مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲ - ۳۳، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۳۳-۵۲

Original Article

بررسی عملکرد مخازن موج‌گیر ساده و تفاضلی در کنترل امواج فشاری ضربه‌ی قوچ

نازیلا کاردان * **(استادیار)**
گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان
یوسف حسن‌زاده (استاد)
حسین خیری (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

ضربه‌ی قوچ یکی از پدیده‌های مخرب هیدرودینامیکی است که در بیشتر ایستگاه‌های پمپاژ، خطوط انتقال آب و نیروگاه‌های برق‌آبی ایجاد می‌شود. نظر به آثار مخرب پدیده‌ی مذکور بر روی خطوط انتقال آب و تأسیسات برق‌آبی، درنظرگرفتن نوسان‌های پارامترهای مختلف نظیر سرعت و فشار می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌یی در طراحی ایمن خطوط انتقال آب داشته باشد. یکی از روش‌های کنترل نوسان‌های ذکرشده در هنگام وقوع پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ، احداث مخزن موج‌گیر در مسیر انتقال است. در پژوهش حاضر، ضمن تشریح عملکرد انواع مخازن موج‌گیر و نقش آن‌ها در تعدیل فشارهای مثبت و منفی خطوط انتقال نیروگاه برق‌آبی، دو نوع مخزن‌گیر ساده و تفاضلی روزنه‌دار انتخاب و تأثیر هر کدام در تغییرات فشار و سرعت در طول خط لوله‌ی انتقال بررسی شده است. برای تحلیل معادلات حاکم بر پدیده، از روش تفاضل محدود استفاده شده و گسسته‌سازی معادلات و حل آن‌ها در نرم‌افزار مطلب انجام شده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل عددی نشان داده است که مخزن موج‌گیر تفاضلی می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌یی در استهلاک انرژی و کاهش نوسان‌های تراز آب مخزن داشته باشد که این تأثیر موجب کاهش ۴۰ درصدی ابعاد مخزن تفاضلی نسبت به مخزن ساده شده است. به لحاظ کنترل نوسان‌های فشار نیز مخزن موج‌گیر تفاضلی به مراتب عملکرد بهتری نسبت به مخزن ساده داشته است.

واژگان کلیدی: ضربه‌ی قوچ، مخازن موج‌گیر، مخزن موج‌گیر تفاضلی، نوسان جرم، روش تفاضل محدود.

n.kardan@azaruniv.edu
yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir
h.kheiry01@yahoo.com

۱. مقدمه

بروز پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ[1] در طرح‌های آبی موجب تخریب فراوان می‌شود و خسارت‌های زیادی را بر سیستم‌های جریان تحت فشار تحمیل می‌کند. بدین جهت لازم است در مراحل اولیه‌ی طراحی و قبل از اقدام به اجرای طرح، پدیده‌ی یادشده به دقت بررسی شود و راه‌حل‌های ممکن ارزیابی و مناسب‌ترین روش برای کنترل آثار سوء فرایند پدیده‌ی مذکور منظور شود. در یک خط لوله، هر عملی که باعث تغییر سرعت جریان شود، پتانسیلی برای تولید ضربه‌ی موج خواهد بود.[1] مطالعه‌ی پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ به دلیل اهمیت مسئله از دیر زمان شروع و جنبه‌های تئوری آن تحلیل شده و برخی پژوهشگران، من‌الجمله پرمکیان از جمله کسانی بوده‌اند که به مطالعه‌ی اولیه این پدیده از دیدگاه تئوری پرداخته‌اند. وی اولین کسی بود که در سال ۱۹۶۳، پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ را شناسایی و بررسی کرد و نشان داد که وقوع ضربه‌ی قوچ ناشی از تغییر ناگهانی در شرایط جریان است که موجب نوسان شدید فشار در سیستم می‌شود.[2]

در پژوهشی در سال ۱۹۶۷، استفاده از روش معادلات مشخصه[2] در حل معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان‌های میرا ارائه شده است.[3] همچنین در سال ۱۹۷۳ یک مدل همگن دوبعدی با استفاده از روش Lax-Wendrof ارائه شده است که در آن انتشار موج فشاری به خوبی شبیه‌سازی شده است.[4] در ادامه نیز در سال ۱۹۷۶، نشان داده شده است که در جریان‌های میرا، هرگاه فشار موضعی به مقدار فشار بخار کاهش یابد، مقداری گاز در مایع آزاد می‌شود که با کاهش فشار، خلاءزایی در سیستم ایجاد می‌شود.[5] روش‌های عددی جدیدی نیز در سال ۱۹۸۴ در تحلیل پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ ارائه شده است.[6] همچنین در سال ۲۰۰۰، هیدرولیک جریان‌های میرا در سیستم‌های انتقال آب بررسی و تحلیل شده است.[7] سپس در سال ۲۰۰۳، برای تشریح بهتر اتلافات انرژی در طی خلاءزایی

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۵/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۱/۳، پذیرش ۱۳۹۴/۱۱/۱۹.

Archive of SID
www.SID.ir

در جریان‌های میرا، تئوری ویسکوزیته‌ی ثانویه[3] ارائه شده است.[8]

در سال ۲۰۰۷ نیز جریان‌های میرا در سیستم خطوط انتقال بررسی شده است.[9] همچنین در سال ۲۰۰۹، تأثیر ضربه‌ی قوچ در شرایط جریان مطالعه شده است.[10] آنالیز حساسیت برای پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ در سیستم‌های انتقال نیز در سال ۲۰۱۴ انجام شده است.[11] همچنین برخی پژوهشگران ایرانی (۲۰۰۳) بر این عقیده بوده‌اند که در نیروگاه‌های برق‌آبی[4]، وقوع پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ در مسیر خطوط انتقال آب به توربین، خصوصاً در مواقعی که طول مسیر انتقال زیاد است و تغییرات بار به طور ناگهانی باشد، امری اجتناب‌ناپذیر و قابل انتظار است. برای مقابله با آثار مخرب پدیده‌ی مذکور، که عمدتاً به‌صورت هد فشاری فوق‌العاده بر روی اتصالات و دیواره‌ی خط انتقال نیروگاه بروز خواهد کرد، دو راه حل عمده وجود دارد: اولین راه حل که برای مسیرهای طولانی بسیار غیراقتصادی و نامعقول است، تقویت کامل پوشش جداره‌ی لوله‌ها و مجاری انتقال آب از آب‌گیر تا توربین است، به طوری که در مقابل افزایش فشار ناشی از ضربه‌ی قوچ مقاومت کند. راه حل دیگر آن است که بخشی از خط لوله‌ی انتقال که در مجاورت توربین[5] قرار دارد، و به دلایل اقتصادی معمولاً طول چندانی ندارد و شامل دریچه‌ها و اتصالات است، در مقابل فشار مزبور تقویت شود و مابقی آن، که لوله‌ی کم‌فشار[6] نامیده می‌شود و بخش اعظم مسیر انتقال آب را شامل می‌شود، در مقابل فشار کمتری طراحی شود. در محل تلاقی این دو بخش، سازه‌یی به نام مخزن موج‌گیر[7] تعبیه می‌شود که وظیفه‌ی اصلی آن استهلاک نوسانات جرم ناشی از ضربه‌ی قوچ است و از انتقال بخشی از امواج فشاری به داخل لوله‌ی کم‌فشار جلوگیری به عمل می‌آورد.[12]

در پژوهشی دیگری (۲۰۰۷) نیز نشان داده شده است که مخازن موج‌گیر بر حسب عوارض طبیعی محل استقرار توربین، اندازه‌ی لوله‌ی انتقال، ظرفیت آن و همچنین بسیاری از مسائل سازه‌یی و هیدرولیکی، به ۳ نوع: ساده،[8] بسته،[9] و تفاضلی[10] تقسیم می‌شوند. استفاده از مخازن موج‌گیر بسته، یکی از روش‌های مطمئن جهت مقابله با ضربه‌ی قوچ است، لیکن روشی بسیار پر هزینه است و لذا مخازن موج‌گیر ساده و تفاضلی می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های مناسب بررسی شوند.[13] طراحی بهینه‌ی مخازن موج‌گیر شامل انتخاب نوع مناسب مخزن و نیز تعیین ابعاد آن است، به طوری که علاوه بر عملکرد مناسب در حفظ تأسیسات موجود در طول خط انتقال، اجرای مخزن نیز با کمترین ابعاد و هزینه صورت پذیرد.

همچنین در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۵) با شبیه‌سازی جریان‌های گذرا، موقعیت‌های بحرانی و فشارهای ایجادشده در مسیر خط انتقال مشخص و براساس آن موقعیت بهینه‌ی تأسیسات کنترلی تعیین شده است. بدین منظور الگوریتم بهینه‌یابی تکاملی ژنتیک به‌عنوان یک مدل بهینه‌ساز غیرخطی در کنار یک برنامه‌ی شبیه‌ساز جریان گذرا استفاده و تعداد و ظرفیت مخازن موج‌گیر در خط انتقال بهینه‌یابی شده است.[14] مسئله‌ی طراحی مخازن موج‌گیر دیفرانسیلی (۲۰۰۳) نیز در قالب یک مسئله‌ی بهینه‌سازی فرموله شده و هزینه‌های اجرایی به‌عنوان تابع هدف انتخاب و ضوابط طراحی و الزامات شرایط هیدرولیکی به‌عنوان قیود در مسئله وارد شده‌اند. نتایج حاصل مؤید آن است که با بهینه شدن متغیرهای طراحی، دامنه‌ی تغییرات سطح آب در مخزن اصلی کاهش می‌یابد.[12] در مطالعه‌ی دیگری در همان سال، به بررسی تأثیر مخزن موج‌گیر ساده در کاهش فشارهای کمینه و بیشینه نسبت به حالت بدون مخزن موج‌گیر پرداخته شده و نتایج مهمی بدین شرح به‌دست آمده است: بسته‌شدن آنی شیر در مقایسه با بسته شدن تدریجی در طی ۶۰ ثانیه بدون استفاده از مخزن موج‌گیر فشارها را در موقعیت شیر افزایش می‌دهد. همچنین نوسانات در بستن آنی شیر حدود ۲۰ برابر بیش از نوسانات در بستن تدریجی است.[15] در سال ۲۰۰۷ نیز عملکرد مخازن موج‌گیر ساده و تفاضلی بررسی شده و هدف از آن، بررسی پارامترهای اصلی در طراحی مخازن موج‌گیر ساده و تفاضلی و تعیین شرایط بهینه جهت انتخاب نوع و مشخصات مخزن بوده است. ارتفاع مخزن و سطح مقطع آن به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند. با مقایسه‌ی مخازن موج‌گیر ساده و تفاضلی مشخص شده است که همواره استفاده از مخزن موج‌گیر تفاضلی در مقایسه با مخزن موج‌گیر ساده می‌تواند باعث کاهش ارتفاع مخزن موج‌گیر و در نتیجه باعث کاهش هزینه‌های اجرایی آن شود.[13]

همچنین در سال ۱۳۹۴، تأثیر انواع سیستم‌های کنترل‌کننده‌ی ضربه‌ی قوچ مطالعه شده و نتایج نشان داده است که ترکیب محفظه‌ی هوایی با مخزن موج‌گیر در خط انتقال موجب کاهش چشم‌گیر حجم مخزن موج‌گیر می‌شود.[1] در مطالعه‌یی در سال ۲۰۰۴ نیز تئوری نوسان سطح آب در مخازن موج‌گیر بررسی شده و برای تغییرات تراز سطح آب در مخزن معادلاتی ارائه شده است.[16] همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک (۲۰۰۹) به بهینه‌یابی مخزن موج‌گیر تعبیه‌شده در سیستم خط لوله‌ی انتقال آب نیروگاهی پرداخته شده و تابع هدف، کمینه‌سازی حجم مخزن موج‌گیر بوده است، به طوری که حجم بهینه بتواند موج‌های فشاری را کنترل کند.[17] در سال ۲۰۱۰ نیز مخازن موج‌گیر سیستم‌های انتقال با استفاده از روش ضربه-پاسخ تحلیل و بررسی شده و نشان داده شده است که نتایج تحلیلی حاصل از روش ضربه-پاسخ[11] منطبق بر نتایج روش مشخصه است.[18] همچنین ضربه‌ی قوچ در سیستم نیروگاهی (۲۰۱۱) بررسی و ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ و مدت زمان استهلاک آن تحلیل شده است و نیز به تأثیر میزان بازشدگی شیر توربین توجه شده و نشان داده شده است که برای بهینه بودن سیستم انتقال و مخزن موج‌گیر، تعبیه‌ی ۱ تا ۲ محفظه‌ی هوا در سیستم اجتناب‌ناپذیر است.[19] با توجه به اهمیت شبیه‌سازی دقیق نوسان جرم در طراحی مخازن موج‌گیر، در مطالعه‌یی در سال ۲۰۱۳، تئوری نوسان جرم در مخازن موج‌گیر با روش المان محدود تحلیل شده و نتایج حاصل با نتایج به دست‌آمده از روش‌های کلاسیک مقایسه شده و در ادامه، این نتیجه به‌دست آمده است که روش مذکور می‌تواند نوسانات سطح آب را به درستی شبیه‌سازی کند.[20]

نظر به اینکه عملکرد مناسب مخازن موج‌گیر در حفظ تأسیسات خطوط انتقال نیروگاه در مقابل آثار ضربه‌ی قوچی که با بسته شدن ناگهانی شیر کنترل در سیستم ایجاد می‌شود، حائز اهمیت است، در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر وجود مخازن موج‌گیر ساده و تفاضلی در میزان نوسانات سرعت در خط انتقال، تراز آب داخل مخزن و ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ پرداخته شده است. همچنین محل مناسب قرارگیری مخزن بر حسب تغییرات تراز آب در داخل آن ارزیابی شده است. بدین منظور در ابتدا معادلات حاکم بر پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ و نوسانات جرم در مخزن ارائه شده و نحوه‌ی گسسته‌سازی آن‌ها به روش تفاضل محدود بیان شده و حل معادلات در نرم‌افزار مطلب[12] انجام شده است.

۲. معادلات حاکم بر پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ

در تحلیل جریان در خطوط انتقال آب، معادلات حاصل بر جریان بین مخزن اصلی و مخزن موج‌گیر از نوع معادله‌ی دیفرانسیل معمولی است، لیکن در تحلیل ضربه‌ی قوچ که بین مخزن موج‌گیر و توربین رخ می‌دهد، معادلات از نوع معادلات دیفرانسیل جزئی و غیرخطی هستند که دو معادله‌ی دینامیکی و پیوستگی را شامل می‌شوند (معادلات ۱ و ۲):

Archive of SID
www.SID.ir

ـ معادله‌ی پیوستگی

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V\frac{\partial H}{\partial x} + V\sin\theta + \frac{c^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x} = 0 \qquad (۱)$$

ـ معادله‌ی دینامیکی

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial x} + g\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \qquad (۲)$$

که در آن، $V(m/s)$ و $H(m)$ به ترتیب بیان‌گر سرعت و هد فشار در زمان و مکان‌های مختلف هستند. D قطر لوله (m)، g شتاب ثقل (m/s^2) و c سرعت انتشار موج فشاری در سیال (m/s) است.[۲۱]

۱.۲. مخزن موج‌گیر ساده

مخزن موج‌گیر ساده، مخزن روبازی است که در مسیر خط انتقال آب نصب می‌شود تا قسمتی از حجم آب درون لوله را در شرایطی که دبی عبوری افزایش می‌یابد، در خود ذخیره کند (تعدیل فشار مثبت) و در مرحله‌یی که فشار منفی درون لوله ایجاد می‌شود، حجم آب موردنیاز جهت از بین بردن آثار ناشی از فشار منفی را تأمین کند.[۲۲] شکل ۱، نمایی از سیستم هیدرولیکی را که در آن مخزن ساده به کار برده شده است، نشان می‌دهد. مخزن تعبیه‌شده در بالادست، مخزن تغذیه‌ی اصلی است، که باید به حد کافی بزرگ باشد تا سطح آب درون آن، در طی جریان‌های میرا ثابت باقی بماند. در پایین‌دست سیستم، یا به عبارتی در بالادست توربین، مخزن موج‌گیر قرار داده شده است تا از انتقال آثار مخرب ضربه‌ی قوچ به لوله‌ی کم‌فشار جلوگیری کند.

در تحلیل جریان درون مخزن موج‌گیر از تئوری نوسان جرم (ستون صلب) استفاده شده و معادلات دینامیکی و پیوستگی استخراج شده‌اند (معادلات ۳ و ۴):

ـ معادله‌ی دینامیکی

$$H_2 - H_1 + \frac{L}{g}\frac{dV}{dt} + \frac{fL}{2gD}V|V| = 0 \qquad (۳)$$

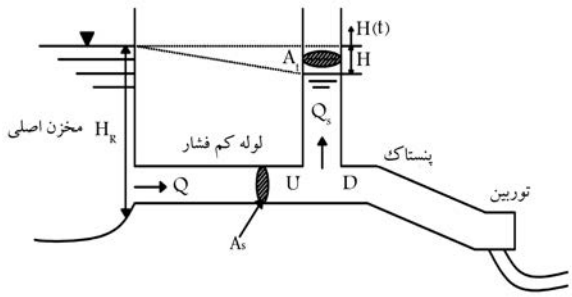
این شرایط مرزی به معادلات حاکم اضافه می‌شود:

ـ در مخزن اصلی بالادست (معادله‌ی ۳-۱):

$$H_R - \Delta H_R = H_1 \qquad (۳-۱)$$

ـ در مخزن موج‌گیر (صرف‌نظر از اینرسی سکون) (معادله‌ی ۳-۲):

$$H_R + H(t) - \Delta H_c = H_2 \qquad (۳-۲)$$



شکل ۱. نمایی از یک سیستم نیروگاه برق‌آبی با مخزن موج‌گیر ساده.

بنابراین معادله‌ی ۳-۳ را خواهیم داشت:

$$H_2 - H_1 = H(t) - \Delta H_c + \Delta H_R \qquad (۳-۳)$$

که در آن، ΔH_R و ΔH_c با استفاده از معادلات ۳-۴ و ۳-۵ به‌دست می‌آیند:

$$\Delta H_R = \frac{k_R}{2gA^2}Q|Q| \qquad (۳-۴)$$

$$\Delta H_c = \frac{k_c}{2g}\dot{H}|\dot{H}| \qquad (۳-۵)$$

که در آن‌ها، H نوسان تراز سطح آب در مخزن موج‌گیر، H_t تراز نهایی سطح آب در مخزن موج‌گیر، ΔH_R افت فشار در ورودی لوله‌ی کم‌فشار، H_R ارتفاع آب در مخزن اصلی، $\dot{H}$ نرخ زمانی تغییر در تراز سطح آزاد آب و ΔH_c افت فشار در ورودی مخزن موج‌گیر است.[۱۹]

ـ معادله‌ی پیوستگی در محل مخزن موج‌گیر

$$A_t\frac{dH}{dt} = A_U V_U - A_D V_D \qquad (۴)$$

که در آن، اندیس‌های U و D به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقادیر پارامترها در بالادست و پایین‌دست ورودی مخزن موج‌گیر است.[۱۹]

۲.۲. مخزن موج‌گیر تفاضلی

در مخازن موج‌گیر تفاضلی به منظور افزایش یا کاهش هد فشار، یک روزنه در محل اتصال مخزن موج‌گیر با لوله‌ی جریان تعبیه شده است، به طوری که در طی افزایش و یا کاهش دبی جریان، فشار بیشتری درون لوله‌ی پشت روزنه ایجاد و موجب تسریع در نرخ کاهش و یا افزایش جریان درون لوله شود. درون مخزن ذکرشده، رایزر وجود دارد. هنگامی که دبی درون مجرا تغییر می‌کند، سطح آب درون رایزر به سرعت پاسخ می‌دهد تا بر حسب مورد، موجب افزایش یا کاهش هد فشار شود. شکل ۲، نمای شماتیک از مخزن موج‌گیر تفاضلی را نشان می‌دهد.[۱۳]

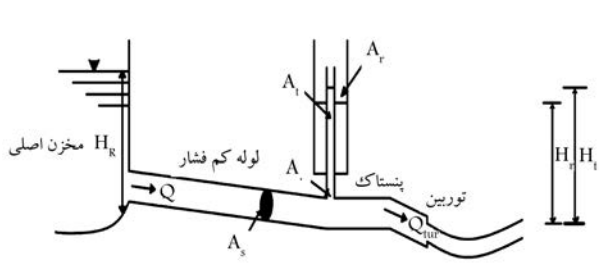
همچنین در تحلیل جریان درون مخزن موج‌گیر تفاضلی، معادلات دینامیکی و پیوستگی (معادلات ۵ و ۶) و نیز معادله‌ی ارتباط بین رایزر و مخزن استخراج شده‌اند (معادله‌ی ۷):

ـ معادله‌ی دینامیکی

$$\frac{L}{gA}\frac{dQ}{dt} = -k_T V|V| - f_s U|U| - (H_2 - H_1) \qquad (۵)$$

ـ معادله‌ی پیوستگی

$$AV = A_t\frac{dH_t}{dt} + A_r\frac{dH_r}{dt} + Q \qquad (۶)$$



شکل ۲. نمایی از یک سیستم نیروگاه برق‌آبی با مخزن موج‌گیر تفاضلی.

Archive of SID
www.SID.ir

ـــ معادله‌ی ارتباط بین رایزر و مخزن

$$A_t \frac{dH_t}{dt} = \begin{cases} CA_\circ \sqrt{2g(H_r - H_t)} & : H_r > H \\ -CA_\circ \sqrt{2g(H_t - H_r)} & : H_r < H \end{cases} \qquad (7)$$

که در آن‌ها، A سطح مقطع لوله‌ی انتقال آب، $A_\circ$ سطح مقطع رایزر در ورودی مخزن، A_t سطح مقطع لوله‌ی میانی مخزن، A_r سطح مقطع لوله‌ی بیرونی مخزن، H_t تراز سطح آب در بخش میانی مخزن، H_r تراز آب در بخش بیرونی مخزن، V سرعت جریان درون لوله، L طول لوله‌ی انتقال آب، C ضریب تخلیه‌ی روزنه و g شتاب ثقل هستند.[۱۳]

۳.۲. پایداری تراز آب در مخزن موج‌گیر

مسئله‌یی که در طراحی مخازن موج‌گیر باید مد نظر قرارگیرد، پایداری سطح آب تحت اثر نیروی ثابت است. در مواردی که تغذیه‌ی مجدد مخزن رخ می‌دهد، نوسان‌های سطح آب موجب تغییر در هد فشار می‌شود و نیروی مضاعفی بر توربین وارد می‌شود. لذا به منظور پایداری سطح آب و جلوگیری از ایجاد نیروی مضاعف در محل توربین، سطح مقطع مخزن باید بیشتر از مقدار کمینه‌ی A_s در نظر گرفته شود (رابطه‌ی ۸):

$$A_t > A_s \qquad (8)$$

که در آن، A_s از رابطه‌ی ۹ به‌دست می‌آید:

$$A_s = \frac{AL}{H_R \Delta H_f} \frac{V^2}{2g} \qquad (9)$$

که در آن، ΔH_f افت انرژی در طول لوله‌ی کم‌فشار است. رابطه‌ی ۸، شرط توما نامیده می‌شود.[۲۰] برای محاسبه‌ی کمینه‌ی سطح مقطع مخزن، معیارهای دیگری توسط پژوهشگران مختلف نظیر گاردل (۱۹۵۶)، ماریس (۱۹۵۹) و راش (۱۹۶۹) ارائه شده است. لیکن سطح پایداری توما، ضریب اطمینان بیشتری نسبت به سایر معیارها دارد و در پژوهش حاضر به کار برده شده است.

۴.۲. گسسته‌سازی معادلات حاکم بر جریان درون مخزن

معادلات حاکم بر نوسان جرم در داخل مخازن موج‌گیر از نوع معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی است و جز در موارد بسیار ساده، حل به روش کلاسیک برای آن‌ها مقدور نیست. این نوع از معادلات را می‌توان به روش‌های مختلفی نظیر المان محدود،[۱۳] تفاضل محدود،[۱۴] و یا روش مشخصه[۱۵] حل کرد. برای حل معادلات حاصل، کدنویسی در نرم‌افزار مطلب انجام شده و گسسته‌سازی معادلات به روش تفاضل محدود با الگوی پیش‌رو بوده است. روش تفاضل محدود (FDM)[۱۶] یکی از روش‌های عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل است، که در آن مشتق توابع با تفاضلات معادل آن‌ها تقریب زده می‌شود، که اساس آن برای حل معادلات، استفاده از تقریب تابع با روش تیلور است.

ـــ در مخزن موج‌گیر ساده: سرعت جریان در هر لحظه از زمان در خط انتقال از رابطه‌ی ۱۰ به‌دست می‌آید:

$$V_i^{k+1} - V_i^k = -(H_i'^k + k_t V_i^k ABS(V_i^k)) \frac{g\Delta t}{L},$$
$$H' = H_2 - H_1 \qquad (10)$$

ارتفاع آب در داخل مخزن در هر لحظه از زمان از رابطه‌ی ۱۱ به‌دست می‌آید:

$$H_i^{k+1} = H_i^k + (A_U V_U^k - A_D V_D^k) \frac{\Delta t}{A_t} \qquad (11)$$

ارتفاع مخزن موج‌گیر از رابطه‌ی ۱۲ به‌دست می‌آید:

$$H_i^{k+1} = H_i^k + H_R - H_{axis} + H_{free} \qquad (12)$$

که در آن، H_{axis} تراز محور لوله است.

ـــ در مخزن موج‌گیر تفاضلی: سرعت جریان در هر لحظه از زمان در خط انتقال از رابطه‌ی ۱۳ به‌دست می‌آید:

$$V_i^{k+1} - V_i^k = (-(H_i'^k + k_t V_i^k ABS(V_i^k)) - (f_s U_i^k ABS(U_i^k)) \frac{g\Delta t}{L} \qquad (13)$$

ارتفاع آب در داخل مخزن در هر لحظه از زمان از رابطه‌ی ۱۴ به‌دست می‌آید:

$$H_i^{k+1} = H_i^k + (A_U V_U^k - A_D V_D^k) \frac{\Delta t}{A_t} \qquad (14)$$

سرعت جریان غیردائم در داخل مخزن موج‌گیر از رابطه‌ی ۱۵ به‌دست می‌آید:

$$U_i^{k+1} = (V(k,1) \times A - A_D V_D^k)/A_t, \qquad U_i^{k+1} = U_i^k \qquad (15)$$

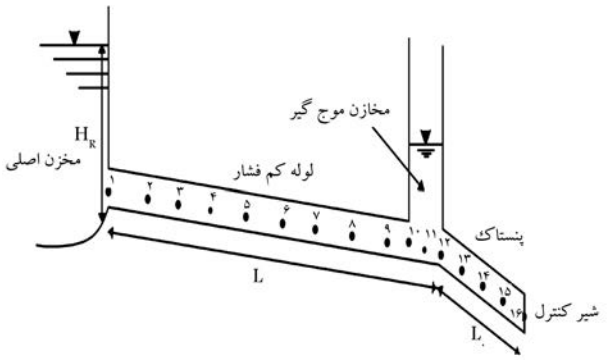
ارتفاع مخزن موج‌گیر نیز از رابطه‌ی ۱۶ به‌دست می‌آید:

$$H_i^{k+1} = H_i^k + H_R - H_{axis} + H_{free} \qquad (16)$$

در مخزن موج‌گیر تفاضلی، سطح مقطع رایزر و روزنه بدون تغییر بوده و ثابت نگه داشته شده است.

۳. طرح مسئله

شرایط ارائه شده در بخش حاضر را می‌توان به‌عنوان نمونه‌یی از مسائل مطرح در زمینه‌ی مذکور ارزیابی کرد. در شکل ۳، نمایی شماتیک از سیستم انتقال آب از مخزن اصلی به یک توربین نیروگاهی نشان داده شده است. لوله‌ها به‌صورت مستقیم و کاملاً صلب فرض شده‌اند و طول لوله‌ی کم‌فشار از مخزن اصلی تا مخزن موج‌گیر (L) برابر ۱۲۰۰ متر و از مخزن موج‌گیر تا محل توربین ($L_\circ$) برابر ۴۳۰ متر، سرعت موج



شکل ۳. نمایی شماتیک از سیستم انتقال آب از مخزن سد به توربین نیروگاه.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱. مشخصات سیستم انتقالی برای مطالعه‌ی موردی.

مشخصات مخزن موج‌گیر	مخزن موج‌گیر ساده		مخزن موج‌گیر تفاضلی	
	حالت اول	حالت دوم	حالت اول	حالت دوم
دبی حالت پایدار (مترمکعب بر ثانیه)	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
سطح مقطع لوله‌ی انتقال آب (مترمربع)	۴	۴	۴	۴
طول لوله‌ی انتقال آب تا مخزن موج‌گیر (متر) (L)	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰
طول لوله‌ی انتقال از مخزن موج‌گیر تا توربین (متر) (L_0)	۴۳۰	۴۳۰	۴۳۰	۴۳۰
جنس لوله	چدنی	چدنی	چدنی	چدنی
ارتفاع آب در مخزن اصلی (متر)	۳۸	۳۸	۳۸	۳۸
تراز آب در محل خروجی توربین (متر)	۹۵/۵	۹۵/۵	۹۵/۵	۹۵/۵
ضریب ایمنی مخزن موج‌گیر نسبت به حالت توما (n)	۲/۲۵	۱/۸۵	۲/۲۵	۱/۸۵
اختلاف تراز سطح آب در حالت جریان پایدار نسبت به محور لوله در محل اتصال مخزن موج‌گیر (متر)	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
ضریب افت در لوله‌ی انتقال آب	۰/۴۸۷	۰/۴۸۷	۰/۴۸۷	۰/۴۸۷
مدت زمان کل شبیه‌سازی (ثانیه)	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰
فواصل زمانی انتخابی (ثانیه)	۶/۵	۶/۵	۶/۵	۶/۵

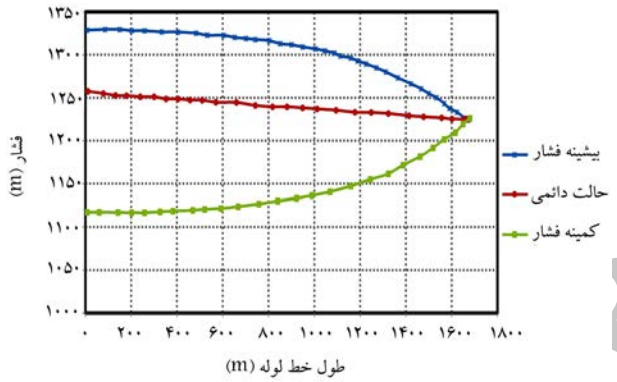
فشاری برابر $c = ۱۰۷۰\ m/s$ و سرعت جریان در لوله $V = ۲/۵۷۴\ m/s$ بوده است. در دمای عادی، مدول کشسانی لوله $E = ۱۶۸ \times ۱۰^۹\ N/m^۲$، تنش مجاز لوله‌ی چدنی برابر ۱۴۸ مگاپاسکال، مدول حجمی آب $k = ۲/۱۹ \times ۱۰^۹\ N/m^۲$ و ضخامت لوله برابر ۱۰ میلی‌متر در نظرگرفته شده است. سایر مشخصات سیستم انتقال در جدول ۱ ارائه شده است. تمام موارد برای دو سطح مقطع مختلف مخزن بررسی شده است.

۴. صحت‌سنجی نتایج

تغییر در مقدار فشار بیشینه و کمینه در طول خط لوله در زمان ۱۳۰۰ ثانیه بدون وجود مخزن موج‌گیر در شکل ۴ نشان شده است. این تغییرات به ازاء تغییر سرعت $۰/۸۵\ m/s$ نسبت به شرایط عادی جریان ($\Delta V = ۰/۳۳V_0$) حاصل شده است که در این حالت بیشینه‌ی مقدار تغییر فشار ۹۲/۷۴ متر بوده است. این تغییر در مقدار سرعت در محل توربین نیروگاه ممکن است در شرایط عادی تحت تأثیر نوسانات برق یا نوسانات مصرف ایجاد شود. لیکن مقدار آن نباید از ۷۵٪ سرعت جریان در شرایط عادی ($\Delta V = ۰/۷۵V_0$) تجاوز کند.[۲۲] این میزان از تغییر معادل با سرعت $۱/۹۷\ m/s$ است که به ازاء آن فشار بیشینه معادل ۲۱۵/۷۴ متر می‌شود. این افزایش فشار بیش از فشار مجاز لوله‌ی چدنی ($۱۳۷/۸۶\ m$) است. در نهایت با توجه به رابطه‌ی ۱۰ و ۱۳، سرعت در هر لحظه در طول خط لوله محاسبه می‌شود و با اعمال تغییر سرعت، سرعت در طول لوله و در هر زمان قابل اندازه‌گیری است. تغییر در هد جریان به ازاء تغییر سرعت ناشی از تغییر شرایط عادی جریان، با استفاده از رابطه‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود:

$$\Delta H = \frac{a\Delta V}{g} \qquad (۱۷)$$

علاوه بر افزایش فشار در طول مسیر لوله، فشار منفی ۱۳/۵۹- متر در خط لوله ایجاد شده است که نشان‌دهنده‌ی وقوع خلاءزایی در لوله است. وقوع خلاءزایی موجب خوردگی جدار لوله می‌شود.[۲۳] بنابراین سیستم انتقال ذکرشده در برابر



شکل ۴. فشار بیشینه و کمینه در سیستم انتقال بدون نصب مخزن موج‌گیر در ۱۳۰۰ ثانیه با $\Delta V = ۰/۳۳V_0$.

فشارهای ناشی از ضربه، ایمن نیست و نیاز به نصب مخزن موج‌گیر دارد. بیشینه‌ی فشار قابل تحمل لوله (P_a) با استفاده از رابطه‌ی $P_a = ۲t\delta_a/D$ محاسبه می‌شود. t ضخامت جدار لوله، δ_a مقاومت مجاز جدار لوله و D قطر لوله است.[۲۴]

برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی، فشارهای بیشینه و کمینه با رابطه‌ی ۱۷ برآورد و با نتایج حاصل مقایسه شده‌اند. در این روش از زمان رفت و برگشت موج ($t_C = ۷/۹\ s$) استفاده شده و فشارهای بیشینه و کمینه از رابطه‌ی فشار با استفاده از رابطه‌ی ۱۸ محاسبه می‌شوند (روابط ۱۹ الی ۲۱):[۲۳]

$$\Delta H = \frac{۲L\Delta V}{gt_c} \qquad (۱۸)$$

که در آن، ΔH افزایش فشار ناشی از وقوع ضربه‌ی قوچ است.

$$\Delta H = \frac{۲L\Delta V}{gt_S} = \frac{۲(۱۳۶۰)(۲/۵۷۴)}{(۹/۸۱)(۷/۹)} = ۱۰۸/۲۷\,m \qquad (۱۹)$$

$$H_{\max} = H_R + \Delta H \rightarrow H_{\max} = ۹۵/۵ + ۱۰۸/۲۷ = ۲۰۳/۷۷\,m \qquad (۲۰)$$

Archive of SID
www.SID.ir

$$H_{\min\max} = H_R - \Delta H \rightarrow H_{\min} = ۹۵/۵ - ۱۰۸/۲۷ = -۱۲/۷۷m \quad (۲۱)$$

مقادیر محاسباتی فشار در سیستم انتقال به ترتیب برابر ۲۰۳/۷۷ و ۱۲/۷۷- متر است که با مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی (۲۱۵/۷۴ و ۱۳/۵۹- متر) اختلاف اندکی دارد که بر درستی و دقت روش عددی استفاده‌شده صحه می‌گذارد.

۵. نتایج و بحث

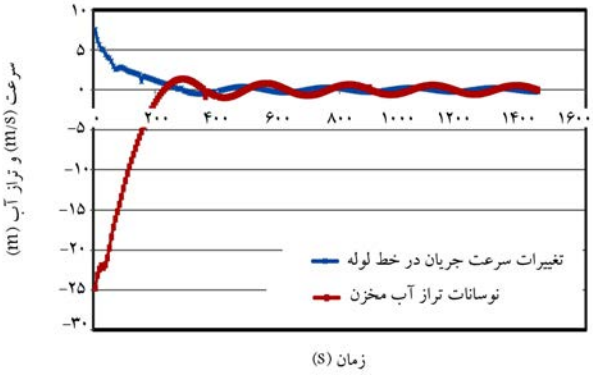
۱.۵. تغییرات سرعت جریان و نوسانات تراز آب مخزن

ابتدا ابعاد مخزن موج‌گیر ساده و تفاضلی در دو حالت ۲/۲۵ برابر و ۱/۸۵ برابر سطح پایداری توما ارزیابی شده است. با استفاده از رابطه‌ی ۹، سطح مقطع پایداری توما A_s برابر ۳۳/۲۰ متر مربع محاسبه شده است. برای حالت $n = ۲/۲۵$، سطح مقطع مخزن موج‌گیر در حدود ۷۴ مترمربع است. برای مقایسه‌ی عملکرد دو مخزن ساده و تفاضلی، تغییرات سرعت جریان در خط انتقال (V) و تراز آب در ارتفاع مخزن (H) بررسی شده است. شکل‌های ۵ و ۶، تغییرات سرعت جریان در خط لوله‌ی انتقال و نوسانات تراز آب داخل مخزن را به ترتیب در مخزن موج‌گیر ساده و تفاضلی در حالت $n = ۲/۲۵$ نشان می‌دهد.

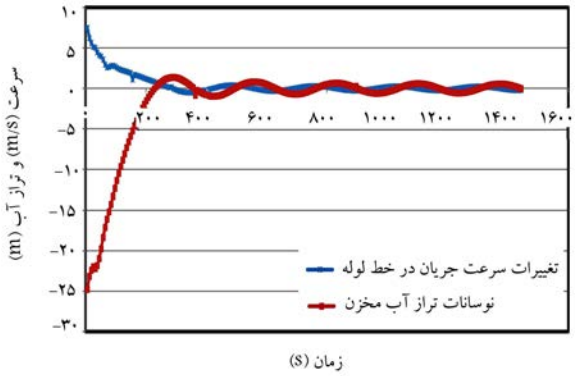
در لحظه‌ی اول بسته شدن شیر توربین،[17] تراز آب در داخل مخزن موج‌گیر ساده برابر ۲۷/۳۹- متر نسبت به تراز مخزن اصلی است. پس از گذشت زمان ۱۴۹/۵۵ ثانیه، ارتفاع آب از ۲۷/۳۹- متری تراز مخزن اصلی به ۶/۱۶ متری تراز مخزن و بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد. سپس پس از طی زمان ۲۸۶/۱۳ ثانیه، تراز سطح آب به ۴/۱۹۶- متری می‌رسد و در نهایت در زمان ۹۷۸/۴۵ ثانیه از شروع گذر جریان میرای هیدرولیکی، تراز آب در مخزن در ارتفاع ۲/۳۳۵+ متر قرار دارد. پس از طی این زمان، ارتفاع آب در مخزن همواره بالای تراز مخزن اصلی است و تا زمان ۱۵۰۰ ثانیه فقط نوسان‌های کوچکی در تراز آب مخزن مشاهده می‌شود.

در مخزن موج‌گیر تفاضلی، تراز آب مخزن در لحظه‌ی اول بسته شدن شیر توربین برابر ۲۴/۱۶- متر نسبت به تراز مخزن اصلی است. پس از گذشت زمان ۲۹۲/۶ ثانیه، ارتفاع سطح آب از ۲۴/۱۶- متری تراز مخزن اصلی به ۱/۳۵۶+ متری و بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد و پس از طی ۹۷۵/۳۸ ثانیه در ۰/۶۱- متری تراز مخزن قرار دارد. به عبارتی در خلال گذر جریان میرای هیدرولیکی، در مخزن موج‌گیر ساده، نوسان جرم در دامنه‌ی بسیار بزرگی صورت می‌پذیرد، در حالی که در مخزن موج‌گیر تفاضلی نوسان جرم در دامنه‌ی بسیار کوچک‌تری از مخزن موج‌گیر ساده انجام می‌شود. کوچک‌تر بودن دامنه‌ی نوسانات در مخزن تفاضلی باعث بهینه بودن و اقتصادی شدن طرح می‌شود. یعنی ابعاد مخزن موج‌گیر تفاضلی نسبت به مخزن ساده بهینه‌تر است.

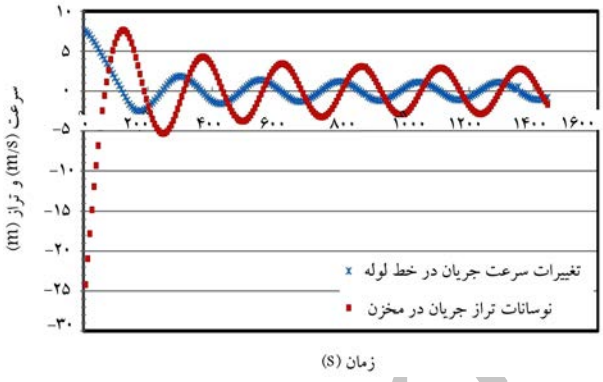
در حالت دوم با ضریب $n = ۱/۸۵$، سطح مقطع مخزن در حدود ۶۰ مترمربع خواهد بود. شکل‌های ۷ و ۸، تغییرات سرعت جریان و نوسان‌های تراز آب را به ترتیب در مخزن موج‌گیر ساده و تفاضلی در حالت $n = ۱/۸۵$ نشان می‌دهد. در



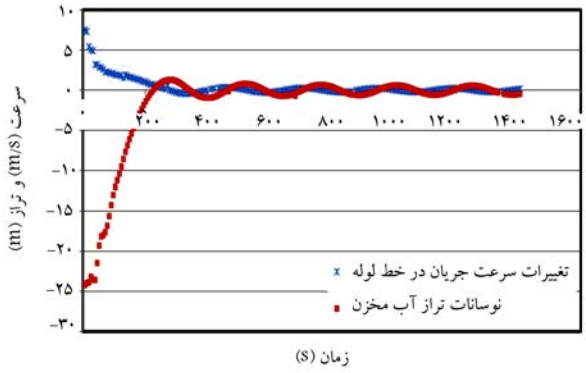
شکل ۵. تغییرات سرعت جریان در خط لوله و نوسان‌های تراز آب داخل مخزن در حالت استفاده از مخزن موج‌گیر ساده با $n = ۲/۲۵$.



شکل ۶. تغییرات سرعت جریان در خط لوله و نوسان‌های تراز آب داخل مخزن در حالت استفاده از مخزن موج‌گیر تفاضلی با $n = ۲/۲۵$.



شکل ۷. تغییرات سرعت جریان در خط لوله و نوسان‌های تراز آب داخل مخزن در حالت استفاده از مخزن موج‌گیر ساده با $n = ۱/۸۵$.



شکل ۸. تغییرات سرعت جریان در خط لوله و نوسان‌های تراز آب داخل مخزن در حالت استفاده از مخزن موج‌گیر تفاضلی با $n = ۱/۸۵$.

www.SID.ir

این حالت نیز نتیجه‌ی مشابهی با حالت $n = ۲/۲۵$ حاصل می‌شود. یعنی سطح مقطع مخزن تفاضلی بهینه‌تر از مخزن ساده است.

۲.۵. مقایسه‌ی ارتفاع مخازن ساده و تفاضلی

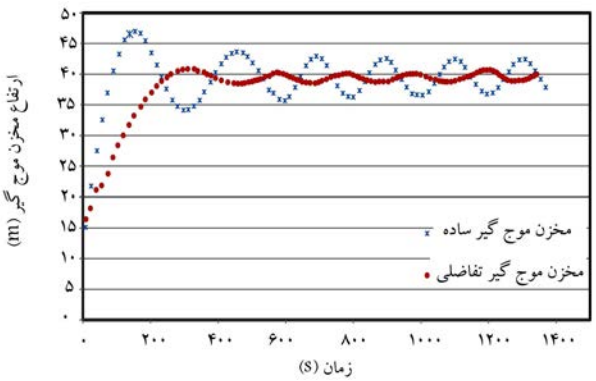
اکنون با درنظرگرفتن نوسان‌های تراز آب در دو حالت، ارتفاع مخزن تعیین شده است. شکل ۹، تغییرات ارتفاع مخازن ساده و تفاضلی را در حالت $n = ۱/۸۵$ نشان می‌دهد. در مخزن ساده که پس از گذشت زمان ۱۴۹/۵۵ ثانیه تراز آب به مقدار بیشینه‌ی ۶/۱۶+ متری تراز مخزن اصلی می‌رسد، با مد نظر قراردادن ارتفاع ۳۸ متری تراز آب در مخزن اصلی، ارتفاع کل مخزن موج‌گیر با احتساب ضریب اطمینان برابر ۴۷ متر انتخاب می‌شود. در زمان ۹۷۸/۴۵ ثانیه با رسیدن تراز آب در مخزن به ۲/۳۳۵+ متری، ارتفاع کمتری برای مخزن موردنیاز است و می‌توان ارتفاعی در حدود ۴۱ متر را برای آن در نظر گرفت. لیکن با توجه به بیشینه‌ی افزایش تراز آب، به ارتفاع مخزن ساده برابر ۴۷ متر توجه شده است. در مخزن تفاضلی پس از گذشت زمان ۲۹۲/۶ ثانیه، ارتفاع سطح آب به ۱/۳۵۶+ متری و بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد. لذا انتخاب ارتفاع ۴۰ متر برای مخزن پیشنهاد شده است. همان‌طور که در شکل مشهود است، نوسان‌های ارتفاع مخزن تفاضلی بسیار کمتر از مخزن ساده است. جدول ۲، مقایسه‌ی نتایج در حالات مختلف را ارائه می‌دهد. بنابراین به لحاظ ارتفاع نیز، مخزن تفاضلی بهینه‌تر از مخزن ساده است.

۳.۵. مقایسه‌ی سرعت جریان در خط لوله‌ی انتقال

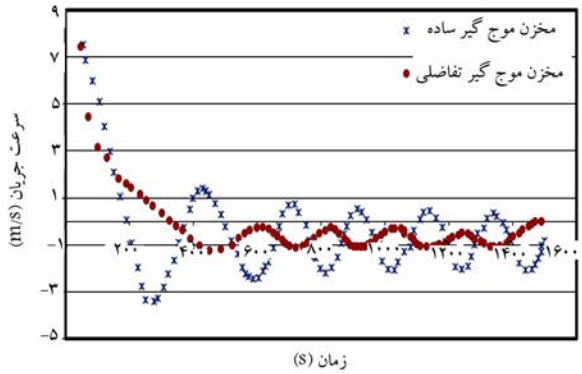
سرعت جریان در سیستم انتقال یکی دیگر از موارد مهمی است که در تحلیل پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ به آن توجه می‌شود. در این راستا، با توجه به تغییرات سرعت در سیستم انتقال (شکل‌های ۷ و ۸) در موقع استفاده از مخازن ساده و تفاضلی، مقایسه‌ی سرعت جریان در زمان‌های مختلف برای حالت اول در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

سرعت جریان در خط لوله‌ی انتقال، در صورت استفاده از مخزن موج‌گیر ساده (در حالت اول)، پس از گذشت زمان ۶۵ ثانیه از مقدار بیشینه‌ی ۷/۵ متر بر ثانیه به ۴/۶۵ متر بر ثانیه و پس از طی زمان ۵۰۰/۶۷ ثانیه به ۱/۲۶ متر بر ثانیه و پس از طی زمان ۸۹۷/۳۵ ثانیه، به ۱/۰۳۳ متر بر ثانیه می‌رسد. در صورت استفاده از مخزن موج‌گیر تفاضلی، پس از گذشت زمان ۶۵ ثانیه، سرعت جریان در لوله‌ی انتقال از مقدار بیشینه‌ی ۷/۵ متر بر ثانیه به ۲/۹۳ متر بر ثانیه و پس از طی ۵۰۰/۶۷ ثانیه به ۰/۳۶۵ متر بر ثانیه و پس از طی ۸۹۷/۳۵ ثانیه به ۲/۷۵- متر بر ثانیه می‌رسد.

این مورد نشان می‌دهد در صورت بروز پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ، استهلاک انرژی در حالت استفاده از مخزن تفاضلی به مراتب بیش از استهلاک انرژی در حالت استفاده از مخزن ساده خواهد بود. با استهلاک سریع انرژی از وارد شدن خسارت



شکل ۹. مقایسه‌ی تغییرات ارتفاع مخازن ساده و تفاضلی در حالت $n = ۱/۸۵$.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی سرعت جریان در خط لوله‌ی انتقال در حالت استفاده از مخازن ساده و تفاضلی.

به تأسیسات و خود توربین جلوگیری می‌شود. لذا در مقایسه‌ی سرعت جریان در خط لوله‌ی انتقال، مخزن تفاضلی به لحاظ کارایی و عملکرد بهتر از مخزن ساده خواهد بود.

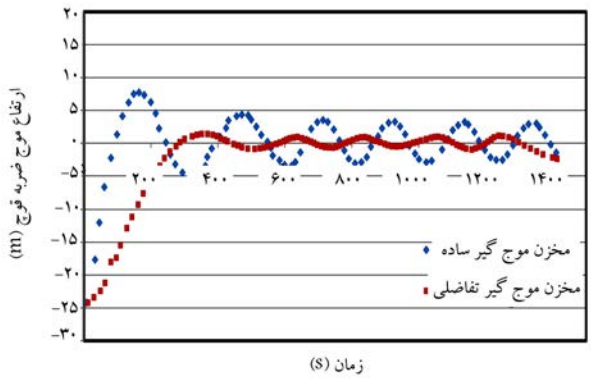
۴.۵. مقایسه‌ی ارتفاع موج فشاری ناشی از پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ

در بخش حاضر، میزان تأثیرپذیری ارتفاع مخزن از ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ بررسی شده است. شکل ۱۱، نوسان‌های ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ نسبت به زمان را در حالت اول نشان می‌دهد. در مخزن موج‌گیر ساده، در حالت اول ($n = ۲/۲۵$) پس از طی زمان ۱۴۹/۵۵ ثانیه، ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ به بیشینه‌ی مقدار ۶/۱۶+ متری تراز مخزن اصلی می‌رسد، در حالی که در مخزن تفاضلی پس از طی زمان ۲۹۲/۶۱۵ ثانیه، ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ به بیشینه‌ی خود یعنی ۱/۳۵۶+ متری تراز مخزن اصلی رسیده است. در حالت دوم ($n = ۱/۸۵$)، با گذشت زمان ۱۲۳/۵۵

جدول ۲. مقایسه ابعاد مخزن ساده و تفاضلی در دو حالت $n = ۲/۲۵$ و $n = ۱/۸۵$.

پارامتر	مخزن موج‌گیر ساده		مخزن موج‌گیر تفاضلی	
	حالت اول	حالت دوم	حالت اول	حالت دوم
زمان طی‌شده (ثانیه)	۱۴۹/۵۵	۱۲۳/۵۵	۲۹۲/۶۱	۲۷۹/۶۱
ضریب پایداری مخزن موج‌گیر	۲/۲۵	۱/۸۵	۲/۲۵	۱/۸۵
سطح پایداری توما (مترمربع)	۳۳/۲۰	۳۳/۲۰	۳۳/۲۰	۳۳/۲۰
سطح مقطع مخزن (مترمربع)	۷۴/۷۱	۶۰/۵۲	۷۴/۷۱	۶۰/۵۲
ارتفاع مخزن (متر)	۴۵/۵	۴۷	۴۰	۴۰

Archive of SID
www.SID.ir



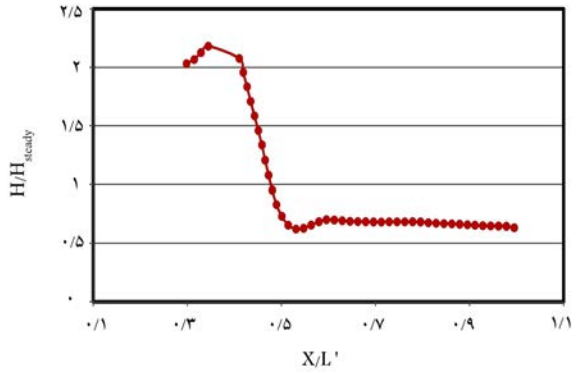
شکل ۱۱. نوسان‌های ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ در مخازن ساده و تفاضلی در حالت $n = ۱/۸۵$.

ثانیه ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ در مخزن ساده به بیشینه‌ی مقدار خود (۷/۶۷۳ متر نسبت به تراز مخزن اصلی) می‌رسد، در حالی که در مخزن تفاضلی پس از گذشت زمان ۲۷۹/۶۱ ثانیه، ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ برابر ۱/۲۸۹ متر نسبت به تراز آب در مخزن اصلی است. این مورد نشان می‌دهد با کاهش سطح مقطع مخزن ساده و نزدیک شدن آن به سطح مقطع پایداری توما، ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ و در نتیجه ارتفاع مخزن ساده افزایش می‌یابد. در حالی که قطر یا ارتفاع مخزن تفاضلی، تأثیر کمتری در ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ و مخزن دارد. در نتیجه می‌توان در مخزن تفاضلی، افزایش قطر کمتری نسبت به مخزن ساده و نسبت به حالت پایدار توما در نظر گرفت. از موارد ذکرشده می‌توان نتیجه گرفت که مخزن موج‌گیر تفاضلی در مجموع در حدود ۲۵٪ (در برخی از حالات تا ۴۰٪) اقتصادی‌تر و بهینه‌تر نسبت به مخزن ساده است.

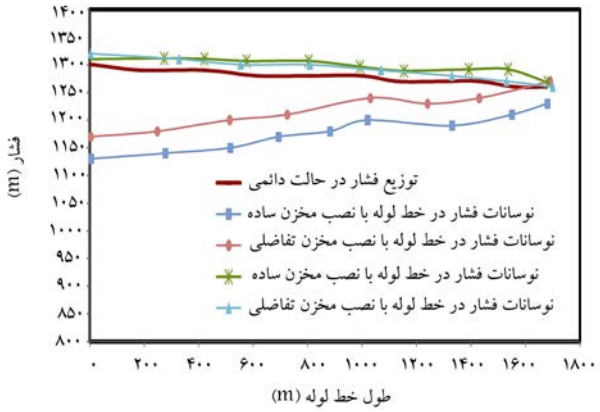
۵.۵. موقعیت قرارگیری مخزن

در تحلیل پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ، علاوه بر نوسان‌های سرعت و ارتفاع آب، موقعیت قرارگیری مخزن در خط انتقال حائز اهمیت است، زیرا مستقیماً در میزان تراز آب در داخل مخزن تأثیر می‌گذارد. برای تعیین بهترین موقعیت قرارگیری مخزن، تغییرات تراز نسبی آب، که به‌صورت تراز جریان در حالت نوسان فشار به تراز جریان در شرایط عادی ($\beta = H/H_{staedy}$) است، فقط در حالت استفاده از مخزن موج‌گیر تفاضلی بررسی شده است، که در آن H، تراز آب در مخزن پس از وقوع پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ و H_{steady}، تراز آب مخزن در حالت جریان دائمی است. در شکل ۱۲، تغییرات مذکور نشان داده شده است. L' طول کل خط لوله ($L' = L + L_{\circ}$) و X فاصله‌ی مخزن از محل توربین‌های نیروگاه یا به عبارتی انتهای لوله است.

در شکل مذکور مشاهده می‌شود که تراز جریان در مخزن در موقعیت $x/L' =$ ۰/۳۷ بیشینه‌ی مقدار $۲/۱۸H_{steady}$ را دارد. در موقعیت $x/L' =$ ۰/۲۶، نیز مقدار β برابر ۲/۰۳ است که اندکی کمتر از موقعیت $x/L' =$ ۰/۳۷ است. با جابه‌جایی موقعیت مخزن به سمت بالادست توربین ($x/L' =$ ۰/۵)، تراز نسبی آب در مخزن کاهش یافته و به ۰/۸۵ برابر تراز آب در شرایط جریان دائمی رسیده است. از این موقعیت به بعد تراز نسبی آب ثابت باقی می‌ماند. لذا محلی برای مخزن انتخاب می‌شود که در آن تغییر در تراز آب کمترین مقدار را داشته باشد، چرا که در این حالت ارتفاع مخزن نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد و بهینه می‌شود. پس بهترین موقعیت قرارگیری مخزن به لحاظ نوسان‌های تراز آب در داخل آن، $x/L' =$ ۰/۵ یا به عبارتی در نیمه‌ی خط لوله‌ی انتقال خواهد بود. به لحاظ طراحی اولیه، طول



شکل ۱۲. تغییرات تراز نسبی آب β بر حسب موقعیت قرارگیری مخزن نسبت به محل توربین‌های نیروگاه (انتهای لوله).



شکل ۱۳. مقایسه‌ی نوسان فشار در خط لوله با وجود مخازن موج‌گیر ساده و تفاضلی نسبت به شرایط عادی جریان.

لوله‌ی پنستاک ($L_{\circ}$) ۴۳۰ متر در نظر گرفته شده است، لیکن به لحاظ نوسان‌های تراز آب و نیز کاهش ارتفاع مخزن، موقعیت مخزن باید به فاصله‌ی ۸۰۰ متر از انتهای لوله جابه‌جا شود که در این حالت طول لوله‌ی پنستاک به $L_{\circ} = ۸۰۰m$ تغییر یافته است.

۶.۵. نوسان‌های فشار در خط لوله

کنترل فشارهای بیشینه و کمینه در خطوط انتقال سیستم‌های نیروگاهی، یکی از مهم‌ترین دلایل نصب مخازن موج‌گیر در سیستم انتقال است. لذا پس از مقایسه‌ی پارامترهای مهم، ضرورت دارد نوسانات فشار در خط لوله در حالت قرارگیری مخازن ساده و تفاضلی با سطح مقطع ۱/۸۵ برابر سطح توما و در موقعیت $L_{\circ} = ۸۰۰m$ بررسی شود. مقایسه‌ی فشارها نسبت به حالت بدون وجود مخزن در سیستم انتقال بوده است. شکل ۱۳، نوسان‌های فشار بیشینه و کمینه در طول لوله را در ۳ حالت دائمی، نصب مخزن ساده و نصب مخزن تفاضلی نشان می‌دهد.

میزان فشار بیشینه در طول خط لوله در حالت نصب مخزن ساده بیش از فشار بیشینه‌ی ایجادشده با وجود مخزن تفاضلی است. با نصب مخزن ساده، فشار کمینه به مقدار ۰/۱۲- متر افزایش یافته و تا حدودی احتمال وقوع خلاءزایی در خط لوله وجود دارد. با نصب مخزن تفاضلی، این افزایش به مقدار ۲/۱۴+ متر خواهد رسید، که فشار کمینه در سیستم خط لوله ایجاد نخواهد شد. بنابراین به لحاظ کنترل

Archive of SID
www.SID.ir

نوسانات فشار بیشینه و کمینه در خط لوله، مخزن تفاضلی به مراتب بهتر از مخزن ساده است.

۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، در ابتدا لزوم نصب مخزن موج‌گیر در سیستم انتقال ارزیابی و با توجه به ایجاد فشارهای مثبت و منفی بالا که ناشی از تغییر بار به سمت توربین برق‌آبی توسط بسته شدن آنی شیر کنترل است، تأثیر به کارگیری دو نوع مخزن موج‌گیر ساده و تفاضلی روزنه‌دار بررسی شده است. موارد مورد توجه در شبیه‌سازی عددی سرعت جریان در خط لوله، تغییرات تراز آب در داخل مخزن، سطح مقطع و ارتفاع مخزن، ارتفاع موج ضربه‌ی قوچ و نیز موقعیت قرارگیری مخزن در خط لوله است. نتایج کلی حاصل از این شبیه‌سازی را می‌توان به این شرح ارائه کرد:

- بدون نصب مخزن موج‌گیر، فشارهای بیشینه و کمینه بیش از مقدار قابل تحمل لوله هستند.
- دامنه‌ی نوسان‌های تراز آب در مخزن ناشی از وقوع پدیده‌ی ضربه‌ی قوچ، در مخزن ساده بیش از مخزن تفاضلی است. به بیانی دیگر در مخزن تفاضلی، نوسان جرم در دامنه‌ی کوچک‌تری انجام می‌شود.
- مخزن تفاضلی با ارتفاع کمتری نسبت به مخزن ساده و به لحاظ اقتصادی بهینه‌تر است.
- استهلاک انرژی در استفاده از مخزن تفاضلی بیش از مخزن ساده است.
- مخزن تفاضلی به لحاظ ابعاد ۲۵٪ و (در برخی از موارد تا ۴۰٪) بهینه‌تر است و به لحاظ کارایی نیز عملکرد بهتری نسبت به مخزن ساده دارد.
- مخزن موج‌گیر تفاضلی نسبت به مخزن ساده، به مراتب عملکرد بهتری در کنترل فشارهای بیشینه و کمینه دارد.

پانوشت‌ها

1. water hammer
2. characteristic equations
3. second viscosity
4. power plants
5. penstock
6. tunnel
7. surge tank
8. simple surge tank
9. restricted surge tank
10. differential surge tank
11. impulse-response
12. MATLAB
13. finite element
14. finite difference
15. characteristic method
16. finite difference method
17. governor

منابع (References)

1. Kardan, N., Hassanzadeh, Y. and Zamanian, J. "A study on controlling methods of maximum and minimum pressures resulting from water hammer phenomenon in high pressure pumping stations", Journal of Water and Soil, **27**(1), pp. 134-121 (2015).
2. Parmakian, J., *Waterhammer Analysis*, Dover Publications Inc. (1963).
3. Streeter, V.L. and Wylie, E.B., *Hydraulic Transients*, Mc Graw-Hill Book Co., New York (1967).
4. Martin, C.S. "Status of fluid transients in Western Europe and the United Kingdom", Report on Laboratory Visits by Freeman Scholar, *Journal of Fluids Engineering*, **95**(2), pp. 301-318 (1973).
5. Tullis, J.P., Streeter, V.L. and Wylie, E.B. "Waterhammer analysis with air release", *In: Proceedings of the 2ed International Conference on Pressure Surges*, BHRA, London, UK, pp. 35-47 (1976).
6. Shimada, M. and Okushima, S. "New numerical model and technique for waterhammer", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, **110**(6), pp. 736-748 (1984).
7. Larock, B.E., Jeppson, R.W. and Watters, G.Z., *Hydraulics of Pipeline Systems*, CRC Press, New York (2000).
8. Pezzinga, G. "Second viscosity in transient cavitating pipe flows", *Journal of Hydraulic Research*, **41**(6), pp. 656-665 (2003).
9. Sirvole, k. "Transiant analysis in pipe networks", M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (2007).
10. Hariri Asli, K., Nagiyev, F.B., Haghi, A.K. and Aliyev, S.A. "Waterhammer and fluid condition", 1st Festival on Water and Wase Water Research and Technology, Tehran, Iran (2009).
11. Mansouri, B., Salmasi, F. and Oghati, B. "Sensitivity analysis for waterhammer problem in pipelines", *Iranica Journal of Energy & Environment*, **5**(2), pp. 124-131 (2013).
12. Moharrami, H., Salehi Neyshabouri, A.A. and Foroughi, A. "Optimal design of differential surge tanks", *Journal of Iran-Water Resources Research*, **4**(1), pp. 59-69 (2003).
13. Saghi, H., Nasirian, A. and Faghfour-e Maghrebi, M. "Comparision the design parameters of simple and differential surge tanks", *8th Iranian Hydraulic Conference*, Tehran University, Tehran, Iran (Dec. 14-16 2007).
14. Talebzadeh, Gh.R., Nasseri, M. and Asghari, K. "Evolutionary optimization for the number and capacity of

Archive of SID

www.SID.ir

surge tanks and pipeline diameters in a transmission line", *Journal of Water and Wastewater*, **59**, pp. 29-38 (2005).

15. Saghi, H. and Faghfour-e Maghrebi, M. "Controlling the pressure wave in water transmission line by simple surge tanks", *2th National Conference on dam and hydropower (NCDH)*, Tehran, Iran (2008).
16. Azhdary Moghaddam, M. "Analysis and design of simple surge tank", *IJE Transaction A: Basics*, **17**(4), pp. 339-345 (2004).
17. Afshar, M.H. and Rohani, M. "Application of genetic algorithm in optimal design of surge tank in pipeline system", *8th international Congress on Civil Engineering*, Shiraz University, Shiraz, Iran (May 11-13 2009).
18. Kim, S.H. "Design of surge tank for water supply systems using the impulse response method with the GA algorithm", *Journal of Mechanical Science and Technology*, **24**(2), pp. 629-636 (2011).
19. Nabi, Gh., Rehman, H.U., Kashif, M. and Tariq, M. "Hydraulic transient analysis of surge tanks: Case study of satpara and golen gol hydropower projects in Pakistan", *Pakistan Journal of Engineering and Applied Science*, **8**, pp. 34-48 (2011).
20. Amaral, L., Berreksi, A. and Abdoune, K. "Computation of mass oscillations in a surge tank by finite element technique", *LARHYSS Journal*, **15**(1), pp. 139-149 (2013).
21. Ramadan, A. and Mustafa, H. "Surge tank design considerations for controlling waterhammer effects at hydroelectric power plants", *University Bulletin*, **3**(15), pp. 147-160 (2013).
22. Iliev, V., Popovski, P. and Markov, Z. "Transient phenomena analysis in hydroelectric power plants at off-design operating conditions", *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, **2**(6), pp. 1480-1488 (2012).
23. Chaudhry, M.H., *Applied Hydraulic Transients*, Van Nostrand, 521 p. (1987).
24. Ashofteh, J., *Applied Hydraulic Transients, Water Hammer*, Cobra Companies, Tehran (1989).

Archive of SID

www.SID.ir