بسم الله الرحمن الرحیم

۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

سیستم های انتقال آب

مخازن انبساط (Surge Tanks)

دکتر مهرزاد شمس

گلشن نظری

مینا صفری

پاییز ۹۳

فهرست مطالب

چکیده ۱

مقدمه ۱

مخازن انبساط ۲

انواع مخازن انبساط ۷

۱- مخزن انبساط ساده (Simple Surge Tank) ۷

۲- مخازن انبساط با سطح مقطع متغیر (Variable - Area Surge Tanks) ۷

۳- مخازن انبساط محدود(Throttled Surge Tanks) ۹

۴- مخازن انبساط دیفرانسیلی (Differential Surge Tanks) ۹

۵- مخازن انبساط سرریزدار (Spilling Surge Tanks) ۱۰

۶- مخازن انبساط بسته(Closed Surge Tanks) ۱۰

تحلیل ضربه قوچ در مخازن انبساط ۱۰

تحلیل ضربه قوچ در مخزن انبساط بدون افت ۱۱

تحلیل ضربه قوچ در مخزن انبساط ساده با افت انرژی ۱۲

الف- تئوری نوسان جرمی (Mass Oscillation) ۱۲

ب- معادلات لگاریتمی محاسبه ضربه قوچ در مخزن انبساط ساده با توجه به افت ۱۵

تحلیل ضربه قوچ در مخزن انبساط دیفرانسیلی ۱۸

الف) معادلات جانسون در هنگام افزایش بار توربین ۱۹

ب) معادلات دیفرانسیل جانسون در هنگام کاهش یا قطع بار ۲۲

مراجع ۲۵

چکیده

مخزن انبساط به صورت لوله، استوانه یا شفت عمودی یا یک مخزن ذخیره آب است که در مسیر پایین دست جریان انتقال آب (از یک سد) به توربین قرار می گیرد یا بر روی لوله رانش پمپ نصب می گردد. در مواقعی که فشار در لوله افزایش می یابد سیال از داخل خط لوله وارد مخزن شده و در آن ذخیره می گردد و بالعکس هنگامی که فشار در خط لوله کاهش می یابد سیال از داخل مخزن وارد لوله می گردد و بدین ترتیب از تغییرات سریع سرعت جلوگیری می نماید.

مقدمه

ضربه قوچ در اثر یک تغییر (یا قطع ناگهانی) در سرعت جریان سیال در یک مجرا (شبکه) به وجود می آید، به عبارت دیگر انرژی سینتیک (Kinetic Energy) به انرژی الاستیسیته (Elasticity Energy) تبدیل می گردد. در موقع قطع برق موتور پمپ های دورانی یا سانتریفوژ (قطع ناگهانی برق یا خاموش کردن ناگهانی پمپ)، نیروی محرکه دوران دهنده پروانه پمپ سریع قطع می گردد، به همین دلیل سرعت جریان سیال بطور ناگهانی تغییر می یابد و انرژی سینتیک از حالت فشار به مکش در خروجی پمپ تبدیل می شود. در این تغییر، امواج فشاری شدیدی در امتداد لوله خروجی پمپ پیش می رود و این امواج در اثر برخورد با مانع (منبع آب) منعکس و برگشت می کند، موج برگشتی جهت جریان سیال را در پمپ عوض کرده و دبی ماکزیممی در جهت عکس، از پمپ جریان می یابد و پمپ به صورت توربین در جهت عکس چرخش اولیه خود شروع به چرخش می نماید و برای مدت کوتاهی پمپ همانند توربین آبی عمل می‌نماید.

همانطور که در بالا اشاره شد، بر اثر قطع ناگهانی نیروی محرکه پمپ، برای زمان کوتاهی پمپ مانند توربین آبی (WaterTurbine) عمل می نماید و کاهش ناگهانی حرکت سیال موجب می شود، فشار داخل لوله خروجی پمپ از فشار اتمسفر کمتر گردد. همچنین به علت اصطکاک درونی پمپ و موتور، کاهش قابل ملاحظه ای در خروجی پمپ ایجاد می نماید که مجموعه این عوامل باعث تبخیر آب و قطع جریان آن در خروجی پمپ می شود و حداقل فشاری در حد فشار بخار آب در لوله خروجی ایجاد می گردد.

عمل تشکیل بخار باعث جدا شدن ستون آب از پمپ می گردد (پدیده جدا شدن ستون آب، همان جدا شدن مایع است که در اثر کشش بیش از حد وقتی فشار کاهش یافته و نزدیک فشار تبخیر می شود به وجود می آید.) و این کاهش فشار در لوله با سرعت و به صورت موج حرکت نموده و ادامه پیدا می کند تا به مخزنی که آب به آن پمپ می شود، می رسد. این حرکت موجی بر اثر برخورد با این مانع منعکس گشته و ستون های آب جدا شده مجدداً به هم متصل شده و به صورت یک موج افزایش یافته دوباره به سمت پمپ برمی‌گردد و به پمپ ضربه وارد می نماید (ضربه قوچ) و این پدیده مجدداً تکرار می شود. در خلال حرکت موج فشار در لوله، مقداری از انرژی آن در اثر اصطکاک از بین می رود. موج فشاری ناشی از افزایش فشار

موج تراکم و موج فشاری ناشی از کاهش فشار موج انبساط نام دارد، امواج تراکم در برخورد با مانع نرم مانند منبع آب، هوا و ... به صورت موج انبساط و در برخورد با مانع سخت مانند شیر یکطرفه، دیوار و ... بصورت امواج تراکم منعکس می شود، این مسئله در مورد موج انبساط نیز صدق می کند. افت فشاری که بر اثر اصطکاک داخل لوله به وجود می آید روی نوسانات فشار تأثیر نموده و کم کم آن را مستهلک و سیستم به حالت تعادل در می آید. پتانسیل تخریبی ضربه قوچ با صدای ناشی از آن قابل تشخیص است، ولی مواردی بوده است که صدای ضربه قوچ شنیده نشده است، اما باعث منهدم شدن لوله گردیده که پس از آنالیز آن مشخص شده است که تخریب به وسیله پدیده ضربه قوچ بوده است. ضربه قوچ سریع و زود گذر است ولی ضربات بسیار مخرب دارد و تعیین شدت آن در بعضی از مواقع بی نهایت دشوار می باشد.

پدیده ضربه قوچ در زمان استارت پمپ هم به وجود می آید و باعث ازدیاد فشار اضافی در پمپ و لوله می‌گردد. ولی مشکلات و مخاطرات ناشی از آن کمتر از ضربه قوچ هنگام خاموش شدن پمپ می باشد. در ابتدای راه اندازی پمپ، میزان جریان آب حدود صفر می باشد و با ازدیاد ناگهانی فشار بر اثر چرخش پروانه و ایجاد جریان سریع، موج فشاری برابر با فشار ضربه قوچ (در حالتی که شیر بسته باشد) ایجاد می نماید، این پدیده را با نیمه باز گذاشتن شیر خروجی پمپ می توان کنترل و فشار اضافی ایجاد شده را کاهش داد.

برای کاهش فشار ناگهانی از پدیده ضربه قوچ بخصوص در زمان خاموش شدن پمپ راه های ذیل پیشنهاد می شود:

استفاده از چرخ لنگر، مخزن انبساط، شیرهای یکطرفه ای که قابلیت بسته شدن سریع را دارند، شیرهای کنترل پمپ، شیرهای اطمینان، شیرهای هوا، سوپاپ ها، درپوش های اطمینان (Rupture disk) و سایر تجهیزاتی که برای کاهش فشار ناگهانی از پدیده ضربه قوچ می شود.

برای یک طراح شاید مخزن انبساط مطمئن ترین روش مقابله با ضربه قوچ باشد و نیز در عین حال ممکن است مستقیم ترین راه حل این مشکل باشد، ولی در عمل برای مجری طرح و بهره برداری شاید این روش گرانبهاترین و مشکل ترین راه حل باشد.

در ادامه به توضیح کامل مخازن انبساط، انواع آن و تحلیل ضربه قوچ در آن می پردازیم :

مخازن انبساط

با بیان ساده، مخزن انبساط (Surge Tank) به صورت یک لوله ، استوانه یا شفت عمودی و یا یک مخزن ذخیره آب است که در مسیر پایین دست جریان انتقال آب (از یک سد) به توربین قرار می گیرد یا در مسیر پایین دست خط انتقال آب یک پمپ استقرار می یابد تا با تخفیف فشارهای ناشی از ضربه قوچ ایمنی سیستم را تامین نماید.

مخزن انبساط معمولا در سیستم های انتقال آب تحت فشار، پمپاژ و توربین های نیروگاه های آبی به کار گرفته می شود تا تغییرات شدید فشار، ناشی از ضربه قوچ را کاهش داده و نیز در هنگام راه اندازی توربین ها فشار لازم را برای تنظیم دبی اعمال نماید.

عمل مخزن انبساط به طور معمول به شرح زیر است :

- با ایجاد یک سطح آزاد آب در مخزن یا در استوانه مخزن انبساط، موجب می گردد تا در هنگام وقوع هرگونه فشار منفی (که به علت ایجاد ضربه قوچ اتفاق می افتد)، با تغذیه آب از این مخزن به درون لوله آب بر توربین (penstock)، فشار سیستم را متعادل نماید و یا در هنگام ایجاد فشار مثبت، مقداری از جریان آب درون لوله آب بر را (که تحت فشار قرار گرفته) دریافت داشته و فشار سیستم را در مسیر لوله آب بر کاهش دهد. این امر سبب جلوگیری از انهدام لوله آب بر و تونل انتقال آب، شیرآلات و پره های توربین خواهد شد.

- مخازن انبساط در هنگام شروع و راه اندازی توربین ها ، مقدار کافی آب را به درون لوله آب بر می فرستد تا سیستم انتقال جریان آب از بند یا سد به توربین، فرصت کافی برای ایجاد شتاب لازم جهت ایجاد یک جریان دائمی به داخل توربین را داشته باشد.

اصولا به هنگام آغاز کار هر توربین برقابی (که با باز کردن شیرهای کنترل صورت می گیرد)، جهت حفظ و تامین و ایجاد جریان دائمی لازم است که به طور ناگهانی حجم زیادی از سیال در مدت زمان کوتاه و مشخصی به توربین برسد. اما از آن جا که لوله آب بر و تونل آبی معمولا طویل می باشند، لذا برای ایجاد شتاب لازم جهت جریان دائمی فوق الذکر معین، مخزن انبساط وارد عمل شده و جبران کمبود اولیه جریان را می نماید و پس از برقراری جریان دائمی، مخزن انبساط دوباره از آب پر می شود.

- در هنگام قطع بار توربین، فشار ضریه قوچ در پشت شیر کنترل ایجاد می شود که به سرعت در طول مسیر لوله آب بر حرکت می نماید. مخزن انبساطی که در نزدیکی توربین ها کار گذاشته می شود، مقدار اضافی جریان را دریافت داشته و لذا از بالا رفتن فشار تا حد خطرناک در لوله آب بر و یا تونل انتقال آب جلوگیری می کند. به این ترتیب امواج فشار خفیف تری در مسیر انتقال جریان ایجاد می شود که نمی تواند به سیستم لوله انتقال و یا تونل آبی و توربین صدمه ای وارد کند.

- مخزن انبساط به مثابه یک وسیله متعادل کننده فشار، تغییرات کوچک جریان را (که همراه با ایجاد فشارهای منفی و مثبت حاصل از عملکرد گاورنر (Governer) می باشد) به نحوی خنثی می نماید که سیستم در شرایط پایداری کار کند.

لازم به یادآوری است که اگر از مخزن انبساط در سیستم پمپاژ استفاده شود، بایستی گرادیان هیدرولیکی کم باشد و یا به علت توپوگرافی خاص منطقه خط انتقال جریان تقریبا با شیب کم طراحی شده باشد، در غیر این صورت مخزن انبساط در مسیر خطوط لوله و در محل ارتفاعات استقرار خواهد یافت.

در این گونه موارد کاهش یا افزایش فشار سیستم انتقال به طور مناسب تعدیل نشده و از این رو برای حفظ سیستم انتقال باید از سیستم های حفاظتی دیگر نیز استفاده نمود. معمولا در لوله های آب بر کوتاه ایستگاه های برقابی از مخازن انبساط استفاده نمی شود. بلکه در چنین حالاتی فشارهای ناشی از ضربه قوچی با روش و وسایل دیگر کنترل می گردد.

باید توجه داشت که چون سطح آب در مخزن انبساط با جوّ در تماس بوده و از طرفی این مخزن در بخش انتهایی به لوله آب بر اتصال دارد، لذا برای جلوگیری از سرریز شدن مخزن انبساط در حالت عادی و در هنگام ایجاد فشار اضافی در سیستم، باید مخزن انبساط به خط گرادیان هیدرولیکی در محل احداث مخزن انبساط نزدیک باشد، تا علیرغم هرگونه نوساناتی که ممکن است در سیستم انتقال جریان بوجود آید، سطح آب مخزن انبساط از ارتفاع معینی بالاتر و یا پایین تر نرود. البته باید با تعبیه سرریز مناسب نیز به نوبه خود، خطرات ناشی از سرریز شدن شفت مخزن انبساط را کنترل نمود.

مقدار دبی یا جریانی که از لوله آب بر و یا لوله انتقال به مخزن انبساط وارد می شود و یا ارتفاع سطح آب در مخزن انبساط سطح آب در مخزن انبساط در هنگام بهره برداری عادی و یا در هنگام وقوع ضربه قوچ، به عواملی چند از جمله اندازه لوله آب بر، ابعاد و اندازه مخزن انبساط، نوع شیرآلات مورد استفاده، چگونگی بسته شدن دریچه ها و شیرها در هنگام بهره برداری و قطع و وصل بار، طول لوله آب بر و تونل انتقال آب، سرعت جریان در مسیر انتقال و عوامل دیگر بستگی دارد.

در نیروگاه های برقابی جریان آب سد بوسیله یک لوله یا تونل آبی نسبتا طویل و یک لوله آب بر نسبتا کوتاه به توربین ها می رسد. معمولا قطر این لوله ها و نهایتا حجم آب انتقالی زیاد است. برای کند یا تند نمودن چنین جریانی تا رسیدن به حالت پایدار و دائمی، نیروی زیادی به سیستم اعمال می شود. برای مثال در یک تونل آبی به قطر ۵ متر و طول ۵ کیلومتر، وزن آبی که در حال حرکت است به حدود ۱۰۰ هزار تن می رسد که تغییرات عظیم ممنتوم را در توقف و یا شروع کار توربین باعث می شود.

تغییرات جریان ورودی نیز همانند توقف ناگهانی و یا راه اندازی توربین ها موجب ایجاد ضربه قوچ می گردد. این امر به ویژه در هنگام تغییر بار توربین ها که در نتیجه آن تغییراتی در مقدار الکتریسیته تولیدی ایجاد می گردد، اتفاق می افتد. در شرایط عادی تغییرات کم و یا تدریجی در مقدار بار توربین چندان خطرناک نخواهد بود، اما در حوادث غیرمترقبه و لحظه ای مانند قطع ناگهانی بار، خاموشی در لحظات حملات هوایی، ایجاد زلزله و آتش سوزی و یا مشکلاتی که در محل توربین ها به طور ناگهانی به وجود می آید، موجب تغییرات فشار بسیار زیاد می گردد.

البته در هنگام بهره برداری با استفاده از وسایلی مانند شیرهای هوا، انحراف تدریجی جریان، یا قطع تدریجی به وسیله شیرهای قابل کنترل تا حد زیادی فشار ضربه قوچ کنترل می شود، اما در هنگام تقاضای بار یا از کار افتادن توربین ها به طور ناگهانی و یا قطع کامل بار در مواقع اضطراری، این وسایل چندان سودمند واقع نشده و مشکل ضربه قوچ همچنان به قوت خود باقی خواهد ماند.

علاوه بر این ، استفاده از شیرهای سینکرونی با ضمایم گران قیمت در سیستم توربین های برقابی، به ویژه در هنگامی که افزایش ناگهانی بار به بیش از ۵۰ درصد یا بیشتر برسد ، به علت بالا بودن هزینه های اجرایی طرح، جای خود را به مخازن انبساط می دهد.

طرز عمل مخزن انبساط در هنگام توقف ناگهانی توربین و یا به عبارت دیگر خارج نمودن توربین از مدار کاری بسیار ساده می باشد. در این حالت، سطح آب در مخزن انبساط به آرامی به سطحی بالاتر از حالت معمولی یا عادی می رسد و از این رو انرژی سینتیک جریان منحرف شده به مخزن انبساط، به انرژی پتانسیلی تبدیل می گردد. تبدیل این نوع انرژی ها به یکدیگر موجب کاهش جریان و در نتیجه کاهش فشار ضربه قوچ در لوله آب بری که بین سد و توربین است می شود. در هنگام راه اندازی

توربین، ارتفاع و حجم آب موجود در شفت مخزن انبساط، با باز نمودن شیرهای کنترل جریان یا دریچه های کنترل، انرژی لازم برای برآورد نمودن تقاضای فوری برای مقدار جریان مقتضی به توربین را فراهم می سازد.

باید توجه کرد که در بعضی از نیروگاه های آبی، تونل آبی یا خط انتقال جریان به توربین طویل و حتی تا ۳۰ ثانیه یا بیشتر وقت لازم است که جریان در لوله آب بر به صورت پایدار درآید و معمولا فشارهای اصل از ضربه قوچی در ۲۰-۱۵ ثانیه اول مهم و خطرناک می باشند.

اصولا در هنگام طراحی مخزن انبساط بایستی معیارهای زیر را در نظر گرفت:

- در یک نیروگاه ابی که بازده توربین یا Governer کنترل می شود، مخزن انبساط باید دارای سطح مقطع کافی باشد تا از وقوع یک حالت ناپایدار جلوگیری نماید.

- سطح مقطع مخزن انبساط باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا ضربه قوچ هایی که در حال بهره برداری ایجاد می شود، موجب تغییرات قابل توجهی در وضعیت توربین نگردد.

- محل مخزن انبساط باید طوری انتخاب شود که تغییرات فشارهای ضربه قوچ در حدود قابل قبولی کنترل شود. این حدود به مسائلی از جمله عوامل سازه ای، نوع سنگ، شیب و ابعاد لوله آب بر مربوط می شود. معمولا محل مخزن انبساط در نقطه اتصال خط لوله جریان با تونل آبی (که با شیب کم ساخته شده) و لوله آب بر (که به توربین منتهی می شود و دارای شیب تند است) در نظر گرفته می شود. به طور معمول هرچه محل مخزن انبساط به توربین نزدیک تر باشد، عمل آن در کنترل ضربه قوچ موثرتر خواهد بود.

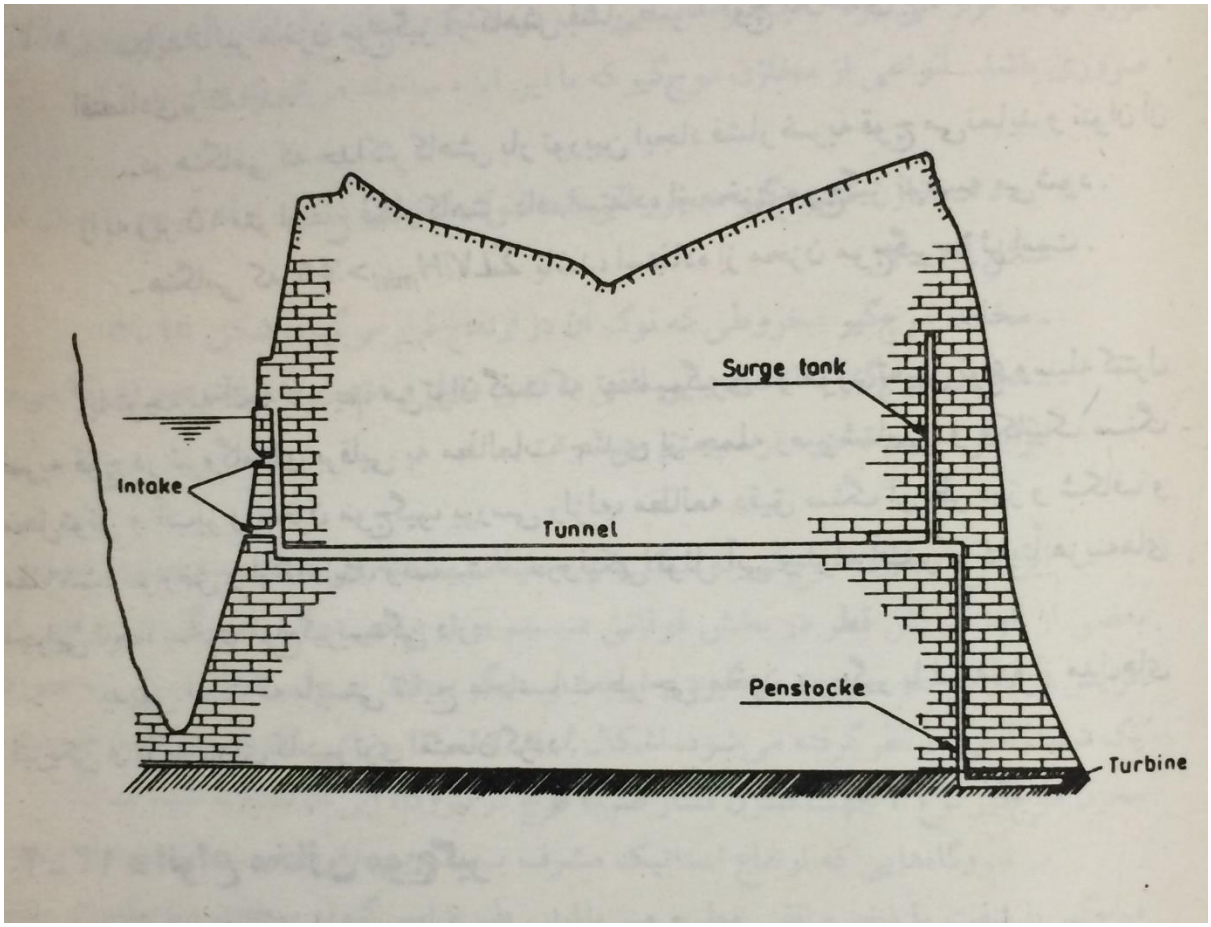
- حجم ذخیره مخزن انبساط در بالای سطح تراز آب نرمال باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا حجم جریان دریافتی از لوله جریان موجب سرریز شدن مخزن انبساط نشود. در صورتی که مخزن انبساط با سرریز طراحی شود، انگاه محدودیت در حجم مخزن انبساط کاهش خواهد یافت.

- حجم ذخیره مخزن انبساط باید تکافوی جریانی را که در هنگام افزایش بار و یا شروع راه اندازی به سیستم لوله آب بر تغذیه می شود، داشته باشد. از این رو تا رسیدن جریان به یک حالت پایدار از ورود هوا به لوله آب بر جلوگیری می گردد.

- مخزن انبساط باید کاملا پایدار باشد تا ارتعاشات و لرزش های سخت را تحمل نماید و به عبارت دیگر سنگ کوه بایستی مقاوم و سخت باشد.

- مخزن انبساط باید طوری طراحی شود که تغییرات فشار ضربه قوچی در حدی کنترل گردد که حرکات شدید Governer تا رسیدن به بار نهایی را مشکل ننماید.

- مخزن انبساط باید تا حد امکان به توربین ها و یا ایستگاه پمپاژ نزدیک باشد. زیرا هر چه مخزن انبساط از محل توربین و پمپ دورتر باشد. کاهش فشار ضربه قوچ، تغذیه سیستم و دریافت جریان از لوله آب بر در هنگام راه اندازی یا توقف توربین، به خوبی صورت نگرفته و از اثرات طراحی این سیستم به نحو قابل ملاحظه ای کاسته خواهد شد.



شکل ۱- نمونه ای از مخزن انبساط در سد مخزنی جیرفت – کرمان

لازم است اضافه گردد که برای کنترل امواج فشار منفی و مثبت ضربه قوچ در نیروگاه های برقابی، از وسیله دیگری به نام اتاق فشار (Air Cushion) استفاده می شود. به ویژه تاکید می شود که اگر ارتفاع کوه به قدری زیاد باشد که برای اتصال شفت به جوّ آزاد، ارتفاع مخزن انبساط را غیر اقتصادی نماید و یا با مشکلاتی از جمله نحوه اجرا و نبودن محلی مناسب برای ایجاد شفت عمودی مواجه گردد، طرح اتاق فشار در مسیر تونل و لوله آب بر عملی تر و اقتصادی تر خواهد بود. اما در سنگ های کارستی و یا سنگ هایی که دارای شکاف و درز زیاد باشد، ممکن است هزینه تزریق و یا پوشش دار نمودن اتاق فشار، جبران هزینه های اضافی مخزن انبساط را نموده و آن را در اولویت قرار دهد.

به طور کلی در انتخاب مخزن انبساط به عنوان عاملی جهت کنترل فشار ضربه قوچ در یک نیروگاه برقابی، معیارهای زیر را در نظر می گیرند :

۱) باید تاثیر مخزن انبساط در کاهش فشار ضربه قوچ به حدی باشد تا تونل آب بر را اقتصادی تر نماید.

۲) در هنگامی که حداکثر کاهش بار توربین ایجاد فشار ضربه قوچ می نماید و نتوان آن را به زیر ۱۵ متر ارتفاع فشار کاهش داد ، استفاده از مخزن انبساط توصیه می شود.

۳) هنگامی که $\Sigma LV/H_{min} > 3\text{-}5$ باشد، استفاده از مخزن انبساط موثر است.

با توجه به آنچه گفته شد، می توان گفت که تصمیم گیری در مورد تعیین نوع وسیله کنترل ضربه قوچ در نیروگاه های برقابی به مطالعات چندی از جمله زمین شناسی و مکانیک سنگ محل تونل و آب بر و مخزم انبساط، بررسی زلزله، مطالعه دقیق سنگ از نظر درز و شکاف و مقاومت، عوارض و ارتفاعات، وضعیت هیدرولیکی تونل آبی و لوله آب بر و نهایتا هزینه های اجرایی ایجاد مخزن انبساط بستگی دارد.

بدیهی است که بایستی نتایج محاسبات طراحی مخزن انبساط با استفاده از مدل های فیزیکی و یا مدل های کامپیوتری امتحان گردد.

انواع مخازن انبساط

بر حسب عوارض طبیعی محل استقرار توربین، اندازه لوله آب بر و ظرفیت آن و بسیاری از مسائل سازه ای، هیدرولیکی و الکترومکانیکی، جهت کنترل فشار ضربه قوچ از انواع مختلف مخازن انبساط استفاده می شود. رایج ترین انواع مخازن انبساطی که در سیستم توربین ها و پمپ ها استفاده می شوند عبارتند از :

۱- مخزن انبساط ساده (Simple Surge Tank)

این نوع مخازن انبساط به صورت استوانه ای با سطح مقطع ثابت و بدون هیچ گونه مانع یا محدودیتی به لوله آب بر اتصال می یابد. طراحی این مخازن انبساط طوری انجام می شود که حداکثر تغییرات سطح آب، در داخل استوانه یا شفت مخزن انبساط محدود شود.

۲- مخازن انبساط با سطح مقطع متغیر (Variable - Area Surge Tanks)

در این نوع مخازن انبساط، سطح مقطع در ارتفاع استوانه یا شفت تغییر می یابد و در حال حاضر چندین نوع آن در طراحی به کار گرفته شده است. این نوع مخازن انبساط هنگامی مورد توجه قرار می گیرد که ذخیره اضافی آب در هنگام قطع یا راه اندازی توربین ها لازم و ضروری باشد.

انواعی از مخازن انبساط که با این ایده ساخته می شوند عبارتند از :

- مخازن انبساط مخروطی که نوک انتهایی آن به لوله آب بر اتصال دارد.

- مخازن انبساط مخروطی که نوک آن در ارتفاع قرار می گیرد.

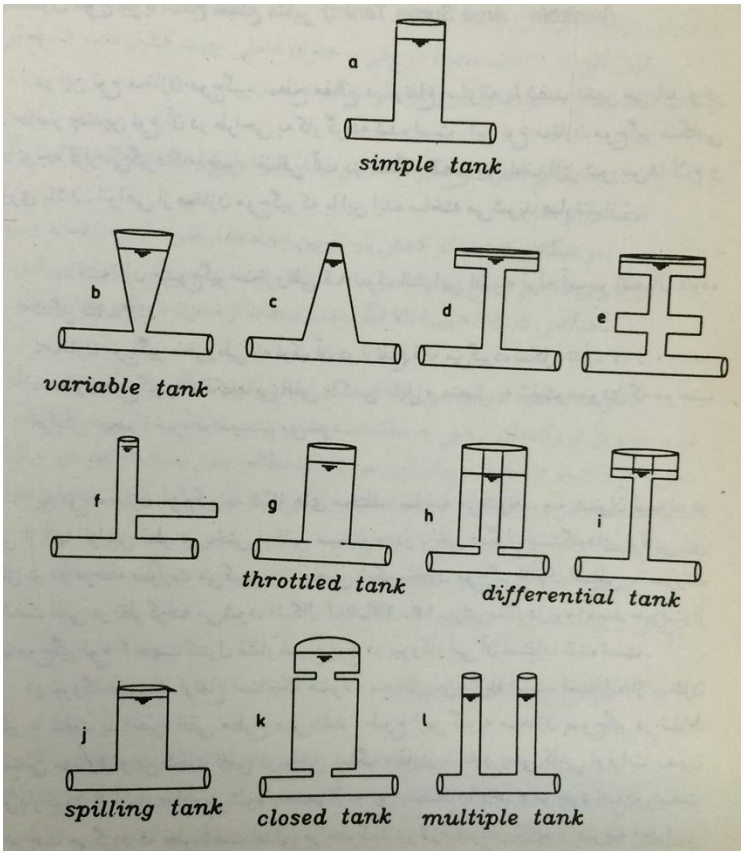
- مخازن انبساط با اتاقک هایی افقی یا کمی مایل و متصل به شفت عمودی که موجب افزایش حجم ذخیره در سیستم می شود.

این نوع مخازن انبساط به شکل های مختلف ساخته می شوند. به عنوان نمونه در بعضی از آن ها افزایش قطر در بخش فوقانی سیستم و در برخی دیگر از ایستگاه های برقابی این افزایش در دو مرحله صورت می گیرد و در بعضی دیگر مخازن انبساط اتاقک اضافی به صورت یک شفت افقی در نظر گرفته می شود.

در نیروگاه هایی که ارتفاع استاتیک مشرف به توربین ها زیاد است، استفاده از مخزن انبساط با شفت یا ذخیره افقی مطرح می باشد. طرح این گونه مخازن انبساط در نقاط کوهستانی متداول و این شفت افقی در داخل سنگ حفاری شده و حتی گاهی اوقات بدون پوشش دار کردن ازآن استفاده می شود. معمولا در این سیستم ها ذخیره موجود آب در شفت افقی موجب می گردد که قطر شفت اصلی در حد کمتری لازم شود و از این رو هزینه اجرایی کاهش می یابد.

گاهی اوقات شفت عمودی در قسمت بالای خود به یک مخزن بزرگتر ختم می شود. این بخش حجم قابل ملاحظه ای آب را در خود ذخیره می کند که در مواقع کاهش فشار به درون لوله آب بر تغذیه می گردد. وظیفه اصلی این استوانه یا شفت افقی و یا مخزن بزرگ در بخش فوقانی شفت عمودی آن است که به طور مناسب و در یک زمان کوتاه شتاب لازم را در هنگام ایجاد موج منفی یا افزایش بار بوجود آوردو نیز در هنگام افزایش فشار یا کاهش بار توربین حجم اضافه آب را در خود جای دهد.

در شرایط عادی کاری و بهره برداری نرمال نیروگاه ، سطح آب در لوله یا شفت عمودی مخزن انبساط تغییر نکرده و فقط در مواقع شدت عمل موج منفی، از حجم آب در مخزن افقی کاسته می شود و حال آن که در امواج کوچک فشاری هیچگونه تغییری در ذخیره و یا افزایش سطح تراز آب آن مشاهده نمی گردد.



شکل ۲- انواع مخازن مورد استفاده در سیستم انتقال آب و نیروگاه های برقابی.

۳- مخازن انبساط محدود (Throttled Surge Tanks)

در این گونه مخازن انبساط، محل اتصال دهانه انتهای سیستم مخزن انبساط به لوله آب بر تنگ تر می باشد که خود موجب کاهش دامنه موج و کاهش بیشتر نوسانات امواج فشاری خواهد شد.

در سال های اخیر، استفاده از این نوع مخازن انبساط مورد توجه بیشتری قرار گرفته و دلیل عمده این استقبال، اقتصادی بودن آن تا میزان ۴۰ درصد نسبت به مخزن انبساط ساده می باشد. در واقع کاهش دامنه نوسانات جرمی در سیستم انتقال به دلیل افت سیستم داخل لوله جریان و محل تنگ شده مخزن انبساط است. معمولا افت انرژی حاصل، متناسب با مجذور سرعت جریان در محل تنگ شده می باشد که در هنگام تغییرات شدید بار توربین به حداکثر خود خواهد رسید. برای ایجاد یک تنگ شدگی از روزنه سوراخ دار در انتهای مخزن انبساط و یا کاهش قطر لوله جریان در این محل، استفاده می شود.

باید توجه داشت که چون در هنگام راه اندازی توربین، خط لوله جریان با افزایش بار ناگهانی روبه رو بوده و موج فشار منفی در خط لوله جریان ایجاد می گردد، از این رو در مخازن انبساط از نوع دهانه تنگ، در صورت وجود افت انرژی به میزان زیاد در محل، وقوع شکست ستون آب متحمل است و لذا از کارآیی سیستم مخزن انبساط می کاهد. در این حالت باید محل اتصال مخزن انبساط به تونل آبی را با قطر بزرگ تر ساخته و کاهش تدریجی قطر را تا حصول به تنگ شدگی مناسب طراحی نمود. این نوع طراحی در هنگام وقوع امواج فشار منفی که باید از ورود هوا به سیستم لوله آب بر جلوگیری شود، مفید واقع می گردد.

۴- مخازن انبساط دیفرانسیلی (Differential Surge Tanks)

طراحی این نوع مخازن انبساط در کشورهای امریکای شمالی و جنوبی مورد توجه زیاد می باشد. در هنگام توقف جریان آب به توربین و ایجاد فشار ضربه قوچ، جریان آب به قسمت تنگ مخزن موج گیر دیفرانسیلی وارد شده و پتانسیل ارتفاعی به ناگهان افزایش می یابد. این امر ، خود سبب کاهش دبی در لوله اصلی جریان یا تونل آبی خواهد شد. سپس جریان ورودی به بخش تنگ شده مخزن انبساط با قسمت های جانبی متعادل می گردد و به عبارت دیگر بخش های مضاعف مخزن انبساط به مثابه منابع ذخیره آب عمل خواهند نمود.

در هنگام راه اندازی و یا افزایش بار توربین که همراه با کاهش شدید فشار و ایجاد موج فشار منفی ضربه قوچ است، سطح آب در ناحیه تنگ شده اولیه به سرعت کاهش می یابد. این تفاوت پتانسیل ارتفاعی که بین بالا دست و پایین دست جریان در لوله متصل به مخزن و محل انبساط پدید می آید، باعث اعمال شتاب بیشتری به جرم آب درون لوله شده و در نتیجه برای نیل به حالت تعادل، زمان کمتری لازم خواهد بود. هنگامی که جریان به صورت پایدار پدید آید، مقدار آب لازم وارد سیستم مخزن انبساط می شود تا ارتفاع آن در این مخزن به وضعیت عادی درآید.

۵- مخازن انبساط سرریزدار (Spilling Surge Tanks)

در این نوع مخازن انبساط از هزینه های اجرایی به دلیل ظرفیت یا حجم کم مخزن انبساط کاسته می شود. حجم مخزن انبساط باید به اندازه ای طراحی گردد که در هنگام ایجاد موج فشار منفی، هوا وارد سیستم لوله آب بر نشود. اما در هنگام قطع جریان، حجم اضافی آب ورودی به مخزن انبساط از سرریز خارج می شود. معمولا بعد از سرریز، یک کانال طویل یا مجرای مناسب برای انتقال اضافه جریان سرریز شده ساخته می شود تا دفع این آب صدمه ای به سیستم ها و سازه های آبی دیگر محلی وارد نیاورد.

۶- مخازن انبساط بسته (Closed Surge Tanks)

در سیستم های مدرن نیروگاه ها، از این گونه مخازن انبساط به تعداد بیش از یک عدد، جهت کنترل فشارهای ضربه قوچ استفاده می شود. گاهی اوقات حفره هایی که در سنگ ایجاد می شود، با پوشش یا بدون پوشش داخلی به لوله جریان و یا لوله آب بر اتصال می یابد. در واقع این گونه مخازن انبساط مشابه اتاق فشار (air cushion) هستند.

در برخی از موارد، هوای تحت فشار را جهت خفه نمودن فشار های مثبت ضربه قوچ به درون اتاقک های بسته مخازن انبساط تزریق می کنند. این نوع مخازن انبساط بسته در نواحی دوردست و برای صرفه جویی در هزینه های نیروگاه های مدرن به کار گرفته شده است. این گونه تجهیزات موج گیر تا اندازه زیادی به محفظه های فشار شباهت دارد.

لازم به ذکر است که در برخی از نیروگاه های برقابی با توجه به انواع مختلف مخازن انبساطی و بر اساس اصول و معیار های مهندسی، عوارض و شرایط محلی اقدام به تغییراتی در شکل و نحوه استقرار مخازن انبساط می گردد.

باید تاکید شود که استفاده از چند مخزن انبساط برای کنترل فشار ضربه قوچی و یا چند اتاق فشار در نیروگاه های آبی متداول و معمول است.

تحلیل ضربه قوچ در مخازن انبساط

جهت آنالیز و تحلیل کاهش فشارهای ناشی از ضربه قوچ با استقرار مخازن انبساط در مسیر خطوط انتقال جریان به توربین، روش های مختلفی ارائه گردیده که کم و بیش به نتایج مشابهی می رسد. ولی با توجه به فرضیات اولیه ای که در هر روش به کار گرفته می شود، سادگی کار، سهولت محاسبات و دقت امر متفاوت خواهد بود.

در پاره ای از روش ها از افت انرژی صرف نظر می شود، حال آن که در پاره ای دیگر از موارد افت در محاسبات گنجانیده می شود. در بعضی از روش ها با استفاده از نمودارها و در پاره ای دیگر از روش ها با انتگرال حسابی به نتایج کاربردی دست پیدا می کنند.

نحوه بهره برداری از سیستم، قطع یا افزایش تدریجی و یا ناگهانی بار نیز از عواملی است که به راه حل های خاص خود احتیاج دارد. یه علاوه در انواع مخازن انبساط برحسب شکل و موقعیت نیز معادلات اساسی تغییر می نماید. اما اصلی که در

تمامی این روش ها پابرجا می باشد، استفاده از تحلیل ضربه قوچ با استفاده از تحلیل ضربه قوچ با استفاده از نظریه ستون صلب آب است که طی ان رفتار و تونل آبی و لوله آب بر (Penstock) نیز غیر ارتجاعی یا غیر الاستیک فرض می گردد.

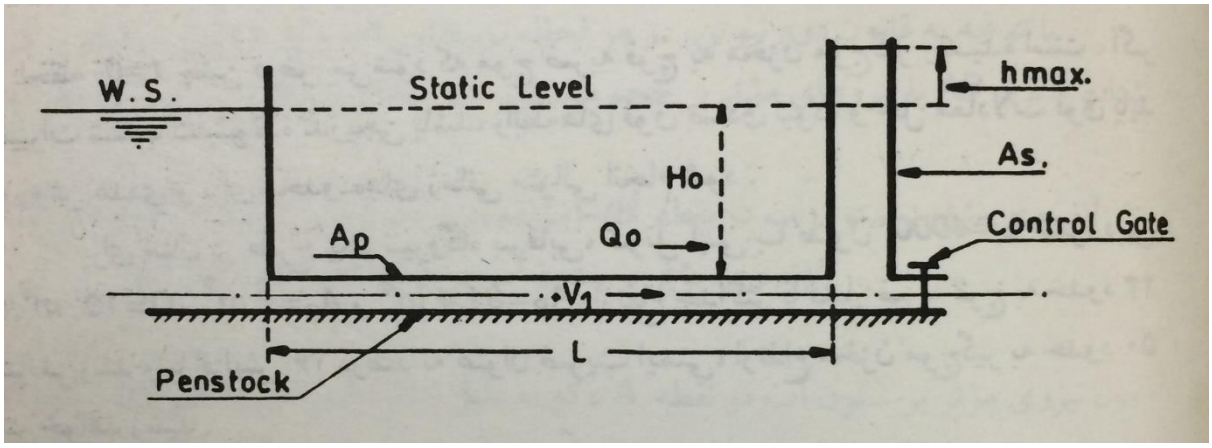
تحلیل ضربه قوچ در مخزن انبساط بدون افت

مخزن انبساط ساده ای که جریان آن توسط دریچه یا شیر کنترل، کم یا زیاد ویا به طور کامل قطع و یا وصل می شود در نظر بگیرید، شکل۳. منظور از تحلیل ضربه قوچ در این حالت محاسبه حداکثر فشار ناشی از ضربه قوچی در ارتباط با مخزن انبساط ساده می باشد. در این حالت از افت انرژی و انرژی ارتفاع نظیر سرعت صرف نظر و جهت تجزیه و تحلیل از نظریه ستون صلب آب استفاده می گردد.

پیش از آن که به بستن شیر اقدام گردد، جرم آبی که در لوله انتقال حرکت می نماید $M = LA\gamma/g$ بوده و در نتیجه بسته شدن شیر یا دریچه، نیروی نامتعادلی که بر روی ستون آب اثر می کند، برابر γAh خواهد بود. با استفاده از قانون دوم نیوتن شتاب متوقف کننده ستون آب در لوله آب بر از فرمول زیر بدست می آید.

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{gh}{L} \qquad (1)$$

که h ارتفاع ستون آب بالاتر از سطح آب در مخزن انبساط در حالت تعادل استاتیکی و L طول تونل آبی می باشد.



شکل ۳- مخزن انبساط ساده و شیر کنترل در مسیر جریان.

با توجه به شرط پیوستگی جریان به هنگام بسته شدن کامل شیر، جریان ورودی به مخزن انبساط با مقدار آبی که از لوله آب بر خارج می شود برابر است، لذا :

$$A_P V_1 = A_S V_S \quad (2)$$

یا :

$$A_P V_1 = A_S \frac{dh}{dt}$$

که در آن A_P سطح مقطع لوله آب بر، V_1 سرعت اولیه جریان، A_S سطح مقطع مخزن انبساط و $V_S = \frac{dh}{dt}$ سرعت جریان در مخزن انبساط ساده می باشند.

با حل هم زمان معادلات در شرایط مرزی $t = 0$ ، $h = 0$ و $\frac{dh}{dt} = \frac{Q}{A_S} = V = V_1$ ، مقدار h از فرمول زیر بدست می آید :

$$h = \frac{Q}{A_S}\left(\frac{A_S L}{A_P g}\right)^{1/2} \sin\left(\frac{A_P g}{A_S L} t\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

و برای رسیدن به حداکثر فشار ضربه قوچ عامل sin مساوی یک است و لذا می توان نوشت :

$$h_{max} = \frac{Q}{A_S}\left(\frac{A_S L}{A_P g}\right)^{1/2} \quad (4)$$

و زمان لازم برای رسیدن به حادثه حداکثر فشار ضربه قوچ برابر است با :

$$T = \frac{\pi}{2}\left(\frac{A_S L}{A_P g}\right)^{1/2} \quad (5)$$

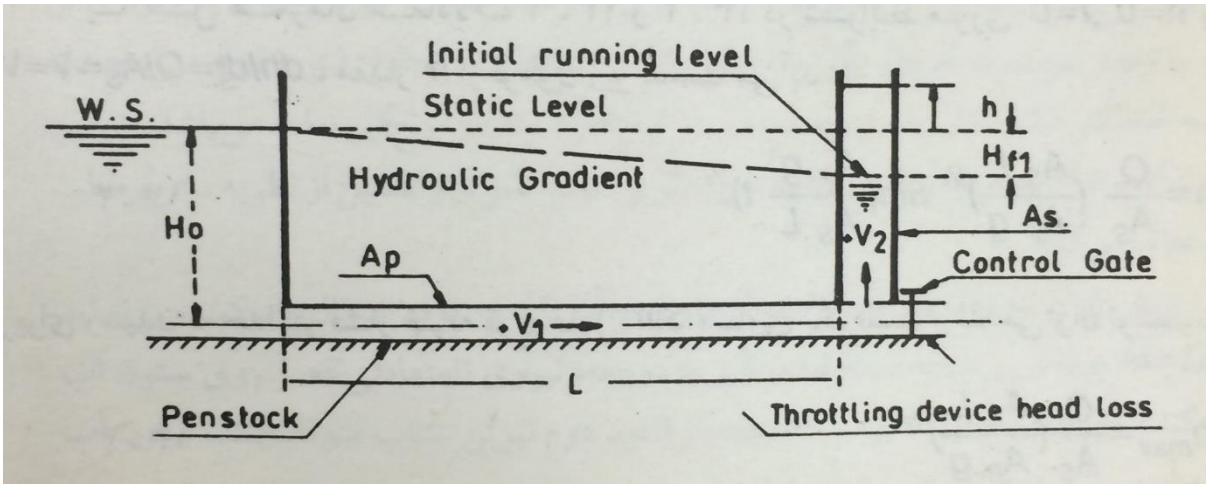
در لحظه t=0 چنین فرض می شود که موج ضربه قوچ به مخزن انبساط رسیده است. اگر تغییرات شتاب کندشونده تدریجی باشد، رابطه های فوق صادق نبوده و حل معادلات فوق باید به روش عددی و برای محدوده های زمانی متوالی انجام شود.

تحلیل ضربه قوچ در مخازن انبساط ساده با افت انرژی

در تجزیه و تحلیل ضربه قوچ با توجه به افت ، به شرح دو روش زیر پرداخته می شود :

الف- تئوری نوسان جرمی (Mass Oscillation)

در این حالت نیز یک مخزن انبساط ساده در سر راه توربین و مخزن سدی مطابق شکل۴ قرار می گیرد ، ولی در تحلیل ضربه قوچ مقدار افت انرژی مسیر جریان نیز در نظر گرفته می شود.



شکل ۴- مخزن انبساط ساده همراه با افت انرژی در مسیر تونل آب بر.

بر اساس تئوری نوسان جرمی، تمامی حجم آب داخل لوله جریان و مخزن انبساط بر معادله دینامیکی، پیوستگی و سرعت عمودی جریان آب در مخزن موج گیر استوار است. گاهی اوقات جهت سادگی کار، از ارتفاع نظیر سرعت صرف نظر می شود، اما استفاده از نظریه ستون صلب و رفتار غیر الاستیک جدار لوله اب بر به قوت خود باقی است.

با توجه به قانون دوم نیوتن، در هر لحظه نوساناتی که موجب تغییر سرعت می گردد، شتاب ستون AB با نیروهای موثر بر حجم محصور آب رابطه دینامیکی زیر را تشکیل می دهد :

$$\rho LA\frac{dV}{dt} = \left[\left(\text{نیروی موثر بر ستون آب در نقطه } B\right) - \left(\text{مولفه وزن ستون آب در خط انتقال}\right)\right] + [\text{(افت انرژی)}$$

$$+(\text{نیروی موثر بر ستون آب در نقطه } A)]$$

حال نیروی موثر بر ستون آب در نقطه A، که به دلیل ارتفاع آب موجود در مخزن سد ایجاد شده و نیز افت مدخل را در محاسبات دخالت می دهند. بدیهی است که افت انرژی ، خود سبب کاهش نیروی وارد بر نقطه مذکور می گردد. بر حسب قرارداد، جهت جریان به طرف توربین را مثبت و به طرف مخزن را منفی به حساب می آورند.

نیروی موثر بر ستون آب در نقطه B به ارتفاع آب در مخزن انبساط بستگی دارد و ناگفته نماند که مقدار افت انرژی ناشی از ورود آب به مخزن انبساط یا افت مدخل نیز باید در نظر گرفته شود. لذا به آسانی می توان فرمول زیر را به شرح زیر نوشت :

$$\rho LA\frac{dV}{dt} = PgA[(H_S \pm \text{افت مدخل آبگیر}) + (H_B - H_S) - (H_B + h + \left(\text{افت روزنه مخزن انبساط}\right)$$

$$\pm \left(\text{افت مسیر در تونل آبی}\right)]$$

که H_S ارتفاع استاتیکی در بالای آبگیر، نقطه A ، H_B ارتفاع سطح آب در حالت تعادل استاتیکی تا نقطه اتصال به لوله آب بر، h افزایش ارتفاع در نتیجه فشار ضربه قوچ و H_L افت انرژی در مسیر تونل آبی تا مخزن انبساط می باشد. با ساده نمودن فرمول فوق داریم :

$$\frac{\mathrm{L\,dV}}{\mathrm{g\,dt}} = -\mathrm{h} \pm HL_1 \pm HL_2 \quad (6)$$

و یا :

$$\mathrm{H_a} = \frac{\mathrm{L\,dV}}{\mathrm{g\,dt}} = -\mathrm{h} \pm C_1V_1^{\,2} \pm C_2V_2^{\,2} \quad (7)$$

عامل H_L یا $C_1V_1^2$ نمایانگر مجموع افت مدخل آبگیر و مسیر لوله با تونل آبی و HL_2 یا $C_2V_2^2$ معرف افت در روزنه اتصال مخزن انبساط به خط لوله یا تونل آبی است. H_a نمایانگر پتانسیل ارتفاعی است که موجب حرکت آب در لوله جریان در جهت سرعت مثبت V_1 می شود. V_2 نیز به سرعت جریان در استوانه مخزن انبساط اطلاق گردیده است.

معادله دینامیکی لوله جریان را می توان به صورت کلی زیر بدست آورد :

$$\frac{L\,dV}{\mathrm{g\,dt}} + \mathrm{h} + \mathrm{fV\,|V|} + \mathrm{f_s\,u|u|} = 0 \quad (8)$$

که f و f_s به ترتیب ضرایب افت انرژی لوله جریان یا تونل آبی و روزنه مدخل مخزن انبساط ، V سرعت در تونل آبی و u سرعت جریان آب در مخزن انبساط می باشند.

حال اگر به معادله پیوستگی در نقطه B توجه گردد، باید مقادیر جریان ورودی و جریان های خروجی از این نقطه مورد بررسی قرار گیرد. از این رو می توان نوشت :

$$\mathrm{VA_p = UA_s + Q} \quad (9)$$

که V سرعت در لوله انتقال، Q بخشی از جریان که از لوله آب بر به طرف توربین حرکت می کند و UA_S جریانی است که به سیستم انبساط وارد می شود.

سرعت جریان در مخزن انبساط، (U) ، بر حسب افزایش ارتفاع در مخزن انبساط قابل محاسبه است، لذا داریم :

$$\mathrm{U} = \frac{\mathrm{dh}}{\mathrm{dt}} \quad (10)$$

که از ترکیب معادلات ۸ و ۹ و ۱۰ روابطی اساسی که منجر به معادلات دیفرانسیل مرتبه دوم خواهند شد، بدست می آیند. این روابط در شرایط خاصی قابل حل هستند.

با توجه به معادلات ۶ و ۷ چهار حالت قابل پیش بینی است :

۱- ایجاد موج مثبت در نتیجه قطع بار توربین یا قطع جریان ورودی به توربین ؛

$$H_a = -h - C_1V_1^2 - C_2V_2^2 \quad , \quad V_1>0 \, , \, V_2>0 \quad (11)$$

۲- ایجاد موج منفی در هنگام راه اندازی توربین یا افزایش بار که با باز نمودن شیر یا دریچه همراه است ؛

$$H_a = -h - C_1V_1^2 + C_2V_2^2 \quad , \quad V_2<0 \, , \, V_1>0 \quad (12)$$

۳- بروز موج منفی در نتیجه توقف پمپ ؛

$H_a = -h + C_1V_1^2 + C_2V_2^2$, $V_2<0$, $V_1<0$ (13)

۴- ایجاد موج مثبت در هنگام راه اندازی پمپ ؛

$H_a=-h+C_1V_1^2 + C_2V_2^2$, $V_2>0$, $V_1<0$ (14)

از طرفی جرم $\gamma AL/g$ از سیال تحت اثر شتاب dV_1/dt قرار می گیرد، لذا با استفاده از قانون دوم نیوتن می توان نوشت :

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{g}{L}H_a \quad (15)$$

رابط پیوستگی جریان نیز به شرح زیر نوشته می شود :

$$V_2 = \frac{AV_1 - Q}{A_2} \quad (16)$$

که A_2 سطح روزنه مدخل مخزن انبساط و Q دبی جریانی است که به طرف توربین حرکت می کند. علاوه بر این ها می توان رابطه زیر را بیان کرد :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{AV_1 - Q}{A_s} \quad (17)$$

با جایگزینی معادله ۸ در معادله ۷ و با استفاده از روابط ۱۶ و ۱۷ و حذف عوامل V_1 و $V_2=U$، یک معدله دیفرانسیل برای h , t بدست می آید که با تغییرات مناسبی می تواند به شکل زیر ارائه گردد :

$$\frac{d^2h_2}{dt_1^2} \pm \frac{1}{2}\left(\frac{dh_2}{dt_1}\right)^2 + 2b\left(\frac{dh_2}{dt_1}\right) + h_2 = 0 \quad (18)$$

که در آن :

$$b = \pm(C_1\,Q)/A\left(\frac{A_s\,g}{AL}\right)^{1/2} = \pm\frac{H_{f1}}{Q}\left(\frac{A_s\,g}{(L/A)}\right)^{1/2}$$

و h_2 تابعی از h و t_1 تابعی از t می باشد.

ب- معادلات لگاریتمی محاسبه ضربه قوچ در مخزن انبساط ساده با توجه به افت

آقایان cole و masonyi برای مخزن انبساط ساده بدون استفاده از روزنه مدخل انبساط معادلاتی به شرح زیر ارائه داده اند :

$$\frac{h_1 - h_0}{\beta} = \ln\frac{\beta}{\beta - h_1} \quad (19)$$

β=LA/2$A_s gf = \frac{\frac{1}{2}L_r}{fA_r}$ (20)

برای مخزن انبساط با روزنه محدود کننده جریان فرمول ۱۹ به شکل زیر در می آید :

$$\frac{h_1 - h_0}{\beta} = \ln\frac{\beta - H_{L2}}{\beta - H_0} \quad (21)$$

که H_{L2} افت انرژی مربوط به روزنه درزمان صفر بلافاصله بعد از بسته شدن شیر کنترل است.

در حالی که جریان ورودی به سیستم (AV_0)، ناگهان به مخزن انبساط منحرف شود، خواهیم داشت :

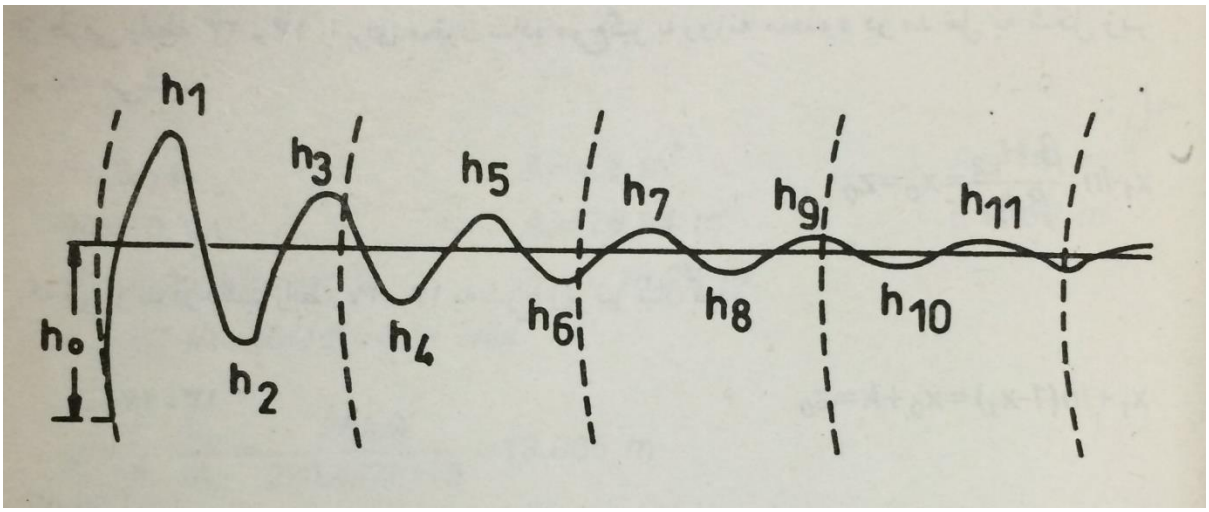
$$\beta = \frac{LA}{2[f + f_s\left(\frac{A}{A_s}\right)^2]gA_s} = \frac{1}{2}\frac{L_r}{F_s A_r} \quad (22)$$

که $F_s = f + f_s/{A_r}^2$ می باشد.

موج های بعدی را می توان با معادله زیر بدست اورد :

$$\frac{|h_n| + |h_{n-1}|}{\beta} = \ln\frac{\beta + |h_{n-1}|}{\beta - |h_n|} \quad (23)$$

مطابق شکل ۵ علامت h برای هر $\frac{1}{2}$ سیکل عوض می شود.



شکل ۵- تغییرات فشار ضربه قوچ در مسیر تونل آب بر در مخزن موج گیر.

می توان معادله ۲۳ را به صورت بدون بعد درآورد :

$$\frac{h_n}{\beta} + \ln\left|1 - \frac{h_n}{\beta}\right| = ln\left(1 + \frac{|h_{n-1}|}{\beta}\right) - \frac{|h_{n-1}|}{\beta} = z_{n-1}$$

که x=h/b

$$x_n + ln|1 - x_n| = \ln(1 + |x_{n-1}|) - |x_{n-1}| = z_{n-1} \quad (24)$$

برای هر مقدار، دو ریشه که قدر مطلق آنها متفاوت است وجود دارد و در واقع حدود دو موج متوالی را نشان می دهد. یکی از ریشه ها مثبت و معرف موج بزرگ تر اولیه و ریشه دیگر منفی بوده و موج کوچک تر انتهای $\frac{1}{2}$ سیکل را نشان می دهد.

می توان برای اولین موج، z_0 را با توجه به افت در لوله جریان و روزنه محاسبه نمود. برای مخزن ساده انبساط معادله ۱۹ را به صورت زیر می نویسیم :

$$x_1 - \ln\frac{\beta - H_{L2}}{\beta - h_1} = x_0 = z_0$$

$$z_0 = \frac{h_0}{\beta}$$

که می تواند به شرح زیر نیز بیان گردد :

$$x_1 + \ln(1 - x_1) = x_0 + k = z_0 \quad (25)$$

بنابراین :

$$\ln\frac{\beta - \mathrm{H_{L2}}}{\beta - \mathrm{h_1}} = k - \ln(1 - x_1)$$

و لذا :

$$k = ln[\frac{\beta - H_{L2}}{\beta - h_1}.\frac{\beta - h_1}{\beta}] = ln\frac{\beta - H_{L2}}{\beta}$$

با جایگزینی مقدار k در معادله ۲۵ :

$$z_0 = \frac{h_0}{\beta} + ln\frac{\beta - H_{L2}}{\beta}$$

و هنگامی که H_{L2} بزرگ تر از β است :

$$z_0 = \frac{h_0}{\beta} + ln\frac{H_{L2} - \beta}{\beta}$$

بدست می آید.

تحلیل ضربه قوچ در مخزن انبساط دیفرانسیلی

یک مخزن انبساط دیفرانسیلی از دو بخش یا دو مخزن انبساط درست شده که به صورت دو استوانه هم مرکز در داخل یکریگر قرار می گیرند. در واقع می توان گفت که مخزن انبساط دیفرانسیلی از یک مخزن ساده انبساط و یک مخزن جداری با تعبیه یک روزنه در مدخل آن تشکیل شده است.

برای تحلیل این گونه مخازن انبساط، معادلات اساسی به روش زیر بدست می آید :

- معادله دینامیکی جریان در بالادست تونل آب بر

- معادله دینامیکی جریان در پایین دست تونل آب بر

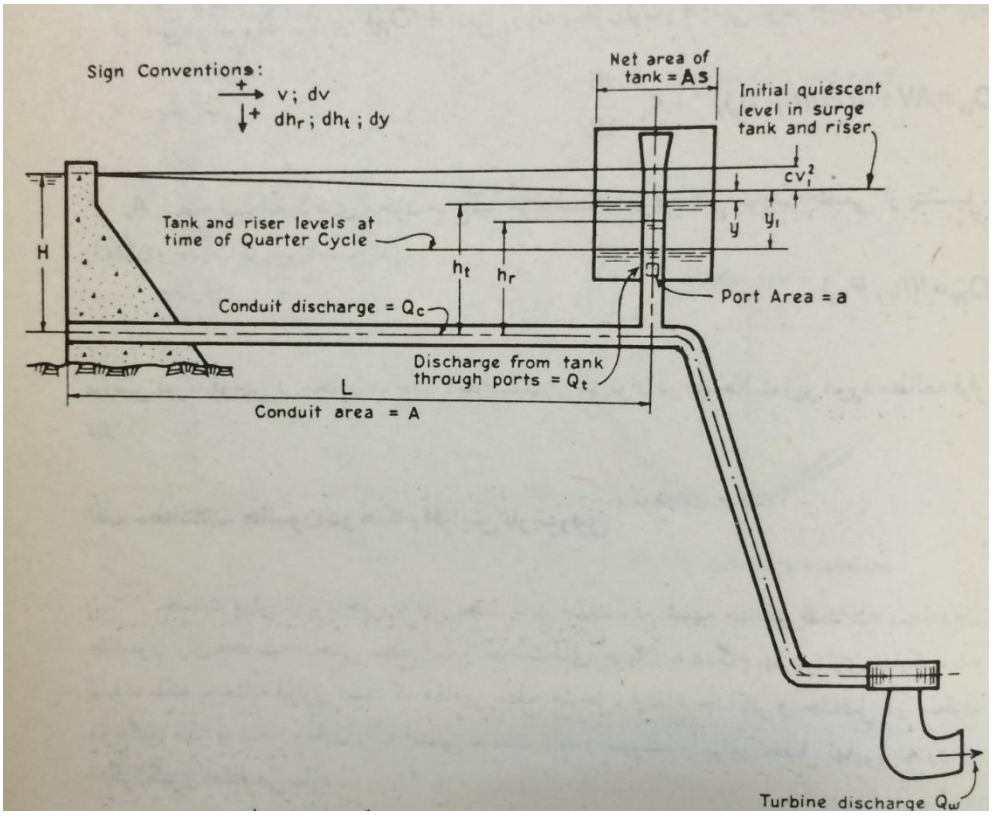
- معادله پیوستگی در بالادست مخازن انبساط

- معادله برای پایداری توتن توربین در حالات مختلف

- معادله پتانسیل خالص بر روی توربین

دراین حالت با توجه به شکل ۶، مقدار کل انرژی در سیستم را می توان به صورت زیر نشان داد :

$$H = h_r + h + CV^2 \quad (26)$$



شکل ۶- تحلیل ضربه قوچ در مخزن انبساط دیفرانسیلی.

که h_r اختلاف ارتفاع خط محور لوله انتقال تا سطح آب در استوانه مرکزی مخزن انبساط، h ارتفاع ضربه قوچ $L/g.dV/dt$ و CV^2 مقدار افت انرژی می باشد.از طرفی مقدار دبی از مخزن بیرونی برابر دبی عبوری از محل روزنه است. بنابراین می توان نوشت:

$$A_s \frac{dh_t}{dt} = a(2g(h_t - h_r))^{1/2} \quad (27)$$

که در آن A_s سطح خالص مخزن انبساط شکل ۶، h_t اختلاف ارتفاع بین سطح آب در مخزن انبساط و خط محور مرکزی لوله انتقال جریان و a سطح باز روزنه مدخل مخزن انبساط دیفرانسیلی می باشد. علاوه بر این، دبی توربین (Q_W) برابر است با :

$Q_W = (Q_C)$دبی لوله جریان $+ (Q_t)$دبی روزنه مخزن $+ (Q_R)$دبی در استوانه مرکزی

$$Q_W = AV + a(2g(h_t - h_r))^{1/2} + A_r \frac{dh_r}{dt} \quad (28)$$

که A_r سطح استوانه مرکزی مخزن انبساط می باشد. از طرفی دبی توربین تابعی از پتانسیل، راندمان و قدرت توربین است، لذا :

$$Q_W = f(h_r, P_W) \quad (29)$$

بررسی ضربه قوچی در مخازن انبساط دیفرانسیلی را می توان در دو حالت زیر مطالعه کرد :

الف) معادلات جانسون در هنگام افزایش بار توربین

معادلات جانسون برای محاسبه منحنی سطح آب و سرعت های جریان به هنگام بهره برداری تدارک دیده نشده ، بلکه به مثابه ابزاری است که مقادیر سطح مدخل، ارتفاع حداکثر و حداقل در مخزن انبساط، قطر و شکل مخزن را به آسانی به دست داده و سیستم را برای تحلیل نهایی به روش انتگرال گیری آماده می سازد.

فرضیاتی که جهت ارائه این معادله در نظر گرفته شده عبارتند از :

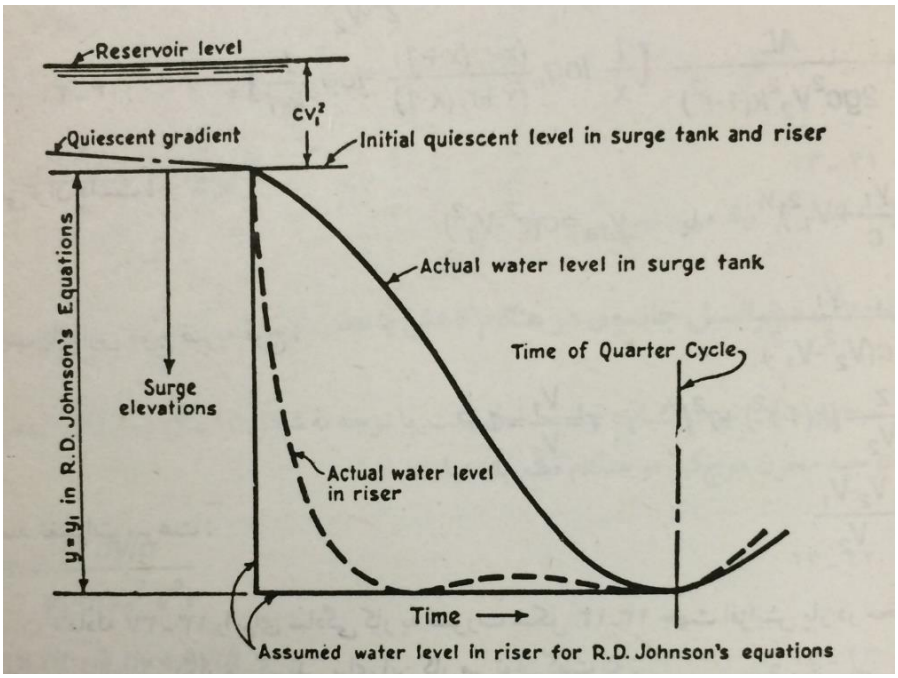
- این تحلیل فقط برای مدت زمان $1/4$ سیکل صادق بوده و این زمانی است که سطح آب در شفت یا استوانه های مرکزی و بیرونی به هم می رسند.

- از اینرسی آب در استوانه مرکزی (Riser) صرف نظر می شود.

مطابق شکل۷ چنین فرض می شود که با آغاز حرکت دریچه یا شیر کنترل توربین ، سطح آب در استوانه مرکزی بلافاصله به سطح آب در $1/4$ سیکل رسیده و به منحنی افتادگی آب در استوانه مرکزی که به شکل مستطیل است می رسد.

- سطح مقطع استوانه مرکزی قابل اغماض و مساوی صفر است.

- سطح مقطع روزنه ورودی، که عملا در طرح ها مقدار ثابتی است، برای سادگی حل معادلات با زمان متغیر فرض می شود.



شکل ۷- تفاوت منحنی های افت واقعی و فرضی در استوانه مرکزی مربع مستطیلی شکل در شرایط تقاضای بار (معادلات جانسون).

با توجه به فرضیات فوق، روابط جانسون عواملی چون ارتفاع موج و قطر مخزن انبساط را با معادلات دیفرانسیل ساده شده بیان می نماید. این معادلات افزایش یا تقاضای ناگهانی بار را که همراه با باز نمودن ناگهانی دریچه یا شیر کنترل است به شرح زیر بیان می نماید :

$$d_t = {}^{(LdV/g)}\Big/_{[y_1 - c(V^2 - {V_1}^2)]} \quad (30)$$

که در آن، c عامل ضریب افت است، به نحوی که $cV_1{}^2$ مقدار افت لوله را نشان می دهد. V سرعت جریان در هر لحظه در تونل آب بر و y_1 مطابق شکل تعریف می شود، از طرفی داریم :

$$AV_2 dt = A_s dy + AVdt \quad (31)$$

که مقدار سطح خالص مخزن انبساط از روابط زیر پیدا می شود :

$$A_s = \frac{AL}{2gcy_{la}}\left[\frac{V_2}{z}\log_e\frac{(z-V_1)(z+V_2)}{(z+V_1)(z-V_2)} - \log_e\frac{z^2-{V_1}^2}{z^2-V_2^2}\right] \quad (32)$$

$$A_s = \frac{AL}{2gc^2{V_2}^2k(1-r^2}\left[\frac{1}{x}\log_e\frac{(x-r)(x+r)}{(x+r)(x-r)} - \log_e\frac{k}{k-1}\right] \quad (33)$$

که می توان داشت :

$$z = \left(\frac{y_1}{c} + V_1^2\right)^{\frac{1}{2}}$$

یا

$$y_{1a} = c(z^2 - V_1^2)$$

ضریب پایداری موج ضربه قوچ :

$$k = \frac{y_1}{c(V_2^2 - V_1^2)}$$

$$r = \frac{V_1}{V_2} = 1 - P \quad \text{و} \quad x = \frac{z}{V_2} = [k(1 - r^2) + r^2]^{1/2}$$

درصد تغییرات سرعت :

$$P = \frac{V_2 - V_1}{V_2}$$

می توان گفت :

$$N^2 = \frac{2gc^2 v_2^2 A_s}{AL} \quad :$$

و برای راحتی خواندن اشل داریم :

$$100N_a = 100V_2 c(\frac{2gA_s}{AL})^{1/2} \quad (34)$$

$$Y_{1a} = 100V_2 c(\frac{2gA_s}{AL})^{1/2}$$

$$y_{1a} = k_a c(V_2^2 - V_1^2)$$

که برای مقادیر معلوم y_{1a} و V_2 مقادیر p ، k و r متناظر بدست آمده و سپس از نمودار مقدار $100N_a$ پیدا می شود. آن گاه به آسانی سطح خالص مخزن موج محاسبه می گردد. جهت انتگرال حسابی لازم است که زمان لازم برای رسیدن به $1/4$ سیکل زمانی تخمین زده شود، از این رو داریم :

$$T_a = \frac{L}{2gcz} \log_e \frac{(z - V_1)(z + V_2)}{(z + V_1)(z - V_2)} \quad (35)$$

و با توجه به شکل ۶ سطح روزنه مدخل مخزن انبساط دیفرانسیلی در شروع سیکل برای افزایش بار چنین بدست می آید:

$$a_0 = [\frac{A(V_2 - V_1)}{(zgy_1)^{1/2}}] \quad (36)$$

و سطح روزنه مدخل مورد نیاز در $1/4$ سیکل به صورت تئوری چنین است :

$$a_1 = [\frac{A.A_S y_1}{L}\left(1 - \frac{1}{k}\right)]^{1/2} \quad (37)$$

که همیشه کمتر از a_0 می باشد.

ب) معادلات دیفرانسیل جانسون در هنگام کاهش یا قطع بار

در این حالت نیز فرضیات قبلی صادق است. با توجه به شکل ۸ معادلات اساسی جهت توجیه مخزن انبساط در هنگام قطع بار عبارتند از :

$$dt = \frac{LdV/g}{y_1 - c(V_2^2 - V_2)} \quad (38)$$

$$AV_1 dt = A_s dy + AVdt \quad (39)$$

هنگام قطع بار دو حالت متمایز اتفاق می افتد :

-حالت اول : $y_1 < cV_2^2$

با انتگرال گیری از معادلات ۳۸ و ۳۹ مقدار A_s به شرح زیر بدست می آید :

$$A_s = \frac{AL}{2gcy_{1r}}[\log_e \frac{V_2^2 - z_1^2}{V_1^2 - z_1^2} . \frac{V_1}{z_1} \log_e \frac{(V_2 - z_1)(V_1 + z_1)}{(V_2 + z_1)(V_1 - z_2)}] \quad (40)$$

حالت دوم : $y_1 > cV_2^2$

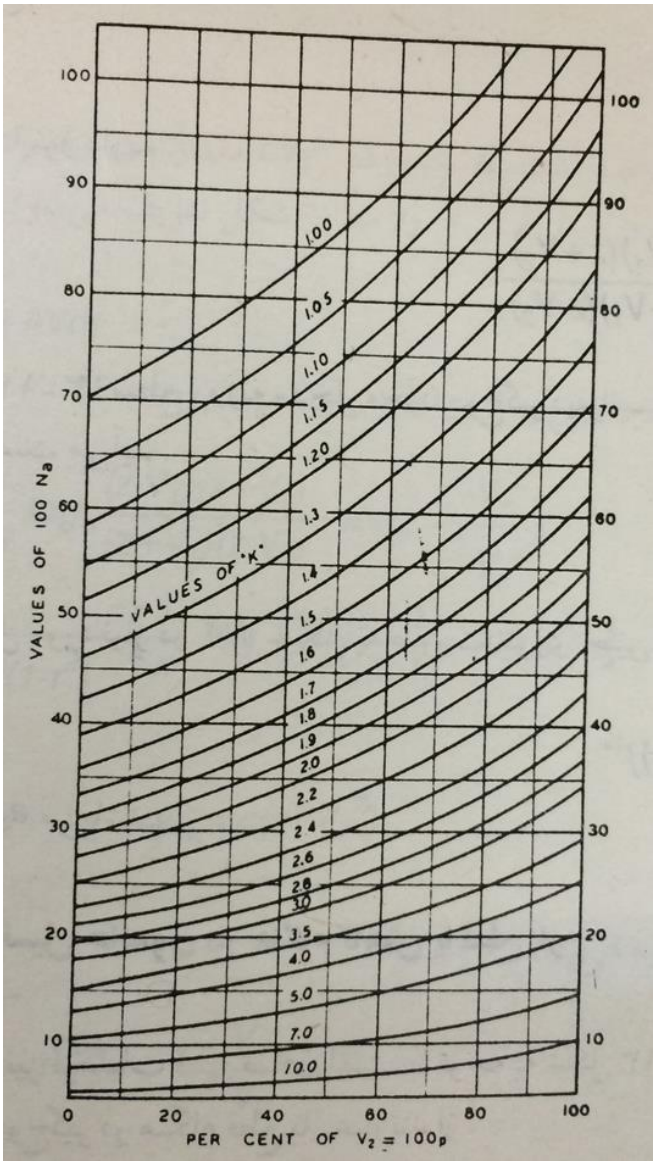
در این هنگام ارتفاع موج به بالاتر از سطح آب مخزن می رسد و لذا :

$$A_s = \frac{AL}{2gcy_1}[\log_e \frac{V_2^2 + z_0^2}{V_1^2 + z_0^2} - \frac{2V_1}{Z_0}(\arctan\frac{V_2}{z_0} - \arctan\frac{V_1}{z_0})] \quad (41)$$

که در آن :

$z_{1=(V_2^2 - \frac{y_1}{c})^{1/2}}$ یا $y_{1r} = c(V_2^2 - z_1^2)$

$z_{0=(\frac{y_1}{c} - V_2^2)^{1/2}}$ یا $y_{1r} = c(V_2^2 - z_0^2)$



شکل ۸- نمودار مربوط به معادلات دیفرانسیل جانسون در هنگام تقاضای بار بیشتر.

و V_1 سرعت اولیه در لوله آب بر پیش از شتاب گیری و V_2 سرعت به هنگام $t_a = T$ می باشد. در حالتی که شیر کاملا بسته شود V_1=0 بوده و معادله ۴۱ به صورت زیر درخواهد آمد :

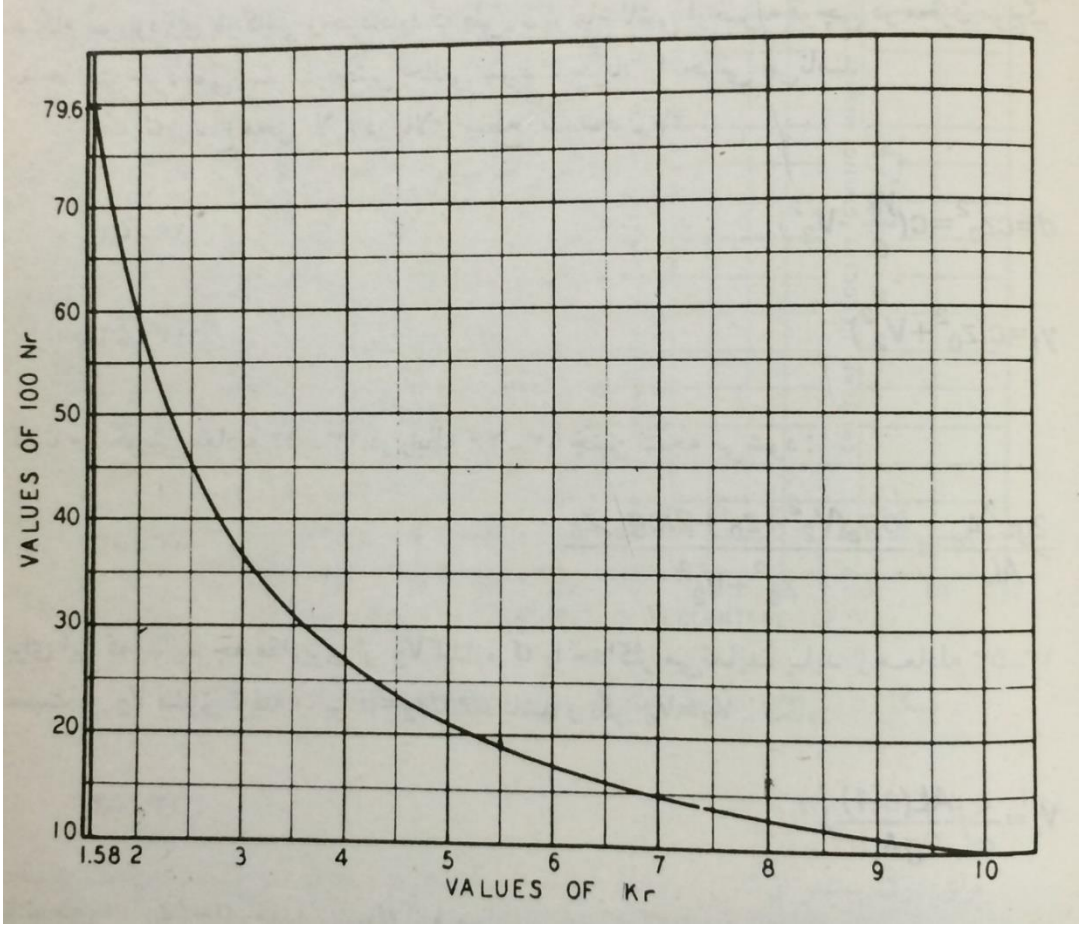
$$A_s = \frac{AL}{2gcy_1} \log_e \frac{V_2^2 + z_0^2}{z_0^2} \quad (42)$$

$$k_r = \frac{y_1}{cv_2^2} \text{ و } A_s = \frac{AL}{2gc^2V_2^2k_r} \log_e \frac{k_r}{k_r - 1} \quad (43)$$

برای اینکه نمودار ترسیمی این معادله تعیین شود، ابتدا رابطه زیر را می نویسیم :

$$100N_r^2 = 100V_2c(\frac{2gA_s}{AL})^{1/2} \quad (44)$$

و برای مقادیر معلوم y_1 و V_2 مقدار k_r مربوطه محاسبه و مقدار $100N_r$ را از نمودار شکل ۹ بدست آورده و سپس A_s محاسبه می گردد.



شکل ۹- نمودار معادلات جانسون برای کاهش یا قطع بار.

مقدار سطح روزنه مورد نیاز در شروع سیکل نیز از رابطه زیر بدست می آید :

$$a_0 = \frac{A(V_2 - V_1) - \text{دبی در بالای استوانه مرکزی}}{(zgy_1)^{1/2}} \quad (45)$$

و سطح روزنه مورد نیاز در $1/4$ سیکل :

$$a_1 = V_2[\frac{A.A_sc}{L}(k_r - 1)]^{1/2} \quad (46)$$

مراجع

۱. محمد نجمایی ؛ ضربه قوچ ؛ انتشارات صانعی

۲. سیستمهای انتقال آب ؛ دکتر محسن کهرم ؛ انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد ؛ ۱۳۸۱.

۳. "مقایسه روش های کنترل جریان میرای هیدرولیکی ناشی از ضربه قوچ" ارائه شده توسط یوسف زندی- عضو هیات علمی گروه عمران دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی تبریز

۴. "کنترل موج فشار جریان گذرا در خطوط انتقال آب توسط مخازن موج گیر ساده" ارائه شده توسط حسن ساقی و محمود فغفور مغربی

5. http://www.codecogs.com/reference/engineering/fluid_mechanics/surge/surge_tanks.

6. www.mechanism.ir

7. www.civilica.com

8. 'Shock and Water Hammer Loading' By Paul F. Boulos & Don J. Wood and Srinivasa Lingireddy