تعیین قطر بهینه پنستاک در نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای میرآباد

مسعود امیدوار طهرانی

کارشناس سازه‌های هیدرولیکی، شرکت مهندسین مشاور طوس آب، مشهد، ایران

Momidvart@yahoo.com

چکیده

با توجه به هزینه زیاد طرح‌های تلمبه ذخیره‌ای خراسان رضوی بهینه کردن قطر پنستاک هزینه‌های طرح را کاهش و نسبت سود به زیان را افزایش خواهد داد. برخلاف نیروگاه‌های برقابی کوچک هزینه پنستاک در نیروگاههای تلمبه‌ذخیره‌ای درصد کمی از هزینه‌های کل طرح می‌باشد. اما قطر پنستاک در هزینه‌ها و درآمدهای کل طرح تاثیر مستقیم دارد. در این مقاله سعی شده است تا تاثیر قطر پنستاک و مسیر انتقال نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای میرآباد خراسان رضوی در درآمد و هزینه کل طرح بررسی گردد. برای این منظور ضمن انتخاب قطر پنستاک و احتساب افتهای مسیر، توان تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ محاسبه می‌شود. سپس هزینه‌های سرمایه‌ای سد، تاسیسات و تجهیزات نیروگاه و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری سالیانه برای سد، تجهیزات هیدرمکانیکال و تجهیزات هیدروالکتریکی براساس توان تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ برآورد می‌شود. منافع مستقیم احداث نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای از طریق جایگزینی نیروگاه گازی که قادر به تولید برق معادل نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای هستند محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: " قطر بهینه پنستاک"، "نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای"، " توان تولیدی توربین "، "توان مصرفی پمپ"

Determination of Penstock Optimum Diameter in the Mirabad Pump-Storage Hydropower

M. Omidvar Tehrani

Expert of Hydraulic Structures Engineering

Toossab Consulting Engineering, Mashhad, Iran

Abstract

With respect to high cost of pump-storage projects, optimization of penstock diameter will decreases the project cost and increases the ratio of benefit to cost. In pump- storage hydropower, unlike hydropower plants, penstock cost will be small percent of total costs. But penstock diameter has direct effect on total costs and benefits of project. In this paper we effort to calculate direct effect of penstock diameter and conveyance route in Khorasan Razavi Mirabad pump- storage hydropower on total costs and benefits of project. For this scope, after selection of penstock diameter and determine of rout losses, turbine output power and pump input power will calculate. Then, dam, powerhouse installations and equipments stock costs, also dam annual maintenance and exploitation, hydro mechanical and hydro electrical equipments costs will be determined with respect to turbine output power and pump input power. Direct benefit of pump- storage hydropower has been calculated with substitute a gas powerhouse that produces the same power.

Key Words: "*Penstock", "Optimum Diameter", "pump-storage", "hydropower"*

مقدمه

نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای از جمله سازه‌های مهم برای تولید انرژی در مناطقی می‌باشند که جریان دائمی آب با حجم رواناب زیاد وجود ندارد. با توجه به هزینه بالای احداث این سازه‌ها نسبت به نیروگاه‌های آبی، کاهش هرچه بیشتر هزینه‌ها باعث توجیه اقتصادی پروژه خواهد شد. یکی از مواردی که می‌تواند سود طرح را بالا و هزینه طرح را کاهش دهد، انتخاب قطر بهینه پنستاک می‌باشد. هزینه پنستاک نسبت به هزینه کل طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای بسیار کم می‌باشد. اما انتخاب قطر مناسب برای پنستاک و مسیر انتقال رابطه مستقیم با نسبت سود به زیان کل طرح دارد. در این مطالعه روش تعیین قطر بهینه پنستاک و مسیر انتقال در نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای خراسان ارائه گردیده است.

در نیروگاه‌های کوچک با مسیر انتقال طولانی درصد زیادی از هزینه‌های طرح مربوط به مسیر انتقال و پنستاک خواهد بود. در نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای هزینه مسیر انتقال و پنستاک درصد کمی از هزینه کل طرح می-باشد. لذا در طرح‌های تلمبه ذخیره‌ای خراسان بهینه کردن قطر پنستاک به این خاطر انجام شده است که تغییر در قطر پنستاک تاثیر مستقیم در هزینه‌ها و درآمدهای طرح خواهد داشت. افزایش قطر پنستاک با میزان دبی ثابت، باعث کاهش افت مسیر، افزایش توان تولیدی نیروگاه و کاهش توان مصرفی پمپ خواهد شد. با افزایش توان تولیدی نیروگاه، از یک طرف هزینه‌های ساخت طرح افزایش و از طرف دیگر درآمد کل طرح نیز افزایش می‌یابد. با کاهش توان مصرفی پمپ میزان هزینه‌های طرح نیز کاهش می‌یابد. در نهایت تفاوت سود منهای زیان طرح در دوره ۵۰ ساله معیار انتخاب قطر پنستاک و مسیر انتقال خواهد بود. در این مقاله انتخاب قطر بهینه پنستاک در طرح‌های تلمبه ذخیره‌ای خراسان و در ساختگاه برتر میرآباد با درنظر گرفتن تمامی درآمدها و هزینه‌ها در دوره طرح و در مقایسه با احداث یک نیروگاه گازی سیکل ترکیبی تشریح شده است [1]، [2]، [3]، [4]، [5]، [6].

تعیین انرژی تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ

با انتخاب قطرهای مختلف برای مسیر انتقال و پنستاک، که در مطالعات مرحله شناخت ثابت درنظر گرفته شده، افتهای مسیر محاسبه شده است. افتهای مسیر شامل افت آشغالگیر، افت ورودی، افت طولی، افت خمها، افت پمپ توربین و افت خروجی می‌باشد. دبی طراحی توربین برابر با ۱۳۲ متر مکعب بر ثانیه، دبی طراحی پمپ برابر با ۱۰۶ متر مکعب بر ثانیه و هد طراحی ناخالص برابر با ۷۹۵ متر می‌باشد. هد ناخالص از رابطه ۱ بدست آمده است.

هد ناخالص = ۰/۵ * (هد ناخالص حداکثر – حد ناخالص حداقل) (۱)

هد ناخالص حداکثر برابر با تراز حداکثر بهره‌برداری مخزن بالا (۲۴۲۸ متر از سطح دریا) منهای تراز حداقل مخزن پائین (متر از سطح دریا ۱۶۱۸) می‌باشد. هد ناخالص حداقل برابر با تراز حداقل بهره‌برداری مخزن بالا (۲۴۰۰ متر از سطح دریا) منهای تراز حداکثر مخزن پائین (۱۶۲۱ متر از سطح دریا) می‌باشد. هد خالص یا هد اسمی توربین برابر با هد ناخالص منهای افتهای مسیر و هد طراحی پمپ برابر با هد خالص باضافه دوبرابر افتهای مسیر می‌باشد.

انرژی تولیدی توربین از رابطه ۲ و توان مصرفی پمپ بر حسب MW از رابطه ۳ بدست می‌آید.

$$P = 9810 * \eta * Q_T * \frac{H_e}{1*10^6} \quad (۲)$$

$$P = 9810 * Q_P * \frac{H_e}{\eta*1*10^6} \quad (۳)$$

در این روابط η راندمان پمپ توربین برابر با ۰/۹، Q_T دبی توربین، Q_P دبی پمپاژ و H_e هد خالص توربین یا پمپ می‌باشد. در جدول ۱ خلاصه محاسبات تعیین ظرفیت تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ برای قطرهای مختلف پنستاک نشان داده شده است [7].

جدول ۱: تعیین ظرفیت تولیدی توربین و توان مصرفی پمپ برای قطرهای مختلف پنستاک

حالت	دبی طراحی توربین	قطر پنستاک	هد ناخالص	افت کل	هد خالص توربین	انرژی تولیدی توربین	زمان کارکرد توربین	انرژی تولیدی سالیانه	دبی کل پمپاژ	هد طراحی پمپ	توان مصرفی کل	زمان کارکرد پمپ	انرژی مصرفی سالیانه
	cms	m	m	m	m	MW	hr	GWH	cms	m	MW	hr	GWH
۱	۱۳۲	۴.۶۰	۷۹۴.۷	۳۱.۰	۷۶۴	۸۹۰	۴	۱۲۹۹	۱۰۶	۸۲۶	۹۵۴	۵	۱۷۴۱
۲	۱۳۲	۵.۵۰	۷۹۴.۷	۱۲.۵	۷۸۲	۹۱۲	۴	۱۳۳۱	۱۰۶	۸۰۷	۹۳۳	۵	۱۷۰۲
۳	۱۳۲	۶.۵۰	۷۹۴.۷	۵.۵	۷۸۹	۹۲۰	۴	۱۳۴۳	۱۰۶	۸۰۰	۹۲۵	۵	۱۶۸۷
۴	۱۳۲	۷.۴۰	۷۹۴.۷	۳.۱	۷۹۲	۹۲۳	۴	۱۳۴۷	۱۰۶	۷۹۸	۹۲۲	۵	۱۶۸۲

خلاصه هزینه‌های سرمایه‌ای طرح

براساس برآوردهای انجام شده در بخش فنی هزینه‌های سرمایه‌ای سد، تاسیسات و تجهیزات نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در ساختگاه میرآباد بشرح جدول ۲ می‌باشد [8].

جدول ۲: هزینه‌های سرمایه‌ای سد، تاسیسات و تجهیزات نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای در ساختگاه میرآباد (میلیارد ریال)

گزینه	هزینه مخزن پائین		هزینه مخزن بالا	هزینه نیروگاه و مسیر انتقال			هزینه خسارت مخزن	هزینه جاده دسترسی	هزینه راه های کارگاهی	کل ساختمانی با ضرایب	هزینه کل طرح
	ساختمانی با ضرایب	تجهیزات	ساختمانی با ضرایب	ساختمانی با ضرایب	تجهیزات نیروگاه	تهیه و نصب پنستاک					
۱	۶۴۶	۵۰	۳۶۲	۶۷۹	۴۴۵۰	۳۸۶	۲۵	۱۵۸	۵۹	۱۹۰۴	۶۸۱۶
۲	۶۴۶	۵۰	۳۶۲	۷۰۴	۴۵۵۸	۵۵۳	۲۵	۱۵۸	۵۹	۱۹۲۹	۷۱۱۵
۳	۶۴۶	۵۰	۳۶۲	۶۹۷	۴۵۹۹	۷۷۳	۲۵	۱۵۸	۵۹	۱۹۲۲	۷۳۶۹
۴	۶۴۶	۵۰	۳۶۲	۵۸۱	۴۶۱۳	۹۹۵	۲۵	۱۵۸	۵۹	۱۸۰۶	۷۴۸۹

هزینه تهیه و نصب هر واحد تجهیزات نیروگاه با توجه به ظرفیت نصب نیروگاه متغیر خواهد بود. بنابراین در هر ساختگاه هزینه تجهیزات به ازای هرکیلو وات متفاوت در نظر گرفته شده است. در ساختگاه میرآباد هزینه تجهیزات به میزان ۵۰۰ دلار برای هر کیلو وات نصب در نظر گرفته شده است. قیمت پنستاک برای هر کیلو وزن آن ۳ هزار تومان منظور شده است. وزن پنستاک به قطر و ضخامت آن و وزن مخصوص فولاد (۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب) بستگی دارد. ضخامت پنستاک از رابطه ۴ بدست می‌آید [9].

$$t = \frac{P*D}{2*\sigma}(1-\lambda) \qquad (۴)$$

در این رابطه t: ضخامت به cm، P حداکثر هد در مجرا شامل ضربه قوچ بر حسب kg/cm^2، D قطر پنستاک به cm، σ تنش تسلیم مجاز فولاد ($۲۴۰۰\ kg/cm^2$) و λ درصد سهم مشارکت سنگ در تحمل فشار داخلی پنستاک می‌باشد. درصد مشارکت سنگ به مدول ارتجاعی فولاد، ضریب انبساط حرارتی فولاد، تغییرات درجه حرارت، مدول ارتجاعی بتن، قطر حفاری تونل، ضریب تغییر شکل پلاستیک سنگ، مدول ارتجاعی سنگ اطراف و عدد پواسون سنگ بستگی دارد. در ساختگاه میرآباد درصد مشارکت سنگ ۰/۵ محاسبه شده است.

در مواردی شامل تجهیزات تلمبه و توربین و تجهزات نیروگاه گازی معادل، عمر مفید تجهیزات کمتر از دوره بررسی اقتصادی طرح در ۵۰ سال است. بنابراین با توجه به عمر مفید آن ها (۲۵ سال برای پمپ و توربین نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای و ۱۲ سال برای نیروگاه گازی) در روند نقدینگی و محاسبه شاخص‌های اقتصادی هزینه جایگزینی با در نظر گرفتن دوره ساخت در محاسبات اقتصادی منظور شده است. هزینه مشاور و کارفرما معادل ۱۰ درصد هزینه های ساختمانی طرح محاسبه و در هزینه های سرمایه‌ای منظور شده اند.

هزینه‌های بهره برداری و نگهداری سالانه سد و نیروگاه‌ها

هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری سالیانه برای سد، تجهیزات هیدرمکانیکال و تجهیزات هیدروالکتریکی بصورت درصدی از هزینه های سرمایه گذاری در سد، تاسیسات و تجهیزات و بر اساس توصیه سازمان توسعه برق و نیروی کشور و به شرح زیر محاسبه شده است:

- هزینه بهره برداری و نگهداری سالانه سد و تاسیسات مربوطه ۰/۶ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه.
- هزینه بهره برداری و نگهداری سالانه تاسیسات هیدرومکانیکال معادل ۱ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه.
- هزینه بهره برداری و نگهداری سالانه تجهیزات برق آبی نیروگاهی معادل ۲ درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه.

منافع طرح

در این مطالعات منافع مستقیم احداث هر یک از نیروگاه های تلمبه ذخیره‌ای از طریق جایگزینی نیروگاه گازی که قادر به تولید برق معادل نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای هستند محاسبه شده است. بدین منظور هزینه‌های اجرا، جایگزینی و بهره برداری و نگهداری ثابت و متغیر نیروگاه‌های گازی معادل محاسبه و به عنوان درآمدهای ناشی از احداث سد و نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای، منظور شده است. در محاسبات هزینه نیروگاه گازی معادل از مبانی زیر استفاده شده است:

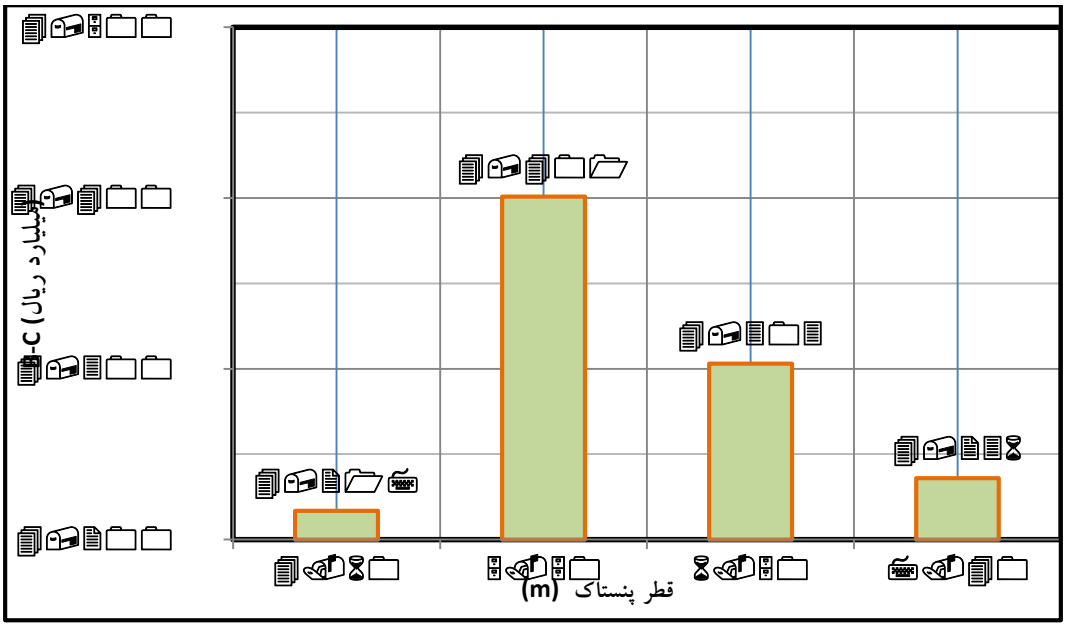
- نیروگاه گازی معادل در ۱۰ ٪ دوره بهره‌برداری به خاطر از کار افتادگی تاسیسات کار نمی‌کند.
- میزان انرژی تولیدی بر اساس مدل بهینه‌سازی، با لحاظ کارکرد ۴ ساعت، ضریب کارکرد ۰/۱۷ و سطح اعتمادپذیری ۹۵ درصد محاسبه شده است.

بنابراین نیروگاه جایگزین طرح، نیروگاه گازی بزرگ خواهد بود و با توجه به پارامترهای ظرفیت نصب، انرژی تولیدی سالیانه، کل هزینه سرمایه‌گذاری، بهره‌برداری و نگهداری سالانه (ثابت و متغیر)، هزینه سوخت سالانه و کل هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سالانه برای نیروگاه جایگزین در هر ساختگاه محاسبه و بعنوان درآمد نیروگاه‌های تلمبه ذخیره‌ای در نظر گرفته شده است.

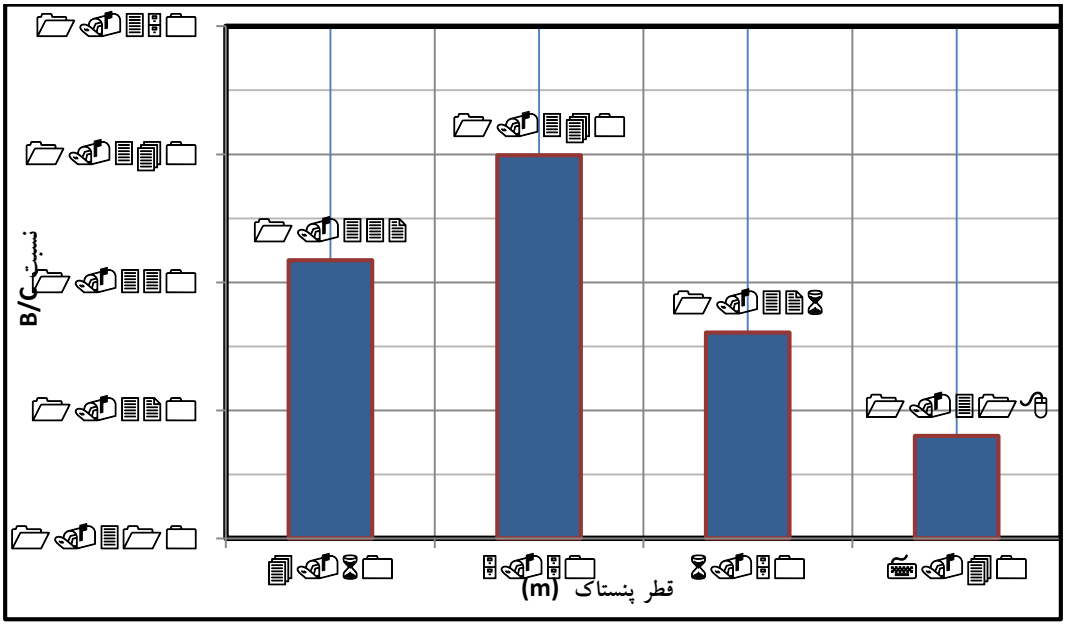
در آخرین گام با تکنیک‌های اقتصاد مهندسی و تولید، معادل ارزش فعلی هزینه‌ها و منافع طرح با نرخ بهره ۸ درصد محاسبه و ارزیابی اقتصادی گزینه با محاسبه B-C و B/C هزینه و درآمد هرکیلو وات برق تولیدی و نرخ بازگشت سرمایه انجام شده است.

نتیجه‌گیری

با استفاده از روش ذکر شده در این مقاله، قطر بهینه پنستاک با تاثیر کلیه عوامل تعیین کننده در سود و زیان طرح بدست آمده است. سود و زیان در طرح تلمبه ذخیره‌ای با مقایسه جایگزینی یک نیروگاه گازی سیکل ترکیبی بدست آمده است. همانطور که در جدول ۲ مشهود است، هزینه پنستاک تنها حدود ۱۰ ٪ هزینه‌های سرمایه‌ای طرح می‌باشد، اما تاثیر مستقیم در سود و زیان کل طرح دارد. در شکل ۳ نمودار میزان B-C کل طرح برای قطرهای مختلف پنستاک و در شکل ۴ نمودار نسبت B/C کل طرح برای قطرهای مختلف پنستاک نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار میزان B-C کل طرح برای قطرهای مختلف پنستاک



شکل ۴: نمودار میزان B/C کل طرح برای قطرهای مختلف پنستاک

مقدار شاخص B-C نشان دهنده درآمد خالص طرح در دوران بهره‌بردای می‌باشد و معیار مناسبی برای انتخاب گزینه برتر از بین گزینه‌های اقتصادی می‌باشد. لذا قطر بهینه پنستاک در ساختگاه میرآباد ۵/۵ متر در مطالعات شناخت انتخاب شده است.

مراجع

[1]C. Voetsch and M. H. Fresen; “Economic Diameter of Steel Penstocks”; Transaction, ASCE, vol. 103, 1938, Paper No. 1982.

[2]H. Doolittle; “A Method for the Economic Design of Penstocks”; Transactions, ASME, vol. 46, 1924, Paper No. 1946.

[3]E. Purwati, H. Indra Wahyun; “OPTIMIZATION ON PENSTOCK DIMENSION OF AMPEL GADING HYDRO ELECTRICAL POWER”; INTERNATIONAL JOURNAL of ACADEMIC RESEARCH, Vol. 2, No. 6. November, 2010, Part II.

[4]A. LUDIN; “Wasserkraftanlagen”; Springer Berlin, 1934.

[5]G. SARKARIA, “penstocks sized quickly”; Engineering News’ Record, August 1957.

[6] F.FAHLBUSCH; “Eine empirische Formel fur den wirtschaftlich-sten Durchmesser von Druckleitungen”; 1962.

[7] "گزارش فنی"؛ نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای محدوده برق منطقه‌ای استان خراسان؛ مطالعات مرحله شناخت؛ شرکت مهندسین مشاور طوس آب؛ بهمن ۱۳۸۹.

[8] "گزارش برآورد هزینه‌ها و مطالعات اقتصاد طرح"؛ نیروگاههای تلمبه ذخیره‌ای محدوده برق منطقه‌ای استان خراسان؛ مطالعات مرحله شناخت؛ شرکت مهندسین مشاور طوس آب؛ مهر ۱۳۹۰.

[9]S. Tekkan; “Technical standards for gates and penstocks“; Water Gate and Penstock Association, Tokyo, 1971.