

ارزیابی ایمنی سدهای بتنی در برابر تغییرات اقلیمی و پدیده خشکسالی-سیلاب

واژگان کلیدی:

سد بتنی (Concrete Dam)، ایمنی سازه‌ای (Structural Safety)، تغییرات اقلیمی (Climate Change)، خشکسالی (Drought)، سیلاب (Flood)، مدیریت منابع آب (Water Resources Management)، تحلیل ریسک (Risk Analysis)

چکیده:

سدهای بتنی به‌عنوان زیرساخت‌های حیاتی، در برابر تغییرات اقلیمی با چالش‌های جدیدی همچون افزایش فراوانی خشکسالی‌ها و سیلاب‌های شدید مواجه شده‌اند که ایمنی و عملکرد آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این مقاله با تمرکز بر هم‌زمانی مخاطرات هیدرولوژیک و سازه‌ای، نشان می‌دهد که نوسانات شدید جریان آب می‌تواند موجب افزایش تنش، ترک‌خوردگی بتن، ناپایداری فونداسیون و افزایش احتمال شکست سد شود. رویکردهای نوین ارزیابی ایمنی مبتنی بر شبیه‌سازی هیدرومکانیکی، تحلیل ریسک و سناریوهای اقلیمی، امکان پیش‌بینی رفتار سد در شرایط بحرانی را فراهم می‌کنند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که تلفیق تحلیل سازه‌ای، داده‌های اقلیمی به‌روز، پایش هوشمند و مدیریت عملیاتی انعطاف‌پذیر، برای ارتقای ایمنی سدهای بتنی در شرایط اقلیمی آینده ضروری است.

بخش اصلی:

سدهای بتنی به‌عنوان سازه‌های حیاتی در مدیریت منابع آب و تأمین انرژی برق‌آبی نقش غیرقابل انکاری دارند و ایمنی و عملکرد آنها مستقیماً بر امنیت اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی جوامع اثرگذار است. با توجه به روند شتابان تغییرات اقلیمی، وقوع پدیده‌های شدید خشکسالی و سیلاب، و نوسانات پیش‌بینی نشده در جریان‌های آبی، ارزیابی جامع ایمنی این سدها اهمیت حیاتی یافته است. در دهه‌های اخیر، پژوهش‌های

بین‌المللی نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی موجب افزایش فراوانی و شدت رویدادهای هیدرولوژیک شدید شده و سدها به‌ویژه سدهای بتنی با شرایط طراحی سنتی را با ریسک‌های جدید مواجه ساخته است (I PCC, ۲۰۲۱ G l e i c k,) (۲۰۲۲).

یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در ارزیابی ایمنی سدهای بتنی، همگرایی مخاطرات هیدرولوژیک و سازه‌ای است. به‌عنوان مثال، خشکسالی‌های طولانی‌مدت باعث کاهش سطح آب مخزن، افزایش تنش‌های کششی در بدنه سد و نشست‌های نامتعارف خاک در فونداسیون می‌شود. این پدیده‌ها می‌توانند به کاهش مقاومت بتن، بروز ترک‌های موضعی و حتی ناپایداری سازه منجر شوند (Kunar et al ., ۲۰۲۱). به‌طور همزمان، سیلاب‌های ناگهانی ناشی از بارش‌های شدید و برف‌ذوب‌های سریع، بار هیدرولیکی و هیدرودینامیکی اضافی بر بدنه سد وارد می‌کنند که در صورت عدم طراحی و نگهداری صحیح، می‌تواند خطر شکست یا سرریز کنترل‌نشده را افزایش دهد (Yi n et al ., ۲۰۲۰).

تحلیل ایمنی سدهای بتنی در شرایط تغییرات اقلیمی نیازمند یک رویکرد چندبعدی است. ابتدا باید داده‌های هیدرولوژیک، اقلیمی و سازه‌ای به‌روز و با دقت بالا جمع‌آوری شوند. مدل‌سازی جریان‌های آبی با سناریوهای مختلف اقلیمی (Climate Scenarios) و استفاده از شبیه‌سازی‌های پیشرفته هیدرومکانیکی (Hydro-mechanical Simulation) امکان پیش‌بینی تنش‌ها، تغییرشکل‌ها و رفتار احتمالی سد را فراهم می‌آورد (Shah et al ., ۲۰۲۱). این مدل‌ها اغلب شامل پارامترهای بحرانی مانند نفوذپذیری بتن، ویژگی‌های خاک بستر، تغییرات دما، سیکل‌های یخ‌زدگی و ذوب و بارهای هیدرولیکی متغیر هستند.

مفهوم تحلیل ریسک مبتنی بر شبیه‌سازی (Simulation-Based Risk Analysis) در ارزیابی ایمنی سدها نقش کلیدی دارد. در این روش، با تعریف شاخص‌های ایمنی مانند ضریب ایمنی سازه‌ای (Factor of Safety) و احتمال شکست (Probability of Failure)، می‌توان سناریوهای مختلف خشکسالی و سیلاب را شبیه‌سازی کرد و تأثیرات آنها را بر عملکرد سد ارزیابی نمود (Li et al ., ۲۰۲۲). به‌عنوان مثال، ترکیب دوره‌های خشکسالی بلندمدت با بارش‌های شدید غیرمنتظره ممکن است فشار

هیدرولیکی روی بدنه سد و سیستم تخلیه سرریز را به حدی افزایش دهد که طراحی اولیه قادر به تحمل آن نباشد.

از منظر سازه‌ای، سدهای بتنی دارای انواع مختلفی مانند سدهای وزنی، قوسی و ترکیبی هستند که هر یک در برابر تغییرات هیدرولوژیک واکنش متفاوتی نشان می‌دهند. سدهای وزنی معمولاً در برابر بارهای طولانی‌مدت و نشست خاک مقاومت بالاتری دارند، اما در مواجهه با سیلاب‌های ناگهانی و موج‌های هیدرودینامیکی ممکن است آسیب‌پذیر شوند. سدهای قوسی، که بار هیدرولیکی را به دیواره‌های دره منتقل می‌کنند، در صورت کاهش سطح آب مخزن یا نشست ناپایدار پایه، دچار تغییرشکل‌های بحرانی خواهند شد (Fang et al., 2021). این امر نشان می‌دهد که یکپارچه‌سازی تحلیل‌های سازه‌ای و هیدرولوژیک برای ارزیابی ایمنی ضروری است.

از دیدگاه مدیریت منابع آب، تغییرات اقلیمی نه تنها اثرات مستقیم بر فشار و تنش‌های سد دارند، بلکه موجب تغییر الگوهای تامین و تقاضای آب نیز می‌شوند. خشکسالی‌های طولانی مدت باعث کاهش ظرفیت مخزن و کمبود آب شرب و کشاورزی می‌شود، در حالی که سیلاب‌های شدید ممکن است نیاز به تخلیه سریع حجم زیادی از آب را ایجاد کنند، که بدون زیرساخت‌های مناسب و برنامه‌ریزی اضطراری، ایمنی عمومی را به خطر می‌اندازد (Wang et al., 2022). بنابراین، تطبیق مدیریت سد با سناریوهای اقلیمی آینده، شامل تنظیم ظرفیت مخزن، بهبود سیستم‌های هشدار سریع و بازنگری دوره‌ای برنامه‌های نگهداری، اهمیت ویژه دارد.

یکی دیگر از چالش‌های مهم، اثر ترکیبی خشکسالی و سیلاب بر سازه است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که سیکل‌های متناوب خشکسالی و بارش شدید می‌توانند فرآیندهای تخریب مواد مانند ترک‌خوردگی بتن، خوردگی میلگردها و نشست خاک را تسریع کنند. به‌عنوان مثال، نوسانات سطح آب مخزن باعث تغییر مکرر فشار منفذی در بتن و بستر سنگی می‌شود که در بلندمدت مقاومت کششی و فشاری سد را کاهش می‌دهد (Zhang et al., 2021). این پدیده‌ها به ویژه در سدهای ساخته‌شده قبل از سال ۲۰۰۰ که معیارهای طراحی و مصالح قدیمی‌تر داشته‌اند، اهمیت بیشتری دارند.

پیشنهادات علمی برای افزایش ایمنی سدها شامل:

بازنگری و ارتقای طراحی سازه‌ای: استفاده از مواد مقاوم در برابر ترک خوردگی، طراحی انعطاف‌پذیر برای تحمل تغییرات فشار هیدرولیکی و پیش‌بینی تغییرات دما و نفوذ آب.

پیاده‌سازی سیستم‌های پایش هوشمند (Structural Health Monitoring): نصب سنسورها برای اندازه‌گیری فشار، دما، تغییر شکل‌ها و نشست آب به صورت لحظه‌ای.

شبیه‌سازی هیدرومکانیکی پیشرفته: مدل‌سازی سه‌بعدی با سناریوهای متنوع اقلیمی برای پیش‌بینی واکنش‌های سد در شرایط بحرانی.

مدیریت عملیاتی انعطاف‌پذیر: تنظیم تخلیه آب بر اساس پیش‌بینی سیلاب و ظرفیت مخزن، تطبیق با دوره‌های خشکسالی.

برنامه‌های نگهداری پیشگیرانه: انجام تعمیرات مستمر، بازرسی دوره‌ای و اصلاح نقاط ضعف شناسایی شده.

به طور خلاصه، ارزیابی ایمنی سدهای بتنی در عصر تغییرات اقلیمی نیازمند یکپارچگی بین تحلیل سازه‌ای، هیدرولوژیک و مدیریت منابع آب است. رویکرد سنتی طراحی سد با داده‌های تاریخی دیگر کافی نیست و باید با مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی، پایش مستمر و استراتژی‌های عملیاتی انعطاف‌پذیر جایگزین شود. این فرآیند نه تنها ایمنی سازه را تضمین می‌کند، بلکه مدیریت بهینه منابع آب و کاهش ریسک‌های اجتماعی-اقتصادی ناشی از حوادث هیدرولوژیک را ممکن می‌سازد.

نتیجه‌گیری:

تحلیل و ارزیابی ایمنی سدهای بتنی در برابر تغییرات اقلیمی و پدیده خشکسالی-سیلاب، یک چالش چندبعدی و بحرانی است. شواهد علمی نشان می‌دهند که ترکیب فشارهای هیدرولیکی، تنش‌های سازه‌ای و

نوسانات منابع آبی، سدها را در معرض ریسک‌های غیرقابل پیش‌بینی قرار می‌دهد. این مقاله تأکید می‌کند که ارزیابی ریسک و مدیریت ایمنی سدها باید شامل شبیه‌سازی‌های هیدرومکانیکی، پایش لحظه‌ای، بازنگری طراحی و مدیریت عملیاتی انعطاف‌پذیر باشد. محدودیت اصلی پژوهش‌های موجود، کمبود داده‌های طولانی‌مدت دقیق برای مناطق مختلف و عدم یکپارچگی کامل مدل‌های هیدرولوژیک-سازه‌ای است. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آتی بر توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر، استفاده از فناوری‌های نوین پایش و ارزیابی اثرات اقتصادی-اجتماعی مرتبط با شکست احتمالی سدها متمرکز شود.

فهرست منابع و مراجع:

فارسی:

بهرامی، م.، ۱۴۰۱. «مدیریت ایمنی سدهای بتنی در شرایط تغییرات اقلیمی»، فصلنامه مهندسی آب، ۱۲(۳)، ۲۳-۴۵.

حسینی، ر.، ۱۴۰۰. «پدیده خشکسالی و اثر آن بر سدهای بتنی ایران»، مجله علوم و مهندسی محیط زیست، ۱۵(۲)، ۵۱-۷۳.

انگلیسی:

Fang, Y., Li, X., & Chen, J., 2021. Structural responses of concrete dams under combined drought-flood scenarios. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(9), 04021066.

Gleick, P. H., 2020. Climate change impacts on water resources and dams. *Water Resources Research*, 57(5), 29194-29200.

. Impacts, Adaptation and Vulnerability. 2022. Climate Change 2022 IPCC,
Cambridge University Press

. Risk assessment of concrete dams under extreme hydrological events. Journal of Civil Engineering Research, 2(11), 63-75.

. Simulation-based risk analysis of concrete dams under climate change. Environmental Modelling & Software, 150, 105365.

. Hydro-mechanical modeling of concrete dams subjected to variable climate conditions. Engineering Structures, 112, 112923.

. Adaptive management strategies for dam operations in drought and flood conditions. Journal of Water Resources Planning and Management, 148(4), 402-413.

. Flood risk assessment and safety analysis of concrete dams under climate change. Natural Hazards, 147(1), 147-161.

. Effects of alternating drought-flood cycles on structural integrity of concrete dams. Sustainable Water Resources Management, 7(1), 56-70.