

بررسی روش های کنترل فشارهای ماکزیمم و مینیمم ناشی از پدیده ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ فشار قوی

یوسف حسن زاده

استاد گروه عمران - آب دانشگاه تبریز

جلیل ابریشمی

دانشیار گروه عمران دانشگاه فردوسی مشهد

جواد زمانیان

کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی

چکیده

ضربه قوچ یکی از پدیده های مخرب هیدرو دینامیکی است که در اکثر ایستگاه های پمپاژ، خطوط انتقال آب و نیروگاه های برق آبی ایجاد می شود. وقوع این پدیده باعث ایجاد فشارهای غیرعادی بروز پدیده کاویتاسیون و در نهایت ترکیدن لوله ها و خرابی کلیه سیستم می شود. بنابراین بررسی دقیق آن به عنوان یک امر لازم، جزء مراحل اولیه و اصلی طراحی است تا با شناخت کامل اثر آن، تأسیسات هیدرولیکی از خطرات این پدیده مصون بمانند. برای کنترل اثرات سوء این فرآیند روش ها و تجهیزات متعددی پیش بینی شده است. که در بعضی از مواقع به کارگیری یک روش کافی است ولی در پاره ای از موارد ترکیب دو یا چند روش لازم به نظر می رسد.

در این مقاله پدیده ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ فشار قوی مورد مطالعه قرار گرفته و معادلات حاکم بر پدیده با اعمال روش مشخصه تحلیل گردیده است. به منظور مقایسه تأثیر روشهای مختلف در کنترل فشارهای ناشی از ضربه قوچ، ایستگاه پمپاژ مورد نظر با در نظر گرفتن وجود چرخ طیار، محفظه هوا، تانک موج گیر و ترکیبی از محفظه هوا و تانک موج گیر مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که در بین روش های یاد شده، کاربرد محفظه هوایی به عنوان بهترین وسیله کنترل فشارهای ناشی از ضربه قوچ قابل توصیه می باشد.

واژه های کلیدی: ضربه قوچ، جریان های میرا، ایستگاه پمپاژ، محفظه هوایی.

۱- مقدمه

توان باز یا بسته نمودن سریع شیرآلات، راه اندازی یا از کار افتادن پمپ ها و توربین ها، پر کردن خطوط خالی، هواگیری خطوط لوله و تغییر قطر لوله در مسیر را نام برد. مطالعه این پدیده به دلیل اهمیت مسأله از دیر زمان شروع و جنبه های تئوری آن تحلیل گشته است. ماری، کورتوگ، ژوکوفسکی، آلیوی و بالاخره پرمکیان، از جمله محققانی بودند که به مطالعه این پدیده از دیدگاه تئوری پرداختند (۱).

با فرارسیدن دهه ۱۹۶۰ و پیشرفت صنعت رایانه عصر جدیدی در بررسی پدیده ضربه قوچ آغاز گردید. دانشمندی چون استریتر و وایلی و آلمیدا و کوئل استفاده از کامپیوتر را برای تحلیل

بروز پدیده ضربه قوچ در طرح های آبی موجب تخریب فراوان می گردد و خسارات زیادی را بر سیستم های جریان تحت فشار تحمیل می نماید. بدین جهت لازم است که در مراحل اولیه طراحی و قبل از اقدام به اجرای طرح، پدیده یاد شده به دقت مورد بررسی قرار گرفته، راه حل های ممکنه ارزیابی و مناسبترین روش برای کنترل اثرات سوء این فرآیند و مصون ماندن سیستم انتقال از خطرات این پدیده منظور شود.

در یک خط لوله هر عملی که باعث تغییر سرعت جریان می گردد، پتانسیلی برای تولید موج ضربه می باشد. از آن جمله می

که در آن V سرعت، P فشار ثقل، f شریب اصطکاک در فرمول داری - ویسیاج، D قطر لوله، ρ جرم مخصوص، t زمان، x مختصات طول و a سرعت موج در لوله است که طبق رابطه زیر محاسبه می شود.

$$A = \sqrt{\frac{K}{r}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{K \cdot D}{E \cdot e}}}$$

K = مدول حجمی آب، E = مدول ارتجاعی لوله و e = ضخامت جدار لوله.

۳- حل معادلات حاکم بر پدیده با روش مشخصه:

اساس راه حل روش مشخصه بر این اصل استوار است که دو معادله (۱) و (۲) با ترکیبی خطی از آنها جایگزین می شود. با لحاظ کردن خصوصیات روش مشخصه می توان معادلات بالا را در امتداد خطوط مشخصه مثبت (C^+) و منفی (C^-) به صورت زیر بیان داشت.

برای خط مشخصه C^+

؛ (۴)

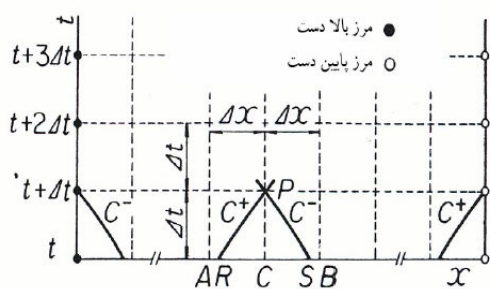
$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} + \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{g}{a} V \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2d} V |V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V + a \end{cases}$$

برای خط مشخصه C^-

(۵)

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} - \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} - \frac{g}{a} V \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2d} V |V| = 0 \\ \frac{dx}{dt} = V - a \end{cases}$$

برای حل معادلات (۴) و (۵) از روش تفاضلات محدود استفاده می شود. با توجه به شکل (۱) داریم:



شکل ۱: نمایش خطوط مشخصه در صفحه مختصات x-t

جریان های میرا تعمیم داد. (۲،۳). توما از جمله محققانی بود که در مورد مخازن موج گیر تئوریهای ارائه کرد و نشان داد که سطح آب در مخازن موج گیر تنها در صورتی به تعادل خواهد رسید که سطح مقطع تانک از یک مقدار حداقل که امروزه به نام سطح توما نامیده می شود، بیشتر باشد. در سال های اخیر محققان دیگری همچون گریز و چادری کاربرد محفظه هوایی در ایستگاه های پمپاژ را مورد بررسی قرار دادند و برای تعیین حجم هوای محفظه های هوایی نمودارهای کاربردی ارائه کردند. (۵،۶) متعاقب آن لای پدیده جدایی ستون مایع را در خطوط انتقال آب مورد بررسی قرار داد (۴). وود و جونز نیز وقوع پدیده ضربه قوچ ناشی از عملکرد انواع شیرفلکه ها را مورد مطالعه قرار داده و نتایج تحقیقات خود را به صورت نمودارهایی ارائه داده است (۷) و بالاخره مارتن نقش ابزارهای جلوگیری از پدیده ضربه قوچ را بطور تجربی مورد آزمایش قرار داده است (۸). اخیراً شیمادا و اوکوشیما روش های عددی جدید را در تحلیل پدیده ضربه قوچ بیان کرده است و لاروک و جیپسون نیز هیدرولیک جریان های میرا را در سیستم انتقال های آب مورد بررسی و تجزیه تحلیل قرار داده است (۹).

تجزیه و تحلیل جریان های ناپایدار در سیستم های مختلف به دو روش عمده زیر انجام می شود:

الف - نظریه رفتار صلب ستون آب: در این روش سیال و لوله غیرالاستیک فرض می شوند که تقریباً در موارد نادری می توان بر این فرضیات صحه گذاشت و نتایج حاصل از این روش تقریبی است.

ب - نظریه رفتار کشسانی: در این نظریه خواص الاستیکی لوله و سیال وارد محاسبات می گردند. معادلات تشریح کننده جریان در این روش، دو معادله دیفرانسیل جزئی غیر خطی می باشند که حل آنها مشکل و پیچیده است اما جواب های حاصل نسبت به روش قبل بسیار دقیقتر و مطمئن تر خواهد بود.

۲- معادلات حاکم بر پدیده

معادلات اصلی برای محاسبه ضربه قوچ در جریان های غیر ماندگار عبارت از دو معادله دیفرانسیل غیر خطی با مشتقات جزئی است که طبق قوانین حرکت و پیوستگی به شرح زیر بیان شوند:

$$L_1 = \left(\frac{dv}{dt} + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial x} + g \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} V |V| \right) = 0$$

$$L_2 = \left(\frac{1}{p} \frac{dp}{dt} + a^2 \frac{\partial V}{\partial X} \right) = 0$$

می توان مقادیر سرعت و فشار را در سرتاسر خط لوله و برای هر زمان دلخواه بدست آورد .

$$\frac{V_P - V_R}{\Delta t} + \frac{g}{a} \frac{H_P - H_R}{\Delta t} - \frac{g}{a} V_R \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} V_R |V_R| = 0 \quad (۶)$$

$$\frac{V_P - V_S}{\Delta t} - \frac{g}{a} \frac{H_P - H_S}{\Delta t} + \frac{g}{a} V_S \frac{dz}{dx} + \frac{f}{2D} V_S |V_S| = 0 \quad (۷)$$

چنانچه معادلات (۶) و (۷) را برای مقادیر V_P و H_P حل کنیم ، خواهیم داشت .

$$V_P = \frac{1}{2} [(V_R + V_S) + \frac{g}{a} (H_R - H_S) + \frac{g}{a} \Delta t (V_R - V_S) \sin \theta - \frac{f \cdot \Delta t}{2D} (V_R |V_R| + V_S |V_S|)] \quad (۸)$$

$$H_P = \frac{1}{2} [(H_R + H_S) + \frac{a}{g} (V_R - V_S) + \Delta t (V_R - V_S) \sin \theta - \frac{a \cdot f \cdot \Delta t}{g \cdot 2D} (V_R |V_R| - V_S |V_S|)] \quad (۹)$$

۴- مشخصات ایستگاه پمپاژ مورد مطالعه

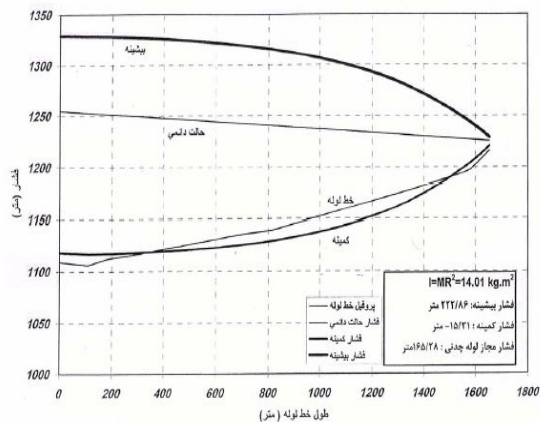
ایستگاه پمپاژ مورد نظر در ارتفاعات جنوبی شهر مشهد قرار دارد و در طراحی آن دو حالت میان مدت (تأمین دبی براساس رشد جمعیت تا سال ۱۳۸۵) و دراز مدت (تأمین دبی براساس شرد جمعیت تا سال ۱۴۰۰) در نظر گرفته شده است . اطلاعات اولیه و مشخصات خطوط لوله به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است .

به منظور کنترل فشارهای ناشی از ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ مورد نظر ، چهار روش نصب چرخ طیار ، نصب محفظه هوا ، استفاده از تانک موج گیر (۵ و ۶ و ۸) و ترکیبی از محفظه هوا و تانک موج گیر مورد استفاده قرار گرفته اند که نتایج حاصل در اینجا ارائه شده اند .

۵- تجزیه و تحلیل نمودارها و مقایسه نتایج

شکل ۲ ، فشارهای ماکزیمم و مینیمم در خط لوله را ، در میان مدت ، بدون در نظر گرفتن وسایل حفاظتی نشان می دهد . بطوریکه ملاحظه می شود فشار ماکزیمم بیش از فشار مجاز لوله چدنی ($H_{max} = 220.24 \text{ m}$) می باشد و فشار منفی ($H_{min} = -15.31 \text{ m}$) نیز در خطوط لوله ایجاد شده است . لذا ایستگاه پمپاژ ذکر شده ، در برابر فشارهای ناشی از ضربه قوچ ایمن نبوده و نیاز به نصب وسایل حفاظتی دارد .

در معادلات فوق $\sin \theta = \frac{dz}{dx}$ مثبت است وقتی که در پایین دست شیب لوله به طرف بالا باشد . از آنجا که در معاملات (۸) و (۹) مقادیر H_S ، H_R ، V_S ، V_R مشخص نیستند ، لازم است این مقادیر با روش انتروپولاسیون ، برحسب مقادیر معلوم H_B ، H_C ، H_A ، V_B ، V_C ، V_A محاسبه شوند . با انجام این عمل خواهیم داشت .



شکل ۲: فشارهای بیشینه و کمینه بدون نصب وسایل حفاظتی در درازمدت

(۱۰)

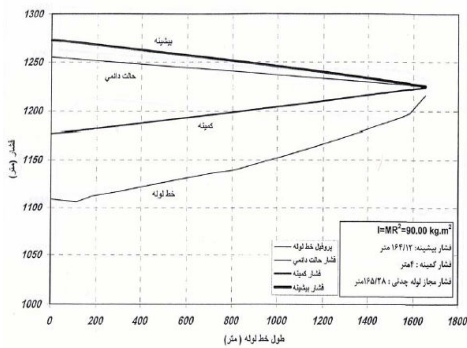
$$V_R = V_C + a \frac{\Delta t}{\Delta x} (V_A - V_C);$$

$$H_R = H_C + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} (H_A - H_C)(a + V_R) \right)$$

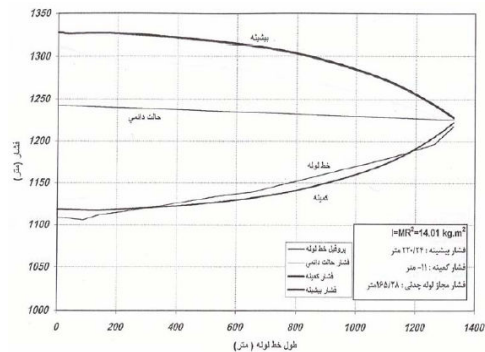
$$V_S = V_C + a \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} (V_B - V_C) \right);$$

$$H_S = H_C + \left(\frac{\Delta t}{\Delta x} (H_B - H_C)(a - V_R) \right)$$

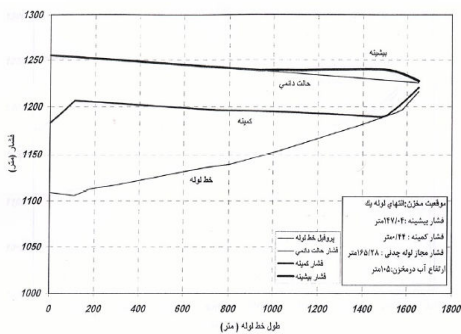
با استفاده از معادلات (۸) تا (۱۰) و با شرایط مرزی ، می توان مقادیر V و H را برای تمام نقاط در طول خط لوله و برای هر زمان $t = \Delta t$ بدست آورد . سپس این مقادیر را به عنوان شرایط اولیه برای بدست آوردن مقادیر V و H دیگر در تمام نقاط خط لوله برای زمان $t = 2\Delta t$ مورد استفاده قرار داد و بدین ترتیب



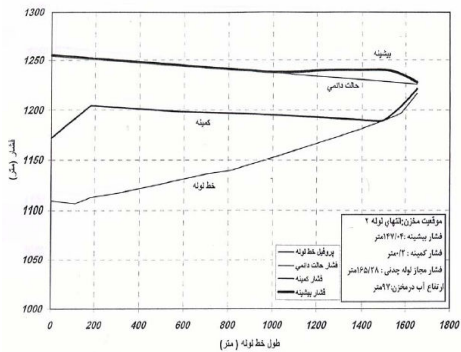
شکل ۵: اثر چرخ طیار بر فشارهای بیشینه و کمینه



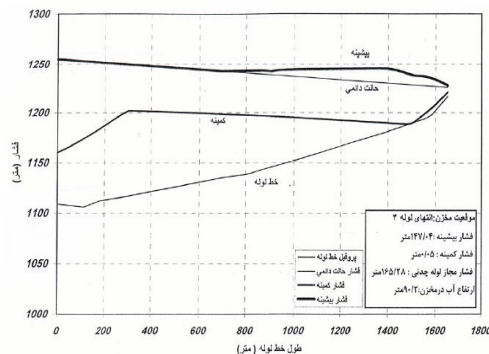
شکل ۳: فشارهای بیشینه و کمینه بدون نصب وسایل حفاظتی در درازمدت



شکل ۶: اثر تانک موج گیر بر فشارهای بیشینه و کمینه



شکل ۷: اثر تانک موج گیر بر فشارهای بیشینه و کمینه

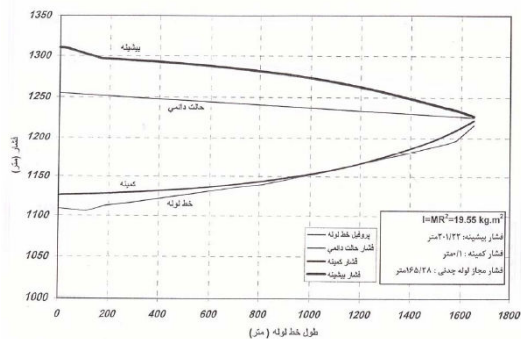


شکل ۸: اثر تانک موج گیر بر فشارهای بیشینه و کمینه

شکل ۳، نمایانگر فشارهای ماکزیمم و می نیمم در خط لوله، در دراز مدت، بدون نصب ابزار حفاظتی می باشد. در این حالت نیز فشار ماکزیمم ($H_{max} = 220.24m$)، بیش از ظرفیت تحمل لوله چدنی است. مقایسه شکل های ۲ و ۳ نشان می دهد که فشار ماکزیمم ($H_{max} = 220.24m$) و قدر مطلق فشار می نیمم (۱۱ متر)، در دراز مدت با وجود افزایش دبی کاهش یافته است. علت این امر را می توان در استفاده از دو لوله موازی در طرح دراز مدت جستجو کرد.

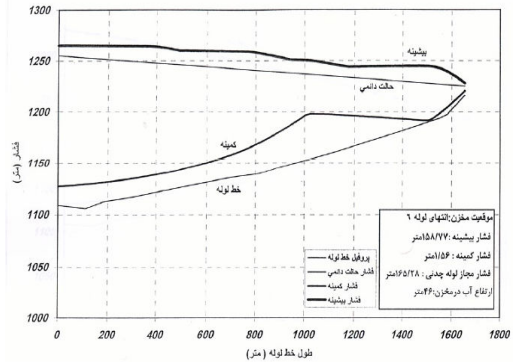
شکل های ۴ و ۵ تأثیر چرخ طیار بر فشارهای ماکزیمم و می نیمم را نمایش می دهند. لازم به توضیح است که اضافه کردن چرخ طیار به پمپ باعث افزایش ممان اینرسی قسمت های چرخنده پمپ می شود و در نتیجه زمان توقف پمپ افزایش می یابد.

همانطوریکه از شکل ۴ پیداست، برای تعدیل فشار می نیمم، لازم است ممان اینرسی قسمتهای چرخنده پمپ تا میزان $(19.55Kg.m^2)$ یعنی $(1/4)$ برابر (افزایش یابد و برای کم کردن فشار ماکزیمم تا حد فشار مجاز، افزایشی تا میزان $(90Kg.m^2)$ یعنی $(6/42)$ برابر) مورد نیاز است.

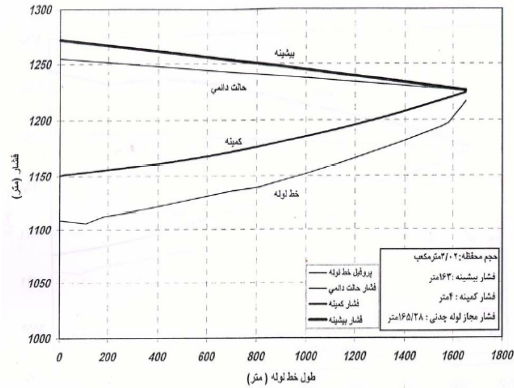


شکل ۴: اثر چرخ طیار بر فشارهای بیشینه و کمینه

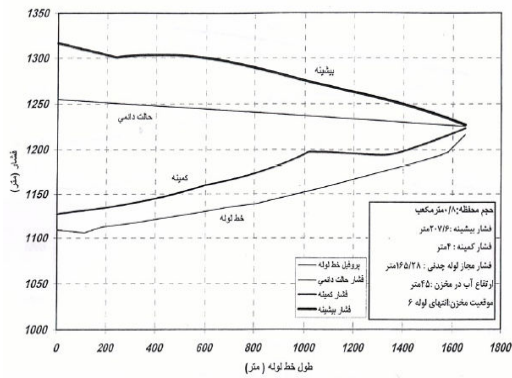
مکعب گردیده است که این مقدار نسبت به حالتی که محفظه هوایی به تنهایی استفاده شده باشد، ۳۶/۵ درصد کاهش حجم را نشان می دهد. در صورتیکه افزودن یک تانک موج گیر به ارتفاع ۵۰ متر، به منظور کنترل فشار پیشینه، باعث کاهش حجم محفظه هوایی تا میزان ۲/۶۲ متر مکعب گردیده است.



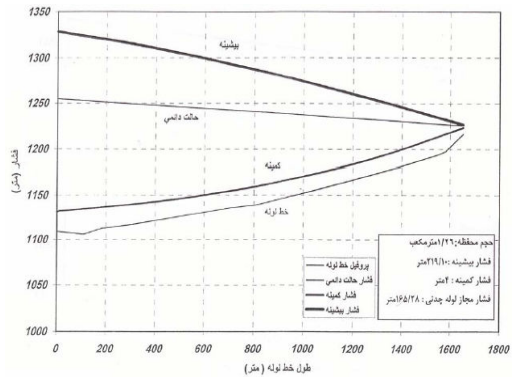
شکل ۹: اثر تانک موج گیر بر فشارهای پیشینه و کمینه



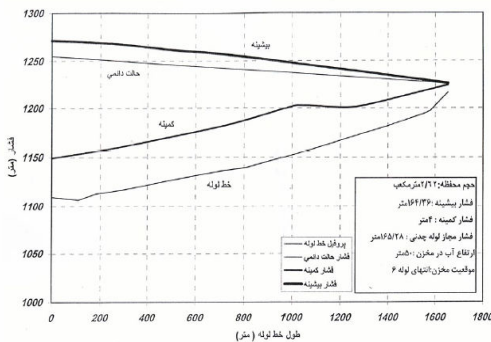
شکل ۱۱: اثر محفظه هوا بر فشارهای پیشینه و کمینه



شکل ۱۲: اثر محفظه هوا و تانک موج گیر بر فشارهای پیشینه و کمینه



شکل ۱۰: اثر محفظه هوا بر فشارهای پیشینه و کمینه



شکل ۱۳: اثر محفظه هوا و تانک موج گیر بر فشارهای پیشینه و کمینه

شکل‌های ۶، ۷، ۸، ۹ تأثیر مخزن موج گیر بر مقدار فشارهای پیشینه و کمینه را نشان می دهند. در شکل های ذکر شده، یک مخزن موج گیر به قطر ۲ متر، به ترتیب در انتهای لوله ۱، ۲، ۳ و ۶ نصب شده است. ارتفاع آب مورد نیاز در این مخازن به ترتیب ۱۰۵، ۹۷، ۹۰/۲ و در بهترین حالت ۴۶ متر می باشد.

شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب بیانگر تأثیر محفظه هوایی در کنترل فشار می نیمم و فشار ماکزیمم می باشند. حجم محفظه هوایی مورد نیاز برای کنترل فشار ماکزیمم ۳/۰۱ متر مکعب می باشد که نسبت به حجم محفظه هوایی مورد نیاز در کنترل فشار می نیمم (۱/۲۶ متر مکعب) نزدیک به ۲/۵ برابر شده است. در شکل های ۱۲ و ۱۳، خط لوله با در نظر گرفتن وجود محفظه هوایی و تانک موج گیر به طور همزمان، مورد بررسی قرار گرفته است. افزودن یک تانک موج گیر به ارتفاع ۴۵ متر (ارتفاع آب داخل مخزن ۴۵ متر می باشد) به منظور کنترل فشار کمینه، باعث کاهش حجم محفظه هوایی تا میزان ۰/۸ متر

جدول (۱) - اطلاعات اولیه ایستگاه پمپاژ [۱۱]

شرح	میان مدت (سال ۱۳۸۵)	دراز مدت (سال ۱۴۰۰)
رقوم ابتدا (متر)	۱۱۱۷.۴۵	۱۱۱۷.۴۵
رقوم حداقل سطح آب در مخزن بالادست (متر)	۱۱۱۸.۴۵	۱۱۱۸.۴۵
رقوم حداکثر سطح آب در مخزن پایین دست (متر)	۱۲۲۵	۱۲۲۵
قطر خط انتقال (میلی متر)	۴۰۰	۴۰۰ + ۵۰۰
طول خط انتقال (متر)	۱۶۷۰.۸	۱۶۷۰.۸

جدول ۲: مشخصات خطوط لوله [۱۱]

مشخصات لوله	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
طول لوله	۱۱۰.۳	۷۱.۶۰	۱۲۲.۵	۳۹۸.۴۰	۱۰۵۰.۸	۲۱۰.۵	۳۶۶.۷۰	۱۶۵۰.۸۰	۲۸۰.۲۰	۹۱۰.۵۰
کد ابتدا	۱۱۱۱.۰۷	۱۱۰۷.۱۴	۱۱۱۴.۱۱	۱۱۱۸.۶۹	۱۱۳۷.۵۲	۱۱۴۰.۹۹	۱۱۵۴.۹۹	۱۱۸۲.۰۲	۱۱۹۵.۶۵	۱۱۹۸.۸۵
کد انتها	۱۱۰۷.۱۴	۱۱۱۴.۱۱	۱۱۱۸.۶۹	۱۱۳۷.۵۲	۱۱۴۰.۹۹	۱۱۵۴.۹۹	۱۱۸۲.۰۲	۱۱۹۵.۶۵	۱۱۹۸.۸۵	۱۲۲۱

۶- نتیجه

از آنچه بیان شده، نتایج زیر حاصل می شود:

استفاده از لوله های موازی (انشعایی) می تواند به عنوان راهکاری برای تعدیل فشارهای ناشی از ضربه قوچ مورد توجه قرار گیرد.

با توجه به اینکه رسیدن به ممان اینرسی های زیاد به راحتی میسر نیست و با توجه به اینکه نصب چرخ طیار، مصرف برق بالایی را در زمان راه اندازی پمپ مطالبه می کند، در نتیجه استفاده از چرخ طیار به منظور کنترل فشارهای بیشینه و کمینه، نمی تواند به عنوان یک روش اقتصادی در ایستگاه های پمپاژ فشار قوی مورد توجه قرار گیرد.

ارتفاع زیاد آب در مخازن موج گیر به خوبی نشان دهنده عدم کارایی این مخازن در ایستگاه های پمپاژ می باشد.

حجم کم محفظه هوا (در مقایسه با حجم زیاد مخزن موج گیر) بیانگر این است که محفظه هوایی به عنوان یک ابزار مؤثر و مناسب، برای کنترل فشارهای ماکزیمم و می نیمم در ایستگاه های پمپاژ، می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

ترکیب محفظه هوایی و تانک موج گیر به منظور کنترل فشارهای می نیمم، تأثیر چشمگیری در کاهش حجم محفظه هوایی نسبت به کنترل فشارهای ماکزیمم دارد.

نتایج این مطالعه نشان می دهد که کاربرد محفظه هوایی به عنوان بهترین وسیله کنترل فشارهای ناشی از ضربه قوچ قابل توصیه می باشد.

۷- مراجع

- 1- Parmakian, J., 1963. "water Hammer Analysis". Dover Publications. Inc.
- 2- Streeter, V.L. and Wilie, E.B., 1967. "Hydraulic Transients", Mc Graw-Hill Book Co. New York.
- 3- Almeida, A.B. and Koelle, E., 1992 "Fluid Transients in Pipe Networks", Elsevier Applied Science.
- 4- LI, W.H., 1962. "Mechanics of PiPe Flow Following column Separation" Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 88, EM4.
- 5- Graze, H.R., 1989, "Rational Design of Air Chamber, Prevent Accidents on Cases and Accidents in Fluid Systems", Ed. E.Kolle, S. Paullo, Brazile.
- 6- Chaudhry, M.H., 1987, "Applied Hydraulic Transients", Van Nostrand.
- 7- Martin, C.S., 1992, "Experience with Surge Protection Devices", BHR Group International Conference on Pipeline", Manchester, England.
- 8- Shimada, M., and Okushima, S., 1984 "Model and Technique for Water Hammer", J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol.110, No. 6.
- 9- Larock, B.E., Jeppson, R.W. and Watters, G.Z., 2000, "Hydraulics of Pipeline Systems", Crc Press, New York.

A Study on the Upsurges and Downsurges Control Methods in a High Pressure Pumping Station

Y. Hassanzadeh

Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz.

J. Abrishami

Associat Professor, Ferdowsi University of Mashhad.

J. Zamanian

Eng., TSC, Mashhad.

Water hammer is one of the destructive hydrodynamic phenomena which is established in most pumping stations, transmission lines and hydroelectric power plants. This phenomenon gives rise to abnormal pressures, cavitation occurrence and finally pipe explosion and disturbance of the whole system. To control the maleffects of this event, different methods are devised. One of which is sometimes enough and a combination of two or more is necessary in some occasions.

This paper is an attempt to study water hammer phenomenon in a pumping station and solve the governing equations with the use of complete method of characteristics. In order to compare the effect of different methods on the control of pressure due to water Hammer, the mentioned pumping station considering the presence of flywheel, surge tank, air chamber and a combination of air chamber and surge tank has been investigated. The result indicate that use of air chamber is the best instrument among from the mentioned methods, to control the pressures due to water hammer.

Keywords : Water hammer, Transient flows, Pumping station, Air chamber