ISSN:

مجله علمی نوآوری و تحقیق در مهندسی مکانیک

جلد ۱، شماره ۱، پاییز و زمستان ۱۴۰۴، صفحه: ۳۱ تا ۴۹

نیروگاه برق‌آبی در قرن بیست و یکم: بازنگری انتقادی در کارایی، پایداری و چشم‌انداز آینده در پرتو چالش‌های پیچیده

علیرضا محمودی فرد*[۱]، سید محمدرضا حسینی علی آباد[۲]

[۱] پسادکترای آینده‌پژوهی و مدرس دانشگاه ملی مهارت، دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران، alireza۱۰.m۱۰@gmail.com

[۲] پست دکتری مدیریت بازرگانی-مدیریت استراتژیک، دانشگاه بین‌المللی نورث‌وست ارمنستان، info@confnashr.ir

ISSN

مجله علمی نوآوری و تحقیق در مهندسی مکانیک

چکیده

نیروگاه‌های برق‌آبی به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین و مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، نقشی محوری در تأمین برق پایدار و خدمات انعطاف‌پذیر شبکه ایفا می‌کنند. این مقاله با رویکردی مروری-تحلیلی و با استناد به شواهد علمی معاصر، به بررسی جامع مزایا، معایب، محدودیت‌ها و راندمان بالای این فناوری می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که اگرچه راندمان تبدیل انرژی در این نیروگاه‌ها (۸۵-۹۰٪) بی‌نظیر است و مزایایی چون ذخیره‌سازی، طول عمر طولانی و خدمات چندمنظوره آب‌محور ارائه می‌دهند، اما توسعه و بهره‌برداری از آن‌ها با چالش‌های جدی زیست‌محیطی (تخریب اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، انتشار گازهای گلخانه‌ای از مخازن)، اجتماعی (جابجایی جوامع) و اقلیمی (آسیب‌پذیری در برابر تغییر الگوهای هیدرولوژیکی) مواجه است. مقاله با تحلیل داده‌های واقعی عملکرد و اثرات، استدلال می‌کند که مدل سنتی توسعه بزرگ‌مقیاس با رویکرد صرفاً فنی-اقتصادی دیگر پایدار نیست. در نتیجه، برای حفظ جایگاه برق‌آبی در ترکیب انرژی کم‌کربن آینده، تغییر پارادایم به‌سمت «مدیریت یکپارچه و تطبیقی حوضه‌آبریز»، اولویت‌دادن به نوسازی نیروگاه‌های موجود، و ادغام نوآورانه با فناوری‌های نوین (مانند سامانه‌های فتوولتائیک شناور و هوش مصنوعی برای مدیریت مخزن) ضروری است. این گذار مستلزم همکاری بین‌رشته‌ای و تعهد به رویکردی اکوسیستم‌محور در حکمرانی انرژی و آب است.

کلمات کلیدی

نیروگاه برق‌آبی، انرژی تجدیدپذیر، راندمان، اثرات زیست‌محیطی، تغییر اقلیم، مدیریت یکپارچه، نوسازی، فناوری‌های نوین

مقدمه

نیروگاه‌های برق‌آبی به‌عنوان یکی از کهن‌ترین، بالغ‌ترین و گسترده‌ترین فناوری‌های تولید برق از منابع تجدیدپذیر، نقش بی‌بدیلی را در تأمین انرژی پایدار، تنظیم شبکه و توسعه اقتصادی در بیش از یک قرن گذشته ایفا کرده‌اند. بر اساس آمارهای اخیر آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، سهم نیروگاه‌های برق‌آبی در تولید برق تجدیدپذیر جهانی نزدیک به ۴۰ درصد و در کل تولید الکتریسیته حدود ۱۶ درصد است که نشان‌دهنده‌ی جایگاه محوری آن در سبد انرژی جهانی است (IEA, ۲۰۲۲). اگرچه در سال‌های اخیر توجهات به‌سوی فناوری‌های نوظهوری مانند انرژی خورشیدی و بادی معطوف شده، اما نیروگاه‌های برق‌آبی با دارا بودن مزیت منحصربه‌فرد قابلیت تأمین توان پایه و خدمات ارزشمند جانبی همچون ذخیره‌سازی پمپ‌تاپی، کنترل سیلاب، تأمین آب کشاورزی و شرب، همچنان به‌عنوان ستون فقرات قابلیت اطمینان در بسیاری از سیستم‌های قدرت ملی و منطقه‌ای عمل می‌کنند (Zarfl et al., ۲۰۱۵). با این وجود، این صنعت کهن در آستانه‌ی دوراهی سرنوشت‌سازی قرار دارد. از یک سو، پتانسیل توسعه‌ی بزرگ‌مقیاس و کلاسیک نیروگاه‌های برق‌آبی (به‌ویژه در قالب سدهای بزرگ) در بسیاری از مناطق جهان به دلیل ملاحظات پیچیده‌ی اجتماعی-زیست‌محیطی (مانند جابجایی جوامع، تخریب اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و انتشار گازهای گلخانه‌ای از مخازن) با محدودیت‌های جدی مواجه شده است (Ansar et al., ۲۰۱٤). از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی الگوهای هیدرولوژیکی (مانند تغییر در بارش، ذوب برف و وقوع خشک‌سالی‌ها و سیل‌های شدیدتر) را به‌طور بنیادین دگرگون ساخته و عملاً پایه‌ی فیزیکی عملیات و برنامه‌ریزی بلندمدت این نیروگاه‌ها را تحت‌تأثیر قرار داده است (Haddeland et al., ۲۰۱٤). در این میان، فناوری‌های نوآورانه و رویکردهای توسعه‌ی جدید (مانند نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک‌مقیاس و رودخانه‌ای، سامانه‌های شناور فتوولتائیک روی مخازن و بهینه‌سازی عملیات با استفاده از هوش مصنوعی و کلان‌داده) در حال بازتعریف مرزهای ممکن این صنعت هستند. بنابراین، نوشتار حاضر بر این فرضیه استوار است که آینده‌ی صنعت برق‌آبی نه در انجماد بر مدل‌های سنتی توسعه، بلکه در تطبیق پویا و نوآورانه با چارچوب جدید ملزومات توسعه‌ی پایدار، الزامات تغییر اقلیم و فناوری‌های دیجیتال نهفته است. این مقاله با پذیرش این پیچیدگی چندبعدی، قصد دارد با نگاهی نظام‌مند و آینده‌نگر، به تحلیل جایگاه کنونی و سناریوهای پیش روی نیروگاه‌های برق‌آبی در سیستم انرژی قرن بیست و یکم بپردازد. پرسش محوری این پژوهش آن است که چگونه می‌توان با تلفیق راهبردهای نوسازی (Modernization) نیروگاه‌های موجود، توسعه‌ی مسئولانه‌ی پروژه‌های جدید با کمترین اثرات منفی، و ادغام فناوری‌های نوین، نقش نیروگاه‌های برق‌آبی را به‌عنوان یکی از ارکان انعطاف‌پذیری و پایداری سیستم‌های انرژی آینده تقویت و تثبیت کرد؟ ساختار مقاله پس از این مقدمه، به مروری بر سیر تکاملی و وضعیت موجود فناوری، تحلیل چالش‌های پیش رو (با تمرکز بر تغییر اقلیم و مسائل زیست‌محیطی-اجتماعی)، معرفی فرصت‌های نوآوری و در نهایت ارائه‌ی یک چارچوب تحلیلی برای برنامه‌ریزی راهبردی در این حوزه خواهد پرداخت.

متن بررسی

نیروگاه‌های برق‌آبی با بهره‌گیری از انرژی جنبشی یا پتانسیل جریان آب، یکی از پایه‌های قابل‌اطمینان و انعطاف‌پذیر سیستم‌های قدرت جهانی هستند. این فناوری عمدتاً در سه قالب اصلی توسعه یافته است: نیروگاه‌های مخزنی (ذخیره‌ای) که با ایجاد یک مخزن بزرگ پشت سد، امکان ذخیره‌سازی انرژی و تولید برق مطابق با نیاز شبکه را فراهم می‌کنند؛ نیروگاه‌های جریانی روزمینی (Run-of-River)که وابستگی کمتری به مخزن بزرگ دارند و بیشتر از جریان طبیعی رودخانه استفاده می‌کنند؛ و نیروگاه‌های ذخیره‌ای پمپ‌تاپی که به‌عنوان باتری‌های بزرگ مقیاس شبکه عمل کرده و با پمپاژ آب به مخزن بالادست در زمان مازاد تولید و رهاسازی آن در زمان اوج مصرف، به تعادل شبکه کمک می‌کنند (Kumar & Katoch, ۲۰۱۵). مزیت کلیدی این فناوری، علاوه‌بر تجدیدپذیر

بودن، قابلیت ارائه‌ی خدمات ارزشمند جانبی به شبکه از جمله قدرت راکتیو، ذخیره‌سازی چرخشی و توانایی راه‌اندازی سریع برای پوشش نوسانات بار است که در کنار انرژی‌های متناوبی مانند باد و خورشید، نقشی حیاتی ایفا می‌کند (IHA, ۲۰۲۱). با این حال، توسعه و بهره‌برداری از نیروگاه‌های برق‌آبی همواره با چالش‌های مهمی همراه بوده است. از منظر زیست‌محیطی، احداث سدهای بزرگ می‌تواند منجر به تخریب اکوسیستم‌های آبی، قطع پیوستگی رودخانه‌ها (که تأثیر مخربی بر زیستگاه ماهی‌ها و رسوب‌گذاری دارد) و تغییر در کیفیت آب شود (Winemiller et al., ۲۰۱۶). از جنبه اجتماعی، پروژه‌های بزرگ‌مقیاس غالباً مستلزم جابجایی جمعیت محلی و تحت تأثیر قرار دادن معیشت جوامع وابسته به رودخانه است که می‌تواند مخالفت‌های گسترده‌ای را برانگیزد (Fearnside, ۲۰۱۶). افزون بر این، پدیده تغییر اقلیم به‌طور مستقیم عملکرد این نیروگاه‌ها را تهدید می‌کند. تغییر در الگوهای بارش و ذوب برف‌ها می‌تواند منجر به کاهش جریان آب در برخی حوضه‌های آبی و در نتیجه کاهش تولید انرژی شود، در حالی که افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حدی مانند سیلاب‌ها نیز ریسک عملیاتی و ایمنی سدها را افزایش می‌دهد (Turner et al., ۲۰۱۷). در برابر این چالش‌ها، راهکارهای نوآورانه‌ای در حال ظهور هستند. رویکردهای توسعه‌ی پایدارتر مانند طراحی و بهره‌برداری از نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک‌مقیاس با کمترین اثرات اجتماعی-زیست‌محیطی، و نیز نوسازی (بازتوانی) نیروگاه‌های موجود برای افزایش راندمان و انعطاف‌پذیری، از جمله این راهکارها هستند (Prasad et al., ۲۰۱۹). همچنین، ادغام فناوری‌های نوین مانند سامانه‌های فتوولتائیک شناور بر روی مخازن موجود (FPV) می‌تواند به افزایش تولید انرژی تجدیدپذیر بدون نیاز به احداث سازه‌های جدید و با استفاده از سطوح آبی موجود بینجامد (Sahu et al., ۲۰۱۶). از منظر مدیریت و بهره‌برداری، به‌کارگیری ابزارهای هوش مصنوعی و مدل‌سازی پیشرفته برای پیش‌بینی جریان آب، مدیریت مخزن بهینه و یکپارچه‌سازی با دیگر منابع انرژی در شبکه‌های هوشمند، پتانسیل افزایش چشمگیر ارزش این نیروگاه‌ها را دارد. بنابراین، آینده نیروگاه‌های برق‌آبی در گرو عبور از پارادایم سنتی صرفاً سازه‌محور و حرکت به‌سمت یک مدل یکپارچه، هوشمند و چندمنظوره است که هم‌زمان اهداف انرژی، آب، اقلیم و توسعه‌ی اجتماعی را مد نظر قرار دهد.

نیروگاه تولید برق

نیروگاه تولید برق به مجموعه‌ای از تأسیسات و تجهیزات اطلاق می‌شود که با تبدیل اشکال مختلف انرژی اولیه به انرژی الکتریکی، وظیفه تأمین پایه‌ای‌ترین نیاز زیرساخت‌های مدرن را بر عهده دارد. این تبدیل انرژی عموماً بر پایه قانون القای الکترومغناطیسی فارادی و با استفاده از یک ژنراتور دوار صورت می‌پذیرد، که برای چرخاندن روتور آن از یک توربین استفاده می‌شود. بر این اساس، نیروگاه‌ها عمدتاً بر اساس نوع انرژی اولیه‌ای که برای به حرکت درآوردن توربین‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، دسته‌بندی می‌شوند. نیروگاه‌های حرارتی که سهم عمده‌ای از تولید جهانی برق را تشکیل می‌دهند، با سوزاندن سوخت‌های فسیلی (زغال‌سنگ، گاز طبیعی، نفت) یا فرآیندهای هسته‌ای، آب را به بخار با فشار و دمای بالا تبدیل کرده و از انرژی جنبشی این بخار برای چرخاندن توربین‌های بخار استفاده می‌کنند (Thiel & Stark, ۲۰۲۱). در مقابل، نیروگاه‌های برق‌آبی (هیدروالکتریک) انرژی پتانسیل ذخیره‌شده در آب پشت سد یا انرژی جنبشی جریان آب رودخانه‌ها را مستقیماً به حرکت توربین‌های آبی تبدیل می‌نمایند. نیروگاه‌های گازی از احتراق مستقیم گاز طبیعی برای چرخاندن توربین‌های گازی بهره می‌برند و چرخه‌های ترکیبی با تلفیق توربین گازی و بخار، به راندمان بسیار بالاتری دست می‌یابند (Boyce, ۲۰۱۲). افزون بر این، فناوری‌های تولید برق از منابع تجدیدپذیر غیرقابل‌کنترل (متناوب) مانند نیروگاه‌های بادی (با استفاده از توربین‌های بادی) و نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی (با تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته از طریق اثر فتوولتائیک) به‌سرعت در حال گسترش هستند (IRENA, ۲۰۲۳). هر یک از این فناوری‌ها دارای ویژگی‌های عملیاتی متمایزی هستند: نیروگاه‌های هسته‌ای و برق‌آبی بزرگ مخزنی معمولاً برای تأمین بار پایه به‌کار می‌روند، در حالی که نیروگاه‌های گازی و چرخه ترکیبی به دلیل قابلیت راه‌اندازی و تغییر بار سریع‌تر، اغلب برای پوشش بار میانی و اوج استفاده می‌شوند. نیروگاه‌های بادی و خورشیدی نیز با توجه به وابستگی به منابع متغیر طبیعت، تولید متناوبی دارند. عملکرد

بهینه یک سیستم قدرت مدرن، مستلزم هماهنگی پیچیده بین این نیروگاه‌ها در قالب بازار برق و با استفاده از مراکز کنترل است تا تعادل لحظه‌ای بین تولید و مصرف برقار برقرار شود. پارامترهای کلیدی در ارزیابی نیروگاه‌ها شامل راندمان تبدیل، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تولید هر کیلووات‌ساعت برق، قابلیت اطمینان، زمان راه‌اندازی و همچنین اثرات زیست‌محیطی آن‌ها (مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها) است. امروزه، تحولات فناورانه، نیروگاه‌های تولید برق را وارد عصر جدیدی کرده است. توسعه نیروگاه‌های مبتنی بر پیل سوختی، پیشرفت در فناوری‌های جذب و ذخیره کربن برای نیروگاه‌های فسیلی، افزایش ظرفیت و کاهش هزینه‌های نیروگاه‌های تجدیدپذیر، و یکپارچه‌سازی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ (باتری‌ها) و نیروگاه‌های مجازی، از جمله مهم‌ترین روندهای شکل‌دهنده به آینده این صنعت هستند.

انواع نیروگاه های تولید برق

انواع نیروگاه‌های تولید برق را می‌توان بر اساس منبع انرژی اولیه و فناوری تبدیل، به دسته‌های اصلی زیر تقسیم‌بندی کرد. نیروگاه‌های حرارتی (Thermal Power Plants) متداول‌ترین نوع هستند که با سوزاندن سوخت‌های فسیلی یا استفاده از انرژی هسته‌ای، گرمای تولید شده را برای تبدیل آب به بخار و به حرکت درآوردن توربین‌های بخار به کار می‌گیرند. این دسته شامل نیروگاه‌های زغال‌سوز، گازسوز، دوگانه‌سوز و هسته‌ای می‌شود. نیروگاه‌های هسته‌ای با استفاده از فرآیند شکافت هسته‌ای در راکتور، گرما تولید می‌کنند (Emerson et al., ۲۰۲۲). نیروگاه‌های گازی (Gas Turbine Plants)، که اغلب با گاز طبیعی کار می‌کنند، در آن‌ها احتراق مستقیم سوخت، توربین گازی را می‌چرخاند. نیروگاه‌های چرخه ترکیبی (Combined Cycle Power Plants- CCPP) با ترکیب یک سیکل توربین گازی و یک سیکل توربین بخار (با استفاده از حرارت تلف‌شده از اگزوز توربین گازی) به راندمان‌های بالاتر از ۶۰ درصد دست می‌یابند (Boyce, ۲۰۱۲). نیروگاه‌های برق‌آبی (Hydropower Plants) انرژی پتانسیل یا جنبشی آب را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند و خود به انواع مخزنی (ذخیره‌ای)، جریانی (روزمینی) و ذخیره‌ای پمپ‌تاپی تقسیم می‌شوند (IHA, ۲۰۲۱). نیروگاه‌های تجدیدپذیر متناوب شامل نیروگاه‌های بادی هستند که انرژی جنبشی باد را توسط توربین‌های بادی به برق تبدیل می‌کنند و در دو نوع خشکی و دریایی توسعه یافته‌اند (GWEC, ۲۰۲۳). نیروگاه‌های فتوولتائیک خورشیدی (PV) از اثر فتوولتائیک در سلول‌های نیمه‌هادی برای تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته استفاده می‌کنند (Haegel et al., ۲۰۱۹). نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی (CSP) با متمرکز کردن پرتوهای خورشید برای تولید گرمای با دمای بالا و به‌کارگیری یک سیکل توربین بخار کار می‌کنند. نیروگاه‌های زیست‌توده (Biomass) با سوزاندن مواد آلی یا استفاده از گازهای حاصل از تخمیر (بیوگاز) انرژی تولید می‌کنند. نیروگاه‌های زمین‌گرمایی (Geothermal) از حرارت زیر پوسته زمین برای تولید بخار و چرخاندن توربین بهره می‌برند. نیروگاه‌های انرژی اقیانوسی که از انرژی جزر و مد، امواج یا گرادیان حرارتی دریا استفاده می‌کنند، در مراحل تجاری‌سازی اولیه هستند. علاوه‌بر این، فناوری‌های نوظهور دیگری مانند پیل‌های سوختی (Fuel Cells) که از طریق واکنش شیمیایی هیدروژن و اکسیژن برق تولید می‌کنند، و نیز سیستم‌های هیبریدی که ترکیبی از چند فناوری (مانند خورشیدی-دیزلی یا بادی-ذخیره‌ساز) هستند، در حال گسترش می‌باشند. انتخاب و بهره‌برداری از هر یک از این نیروگاه‌ها به عواملی مانند دسترسی به منبع انرژی اولیه، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، ملاحظات زیست‌محیطی و الزامات فنی شبکه برق بستگی دارد.

نیروگاه برق‌آبی

نیروگاه برق‌آبی (هیدروالکتریک) با بهره‌گیری از انرژی پتانسیل ذخیره‌شده در آب پشت یک سد یا انرژی جنبشی جریان آب رودخانه‌ها، یکی از بزرگ‌ترین و قدیمی‌ترین منابع تولید برق تجدیدپذیر در جهان است. اساس کار این نیروگاه‌ها بر تبدیل انرژی موقعیتی آب به انرژی مکانیکی و سپس الکتریکی استوار است: آب از ارتفاعی معین رها شده و با برخورد به پره‌های یک توربین آبی

(مانند توربین‌های فرانسیس، کاپلان یا پلتون)، آن را به چرخش درمی‌آورد و چرخش توربین نیز از طریق شفت به یک ژنراتور الکتریکی منتقل شده و برق تولید می‌شود (Kumar & Katoch, ۲۰۱۵). این نیروگاه‌ها عمدتاً در سه نوع اصلی طبقه‌بندی می‌شوند: نیروگاه‌های مخزنی (ذخیره‌ای) که با احداث سد، دریاچه‌ای مصنوعی ایجاد کرده و امکان ذخیره‌سازی آب و تولید برق در زمان مورد نیاز (حتی در ساعات اوج مصرف) را فراهم می‌کنند. نیروگاه‌های جریانی روزمینی (Run-of-River) که وابستگی کمتری به مخزن بزرگ داشته و عمدتاً از انرژی جنبشی جریان طبیعی رودخانه استفاده می‌کنند و تأثیر کمتری بر محیط زیست می‌گذارند، اما تولید آن‌ها به دبی لحظه‌ای رودخانه وابسته است. نیروگاه‌های ذخیره‌ای پمپ‌تاپی که در واقع نوعی سیستم ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بزرگ هستند؛ در زمان مازاد تولید برق در شبکه (مثلاً در ساعات کم‌باری)، آب از مخزن پایین‌دست به مخزن بالادست پمپ شده و در زمان اوج مصرف، این آب رها شده و برق تولید می‌کند (IHA, ۲۰۲۱). نیروگاه‌های برق‌آبی مزایای متعددی دارند: تولید برق بدون انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای در حین بهره‌برداری، طول عمر بسیار طولانی (بیش از ۵۰ تا ۱۰۰ سال)، هزینه عملیاتی و نگهداری نسبتاً پایین، قابلیت راه‌اندازی سریع برای پاسخ به نوسانات شبکه و ارائه خدمات جانبی حیاتی مانند کنترل سیلاب، تأمین آب کشاورزی و شرب، و توسعه آبیاری (Zarfl et al., ۲۰۱۵). با این حال، معایب و چالش‌های قابل توجهی نیز وجود دارد: ساخت سدهای بزرگ می‌تواند موجب جابجایی گسترده جوامع محلی، تخریب اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و قطع پیوستگی رودخانه (مانع مهاجرت ماهی‌ها و انتقال رسوب) شود (Winemiller et al., ۲۰۱۶). همچنین در برخی مناطق گرمسیری، تجزیه مواد آلی در مخزن سد ممکن است منجر به انتشار مقادیر قابل توجهی از گاز متان (یک گاز گلخانه‌ای قوی) گردد. علاوه‌بر این، عملکرد این نیروگاه‌ها به‌طور جدی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و تغییر الگوهای هیدرولوژیکی است؛ کاهش بارش و خشکسالی‌های طولانی‌مدت می‌تواند ظرفیت تولید را به‌شدت کاهش دهد (Turner et al., ۲۰۱۷). امروزه روندهای نوین در این صنعت شامل نوسازی و بازتوانی نیروگاه‌های قدیمی برای افزایش راندمان و ظرفیت، توسعه طرح‌های برق‌آبی کوچک‌مقیاس با اثرات محیط زیستی کمتر، و ادغام با دیگر فناوری‌ها مانند سیستم‌های فتوولتائیک شناور روی مخازن موجود برای بهینه‌سازی استفاده از زمین و آب است (Prasad et al., ۲۰۱۹). بنابراین، آینده پایدار صنعت برق‌آبی در گرو توسعه مسئولانه‌ی پروژه‌های جدید با کمترین اثرات منفی و تطبیق بهره‌برداری از تأسیسات موجود با شرایط متغیر هیدرولوژیکی و الزامات محیط زیستی است.

تجهیزات این نیروگاه‌ها

تجهیزات نیروگاه‌های برق‌آبی را می‌توان در دو بخش عمده تجهیزات هیدرولیک و تجهیزات الکترومکانیکال دسته‌بندی کرد. در بخش هیدرولیک، سد (یا بند انحراف در نیروگاه‌های جریانی) به‌عنوان سازه اصلی برای ذخیره یا انحراف آب عمل می‌کند. مخزن (دریاچه پشت سد) وظیفه ذخیره‌سازی انرژی پتانسیل را بر عهده دارد. دریچه‌ها (Gates) و سرریزها (Spillways) برای کنترل جریان آب، مدیریت سیلاب و تنظیم سطح مخزن به‌کار می‌روند. تونل‌های آب‌بَر (Penstocks) که لوله‌های فشار قوی و اغلب فولادی هستند، آب را از مخزن یا محل انحراف به‌سمت توربین هدایت می‌کنند. در برخی نیروگاه‌های بزرگ، یک حوضچه آرامش (Surge Tank) نیز در مسیر پنستاک نصب می‌شود تا از ایجاد ضربه قوچ (Water Hammer) در هنگام تغییرات ناگهانی بار جلوگیری کند (Berga et al., ۲۰۰۶). تجهیزات الکترومکانیکال هسته اصلی تبدیل انرژی هستند که شامل توربین آبی می‌شود. توربین‌های اصلی شامل توربین‌های عکس‌العملی مانند فرانسیس (برای ارتفاع متوسط)، کاپلان یا پروپلر (برای ارتفاع کم و دبی بالا) و توربین‌های ضربه‌ای مانند پلتون (برای ارتفاع بسیار زیاد) هستند. توربین به یک ژنراتور سنکرون کوپل شده است که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سیستم کنترل گاورنر (Governor) سرعت چرخش توربین-ژنراتور را به‌طور دقیق تنظیم می‌کند. ترانسفورماتور پست نیروگاه ولتاژ خروجی ژنراتور را برای انتقال در خطوط فشارقوی افزایش می‌دهد. سیستم‌های خنک‌کننده (هوا یا آب) برای ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم‌های روغن‌کاری برای یاتاقان‌ها (آتشه‌ها) و گیربکس (در صورت وجود)، و سیستم‌های کنترل و حفاظت الکتریکی پیشرفته (شامل رله‌های حفاظتی، سیستم‌های SCADA و کنترل‌کننده‌های منطق برنامه‌پذیر PLC) از دیگر

اجزای حیاتی هستند (Lund, ۲۰۱۵). در نیروگاه‌های پمپ‌تاپی، علاوه بر تجهیزات فوق، ماشین‌های دوکاره (توربین-پمپ) و موتور-ژنراتورهای دوکاره وجود دارند که می‌توانند در هر دو جهت چرخش (برای تولید یا پمپاژ) عمل کنند. برای مدیریت جریان آب برگشتی، کانال یا تونل تاخور (Tailrace) آب خروجی از توربین را به رودخانه پایین‌دست بازمی‌گرداند. همچنین، سیستم‌های مکانیکی مانند جرثقیل‌های سنگین برای نصب و تعمیرات، سیستم‌های تصفیه آب (برای مصارف خنک‌کنندگی و آشامیدنی) و تأسیسات کمکی (Auxiliaries) برق فشار ضعیف برای روشنایی و تجهیزات کنترل، جزئی ضروری از نیروگاه هستند. طراحی و انتخاب این تجهیزات به پارامترهای هیدرولوژیکی سایت (دبی، ارتفاع، رسوب) و نیازمندی‌های شبکه برق بستگی دارد.

مزایای نیروگاه‌های برق‌آبی

مزایای نیروگاه‌های برق‌آبی را می‌توان به شرح زیر و با استناد به منابع معتبر فهرست نمود:

۱. تولید برق تجدیدپذیر و پاک: در حین بهره‌برداری، هیچ‌گونه آلاینده هوا یا گاز گلخانه‌ای (مانند دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن یا دی‌اکسید گوگرد) مستقیماً منتشر نمی‌کنند و بنابراین سهم مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود کیفیت هوا دارند (IPCC, ۲۰۱۲).

۲. ذخیره‌سازی انرژی و انعطاف‌پذیری بالا: نیروگاه‌های مخزنی و به‌ویژه نوع پمپ‌تاپی، قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس بسیار بزرگ و پاسخ سریع به نوسانات بار شبکه را دارا هستند. این ویژگی، آن‌ها را به ابزاری حیاتی برای یکپارچه‌سازی منابع انرژی متناوب مانند باد و خورشید تبدیل می‌کند (IHA, ۲۰۲۱).

۳. راندمان تبدیل انرژی بالا: نیروگاه‌های برق‌آبی مدرن از بالاترین راندمان تبدیل انرژی در میان تمام فناوری‌های تولید برق برخوردارند که می‌تواند به بیش از ۹۰٪ برسد، در حالی که این رقم برای نیروگاه‌های حرارتی معمولاً بین ۳۵٪ تا ۶۰٪ است (Kumar & Katoch, ۲۰۱۵).

۴. طول عمر عملیاتی بسیار طولانی: عمر مفید این نیروگاه‌ها بسیار طولانی (بین ۵۰ تا ۱۰۰ سال یا بیشتر) است که در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی یا هسته‌ای مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌باشد (Zarfl et al., ۲۰۱۵).

۵. هزینه عملیاتی و نگهداری نسبتاً پایین: پس از احداث، هزینه سوخت وجود ندارد و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از نیروگاه‌های وابسته به سوخت است (IRENA, ۲۰۲۱).

۶. قابلیت اطمینان و پایداری در تأمین برق: این نیروگاه‌ها (به‌ویژه نوع مخزنی) قادر به تولید پایدار و قابل برنامه‌ریزی برق (بار پایه) و همچنین پاسخگویی به بار پیک هستند که ثبات شبکه را افزایش می‌دهد.

۷. ارائه خدمات چندمنظوره: سدهای مرتبط با نیروگاه‌های برق‌آبی اغلب منافع چندگانه‌ای فراتر از تولید برق ارائه می‌دهند که شامل کنترل و مهار سیلاب، تأمین آب برای کشاورزی، صنعت و شرب، توسعه آبیاری، ایجاد مخازن پرورش ماهی و امکانات تفریحی می‌شود (Berga et al., ۲۰۰۶).

۸. منبع انرژی داخلی و افزایش امنیت انرژی: توسعه نیروگاه‌های برق‌آبی وابستگی به واردات سوخت‌های فسیلی را کاهش داده و امنیت انرژی ملی را افزایش می‌دهد.

معایب و چالش‌های نیروگاه‌های برق‌آبی

معایب و چالش‌های نیروگاه‌های برق‌آبی را می‌توان به شرح زیر و با استناد به منابع علمی فهرست نمود:

۱. تأثیرات منفی گسترده بر اکوسیستم‌های آبی: احداث سد باعث قطع پیوستگی رودخانه می‌شود که مهاجرت ماهی‌ها و دیگر آبزیان را مختل کرده و چرخه انتقال رسوبات طبیعی را برهم می‌زند. این امر می‌تواند منجر به فرسایش در پایین‌دست و تغییر کامل زیست‌بوم‌های رودخانه‌ای شود (Winemiller et al., ۲۰۱٦).

۲. جابجایی جمعیت محلی و پیامدهای اجتماعی: ساخت مخازن بزرگ اغلب مستلزم غرق‌شدن زمین‌های زراعی، مناطق مسکونی و اماکن فرهنگی-تاریخی است که به جابجایی اجباری جوامع محلی و از دست‌دادن معیشت آن‌ها می‌انجامد و مشکلات اجتماعی عمیقی ایجاد می‌کند (Fearnside, ۲۰۱٦).

۳. انتشار گازهای گلخانه‌ای از مخازن (در برخی مناطق): در مخازن مناطق گرمسیری، تجزیه مواد آلی در شرایط بی‌هوازی می‌تواند مقادیر قابل توجهی از گاز متان (CH_4) را که یک گاز گلخانه‌ای بسیار قوی است، تولید و منتشر کند (Deemer et al., ۲۰۱٦).

۴. وابستگی به شرایط هیدرولوژیکی و آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی: تولید انرژی این نیروگاه‌ها به‌طور کامل به میزان بارش و الگوهای جریان آب وابسته است. خشکسالی‌های طولانی‌مدت و تغییرات الگوی بارش ناشی از تغییر اقلیم، می‌تواند ظرفیت تولید را به‌طور چشمگیری کاهش دهد و قابلیت اطمینان آن را تحت‌تأثیر قرار دهد (Turner et al., ۲۰۱۷).

۵. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بسیار بالا و زمان ساخت طولانی: ساخت نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ‌مقیاس به سرمایه‌گذاری کلان، مطالعات پیچیده و زمان ساخت چندین ساله (اغلب بیش از یک دهه) نیاز دارد که ریسک‌های مالی و اجرایی قابل توجهی به همراه دارد (Ansar et al., ۲۰۱٤).

۶. خطر بالقوه ناشی از شکست سد: سدهای بزرگ در صورت بروز نقص طراحی، ساخت یا در مواجهه با رویدادهای حدی فراتر از توان طراحی (مانند سیلاب‌های بسیار بزرگ یا زمین‌لرزه)، می‌توانند شکسته شوند و فاجعه‌ای انسانی و زیست‌محیطی در پایین‌دست ایجاد کنند.

۷. تغییر در کیفیت آب: آب‌های راکد در مخازن ممکن است دچار کاهش کیفیت (مانند کاهش اکسیژن محلول، افزایش شوری و تغذیه‌گرایی) شوند که بر مصارف پایین‌دست تأثیر می‌گذارد.

۸. چالش رسوب‌گذاری در مخزن: رسوباتی که در مخزن جمع می‌شوند، ظرفیت ذخیره‌سازی و در نهایت بازده نیروگاه را به‌مرور زمان کاهش داده و هزینه‌های سنگین لایروبی را تحمیل می‌کنند.

۹. محدودیت جغرافیایی برای توسعه: مکان‌های ایده‌آل برای احداث نیروگاه برق‌آبی از نظر توپوگرافی و پتانسیل هیدرولوژیکی محدود هستند و بسیاری از بهترین مکان‌ها در جهان قبلاً توسعه یافته‌اند.

محدودیت‌های نیروگاه‌های برق‌آبی

محدودیت‌های نیروگاه‌های برق‌آبی را می‌توان به شرح زیر و با استناد به منابع علمی فهرست نمود:

۱. محدودیت ذاتی جغرافیایی و مکانیابی: توسعه این نیروگاه‌ها منوط به وجود شرایط خاص توپوگرافی (شیب مناسب، دره‌های عمیق) و هیدرولوژیکی (دبی و ریزش سالانه کافی آب) است. مکان‌های ایده‌آل از این نظر در جهان محدود هستند و بسیاری از آن‌ها قبلاً مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند (Zarfl et al., ۲۰۱۵).

۲. وابستگی شدید به الگوهای بارش و آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی: این نیروگاه‌ها به‌طور کامل به نوسانات طبیعی و تغییرات بلندمدت در میزان بارش، ذوب برف و الگوهای جریان رودخانه وابسته هستند. خشکسالی‌های طولانی‌مدت ناشی از تغییر اقلیم می‌تواند به‌طور جدی تولید انرژی را کاهش داده و حتی در مواردی متوقف کند، بنابراین قابلیت اطمینان آن به‌عنوان یک منبع پایه در بلندمدت می‌تواند تحت‌تأثیر قرار گیرد (Turner et al., ۲۰۱۷).

۳. محدودیت‌های اجتماعی و سیاسی: پروژه‌های بزرگ برق‌آبی به دلیل جابجایی جمعیت، زیر آب بردن زمین‌های کشاورزی و میراث فرهنگی، اغلب با مخالفت جوامع محلی و سازمان‌های مردمنهاد مواجه می‌شوند. کسب مجوز اجتماعی (Social License to

(Operate) و رفع تعارضات می‌تواند فرآیندی طولانی و پیچیده باشد که توسعه را به تأخیر انداخته یا متوقف کند (Fearnside, ۲۰۱۶).

۴. محدودیت‌های مالی و اقتصادی: این پروژه‌ها نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بسیار سنگین، دوره ساخت طولانی (اغلب بیش از یک دهه) و نرخ بازگشت سرمایه بلندمدت دارند. این موضوع جذب سرمایه‌گذاران خصوصی را دشوار می‌سازد و اغلب نیازمند تضمین‌های دولتی یا تأمین مالی از سوی نهادهای بین‌المللی است (Ansar et al., ۲۰۱٤).

۵. محدودیت‌های زیست‌محیطی و قانونی: امروزه قوانین سختگیرانه‌ای در زمینه ارزیابی اثرات زیست‌محیطی (EIA)، حفظ تنوع زیستی و حقابه‌های محیط زیستی پایین‌دست وجود دارد. رعایت این قوانین می‌تواند هزینه‌ها را افزایش داده، طرح‌ها را اصلاح کند یا حتی از اجرای برخی پروژه‌ها جلوگیری نماید (Winemiller et al., ۲۰۱٦).

۶. محدودیت در انتقال توان: بسیاری از پتانسیل‌های عالی برق‌آبی در مناطق دورافتاده و کوهستانی قرار دارند که فاصله زیادی از مراکز اصلی مصرف برق دارند. این امر نیازمند سرمایه‌گذاری سنگین و اضافی در خطوط انتقال فشارقوی طولانی است که هم هزینه‌ها را افزایش می‌دهد و هم تلفات انتقال را به همراه دارد.

۷. محدودیت فنی مرتبط با رسوبات: در حوضه‌های آبی با بار رسوبی بالا، انباشت تدریجی رسوبات در مخزن، حجم مفید ذخیره آب و در نتیجه ظرفیت تولید انرژی را کاهش می‌دهد. عملیات لایروبی نیز بسیار پرهزینه و فنی است.

۸. محدودیت در ظرفیت نصب: حتی در یک مکان ایده‌آل، ظرفیت نهایی نیروگاه توسط پارامترهای فیزیکی مانند حداکثر ارتفاع سد، دبی قابل تنظیم رودخانه و ابعاد دره کاملاً محدود می‌شود و امکان توسعه نامحدود وجود ندارد.

جدول ۱: مزایای نیروگاه‌های برق‌آبی

مزیت	شرح
منبع انرژی تجدیدپذیر و پاک	در حین بهره‌برداری انتشار مستقیم گازهای گلخانه‌ای یا آلاینده‌های هوا ندارد (IPCC, ۲۰۱۲).
انعطاف‌پذیری عملیاتی و ذخیره‌سازی انرژی	نیروگاه‌های مخزنی و پمپ‌تابی می‌توانند سریعاً پاسخگوی نوسانات شبکه بوده و انرژی را در مقیاس بزرگ ذخیره کنند (IHA, ۲۰۲۱).
راندمان تبدیل انرژی بسیار بالا	راندمان تبدیل انرژی در نیروگاه‌های مدرن می‌تواند از ۹۰٪ فراتر رود (Kumar & Katoch, ۲۰۱۵).
طول عمر عملیاتی طولانی	عمر مفید اغلب بیش از ۵۰ تا ۱۰۰ سال است که از نظر اقتصادی جذابیت دارد (Zarfl et al., ۲۰۱۵).
هزینه عملیاتی و نگهداری پایین	پس از احداث، هزینه سوخت وجود ندارد و هزینه‌های جاری نسبتاً کم است (IRENA, ۲۰۲۱).
قابلیت اطمینان در تولید بار پایه و پیک	امکان تولید پایدار و برنامه‌ریزی‌شده (بار پایه) و نیز پاسخ به تقاضای اوج مصرف را فراهم می‌کند.
خدمات چندمنظوره	فراتر از تولید برق، فوایدی مانند کنترل سیل، تأمین آب کشاورزی و شرب، توسعه آبیاری و گردشگری ارائه می‌دهد (Berga et al., ۲۰۰٦).
کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی	به افزایش امنیت انرژی ملی از طریق بهره‌گیری از یک منبع داخلی کمک می‌کند.

جدول ۲: معایب و چالش‌های نیروگاه‌های برق‌آبی

معایب/چالش‌ها	شرح
تخریب اکوسیستم‌های آبی	قطع پیوستگی رودخانه، اختلال در مهاجرت ماهی‌ها و چرخه رسوب، تغییر زیست‌بوم‌های رودخانه‌ای (Winemiller et al., ۲۰۱٦).

جابجایی جمعیت و مشکلات اجتماعی	زیر آب رفتن زمین‌ها و سکونتگاه‌ها منجر به جابجایی اجباری و از دست‌دادن معیشت جوامع محلی می‌شود (Fearnside, ۲۰۱٦).
انتشار گازهای گلخانه‌ای از مخازن	در مخازن مناطق گرمسیری، تجزیه مواد آلی می‌تواند منجر به انتشار متان (CH_4) قابل توجهی شود (Deemer et al., ۲۰۱٦).
آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی	تغییر الگوهای بارش و خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت می‌تواند ظرفیت تولید را به‌شدت کاهش دهد (Turner et al., ۲۰۱۷).
هزینه و زمان ساخت بسیار بالا	نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه کلان و دوره ساخت طولانی (اغلب بیش از یک دهه) است (Ansar et al., ۲۰۱٤).
خطر بالقوه شکست سد	نقص طراحی، ساخت یا رویدادهای حدی می‌توانند منجر به شکست فاجعه‌بار سد شوند.
تغییر کیفیت آب و رسوب‌گذاری	راکد شدن آب می‌تواند کیفیت آن را کاهش دهد و انباشت رسوبات ظرفیت مخزن و تولید را کم می‌کند.
محدودیت مکانیابی مناسب	مکان‌های ایده‌آل از نظر توپوگرافی و هیدرولوژی محدود هستند.

جدول ۳: محدودیت‌های نیروگاه‌های برق‌آبی

محدودیت	شرح
محدودیت جغرافیایی و مکانیابی	وابستگی شدید به شرایط خاص توپوگرافی و هیدرولوژیکی؛ مکان‌های ایده‌آل محدود و بسیاری توسعه یافته‌اند (Zarfl et al., ۲۰۱۵).
وابستگی به شرایط آب‌وهوایی و تغییر اقلیم	تولید به نوسانات بارش وابسته است و در بلندمدت تحت‌تأثیر تغییرات اقلیمی قرار می‌گیرد (Turner et al., ۲۰۱۷).
محدودیت‌های اجتماعی-سیاسی	مخالفت جوامع محلی و چالش کسب مجوز اجتماعی می‌تواند توسعه را متوقف یا به تأخیر اندازد (Fearnside, ۲۰۱٦).
محدودیت مالی و اقتصادی	نیاز به سرمایه اولیه سنگین و دوره بازگشت طولانی، جذب سرمایه خصوصی را دشوار می‌سازد (Ansar et al., ۲۰۱٤).
محدودیت‌های قانونی و زیست‌محیطی	قوانین سختگیرانه ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و حقابه‌های محیط زیستی، توسعه را پرهزینه‌تر و پیچیده‌تر می‌کند (Winemiller et al., ۲۰۱٦).
محدودیت در انتقال توان	پتانسیل‌های دورافتاده نیاز به خطوط انتقال فشارقوی طولانی و پرهزینه دارند.
محدودیت فنی ناشی از رسوبات	کاهش تدریجی ظرفیت مخزن و تولید بر اثر رسوب‌گذاری و هزینه‌های سنگین لایروبی.
محدودیت فیزیکی در ظرفیت نصب	ظرفیت نهایی توسط پارامترهای فیزیکی سایت (ارتفاع، دبی، ابعاد دره) محدود می‌شود.

جدول ۴: بهترین اماکن جغرافیایی جهان برای احداث نیروگاه‌های برق‌آبی و شرایط مرتبط

منطقه/کشور	شرایط هیدرولوژیکی و توپوگرافی کلیدی	پتانسیل و وضعیت فعلی	چالش‌های خاص منطقه‌ای
حوزه آمازون (برزیل، پرو، کلمبیا)	دبی آب بسیار بالا (بزرگ‌ترین سیستم رودخانه‌ای جهان)، بارش فراوان. توپوگرافی نسبتاً مسطح در بخش‌های وسیعی از برزیل، اما دارای مناطق با شیب مناسب در کوهستان‌های آند (سرچشمه رودخانه‌ها).	پتانسیل نظری بسیار عالی. برزیل دومین ظرفیت نصب شده برق‌آبی جهان را دارد (بیش از ۱۰۰ گیگاوات). پروژه‌های عظیمی مانند سد ایتایپو و بلیو مونته.	تخریب شدید جنگل‌های بارانی و تنوع زیستی، انتشار گاز متان از مخازن در مناطق گرمسیری، جابجایی جوامع بومی، مقاومت اجتماعی و زیست‌محیطی گسترده (Fearnside, ۲۰۱۶).
حوزه کنگو (جمهوری دموکراتیک کنگو)	دبی عظیم (دومین رودخانه جهان از نظر دبی)، بارش بالا، وجود شکل‌گیری‌های زمین‌شناسی خاص	پتانسیل نظری بزرگ‌ترین در جهان (حدود ۱۰۰۰ گیگاوات)، اما کمتر از ۳٪ آن توسعه یافته است. پروژه	بی‌ثباتی سیاسی و امنیتی، فقدان شدید زیرساخت، چالش‌های مالی کلان، حفظ اکوسیستم منحصربه‌فرد.

	(مانند آبشارهای اینگا) که اختلاف ارتفاع طبیعی ایده‌آلی ایجاد می‌کنند.	پیشنهادی گرند اینگا می‌تواند بزرگترین نیروگاه جهان باشد.	
هیمالیا (چین، نپال، بوتان، هند)	اختلاف ارتفاع بسیار زیاد (از فلات تبت تا دشت‌ها)، ذخیره‌سازی طبیعی برف و یخچال‌ها به‌عنوان منبع آب تجدیدپذیر فصلی. رودخانه‌های بزرگ مانند یانگتسه، زرد، مکونگ، سند و گنگ.	چین بزرگ‌ترین ظرفیت نصب شده برق‌آبی جهان را دارد (بیش از ۳۵۰ گیگاوات). پتانسیل عالی در نپال و بوتان که بخش عمده‌ای از آن توسعه نیافته.	خطر بالای زمین‌لرزه، آسیب‌پذیری بالا در برابر تغییر اقلیم (ذوب سریع یخچال‌ها و تغییر الگوهای بارش)، چالش‌های ساخت در زمین‌های دشوار، تنش‌های فرامرزی بر سر منابع آب (Grumbine & Pandit, ۲۰۱۳).
کوهستان‌های آلپ (سوئیس، اتریش، فرانسه، ایتالیا)	اختلاف ارتفاع زیاد در فاصله کوتاه، ذخایر آب یخچال‌های طبیعی و برف، دره‌های عمیق و باریک.	توسعه بسیار بالا و بهینه (نیروگاه‌های ذخیره‌ای پمپ‌تاپی نقش کلیدی در شبکه اروپا دارند). تمرکز بر نوسازی و افزایش راندمان.	حساسیت بالای اکوسیستم آلپ، مخالفت‌های محلی نسبت به توسعه بیشتر، تأثیر تغییر اقلیم بر منابع برف و یخ.
منطقه اسکاندیناوی (نروژ، سوئد)	فراوانی دریاچه‌های طبیعی و رودخانه‌های پرآب، توپوگرافی مناسب، بارش نسبتاً زیاد.	نروژ نزدیک به ۹۰٪ از برق خود را از نیروگاه‌های برق‌آبی تامین می‌کند. توسعه عمدتاً کامل شده و تمرکز بر مدیریت و بهینه‌سازی است.	حفظ ماهی‌های آزاد (Salmon) و اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، محدودیت برای توسعه بیشتر در مناطق بکر.
آمریکای شمالی (حوضه کلمبیا در آمریکا/کانادا، کانادا)	رودخانه‌های بزرگ با جریان قابل تنظیم (مانند کلمبیا، میسی‌سیپی)، دریاچه‌های بزرگ، مناطق کوهستانی (راکی، کاسکید).	کانادا سومین ظرفیت نصب شده جهانی را دارد. سیستم‌های یکپارچه بزرگ مانند حوضه کلمبیا. توسعه عمدتاً کامل و تمرکز بر بازتوانی.	مخالفت‌های گسترده زیست‌محیطی برای پروژه‌های جدید (مخصوصاً در مورد ماهی‌های آزاد)، مسائل حقوق آب‌های فرامرزی، کهنگی بخشی از ناوگان.
جنوب شرق آسیا (حوضه مکونگ: لائوس، ویتنام، کامبوج)	دبی بالا (رودخانه مکونگ)، فصل باران‌های موسمی مشخص، مناطق کوهستانی.	لائوس در حال تبدیل شدن به "باتری آسیای جنوب شرقی" با توسعه گسترده (عمدتاً برای صادرات برق).	تأثیر شدید بر شیلات و امنیت غذایی پایین‌دست (مثل دلتای مکونگ در ویتنام)، تنش‌های فرامرزی، جابجایی جوامع (Winemiller et al., ۲۰۱۶).

راندمان نیروگاه‌های برق‌آبی

راندمان نیروگاه‌های برق‌آبی در بین فناوری‌های تبدیل انرژی، جزو بالاترین‌ها محسوب می‌شود. این راندمان در سطوح مختلفی تعریف و اندازه‌گیری می‌شود:

۱. راندمان توربوژنراتور (دستگاه‌های تبدیل انرژی مکانیکی به الکتریکی):

این بخش، بالاترین راندمان را داراست. توربین‌های آبی مدرن (فرانسیس، کاپلان، پلتون) می‌توانند راندمان مکانیکی بالای ۹۵٪ داشته باشند، به این معنی که بیش از ۹۵٪ از انرژی هیدرولیک آب را به انرژی مکانیکی چرخشی تبدیل می‌کنند. ژنراتورهای سنکرون بزرگ نیز راندمان الکتریکی در محدوده ۹۶-۹۸٪ دارند. در نتیجه، راندمان کلی مجموعه توربوژنراتور (تبدیل انرژی آب به برق در پست ژنراتور) معمولاً بین ۹۰٪ تا ۹۵٪ است و در برخی نیروگاه‌های بسیار بهینه‌شده حتی از ۹۵٪ نیز فراتر می‌رود (Kumar & Katoch, ۲۰۱۵).

۲. راندمان کل نیروگاه (از مخزن تا خروجی شبکه):

این راندمان که عددی واقع‌بینانه‌تر ارائه می‌دهد، تمام تلفات سیستم را در نظر می‌گیرد. این تلفات شامل موارد زیر است:

تلفات هیدرولیک در مسیر آب: شامل اصطکاک و اغتشاش در پنستاک، دریچه‌ها و محفظه حلزونی.

تلفات در سیستم‌های کمکی: انرژی مصرفی برای سیستم‌های خنک‌کننده، روغن‌کاری، کنترل و روشنایی نیروگاه.
تلفات ترانسفورماتور: جهت افزایش ولتاژ برای انتقال.
با احتساب این موارد، راندمان کلی نیروگاه‌های برق‌آبی معمولاً در محدوده ٪۸۵ تا ٪۹۰ قرار می‌گیرد که همچنان بسیار برتر از نیروگاه‌های حرارتی (٪۶۰-۳۵) و حتی نیروگاه‌های گازی چرخه ترکیبی پیشرفته (حدود ٪۶۳-۶۰) است (Paish, ۲۰۰۲).
۳. عوامل مؤثر بر راندمان:
راندمان یک نیروگاه ثابت نیست و تحت‌تأثیر عوامل عملیاتی زیر نوسان دارد:
دبی جریان آب: هر توربین در یک دامنه بهینه دبی طراحی شده است. عملکرد با دبی کمتر یا بیشتر از این محدوده بهینه، راندمان را کاهش می‌دهد.
هد (ارتفاع آب): تغییرات ارتفاع آب پشت سد (مخزن) نیز بر راندمان تأثیر مستقیم دارد. طراحی توربین برای یک هد نامی صورت گرفته است.
سن و وضعیت نگهداری تجهیزات: فرسودگی پره‌های توربین، سایش یاتاقان‌ها و کاهش بازده ژنراتور به مرور زمان راندمان را کم می‌کند. بازتوانی و نوسازی می‌تواند راندمان نیروگاه‌های قدیمی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد (Prasad et al., ۲۰۱۹).
نوع توربین: راندمان ذاتی انواع توربین متفاوت است. توربین‌های کاپلان (قابل تنظیم) در محدوده وسیع‌تری از دبی و هد راندمان بالا حفظ می‌کنند، در حالی که توربین‌های پلتون برای هدهای بسیار بالا بازدهی عالی دارند.
۴. مقایسه با دیگر فناوری‌ها:
نیروگاه‌های حرارتی (فسیلی/هسته‌ای): راندمان معمول ٪۴۰-۳۵ برای واحدهای بخاری و حداکثر ٪۶۰ برای چرخه ترکیبی گاز. بخش عمده انرژی به‌صورت حرارت تلف می‌شود.
توربین‌های بادی: راندمان تبدیل انرژی جنبشی باد به برق طبق حد بتز، حداکثر نظری ٪۵۹.۳ است و در عمل به ٪۵۰-۴۰ می‌رسد.
سلول‌های فتوولتائیک: راندمان تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته در ماژول‌های تجاری بین ٪۱۵ تا ٪۲۲ است.
نتیجه‌گیری: نیروگاه برق‌آبی با راندمان کلی تبدیل ٪۹۰-۸۵، کارآمدترین فناوری بزرگ‌مقیاس تولید برق است. این راندمان استثنایی، همراه با هزینه عملیاتی پایین و طول عمر طولانی، علی‌رغم چالش‌های زیست‌محیطی و سرمایه‌گذاری اولیه سنگین، همچنان جایگاه آن را به‌عنوان یک منبع انرژی حیاتی و کم‌کربن تثبیت کرده است.

تاریخچه پژوهش

پژوهش‌های آکادمیک در مورد نیروگاه‌های برق‌آبی را می‌توان به سه دوره کلان تقسیم‌بندی کرد که منعکس‌کننده تحول در پارادایم‌های علمی و اولویت‌های اجتماعی-زیست‌محیطی است. دوره اول (از اواخر قرن نوزدهم تا دهه ۱۹۶۰) عمدتاً بر مبانی هیدرودینامیک، طراحی سازه‌های هیدرولیک و بهینه‌سازی کارایی مکانیکی متمرکز بود. پژوهش‌های این عصر، پایه‌های طراحی توربین‌های کارآمد (فرانسیس، کاپلان، پلتون) و روش‌های تحلیل پایداری سدها را بنا نهاد و ماهیتی عمیقاً فنی-مهندسی داشت. با گسترش سریع پروژه‌های بزرگ سدسازی در میانه قرن بیستم، دوره دوم (دهه‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۹۰) آغاز شد که در آن، پژوهش‌ها به سمت مدل‌سازی هیدرولوژیکی پیشرفته، تحلیل سیستم‌های تولید چندمنظوره آب و برق، و ارزیابی اقتصادی پروژه‌های عظیم گرایش یافت. در این دوره، مطالعات کلانی مانند ارزیابی پتانسیل جهانی برق‌آبی توسط سازمان‌هایی مانند لوستروم انجام شد (Le Strat, ۱۹۸۶). با این حال، از اواخر دهه ۱۹۸۰ و به‌ویژه از دهه ۱۹۹۰ به بعد، همزمان با رشد جنبش‌های زیست‌محیطی و حقوق جوامع محلی، پارادایم پژوهشی به‌طور اساسی تغییر کرد و دوره سوم (از ۱۹۹۰ تاکنون) شکل گرفت. در این دوره، کانون توجه تحقیقات از "حداکثرسازی تولید انرژی" به‌سمت ارزیابی جامع تأثیرات اجتماعی-زیست‌محیطی و راه‌حل‌های فنی برای کاهش آن‌ها معطوف شد. موضوعاتی مانند ارزیابی اثرات قطع پیوستگی رودخانه‌ها بر اکوسیستم‌های آبی و جوامع ماهی‌گیری (Poff & Hart,

۲۰۰۲)، محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای از مخازن (Barros et al., ۲۰۱۱)، تحلیل هزینه-فایده اجتماعی-اقتصادی پروژه‌های بزرگ (Ansar et al., ۲۰۱٤) و راه‌کارهای کاهش مهاجرت ماهی‌ها به‌شدت مورد توجه قرار گرفتند. به موازات این تحول، از دهه ۲۰۰۰ به بعد، یک جریان پژوهگی قوی نیز به تأثیرات تغییر اقلیم بر عملکرد و قابلیت اطمینان آتی نیروگاه‌های برق‌آبی پرداخت و آسیب‌پذیری این سیستم‌ها در مقابل تغییر الگوهای هیدرولوژیکی را مورد تحلیل قرار داد (Hamududu & Killingtveit, ۲۰۱۲).
در سال‌های اخیر، خوشه‌های پژوهشی نوظهوری در حال شکل‌گیری هستند که بر ادغام فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی برای مدیریت بهینه مخزن، کاربرد سیستم‌های فتوولتائیک شناور روی مخازن (Sahu et al., ۲۰۱٦) و استراتژی‌های نوسازی و افزایش راندمان نیروگاه‌های موجود (Prasad et al., ۲۰۱۹) تمرکز دارند. با وجود این پیشینه غنی، شکاف پژوهشی آشکاری در مدل‌سازی یکپارچه و پویای تعاملات پیچیده بین ابعاد فنی، هیدرولوژیکی، اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی نیروگاه‌های برق‌آبی در مقیاس حوضه‌آبریز وجود دارد. این مقاله با شناسایی این شکاف، قصد دارد با رویکردی سیستماتیک و بین‌رشته‌ای به آن بپردازد.
مرور نظام‌مند پژوهش‌های پیشین در حوزه نیروگاه‌های برق‌آبی نشان می‌دهد که ادبیات موجود را می‌توان در چند محور پژوهشی اصلی طبقه‌بندی نمود. در محور بهینه‌سازی طراحی و عملکرد، مطالعات گسترده‌ای به مدل‌سازی هیدرولیکی و مکانیکی توربین‌ها برای افزایش راندمان در محدوده وسیع‌تری از دبی و هد پرداخته‌اند. برای نمونه، پژوهش‌ها بر روی طراحی پره‌های توربین فرانسیس با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای کاهش کاویتاسیون و تنش‌های خستگی متمرکز بوده‌اند (Muin & Zhou, ۲۰۲۱). در محور ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی، حجم قابل توجهی از تحقیقات به موضوع قطع پیوستگی رودخانه و راهکارهای کاهش آن اختصاص یافته است. مطالعات میدانی و مدل‌سازی‌های اکولوژیکی، اثربخشی راهکارهایی مانند پل‌کانی ماهی (Fish Ladders)، گذرگاه‌های مهاجرت و سیستم‌های هدایت ماهی را مورد سنجش قرار داده و نشان داده‌اند که موفقیت این سازه‌ها به شدت به گونه‌های ماهی و شرایط هیدرولیکی خاص محل وابسته است (Noonan et al., ۲۰۱۲). در زمینه انتشار گازهای گلخانه‌ای، مطالعات میدانی گسترده‌ای مانند تحقیق باروس و همکاران (۲۰۱۱) ارتباط معنی‌داری بین سن مخزن، عرض جغرافیایی و میزان انتشار کربن از مخازن را نشان داده‌اند و این باور قدیمی که نیروگاه‌های برق‌آبی کاملاً بدون انتشار هستند را به چالش کشیده‌اند. در حوزه تأثیر تغییرات اقلیمی، پژوهش‌های متعددی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی-اقلیمی (Hydro-climatic Models) به شبیه‌سازی اثرات سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر جریان رودخانه‌ها و در نتیجه تولید انرژی آتی نیروگاه‌ها پرداخته‌اند. این مطالعات عموماً حاکی از افزایش نوسانات و کاهش قابلیت اطمینان تولید در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه حوزه‌های متکی بر ذوب برف، است (Turner et al., ۲۰۱۷). محور پژوهشی مهم دیگر، اقتصاد و مدیریت پروژه است که در آن مطالعاتی مانند آنسر و همکاران (۲۰۱۴) با تحلیل تاریخی هزینه‌های پروژه‌های بزرگ سدسازی، نشان داده‌اند که این پروژه‌ها به‌طور سیستماتیک با تأخیرهای زمانبندی و هزینه‌های فراتر از بودجه اولیه مواجه می‌شوند. در زمینه فناوری‌های نوین و یکپارچه‌سازی، پژوهش‌های اخیر به بررسی پتانسیل سامانه‌های فتوولتائیک شناور بر روی مخازن موجود (FPV) برای افزایش تولید تجدیدپذیر بدون نیاز به زمین جدید و کاهش تبخیر از سطح مخزن پرداخته‌اند (Sahu et al., ۲۰۱٦). همچنین، مطالعاتی در حال بررسی امکان استفاده از باتری‌های جریان‌گذر (Flow Batteries) یا هیدروژن سبز در ترکیب با نیروگاه‌های پمپ‌تاپی برای افزایش قابلیت ذخیره‌سازی هستند. با وجود این حجم عظیم تحقیقات، یک شکاف مشهود، کمبود مطالعات سیستماتیک و چارچوب‌مند در زمینه ارزیابی تجمیعی (Cumulative Impact Assessment) پروژه‌های متعدد برق‌آبی در مقیاس یک حوضه آبریز بزرگ است که اثرات غیرخطی و ترکیبی آن‌ها را بر اکوسیستم و جامعه در بلندمدت تحلیل کند. علاوه‌بر این، پژوهش‌های کمتری به طراحی راهبردهای تطبیقی مدیریت مخزن

(Adaptive Reservoir Operation) تحت‌شرایط عدم قطعیت عمیق ناشی از تغییر اقلیم و نیازهای متغیر اجتماعی پرداخته‌اند. این مقاله با هدف پر کردن بخشی از این شکاف‌ها و ارائه یک تحلیل یکپارچه‌نگر نگاشته شده است.

داده‌ها و آنالیزها

بررسی داده‌های واقعی و آنالیزهای ارائه‌شده در مطالعات معتبر، ابعاد مختلف عملکرد و تأثیرات نیروگاه‌های برق‌آبی را روشن می‌سازد. از منظر تولید انرژی، داده‌های آژانس بین‌المللی انرژی تجدیدپذیر (IRENA) نشان می‌دهد که سهم نیروگاه‌های برق‌آبی در تولید برق جهانی در سال ۲۰۲۲ حدود ۴۲۶۰ تراوات‌ساعت بوده که ۱۵٪ از کل تولید برق و ۴۰٪ از تولید برق تجدیدپذیر را تشکیل می‌دهد (IRENA, ۲۰۲۳). در زمینه هزینه، تحلیل‌های همین منبع نشان می‌دهد هزینه سطح‌شده انرژی (LCOE) برای پروژه‌های برق‌آبی بزرگ‌مقیاس جدید در سال ۲۰۲۲ به‌طور متوسط ۰٫۰۴۳ دلار بر کیلووات‌ساعت بوده که در مقایسه با سایر فناوری‌های تجدیدپذیر (به‌استثنای فتوولتائیک در مناطق بسیار آفتابی) بسیار رقابتی است. با این حال، داده‌ها حاکی از کاهش سرمایه‌گذاری سالانه جدید در برق‌آبی از سال ۲۰۱۳ است که نشان‌دهنده تمرکز بر توسعه سایر منابع و چالش‌های توسعه پروژه‌های جدید است. در حوزه تأثیرات زیست‌محیطی، یک مطالعه متاآنالیز بر روی ۲۶۷ مخزن در سراسر جهان نشان داد که این مخازن سالانه حدود ۰٫۸ پتاگرم (میلیارد تن) معادل کربن دی‌اکسید به اتمسفر منتشر می‌کنند که حدود ۱٫۳٪ از انتشارات ناشی از فعالیت‌های انسانی است. این مطالعه تأیید کرد که مخازن مناطق گرمسیری جوان (کمتر از ۱۰ سال) بیشترین انتشار در واحد سطح را دارند (Deemer et al., ۲۰۱۶). آنالیز داده‌های ماهواره‌ای مربوط به سطح مخازن جهانی نیز نشان داده است که مخازن سدها بین سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵ حدود ۴۷ درصد از افزایش کلی سطح آب‌های شیرین در کره زمین را سبب شده‌اند که پیامدهای مهمی برای انتشار گاز و تبخیر دارد (Mulligan et al., ۲۰۲۰). از سوی دیگر، مطالعه‌ای بر روی بیش از ۲۴۰۰ گونه ماهی رودخانه‌ای در سطح جهان نتیجه گرفت که محدودیت در مهاجرت و کاهش کیفیت زیستگاه ناشی از سدها، مهم‌ترین تهدید برای تنوع ماهی‌های رودخانه‌ای است (Barbarossa et al., ۲۰۲۰). در زمینه تأثیر تغییر اقلیم، مدل‌سازی‌های انجام‌شده توسط هامودودو و کیلینگ‌تویت (۲۰۱۲) پیش‌بینی کرده‌اند که تغییر اقلیم می‌تواند پتانسیل برق‌آبی جهانی را تا سال ۲۰۵۰ بین ۳٫۶٪ کاهش یا ۶٫۱٪ افزایش دهد، اما این تغییر به‌شدت منطقه‌ای و نامتوازن خواهد بود؛ به‌طوری‌که مناطق معتدل (به دلیل افزایش بارش) ممکن است افزایش پتانسیل و مناطق خشک و نیمه‌خشک (مانند خاورمیانه و جنوب غربی آمریکا) کاهش چشمگیر پتانسیل را تجربه کنند. داده‌های عملکردی نیروگاه‌ها نیز گواه این آسیب‌پذیری است؛ برای نمونه، تحلیل داده‌های تاریخی تولید نیروگاه‌های برق‌آبی در کالیفرنیا طی دوره خشکسالی تاریخی ۲۰۱۶-۲۰۱۲ نشان داد که تولید سالانه برق تا ۶۶٪ در برخی نیروگاه‌ها نسبت به میانگین بلندمدت کاهش یافت (Gaudard et al., ۲۰۱۸). این داده‌ها و نتایج به‌وضوح دوگانگی ذاتی نیروگاه‌های برق‌آبی را به تصویر می‌کشند: از یک سو سهم حیاتی و کارآمد در تأمین انرژی پایدار و از سوی دیگر آسیب‌پذیری بالا در برابر تغییرات محیطی و هزینه‌های اجتماعی-زیست‌محیطی قابل توجه که مدیریت آینده‌نگر این صنعت را ضروری می‌سازد.

آنالیزهای عمیق‌تر بر روی داده‌های واقعی، لایه‌های پیچیده‌تری از عملکرد و اثرات نیروگاه‌های برق‌آبی را آشکار می‌سازد. مطالعه‌ای بر اساس داده‌های ۶۳۶۳ نیروگاه برق‌آبی در ۱۲۴ کشور نشان داد که میانگین جهانی ضریب ظرفیت (Capacity Factor) این نیروگاه‌ها حدود ۴۵٪ است که نسبت به نیروگاه‌های اتمی (۸۵٪+) پایین‌تر بوده و گویای وابستگی شدید به شرایط هیدرولوژیکی فصلی است. با این حال، این ضریب طیف وسیعی از ۲۰٪ تا بالای ۹۰٪ را در بر می‌گیرد که نشان‌دهنده تفاوت چشمگیر در مدیریت مخازن و پایداری منابع آب در مناطق مختلف است (Gernaat et al., ۲۰۱۷). در بعد اجتماعی-اقتصادی، آنالیز داده‌های تاریخی پروژه‌های سدسازی بزرگ نشان می‌دهد که ۹۶٪ از این پروژه‌ها از برنامه زمان‌بندی اولیه خود تأخیر داشته‌اند و میانگین افزایش هزینه‌ها نسبت به برآورد اولیه ۷۲٪ بوده است. این تأخیرها به‌طور متوسط ۲٫۳ سال و در برخی موارد به بیش از ۱۵ سال رسیده است که فشار مالی شدیدی بر اقتصاد کشورهای میزبان وارد کرده است (Ansar et al., ۲۰۱۴). از منظر اکوسیستمی، تحلیل‌های

مبتنی‌بر داده‌های ماهواره‌ای و نمونه‌برداری میدانی ثابت کرده است که حداقل ۱۶۵ گونه ماهی بزرگ رودخانه‌ای در سراسر جهان در معرض خطر انقراض قرار دارند که سدها یکی از عوامل اصلی این تهدید محسوب می‌شوند. این مطالعه همچنین نشان داد که رودخانه‌های آزاد (بدون سد) تنها ٪۳۷ از رودخانه‌های جهان با طول بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر را تشکیل می‌دهند (Grill et al., ۲۰۱۹). در زمینه انتشار گازهای گلخانه‌ای، داده‌های دقیق‌تر نشان می‌دهند که الگوی انتشار از مخازن پویا است؛ انتشار گاز متان (CH_4) در دهه اول آب‌گیری مخزن در مناطق گرمسیری می‌تواند تا ۳۶ برابر بیشتر از یک نیروگاه گازی با تولید انرژی مشابه باشد، هرچند این نرخ پس از بلوغ مخزن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (Deemer et al., ۲۰۱۶). از سوی دیگر، داده‌های عملکردی در برابر تغییر اقلیم هشداردهنده است؛ مدل‌سازی‌های پیشرفته نشان می‌دهند که تا سال ۲۰۵۰، تغییر اقلیم می‌تواند ظرفیت تولید نیروگاه‌های برق‌آبی را در کشورهای حوزه مدیترانه (مانند اسپانیا و ایتالیا) تا ٪۱۵-۲۰ و در جنوب آفریقا تا ٪۲۵ کاهش دهد، در حالی که ممکن است در مناطق شمالی مانند کانادا و روسیه افزایشی جزئی را تجربه کنند (Turner et al., ۲۰۱۷). همچنین، داده‌های عملیاتی نیروگاه‌های پمپ‌تابی در اروپا نشان می‌دهد که این نیروگاه‌ها با راندمان چرخه (Round-trip efficiency) حدود ٪۷۵-۸۰، کلیدی‌ترین فناوری موجود برای ذخیره‌سازی انرژی در مقیاس شبکه و یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر متناوب هستند. این داده‌ها به‌طور جمع‌بندی تأکید می‌کنند که مدیریت آینده صنعت برق‌آبی نیازمند رویکردی مبتنی بر شواهد است که بین منافع انرژی‌ای غیرقابل انکار و هزینه‌های اجتماعی-زیست‌محیطی جدی در بستر آسیب‌پذیری فزاینده نسبت به تغییر اقلیم توازن ایجاد کند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نیروگاه‌های برق‌آبی در یک موقعیت پارادوکس‌گونه قرار دارند: از یک سو، به‌عنوان یک فناوری بالغ، تجدیدپذیر و با راندمان بسیار بالا، ستون فقرات تولید برق پاک و انعطاف‌پذیر در بسیاری از سیستم‌های قدرت جهانی بوده و نقش بی‌بدیلی در گذار انرژی ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، یافته‌های این مقاله و شواهد علمی گسترده نشان می‌دهد که توسعه سنتی و مدیریت جاری این نیروگاه‌ها با چالش‌های عمیق اجتماعی، زیست‌محیطی و اقلیمی مواجه است. این چالش‌ها شامل تخریب اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، جابجایی جوامع، انتشار گازهای گلخانه‌ای در برخی مخازن، آسیب‌پذیری در برابر تغییرات هیدرولوژیکی و هزینه‌های اقتصادی اغلب فراتر از برآورد اولیه است. بنابراین، آینده‌ی پایدار صنعت برق‌آبی نه در توقف توسعه، بلکه در یک تغییر پارادایم اساسی از رویکرد «توسعه محض» به‌سوی «مدیریت یکپارچه، هوشمند و تطبیقی» منابع آب و انرژی نهفته است. بر این اساس، پیشنهادهای زیر در سه سطح ارائه می‌شود:

پیشنهادهای راهبردی و سیاستی:

۱. حرکت به‌سمت چارچوب برنامه‌ریزی «حوضه آبریز محور» به‌جای «پروژه محور». در این چارچوب، توسعه هر پروژه جدید یا بهره‌برداری از پروژه‌های موجود باید با در نظر گرفتن اثرات تجمیعی بر کل حوضه و با هدف بیشینه‌سازی منافع اجتماعی-زیست‌محیطی-انرژی‌ای طراحی شود.

۲. تدوین و اجرای استانداردهای اجباری «جریان زیست‌محیطی (Environmental Flows)» مبتنی‌بر اکوهیدرولوژی برای تمامی سدهای موجود و جدید، به‌منظور حفظ حداقل خدمات اکوسیستمی رودخانه‌ها و کاهش اثرات قطع پیوستگی.

۳. ایجاد بازار خدمات انعطاف‌پذیری و ذخیره‌سازی شبکه که به‌طور شفاف ارزش واقعی خدمات جانبی نیروگاه‌های برق‌آبی (به‌ویژه نیروگاه‌های پمپ‌تابی) را در یک سیستم دارای سهم بالای انرژی‌های متناوب، شناسایی و قیمت‌گذاری کند.

پیشنهادهای پژوهشی و نوآوری:

۴. توسعه و به‌کارگیری گسترده‌ی «دام‌های دیجیتال (Digital Twins)» برای نیروگاه‌ها و مخازن موجود. این مدل‌های دینامیک پیشرفته که با داده‌های بلادرنگ به‌روز می‌شوند، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، مدیریت بهینه مخزن و پیش‌بینی اثرات زیست‌محیطی استفاده شوند.

۵. تسریع در تحقیق و توسعه فناوری‌های نوآورانه کاهش اثرات، از جمله توربین‌های دوستدار ماهی با تیغه‌های نرم یا میدان‌های الکتریکی برای هدایت ایمن ماهی و سیستم‌های پایش بی‌دریغ (eDNA) برای نظارت بر تنوع زیستی.

۶. اجرای پروژه‌های پایلوت برای یکپارچه‌سازی چندگانه‌ی انرژی (Hybridization)، مانند ترکیب نیروگاه‌های برق‌آبی با سیستم‌های فتوولتائیک شناور و الکترولایزرهای تولید هیدروژن سبز در محل، جهت بهینه‌سازی استفاده از زمین و آب و ایجاد یک مرکز چندمنظوره تولید انرژی.

پیشنهادهای مدیریتی و عملیاتی:

۷. طراحی و پیاده‌سازی الگوریتم‌های مدیریت تطبیقی مخزن (Adaptive Reservoir Management) که با استفاده از هوش مصنوعی و پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت آب‌وهوایی، بین اهداف متضاد تولید انرژی، تأمین آب، کنترل سیل و نیازهای اکوسیستمی در شرایط عدم قطعیت، بهینه‌سازی پویا انجام دهند.

۸. اولویت‌دهی به برنامه‌های نوسازی و ارتقاء (Modernization & Uprating) نیروگاه‌های قدیمی به‌جای ساخت پروژه‌های جدید در مناطق حساس. این کار می‌تواند ظرفیت و انعطاف‌پذیری را با کمترین اثرات محیطی اضافی افزایش دهد.

در نهایت، تضمین آینده‌ی پایدار نیروگاه‌های برق‌آبی مستلزم گذار از نگرشی صرفاً فنی-اقتصادی به نگرشی اکوسیستم-محور و تاب‌آور است که در آن، رودخانه نه به‌عنوان یک «منبع هیدرولیک»، بلکه به‌عنوان یک «زیرساخت حیاتی طبیعی-انسانی» پیچیده و زنده شناخته و مدیریت شود.

مراجع

[۱] IEA. (۲۰۲۲). Hydropower Special Market Report. International Energy Agency.

[۲] Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (۲۰۱۵). A global boom in hydropower dam construction. Aquatic Sciences, ۷۷(۱), ۱۶۱-۱۷۰.

[۳] Ansar, A., Flyvbjerg, B., Budzier, A., & Lunn, D. (۲۰۱٤). Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. Energy Policy, ٦۹, ٤۳-٥٦.

[٤] Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., ... & Wada, Y. (۲۰۱٤). Global water resources affected by human interventions and climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences, ۱۱۱(۹), ۳۲٥۱-۳۲٥٦.

[٥] Kumar, D., & Katoch, S. S. (۲۰۱٥). Sustainability indicators for run of the river (RoR) hydropower projects in hydro rich regions of India. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٤٥, ٤۳۰-٤۳۹.

[٦] IHA. (۲۰۲۱). Hydropower Status Report ۲۰۲۱. International Hydropower Association.

[۷] Winemiller, K. O., McIntyre, P. B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., ... & Saenz, L. (۲۰۱٦). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. Science, ۳٥۱(٦۲٦۹), ۱۲۸-۱۲۹.

[۸] Fearnside, P. M. (۲۰۱٦). Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Implications for the aluminum industry. World Development, ۷۷, ٤۸-٦٥.

[۹] Turner, S. W., Ng, J. Y., & Galelli, S. (۲۰۱۷). Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model. Science of the Total Environment, ٥۹۰, ٦٦۳-٦۷٥.

[۱۰] Prasad, A. D., Ravindranath, D., & Goswami, A. (۲۰۱۹). Modernization and uprating of hydropower plants—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۱٤, ۱۰۹۳۰۰.

[۱۱] Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (۲۰۱٦). Floating photovoltaic power plant: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٦٦, ۸۱٥-۸۲٤.

[۱۲] Thiel, G. P., & Stark, A. K. (۲۰۲۱). To decarbonize industry, we must decarbonize heat. Joule, ٥(۳), ٥۳۱-٥٥۰.

[۱۳] Boyce, M. P. (۲۰۱۲). Gas Turbine Engineering Handbook. Butterworth-Heinemann.

[۱٤] IRENA. (۲۰۲۳). Renewable Capacity Statistics ۲۰۲۳. International Renewable Energy Agency.

[۱٥] Emerson, S., O'Grady, A., & Glaser, A. (۲۰۲۲). The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World. MIT Energy Initiative.

[۱٦] Boyce, M. P. (۲۰۱۲). Gas Turbine Engineering Handbook. Butterworth-Heinemann.

[۱۷] IHA. (۲۰۲۱). Hydropower Status Report ۲۰۲۱. International Hydropower Association.

[۱۸] GWEC. (۲۰۲۳). Global Wind Report ۲۰۲۳. Global Wind Energy Council.

[۱۹] Haegel, N. M., Atwater, H., Barnes, T., Breyer, C., Burrell, A., Chiang, Y. M., ... & Kurtz, S. (۲۰۱۹). Terawatt-scale photovoltaics: Transform global energy. Science, ۳٦٤(٦٤٤۳), ۸۳٦-۸۳۸.

[۲۰] Kumar, D., & Katoch, S. S. (۲۰۱٥). Sustainability indicators for run of the river (RoR) hydropower projects in hydro rich regions of India. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٤٥, ٤۳۰-٤۳۹.

[۲۱] IHA. (۲۰۲۱). Hydropower Status Report ۲۰۲۱. International Hydropower Association.

[۲۲] Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (۲۰۱٥). A global boom in hydropower dam construction. Aquatic Sciences, ۷۷(۱), ۱٦۱-۱۷۰.

[۲۳] Winemiller, K. O., McIntyre, P. B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., ... & Saenz, L. (۲۰۱٦). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. Science, ۳٥۱(٦۲٦۹), ۱۲۸-۱۲۹.

[۲٤] Turner, S. W., Ng, J. Y., & Galelli, S. (۲۰۱۷). Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model. Science of the Total Environment, ٥۹۰, ٦٦۳-٦۷٥.

[۲٥] Prasad, A. D., Ravindranath, D., & Goswami, A. (۲۰۱۹). Modernization and uprating of hydropower plants—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۱۱٤, ۱۰۹۳۰۰.

[۲٦] Berga, L., Buil, J. M., Bofill, E., Cea, J. C., García, J. A., & Mañueco, G. (Eds.). (۲۰۰٦). Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the ۲۱st Century. Taylor & Francis.

[۲۷] Lund, H. (Ed.). (۲۰۱٥). Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of ۱۰۰٪ Renewable Solutions. Academic Press.

[۲۸] IPCC. (۲۰۱۲). Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

[۲۹] IHA. (۲۰۲۱). Hydropower Status Report ۲۰۲۱. International Hydropower Association.

[۳۰] Kumar, D., & Katoch, S. S. (۲۰۱٥). Sustainability indicators for run of the river (RoR) hydropower projects in hydro rich regions of India. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٤٥, ٤۳۰-٤۳۹.

[۳۱] Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (۲۰۱۵). A global boom in hydropower dam construction. Aquatic Sciences, ۷۷(۱), ۱۶۱-۱۷۰.

[۳۲] IRENA. (۲۰۲۱). Renewable Power Generation Costs in ۲۰۲۱. International Renewable Energy Agency.

[۳۳] Berga, L., Buil, J. M., Bofill, E., Cea, J. C., García, J. A., & Mañueco, G. (Eds.). (۲۰۰۶). Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the ۲۱st Century. Taylor & Francis.

[۳۴] Winemiller, K. O., McIntyre, P. B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., ... & Saenz, L. (۲۰۱۶). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. Science, ۳۵۱(۶۲۶۹), ۱۲۸-۱۲۹.

[۳۵] Fearnside, P. M. (۲۰۱۶). Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Implications for the aluminum industry. World Development, ۷۷, ۴۸-۶۵.

[۳۶] Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., DelSontro, T., Barros, N., ... & Vonk, J. A. (۲۰۱۶). Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. BioScience, ۶۶(۱۱), ۹۴۹-۹۶۴.

[۳۷] Turner, S. W., Ng, J. Y., & Galelli, S. (۲۰۱۷). Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model. Science of the Total Environment, ۵۹۰, ۶۶۳-۶۷۵.

[۳۸] Ansar, A., Flyvbjerg, B., Budzier, A., & Lunn, D. (۲۰۱۴). Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. Energy Policy, ۶۹, ۴۳-۵۶.

[۳۹] Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., & Tockner, K. (۲۰۱۵). A global boom in hydropower dam construction. Aquatic Sciences, ۷۷(۱), ۱۶۱-۱۷۰.

[۴۰] Turner, S. W., Ng, J. Y., & Galelli, S. (۲۰۱۷). Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model. Science of the Total Environment, ۵۹۰, ۶۶۳-۶۷۵.

[۴۱] Fearnside, P. M. (۲۰۱۶). Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Implications for the aluminum industry. World Development, ۷۷, ۴۸-۶۵.

[۴۲] Ansar, A., Flyvbjerg, B., Budzier, A., & Lunn, D. (۲۰۱۴). Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. Energy Policy, ۶۹, ۴۳-۵۶.

[۴۳] Winemiller, K. O., McIntyre, P. B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., ... & Saenz, L. (۲۰۱۶). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. Science, ۳۵۱(۶۲۶۹), ۱۲۸-۱۲۹.

[۴۴] Fearnside, P. M. (۲۰۱۶). Environmental and social impacts of hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Implications for the aluminum industry. World Development, ۷۷, ۴۸-۶۵.

[۴۵] Grumbine, R. E., & Pandit, M. K. (۲۰۱۳). Threats from India's Himalaya dams. Science, ۳۳۹(۶۱۱۵), ۳۶-۳۷.

[۴۶] Winemiller, K. O., McIntyre, P. B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., ... & Saenz, L. (۲۰۱۶). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. Science, ۳۵۱(۶۲۶۹), ۱۲۸-۱۲۹.

[۴۷] Kumar, D., & Katoch, S. S. (۲۰۱۵). Sustainability indicators for run of the river (RoR) hydropower projects in hydro rich regions of India. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۴۵, ۴۳۰-۴۳۹.

[۴۸] Paish, O. (۲۰۰۲). Small hydro power: technology and current status. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ۶(۶), ۵۳۷-۵۵۶.

[٤٩] Prasad, A. D., Ravindranath, D., & Goswami, A. (٢٠١٩). Modernization and uprating of hydropower plants—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ١١٤, ١٠٩٣٠٠.

[٥٠] Le Strat, A. (١٩٨٦). Les ressources en eau et leur aménagement. Éditions Masson.

[٥١] Poff, N. L., & Hart, D. D. (٢٠٠٢). How dams vary and why it matters for the emerging science of dam removal. BioScience, ٥٢(٨), ٦٥٩-٦٦٨.

[٥٢] Barros, N., Cole, J. J., Tranvik, L. J., Prairie, Y. T., Bastviken, D., Huszar, V. L., ... & Roland, F. (٢٠١١). Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. Nature Geoscience, ٤(٩), ٥٩٣-٥٩٦.

[٥٣] Ansar, A., Flyvbjerg, B., Budzier, A., & Lunn, D. (٢٠١٤). Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. Energy Policy, ٦٩, ٤٣-٥٦.

[٥٤] Hamududu, B., & Killingtveit, A. (٢٠١٢). Assessing climate change impacts on global hydropower. Energies, ٥(٢), ٣٠٥-٣٢٢.

[٥٥] Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (٢٠١٦). Floating photovoltaic power plant: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٦٦, ٨١٥-٨٢٤.

[٥٦] Prasad, A. D., Ravindranath, D., & Goswami, A. (٢٠١٩). Modernization and uprating of hydropower plants—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ١١٤, ١٠٩٣٠٠.

[٥٧] Muin, S., & Zhou, L. (٢٠٢١). A review on CFD application in hydraulic turbine runner design. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ١٤٣, ١١٠٨٤٦.

[٥٨] Noonan, M. J., Grant, J. W., & Jackson, C. D. (٢٠١٢). A quantitative assessment of fish passage efficiency. Fish and Fisheries, ١٣(٤), ٤٥٠-٤٦٤.

[٥٩] Barros, N., Cole, J. J., Tranvik, L. J., Prairie, Y. T., Bastviken, D., Huszar, V. L., ... & Roland, F. (٢٠١١). Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. Nature Geoscience, ٤(٩), ٥٩٣-٥٩٦.

[٦٠] Turner, S. W., Ng, J. Y., & Galelli, S. (٢٠١٧). Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model. Science of the Total Environment, ٥٩٠, ٦٦٣-٦٧٥.

[٦١] Ansar, A., Flyvbjerg, B., Budzier, A., & Lunn, D. (٢٠١٤). Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. Energy Policy, ٦٩, ٤٣-٥٦.

[٦٢] Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (٢٠١٦). Floating photovoltaic power plant: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٦٦, ٨١٥-٨٢٤.

[٦٣] IRENA. (٢٠٢٣). Renewable Capacity Statistics ٢٠٢٣. International Renewable Energy Agency.

[٦٤] Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., DelSontro, T., Barros, N., ... & Vonk, J. A. (٢٠١٦). Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. BioScience, ٦٦(١١), ٩٤٩-٩٦٤.

[٦٥] Mulligan, M., van Soesbergen, A., & Sáenz, L. (٢٠٢٠). GOODD, a global dataset of more than ٣٨,٠٠٠ georeferenced dams. Scientific Data, ٧(١), ١-٨.

[٦٦] Barbarossa, V., Schmitt, R. J., Huijbregts, M. A., Zarfl, C., King, H., & Schipper, A. M. (٢٠٢٠). Impacts of current and future large dams on the geographic range connectivity of freshwater fish worldwide. Proceedings of the National Academy of Sciences, ١١٧(٧), ٣٦٤٨-٣٦٥٥.

[٦٧] Hamududu, B., & Killingtveit, A. (٢٠١٢). Assessing climate change impacts on global hydropower. Energies, ٥(٢), ٣٠٥-٣٢٢.

[٦٨] Gaudard, L., Avanzi, F., & De Michele, C. (٢٠١٨). Seasonal aspects of the energy-water nexus: The case of a run-of-the-river hydropower plant. Applied Energy, ٢١٠, ٦٠٤-٦١٢.

[٦٩] Gernaat, D. E., Bogaart, P. W., van Vuuren, D. P., Biemans, H., & Niessink, R. (٢٠١٧). High-resolution assessment of global technical and economic hydropower potential. Nature Energy, ٢(١٠), ٨٢١-٨٢٨.

[٧٠] Ansar, A., Flyvbjerg, B., Budzier, A., & Lunn, D. (٢٠١٤). Should we build more large dams? The actual costs of hydropower megaproject development. Energy Policy, ٦٩, ٤٣-٥٦.

[٧١] Grill, G., Lehner, B., Thieme, M., Geenen, B., Tickner, D., Antonelli, F., ... & Zarfl, C. (٢٠١٩). Mapping the world's free-flowing rivers. Nature, ٥٦٩(٧٧٥٥), ٢١٥-٢٢١.

[٧٢] Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., DelSontro, T., Barros, N., ... & Vonk, J. A. (٢٠١٦). Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: A new global synthesis. BioScience, ٦٦(١١), ٩٤٩-٩٦٤.

[٧٣] Turner, S. W., Ng, J. Y., & Galelli, S. (٢٠١٧). Examining global electricity supply vulnerability to climate change using a high-fidelity hydropower dam model. Science of the Total Environment, ٥٩٠, ٦٦٣-٦٧٥.