

مطالعه مهندسی بند تاریخی هلاکو در منطقه سیدی استان کرمان

فرزانه قادری نسب گروهی^۱ و محمد جواد خانجانی^{۲*}

تاریخ ارسال: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۰۵

چکیده:

بند تاریخی هلاکو با عمر بیش از ۷۰۰ سال در ۱۶ کیلومتری شمال شهر کرمان و در منطقه سیدی شهرستان کرمان قرار دارد. این بند به منظور تامین آب کشاورزی مزارع پایین دست و کنترل جریان‌های سیلابی بر روی رودخانه سیدی احداث شده است. ارتفاع بند در بالادست بین ۹٫۶ تا ۱۰ متر و در پایین دست به ۸ متر کاهش پیدا می‌کند. طول تاج بند در بالادست ۴۳ متر و در پایین دست ۳۲ می‌باشد. در این مطالعه با مرور منابع، بازدیدهای میدانی، اندازه‌گیری و انجام محاسبات تئوری پایداری بند هلاکو بررسی شد. نتایج مطالعه نشان داد در طراحی این بند ملزومات تکنیکی، شرایط محیطی، مکان‌یابی مناسب و سازه‌های جانبی لازم در نظر گرفته شده‌اند. سازه‌های جانبی قابل ملاحظه در بند شامل سرریز اضطراری از نوع تنداب، برج آبگیر و دهانه‌های آبگیر می‌باشند. همچنین نتایج محاسبات تئوری نشان داد که معیارهای پایداری بند از لحاظ لغزش و واژگونی به ترتیب ۱٫۳۶ و ۱٫۸۶ بوده که در دامنه قابل پذیرش قرار دارد.

واژه های کلیدی: بند هلاکو، تاریخ آب و آبیاری در کرمان، سازه تاریخی، ذخیره آب .

۱ دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، ۰۹۱۳۸۶۳۳۹۴۱

gaderi_f@alumni.ut.ac.ir

۲ استاد بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران پست

الکترونیک: khangani@yahoo.com (نویسنده مسئول)

مقدمه

از داخل برج دریچه‌های آبیگری آن را باز کرده یا ببندند (عنایت الله و همکاران، ۱۳۵۰).

در استان کرمان نیز نمونه‌ای از این بندهای تاریخی وجود دارد که تمدن ایرانیان، علم آنها در زمینه هیدرولیک، طراحی هوشمندانه سازه، تعبیه سازه‌های جانبی و استفاده بهینه از آب را نشان می‌دهد. بند هلاکو یکی از سازه‌های تاریخی قابل معرفی در استان کرمان است. متأسفانه منابعی که به تاریخچه بند هلاکو اشاره کرده‌اند، محدود می‌باشند. مرحوم دکتر باستانی پاریزی در کتاب‌های "حماسه کویر" صفحه ۳۲۸، "زیر این هفت آسمان" صفحه ۱۱۷، "نوح هزار طوفان" صفحه ۴۱۲، "سنگ هفت قلم بر مزار خواجهگان هفت چاه" صفحه ۲۲۹ و "تاریخ شاهی قراخانیان" صفحه ۳۳۱ از این بند نام برده است (باستانی پاریزی، ۱۳۵۵، ۱۳۶۷، ۱۳۶۹، ۱۳۸۰، ۱۳۸۲).

ایشان در صفحه ۳۳۱ کتاب "تاریخ شاهی قراخانیان" با بررسی مفصل تاریخ کرمان ساخت بند را در دوره ایلخانان، زمان حکومت قراخانیان کرمان خصوصاً ترکان خاتون نسبت داده است. با توجه به اینکه ترکان خاتون از سال ۶۵۵ هجری قمری به مدت ۳۰ سال بر کرمان حکومت کرده است (باستانی پاریزی، ۱۳۵۵ و ضیائی، ۱۳۸۵)، عمر بند هلاکو بین ۷۵۰ تا ۷۸۰ سال تخمین زده می‌شود. قابل ذکر است که سدهای دیگری نیز در دوره مغول و ایلخانان در ایران ساخته شده است که می‌توان به سد وزنی ساوه و سد قوسی کبار قم اشاره کرد (الفتی، ۱۳۷۴).

با توجه به اینکه سازه بیش از ۷۰۰ سال پایدار باقی مانده است، بررسی اصول و ضوابط طراحی، مطالعه هیدرولیکی، دلایل پایداری و معرفی این سازه تاریخی از اهداف این مطالعه می‌باشند.

از دیرباز تلاش‌های بی‌شماری برای در اختیار گرفتن بخش‌های مفید منابع آب و رویارویی با نیروهای مخرب آن انجام شده است (بربر، ۱۳۹۱). بدون شک سازندگان قدیمی سدها بر اساس تجربیات خود از قدرت تخریبی سیل در طبیعت و از فشار افقی آب جمع‌آوری شده در پشت سد اطلاع داشتند. اکثر سدهای قدیمی از نظر اصول مقاومت و پایداری در برابر فشار آب از تیپ سدهایی هستند که امروزه سدهای وزنی نامیده می‌شوند که در واقع نیروی محرک حاصل از فشار آب در پاشنه سد با نیروی مقاوم حاصل از وزن سد خنثی می‌گردد (سالاریان و همکاران، ۱۳۹۲).

در برخی از این سدهای قدیمی، سازه‌های جانبی از جمله سرریز به منظور جلوگیری از سرریز کردن آب از روی سد و در نتیجه خراب شدن آن، گالری تخلیه رسوب با هدف افزایش عمر مفید سد، برج آبیگر و دریچه‌های آبیگری تعبیه شده است. از آبیگر برای تامین نیازهای آبی پایین دست به صورت کنترل شده استفاده می‌شود. آبیگرها به صورت تونلی هستند که از یک سازه ورودی، مجرا، وسایل کنترل و سازه خروجی تشکیل می‌شود. مجرای آبیگر ممکن است در بدنه سد، نزدیک تکیه‌گاه‌های جانبی سد و یا زیر سد ساخته شوند. ورودی آبیگر در رقومی پایین‌تر از رقوم تاج سرریز قرار می‌گیرد (Bureau of Reclamation, 1987).

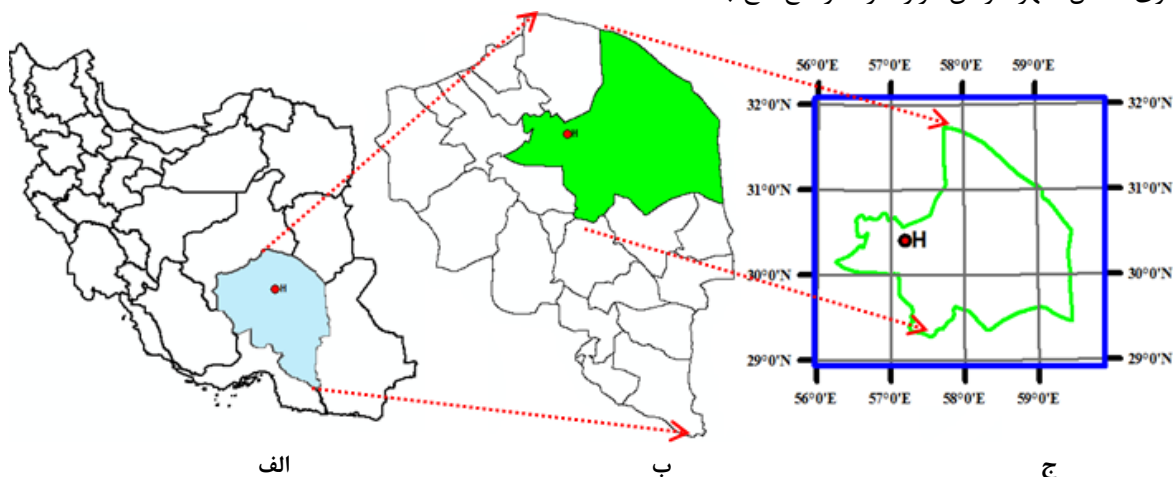
ارتفاع اکثر سدهای مخزنی تاریخی در ایران بین ۱۵ تا ۴۰ متر می‌باشد. بدیهی است که در مراحل اولیه سدسازی، مهار کردن فشار آب در مواقع باز کردن دریچه سد برای سازندگان مشکلاتی را به وجود آورده است. اما ایرانیان در ادوار قدیم راه‌حل جالبی برای آن یافته‌اند، به این صورت که در قسمت سراب و چسبیده به بدنه سد برج‌هایی از کف رودخانه تا تاج سد از آجر یا سنگ بنا می‌کرده‌اند. این برج‌ها در ارتفاعات معینی مجهز به سوراخ‌های افقی بوده‌اند که با مخزن و دریاچه سد ارتباط داشته‌اند. دور برج مزبور پله حلزونی از تاج تا مجرای آبیگری برج تعبیه می‌شده تا بندبانان بتوانند

سال هشتم • شماره سی و دوم • تابستان ۱۳۹۷

موارد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی و هدف از احداث بند

بند هلاکو در طول جغرافیایی $57^{\circ}10'12''$ شرقی و عرض جغرافیایی $30^{\circ}25'24.5''$ شمالی و در ۱۶ کیلومتری شمال شهر کرمان قرار دارد. ارتفاع تاج بند



شکل ۱- موقعیت بند هلاکو الف: موقعیت بند در کشور، ب: موقعیت بند در استان کرمان و ج: موقعیت بند در شهرستان کرمان



شکل ۲- تصویر ماهواره ای موقعیت قرار گیری بند هلاکو (۱۰)

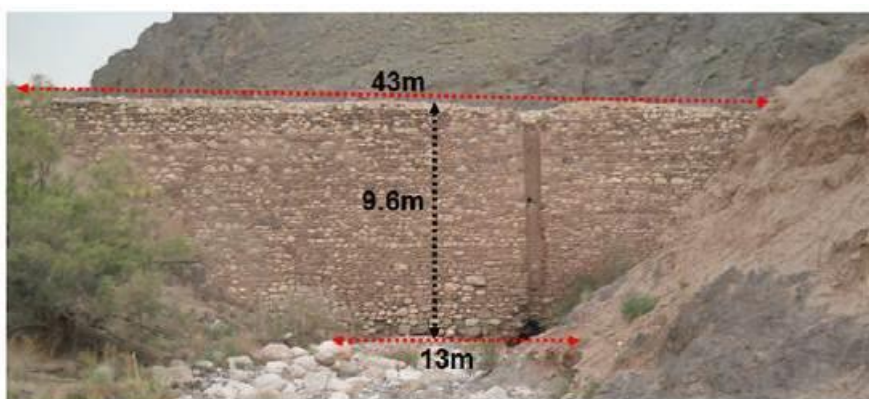
احداث شده است و زیری (۱۳۷۶) و باستانی پاریزی (۱۳۶۹، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۲).

این بند با هدف ذخیره آب رودخانه سیدی جهت تامین آب مزارع کشاورزی و کنترل سیلاب در فصول طغیان رودخانه در منطقه سیدی شهرستان کرمان

مشخصات سازه‌ای بند هلاکو

انتخاب شده‌اند، اما در بین آنها نیز سنگ‌دانه‌های رودخانه‌ای گردگوشه نیز به وفور به چشم می‌خورد. تقریباً به ازای هر ۴ تا ۷ ردیف سنگ‌دانه، یک ردیف سنگ‌دانه پهن و نازک به کار برده شده است. بند در یک دره تنگ که صخره‌ها از دو طرف شیب دارند واقع شده است، به گونه‌ای که در بالادست بند، طول آن در کف رودخانه ۱۳ متر و در تاج ۴۳ متر می‌باشد. در شکل (۳) نمای بالادست بند نشان داده شده است. در شکل (۴) نیز قسمت سمت راست نمای بالادست بند از فاصله نزدیک‌تری نشان داده شده است. ارتفاع بند در پایین دست بین ۷/۸ تا ۸ متر متغیر می‌باشد. در شکل (۵) نمای پایین دست بند نشان داده شده است. طول تاج بند در پایین دست به واسطه شکل خاص دره به ۳۲ متر کاهش می‌یابد. در پایین دست و در کف رودخانه طول بند ۱۲ متر است.

بند هلاکو از نوع سنگی و ملاتی می‌باشد و در ارتفاع حدود ۱۰ متر احداث شده است. بالادست بند شامل ۵۳ ردیف و پایین‌دست بند شامل ۴۳ ردیف سنگ‌دانه است که به صورت منظم چیده شده‌اند. ساختمان بند در بالادست و در کف رودخانه شامل سه تا چهار ردیف سنگ بزرگ می‌باشد که تقریباً معکب‌مستطیل شکل هستند. سطح مقطع سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در ردیف‌های پایین بین $40\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ تا $60\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ متغیر می‌باشد. در سایر قسمت‌های بالادست بند سطح مقطع سنگ‌ها بین $30\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ تا $35\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ متغیر می‌باشد. در نمای پایین دست بند سطح مقطع سنگ‌دانه‌ها عموماً بین $30\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ تا $15\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ متغیر می‌باشند. جهت پایداری بیشتر بند عموماً سنگ‌دانه‌ها معکب و معکب‌مستطیل شکل



شکل ۳: نمای بالادست بند هلاکو



شکل ۴: قسمت سمت راست نمای بالادست بند هلاکو



شکل ۵: نمای پایین دست بند هلاکو و تغییر ارتفاع روی تاج بند



شکل ۶: کاهش تاج بند هلاکو به واسطه جلوآمدگی صخره و استفاده از آن به عنوان سرریز جهت عبور جریان‌های سیلابی

برج آبرگیر و دریچه‌های آبرگیری

یکی از سازه‌های جانبی که در طراحی بند هلاکو در نظر گرفته شده است، برج آبرگیر و دریچه‌های آبرگیری است. دریچه‌های آبرگیری بند هلاکو در ارتفاعات مختلف بند پیش‌بینی شده‌اند. در شکل (۷) نمای جانبی از بستر رودخانه، برج آبرگیر، دریچه‌های آبرگیری و گالری تحتانی بند هلاکو و همچنین نمای بالادست آن ترسیم شده است. در مطالعات برخی از محققان از جمله Vermeyen (1998 و 1999)، Safavi و Gelda (2007) و همکاران (2009)

سرریز اضطراری بند

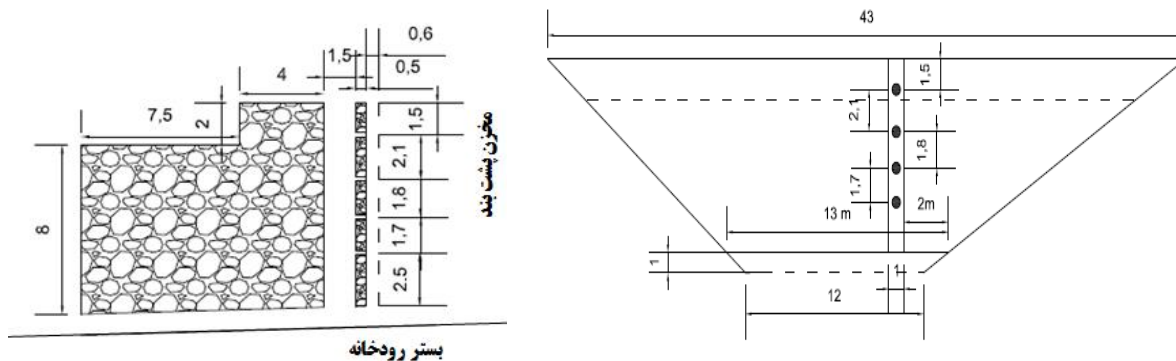
برای بند هلاکو سرریز اضطراری ساخته نشده است اما مکان مناسب بند و صخره طبیعی کوهستان سبب شده است سرریز اضطراری به طور طبیعی در بند وجود داشته باشد. در شکل (۶) کاهش عرض در تاج بند در پایین دست که به واسطه جلوآمدگی صخره به وجود آمده است، با دقت بیشتری نشان داده شده است. مطابق بازدیدهای میدانی صورت گرفته، جلوآمدگی صخره به عبور سیلاب‌های عبوری از روی بند کمک کرده و بند را از تخریب مصون داشته است. همچنین در این شکل مسیر جریان سرریزی از روی بند نشان داده شده است. استفاده بهینه از جلوآمدگی صخره طبیعی کوهستان، به عنوان سرریز جهت عبور جریان‌های سیلابی عبوری از روی بند قابل تحسین می‌باشد. با توجه به اینکه سرریز آب را در فاصله کوتاهی و در ارتفاع نسبتاً زیادی منتقل می‌کند، می‌توان آن را سرریز تنداب تلقی کرد. جنس سرریز سنگی و صخره طبیعی کوهستان می‌باشد.

¹lower intake

¹Urgent spillway

²Shute spillway

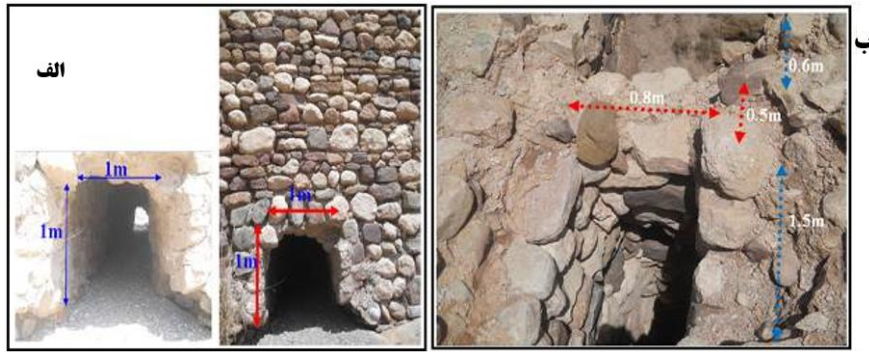
کاهش آب پشت سد (مخزن) دریچه پایین تر را می‌گشوده‌اند تا آب ذخیره شده، مورد استفاده قرار گیرد (باستانی پاریزی ۱۳۵۵ و ۱۳۶۷). در شکل (۸) نمای بالادست بند و موقعیت دریچه‌های آبیگری بند هلاکو نشان داده شده است. این چهار دریچه با فلش مشخص شده‌اند. دریچه‌ها به ترتیب در فاصله ۱،۵، ۳،۶، ۵،۴ و ۷،۱ متری از تاج بند تعبیه شده‌اند. دریچه‌های تعبیه شده روی بند، آب را به برج آبیگر هدایت کرده و سپس جریان از طریق آبیگر تحتانی به پایین دست بند منتقل می‌شود. آبیگر تحتانی بند هلاکو در عرض بند امتداد یافته است.



شکل ۷: نمای جانبی از بستر رودخانه، برج آبیگر، دریچه‌های آبیگری و گالری تحتانی بند هلاکو



شکل ۸: نمای بالادست بند و دریچه‌های آبیگر بند هلاکو (۴ دریچه با شماره و فلش مشخص شده‌اند)



شکل ۹: الف مقطع مجرای خروجی آبگیر بند هلاکو (عکسبرداری از نمای پایین دست بند صورت گرفته شده است)؛ ب سطح مقطع گالری قائم آبگیر بند (عکس از روی تاج بند و در جهت طول بند گرفته شده است)

از ماسه سنگ می‌باشند (سازمان نقشه برداری کشور، ۱۳۸۷).

معیارهای پایداری بند در مقابل لغزش و واژگونی

به طور کلی مهمترین نیروهای وارده بر سد وزنی عبارتند از نیروهایی که در جهت پایداری سد عمل می‌کنند و نیروهایی که در جهت عدم پایداری سد عمل می‌کنند.

الف- نیروهایی که در جهت پایداری سد عمل می‌نمایند عبارتند از:

-نیروی ناشی از وزن سد (W)

برای محاسبه این نیرو مقطع طولی سد را به یک سری مثلث و مستطیل تقسیم کرده و سطح آن محاسبه می‌شود. چون محاسبات برای یک متر پهنای سد انجام می‌شود سطح آن را در وزن مخصوص مصالح ضرب می‌کنند.

-نیروهای فشار قائم آب در بالادست و پایین دست بند (F_1 و F_2):

این نیروها مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند:

$$F_1 = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan \theta \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \gamma \hat{H}^2 \tan \hat{\theta} \quad (2)$$

که γ وزن مخصوص آب، H و \hat{H} به ترتیب عمق آب در بالادست و پایین دست بند و θ و $\hat{\theta}$ به ترتیب زاویه شیروانی بالادست و پایین دست بند می‌باشند. چون هم رویه بالادست و هم رویه پایین دست بند

در شکل (۹) در قسمت الف گالری تحتانی مربوط به برج آبگیر بند هلاکو از نمای پایین دست بند نشان داده شد است. به طور متوسط سطح مقطع این مجرای $1\text{m} \times 1\text{m}$ (ارتفاع بین 0.9m تا 1.2m و عرض آن بین 0.9m تا 1.3m) و طول آن 13.5m متر می‌باشد در قسمت ب شکل (۹) سطح مقطع برج آبگیر از نمای روی تاج بند نشان داده شده است. مقطع برج آبگیر در ابعاد $1.5\text{m} \times 0.8\text{m}$ طراحی شده است. جهت هدایت بهتر جریان به سمت دریاچه‌ها، در طول بند ابتدا یک تورفتگی به طول 0.6m و عرض 0.8m لحاظ شده است. این تورفتگی در شکل (۹) قسمت ب و در بالای تصویر قابل مشاهده است (تورفتگی در شکل (۷) با خط چین نشان داده شده است) و سپس یک ستون به ارتفاع بند و به طول 0.5m پی‌ریزی شده است و در نهایت برج آبگیر با ابعاد 1.5m در 0.8m در نظر گرفته شده است.

زمین شناسی بند

به منظور بررسی زمین شناسی محل بند هلاکو از نقشه زمین شناسی کرمان با مقیاس $1:100000$ استفاده شد. نقشه مورد استفاده توسط سازمان نقشه برداری کشور در سال ۱۳۸۷ تهیه شده است. مطابق این نقشه محل بند در موقعیت گدازه‌های آندزیت بازالتی و آکومرا و توف‌های وابسته واقع می‌شود. همچنین زمین شناسی اطراف بند شامل ماسه سنگ درشت دانه، ماسه سنگ همراه با کنگلومرای بین لایه‌ای و در جاهایی قلوه‌های درشت همراه با لایه‌هایی

سال هشتم • شماره سی و دوم • تابستان ۱۳۹۷

$$P_e = 0.726 \cdot p_e \cdot H \quad (۸)$$

$$p_e = C_m \cdot \alpha \cdot \gamma \cdot H \quad (۹)$$

$$C_m = 0.735 \frac{\theta}{90} \quad (۱۰)$$

$$M_e = 0.412 H P_e \quad (۱۱)$$

که در این روابط α برابر ۰٫۱ ، θ زاویه رویه بالادست با افق، H تراز آب در بالادست، C_m ماکزیمم مقدار ضریب فشار برای شیب ثابت سد، P_e نیروی فشار هیدرودینامیک ناشی از زلزله و M_e گشتاور ناشی از فشار هیدرودینامیک می‌باشند.

-نیروی قائم رو بالا ناشی از زلزله

شتاب قائم ممکن است در جهت رو به بالا یا پایین باشد. وقتی که در جهت رو به بالا اعمال می‌شود، فونداسیون به سمت بالا بلند شده و به بدنه سد نزدیک‌تر شده و بنابراین وزن موثر سد افزایش می‌یابد از این رو تنش توسعه یافته افزایش می‌یابد و اثر سوء بر طراحی سد دارد. در شکل (۱۰) مقطع بند هلاکو جهت بررسی نیروهای وارده بر آن نشان داده شده است.

ضریب اطمینان در مقابل واژگونی

پایداری در مقابل واژگونی به صورت نسبت مجموع لنگرهای مقاوم در برابر واژگونی به مجموع لنگرهای واژگون کننده (رابطه (۱۲)) تعریف می‌شود. چنانچه مجموع لنگرهای مقاوم نسبت به پنجه سد ۱٫۵ تا ۱٫۷ برابر مجموع لنگرهای واژگون کننده نسبت به همان نقطه باشد، سد در مقابل واژگونی مقاوم است.

$$SF_{(over)} = \frac{\sum M_{res}}{\sum M_{over}} \quad (۱۲)$$

ضریب اطمینان در مقابل لغزش

ضریب اطمینان در مقابل لغزش مطابق رابطه (۱۳) تعریف می‌شود:

هلاکو قائم می‌باشد نیروی فشار قائم آب در بالادست و پایین دست صفر می‌باشد.

-نیروی فشار افقی آب در پایین دست (\dot{P})

$$\dot{P} = \frac{1}{2} \gamma \dot{H}^2 \quad (۳)$$

در رابطه (۳) در بررسی پایداری بند هلاکو هدف بررسی بحرانی‌ترین حالت است. بنابراین در محاسبات مقدار این نیرو صفر می‌باشد.

-مولفه عمودی نیروی ناشی از رسوبات

مولفه عمودی نیروی ناشی از رسوبات مطابق رابطه (۴) می‌باشد.

$$F_S = \frac{1}{2} \gamma_{Sub} H_S^2 \tan \theta \quad (۴)$$

در این رابطه H_S ارتفاع رسوبات در بالادست و γ_{Sub} وزن مخصوص رسوب می‌باشد. در بند هلاکو چون آبگیر تحتانی به عنوان مجرای تخلیه رسوب هم عمل می‌کرده است، رسوبات جمع شده در پشت بند به پایین دست منتقل می‌شده و در بررسی پایداری بند از این نیرو صرف‌نظر شده است.

ب- نیروهایی که در جهت عدم پایداری بند عمل می‌کنند

نیروهایی که در جهت عدم پایداری بند عمل می‌کنند طبق روابط (۵) تا (۱۱) ارائه شده اند:

-نیروی فشار افقی آب در بالادست (P)

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 \quad (۵)$$

-نیروی زیر فشار، U

$$U = \frac{1}{2} \gamma (\dot{H} + H) \quad (۶)$$

-نیروی افقی ناشی از زمین لرزه در بدنه سد

$$F_{e1} = \alpha W \quad (۷)$$

که α برابر ۰٫۱ در نظر گرفته شد Woodward و Griffiths (1996).

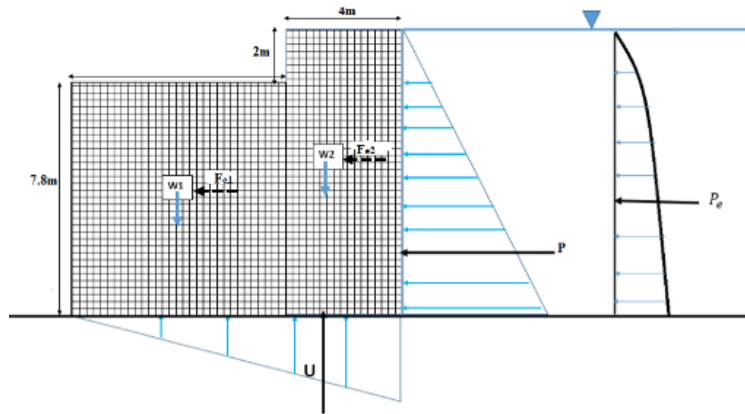
-فشار هیدرودینامیکی ناشی از زلزله در ارتفاع y سطح F_{e1} :

فشار هیدرودینامیکی و گشتاور ناشی از آن مطابق روابط (۸) تا (۱۱) محاسبه می‌گردد (Zanger, 1952)

$$SF = \frac{f \sum F_V}{\sum F_H} \quad (13)$$

$\sum F_V$ مجموع نیروی قائم، $\sum F_H$ مجموع نیروهای افقی و f ضریب اصطکاک و SF ضریب اطمینان در مقابل لغزش می‌باشد.

در روابط (۱۲) و (۱۳) مجموع گشتاورهای مقاوم و $\sum M_{over}$ مجموع گشتاورهای واژگون کننده،

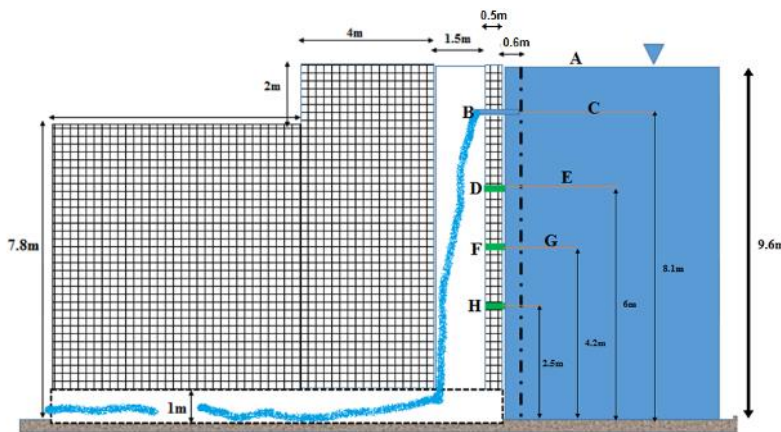


شکل ۱۰- نیروهای وارده بر بند هلاکو جهت بررسی معیارهای پایداری در برابر لغزش و واژگونی

آن نشود. چنین حالتی به طور شماتیک در شکل (۱۱) ترسیم شده است. همچنین جنس مصالح کف باید به گونه‌ای باشد که در برابر ریزش جت خروجی از دریچه مقاومت داشته باشند. بررسی کف رودخانه در محل برج آبگیر هیچ گونه فرسایشی را نشان نمی‌دهد.

طراحی اندازه برج آبگیر و فاصله دریچه‌ها

در طراحی برج آبگیر و فاصله دریچه‌ها روی آن، باید به این مسئله دقت کرد که جت ریزشی خروجی از دریچه که وارد برج آبگیر می‌شود به طور مستقیم با دیواره روبرو برخورد نکند و سبب تخریب و فرسایش



شکل ۱۱- بررسی امکان برخورد جت جریان خروجی با دیواره برج آبگیر

که x فاصله افقی از نقطه پرتاب و $y(x)$ ارتفاع در فاصله x نسبت به نقطه اولیه پرتاب می‌باشد. این پارامترها در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند. USBR (1987) با اصلاح رابطه پرتابه، معادله زیر را برای جت خروجی آب ارائه کرده است.

به منظور بررسی بررسی امکان برخورد جت ریزشی ناشی از دریچه با دیواره روبرو، می‌توان از معادله مسیر حرکت پرتابی مطابق معادله (۱۴) استفاده کرد.

$$y(x) = x \tan \theta - \frac{gx^2}{2v_0^2 (\cos \theta)^2} \quad (14)$$

این پارامتر کافی است سرعت خروجی جت از دریچه را داشته باشیم و در ادامه H را محاسبه کنیم. برای محاسبه سرعت باید رابطه برنولی بین سطح مخزن و نقطه خروجی از دریچه نوشته شود:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_f \quad (18)$$

در معادله (۱۸)، h_f مجموع افتها از مخزن تا لحظه خروج از دریچه می‌باشد. این افت‌ها شامل افت در دهانه ورودی، افت در طول مسیر و افت خروجی می‌باشد.

افت در دهانه ورودی بستگی به شکل دهانه ورودی دارد. ضریب افت در دهانه وردی (K_{in}) برای دهانه‌های ورودی لبه تیز ۰٫۵ و برای دهانه های شیپوری حدود ۰٫۰۵ است. که به صورت رابطه (۱۹) قابل ارائه است.

$$h_{in} = K_{in} \frac{v^2}{2g} \quad (19)$$

افت در طول مسیر به طول مسیر L، قطر لوله D و سرعت جریان در لوله v بستگی دارد در بسیاری از مسائل از رابطه زیر که بر اساس معادله مانینگ استخراج شده است استفاده می‌شود.

$$h_f = S_f L = 19.6 n^2 \frac{L}{R_h^{4/3}} \times \frac{v^2}{2g} \quad (20)$$

در این رابطه R_h شعاع هیدرولیکی لوله و برابر یک چهارم قطر لوله است. ضریب زبری مانینگ (n) برای مجرای سنگی بدون پوشش ۰٫۰۳۵ است. معادله (۲۰) در سیستم متریک می‌باشد.

افت خروجی نیز همانند سایر افت‌ها به صورت ضریبی از هد سرعت به صورت زیر تعریف می‌شود:

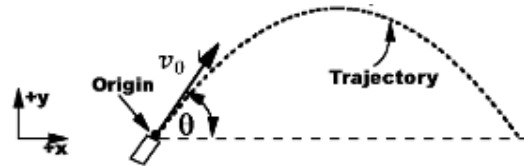
$$h_{out} = k_{out} \frac{v^2}{2g} \quad (21)$$

$$y = x \tan \theta - \frac{x^2}{4kH(\cos \theta)^2} \quad (15)$$

طول پرتابه به سرعت جریان و زاویه افقی جریان در محل جدایی از جام بستگی دارد. با توجه به مقاومت هوا، آشفتگی جریان و پراکندگی جت، طول بردار سرعت جت کاهش می‌یابد که با اعمال ضریب مقاومت K، معادله پرتابه تصحیح می‌شود. مسیر تئوریک پرتابه با ضریب $K=1$ به دست می‌آید که با لحاظ اثرات مقاومت هوا و اغتشاشات جریان مقدار این ضریب بین ۰٫۸۵ الی ۰٫۹ پیشنهاد شده و H انرژی آب در محل جدایی جریان از جام می‌باشد و به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$H = h_p + h_v \quad (16)$$

در این رابطه h_p فشار پیزومتریک در محل جدایی و h_v انرژی سرعت می‌باشد.



شکل ۱۱: معادله مسیر پرتابه

بدیهی است برای ممانعت از برخورد جت خروجی از دریچه به دیواره برج آبگیر حداکثر فاصله افقی مجاز برای پیمایش جت ۱٫۵ متر می‌باشد (مطابق شکل ۹) الف و شکل (۱۱)). همچنین با توجه به اینکه جت افقی است و زاویه جت با افق برابر صفر است و با در نظر گرفتن $k=0.85$ رابطه به صورت زیر خلاصه خواهد شد.

$$y_{max} = -\frac{1.5^2}{0.85 * 4H} = -\frac{0.66}{H} \quad (17)$$

در این معادله y_{max} حداکثر ارتفاعی است که به ازای آن جت خروجی از دریچه در زمان ریزش با دیواره روبرو برخورد نمی‌کند. بنابراین جهت محاسبه

سال هشتم • شماره سی و دوم • تابستان ۱۳۹۷

چنانچه لوله در انتها به صورت واگرا باشد $k_{out} = \frac{A_1^2}{A_2^2}$ در نظر گرفته می‌شود که A_1 و A_2 سطح مقطع جریان به ترتیب در ابتدا و انتهای واگرایی هستند.

بحث و نتایج

بررسی طراحی بند و وضعیت نیروهای فشاری وارد بر بند

همانطور که بیان شد ارتفاع بند در بالادست ۹٫۸ متر و در پایین دست ۸ متر می‌باشد. این کاهش ارتفاع در روی تاج بند به صورت یکنواخت نمی‌باشد و در واقع تاج بند مسطح نبوده و به وضوح می‌توان یک تغییر ارتفاع بزرگ را روی تاج بند مشاهده کرد، به گونه‌ای که در ابتدا تاج بند به عرض ۶ متر امتداد یافته و سپس یک پله کاهش ارتفاعی به عمق ۲ متر را ایجاد کرده و در ادامه تاج بند به عرض ۷٫۵ متر ساخته شده است (شکل‌های ۵، ۷ و ۱۰). با بررسی‌های بیشتر

می‌توان دیدگاه مهندسی و درک نیروهای فشاری آب در بالادست بند، که توسط پیشینیان ما در طراحی بند لحاظ شده را مشاهده کرد. زیرا همانطور که مسلم است برآیند حداکثر نیروی فشار هیدرواستاتیک از طرف آب به بند، در یک سوم ارتفاع بند وارد می‌شود. در نتیجه نیروی وارده به قسمت‌های پایینی بیشتر از قسمت‌های بالایی است.

مطابق شکل (۶) که نمای جانبی بند را نشان می‌دهد، به واسطه اینکه در قسمت‌های بالایی نیروی فشار آب کمتر بوده است عرض سنگ چینی ۶ متر و کمتر از سایر قسمت‌هاست و بدین صورت هزینه‌های اجرای بند کاهش یافته است.

بررسی‌ها در بدترین شرایط و در کمترین عرض بند (فرض شده است که عرض موثر بند از برج آبگیر به بعد باشد). همچنین خلاصه محاسبات مهمترین نیروهای وارده بر بند هلاکو به شرح جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱- خلاصه محاسبات مربوط به نیروها و گشتاورها (نسبت به پنجه) وارده بر بند هلاکو

| عنوان نیرو | | نماد | بزرگی نیرو (تن) | بازوی گشتاور (متر) | گشتاور (M) نسبت به پنجه (تن-متر) +M در جهت عقربه‌های ساعت -M در جهت عقربه‌های ساعت |
|--|-------------------------------|-------------------|---|-----------------------|--|
| نیروهای قائم | وزن سد | W_1 | $7.5 \times 7.8 \times 2.4 = 140.4$ | 3.75 | $M_1 = +526.5$ |
| | | W_1 | $9.8 \times 4 \times 2.4 = 94$ | 9.5 | $M_2 = 893$ |
| | نیروی فشار بالابر | U | $-\frac{1}{2}(9.8 \times 11.5) \times 1 = -56.35$ | 7.66 | $M_3 = -432$ |
| | نیروی ناشی از شتاب قائم زلزله | F_w | $0.05 \times (W_1 + W_2) = 11.72$ | | $M_4 = 0.05 \times (M_1 + M_2) = -70.97$ |
| نیروهای افقی | نیروی فشار هیدرواستاتیک | P | $-\frac{1}{2}(9.8 \times 9.8) \times 1 = -48$ | 3.27 | $M_5 = -156.8$ |
| | نیروی زلزله | $F_{e1} = 0.1W_1$ | -14.4 | 3.9 | $M_6 = -56.16$ |
| | | $F_{e2} = 0.1W_1$ | -9.4 | 4.9 | $M_7 = -46$ |
| نیروی فشار هیدرودینامیکی وارده مخزن سد | P_e | 5.12 | | $M_8 = -20.67$ | |

ضریب اطمینان در مقابل واژگونی

ضریب اطمینان در مقابل لغزش

$$SF_{(over)} = \frac{\sum M_{res}}{\sum M_{over}} \quad (22)$$

$$= \frac{526.5 + 893}{432 + 70.97 + 156.8 + 56.16 + 46 + 20.67}$$

$$= 1.81$$

سال هشتم • شماره سی و دوم • تابستان ۱۳۹۷

$$1.5 = 4.14 \frac{v^2}{2g} \rightarrow v = 2.66 \text{ m/s}$$

$$H = 0 + h_v = 0 + \frac{2.66^2}{2g} = 0.36 \quad (28)$$

$$y_{\max} = -\frac{1.5^2}{0.85 * 4H} = -\frac{0.66}{0.2} = 1.83$$

مطابق روابط (۲۷) و (۲۸) در ارتفاع ۱٫۸۳ متری نسبت به اولین دریچه و به عبارت دیگر در فاصله ۶٫۲۷ = y_{\max} - ۸٫۱ متری از کف بند، جت آب به دیواره برج برخورد می‌کند. همانطور که ذکر شد به واسطه اثرات مقاومت هوا، آشفستگی جریان و پخش‌شدگی جت جریان در مسیری که ۱٫۸۳ متر به صورت قائم حرکت داشته انرژی جت جریان مستهلک می‌شود.

- بررسی طراحی دومین دریچه:

بدیهی است زمانی که تراز آب به نقطه C یا ۸٫۱ متری نسبت به کف مخزن می‌رسیده، دریچه دوم باز می‌شده است. با نوشتن معادله انرژی بین این نقطه C و D خواهیم داشت:

$$8.1 + 0 + 0 = 6 + 0 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_f \rightarrow \quad (29)$$

$$2.1 = 4.14 \frac{v^2}{2g} \rightarrow v = 3.15 \text{ m/s}$$

$$H = 0 + h_v = 0 + \frac{3.15^2}{2g} = 0.5 \quad (30)$$

$$y_{\max} = -\frac{1.5^2}{0.85 * 4H} = -\frac{0.66}{0.5} = 1.32 \text{ m} \quad (31)$$

مطابق محاسبات صورت گرفته در روابط (۲۹) تا (۳۱) در ارتفاع ۱٫۳۲ متری نسبت به دومین دریچه و به عبارت دیگر در فاصله $6 - 1.32 = 4.68$ متری از کف، جت آب به دیواره برج برخورد می‌کند،

بررسی طراحی سومین دریچه:

بعد از اینکه تراز آب به سطح E رسید سومین دریچه باز می‌شود با نوشتن معادله انرژی بین E و F روابط (۳۲) تا (۳۴) حاصل خواهد شد:

$$6 + 0 + 0 = 4.2 + 0 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_f \rightarrow \quad (32)$$

$$1.8 = 4.14 \frac{v^2}{2g} \rightarrow v = 2.9 \text{ m/s}$$

$$SF = \frac{f \sum F_V}{\sum F_H} = \frac{0.65 \times (140.4 + 94 - 56.35 - 11.72)}{48 + 14.4 + 9.4 + 5.12} = \frac{0.65 \times 166.33}{76.92} = 1.36 \quad (23)$$

بررسی طراحی دریچه ها

- بررسی طراحی اولین دریچه:

دهانه ورودی به صورت لبه تیز در نظر گرفته شده و ضریب افت در آن ۰٫۵ و میزان افت مطابق رابطه (۲۴) می‌باشد.

$$h_{in} = 0.5 \times \frac{v^2}{2g} \quad (24)$$

با توجه به قطر مسیر عبور جریان در داخل دیواره برج آبگیر برابر ۱۰ سانتیمتر است میزان افت در طول مسیر به صورت رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود:

$$h_{fl} = 19.6 \times 0.035^2 \frac{0.5}{\left(\frac{0.10}{4}\right)^{4/3}} \times \frac{v^2}{2g} = 1.64 \times \frac{v^2}{2g} \quad (25)$$

ضریب افت در دهانه خروجی ۱ فرض شده است و رابطه افت دهانه خروجی مطابق رابطه (۲۶) تعریف می‌شود.

$$h_{in} = \frac{v^2}{2g} \quad (26)$$

با نوشتن معادله انرژی بین سطح مخزن (فرض شده است تراز ارتفاع تا ۹٫۶ متری نسبت به کف مخزن بالا آمده است) و نقطه خروج جریان از اولین دریچه نقاط A و B در شکل (۱۰) خواهیم داشت.

$$9.6 + 0 + 0 = (8.1) + 0 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_f \rightarrow \quad (27)$$

$$1.5 = \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_f$$

$$= \frac{v_2^2}{2g} + 1.64 \frac{v^2}{2g} + 1 \frac{v^2}{2g} + 0.5 \times \frac{v^2}{2g} \rightarrow$$

سال هشتم • شماره سی و دوم • تابستان ۱۳۹۷

$$H = 0 + h_v = 0 + \frac{2.2^2}{2g} = 0.43 \quad (33)$$

$$y_{\max} = -\frac{1.5^2}{0.85 * 4H} = -\frac{0.66}{0.43} = 1.51 \quad (34)$$

در نتیجه در ارتفاع ۱,۵۱ متری نسبت به سومین دریچه و به عبارت دیگر در فاصله ۲,۶۹=۱,۵۱-۴,۲ متری از کف جت آب به دیواره برج برخورد می‌کند.

بررسی طراحی چهارمین دریچه:

بعد از اینکه تراز آب به سطح G رسید سومین دریچه باز می‌شود با نوشتن معادله انرژی بین G و H رابطه (۳۵) حاصل خواهد شد.

$$4.2 + 0 + 0 = 2.5 + 0 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_f \rightarrow \quad (35)$$

$$1.7 = 4.14 \frac{v^2}{2g} \rightarrow v = 2.83 \text{ m/s}$$

$$H = 0 + h_v = 0 + \frac{2.5^2}{2g} = 0.41 \quad (36)$$

$$y_{\max} = -\frac{1.5^2}{0.85 * 4H} = -\frac{0.66}{0.41} = 1.6 \quad (37)$$

مطابق محاسبه صورت گرفته در روابط (۳۵) تا (۳۷) در ارتفاع ۱,۶۹ متری نسبت به چهارمین دریچه و به عبارت دیگر در فاصله ۰,۹=۱,۶-۲,۵ متری از کف جت آب به دیواره برج برخورد می‌کند. در جدول ۲ نتیجه محاسبات بالا به صورت مختصر بیان شده است

جدول ۲- خلاصه نتایج بررسی برخورد جت خروجی از

دریچه آبگیر با دیواره برج آبگیر

| شماره دریچه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ |
|--|------|------|------|-----|
| فاصله دریچه نسبت به کف (m) | ۸,۱ | ۶ | ۴,۲ | ۲,۵ |
| محل برخورد جت خروجی با دیواره روبرو نسبت به کف (m) | ۶,۲۷ | ۴,۶۸ | ۲,۶۹ | ۱,۶ |

بررسی مکان‌یابی بند

از لحاظ مهندسی مکان بند بسیار مناسب انتخاب شده است. بند در قسمتی از رودخانه که دو رشته کوه به هم نزدیک شده‌اند، ساخته شده است. پی اصلی بند بر روی صخره‌های طبیعی کوهستان قرار دارد. در شکل (۱۲) در تصویر ماهواره‌ای مشخص است که بند در محل نزدیکی دو رشته کوه به یکدیگر احداث شده است. جهت جریان با پیکان نشان داده است و انتهای پیکان محل قرارگیری بند می‌باشد. این ژرف‌نگری نه تنها در این بند بلکه آنچنان که در منابع (۱۶) آمده است روشن می‌سازد که ایرانیان در انتخاب سد به سه عامل مهم مکان مناسب، شالوده و پی و مواد تجهیزات ساخت توجه داشته‌اند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با مرور منابع در خصوص سابقه تاریخی بند، بازدیدهای میدانی متعدد و بررسی‌های کارشناسی، محاسبات مهندسی و مصاحبه با افراد آشنا به منطقه بند تاریخی هلاکو مورد مطالعه قرار گرفت. بند هلاکو در ارتفاع ۹,۶ در بالادست و ارتفاع ۸ متر در پایین دست، در طول ۱۳,۵ متر احداث شده است. در بالادست عرض بند در تاج ۴۳ متر و در کف ۱۳ متر می‌باشد. در پایین دست عرض بند در تاج ۳۲ متر و در کف ۱۲ متر می‌باشد. نتیجه محاسبات ثنوری نشان داد معیارهای پایداری بند در مقابل لغزش و واژگونی به ترتیب ۱,۳۶ و ۱,۸۶ بوده که در دامنه قابل پذیرش قرار دارد. آنچه مسلم است و در نتیجه‌ی این مطالعه می‌توان بیان کرد، این هست که ساخت بند هلاکو تکیه بر گروه مهندسی واقف بر علم هیدرولیک دارد به گونه‌ای که در احداث آن تمامی ملزومات طراحی، مکانیابی، شرایط محیطی در نظر گرفته شده است. انتخاب محل سد از لحاظ تنگی دره و استقامت کوه‌ها به خوبی مراعات شده است. شرایط شالوده‌ریزی و احداث پی بند بر روی صخره‌های طبیعی کوهستان، استفاده از مصالح رودخانه‌ای در دسترس و ساخت بند به صورت دو تکه (ارتفاع متفاوت بالادست و پایین دست) هزینه‌های

حذف سرریز، نوآوری و روشی هوشمندانه است. همه موارد بیان شده در بالا که تخصص چند رشته‌ای را تداعی می‌کند سبب شده که بند هلاکو با بیش از ۷۰۰ سال عمر همچنان به حیات ادامه دهد.

احداث بند را کاهش داده است. انتخاب آبگیر تونلی در کف بند با توجه به شرایط تکیه‌گاه‌ها و موقعیت بند طراحی مهندسی بند را توجیه‌پذیر می‌کند. همچنین در نظر گرفتن صخره طبیعی کوهستان به منظور عبور جریان‌های طغیانی مزاد بر ظرفیت مخزن با هدف

منابع

- الفتی، ه. ۱۳۷۴. تاریخ کشاورزی و دامپروری در ایران، جلد اول، چاپخانه سپهر، تهران.
- باستانی پاریزی، م. ۱۳۵۵. تاریخ شاهی قراختائیان، اثر مؤلفی ناشناخته در قرن هفتم، به‌اهتمام و تصحیح محمد ابراهیم باستانی پاریزی، انتشارات بنیاد فرهنگ ایران، تهران.
- باستانی پاریزی، م. ۱۳۶۷. سنگ هفت قلم بر مزار خواجهگان هفت چاه (کتاب هفتم از هفت کتاب). چاپ سوم، انتشارات علم، تهران، ص ۲۹۸-۲۹۹.
- باستانی پاریزی، م. ۱۳۶۹. زیر این هفت آسمان، چاپ چهارم، انتشارات جاویدان، تهران، ص ۱۱۷.
- باستانی پاریزی، م. ۱۳۸۰. نوح هزار طوفان، چاپ دوم، نشر نامک، تهران، ص ۴۱۲.
- باستانی پاریزی، م. ۱۳۸۲. حماسه کویر، چاپ اول، نشر علم، تهران، ص ۳۲۸.
- بربر، م. ۱۳۹۱. دانش طراحی و احداث سدها و مخازن، کتاب ماه علوم و فنون، دوره دوم، سال ششم، شماره ششم، ۵۸-۶۵.
- سازمان نقشه برداری کشور، ۱۳۷۸. نقشه زمین شناسی کرمان، سالاریان، م.، محرابی، ط.، صفری، ع. و قره‌گزلو، م. ۱۳۹۲. سد عباس آباد بهشهر در مازندران، اولین همایش ملی سازه‌های آبی و آبیاری، گرگان
- ضیائی، ع. ۱۳۸۵. میراث فرهنگی قراختایان کرمان دانشگاه فرهنگی ترکان خاتون، مجله مطالعات ایرانی مرکز تحقیقات فرهنگ و زبانهای ایرانی، سال پنجم، شماره دهم، ۱۲۷-۱۵۸
- عنایت الله، ر.، کورس، غ.، شوشتری، ا. و انتظامی، ع. ا. ۱۳۵۰. آب و فن آبیاری در ایران باستان؛ گردآوری، انتشارات وزارت آب و برق، تهران، ص ۲۴۵
- United States Bureau of Reclamation. 1987. Design of small dams, 3rd Ed., United States Department of the Interior, United States Government Printing Office, Denver, 365-387.
- Gelda, R.K. and Effler, S.W. 2007. Simulation of Operations and Water Quality Performance of Reservoir Multilevel Intake Configurations, Journal of Water Resources Planning and Management 133(1):78-86
- Google Earth(2015)
- Khorasanizadeh, Sh. 2008. Novel hydraulic structures and water management in Iran: A historical perspective ,Regional center on urban water management, Tehran, Iran.
- Safavi,K., Karaminejad, A.R., Jamali, H. Sarkardeh, H.A and Zarrati, A.R. 2009. Hydraulic design a multi-level intake structure, Advances in Water Resources and Hydraulic Engineering
- Vermeyen, T. B. 1998. First Year Performance of the Shasta Dam Temperature Control Device. Exploring our New Frontiers, The Best of Hydro Vision 98, Reno, CA, July 28-31.
- Vermeyen, T. B. 1999. An Overview of the Design Concept and Hydraulic Modeling of the Glen Canyon Dam Multi-Level Intake Structure. http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/tvermeyen/watpow99/watpow99.

- Woodward, P. K. and Griffiths, D. V.1996, Comparison of the pseudo-static and dynamic behaviour of gravity retaining walls, Geotechnical & Geological Engineering, Volume 14, Issue 4, pp 269–290
- Wu, S.Y., Cao, W., Wang, H .M., sun, S .K., and chen, Q. W.2011. Research on the multi-level intake water temperature effect of the Yalong River Jinping-I hydropower project. SciChina Tech Sci, 54(Suppl. 1): 125-132
- Zanger, C. N. 1952. Hydrodynamic pressures on Dams due to horizontal Earthquake Effects, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No.11.

An Engineering Investigation of Historical Helakoo Dam in Seyyedi district in Kerman Province

Farzaneh Qaderi^۱, Mohammad Javad Khanjani^۲

Abstract:

Historical Helakoo dam with more than 700 years age is located in Seyyedi district that is 16km far from north of Kerman city .This dam was constructed for supplying the Agricultural water and Flood Control on Seyyedi river. The dam height in upstream is varied between 9.6m-10m and in downstream is decreased to 8m. The length of dam crest in upstream is 43 meter and in downstream is 32. In this study the dam stability was investigated with review of the literature, Field visits, measurement and theoretical calculation. The results of this study were shown that the technical instruments, environmental condition, Site Suitable Location, necessary lateral structures were considered. The dam remarkable lateral structures are Include emergency weir, intake tower and intake mouths. In addition the result showed that the dam stability criteria's include of Overturning and Sliding stability are 1.86 and 1.36 respectively that is in the acceptable domain

Key words: Helachoo dam, historical structure, Water reserve, History of Water and Irrigation in Kerman.

^۱PHD Candidate, Water Structure Department, Shahid Bahonar University Of Kerman, Kerman, Iran

Email : gaderi_f@alumni.ut.ac.ir, tel:+989138633941

^۲Professor, Civil Engineering Department, Shahid Bahonar University Of Kerman, Kerman, Iran,

Email : khangani@yahoo.com