتقال و پردازش داده‌های هیدرولوژیکی و پیش‌بینی جریان رودخانه از طریق مدل‌سازی در چهل سال گذشته، پیشرفت چشمگیری داشته است. استفاده از روش‌های جدید، برای افزایش دقت پیش‌بینی جریان رودخانه ضروری است. برای دستیابی به این هدف، استفاده

در عصر حاضر، انتظار می‌رود تقاضای جهانی انرژی روز به روز افزایش یابد (ون رویجون<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). پدیده‌های اقلیمی مانند سیل، خشکسالی، طوفان بر پتانسیل نیروگاههای آبی تأثیر می‌گذارند. همچنین می‌توانند بر زیرساخت‌های سامانه‌های تولید و انتقال برق آبی و تأمین انرژی تأثیر بگذارد. تغییرات آب و هوایی می‌توانند با ایجاد خسارت فیزیکی ناشی از سیل، طوفان و خشکسالی بر اقتصاد جهانی تأثیر بگذارد (یاموسه<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۰).

مخزن برق آبی معمولاً به نگه داشتن سطح آب در حداقل سطح طراحی نیاز دارد تا حداقلتر انرژی را برای تولید روزانه برق آبی ذخیره کند و همچنین از هرگونه نشت در سد جلوگیری کند. با این حال، از آنجایی که حجم ذخیره‌مسازی مخزن به دلیل رسوب‌گذاری از بین می‌رود، انرژی خروجی از نیروگاه تحت تأثیر قرار می‌گیرد، مخزن به تدریج قابلیت مهار جریان‌های ورودی زیاد را از دست می‌دهد و کنترل رهاسازی سیلاب از طریق سرریز اجتناب‌ناپذیر است (ابرشمشچی<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۱؛ شفیعی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۲):

با توجه به افزایش تقاضای آب، منابع آب به دلیل رشد جمعیت محدود و غیرقابل اعتماد خواهند بود (پی مر<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). انتظار می‌رود تغییرات آب و هوایی، به ویژه دما و بارندگی، تأثیر قابل توجهی بر منابع آبی آینده داشته باشد (مانزاناس<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). بر اساس مطالعات پیشین، تغییر ۱۰ درصدی بارش، عمدتاً منجر به تغییر ۱۵ تا ۲۵ درصدی در جریان رودخانه می‌شود. با این حال، افزایش دما، معمولاً منجر به کاهش ۵ تا ۱۲ درصدی جریان ورودی می‌شود (شارما و گویال<sup>۷</sup>، ۲۰۲۰). بنابراین، تغییرات جریان می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر تولید برق تولید شده نیروگاههای آبی داشته باشد (لیو<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۰).

7 Sharma and Goyal (2020)

8 Liu et al (2020)

9 Doulabian et al (2020)

10 Salam (2020)

11 Qin, P., et al (2020)

12 Ahmad and Hossain (2020)

1 Van Ruijven et al (2019)

2 Uamusse et al (2020)

3 Abrishamchi et al (2011)

4 Shafiee et al (2012)

5 Paymard et al (2019)

6 Manzanas et al (2020)

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 دارد. 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. مقاله حاضر به منظور برآورد منافع اقتصادی و درآمدهای ناشی از استفاده از این سامانه پیش‌بینی تهیه شده است و علیرغم آنکه می‌تواند منافع و درآمدهای آن گستره باشد، صرفاً برروی آثار آن بر منافع و درآمد افزایش تولید برق دو نیروگاه آبی کارون<sup>۴</sup> و رودبار لرستان متتمرکز شده است.

### مواد و روش‌ها

#### ۱- منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی کارون<sup>۴</sup> در استان چهارمحال و بختیاری در فاصله ۱۸۰ کیلومتری جنوب غربی شهرکرد و چهار کیلومتری پایین دست محل تلاقي رودخانه‌های ارمند و بازفت واقع شده است. حوضه آبریز رودخانه کارون در محدوده سد کارون<sup>۴</sup> در قسمت جنوب غربی ایران در محدوده بین عرض شمالی ۳۱-۲۰ تا ۴۰-۳۲ و طول شرقی ۴۹-۳۳ تا ۵۱-۴۵ 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<sup>۴</sup>، ۱۲۸۱۳ کیلومترمربع بوده و رشته کوههای مرتفع زاگرس شرایط مناسبی را برای بارش در حوضه آبریز این رودخانه (به خصوص نواحی غربی و شمال غربی) به وجود آورده است. ارتفاع متوسط بارندگی سالانه این حوضه حدود ۶۸۰ میلیمتر برآورد می‌شود. متوسط آورد سالانه رودخانه ۴۹۲۷/۴ میلیون مترمکعب بوده و حدکثر

از مدل‌های فیزیکی و عددی در برآورد و پیش‌بینی دقیقتراز اهمیت ویژه‌ای بخوردار است (کنتراست<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۰).

اقلیم و به تبع آن جریان ورودی رودخانه، تعیین کننده تولید و عرضه برق و انرژی در منطقه است. بنابراین، بررسی تأثیر برق و انرژی بر اقتصاد جوامع حائز اهمیت است (گللو و قدیمی<sup>۲</sup>، ۲۰۱۷). افزایش تقاضا و کاهش بالقوه منابع انرژی در آینده به یکی از چالش‌های اصلی تبدیل شده است (ابراهیمیان<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۸). در نیروگاه‌های برق آبی، دما و بارش می‌توانند شرایط هیدرولوژیکی آینده را تغییر داده و بر میزان و توزیع زمانی تولید برق توسط یک نیروگاه برق آبی تأثیر گذارند (سانچز-گارسیا<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). برای پیش‌بینی بهتر اثرات تغییرات آب و هوایی بر تولید برق آبی، اطلاعات متنوعی در مورد آینده مورد نیاز است.

برآورد میزان آب برای تولید برق آینده ضروری است. تقاضای آب، تابعی از رشد جمعیت، رشد اقتصادی و تغییرات تکنولوژیک است (آفاجانی و قدیمی<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸). تغییرات جریان رودخانه، بر مصرف آب در پنج حوزه تقاضای آب تأثیر دارد: کشاورزی، صنعتی، انرژی، شهری و تلفات مخازن. تمرکز این مطالعه بر روی میزان آب در مخزن نیروگاه آبی است (پریرا<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین، استفاده از روش‌های پیش‌بینی دقیق رواناب نقش مهمی در برآورد نیروگاه‌های آبی دارد (استودارت<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). معادلات مختلفی برای تعیین رواناب مدت‌هاست که برای مدیریت منابع آب در علوم هیدرولوژیکی پیشنهاد شده است (ژو<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). مدل‌های تجربی هیدرولوژیکی و روش‌های هوشمند عصبی را می‌توان برای شبیه‌سازی رواناب استفاده کرد (ارکان<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). فرآیند تبدیل بارندگی به رواناب بسیار پیچیده است و تعاملات زیادی بین اجزای مختلف آن وجود دارد (پیل و مک‌ماهون<sup>۱۰</sup>، ۲۰۲۰).

<sup>6</sup> Perera et al (2020)

<sup>7</sup> Stoddart et al (2020)

<sup>8</sup> Zhou et al (2019)

<sup>9</sup> Ercan et al (2019)

<sup>10</sup> Peel, M.C., McMahon (2020)

<sup>1</sup> Contreras et al (2020)

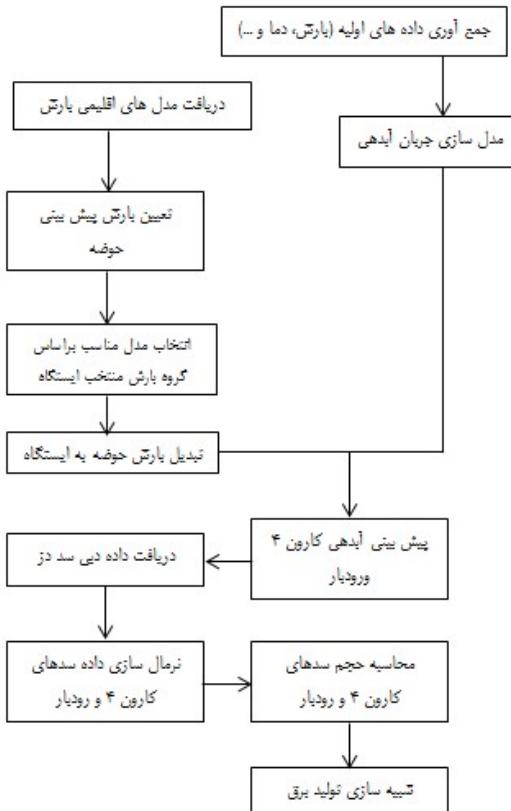
<sup>2</sup> Gollou and Ghadimi (2017)

<sup>3</sup> Ebrahimian et al (2018)

<sup>4</sup> Sanchez-Garcia et al (2020)

<sup>5</sup> Aghajani and Ghadimi (2018)

مخزن کارون ۴ و رودبار لرستان در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ در حالت بدون سامانه پیش‌بینی، از سد دز استفاده شد که مراحل انجام کار برای هر سد به تفکیک در زیر ارائه شده است (شکل (۲)).

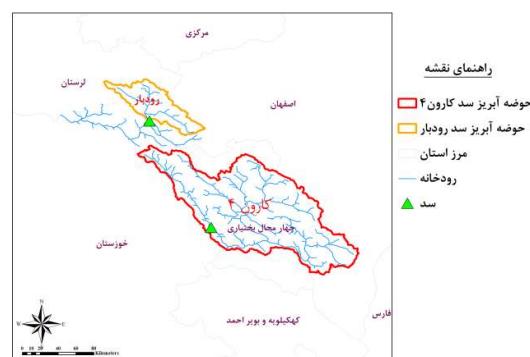


شکل (۲): مراحل انجام پژوهش

برای برآورد میزان تولید برق در حالت بدون هشدار سیل از نرم افزار تخصصی منبع‌نما Source View شرکت دانش بنیان پایشگر تدبیرافزار استفاده شد تا با کمک منحنی حجم-ارتفاع سدها، حجم اولیه شروع دوره و ورودی جریان سدها در طول دوره مقادیر تولید برق در حالت بدون هشدار سیل شبیه‌سازی شود. نرم افزار منبع‌نما (Source View) به منظور تهیه مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه سازی بهره‌رداری از منابع آب توسعه داده شده است. این نرم افزار به‌گونه‌ای طراحی شده است که ضمن رعایت اصول پایه ذخیره اطلاعات تحت سرور، بازیابی اطلاعات جهت تهیه گزارشها به سهولت و به سرعت انجام می‌پذیرد. با رسم گره‌ها و کمان‌های مورد نظر در صفحه شماتیک و تعریف ویژگی‌های هر کدام و همچنین اعمال سیاست‌های بهره‌برداری از

سیلاب محتمل حوضه در حدود ۱۰۲۰۰ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است.

سد رودبار لرستان بر روی رودخانه رودخانه رودبار (از سرشاخه‌های شرقی حوزه آبدیگر رودخانه دز) و در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز در استان لرستان واقع گردیده است. مورفلوژی رودخانه رودبار در این محدوده و چرخش مسیر آن در پایین دست محل احداث سد به‌گونه‌ای است که اختلاف ارتفاعی طبیعی حدود ۳۰۰ متر را ایجاد می‌کند. مساحت حوضه آبریز رودخانه تا محل احداث سد رودبار لرستان ۲۲۵۵ کیلومترمربع و میزان متوسط جریان سالانه رودخانه در محل سد معادل  $30/2$  مترمکعب در ثانیه است. حداقل دبی ماهانه رودخانه، پس از برداشت‌های بالادست در حدود  $4/1$  مترمکعب بر ثانیه و حداقل آن در حدود  $250/5$  مترمکعب بر ثانیه است. همچنین آورد سالانه این رودخانه ۹۵۷ میلیون مترمکعب و حداقل سیلاب محتمل حوضه در حدود  $3734$  مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. موقعیت جغرافیایی دو حوضه مورد مطالعه را در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه‌ها

- تولید انرژی نیروگاه آبی بدون سامانه پیش‌بینی در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸

با توجه به اینکه سامانه پیش‌بینی در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ فعال بوده و بهره‌برداری از سد مخزن کارون ۴ و رودبار لرستان براساس اطلاعات این سامانه انجام شده است لذا سری زمانی حجم مخزن این دو سد در زمان بدون سامانه پیش‌بینی در دسترس نیست. برای برآورد سری زمانی حجم

مهر سال ۹۷ حدود ۱۵۶۵ میلیون متر مکعب ثبت شده است که اختلافی حدود ۴.۵ میلیون متر مکعب با مقدار برآورده شده از حجم سد دز داشته است. این اختلاف از ورودی ۱۰ روز اول ماه به سد کارون ۴ کسر گردید تا شرایط شبیه سازی نزدیک به شرایط واقعی نزدیک شود.

با توجه به شرایط تولید برق برای نزدیکتر شدن شرایط شبیه سازی به شرایط واقعی نیاز بود که سری زمانی حداقل حجم و سری زمانی حداکثر حجم ایجاد شود. با این سری زمانی با بازه ۵۰ میلیون متر مکعبی حجم سد با توجه به حداکثر و حداقل ذخیره سد شبیه سازی می شود. در واقع برای ایجاد سری زمانی حداقل حجم مقدار ۱۰ میلیون متر مکعب از سری زمانی شبیه سازی شده کسر گردید. همچنین برای ایجاد سری زمانی حداکثر حجم مقدار ۴۰ میلیون متر مکعب به سری زمانی شبیه سازی شده اضافه گردید به شرط اینکه از مقدار حداکثر حجم مجاز یعنی ۲۲۰ عبور نکرده باشد.

## ۲- سد روبار لرستان

جهت برآورده برق تولیدی نیروگاه سد روبار لرستان در حالت بدون وجود سامانه پیش بینی نیاز است که ابتدای حجم مخزن شبیه سازی شود. برای این منظور مراحل زیر به ترتیب انجام شد.

حجم مخزن سد دز از ۱ مهر سال ۱۳۹۷ لغایت ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۸ به صورت روزانه از سایت <http://dams.wrm.ir> برداشته شد.

در این مرحله نیز سری زمانی فوق نرمال (بی بعد) گردید و از معادله یک استفاده شد.

سپس برای بدست آوردن سری زمانی حجم مخزن سد روبار در روزهای ۱ مهر سال ۹۷ لغایت ۳۱ اردیبهشت سال ۱۳۹۸، سری زمانی بی بعد شده سد دز را به صورت روزانه در اختلاف حداکثر و حداقل حجم مخزن ضرب و با مقدار جمع شد. حداقل و حداکثر سد روبار لرستان در این بازه به ترتیب ۱۴۴۹ و ۲۲۰۲ میلیون متر مکعب است.

با معادله ۲، سری زمانی حجم مخزن سد روبار لرستان در روزهای ۱ مهر سال ۹۷ لغایت ۳۱ اردیبهشت سال ۱۳۹۸ در حالت بدون سامانه بدست آمد. حجم سد روبار لرستان

سیستم منابع آب، متغیرهای تصمیم و همچنین قیود مسئله تعریف می شود که با اجرای مدل بهینه سازی برنامه ریزی خطی در یک گام زمانی مورد نظر می توان جواب بهینه را بدست آورد.

## ۱- سد و نیروگاه کارون ۴

جهت برآورده برق تولیدی نیروگاه سد کارون ۴ در حالت بدون وجود سامانه پیش بینی، نیاز است که ابتدای حجم مخزن شبیه سازی شود. برای این منظور مراحل زیر به ترتیب انجام شد.

حجم مخزن سد دز از ۱ مهر سال ۱۳۹۷ لغایت ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۸ به صورت روزانه از سایت <http://dams.wrm.ir> برداشته شد.

حداقل حجم مخزن سد دز ۵۸۶ میلیون متر مکعب در نظر گرفته شده که جهت بدست آوردن حجم استفاده شده در تولید برق، این حداقل حجم از حجم مخزن سد دز از تمامی روزها یعنی ۱ مهر سال ۹۷ لغایت ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۸ کسر گردیده شد.

در این مرحله سری زمانی فوق نرمال (بی بعد) گردید. برای نرمال سازی از معادله ۱ استفاده شد.

$$V_N = \frac{V_i - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (1)$$

$V_N$ : حجم بی بعد (نرمال سازی شده)

$V_i$ : حجم سد مورد نظر

$V_{max}$ : حجم حداکثری سد

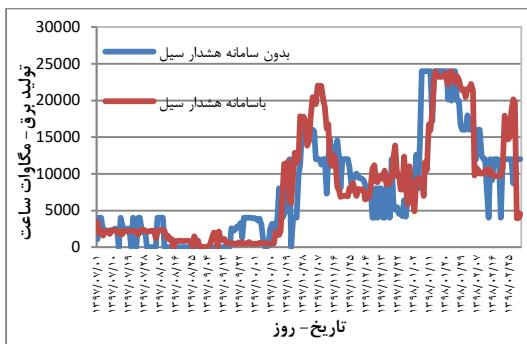
$V_{min}$ : حجم حداقلی سد

سپس برای بدست آوردن سری زمانی حجم مخزن سد کارون ۴ در روزهای ۱ مهر سال ۹۷ لغایت ۳۱ اردیبهشت سال ۱۳۹۸، سری زمانی بی بعد شده سد دز را به صورت روزانه در اختلاف حداکثر و حداقل حجم مخزن ضرب و با حداقل مقدار جمع شد. حداقل و حداکثر حجم کارون ۴ در این بازه به ترتیب ۱۴۴۹ و ۲۲۰۲ میلیون متر مکعب است.

$$V_i = V_N \times (V_{max} - V_{min}) + V_{min} \quad (2)$$

با معادله ۲، سری زمانی حجم مخزن سد کارون ۴ در روزهای ۱ مهر سال ۹۷ لغایت ۳۱ اردیبهشت سال ۱۳۹۸ در حالت بدون سامانه بدست آمد. حجم سد کارون ۴ در ۱

شکل (۴) مقادیر روزانه تولید برقابی سد کارون ۴ در دو حالت بدون وجود سامانه پیش‌بینی و با وجود سامانه پیش‌بینی در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۵) نیز مقادیر ماهانه تولید برقابی سد کارون ۴ در دو حالت بدون وجود سامانه پیش‌بینی و با وجود سامانه پیش‌بینی در ماههای مهر لغایت اردیبهشت سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ را نشان می‌دهد.

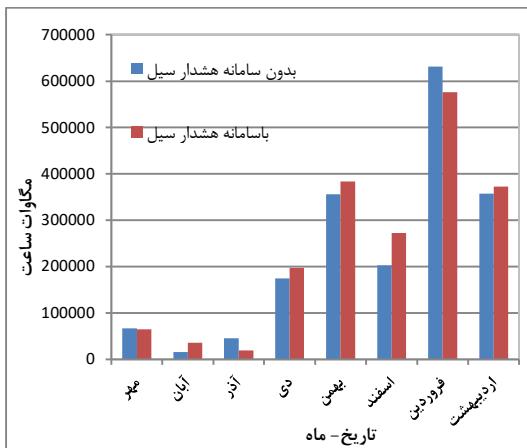


شکل (۴): مقادیر روزانه تولید برق سد کارون ۴ در دو حالت بدون و با سامانه پیش‌بینی در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸

در ۱ مهر سال ۹۷ حدود ۱۱۴ میلیون متر مکعب ثبت شده است که اختلافی حدود ۷/۱ میلیون متر مکعب با مقدار برآورد شده از حجم سد دز داشته است. این اختلاف از ورودی ۶۰ روز اول ماه از سد رودبار لرستان کسر گردید تا شرایط شبیه‌سازی نزدیک به شرایط واقعی نزدیک شود. با توجه به شرایط تولید برق برای نزدیکتر شدن شرایط شبیه‌سازی به شرایط واقعی، نیاز بود که سری زمانی حداقل حجم و سری زمانی حداکثر حجم ایجاد شود. بنابراین با ایجاد یک بازه ۴۰ میلیون متر مکعبی، حجم‌ها در این بازه شبیه‌سازی می‌شوند. در نهایت، برای ایجاد سری زمانی حداقل حجم مقدار ۱۰ میلیون متر مکعب از سری زمانی شبیه‌سازی شده کسر شد. همچنین برای ایجاد سری زمانی حداکثر حجم مقدار ۳۰ میلیون متر مکعب به سری زمانی شبیه‌سازی شده اضافه گردید به شرط اینکه از مقدار حداکثر حجم مجاز یعنی ۲۱۴/۷ عبور نکرده باشد.

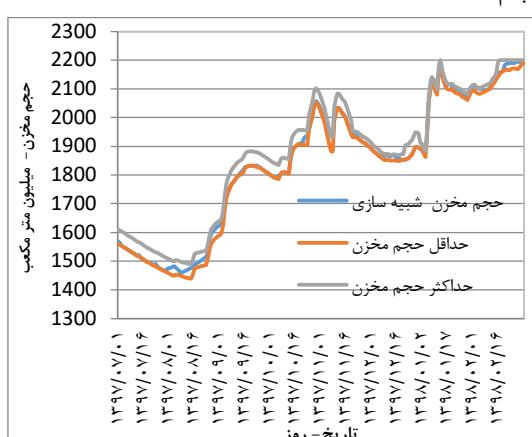
## نتایج و بحث

شکل (۳) مقادیر شبیه‌سازی شده حجم مخزن سد کارون ۴ از سد دز و محدودیت‌های حداقل وحداکثر برای مخزن سد در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ را نشان می‌دهد. با استفاده از حجم شبیه‌سازی شده و محدودیت‌های حداقل وحداکثر سد کارون ۴، تولید برق در حالت بدون وجود سامانه پیش‌بینی انجام شد.



شکل (۵): مقادیر ماهانه تولید برق سد کارون ۴ در دو حالت بدون و با سامانه پیش‌بینی در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸

در این پژوهش برای نیروگاه تولید برق سد کارون ۴ به طور متوسط، راندمان ۹۳ در نظر گرفته شده است همچنین مقدار تبخیر سالانه و تخلیه رسوب، برای مخزن سد کارون ۴ در نظر گرفته شده است که به ترتیب ۱۶/۶ میلیون متر مکعب به عنوان تبخیر در بازه زمانی ۱ مهر ۱۳۹۷ الی ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۸ و ۷۴/۳ میلیون متر مکعب به عنوان تخلیه رسوب در فروردین ۱۳۹۸ از مخزن خارج شده است.

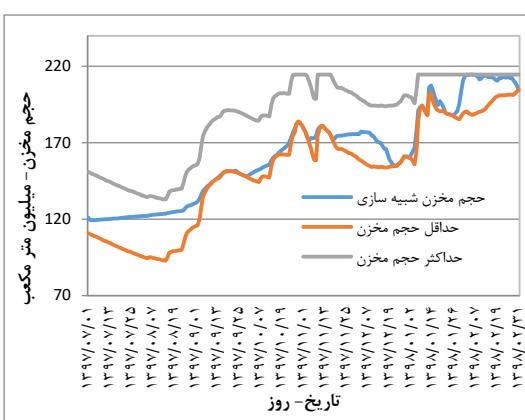


شکل (۳): مقادیر روزانه حجم مخزن کارون ۴ و محدودیت‌های حداقل وحداکثر برای مخزن در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸

پس از دسته‌بندی ضرایب، جهت پیاده‌سازی در نرم افزار، ۶ گره به عنوان نیروگاه بر قابی در نظر گرفته شد که هر گره قادر به تولید حداقل ۴ ساعت انرژی بر قابی است. ضرایب سود نیز برای گره اول بیشترین و برای گره ششم کمترین مقدار لحاظ شد. همچنین گره اول که دارای بیشترین ضریب سود تولید انرژی بر قابی است، ملزم به تولید حداقل ۴ ساعت گردید. در حقیقت با استفاده از این روش و ساخت یک مدل شبیه‌سازی، ضرایب ارزش تولید برق به صورت ساعتی در اختیار نرم افزار قرار داده شد.

اساس کار مدل بدین صورت است که در گره اول با توجه به محدودیت‌های حداقل و حداکثر اعمال شده در تولید، ۴ ساعت تولید را خواهیم داشت. در گره‌های دوم تا ششم، مدل بهینه‌سازی با توجه به ضرایب تخصیص یافته برای هر گره، مقدار تولید را در نظر می‌گیرد. در نتیجه با قیمانده تولید توسط گره دوم و پس از آن گره سوم و به ترتیب تا انتهای صورت می‌پذیرد. همچنین لازم به ذکر است که تصمیم بر این که یک روز مقدار تولید تا گره دوم و یک روز تا گره سوم انجام شود به مقدار ضرایب روزانه بستگی دارد.

شکل (۷) مقادیر شبیه‌سازی شده حجم مخزن سد رودبار لرستان از سد دز و محدودیت‌های حداقل و حداکثر برای مخزن سد در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ را نشان می‌دهد. با استفاده از حجم شبیه‌سازی شده و محدودیت‌های حداقل و حداکثر سد رودبار لرستان، تولید برق در حالت بدون وجود سامانه پیش‌بینی انجام شد.

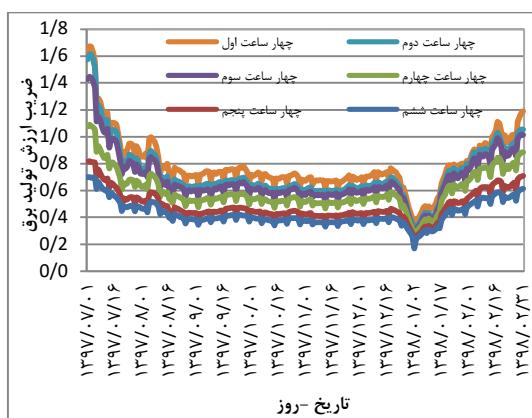


شکل (۷): مقادیر روزانه حجم مخزن رودبار لرستان و محدودیت‌های حداقل و حداکثر برای مخزن در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸

پس از ایجاد شرایط اولیه برای حجم مخزن و ورودی آن، می‌باشد مقادیر خروجی توربین و تولید برق را نیز با استفاده از مدل منبع‌نمای شرکت پایشگر تدبیرافزار محاسبه نمود. مقادیر خروجی از توربین و سریز در حالت شبیه‌سازی به ترتیب برابر با ۴,۱۵۰ میلیون متر مکعب و سریز مقداری برابر ۱۵۱/۸ میلیون متر مکعب در نظر گرفته شده است که این مقدار خروجی از توربین ۱,۸۴۹,۶۰۰ مگاوات ساعت برآورد شد.

مقدار خروجی در بازه زمانی مورد مطالعه در طرح هشدار سیل حدود ۴,۳۲۹ میلیون متر مکعب بوده که این مقدار خروجی مقداری برابر با ۱,۹۲۱,۹۰۰ مگاوات ساعت بوده که نسبت به حالت بدون هشدار سیل افزایش ۳/۹ درصدی تولید را نشان می‌دهد.

در مدل شبیه‌سازی ارائه شده، مقرر شد که ضرایب ارزش تولید برق به صورت ساعتی لحاظ گردد. از آنجا که اجرای مدل در بازه زمانی روزانه بوده است، در نتیجه یک مدل شبیه‌ساعتی ساخته شد که در این مدل هر روز به ۶ دسته ۴ ساعته با ارزش‌های تولید متفاوت تقسیم شد. لازم به ذکر است که تقسیم‌بندی هر روز پس از مرتب کردن ضرایب از بیشترین به کمترین مقدار انجام می‌شود. به صورتی که میانگین ضرایب ۴ ساعت موجود در اولین دسته (دسته اول) بیشترین مقدار و میانگین ضرایب ۴ ساعت موجود در آخرین دسته (دسته ششم) کمترین مقدار را داراست. شکل (۶) ضریب ارزش تولید برق به صورت ۴ ساعته در روز نشان می‌دهد.



شکل (۶): ضریب ارزش تولید برق به صورت ۴ ساعته در روز

پس از ایجاد شرایط اولیه برای حجم مخزن و ورودی آن می‌بایست مقادیر خروجی توربین و تولید برق را نیز محاسبه نمود. مقادیر خروجی از توربین در حالت شبیه‌سازی برابر با  $597/5$  میلیون مترمکعب است که این مقدار خروجی از توربین  $735,500$  مگاوات ساعت برق تولید می‌کند.

مقدار خروجی در بازه زمانی مورد مطالعه در طرح هشدار سیل حدود  $661$  میلیون متر مکعب بوده که این مقدار خروجی مقداری برابر با  $771200$  مگاوات ساعت بوده که نسبت به حالت بدون هشدار سیل افزایش  $4/8$  درصدی تولید را نشان می‌دهد.

برای بهره‌برداری از سد و نیروگاه رودبار، مقدار جریان حداقل زیست محیطی پایین دست برابر با  $0/9$  مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شد که در مدل شبیه‌سازی شده  $120$  میلیون متر مکعب خروجی برآورد شده است. ضرایب سود نیز مانند محاسبه در سد کارون<sup>۴</sup>، برای گره اول بیشترین و برای گره ششم کمترین لحاظ شد.

محاسبه منافع اقتصادی و درآمدهای مالی سامانه پیش‌بینی در نیروگاه کارون<sup>۴</sup> و رودبار لرستان

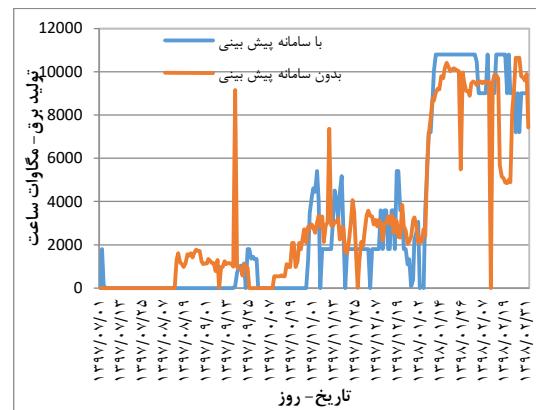
به منظور محاسبه منافع اقتصادی و درآمدهای مالی سامانه پیش‌بینی ابتدا باید تأثیر این سامانه را در تولید برق در این دو نیروگاه محاسبه کرد. به این‌منظور، میزان تولید انرژی برقابی، در دو حالت با سامانه پیش‌بینی و بدون سامانه پیش‌بینی در سال آبی  $1397-98$  (۱) مهر  $1397$  لغایت  $31$  اردیبهشت  $1398$  محاسبه شد. نتایج این بررسی با توجه به خروجی‌های مدل شبیه‌سازی به شرح جدول ۱ است.

جدول ۱- میزان تغییرات تولید برق در نیروگاه در دو حالت با و بدون سامانه پیش‌بینی- مگاوات ساعت

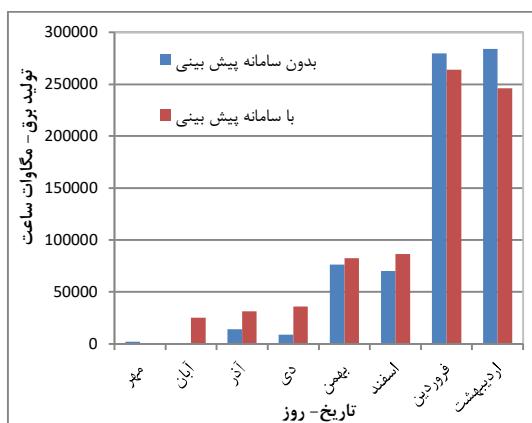
افزایش تولید برق	برق تولید شده		نام نیروگاه
	با سامانه	بدون سامانه	
۷۲,۲۵۴	۱,۹۲۱,۹۱۳	۱,۸۴۹,۶۵۹	کارون <sup>۴</sup>
۳۵,۷۳۷	۷۷۱,۱۹۸	۷۳۵,۴۶۱	رودبار

جدول فوق نشان از آن دارد که استفاده از سامانه پیش‌بینی توانسته است تا به بهره‌برداری مناسب‌تر سبب افزایش میزان برق تولیدی در این نیروگاه کارون<sup>۴</sup> و رودبار لرستان در سال آبی  $1397-98$  شود. با توجه به دید چند ساله با انجام

شکل (۸) مقادیر روزانه تولید برقابی سد رودبار لرستان در دو حالت بدون وجود سامانه پیش‌بینی و با وجود سامانه پیش‌بینی در سال آبی  $1397-98$  را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۹) نیز مقادیر ماهانه تولید برقابی سد رودبار لرستان در دو حالت بدون وجود سامانه پیش‌بینی و با وجود سامانه پیش‌بینی در ماههای مهر لغایت اردیبهشت سال آبی  $1397-98$  را نشان می‌دهد.



شکل (۸): مقادیر روزانه تولید برق سد رودبار لرستان در دو حالت بدون و با سامانه پیش‌بینی در سال آبی  $1397-98$



شکل (۸): مقادیر ماهانه تولید برق سد رودبار لرستان در دو حالت بدون و با سامانه پیش‌بینی در سال آبی  $1397-98$

در این پژوهش برای نیروگاه تولید برق سد رودبار به طور متوسط راندمان  $۹۴$  در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار تبخیر سالانه و تخلیه رسوب برای مخزن سد رودبار در نظر گرفته شده است که به ترتیب  $1/4$  میلیون مترمکعب به عنوان تبخیر در بازه زمانی  $1$  مهر  $1397$  الی  $31$  اردیبهشت  $1398$  و تخلیه رسوبی در این بازه رخ نداده است.

- 1- Abrishamchi, A., Dashti, M. and Tajrishy, M. (2011). "Development of a Multi-Reservoir Flood Control Optimization Model: Application to the Karkheh River Basin, Iran", World Environmental and Water Resource Congress, pp. 3048-3057.
- 2- Aghajani, G., Ghadimi, N., 2018. Multi-objective energy management in a micro-grid. Energy Rep. 4, 218–225.
- 3- Ahmad, S.K., Hossain, F., 2020. Forecast-informed hydropower optimization at long and short-time scales for a multiple dam network. J. Renew. Sustain. Energy 12 (1), 014501.
- 4- Contreras, E., Herrero, J., Crochemore, L., Aguilar, C., Polo, M.J., 2020. Seasonal climate forecast skill assessment for the management of water resources in a run of river hydropower system in the Poqueira river (southern Spain). Water 12 (8), 2119.
- 5- Doulabian, S., Golian, S., Toosi, A.S., Murphy, C., 2020. Evaluating the effects of climate change on precipitation and temperature for Iran using RCP scenarios. J. Water Clim. Change.
- 6- Ebrahimian, H., Barayoon, S., Mohammadi, M., Ghadimi, N., 2018. The price prediction for the energy market based on a new method. Econ. Res.-Ekonomika Istraživanja 31 (1), 313–337.
- 7- Ercan, B., Yagci, A.E., Yilmaz, A.S., Yuce, M.I., Unsal, M., 2019. Annual runoff modeling of kizilirmak basin by artificial intelligent techniques. Feb-Fresenius Environ. Bull. 6651.
- 8- Gollou, A.R., Ghadimi, N., 2017. A new feature selection and hybrid forecast engine for day-ahead price forecasting of electricity markets. J. Intell. Fuzzy Systems 32 (6), 4031–4045.
- 9- Liu, Y., et al., 2020. Global socioeconomic risk of precipitation extremes under climate change. Earth's Future 8 (9), e2019EF001331.
- 10- Manzanas, R., Fiwa, L., Vanya, C., Kanamaru, H., Gutierrez, J., 2020. Statistical downscaling or bias adjustment? A case study involving implausible climate change projections of precipitation in Malawi. Clim. Change 162 (3), 1437–1453.
- 11- Paymard, P., Yaghoubi, F., Nouri, M., Bannayan, M., 2019. Projecting climate change impacts on rainfed wheat yield, water demand, and water use efficiency in northeast Iran. Theor. Appl. Climatol. 138 (3–4), 1361–1373.
- 12- Peel, M.C., McMahon, T.A., 2020. Historical development of rainfall-runoff modeling. Water 7 (5), e1471, Wiley Interdisciplinary Reviews.
- 13- Perera, A., Nik, V.M., Chen, D., Scartezzini, J.-L., Hong, T., 2020. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems. Nat. Energy 5 (2), 150–159.
- 14- Qin, P., et al., 2020. Assessing concurrent effects of climate change on hydropower supply, electricity demand, and greenhouse gas emissions in the Upper Yangtze River Basin of China. Appl. Energy 279, 115694.
- 15- Salam, A., 2020. Internet of things for environmental sustainability and climate change. In: Internet of

پیش‌بینی مستمر دبی ورودی به سدها و اعمال آن بر میزان خروجی توربین‌ها و تولید برق، می‌توان مدیریت بهتری در هزینه‌ها و تولید پایدار برق به همراه ذخیره آب داشت.

### نتیجه‌گیری

سامانه پیش‌بینی در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ فعال بوده و بهره‌برداری از سد مخزن کارون ۴ و رودبار لرستان براساس اطلاعات این سامانه انجام شده است بنابراین سری زمانی حجم مخزن این دو سد در زمان بدون سامانه پیش‌بینی در دسترس نمی‌باشد. برای برآورد سری زمانی حجم مخزن کارون ۴ و رودبار در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ در حالت بدون سامانه پیش‌بینی، از سد دز استفاده گردید که پس از ایجاد شرایط اولیه برای حجم مخزن و ورودی آن، می‌بایست مقادیر خروجی توربین و تولید برق را نیز محاسبه نمود.

مقادیر خروجی از توربین و سریز در حالت شبیه سازی در سد کارون ۴ به ترتیب برابر با ۴۱۵۰ میلیون مترمکعب و سریز مقداری برابر ۱۵۲ میلیون متر مکعب در نظر گرفته شده است که از این مقدار خروجی از توربین ۱,۸۴۹,۶۰۰ مگاوات ساعت برآورد شد. مقدار خروجی در طرح هشدار سیل حدود ۴۳۲۹ میلیون متر مکعب بوده که این مقدار خروجی مقداری برابر با ۱,۹۲۱,۹۰۰ مگاوات ساعت بوده که نسبت به حالت بدون هشدار سیل افزایش ۳/۹ درصدی تولید را نشان می‌دهد. مقادیر خروجی از توربین در حالت شبیه سازی برای سد رودبار برابر با ۵۹۷/۵ میلیون مترمکعب که این مقدار خروجی از توربین ۷۳۵,۵۰۰ مگاوات ساعت برق تولید می‌کند. همچنین مقدار خروجی در طرح هشدار سیل حدود ۶۶۱ میلیون متر مکعب بوده که این مقدار خروجی مقداری برابر با ۷۷۱,۲۰۰ مگاوات ساعت بوده که نسبت به حالت بدون هشدار سیل افزایش ۴/۸ درصدی تولید را نشان می‌دهد. در نهایت مشخص گردید که نیروگاه‌ها با دسترسی به اطلاعات هشدار سیل می‌توانند با مدیریت صحیح منابع میزان تولید برق را افزایش داده که این موضوع باعث افزایش درآمد حاصل از تولید می‌گردد.

### مراجع

- Things for Sustainable Community Development. Springer, pp. 33–69.
- 16- Sanchez-Garcia, D., Rubio-Bellido, C., Tristanco, M., Marrero, M., 2020. Acomparative study on energy demand through the adaptive thermal comfort approach considering climate change in office buildings of Spain. *Build. Simul.* 13 (1), 51–63.
  - 17- Shafiee, M.J., Dashti, M. and Abrishamchi, A. (2012). “A System Dynamics Model for Improving Flood Control Operation Policies”, World Environmental and Water Resources Congress, pp. 962 -972.
  - 18- Sharma, A., Goyal, M.K., 2020. Assessment of the changes in precipitation and temperature in Teesta River basin in Indian Himalayan Region under climate change. *Atmos. Res.* 231, 104670.
  - 19- Stoddart, M.C., McCurdy, P., Slawinski, N., Collins, C.G., 2020. Envisioning energy futures in the North Atlantic Oil Industry: Avoidance, persistence, and transformation as responses to climate change. *Energy Res. Soc. Sci.* 69, 101662.
  - 20- Uamusse, M.M., Tussupova, K., Persson, K.M., 2020. Climate change effects on hydropower in Mozambique. *Appl. Sci.* 10 (14), 4842.
  - 21- van Ruijven, B.J., De Cian, E., Wing, I.S., 2019. Amplification of future energy demand growth due to climate change. *Nat. Commun.* 10 (1), 1–12.
  - 22- Zhou, Q., Chen, L., Singh, V.P., Zhou, J., Chen, X., Xiong, L., 2019. Rainfallrunoff simulation in karst dominated areas based on a coupled conceptual hydrological model. *J. Hydrol.* 573, 524–533.

## Economic and financial assessment of the consequences of runoff forecast in dam and hydropower projects (Case study: Karun 4 and Rudbar Lorestan dams and power plants)

Hamidreza Eslami<sup>1</sup>

Saeid Jamali<sup>2</sup>

Reza Ayoubikia\*<sup>3</sup>

Kamyab Eslami<sup>4</sup>

### Abstract

Increasing energy demand has made improving the management of resource utilization and energy inevitable. The purpose of this article is to compare the power generation of two power plants of Karun 4 and Rudbar dams in the period of 1397-98 in two cases with flood forecasting and warning without applying and paying attention to flood warning and finally estimating economic benefits and revenues. It is a prediction of the use of this system. Flood forecasting and warning systems are among the non-structural methods of flood management that in combination with structural methods can increase the efficiency of flood management. This system timely warnings through planning and management of dam reservoir operation, enables the creation of broad benefits in reducing flood damage lands. In addition to these benefits, another part of the positive effects of these systems is the increase in electricity production in hydropower plants. The results of this study show that the amount of electricity generation in the power plants of dams in the state of flood warning activity by increasing the release from the turbines of power plants before the flood and preventing overflow, 3.9 and 4.8% more than Flood alert mode is desired during the annual interval.

### Keywords

Flood warning, discharge forecast, hydroelectric power plant, Karun 4, Lorestan Rudbar

<sup>1</sup> CEO Payeshgar Tadbir Afzar.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Faculty of Civil Engineering and Land Resources.

<sup>3\*</sup> Water Resources Expert - Payeshgar Tadbir Afzar Company. pta\_data@yahoo.com.

<sup>4</sup> Software Developer Expert - Payeshgar Tadbir Afzar Company.