جریانهای ناپایدار در لوله

(ضربهٔ قوچ)

مهندس حمیدرضا مرتهب مهندس فضل‌الله فرهادی

کارشناسان مهندسین مشاور طرح و تحقیقات آب وفاضلاب

مقدمه:

یکی از مهمترین پدیده‌های هیدرولیکی که در لوله‌ها و مجاری سر پوشیده و تحت فشارسیال ممکن است حادث گردد و باعث ایجاد فشارهای زیاد، سروصدا وکاویتاسیون شود ضربه قوچ می‌باشد.

این پدیده در اثر عوامل مختلفی پدیدار می‌شود که باعث اثرات سوء برروی مجاری و لوله‌ها و تونلهای انتقال مایع و همچنین پمپهاو بطورکلی ماشین آلات مربوط به انتقال سیالات می‌گردد. ضربه قوچ می‌تواند فشاری معادل دهها برابر فشار عادی در مجرا ایجاد کند که گاهی منجر به شکستن مجرا و ایجاد خسارات زیاد مالی و جانی می‌شود. با توجه به اهمیتی که این پدیده در کاربرد شبکه‌های لوله‌کشی و ایستگاههای پمپاژ دارد و همچنین به منظور یافتن علل ایجاد این پدیده و روشهای جلوگیری از آن، در این مقاله موضوع ضربه قوچ مورد بررسی واقع شده است.

۱ـ تعریف ضربهٔ قوچ:

در اثر عوامل مختلف از قبیل قطع جریان برق و از کارافتادن ناگهانی پمپها و یا بازوبسته کردن سریع شیرهای قطع و وصل، فشارداخلی لوله به طور ناگهانی افزایش می‌یابد. افزایش فشار به‌صورت موج رفت وبرگشتی بین پایین دست و بالادست جریان حرکت کرده و در مسیر خود با ضربه‌زدن به تأسیسات و خطوط لوله باعث بروز ضایعاتی می‌گردد. اطلاع از شدت این ضربه و روش عملی جلوگیری از آن در جهت افزایش عمر تأسیسات مفید خواهد بود.

۲ـ علل پیدایش ضربه قوچ:

به علل فوق‌الذکر و وصل و یا به هر علت دیگری که جریان در یک خط لوله به‌طور ناگهانی قطع گردد، در اثر تبدیل انرژی جنبشی به انرژی کشسانی فشار در نقطهٔ قطع افزایش خواهد یافت و یک موج فشاری به سمت بالادست شروع به حرکت خواهد کرد.

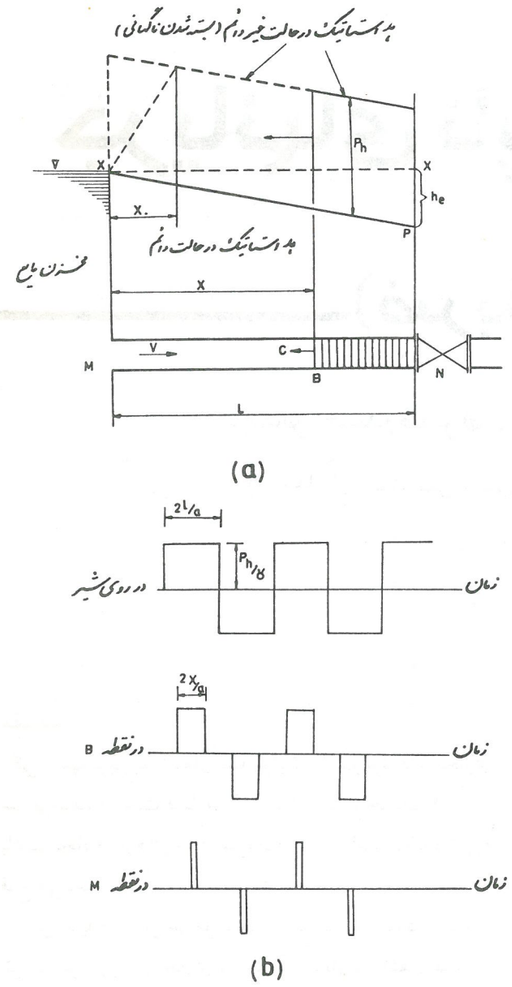
این موج در نقطهٔ شروع منعکس خواهد شد و مابین ابتدا و انتهای مسیر به حرکت رفت و برگشتی خود ادامه خواهد داد و

به علت وجود اصطکاک در لوله و در حین حرکت مستهلک گردیده و بالاخره فشار در تمامی خط لوله مساوی با هد مخزن خواهد شد و جریان کاملاً متوقف می‌شود. بطورکلی هم باز کردن و هم بستن شیر باعث ایجاد امواج فشاری می‌شود و این امواج فشاری به نوع و نحوهٔ باز وبسته شدن شیر و مشخصات هیدرولیکی سیال و خواص الاستیکی لوله وسیال بستگی دارند. در پاره‌ای موارد به هنگام بستن چند درصد آخر شیر، فشارهایی بسیار بالا یا پایین در دو طرف شیر پدید می آید که به ترتیب فشارهای بالا موجب صدمه زدن به خطوط لوله و تأسیسات و فشارهای پایین سبب ایجاد کاویتاسیون و پدیدهٔ جدایی ستون مایع (column separation)می‌شود.

۳ـ تئوری و محاسبات مربوط به ضربه قوچ:

جهت بررسی فیزیکی ضربه قوچ ۳ حالت زیر را مورد بررسی قرار می‌دهیم: بسته شدن ناگهانی و آنی (زمان بسته شدن صفر است)، بسته شدن سریع شیر (زمان بسته شدن کوتاه است)، بسته شدن آهسته شیر. هر چند ازنظر فیزیکی بسته شدن ناگهانی و آنی شیر امکانپذیر نیست، بررسی چنین حالتی می‌تواند بطور مقدماتی به فهم مسئله کمک نماید (شکل ۱)

شکل (۱a) را در نظر بگیرید در این شکل یک لوله افقی نسبتاً طولانی به مخزن آبی متصل است. یک شیر در انتهای لوله تعبیه شده است. ابتدا شیر باز بوده و جریان بطور دائم از لوله خارج می‌شود در لحظه صفر شیر را بطور ناگهانی می‌بندیم. پس از بسته شدن شیر ذرات مایع داخل لوله در نزدیکی شیر متوقف و توسط بقیه مایع موجود در داخل لوله فشرده می‌گردد. سپس ذرات مایع که در نزدیکی قسمت ساکن شده می‌باشد، متراکم و ساکن می‌گردد و این عمل ادامه پیدا می‌کند. اختلاف فشار بین دو طرف ساکن و متحرک سبب ایجاد یک موج فشاری (pressure wave) می‌گردد که با سرعت سیر صوت حرکت کرده، سیال را به سکون می‌رساند. شکل (۱_b) زمانی را نشان میدهد که موج فشاری قسمتی از لوله را طی کرده و به طرف مخزن در حال حرکت است. مایع در سمت راست موج ساکن و دارای فشار زیاد و در سمت چپ متحرک و دارای فشارکم می‌باشد. مایع در سمت راست متراکم شده و همانند سیال قابل تراکم عمل می‌کند.



شکل ۱ (a) منبع، لوله و شیر همراه با تغییر فشار در دو حالت (b) تغییرات فشار در اثر ضربه قوچ در سه نقطه مختلف لوله.

همچنین در اثر افزایش فشار مایع و اعمال نیرو به دیواره، قطر دیواره نیز اندکی افزایش می‌یابد.

وقتی موج فشاری به انتهای لوله (نقطه M) رسید، تمام مایع داخل لوله ساکن شده ولی فشار سیال داخل لوله بیشتر از حد معمول است. شکل (۱_a) فشار مایع داخل لوله را در دو حالت قبل از بسته شدن و در حالت سکون سیال نشان می‌دهد. بعلت اینکه فشار مایع داخل لوله در نقطه M بیشتر از فشار سکون مایع بالای نقطه M در مخزن است، حالت مایع در لوله پایدار نمی‌باشد و این تغییر فشار باعث حرکت ذرات مایع داخل لوله در نزدیکی نقطه M بطرف مخزن می‌گردد. لذا یک موج فشاری دیگر به طرف داخل لوله شروع به حرکت می‌نماید. در لحظه‌ای که این موج به نقطه‌ای مثل B در داخل لوله رسید، مایع داخل لوله در قسمت MB منبسط شده و بطرف مخزن حرکت کرده و فشار آن با ارتفاع آب داخل مخزن در حالت تعادل می‌باشد. در حالی که مایع داخل لوله در قسمت BN ساکن بوده و فشاری بالاتر از فشار مایع در قسمت دیگر دارد. وقتی موج به نقطه N برسد کلیه ذرات مایع در داخل لوله به سمت مخزن در حال حرکت می‌باشد. ولی ذرات مایع در نزدیکی شیر نمی‌تواند حرکت به سمت مخزن را ادامه دهد لذا سرعت مایع در این حوالی دوباره به صفر می‌رسد و فشارآن بخاطر حرکت سیال مجاور، کاهش می‌یابد. در حالت ایده‌آل این کاهش فشار، درست برابر افزایش فشار مایع در حالت قبل است.

موج فشاری جدید که سبب کاهش فشار می‌شود به سمت مخزن برمی‌گردد و در هر جا که برسد سرعت مایع را به صفر رسانده و فشارش را کاهش می‌دهد. این عمل همچنان ادامه می‌یابد. در حالت ایده‌آل حرکت موجهای فشار در طول لوله به طرف مخزن و سپس به طرف شیر تا بی‌نهایت ادامه پیدا می‌کند و فشارمایع داخل لوله مرتب کاهش و افزایش پیدا می‌کند ۰ در صورتی که سرعت موج فشاری را با a نشان دهیم می‌توان نشان داد که این سرعت بستگی به مدول الاستیسیته مایع و لوله و دانسیته مایع، قطر لوله و ضخامت لوله دارد و از رابطه زیر بدست می آید:

$$a = \sqrt{\frac{K.g/\gamma}{(1+K/\varepsilon.D/e)}}$$

که در آن

K = مدول الاستیسیته سیال جاری (pa)که برای آب این مقدار برابر 2.07×10^9pa است

ε = مدول الاستیسیته لوله(pa)

D = قطر لوله(m)

e = ضخامت جداره لوله (m)

لذا زمان حرکت یک موج ضربه‌ای از نقطه N به نقطه M و بازگشت آن از M به N برابر است با:

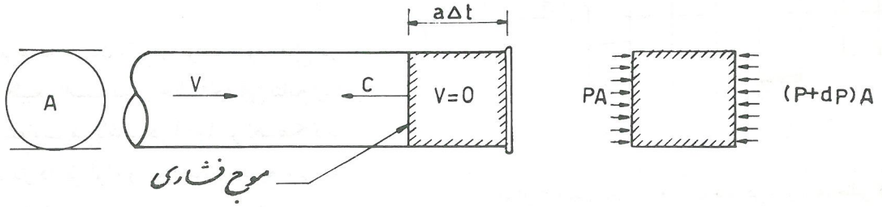
$$T_r = \frac{2l}{a}$$

که در آن l= طول لوله، T_r= زمان رفت و برگشت موج فشاری در طول لوله است.

شکل (۱_b) منحنی تغییرات فشار مایع را در سه نقطه مختلف بر حسب زمان نشان می‌دهد. پریود نوسانات موج فشار در هر نقطه T_p با توجه به این شکل برابر است با

$$T_p = \frac{4l}{a}$$

مقدار افزایش یاکاهش فشار مایع در اثر ضربه قوچ را می‌توان بطور مقدماتی از طریق بررسی المان سیال در طول لوله بدست آورد.



شکل ۲ـبررسی شماتیک ضربه قوچ در لوله

شکل ۲ لحظه‌ای (dt) پس از بسته شدن شیری که در انتهای یک لوله که به مخزن آبی متصل شده است را نشان می‌دهد. موج فشاری ایجاد شده با سرعت a به طرف چپ حرکت می‌کند. طول قسمتی از لوله که مایع در آن ساکن شده است برابر adt است. قانون دوم نیوتن را برای حجم معیاری که شامل مایع ساکن است می‌نویسیم:

$$Fdt = Mdv$$

با صرفنظر از نیروی اصطکاک، تنها نیروی اعمال شده نیروی ناشی از فشار است. بنابراین رابطه فوق به‌صورت زیر ساده می‌شود.

$$\{pA-(p+dp)A\}dt=(\frac{\gamma}{g}Aadt)dv$$

و یا

$$dp=\frac{\gamma}{g}adv$$

از طرفی

$dv=o-v=-v$ می‌باشد همچنین اگر تغییرات فشار در اثر ضربه قوچ را با P_h نشان دهیم، $dp=P_h$ و داریم

$$P_h=\frac{\gamma}{g}v.a$$

که P_h فشار اضافی ناشی از ضربه قوچ (kg/m^2)

γ وزن مخصوص سیال جاری در لوله (kg/m^3)

v سرعت سیال (m/sec)

a سرعت موج فشاری (m/sec)

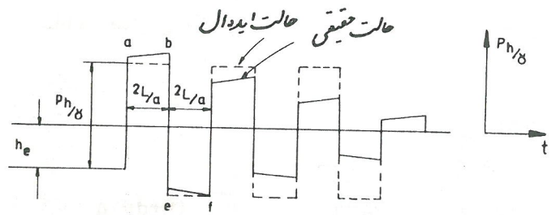
g شتاب ثقل (m/sec^2)

می‌باشند.

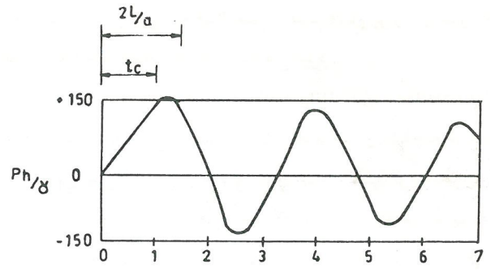
همانطور که در رابطه اخیر مشخص شده است تغییر فشار در اثر ضربه قوچ بستگی به طول لوله نداشته و فقط تابعی از دانسیته، سرعت موج و سرعت اولیه مایع می‌باشد. البته در حالت حقیقی که اصطکاک را در نظر می‌گیریم طول اولیه نیز مؤثر خواهد بود.

بررسی فوق مربوط به جریان مایع و اثرات ضربه قوچ در حالت ایده‌آل است. طبیعی است که در حالت حقیقی نتایج این بررسی تا حدودی متفاوت می‌باشد. در اینجا اثر اصطکاک، ناپایدار بودن جریان در داخل لوله و بسته شدن سریع ولی نه ناگهانی شیر بطور کیفی بررسی می‌شود. در اثر وجود اصطکاک بین لایه‌های جریان مایع و نیز بین مایع و دیواره لوله موج فشاری در حین حرکت از قدرتش کاسته شده و در نتیجه سبب تغییر کمتر فشار و سرعت سیال می‌گردد. نهایتاً پس از مدتی موج فشاری قدرتش به صفر رسیده، ناپدید می‌شود. شکل ۳ اثر اصطکاک و متعادل شدن فشار مایع را نشان می‌دهد. در این شکل منحنی تغییرات فشار نقطه N برحسب زمان رسم شده است. افزایش جزئی فشار بخاطر متعادل شدن سیال در حال سکون در لوله بوده و کاهش دامنه اوج فشار نسبت به زمان بخاطر وجود اصطکاک می‌باشد.

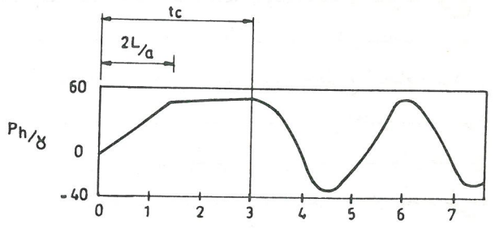
شکل ۴ منحنی تغییرات فشار نقطه N را در حالت حقیقی وقتی زمان بسته شدن شیر کوتاه ولی بیشتر از صفر باشد (بسته شدن سریع) نشان می‌دهد. در این حالت زمان بسته شدن t_c کمتر از زمان یک رفت و برگشت موج، t_r، می‌باشد. شکل منحنی فشار در فاصله زمانی $0<t<t_c$ بستگی به نحوه بسته شدن شیر دارد. مقدار ماکزیمم فشار دراین حالت برابر با فشار ماکزیمم در حالتی است که شیر بطور ناگهانی بسته می‌شود. ولی در این حالت، است زمانی که فشار ماکزیمم است خیلی کمتر از حالت بسته شدن ناگهانی است. درصورتی که بسته شدن شیر آهسته صورت گیرد بطوریکه $t_c>t_r$ باشد، برای موج فشاری زمان کافی وجود ندارد که طول لوله را بطور کامل طی کرده و قبل از اینکه شیر کاملاً بسته شده باشد به نقطه اول خود برمی‌گردد. در این حالت فشار کمتر از فشار ماکزیمم در حالتهای قبل می‌باشد. شکل ۵ منحنی فشار نقطه N را برای حالتی که شیر به آهستگی بسته می‌شود، نشان می‌دهد.



شکل ۳ـ منحنی تغییرات فشار در نزدیکی شیر برای حالتی که بسته شدن شیر ناگهانی است با درنظر گرفتن اثرات اصطکاک و متعادل شدن فشار



شکل ۴ ـ بسته شدن سریع شیر، نتایج یک آزمایش برای t_c=1sec



شکل ۵ ـ بسته شدن آهسته شیر وقتی $T_p<t_c$ باشد، نتیجه یک آزمایش برای $t_c = 3^{sec}$

۴ ـ راههای جلوگیری از پدیدهٔ ضربهٔ قوچ:

روشهای مختلف کنترل ضربهٔ قوچ معمولاً یک هدف را دنبال می‌کنند و آن کاهش فشارهای ناشی از ضربهٔ قوچ تا حد مقاومت مجاز لوله و اتصالات خط لوله می‌باشد. در اغلب مواقع هدف از نصب تأسیسات کنترل ضربهٔ قوچ تقلیل فشارهای کاهندهٔ ناشی از توقف پمپها می‌باشد چه در صورت تقلیل این فشار، فشارهای فزاینده، نیز خود بخود کاسته می‌شود و یا کاملاً حذف می‌گردد. معمول‌ترین روش کنترل فشارکاهنده، تغذیهٔ آب به داخل لوله در لحظهٔ کاهش فشار در لوله می‌باشد در مورد روشهای موجود ذیلاً توضیحاتی آورده شده است.

۱) استفاده از اینرسی پمپ:

اضافه نمودن ممان اینرسی قطعات گردندهٔ پمپ و موتور محرک (به طور مثال به وسیلهٔ چرخ لنگر) باعث ادامهٔ چرخش پمپ برای مدتی بعد از قطع جریان می‌گردد. لذا مانع کاهش سریع سرعت پمپ و در نتیجه افزایش فشار و ایجاد ضربهٔ قوچ می‌گردد.

اثر اینرس چرخشی پمپ در حالتی که طول خط لوله کوتاه و ارتفاع پمپاژ نیز کم باشد قابل توجه است.

۲) استفاده از تانکهای موج گیر.

تانک موج گیر محفظه یا مخزنی روباز است که به خط لوله متصل شده و امواج فشاری را منعکس و مایع اضافی خط لوله را دریافت و کمبود آب خط لوله را به آن اضافه می‌نماید و دارای دو نوع زیر است:

الف) مخزن ضربه‌گیر

ب) مخزن تخلیه

۳) استفاده از محفظه‌های هوای فشرده:

چنانچه پروفیل طولی خط لوله نسبت به خط شیب هیدرولیکی به نحوی باشد که نتوان از مخزن ضربه‌گیر یا مخزن تخلیه استفاده نمود در این صورت محفظه‌های هوای فشرده کاربرد پیدا خواهد نمود. هنگام ایجاد امواج فشار منفی در خط لوله، آب با فشار از محفظه به داخل لوله وارد شده و از تشکیل ستون جداشدهٔ آب جلوگیری به عمل می‌آورد. در این محفظه‌ها که در بخش بالائی آن با استفاده از کمپرسور، هوای فشرده تزریق می‌شود و این هوای فشرده موجب تخلیه آب از مخزن به داخل لوله می‌گردد، تغییرات سرعت حرکت آب در لوله به حداقل کاهش خواهد یافت و اثرات ناشی از ضربهٔ قوچ کاسته می‌گردد. از مزایای این روش نسبت به استفاده از مخازن موج‌گیر: حجم کمتر، قرارگرفتن محفظه‌ها به موازات خط لوله و حذف هزینه فیلتراسیون و امکان قرارگیری آن در مجاور ایستگاه پمپاژ و از معایب آن ضرورت تأمین ماشین آلات مورد نیاز نظیر کمپرسور هوا و وسایل اضافی که نیاز به مراقبت و تعمیر و نگهداری دائمی دارند را می‌توان نام برد.

۴) استفاده از والو:

با استفاده برخی از انواع والوها در شبکه می‌توان اثرات ضربهٔ قوچ را در شبکه به حداقل رساند که ذیلاً به اختصار در مورد هر یک توضیح داده می‌شود:

الف ـ شیر یک طرفه (check valve)

نصب شیر یک طرفه در روی خط لوله به تنهایی موجب کاهش فشارهای ضربهٔ قوچ نمی‌گردد و برعکس در بعضی شرایط نصب شیر در مکانهای نا مناسب در خط زیانهایی را در بر خواهد داشت.

نصب شیر یک طرفه در خط لوله با نصب مخازن ضربه‌گیر، مخازن تخلیه و محفظه‌های هوای فشرده همراه خواهد بود.

یکی از ساده‌ترین طرق پیشگیری اثرات ناشی از ضربهٔ قوچ نصب شیر یک طرفه بطور موازی با پمپ است. در شرایط عادی فشار پمپ باعث می‌گردد که شیر یک طرفه بسته بماند پس از توقف پمپ ارتفاع پیزومتریک در لولهٔ تخلیهٔ پمپ کاهش خواهد یافت اگر این کاهش فشار به حدی باشد که از فشار قسمت مکش پمپ کمتر گردد شیر یک طرفه باز می‌گردد و سیال از قسمت مکش وارد لولهٔ رانش گردیده و از کاهش فشار بیشتر جلوگیری به عمل خواهد آورد. این روش نمی‌تواند در کلیهٔ حالات مورد استفاده قرار گیرد زیرا فشار تخلیه پس از قطع پمپ اغلب بیشتر از فشار مکش می‌باشد و عملاً موقعی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که ارتفاع پیزومتریک بطورقابل ملاحظه‌ای کمتر از ارتفاع نظیر فشار ضربهٔ قوچ ($\frac{cV_0}{g}$) باشد. (در این عبارت c سرعت امواج ضربهٔ قوچ، V_0 سرعت حرکت آب در لوله و g شتاب ثقل است).

ب ـ شیر اطمینان (Safety valve):

شیر اطمینان عبارت از شیر فنری یا بارگذاری شدهٔ وزنی است که به محض افزایش فشار داخلی خط انتقال نسبت به فشار تنظیم شدهٔ روی شیر، باز خواهد شد و آب به صورت پساب به بیرون از شبکه یا به مخزن برداشت آب و یا به کانال فاضلاب هدایت می‌گردد.

ج ـ شیر آزاد کنندهٔ فشار اضافی:

عملکرد این شیر شبیه یک شیر اطمینان است به استثنای آن که شیر متناسب با فشار مایع در خط انتقال و درست در بالا دست شیر و در شرایطی که این فشار از حد معینی تجاوز نماید باز می‌شود و هنگامی که فشار در خط انتقال کاهش می‌یابد و در محدوده‌ای قرار گیرد که قبلاً عمل تنظیم فشار بر روی شیر به عمل آمده شیر مزبور کاملاً بسته می‌شود.

د ـ شیر خودکارتنظیم فشار (pressure regulating valve)

امروزه انواع مختلفی از شیرهای تنظیم فشار ساخته شده است. این شیرها دارای راه اندازهای هیدرولیکی بوده بطوری که پس از قطع برق پمپ بطور خودکار باز و پس به تدریج بسته می‌شوند. معمولاً این شیرها از نوع سوزنی بوده و فشار اضافی ایجاد شده را همراه مقداری آب از طریق لوله‌ای که به مخزن مکش پمپ متصل می‌باشد تخلیه می‌نمایند.

این شیرها معمولاً بلافاصله در پایین دست شیر یک طرفهٔ مجاور پمپ نصب می‌گردند.

۵ـ انتخاب روش مناسب جهت‌کنترل ضربهٔ قوچ:

با توجه به مجموع بحثهای بالا انتخاب روش مناسب جهت کنترل پدیدهٔ ضربهٔ قوچ بایستی بوسیلهٔ طراح انجام شود.در این مورد باید ترکیب پارامترهای فنی طرح (فشار پمپاژ، نوع پمپها، قطرلوله‌ها، طول مسیر، آرایش ترکیبی پمپها و مسائل دیگر) با ملاحظات اقتصادی در مورد هزینه‌های انجام طرح، توأماً در نظر گرفته شوند و نهایتاً روش مناسب انتخاب گردد.

در خاتمه تأکید می‌شود که مسئله ایجاد ضربهٔ قوچ یک مسئلهٔ بحرانی در خطوط انتقال و شبکه‌های آبرسانی و توزیع آب می‌باشد و برخورد صحیح با این مسئله فقط با داشتن اطلاع کافی از ماهیت آن و تجربه مهندسی در این رابطه امکانپذیر است و در صورت بی‌توجهی به این مسئله وقوع خسارت اجتناب ناپذیر خواهد بود.

۶ـ مراجع:

۱ ـ فیروز تربیت، «هیدرولیک ایستگاههای پمپاژ»، انتشارات وزارت نیرو، چاپ اول، ۱۳۶۵.

۲ – جلال آشفته، «هیدرولیک کاربردی جریانهای میرا (ضربه قوچ)،» جلد اول و دوم، چاپ اول، ۱۳۶۹.

۳ – م – ت. منزوی، «آبرسانی شهری»، انتشارت دانشگاه تهران، چاپ پنجم، ۱۳۶۷.

۴ – مجله آب، انتشارات وزارت نیرو، ۱۳۶۳.

۵ – Franzini, J.B. , Daugherty, R.L.

"Fluid mechanics with engineering applications"

1965, New York, Mc-Graw Hill Co., 6th. ed.