Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهارم، شماره ۱، بهار ۱۳۸۷
Volume 4, No. 1, Spring 2008 (IR-WRR)
۵۹-۶۹

طراحی بهینه مخازن موج‌گیر دیفرانسیل

حمید محرمی [۱]، سیدعلی‌اکبر صالحی نیشابوری [۲]
و عبدالمهدی فروغی [۳]

چکیده

یکی از راههای کاهش پدیده ضربه قوچ در مسیر خطوط انتقال آب نیروگاههای آبی، احداث مخزن موج‌گیر در مسیر انتقال آب می‌باشد. مخازن موج‌گیر باعث استهلاک نوسانات جرم گردیده و سبب می‌شوند که امواج فشاری کمتری به داخل تونل کم فشار منتقل گردد.

طراحی مخازن موج‌گیر دیفرانسیل معمولاً شامل تعیین متناسب قطر مخزن موج‌گیر، قطر لوله رایزر، تراز سرریزی رایزر، ارتفاع مخزن موج‌گیر و سطح مقطع روزنه‌ها می‌باشد، به نحوی که عملکرد هیدرولیکی قابل قبولی را ارائه نماید.

در این مقاله مسئلهٔ طراحی مخازن موجگیر دیفرانسیل در قالب یک مسئلهٔ بهینه‌سازی فرموله شده است. در این فرمول‌بندی کل هزینه‌های اجرایی بعنوان تابع هدف اختیار شده است که باید حد اقل شود و ضوابط طراحی و الزامات شرایط هیدرولیکی مسئله بعنوان شروط مسئله بصورت قیود در مسئله وارد شده‌اند. حل مسئله به روش تابع جریمه داخلی صورت می‌گیرد. خروجی‌های مسئله عبارتند از مشخصه‌های اصلی طراحی که با آن طراحی اجزاء مخزن صورت می‌گیرد. برای نشان دادن قابلیتهای روش، مخزن موجگیر سد آپالاچیا که مشخصات آن در دسترس می‌باشد طراحی بهینه شده و با نتیجهٔ حاصل از کار محققین دیگر، مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: مخزن موجگیر دیفرانسیل، نیروگاه آبی، طراحی بهینه.

تاریخ دریافت مقاله: ۲۰ فروردین ۱۳۸۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۲۵ اسفند ۱۳۸۶

۱- دانشیار بخش عمران ، دانشکده فنی ومهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- استاد بخش عمران ، دانشکده فنی ومهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
۳- کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی شرکت توسعه آب و نیروی ایران

Optimal Design of Differential Surge Tanks

H. Moharrami [1], S. A. Salehi Neishabouri [2] and Abdolmahdi Foroughi [3]

Abstract

One way to reduce the effect, of water hammer in hydraulic conduits is to build a proper surge tank. Surge tanks dissipate the mass oscillation and reduce the transmitted pressure into hydraulic conduits.

The design of Differential Surge Tanks usually includes the proper determination of diameter of the main tank and the riser, the heights of the main tank and the riser, and the area of orifices such that they guarantee the acceptable hydraulic performance.

In this paper, the design of differential surge tanks has been formulated in the form of an optimization problem in which the objective function is to minimize the total cost. Hydraulic conditions that have to be satisfied for a good performance of the system, comprise the constraints of the problem. The optimization problem has been solved using the Barrier method. The outputs are the basic design parameters that make detailed design of surge tank possible. To show the capabilities of the method, the surge tank of Appalachia dam has been designed by the proposed algorithm and compared to similar design of other research.

Keywords: Differential Surge Tank, Hydro-plant, Optimal Design

1- Associate professor, Civil Eng. Department, Faculty of Eng., Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran, hamid@modares.ac.ir
2- Professor, Civil Eng. Department, Tarbiat Modarres University salehi@modares.ac.ir
3- M.S. Hydraulic Structures Engineering, Water & Power Development of Iran Co.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

در نیروگاههای آبی وقوع پدیدهٔ ضربهٔ قوچ در مسیر خطوط انتقال آب به توربین بخصوص در مواقعی که طول مسیر انتقال آب زیاده بوده و تغییرات بار بطور ناگهانی باشد امری اجتناب ناپذیر و قابل انتظار می‌باشد. برای مقابله با اثرات مخرب این پدیده که عمدتاً بصورت هد فشاری فوق‌العاده بر روی اتصالات و دیواره خط انتقال آب نیروگاه بروز خواهد نمود دو راه حل عمده وجود دارد: اولین راه حل که برای مسیرهای طولانی بسیار غیراقتصادی و نامعقول می‌باشد تقویت پوشش جدارهٔ لوله‌ها و مجاری انتقال آب بطور کامل از آبگیر تا توربین است، بطوریکه در مقابل افزایش فشار ناشی از ضربه قوچ مقاومت نماید. راه حل دیگر این است که بخشی از خط لوله انتقال آب که در مجاورت توربین قرار دارد و به دلایل اقتصادی معمولاً طول چندانی ندارد و شامل دریچه‌ها و اتصالات می‌باشد، در مقابل فشار مزبور تقویت گردد و مابقی آن که تونل کم فشار نامیده می‌شود و بخش اعظم مسیر انتقال آب را شامل میشود، در مقابل فشار کمتری طراحی گردد و در محل تلاقی این دو بخش، سازه‌ای بنام مخزن موجگیر تعبیه گردد که وظیفه اصلی آن استهلاک نوسانات جرم ناشی از ضربهٔ قوچ می‌باشد و از انتقال بخشی از امواج فشاری به داخل تونل یا لولهٔ کم فشار جلوگیری بعمل می‌آورد.

بطور کلی مخازن موجگیر به سه نوع ساده، دیفرانسیل و روزنه‌ای تقسیم می‌شوند. که در میان آنها نوع دیفرانسیل دارای عملکرد بهتری می‌باشد [Chaudhry,1987] و علت آن عکس‌العمل سریع‌تر در مقابله با تغییرات بار می‌باشد. در بخش بعد به اجمال مخازن موجگیر دیفرانسیل تشریح می‌شود.

۲- مخازن موجگیر دیفرانسیل

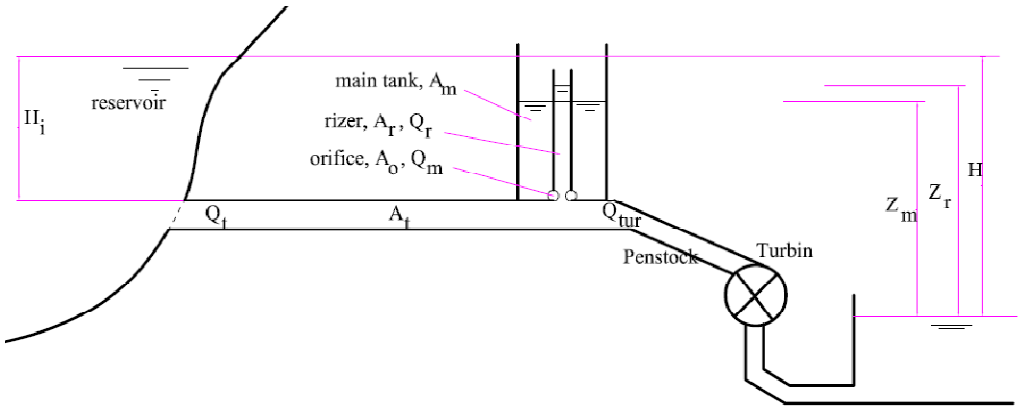
مخزن موج‌گیر دیفرانسیل همانطوریکه در شکل (۱) نشان داده شده است، یک مخزن موج‌گیر روزنه‌دار است که در وسط آن مخزنی با قطر کم بنام رایزر قرار گرفته است. ارتباط بین رایزر و مخزن اصلی (بیرونی) از طریق روزنه می‌باشد. مزیت این نوع مخزن نسبت به انواع دیگر، پاسخ سریع هیدرولیکی به امواج بوجود آمده ناشی از ضربه قوچ است. چون رایزر باریک می‌باشد، زمانی که موج در مرحله بالا رونده است رایزر عکس‌العمل آنی دارد. در همان زمان حداکثر دامنه نوسان به تراز بالای آن محدود می‌شود و هرگونه آب اضافی بداخل مخزن بیرونی سرریز می‌کند. به طور مشابه زمانی که موج در مرحله پائین رونده است آب اضافی مخزن بیرونی بداخل رایزر وارد می‌شود. [Chaudhry, 1987 and Rich, 1963].

در شکل (۱)، Z_m و Z_r ، بترتیب ارتفاع سطح آب درمخزن بیرونی و رایزر نسبت به سطح آب در پایاب، Q_{tur} دبی توربین، Q_m دبی عبوری از روزنه‌ها، Q_t دبی عبوری از تونل آبرسان، Q_r دبی عبوری از رایزر، A_O سطح مقطع روزنه‌ها، A_r سطح مقطع رایزر، A_t سطح مقطع تونل، A_m سطح مقطع مخزن بیرونی و L طول تونل می‌باشند.

همچنین H هد ناخالص روی توربین و H_i هد آب در ابتدای تونل است.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر نوسانات موج در مخازن موجگیر دیفرانسیل شامل معادلات حرکت و پیوستگی بشرح زیر می‌باشند:



شکل ۱- طرح شماتیک مخزن موجگیر دیفرانسیل

www.SID.ir

Archive of SID

$$\frac{dQ_t}{dt} = \frac{dA_t}{L}(H - Z_r + KQ_t \mid Q_t \mid) \qquad (۱)$$

در معادله فوق، Qt دبی جریان عبوری از تونل، K فاکتور افت اصطکاکی در تونل بوده و علامت مثبت نشان دهنده این است که جهت جریان از مخزن سد به سمت مخزن موجگیر خواهد بود [Chaudhry,1987 and Rich,1963].

معادله پیوستگی در محل اتصال تونل، پنستاک و مخزن موجگیر بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$Q = Q_m + Q_r + Q_{tur} \qquad (۲)$$

برای محاسبه تغییرات سطح آب در رایزر و مخزن بیرونی معادلات زیر بکار برده می‌شوند:

$$\frac{dZ_m}{dt} = \frac{Q_m + Q_w}{A_m} \qquad (۳)$$

$$\frac{dZ_r}{dt} = \frac{Q_t + Q_m - Q_{tur} - Q_w}{A_r} \qquad (۴)$$

Q_w میزان جریان عبوری از روی سرریز رایزر می‌باشد. مقادیر Q_m و Q_w را می‌توان از معادلات زیر بدست آورد:

الف) اگر ارتفاع آب در رایزر بیشتر از مخزن اصلی باشد ($Z_r > Z_m$) در این صورت:

الف-۱) دبی عبوری از روزنه برابر است با

$$Q_m = \mu_{in}\, A_0 \sqrt{2g\,(Z_r - Z_m)} \qquad (۵)$$

الف-۲) اگر تاج رایزر پالاتر از سطح آب رایزر باشد، سرریز نداریم.

$$Q_w = 0 \qquad (۶)$$

الف-۳) اگر تاج رایزر پایینتر از سطح آب رایزر باشد، سرریز برابر است با:

$$Q_w = C_d .B.\sqrt{2g}\,(Z_r - Z_c)^{3/2} \qquad (۷)$$

ب) اگر ارتفاع آب در مخزن اصلی بیشتر از رایزر باشد ($Z_m > Z_c$) در اینصورت:

ب-۱) دبی عبوری از روزنه برابر است با:

$$Q_m = -\mu_{out}\, A_0 \sqrt{2g(Z_m - Z_r)} \qquad (۸)$$

ب-۲) اگر تاج رایزر پالاتر از سطح آب مخزن باشد، سرریز نداریم.

$$Q_w = 0 \qquad (۹)$$

ب-۳) اگر تاج رایزر پایینتر از سطح آب مخزن اصلی باشد، سرریز برابر است با:

$$Qw = -C_d .B.\sqrt{2g}\,(Z_m - Z_c)^{3/2} \qquad (۱۰)$$

در معادلات فوق، Z_c ارتفاع تاج سرریز رایزر نسبت به سطح آب در پایاب و B محیط خیس شده سرریز می‌باشند، μ_{in} و μ_{out} به ترتیب ضرائب جریان ورودی و خروجی روزنه هستند و C_d ضریب جریان عبوری از سرریز رایزر است.

ج) اگر Z_m و Z_r هر دو بزرگتر از Z_c باشند، مخزن بیرونی و رایزر دارای سطح آب یکسان خواهند بود و در نتیجه معادلات (۳) و (۴) با هم برابر و سطح مخزن موجگیر برابر سطح رایزر و مخزن بیرونی خواهد شد، یعنی $A_s=A_m+A_r$. همچنین می‌توان نوشت:

$$\frac{dZ_m}{dt} = \frac{dZ_r}{dt} \qquad (۱۱)$$

$$\frac{dZ_r}{dt} = (Q_t - Q_{tur}) / As \qquad (۱۲)$$

۴- سابقهٔ پژوهش

هر چند مطالعات زیادی در مورد مخازن موجگیر انجام شده است، اما متأسفانه تحقیقات بسیار اندکی در زمینهٔ بهینه‌سازی آن صورت گرفته است. شاید اولین حرکت به سمت طرح بهینه توسط Rich (1963) انجام شده باشد. او برای انتخاب قطر اقتصادی مخزن موجگیر، منحنی‌هایی را ارائه داد و از آن برای طراحی بهینهٔ مخزن موجگیر سد آپالاچیا استفاده نمود. منحنی‌های Rich با توجه به روابط فیمابین قطر مخزن اصلی و اندازهٔ موج برای دو حالت تقاضای بار و حذف بار و بازاء قطرهای مختلف فرض شده برای مخزن اصلی و همچنین هزینه‌های اجرایی متناظر با ارتفاع و قطر مخزن و تخمین حداقل قطر لازم برای تضمین شرایط پایداری نوسانات جرم، ترسیم می‌گردد. بدین ترتیب با توجه به منحنی هزینه‌های اجرایی می‌توان حداقل قطر مخزن موجگیر را که در عین حال شرط پایداری Thoma[1] را ارضاء نماید انتخاب نمود. مطالعات دیگری توسط Arshenevskii et al (1984) انجام شده است. ایشان با تعریف مسئله طراحی مخازن موجگیر دیفرانسیل بصورت یک مسئلهٔ بهینه‌سازی و تعیین پارامترهای طراحی و محدودیت‌های آن و استفاده از یک روش چند مرحله‌ای، اقدام به ارائه مدلی برای طراحی بهینه مخازن موجگیر دیفرانسیل نمودند. در روش ایشان پس از تعریف داده‌های ثابت مسئله و محدودیتهای طراحی که با توجه به شرایط پروژه تعیین می‌گردد مقادیر بهینهٔ متغیرهای طراحی که همان ابعاد و مشخصات مخزن موجگیر می‌باشد در چهار مرحله

www.SID.ir

Archive of SID

بدست می‌آیند. درمرحلهٔ اول با ثابت نگهداشتن همه متغیرها و تغییرسطح مقطع روزنه (A_o)، سطح روزنه ای که بهترین عملکرد هیدرولیکی را بدست دهد (A_o بهینه اولیه) بدست می آید. در مرحله دوم با تغییر در قطر مخزن و یافتن A_o متناظر با آن ، زوج مقادیر «A_o و قطر مقطع مخزن اصلی (D_s) » که بهترین رفتار را در هر دو حالت حذف بار و تقاضای بار ایجاد کند، پیدا می‌شود. در مرحله سوم این کار برایZ_c های مختلف انجام و مقادیر بهینه «A_o، D_s وتراز تاج سرریز (Z_c)» بدست می‌آید و در مرحله چهارم این کار برای D_rها انجام می شود و طرح متناظر با کمترین هزینه انتخاب می‌شود.

کار تحقیقی دیگری تحت عنوان «مدل کامپیوتری بهینه‌سازی مخازن موجگیر دیفرانسیل» توسط جلیلیان (۱۳۷۳) انجام شده است. در روش جلیلیان با در نظر گرفتن روابط پایداری و حل معادلات مربوطه با بکارگیری کامپیوتر، منحنی‌هایی ترسیم می‌شود که به کمک آن حداقل سطح مقطع مورد نیاز مخزن موجگیر و رایزر که پایداری نوسانات جرم را تضمین می‌نماید تعیین می‌شوند. در برنامهٔ کامپیوتری جلیلیان به ازای تغییر پارامترهای طراحی، میزان گسترش محدودهٔ پایداری نوسانات جرم مورد بررسی قرار می‌گیرد و طرح اقتصادی، متناظر با طرحی فرض می‌شود که «پارامترهای طراحی آن علاوه بر ایجاد کمترین حجم لازم برای مخزن موجگیر، در سریع‌ترین زمان ممکن نوسانات موج را مستهلک نماید».

همانگونه که ملاحظه می‌شود هیچکدام از روش‌های مطرح شده توسط محققین مختلف به ارائه یک طرح بهینه بدون دخالت فرضیات و قضاوت‌های مهندسی نپرداخته‌اند و در هیکدام از آنها اثرات انتقال امواج برگشتی به داخل تونل یا لولهٔ کم فشار در طراحی مخزن موجگیر ملحوظ نبوده است. لذا طراحهای بدست آمده را نمی‌توان اقتصادی‌ترین طرح و یا بعبارتی طرح بهینه دانست.

۵- بهینه‌سازی مخازن موجگیر

پارامترهای اصلی طراحی مخزن موجگیر دیفرانسیل عبارتند از قطر مخزن اصلی، قطر لوله رایزر، سطح مقطع روزنه‌ها، ارتفاع مخزن اصلی و رایزر. از آنجا که پارامترهای طراحی هم تعیین کننده رفتار هیدرولیکی مخزن موجگیر هستند و هم بر اقتصاد پروژه و هزینه‌های اجرایی اثر می‌گذارند، تعیین متناسب آنها بنحوی که هم شراط هیدرولیکی قابل قبول تامین شود هم هزینه‌های اجرایی به حداقل برسد کار دشواری است که با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. در این مقاله طراحی مخزن موجگیر دیفرانسیل در قالب یک مسئلهٔ بهینه‌سازی مقید که تابع هدف آن کل هزینه‌های اجرایی مخزن موجگیر و قیود آن ضوابط طراحی و قوانین هیدرولیکی است فرموله و حل شده است.

۶- فرموله کردن مسئله بهینه‌سازی

بطور کلی هزینه‌های طرح، شامل دو بخش عمدهٔ زیر می‌باشد:

۱- هزینه‌های سازه‌ای مربوط به احداث مخزن موجگیر

۲- هزینه‌های ناشی از مقاوم سازی خط لولهٔ کم فشار برای مقابله با امواج برگشتی ضربه قوچ.

برای به حداقل رساندن هزینه‌های سازه‌ای مخزن موجگیر باید پارامترهای طراحی آن به نحوی انتخاب گردد که ارضاء شرایط پایداری و ضوابط و معیارهای طراحی با حداقل هزینه مربوط به حفاری و احداث مخزن موجگیر امکان‌پذیر گردد. برای به حداقل رساندن هزینه‌های مقاوم‌سازی تونل کم فشار با توجه به اینکه مخازن موجگیر دیفرانسیل بخشی از امواج فشاری ضربهٔ قوچ را به داخل لولهٔ فشار منتقل می‌کند، هرچقدر خاصیت مستهلک کنندگی مخزن افزایش یابد، خاصیت انعکاس امواج ضربه قوچ به داخل لولهٔ کم فشار نیز کاهش می‌یابد. لذا پارامترهای طراحی مخزن بایستی به گونه‌ای انتخاب گردد که عملکرد هیدرولیکی مخزن در هنگام تغییرات ناگهانی بار، بهینه شده و حداقل تأثیرات نامطلوب بر روی لولهٔ کم فشار ایجاد گردد.

متغیرهای مسئله که همان پارامترهای طراحی مخزن موجگیر می‌باشند عبارتند از:

قطر مخزن موجگیر (D_s) – قطر لولهٔ رایزر (D_r) – تراز سرریزی رایزر(Z_c) – حداقل سطح آب مخزن درحالت تقاضای بار Z_{max} - حداکثر سطح آب مخزن درحالت حذف بار Z_{max} – سطح مقطع رونه‌ها (A_0).

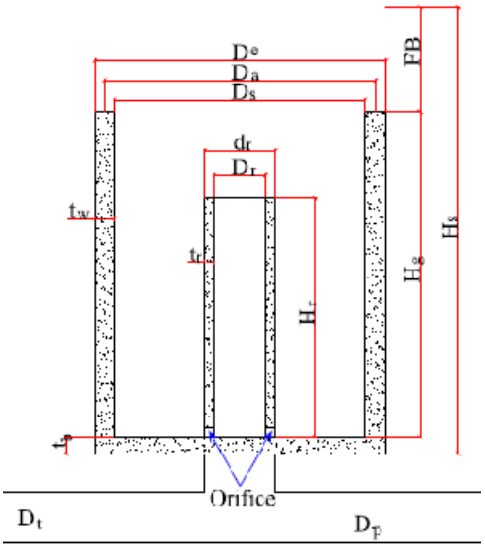
تابع هزینه ترکیبی از هزینه‌های فوق می‌باشد و آن را می‌توان به شکل $C_t = C_s + C_p$ نوشت که در آن C_t هزینه کل و C_s هزینه احداث مخزن موجگیر بوده و شامل هزینه حفاری در داخل سنگ، هزینه بتن‌ریزی جدار و کف مخزن، هزینه لولهٔ رایزر و هزینه‌های متفرقه می‌باشد. C_p هزینه احداث خط لولهٔ کم فشار است.

بسته به موقعیت مخزن موجگیر در سیستم انتقال آب و اینکه چه بخشی از آن در داخل زمین و چه بخشی از آن در سطح زمین واقع می‌گردد و همچنین نحوهٔ انتقال آب اعم از انتقال توسط تونل یا خط لوله و دیگر پارامترهای موثر در طراحی پروژه که عمدتاً توسط

www.SID.ir

Archive of SID

شرایط توپوگرافی و زمین‌شناسی و ژئوتکنیک تعیین می‌شوند، تعریف یک تابع هزینه که برای کلیه مسائل طراحی مخازن موجگیر دیفرانسیل جامعیت داشته باشد، کاری غیر عملی است ولی بهرحال آنچه در همهٔ مسائل طراحی، مشترک می‌باشد متغیرهای طراحی است، که برای تعریف تابع هزینه بکار می‌رود. طراحی بایستی با بکارگیری متغیرهای طراحی، تابع هزینه متناسب با مسئله مورد نظر را تعریف نماید. شکل ۲ یک مخزن موجگیر دیفرانسیل را بصورت شماتیک نشان می دهد. در اینجا فرض می‌گردد که مسئله طراحی شامل یک مخزن موجگیر از نوع جانسون با لولهٔ رایزر فلزی واقع در مسیر خط انتقال از آبگیر تا نیروگاه می‌باشد.



شکل ۲- جزئیات سازه ای یک مخزن موجگیر دیفرانسیل

خط انتقال بصورت لوله از نوع فولادی است. مخزن موجگیر تماماً در داخل سنگ حفاری می‌گردد و حفاری آن از پائین توسط یک تونل افقی صورت می‌گیرد، لذا هزینه‌های اجرائی با توجه به شکل ۲ بصورت زیر فرموله می‌شود.

الف- هزینه‌های مخزن موجگیر

هزینه حفاری مخزن موجگیر:

$$C_e = \alpha_1 \left[\frac{\pi D_e^2}{4} . H_s \right] \qquad (۱۳)$$

هزینه بتن ریزی جدار مخزن:

$$C_W = \beta_1 \left[\frac{\pi D_e^2}{4} . \pi D a H g \right] t_w \qquad (۱۴)$$

هزینه رایزر:

$$Cr = \gamma_S \beta_2 (\pi D_r H_r) t_r \qquad (۱۵)$$

هزینه‌های تجهیزات:

$$Ceq = 0.6(C_e + C_w + C_r) \qquad (۱۶)$$

ب- هزینه مقاوم سازی لولهٔ آبرسان:

$$C_p = \beta_3 \xi (t - t_0) L \pi D_t \qquad (۱۷)$$

که در آنها: ارتفاع مفید مخزن موجگیر:

$$H_g = Z_{max} - Z_{min} \qquad (۱۸)$$

حداقل قطر لازم برای حفاری مخزن:

$$D_e = D_s + 2t_w \qquad (۱۹)$$

ارتفاع لازم برای حفاری مخزن:

$$H_s = H_g + FB + t_w \qquad (۲۰)$$

قطر تمام شده مخزن:

$$D_a = D_s + t_w \qquad (۲۱)$$

قطر تمام شدهٔ رایزر:

$$d_r = D_r + t_r \qquad (۲۲)$$

ارتفاع رایزر :

$$H_r = Z_c - Z_{min} \qquad (۲۳)$$

قطر پنستاک(D_p) قطر لولهٔ آبرسان (D_t)

سطح مقطع مخزن موجگیر:

$$A_m = \pi \frac{D_S^2}{4}$$

سطح مقطع لولهٔ رایزر:

$$A_r = \pi \frac{D_r^2}{4}$$

t ضخامت لوله آبرسان متناظر با فشار طراحی است و t_0 ضخامت حداقل لازم برای جابجایی و کارگذاری لوله است و بر اساس ASCE(1989) و Dandekar et.al. (1983) از روابط تقریبی زیر محاسبه می‌گردد.

$$t = \frac{0.5\,P\,(100\,D_p)}{\sigma\eta - 0.6\,P} \qquad (۲۴)$$

$$t_0 = 0.0025Dp + 0.00127 \qquad (۲۵)$$

P فشار طراحی لوله بر حسب کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می‌باشد. بر پایه مطالعات Zienkiewicz (1956) می‌توان نشان داد که حداکثر P از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$P = \frac{Q}{5(M - m_4)} \left\{ 1 - \frac{\left[\sqrt{(\frac{M}{m_4}) + 8K_f Q(M - m_4)} - \frac{M}{m_4} \right]}{4K_f Q(M - m_4)} \right\} \qquad (۲۶)$$

که در آن $M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ و

$$m_1 = \frac{gA_r}{a} \quad m_2 = \frac{gA_p}{a} \quad m_3 = \frac{gA_t}{a} \quad m_4 = \frac{gA_m}{a} \qquad (۲۷\text{-}۱)$$

$$K_f = \frac{1}{2g} \left(\frac{1}{\mu_{in} A_0} - \frac{1}{A_m} \right)^2$$

www.SID.ir

Archive of SID

مجموع هزینه‌های فوق تابع هزینه را تشکیل می‌دهد و آن عبارتست از:

$$C_t = C_e + C_w + C_{eq} + C_p$$

در روابط فوق پارامترهای ثابت بصورت زیر تعریف می‌شوند:
هزینه واحد حجم حفاری مخزن موجگیر = α_1 ، هزینه واحد حجم بتن ریزی مخزن موجگیر = β_1 ، هزینه واحد وزن لوله رایزر = β_2 ، هزینه واحد وزن لوله آبرسان = β_3 ، وزن مخصوص لوله رایزر = γ_s و وزن مخصوص لولهٔ آبرسان = ζ ضریب راندمان اتصالات خط لوله = η ، سرعت حرکت امواج در آب = α ، شتاب جاذبه زمین = g ، تنش مجاز فولاد = σ و بقیه پارامترها در شکل (۲) مشخص شده اند.

اکنون مسئله بهینه‌سازی مخزن موجگیر را به صورت زیر می‌توان خلاصه نمود:

متغیرهای طراحی مسئله $X=[D_s,D_r,A_0,Z_c, Z_{max}, Z_{min}]$ را چنان بیابید که هزینهٔ کل مخزن موجگیر $F(X)=F[D_s, D_r, A_0, Z_c,$ $Z_{max}, Z_{min}]$ به حداقل برسد و قیود مسئله که بصورت توابعی از متغیرهای طراحی (X) هستند و در ۶ بند زیر تعریف می‌شوند ارضاء شوند.

۷- تعریف ریاضی قیود

محدودیتهای مذکور در قسمت قبل را به فرمهای ریاضی زیر می‌توان بیان نمود:

الف- معادلات دیفرانسیل حاکم بر نوسانات جرم در مخازن موجگیر دیفرانسیل ارضاء گردد.

$$g_1(X) \equiv \frac{dQ_t}{dt} = \frac{gA_t}{L}(H - Z_r + KQ_t|Q_t|) \qquad (۲۸)$$

$$g_2(X) \equiv \frac{dZ_m}{dt} = \frac{Q_m + Q_w}{A_m} \qquad (۲۹)$$

$$g_3(X) \equiv \frac{dZ_r}{d_t} = \frac{Q_1 - Q_m - Q_{tur} - Q_w}{A_r} \qquad (۳۰)$$

در روابط فوق توابع $g_1(X)$ و $g_2(X)$ و $g_3(X)$ در واقع همان معادلات ۱و ۳ و ۴ هستند که از معادلات حاکم بر نوسانات جرم در مخازن موجگیر دیفرانسل بدست می‌آیند.

ب- سطح مقطع خالص مخزن موجگیر باید بتواند شرایط پایداری هیدرولیکی نوسانات جرم در مخزن موجگیر را ارضاء نماید. بعبارت دیگر سطح مقطع خالص مخزن موجگیر از مقدار تعیین شده توسط رابطهٔ توما بیشتر باشد.

$$g_4(X) \equiv (A_m - A_r) \geq A_{th} \qquad (۳۱)$$

ج- تراز حداقل نوسانات سطح آب در حالت تقاضای بار از خط پیزومتریک خط انتقال کمتر نشود، بطوریکه پائین رفتن سطح آب در مخزن باعث ورود هوا به داخل پنستاک و نهایتاً ایجاد اختلال در عملکرد توربین نگردد.

$$g_5(X) \equiv Z_{min} \geq Z_a \qquad (۳۲)$$

د- حداقل نوسانات سطح آب در حالت تقاضای بار از حداکثر نوسانات سطح آب در حالت حذف بار بیشتر نگردد.

$$g_6(X) \equiv Z_{min} \leq Z_{max} \qquad (۳۳)$$

ه- ارتفاع رایزر از ارتفاع لازم برای حفاری مخزن بیشتر نشود.

$$g_7(X) \equiv H_r \leq H_g \qquad (۳۴)$$

و- میزان حداقلی برای کلیه متغیرهای طراحی تأمین گردد.

$$g_8(X) \equiv D_s > \overline{D}_s \qquad (۳۵)$$

$$g_9(X) \equiv A_O \geq A_O \qquad (۳۶)$$

$$g_{10}(X) \equiv D_r \geq \qquad (۳۷)$$

$$g_{11}(X) \equiv Z_c \geq \overline{Z_c} \qquad (۳۸)$$

در روابط اخیر $\overline{D}_s$,$\overline{A}_o$,$\overline{D}_r$,$\overline{Z}_c$,$\overline{H}_r$,$\overline{H}_g$ به ترتیب مقادیر حداقل قطر مخزن موجگیر، سطح روزنه‌ها، قطر رایزر، تراز سرریزی رایزر، ارتفاع تاج رایزر و ارتفاع مفید مخزن موجگیر می‌باشد.

۸- حل مسئلهٔ بهینه‌سازی

با بررسی توابع قید ملاحظه می‌شود که ارضای قیود g_1 و g_2 و g_3 مستلزم حل یک دستگاه معادلات دیفرانسیل می‌باشد که از حل آن مقادیر Q_t ، Z_m و Z_r بر حسب زمان و بازای متغیرهای Z_c و D_r و D_s A_0 بدست می‌آید.

از طرفی حل دستگاه معادلات فوق از طریق تحلیلی امکانپذیر نبوده و در نتیجه مقادیر Z_r و Q_t و Z_m را بصورت توابع صریحی از متغیرهای Z_c و D_r و D_s A_0 نمی‌توان بیان نمود. به عبارتی دیگر مقادیر Q_t ، Z_m و Z_r بر حسب متغیرهای Z_c و D_r و D_s A_0 تنها بصورت تابع غیر صریح قابل بیان می‌باشند. در نتیجه دستگاه معادلات دیفرانسیل فوق با استفاده از یک روش عددی مناسب باید حل شود.

www.SID.ir

Archive of SID

از آنجاکه برای حل یک مسئله بهینه‌سازی حتی‌الامکان باید کلیه قیود بصورت توابع صریح از متغیرهای طراحی قابل توصیف باشند وجود توابع غیرصریح حل مسئله را پیچیده‌تر می‌نماید، لذا برای رفع این مشکل به طریق زیر عمل شد:

از آنجائیکه متغیرهای طراحی Z_{min} و Z_{max} مقادیر حداقل و حداکثر Z_m در دو حالت تقاضای بار و حذف بار می‌باشند و با استفاده از نتایج حل معادلات دیفرانسیل فوق بدست می‌آیند، لذا می‌توان مقادیر Z_{min} و Z_{max} را بصورت توابع مشخصی از دیگر پارامترهای طراحی تعریف نمود. بعبارت دیگر:

$$Z_{min} = H^{demand}\,(Z_C\,,\, D_r, A_o, D_s) \qquad (۳۹)$$

$$Z_{max} = H^{reject}\,(Z_C\,,\, D_r, A_o, D_s) \qquad (۴۰)$$

که در آن H^{demand} و H^{reject} بترتیب توابع محاسباتی Z_{min} و Z_{max} برحسب متغیرهای Z_C , D_r, A_o, D_s می‌باشند که فعلا رابطه صریحی از آنها در دست نیست، اما در صورت یافتن آنها متغیرهای طراحی از ۶ به ۴ عدد کاهش یافته و تابع هدف به شکل زیر تبدیل می‌گردد.

$$F(X) = F(Z_C\,,\, D_r, A_o, D_s\,,\, H^{demand}(\,Z_C\,,\, D_r, A_o, D_s), H^{reject}\,(Z_C\,,\, D_r, A_o, D_s)\,) \qquad (۴۱)$$

و توابع غیرصریح g_1 تا g_3 نیز از میان توابع قید حذف می‌گردد. در نتیجه از پیچیدگی صورت مسئله تا حد زیادی کاسته شده و مسئله بهینه سازی بصورت یک مسئله ساده تبدیل می‌گردد.

به این ترتیب در این تحقیق در هر مرحله از فرآیند حل مسئله بهینه‌سازی بازاء مقادیر مشخص متغیرهای طراحی Z_C , D_r, A_o, D_s که در مرحلهٔ قبل تعیین گردیده است دستگاه معادلات دیفرانسیل g_1 تا g_3 از روش عددی حل گردیده و مقادیر Z_{min} , Z_{max} تعیین گردید و با استفاده از آن‌ها مقادیر تابع هدف و توابع قیود و همچنین گرادیان آنها به روش تفاضلات متناهی بسادگی محاسبه شدند. نهایتاً فرم استاندارد مسئله بهینه‌سازی مخازن و موجگیر دیفرانسیل بصورت زیر درآمد.

$$Min \qquad F(A_o, D_s, D_r, Z_c) \qquad (۴۲)$$

$$Subject\ to: \qquad (A_m - A_r - A_{th}) \le 0 \qquad (۴۳)$$

$$\cdot\cdot \qquad -(Z_{min} - Z_a) \le 0$$

$$-(Z_{min} - Z_a) \le 0$$

$$-(A_m - A_r) \le 0$$

$$-(Z_{min} - Z_{max}) \le 0$$

$$-(H_r - H_g) \le 0$$

$$-(D_s - D_r) \le 0$$

که در آن:

$$Z_{max} = H^{reject}\,(Z_C\,,\, D_r, A_o, D_s) \qquad (۴۴)$$

$$Z_{min} = H^{demand}\,(Z_C\,,\, D_r, A_o, D_s) \qquad (۴۵)$$

$$A_m = \frac{\pi D_S^2}{4} \qquad (۴۶)$$

$$A_r = \frac{\pi D_r^2}{4} \qquad (۴۷)$$

$$A_{th} = n\,\frac{LA_t}{2gCH} \qquad (۴۸)$$

C فاکتور افت اصطکاکی می‌باشد و پارامترهای Z_a و A_a با توجه به شرایط مسئله تعیین می‌شوند. حل مسئله بهینه‌سازی فوق که از نوع مقید با توابع غیرخطی می‌باشد در این پژوهش به روش تابع جریمه داخلی صورت گرفته است. به این منظور با تعریف تابع جریمه مناسب مسئله به شکل مسئله بهینه‌سازی بدون قید به فرم زیر تبدیل گردید.

$$MinC = C_t(A_0, D_s, D_r, Z_C) + P(A_0, D_s, D_r, Z_c, R) \qquad (۴۹)$$

$$P = R\left(\frac{1}{A_m - A_r - A_{th}} + \frac{1}{Z_{min} - Z_a} + \frac{1}{Z_{max} - Z_{min}} + \frac{1}{D_s - Z_{min}} + \frac{1}{D_s - \overline{D}_r} + \frac{1}{H_g - H_r}\right) \qquad (۵۰)$$

و سپس با بکارگیری روش Conjugate Gradient اقدام به حل مسئله بهینه‌سازی بدون قید شد.

لازم به ذکر است که قیود ابعادی مربوط به محدودیت‌ها بصورت کناری در فرآیند بهینه‌سازی کنترل می‌شوند فرآیند بهینه‌سازی از یک نقطهٔ اولیه طراحی که باید الزاماً در ناحیهٔ قابل قبول واقع گردد شروع می‌شود. لذا برای تولید نقطهٔ اولیه طراحی می‌توان ابعاد مخزن اصلی و رایزر را بقدرکافی بزرگ در نظرگرفت. برای آنکه فرایند تکراری در جایی خاتمه یابد از معیار همگرایی استفاده می‌شود. معیار همگرایی در این پژوهش بصورت زیر به فرایند بهینه‌سازی اعمال گردیده است.

$$\varepsilon = \frac{\left|\Delta F_{(X)}\right|}{F_{(X)}} \le 0.001 \qquad (۵۱)$$

www.SID.ir

Archive of SID

۹- کاربرد مدل بهینه‌سازی

به منظور نمایش قابلیتهای روش پیشنهادی و امکان مقایسهٔ آن با نتایج کارهای تحقیقاتی مشابه، مخزن موجگیر سد آپالاچیا مورد توجه قرار گرفت این پروژه از معدود پروژه‌های اجرا شده است که داده‌ها و مشخصات آن در دسترس می‌باشد.

۱۰- مشخصات پروژه آپالاچیا

مخزن موجگیر سد آپالاچیا از نوع دیفرانسیل بوده و مشخصات آن مطابق زیر می‌باشد:

تراز حداکثر بهره‌برداری مخزن از سطح دریا ۳۹۰/۷متر، تراز نرمال بهره‌برداری مخزن از سطح دریا ۳۸۵/۶ متر، تراز حداقل بهره‌برداری مخزن از سطح دریا ۳۷۴ متر، تراز نرمال پایاب نیروگاه از سطح دریا ۲۵۶ متر، طول تونل بالا دست ۱۳۱۶۷ متر، قطر تونل ۵/۵ متر، طول پنستاک ۶۰۹/۲ متر، قطر پنستاک ۴/۸۷ متر، زمان عملکرد گاورنر ۵ ثانیه، ضریب اصطکاک خط انتقال از آبگیر تا مخزن موجگیر در حالت حذف بار= ۰/۰۰۱۹ و در حالت تقاضای بار= ۰/۰۰۲۴ ، ضریب جریان روزنه در حالت حذف بار=۰/۷ ، ضریب جریان روزنه در حالت تقاضای بار=۰/۹۱ و ضریب آبگذری سرریز رایزر ۲= C_d می‌باشد. قدرت توربین 2×50000hp با هد خالص ۸۷ متر در حداکثر بازشدگی دریچه‌ها و در ۱۸۰ rpm بهترین راندمان توربین در هد خالص ۱۱۴ تا ۱۲۲ متر است.

پارامترهای طراحی مخزن موجگیر آپالاچیا عبارتند از:
قطر مخزن اصلی ۲۰/۱ متر ، قطر لولهٔ رایزر ۴/۸۷ متر، سطح مقطع ناخالص روزنه ۳/۷۲ مترمربع ، تراز سرریزی رایزر (نسبت به پایاب) ۱۵۲ متر

به منظور طراحی مجدد مخزن موجگیر دیفرانسیل به کمک برنامهٔ بهینه‌سازی تدوین شده دراین پژوهش پارامترهای مؤثر در تابع هزینه با استفاده از مبانی قیمت‌های پایه کارهای آبی شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس بشرح زیر انتخاب گردیده است:

α_1=۱۲۰ (هزار ریال بر متر مکعب)
β1=۲۱۰(هزار ریال بر مترمکعب)
β2=۳/۷ (هزار ریال بر کیلوگرم)
β 3= ۳/۷(هزار ریال بر کیلوگرم)
a = ۴۰۰(m/s)
γ_s = ۷۳۰۰ (kg/m^3)
σ =۱۰۰۰ ،ζ = ۷۳۰۰ (kg/m^3)
η =۰/۸۵
γ = ۱۵ (درصد)
t_w = ۰/۳ (متر)
t_r =۰/ ۳ (متر)
و
t_b =۰/۳ (متر)

۱۱- اجرای برنامهٔ بهینه‌سازی برای پروژهٔ آپالاچیا

براساس داده‌های ورودی فوق نتایج حاصل از اجرای برنامه شامل مقادیر بهینه قطر مخزن موجگیر (D_S)، قطر رایزر (D_r)، سطح مقطع روزنه‌ها (A_o) و تراز سرریزی رایزر (Z_C) و مقدار تابع هزینه متناظر با آن در هر مرحله بدست می‌آیند. بمنظور مشاهدهٔ روند کاهش مقدار تابع هزینه درهر روند تغییرات متغیرهای طراحی و تابع هدف تا رسیدن به جوابهای بهینه در جدول ۱ آمده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مقادیر بهینه متغیرهای طراحی مخزن موجگیر دیفرانسیل سد آپالاچیا پس از ۷ چرخه بهینه‌سازی بدست آمده‌اند. برای رسیدن به جوابهای بهینه، معیارهای همگرایی بصورت ε=0.01 در نظر گرفته شده است.

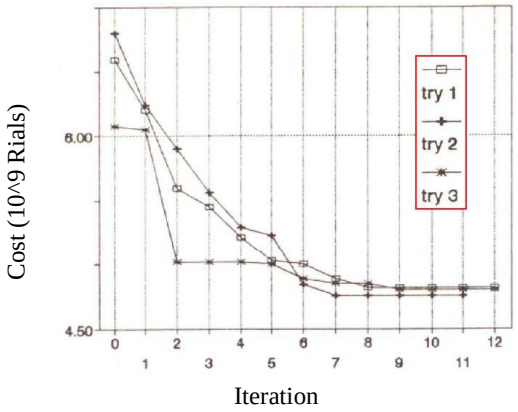
جدول ۱- روند اجرای برنامهٔ بهینه‌سازی برای مخزن موجگیر دیفرانسیل آپالاچیا

Iter No.	D_s (m)	D_r(m)	A_0 (m^2)	Z_c (m)	C_t (10^9Rial)
0	22	4.48	1.8	152	6.8
1	21.95	4.19	2.48	151.9	6.24
2	21.83	3.95	2.95	151.7	5.9
3	20.93	3.95	3.26	150.57	5.56
4	20.23	3.67	3.72	149.4	5.29
5	20.49	3.11	4.71	148.96	5.23
6	20.49	3.11	4.76	148.6	4.84
7	20.49	3.11	4.76	148.96	4.76
8	20.49	3.11	4.76	148.96	4.76

در شکل (۳) فرایند بهینه‌سازی یا تغییرات تابع هزینه با پیشرفت مراحل نشان داده شده است. همچنانکه ملاحظه می‌شود، آهنگ تغییرات تابع هزینه که شاخص خوبی برای عملکرد برنامهٔ بهینه‌ساز است تقریباً یکنواختی را در مراحل بهینه‌سازی نشان می‌دهد. در این شکل نحوه کاهش هزینه برای شروع بهینه‌سازی از دو طرح اولیه دیگر نیز نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل۳- منحنی تغییرات تابع هزینه نسبت به پیشرفت مراحل تکرار

۱۲- تحقیق در مورد بهینه بودن جوابها

به منظور ارزیابی جوابهای بدست آمده از اجرای برنامه به دو طریق زیر عمل گردید: الف: ابتدا با ایجاد یک تغییر جزیی درهر یک از متغیرهای بهینه‌شده مقدار تابع هزینه متناظر با آن محاسبه و رابطهٔ $F(X_i \pm \Delta X_i) < F(X_i)$ بررسی گردید. نتایج حاصل از این بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنانکه ملاحظه می‌شود بازاء $\pm$ 5% تغییر در متغیرها مقدار تابع هزینه افزایش یافته است. بنابراین میتوان گفت که نتایج حاصل از اجرای برنامه به مینی موم منتهی شده است. مقایسهٔ این نتایج با کارهای جلیلیان نیز مؤید همین نتیجه است:

جدول ۲- تأثیر پارامترهای طراحی در مقدار تابع هزینه

پارامتر تغییر یافته	میزان تغییر	مقدار تابع هزینه پس از تغییر	درصد تغییر تابع هزینه نسبت به مقدار بهینه
قطر مخزن (D_s)	+٪۵	۴/۸۱	+۱/۰۵
	-٪۵	۴/۸۹	+۲/۷۳
قطر رایزر (D_r)	+٪۵	۴/۸۶	+۲/۱
	-٪۵	۴/۷۸	+۰/۴۲
سطح مقطع روزنه‌ها (A_o)	-٪۵	۴/۸	+۰/۸۴
	-٪۵	۴/۸۶	+۲/۱
ترازسرریزی رایزر (Z_C)	-٪۵	۴/۹۴	+۳/۷۸
	-٪۵	۵/۱	+ ۷/۱

جلیلیان (۱۳۷۳) پس از اجرای برنامه کامپیوتری خود برای پروژه آپالاچیا به نتایج زیر رسید:

(مترمربع) ۳۰۰ = مساحت مخزن موجگیر

(مترمربع) ۱۸/۸ = مساحت رایزر

(متر مربع) ۳/۸ = مساحت روزنه‌ها

(متر) ۱۵۲/۱ = تراز سرریزی رایزر

با محاسبهٔ تابع هزینه متناظر با مقادیر فوق خواهیم داشت:

(میلیارد ریال) ۵/۲۴ = تابع هزینه

۱۳- جمعبندی و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان بصورت زیر جمعبندی نمود:

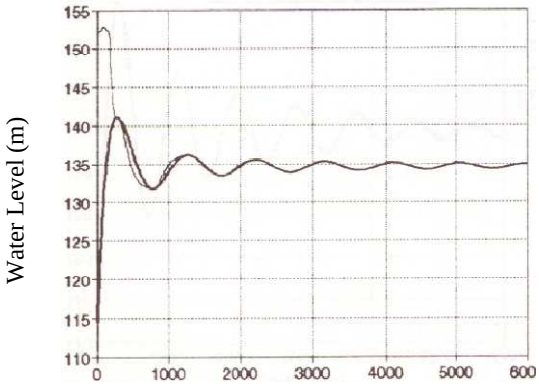
(۱) در شکلهای (۴ تا ۶) منحنی تغییرات سطح آب در مخزن موجگیر و رایزر برای سه نقطهٔ ابتدا، وسط و بهینه در سعی اول در فرآیند طراحی بهینه پروژه آپالاچیا رسم گردیده است. همانگونه که در شکل فوق ملاحظه می‌گردد، با بهینه شدن متغیرهای طراحی، دامنه تغییرات سطح آب در مخزن اصلی کاهش می‌یابد، سطح آب در مخزن اصلی زودتر به مقدار حداکثر خود می‌رسد و از طرف دیگر تراز حداکثر بالاآمادگی سطح آب در مخزن اصلی به تراز سرریزی رایزر نزدیک خواهد گردید، بطوریکه در هنگام ایجاد نوسانات سطح آب در مخزن اصلی، ارتفاع مخزن تماماً مورد استفاده قرار گرفته و حجم خالی و بلا استفاده در مخزن موجگیر نخواهیم داشت.

(۲) با توجه به شکل (۳) که منحنی تغییرات تابع هزینه نسبت به پیشرفت مراحل فرآیند را نشان می‌دهد ملاحظه می‌شود که در جریان فرآیند بهینه‌سازی مقدار تابع هزینه با آهنگ نسبتاً خوبی کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر تغییر متغیرهای طراحی در هر مرحله از فرآیند بهینه‌سازی بنحو خوبی منجر به اصلاح متغیرهای طراحی در جهت بهینه‌شدن آنها می‌گردد.

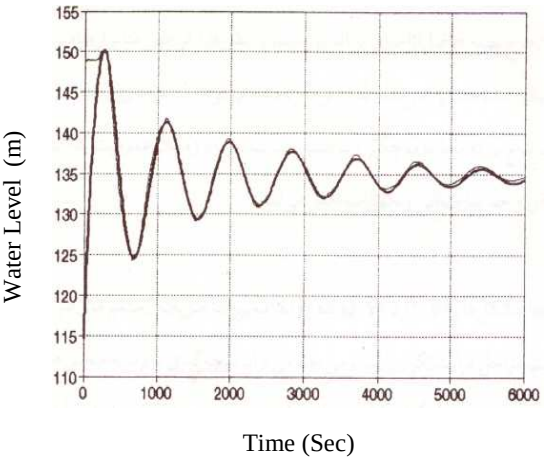
(۳) از جدول ۱ چنین استنباط می‌شود که کاهش هزینه‌های اجرایی متناسب با افزایش سطح مقطع روزنه‌ها و کاهش مقادیر قطر رایزر و مخزن اصلی و ارتفاع رایزر است. این موضوع با توجه به اثراتی که سطح مقطع روزنه‌ها برروی امواج فشاری برگشتی به داخل لوله کم فشار خواهد گذاشت و باعث افزایش فشار طراحی و افزایش هزینه‌های اجرایی خواهد شد قابل توجیه می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که در طراحی مخازن موجگیر دیفرانسیل مقدار سطح مقطع روزنه‌ها در کاهش هزینه‌های اجرایی تاثیر قابل توجهی دارد و انتخاب آن باید با توجه به محدودیت‌های مسئله و هزینه‌های اجرایی صورت گیرد و این کاری است که برنامه بهینه‌سازی حاضر انجام می‌دهد.

www.SID.ir

Archive of SID

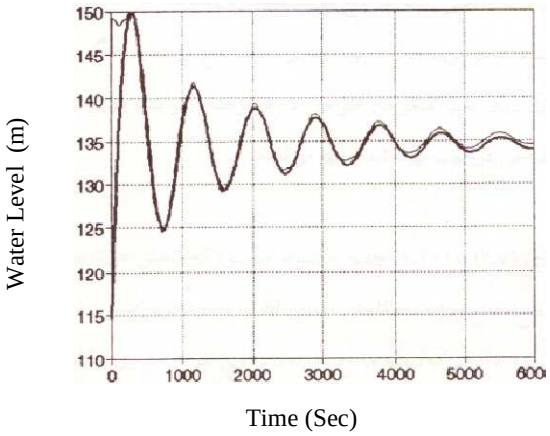


شکل ۴- منحنی تغییرات سطح آب در مخزن اصلی (خط پر) و رایزر (خط نازک) در حالت حذف بار در ابتدای بهینه سازی- پروژه آپالاچیا



شکل ۵- منحنی تغییرات سطح آب در مخزن اصلی (خط پر) و رایزر (خط نازک) در حالت حذف بار در میانه بهینه سازی- پروژه آپالاچیا

همانطوریکه قبلاً اشاره شد مخازن موجگیر دیفرانسیل از نظر امواج برگشتی ضربهٔ قوچ به داخل لولهٔ کم فشار حالت حالت بینابین دارند. با اجرای برنامهٔ حاضر و مقایسهٔ نتایج بدست آمده میتوان نتیجه‌گیری نمود که هر چه سهم بیشتری برای هزینه‌های مقاوم سازی لولهٔ کم‌فشار نسبت به کل هزینه‌های طرح در نظر گرفته شود، به این معنی است که در طراحی مخزن موجگیر به خاصیت مستهلک کنندگی نوسانات ضربهٔ قوچ ارزش بیشتری داده شده و در نتیجه جوابهای بدست آمده به سمت مخزن موجگیر دیفرانسیلی با قطر رایزر بزرگتر و نزدیک به قطر مخزن اصلی پیش خواهد رفت و بالعکس با کاهش آن،قطر رایزر در طرح بهینه به حداقل میزان خود (با توجه به محدودیت‌ها) خواهد رسید. لذا در صورتی که هزینه‌های مقاوم‌سازی لولهٔ کم‌فشار در تابع هزینه منظور نگردد (مثلاً در شرایطی که فاکتورهای دیگری در طراحی جدارهٔ لوله تعیین کننده می‌باشد) مخزن موجگیر روزنه‌ای (Dr=0) و در صورتی که مقاوم‌سازی لولهٔ کم‌فشار تأثیر عمده‌ای در هزینه طرح داشته باشد، مخزن موجگیر روزنه‌ای (Dr=Ds) و در صورتی که مقاوم‌سازی لولهٔ کم فشار از تأثیر عمده‌ای در هزینه طرح داشته باشد، مخزن موجگیر ساده (Dr=Ds) اقتصادی‌ترین طرح خواهد بود.



شکل ۶- منحنی تغییرات سطح آب در مخزن اصلی (خط پر) و رایزر (خط نازک) در حالت حذف بار در پایان بهینه سازی- پروژه آپالاچیا

۱۴- تشکر و قدردانی

لازم می‌داند از سازمان مدیریت منابع آب ایران که انجام این پژوهش را در قالب طرح تحقیقاتی شماره Dam6-79358 پشتیبانی مالی نمودند، تشکر و قدردانی نماید.

پی‌نوشت

۱- توما نشان داد که نوسانات در شرایطی که سطح مقطع مخزن از یک مقدار حداقل $A_{th}=n\frac{AL}{2gcH}$ کمتر باشد، ناپایدار می‌شوند.

۱۵- مراجع

جلیلیان، رامین، مدل کامپیوتری بهینه‌سازی مخازن موجگیر دیفرانسیل، پایان‌نامهٔ دورهٔ کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، تهران: دانشگاه امیرکبیر، اردیبهشت ۱۳۷۳،

www.SID.ir

Archive of SID

زندی، رضا، بررسی پایداری نوسانات موج در مخازن موجگیر دیفرانسیل ، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، تهران: دانشگاه تربیت مدرس، فروردین ۱۳۷۵.

فروغی، عبدالمهدی، طراحی بهینه مخازن موجگیر دیفرانسیل، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، تهران: دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۵.

ASCE, (1989), "Civil Engineering Guidelines for planning and Designing Hydroelectric Developments " *ASCE*, New York,

Arora, J.S., (1989), "*Introduction to optimum Design*," McGraw-Hill Book Co., New York.

Arshenevskii, N.N., and Berloin, V.V., and Murov'erv, O.A., (1984), "Optimization of Design parameters of complex surge tanks, "Hydrotechnical construction, Vol. 18, No.4, pp. 145-148.

Barr, D.I.H., (1966), "Optimization of pressure conduit sizes," *J. of WPDC*.

Chapra, S.C. and Canale, R.P., (1989), "Numerical Methods for Engineers " McGraw Hill Book New York.

Chaudhry, M.H., (1987), "*Applied Hydraulic Transients*" Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Dandekar, M.M, and Sharna, K.N, (1983), "Water Engineering" 2nd Edition, Vikas publishing House.

Datta, O P, and Mehra, J M L, (1973), "Rudiments of Surge Tank Design" *Indian Journal of RPVD*, Vol. 23, No. 2, pp. 39-41.

Davis, C.V, and Sorenen, K E, (1967), "Handbook of *Applied Hydraulics*" McGraw- Hill Book Co, New York.

Gowda, B H L, (1967), "A Differential Surge- Tank for Kakinadi Hydel Project" *Indian Journal off PRVD*.

Haftka, R t, and Gurdal, Z, (1992), "*Element of structural optimization* " 3rd Edition, Kluwer, Academic publishers, London.

Jaeger, C (1977), "*Fluid Transient in Hydroelectric Engineering*" , Blackie & Son Limited, London.

Mosonyi, E., and Seth, H.B.S. (1975), "The surge tank-A Device for Controlling Water Hammer" *J. of WPDC* Vol. 27, pp. 69-123.

Novak, P. and Nalluri, C., and Narayana, R., and Moffat, A.I.B., (1990), "Hydraulic Structures", Unwin Hyman Ltd.

Otter, O. (1988), "Design and Performance of a Differential Surge Tank," *Hydro Rev*., Vol. 7, No.5, pp. 70-74.

Reklaitis, G.V., Ravindran, A. and Ragsdell, K.M. (1983), "*Engineering Optimization*," John Wiley & Sons, New York.

Rich, G.T., (1963), "Hydraulic Transient", Dover Publications, New York.

Singamsetti, S.R., and Singh, P.N, (1979), "Design Considerations for a Differential Surge Tank", *J. of WPDC*,Vol. 31, No. 12, pp. 48-50.

Yang, X.L. and Cederwall, K. and Kung, C.S., (1992), "Research on Surge-Control Facilities for Hydropower Plants in Sweden ", Hydropower, 2, Broch and Lysne, Edition, Balkema.

Yang, X.L. and Cederwall, K., (1991), "Surge Tanks Evaluated from the Point of View of Pressure Wave Transmission," X XIV IAHR Congress, Madrid.

Zienkiewicz. O.C., (1956), "Stability of Parallel Branch and Differential Surge Tanks." The Institution of Mechanical Engineers.

www.SID.ir