تحلیل کامپیوتری پدیده ضربه قوچ در تاسیسات توربین برق-آبی

یوسف حسن زاده
استاد دانشکده فنی دانشگاه تبریز **Yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir**
سعید عباسی
دانشجوی دکترای سازه های هیدرولیکی
عضو هیات علمی دانشگاه زنجان **Sabbasi_mr@Znu.ac.ir**

چکیده

پدیده ضربه قوچ در خطوط انتقال آب نیروگاههای برق-آبی یکی از مسایلی است که از دیرباز مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. نظر به این که این پدیده میتواند اثرات زیانبار فراوانی روی خطوط لوله انتقال آب و تاسیسات توربین داشته باشد, ضرورت دارد که اثرات این امواج فشاری در طول خط لوله انتقال آب و توربین مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته و روش های مطلوب کنترل آنها ارائه شود. در این راستا یکی از روشهای موثر و کارامد کنترل امواج فشاری, استفاده از برج های فشار شکن می باشد.

در این مقاله ضمن تشریح پدیده و بیان معادلات حاکم و نقش انواع برجهای فشارشکن, یک برنامه کامپیوتری به زبان برنامه نویسی *Visual Basic* جهت تحلیل پدیده ضربه قوچ تدوین و ارائه گردیده که تغییرات فشار و سرعت را در طول یک خط لوله منفرد منتهی به یک شیر قطع و وصل جریان و نیز مجهز به یک برج فشار شکن محاسبه و نتایج و نمودارهای مربوطه را ترسیم و ارائه می نماید.

کلید واژه ها : برج فشار شکن, ضربه قوچ, نیروگاه برق-آبی

مقدمه

مطالعه جریان های میرای هیدرولیکی با بررسی پدیده انتشار امواج صوتی در هوا و انتشار امواج در آبهای کم عمق و نیز جریان خون در داخل شریان ها آغاز گردید. با این وجود هیچ یک از این مسائل تا وقتی که تئوری الاستیسیته, حساب دیفرانسیل و انتگرال و حل معادلات دیفرانسیل جزئی توسعه نیافته بودند, قابل تحلیل نبودند. لاگرانژ جریان سیالات قابل تراکم و غیر قابل تراکم را مورد بررسی قرار داد. به این منظور وی مفهوم پتانسیل سرعت را ارائه داد. در سال ۱۷۸۹ گاسپار مونژ روش ترسیمی را برای انتگرال گیری از معادلات دیفرانسیل جزئی تحت عنوان روش مشخصه ها[1] ارائه داد. منابری[2] اولین کسی بود که پدیده ضربه قوچ را مورد بررسی قرار داد. میچاود مساله ضربه قوچ و طراحی و استفاده از محفظه های هوای تحت فشار و شیر اطمینان را بررسی نمود. برای اولین بار گرومیکا[3] هنگام تحلیل ضربه قوچ افت های اصطکاکی را با مفروض داشتن سیال غیر قابل تراکم و این که افت های اصطکاکی با سرعت جریان نسبت مستقیم دارند, مورد مطالعه قرار داد.

[1] Method of charachteristics
[2] Menaberea
[3] Gromeka

فریزل[4] بر اساس مطالعاتی که بر نیروگاه آبی اوگدن[5] انجام داده بود تحلیلی از پدیده ضربه قوچ ارائه داد و روابطی برای سرعت موج ضربه قوچ و افزایش فشار حاصل از کاهش ناگهانی سرعت بدست آورد. در سال ۱۸۹۷ ژوکوفسکی[6] در مسکو آزمایشات زیادی بر روی لوله ها با ابعاد مختلف انجام داد وگزارش کلاسیک خود را در مورد تئوری اساسی ضربه قوچ منتشر نمود. او فرمولی برای محاسبه سرعت موج بدست آورد که در آن الاستیک بودن آب و جدار لوله لحاظ گردیده است.

آلیوی[7] تئوری عمومی ضربه قوچ را با استفاده از اصول اولیه ارائه و آن را در سال ۱۹۰۲ منتشر کرد. وی رابطه ای برای افزایش فشار در پشت شیر به دست آورد و جداولی برای افزایش و یا کاهش فشار ناشی از بستن یا باز شدن یکنواخت شیر ارائه داد.

در مورد برج های فشار شکن توما[8] اولین کسی بود که نشان داد مخزن موج گیر تنها در صورتی پایدار خواهد بود که سطح مقطع آن از یک مقدار حد اقل بیشتر باشد که امروزه سطح توما نامیده می شود. بسیاری از محققین ضمن پژوهش در مورد تئوری برج های فشار شکن, انواع جدیدی از آنها را ابداع کرده اند[۳،۲،۱].

در این مقاله معادلات حاکم بر پدیده ضربه قوچ در یک لوله آب بر توربین مجهز به برج فشار شکن با اعمال روش تفاضلات محدود به کمک کامپیوتر تحلیل و تغییرات فشار و سرعت در برجهای ساده و روزنه دار محاسبه گردیده و مورد مقایسه قرار گرفته است.

انواع برجهای فشار شکن

برج فشار شکن عبارت از یک لوله, استوانه یا شفت عمودی و یا یک مخزن ذخیره آب است که در مسیر پایین دست جریان انتقال آب از یک سد یا بند به توربین تعبیه میشود.

عملکرد برج فشار شکن به طور خلاصه به شرح زیر بیان میشود:

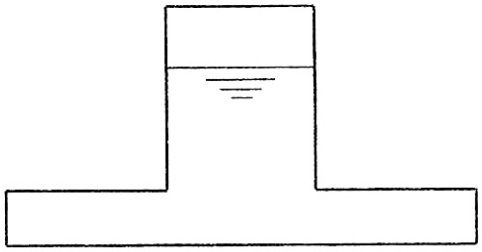
- با ایجاد یک سطح آزاد آب در مخزن یا در استوانه برج فشار شکن, فشار های منفی ناشی از وقوع ضربه قوچ, از طریق ورود آب از این برج به درون لوله آب بر توربین متعادل می گردد.
- برج های فشار شکن در هنگام راه اندازی توربین مقدار کافی آب را به درون لوله آب بر تخلیه میکنند تا سیستم انتقال جریان آب از سد به توربین, فرصت کافی برای ایجاد شتاب لازم جهت برقراری یک جریان دائمی به درون توربین را داشته باشد.
- در هنگام قطع بار توربین, برج فشار شکن که در نزدیکی توربین ها کار گذاشته میشود, مقدار اضافی جریان را دریافت داشته و از بالا رفتن فشار تا حد خطرناک در لوله آب بر جلوگیری میکند.

به طور کلی می توان گفت که برج فشار شکن به عنوان یک وسیله متعادل کننده فشار, تغییرات کوچک جریان را به نحوی خنثی میکند که سیستم در شرایط پایدار کار کند.

بر حسب عوارض طبیعی محل استقرار توربین اندازه لوله آب بر و ظرفیت آن و بسیاری از مسائل هیدرولیکی, الکترومکانیکی و سازه ای, از انواع مختلف برج های فشار شکن استفاده میشود. رایج ترین انواع برج های فشار شکن که در سیستم توربین ها استفاده میشوند عبارتند از:

- برج فشار شکن ساده:

این نوع برج فشارشکن به شکل استوانه با سطح مقطع ثابت و بدون هیچگونه مانع یا محدودیتی به لوله آب بر مطابق شکل (۱) متصل میشود.



شکل ۱: برج فشار شکن ساده

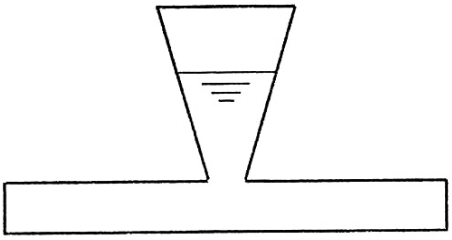
برج فشار شکن با سطح مقطع متغیر

در این نوع از برج های فشار شکن, سطح مقطع داخل استوانه یا شفت تغییر مینماید.

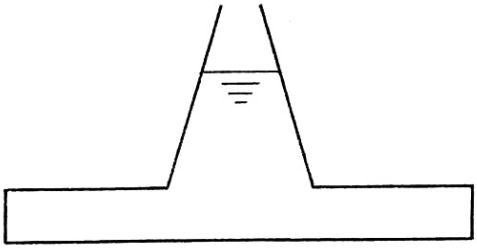
این نوع برجها هنگامی مورد توجه قرار میگیرند که ذخیره اضافی آب در هنگام از کار افتادن یا راه اندازی توربین ها لازم و ضروری باشد.

---

[4] Frizell
[5] Ogden
[6] Joukowsky
[7] Allievi
[8] Thoma



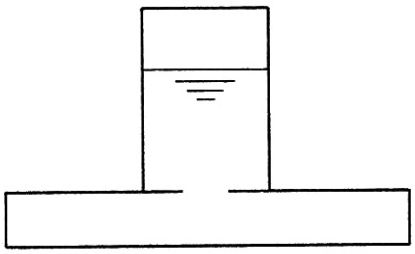
الف –برج فشار شکن مخروطی معکوس



ب–برج فشار شکن مخروطی مستقیم
شکل ۲: انواع برجهای فشار شکن با مقاطع متغیر

برج فشار شکن روزنه دار:

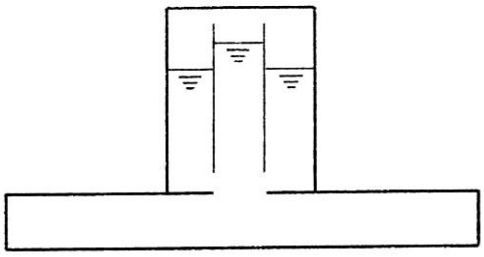
در این گونه برج ها محل اتصال دهانه برج به لوله آب بر تنگ تر میشود که خود موجب کاهش دامنه امواج و نوسانات موج فشاری میگردد. در سالهای اخیر استفاده از این نوع برج های فشار شکن مورد توجه بیشتری قرار گرفته که دلیل عمده آن اقتصادی بودن آن تا میزان ۴۰ درصد نسبت به برج فشار شکن ساده می باشد.



شکل ۳: برج فشار شکن روزنه دار

برج فشار شکن دیفرانسیلی:

طراحی این نوع برج ها در کشورهای آمریکای شمالی و جنوبی مورد توجه قرار گرفته است. در هنگام توقف جریان و ایجاد فشار ضربه قوچ, جریان آب به قسمت تنگ برج دیفرانسیلی وارد شده و انرژی پتانسیل به طور ناگهانی افزایش می یابد سپس جریان ورودی به بخش تنگ شده برج با قسمت های جانبی متعادل می گردد[۶و۵].



شکل ۴: برج فشار شکن دیفرانسیلی جانسون

معادلات حاکم بر پدیده

جریان غیر دائمی در داخل مجاری تحت فشار به وسیله معادلات دینامیکی و پیوستگی جریان به شرح زیر بیان می گردد:

الف- معادله دینامیکی

این معادله با اتکا بر اصل اساسی دینامیک و با لحاظ کردن نیروهای فشار, ثقل و اصطکاک به عنوان نیروهای خارجی و اعمال ساده سازی های لازم به صورت زیر در می آید:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA}Q|Q| = 0 \qquad (۱)$$

که در آن Q دبی حجمی, H ارتفاع نظیر انرژی کل, A سطح مقطع لوله, D قطر لوله, f ضریب اصطکاک جدار لوله, x فاصله و t زمان میباشد.

ب- معادله پیوستگی جریان

با در نظر گرفتن یک حجم کنترل و این که جرم حجم کنترل در لحظه $t+dt$ برابر است با جرم حجم کنترل در لحظه t به علاوه جرم ورودی سیستم منهای جرم خروجی از سیستم که پس از ساده سازی به صورت معادله دیفرانسیل زیر بیان میشود:

$$L_2 = a^2\frac{\partial Q}{\partial x} + gA\frac{\partial H}{\partial t} = 0 \qquad (۲)$$

که در آن a سرعت انتشار موج فشاری در یک جریان تحت فشار است.

تحلیل ضربه قوچ در برج فشار شکن با منظور کردن افت انرژی و با استفاده از تئوری نوسان جرم صورت گرفته است. بر اساس این تئوری تمامی حجم آب داخل لوله جریان و برج فشار شکن بر سه معادله دینامیکی, پیوستگی و سرعت عمودی جریان آب در برج فشار شکن استوار است.

بر اساس تئوری نوسان جرم، نیروی موثر بـر سـتون آب در نقطه اتصال برج, فشار ناشی از ورود آب به برج فشار شـکن را نیز باید در نظر گرفت. با توجه به قانون دوم نیوتن, در هر لحظه نوساناتی که موجـب تغییـر سـرعت میـشوند, شـتاب ستون آب با نیروهای مـوثر بـر حجـم محـصور آب, رابطـه دینامیکی زیر را تشکیل میدهند:

$$\rho LA\frac{dV}{dt}=\rho gA\ [(H_S\pm\text{(افت مدخل آبگیر)})+(H_B-H_S)$$
$$-(h+H_L+\text{(افت روزنه مدخل برج)}\pm\text{(افت در مسیر تونل آبی)}]$$

که در آن H_S ارتفاع استاتیکی در بـالای آبگیـر, H_B ارتفـاع سطح آب در حالت تعادل استاتیکی تا نقطه اتصال بـه لولـه آب بر, h افزایش ارتفاع در نتیجـه فـشار ضـربه قـوچ و H_L افت انرژی در مسیر تونل آبی تا برج فشار شکن مـی باشـد. بر همین اساس و پس از ساده سـازی معادلـه زیـر حاصـل میگردد:

$$H_a=\frac{L}{g}\frac{dV}{dt}=-h\pm C_1V_1^{\,2}\pm C_2V_2^{\,2} \qquad (۳)$$

که $C_1V_1^2$= مجموع افت مدخل آبگیـر و مـسیر تونـل آبـی, $C_2V_2^2$= افت در روزنه اتصال برج فشار شکن به لوله آب بر, H_a پتانسیل ارتفاعی که موجب حرکت آب در تونل آب بـر با سرعت V_1 میشود و V_2 سـرعت جریـان در اسـتوانه بـرج فشار شکن است.

معادله دینامیکی لوله جریان را میتوان به صورت کلی زیر به دست آورد:

جدول مشخصات برج های فشار شکن داده شده به برنامه کامپیوتری

مشخصات خط لوله	برج فـشار شـکن ساده	برج فشار شکن روزنه دار
قطر لوله آب بر	۲/۵ متر	۲/۵ متر
طول لوله آب بر	۲۰۰۰ متر	۲۰۰۰ متر
دبی در حالت پایدار	۳۰ متر مکعب بـر ثانیه	۳۰ متر مکعب بر ثانیه
ثطر برج فشار شکن	۱۰ متر	۱۰ متر
قطر روزنه برج	–	۱ متر
افت ارتفاع آب در بـرج نسبت به سطح آب	۱۸/۲۲– متر	۱۸/۲۲– متر

$$\frac{L}{g}\frac{dV}{dt}+h+fV|V|+f_su|u|=0 \qquad (۴)$$

که در آن f و f_s به ترتیب ضرایب افت انرژی لوله جریان یا تونل آبی و روزنه مدخل برج, V سـرعت در تونـل آبـی و u سرعت جریان آب در مخزن برج فشار شکن می باشند[۴].

پس از ساده سازی های نهایی و حذف سرعت از معـادلات, یک معادله دیفرانسیل برای h و t به صورت زیـر بـه دسـت می آید:

$$\frac{d^2h}{dt^2}\pm\frac{1}{2}\left(\frac{dh}{dt}\right)^2+2b\left(\frac{dh}{dt}\right)+h=0 \qquad (۵)$$

که در آن:

$$b=\pm\frac{C_1Q}{A}\left(\frac{A_sg}{AL}\right)^{1/2}=\pm\frac{H_{f1}}{Q}\left(\frac{A_sg}{L/A}\right)^{1/2} \qquad (۶)$$

تکنیک حل این معادلات در برنامه نوشته شده کـامپیوتری, روش تفاضلات محدود تقریب مرکزی می باشد.

تجزیه و تحلیل داده ها

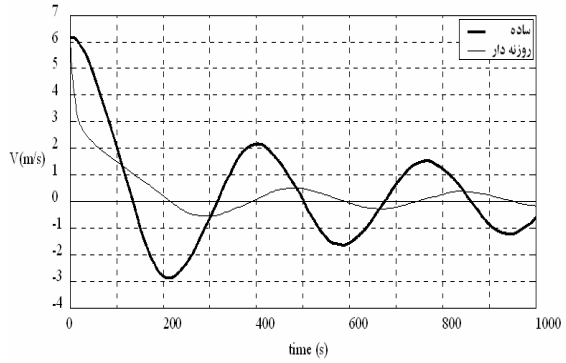
معادلات یاد شده با اعمال روش تفاضلات محدود به کمک کامپیوتر تحلیل گردیده اند.

برنامه کامپیوتری تدوین شده برای ایـن منظـور کـه تحـت عنوان *SURGE* نام گذاری گردیده است به منظـور تحلیـل چگونگی تغییرات سرعت در خط لوله و تغییـرات سـطح آب در برج فشار شکن تهیه گردیده است. این برنامه بـه منظـور حـل معـادلات پیوسـتگی و دینـامیکی از روش تفاضـلات محدود و گسسته سازی معادلات در بـازه هـای طـول لولـه استفاده میکند[۷].

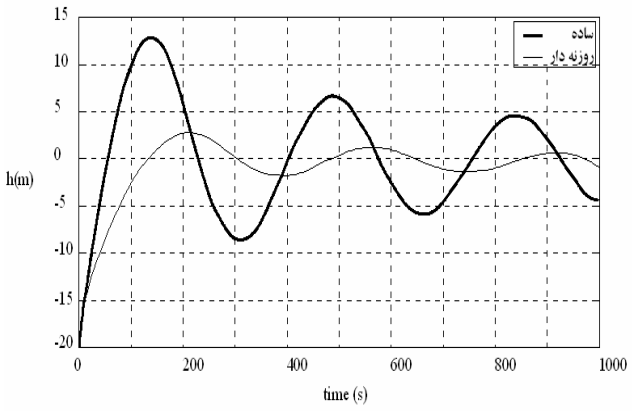
قبل از استفاده از برنامـه لازم اسـت کـه برنامـه در محـیط *Windows* نصب گردد. برای این کار باید فایل *Setup.exe* را از بسته نرم افزاری اجرا نمود. ادامه عملیات بـا راهنمـایی انجام شده در خلال نصب برنامه قابل انجام است.

در صفحه اصلی برنامه امکـان انتخـال دو نـوع بـرج فـشار شکن ساده و روزنه دار برای تحلیـل وجـود دارد. در مرحلـه بعدی, اطلاعات مربوط به هر کـدام از ایـن برجهـا خواسـته میشود و پـس از وروی اطلاعـات, مرحلـه محاسـبات آغـاز میگردد.

معادلات حاکم بر پدیده ضربه قوچ و بـرج فـشار شـکن بـه روش تفاضلات محدود تحلیل میگردند و اعداد بدست آمـده به صورت جدول به نمایش در می آیند.



شکل ۵: نمودار تغییرات سرعت آب در لوله آب بر



شکل ۶: نمودار تغییرات تراز آب در برج فشار شکن

نتیجه گیری

برنامه کامپیوتری تدوین شده در این تحقیق که تحت عنوان *SURGE* نامیده میشود, در عین حال که محاسبات مشابه نرم افزارهای پیشرفته را انجام میدهد, به صورت ساده و گرافیکی تدوین شده و نیاز به اطلاعات بسیار کمی در کاربری کامپیوتر دارد. همچنین این نرم افزار همان فرض های ساده کننده را که در روش دستی انجام میگیرد به کار میبرد و لذا داده های ورودی برنامه به تعداد بسیار محدودی کاهش پیدا کرده اند.

میتوان گفت که استفاده از این نرم افزار به منظور تحلیل اولیه برج فشار شکن در مرحله انتخاب نوع این برج و همچنین در مرحله طراحی اولیه برج فشار شکن بسیار مناسب, ایده آل, کم هزینه و سریع است.

در شکل های ۵ و ۶ خروجی نرم افزار برای دو نوع برج فشار شکن در شرایط یکسان ارائه شده است. ملاحظه میشود که نرخ استهلاک انرژی در حالت برج فشار شکن روزنه دار نسبت به برج فشار شکن ساده بسیار سریع تر است. از این رو برج فشار شکن روزنه دار هرچند از دیدگاه اجرایی انکی پیچیده به نظر میرسد, ولی از نظر کارایی و هزینه بری نسبت به برج فشار شکن ساده اقتصادی تر است.

مراجع:

1- Chaudhry, M.H., , 1987, "Applied Hydraulics Transients", Washington State University Pullman.

2- George R. rich, 1961, "Water Hammering Analysis", Dover Publications,

3- Parmakian, John, 1955, "Water Hammering Analysis", Dover Publications, New York,

4- Betamio de Almeida, 1992, "Fluid Transients in Pipe Networks", Elsevier Publications,

۵- آشفته, جلال, علیرضا پزشکی نژاد, ۱۳۶۹، "هیدرولیک کاربردی جریان های میرا در خطوط انتقال شبکه های توزیع کانالها و نیروگاهها"ضربه قوچ"", جلد اول.

۶- حسن زاده, یوسف, ۱۳۷۸، "ماشینهای آبی", جلد اول پمپ ها, انتشارات دانشگاه تبریز.

۷- عباسی, سعید, ۱۳۷۹، "بررسی پدیده ضربه قوچ در تاسیسات توربین برق-آبی", پایان نامه کارشناسی ارشد عمران-سازه های هیدرولیکی, دانشکده فنی دانشگاه تبریز.

Computer Analysis of Water Hammer Phenomenon in Hydroelectric Power Plant Equipment

YOUSEF HASANZADEH
in fluid mechanics, professor of Faculty of Civil Engineering, Tabriz University
Yhassanzadeh@tabrizu.ac.ir

ENG. SAEED ABBASI
candidate in hydraulic structures, instructor of Zanjan University
Sabbasi_mr@Znu.ac.ir

Abstract
The water hammer phenomenon in hydroelectric power plant's penstock is one of the famous troubles which have been an interest for researchers. Hence this phenomenon can cause many harmful effects on pipe lines and turbine, it is essential that effects of these surges along with pipe line and turbine have been studied and suitable methods for controlling presented. In this way one of the most effective and appropriate methods for surges control, is the use of surge tanks.
In this paper as demonstrating the phenomenon and illustrating the governing equations, a computer program developed by 'Visual Basic' programming language for analyzing the water hammer phenomenon has been presented, which is able to calculate pressure and velocity gradients along with a pipe line ended by a valve and equipped with a surge tank, and also sketch the results as diagrams or present as tables.

Keywords: Surge tank, Water hammer, Hydroelectric power plant