مقایسه پارامترهای طراحی مخازن موج گیر تفاضلی و ساده

حسن ساقی، علی نصیریان
دانشجوی دکتری عمران-آب دانشگاه فردوسی و کارشناس شرکت مهندسی مشاور طوس آب
دانشجوی دکتری عمران-آب دانشگاه فردوسی و کارشناس شرکت مهندسی مشاور ساز آب

has.saghi@gmail.com

خلاصه

استفاده از مخازن موج گیر، یکی از روشهای متداول جهت کنترل و کاهش صدمات ناشی از موج فشار (ضربه قوچ) در جریانهای گذرا و در لوله های آب بر سدها می باشد. مخازن موج گیر شامل انواع مختلفی است که از آنجمله می توان به مخازن موج گیر ساده و تفاضلی اشاره نمود.استفاده از مخازن موج گیر بسته در خطوط انتقال آب، یکی از روشهای مطمئن جهت مقابله با ضربه قوچ می باشد. اما این روش از گرانترین و مشکل ترین راه حل ها بوده و لذا مخازن موج گیر ساده و تفاضلی می تواند به عنوان گزینه مناسب بعدی پیشنهاد گردد. طراحی بهینه مخازن موج گیر شامل انتخاب نوع مناسب مخزن و نیز تعیین ابعاد آن می باشد بطوریکه علاوه بر عملکرد مناسب در حفظ تأسیسات موجود در طول خط انتقال (شیر آلات و ...)، اجرای مخزن نیز با کمترین ابعاد و هزینه صورت پذیرد. هدف از این تحقیق، بررسی پارامترهای اصلی در طراحی مخازن موج گیر ساده و تفاضلی و تعیین شرایط بهینه جهت انتخاب نوع و مشخصات مخزن می باشد. در این تحقیق ارتفاع و سطح مقطع مخزن به عنوان پارامترهای اصلی مخزن موج گیر ساده و سطح مقطع مخزن اصلی، سطح مقطع رایزر و ارتفاع رایزر و سطح مقطع روزنه به عنوان پارامترهای اصلی مخزن موج گیر تفاضلی در نظر گرفته شده اند. با بررسی پارامترهای طراحی مخازن موج گیر تفاضلی، در نهایت مشخص گردید سطح مقطع مناسب برای رایزر، برابر سطح لوله آب بوده که بر اساس میزان تغییر دبی می توان ارتفاع رایزر را مشخص نمود. همچنین روزنه ای با سطح مقطع معادل ۰/۲ برابر سطح مقطع لوله آب بر، به عنوان گزینه مناسب طراحی مخزن موج گیر تفاضلی انتخاب گردید. از طرفی با مقایسه مخازن موج گیر ساده و تفاضلی مشخص گردید همواره استفاده از مخزن موج گیر تفاضلی در مقایسه با مخزن موج گیر ساده می تواند باعث کاهش ارتفاع مخزن موج گیر و در نتیجه باعث کاهش هزینه های اجرایی آن گردد.

کلمات کلیدی: ضربه قوچ، مخزن موج گیر ساده، مخزن موج گیر تفاضلی، رایزر، روزنه

۱- مقدمه

ضربه قوچ وضعیتی از جریان در لوله های تحت فشار می باشد که بر اثر ایجاد تغییرات ناگهانی در سرعت جریان درون لوله بوجود می آید. این امر باعث ایجاد تغییراتی در اندازه حرکت و فشار سیال گردیده و موج فشاری بوجود آمده با سرعتی که به سرعت موج موسوم است باعث تشکیل امواج در طول لوله می گردد. لذا لوله می بایست به نحوی طراحی شود که در مقابل امواج بوجود آمده مقاوم و از طرفی عملکرد هیدرولیکی قابل قبولی داشته باشد. عوامل اصلی ایجاد ضربه قوچ شامل از کار افتادن و راه اندازی مجدد پمپ، بسته شدن شیرآلات و ... می باشد[۱] و [۲]. روشهای مختلف مقابله با ضربه قوچ را می توان استفاده از چرخ لنگر، مخزن ضربه گیر تحت فشار، مخزن ضربه گیر یکطرفه، مخازن موج گیر ساده و یا تفاضلی نام برد [4] ، [5].

استفاده از مخازن موج گیر ساده و تفاضلی، از جمله روشهای مقابله با تأثیرات مخرب ضربه قوچ در خطوط انتقال آب می باشد. طراحی مخازن موج گیر شامل تعیین ابعاد قسمتهای اصلی تشکیل دهنده مخازن موج گیر می باشد. هدف از این تحقیق، ارائه پیشنهاداتی جهت طراحی بهینه مخازن موج گیر تفاضلی و مقایسه آن با مخازن موج گیر ساده می باشد. در این راستا شرایط آورده شده را می‌توان به صورت نمونه‌ای از مسائلی که در این زمینه مطرح است، مورد ارزیابی قرار می دهیم.

به منظور بررسی تأثیرات ناشی از ضربه قوچ بر میزان سرعت و فشار در نقاط مختلف ، لازم است معادلات حاکم بر این پدیده مورد بررسی قرار گیردکه شامل معادلات پیوستگی و مومنتم بوده و به شرح زیر می باشند[۶] و [۷]:

(۱) معادله پیوستگی

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

(۲) معادله ممنتم

$$\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}+g\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{f|V|V}{2D}=0$$

به منظور حل همزمان معادلات فوق می توان از روش خصوصیات استفاده نمود. در این روش، معادلات به صورت زیر تبدیل می گردد (شکل ۱ را ببینید).

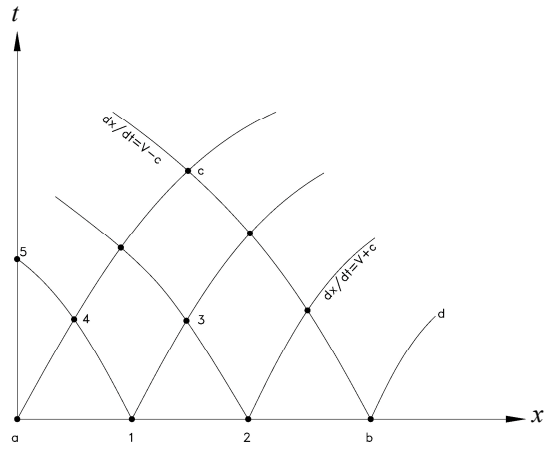
(۳) در امتداد (1-3)

$$\frac{c}{g}\left(V_3-V_1\right)+\left(H_3-H_1\right)+\frac{f}{2gD}\frac{|V_3|V_3+|V_1|V_1}{2}c\left(t_3-t_1\right)=0$$

(۴) در امتداد (2-3)

$$\frac{c}{g}\left(V_3-V_2\right)+\left(H_3-H_2\right)+\frac{f}{2gD}\frac{|V_3|V_3+|V_2|V_2}{2}c\left(t_3-t_2\right)=0$$

که در آن V، H و t به ترتیب سرعت، هد و زمان و اندیسهای 1، 2 و3 متناظر با نقاط نشان داده شده در شکل (۱) می باشند. همچنین D قطر لوله، g شتاب ثقل و c سرعت انتشار موج در سیال می باشد.

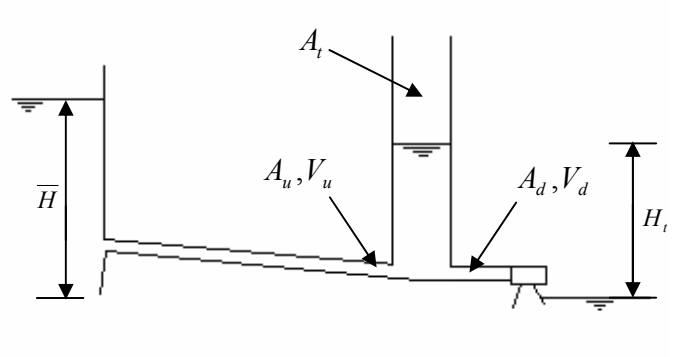


شکل (۱): منحنی مشخصات در موج ضربه قوچ

حال مطابق شکل (۱) و با توجه به اینکه مقدار سرعت و هد فشار در نقاط 1 و 2 معلوم می باشد، با حل همزمان معادلات (۳) و (۴) می توان مقدار سرعت و هد فشار را در نقطه 3 بدست آورد.

۲- مخزن موج گیر ساده

استفاده از مخازن موج گیر ساده، یکی از روشهای متداول جهت مقابله با اثرات مخرب ضربه قوچ در خطوط انتقال آب می باشد. مخزن موج گیر ساده شامل مخزن روبازی است که در مسیر خط لوله نصب می گردد تا قسمتی از حجم آب درون لوله را در شرایطی که دبی عبوری کاهش می یابد در خود ذخیره نموده و در مرحله ای که فشار منفی درون لوله ایجاد می گردد، حجم آب مورد نیاز جهت از بین بردن اثرات ناشی از فشار منفی را تأمین نماید. شکل (۲) نمای شماتیک مخزن موج گیر ساده را نشان می دهد. در شکل زیر H_t ارتفاع مخزن، A_t سطح مقطع مخزن و $\overline{H}$ ارتفاع آب در داخل مخزن سد می باشد.



شکل (۲): نمای شماتیک مخزن موج گیر ساده

به منظور بررسی جریان در شرایط وجود مخزن موج گیر ساده در طول خط انتقال علاوه بر معادلات مشخصه به دست آمده از معادلات ممنتوم و پیوستگی(معادلات ۵ و ۶)، معادله پیوستگی در محل اتصال مخزن موج گیر به خط لوله(معادله ۷) نیز به عنوان شرط مرزی به معادلات حاکم اضافه می شود [5]:

$$\frac{c_u}{g}\left(V_u - V_2\right) + \left(H - H_2\right) + \frac{f_u}{2gD_u} \cdot \frac{|V_u|V_u + |V_2|V_2}{2} c_u \Delta t = 0 \qquad (۵)\ \text{درامتداد(2-4)}$$

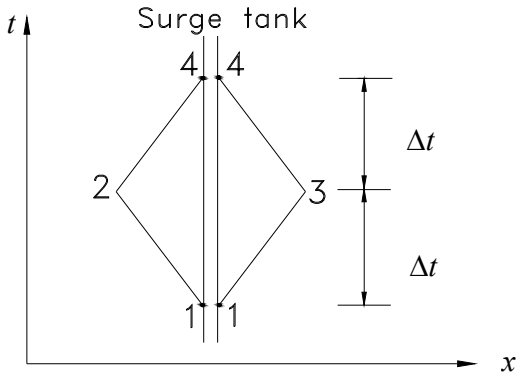
$$\frac{c_d}{g}\left(V_d - V_3\right) + \left(H - H_3\right) + \frac{f_d}{2gD_d} \cdot \frac{|V_d|V_d + |V_3|V_3}{2} c_d \Delta t = 0 \qquad (۶)\ \text{درامتداد(3-4)}$$

$$A_t \frac{dH_t}{dt} = A_u V_u - A_d V_d \qquad (۷)\ \text{معادله پیوستگی در محل مخزن موج گیر}$$

معادله (۷) را می توان به شکل زیر گسسته نمود.

$$A_1\left(H_4 - H_1\right) = \left[\frac{A_u\left(V_u + V_{u1}\right)}{2} - \frac{A_d\left(V_d + V_{d1}\right)}{2}\right] 2\Delta t \qquad (۸)$$

در روابط فوق، اندیس‌های u و d به ترتیب نشان دهنده مقادیر پارامترها در بالادست و پایین دست مخزن موج گیر می‌باشند. با Δt یکسان همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، مقادیر V_u، V_d و H_4 در نقطه 4 را می‌توان با استفاده از مقادیر معلوم در نقاط 1، 2 و 3 و حل همزمان معادلات (۵)، (۶) و (۸) محاسبه نمود.

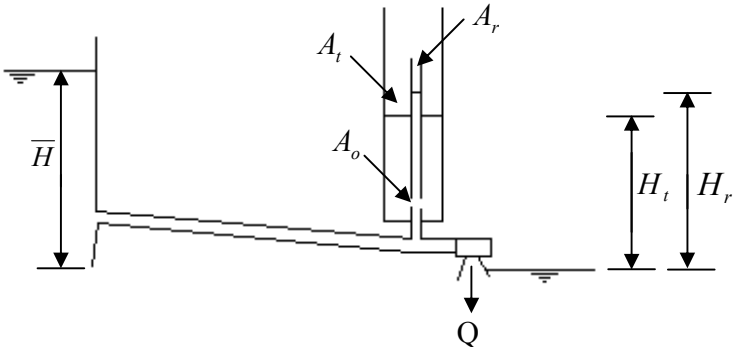


شکل (۳): نحوه مدلسازی شرط مرزی مخزن موج گیر در روش خصوصیات

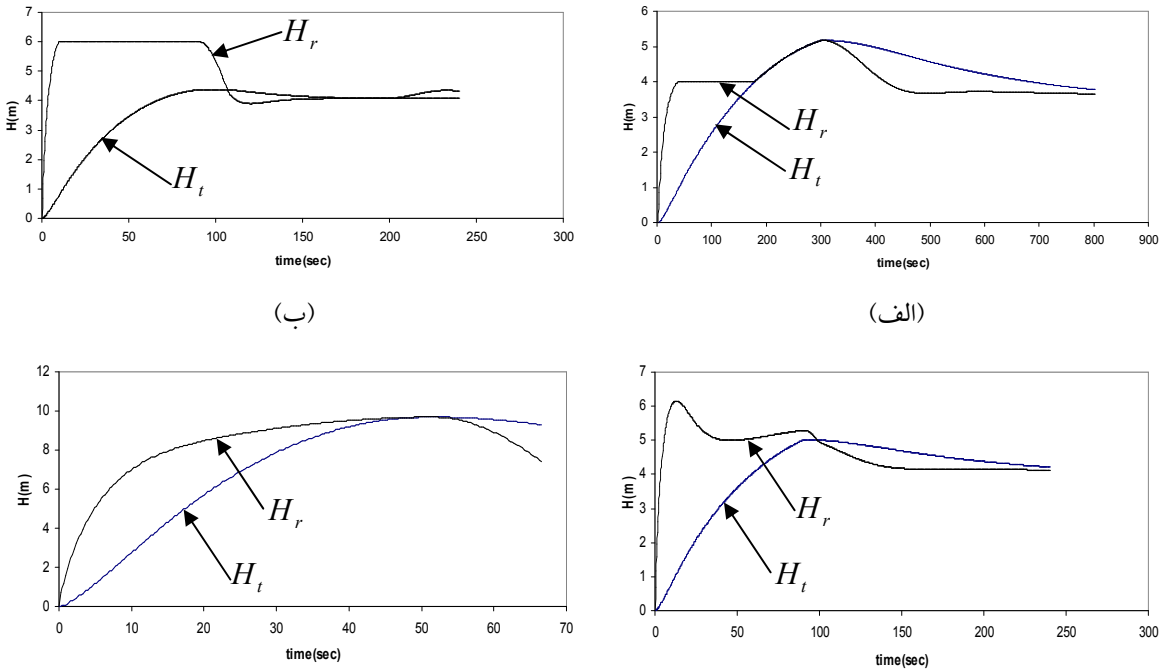
۳- مخزن موج گیر تفاضلی

مخزن موج گیر تفاضلی یکی از انواع مخازن موج گیر می باشد. در این نوع مخزن، به منظور افزایش و یا کاهش هد، یک اریفیس در محل اتصال مخزن موج گیر با لوله جریان تعبیه شده است. بطوریکه در طی افزایش و یا کاهش دبی جریان، فشار بیشتری درون لوله پشت اریفیس ایجاد و موجب تسریع در نرخ کاهش و یا کاهش جریان درون لوله می گردد. درون این مخزن رایزر وجود دارد. هنگامی که دبی درون مجرا تغییر می کند، سطح آب درون رایزر به سرعت پاسخ می دهد تا بر حسب مورد موجب افزایش یا کاهش هد گردد. شکل (۵) نمای شماتیک مخزن موج گیر تفاضلی را بصورت شماتیک نشان می دهد. در شکل (۴) H_t ارتفاع مخزن اصلی، H_r ارتفاع مخزن رایزر، A_t سطح مقطع مخزن اصلی، A_r سطح مقطع مخزن رایزر، A_o سطح مقطع روزنه، Q دبی خروجی از توربین و $\overline{H}$ ارتفاع آب در داخل مخزن سد می باشد.

چهار حالت متفاوت در وضعیت جریان درمخازن موج گیر تفاضلی قابل پیش بینی می باشد. در شکل ۵(الف) ، ارتفاع آب در داخل رایزر سریعتر از ارتفاع آب در مخزن اصلی افزایش یافته و به ارتفاع ثابت رایزر می رسد. سپس به تدریج ارتفاع آب در داخل مخزن اصلی افزایش یافته تا به ارتفاع رایزر برسد. از این لحظه به بعد ارتفاع آب در کل مقطع مخزن افزایش می یابد که در این حالت عملکرد مخزن موج گیر تفاضلی همانند مخزن موج گیر ساده می باشد. در شکل ۵(ب)، ارتفاع آب در داخل رایزر سریعتر از ارتفاع آب در مخزن اصلی افزایش یافته و به ارتفاع ثابت رایزر می رسد. سپس ارتفاع آب در داخل مخزن اصلی افزایش یافته و در ارتفاعی کمتر از ارتفاع رایزر متوقف و سپس کاهش می یابد. همزمان ارتفاع آب در داخل رایزر نیز به سرعت کاهش یافته تا پس از مدتی، ارتفاع آب در داخل مخزن اصلی و رایزر برابر شود. در شکل ۵(ج)، ارتفاع آب در داخل رایزر سریعتر از ارتفاع آب در مخزن اصلی افزایش یافته اما قبل از رسیدن به تراز بالای رایزر، روند افزایش ارتفاع آب در داخل رایزر متوقف و شروع به کاهش می کند. همزمان ارتفاع آب در داخل مخزن اصلی با آهنگ کندتری افزایش یافته تا پس از مدتی ارتفاع در داخل مخزن اصلی و رایزر برابر شود. در شکل ۵(د) همانند حالت سوم می باشد با این تفاوت که حداکثر ارتفاع آب در داخل رایزر و مخزن اصلی برابر است. لازم به ذکر است، تراز سطح آب در داخل مخزن موج گیر و قبل از ایجاد ضربه قوچ له عنوان مبنای ارتفاع در نظر گرفته شده است.



شکل (٤): نمای شماتیک مخزن موج گیر تفاضلی



شکل (٥): منحنی تغییرات ارتفاع آب در داخل رایزر و مخزن اصلی در حالتهای مختلف

معادلات کنترل در مخزن موج گیر تفاضلی عبارتند از:

(۹) معادله پیوستگی

$$AV = A_t \frac{dH_t}{dt} + A_r \frac{dH_r}{dt} + Q$$

(۱۰) معادله ممنتم

$$\overline{H} - H_r = cV|V| + \frac{L}{g}\frac{dV}{dt}$$

(۱۱) معادله ارتباط بین رایزر و تانک

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

در روابط فوق A سطح مقطع لوله آب بر، V سرعت جریان درون لوله، L طول لوله آب بر، C ضریب تخلیه روزنه و g شتاب ثقل می باشد.

۴- طرح مسئله

در مسئله مورد بررسی(مطابق اشکال۲و۴) ، به منظور بهره برداری از آب ذخیره شده در یک سد مخزنی به ارتفاع $\overline{H} = 173.62\,m$ ، خط انتقالی با سطح مقطع $A = 19\ m^2$ و طول $L = 1220\,m$ اجرا می گردد. مقادیر اولیه مخزن موج گیر تفاضلی شامل سطح مقطع رایزر $A_r = 40\,m^2$ ، سطح مقطع روزنه $A_o = 4.0\,m^2$ و ارتفاع رایزر $H_r = 8\,m$ بوده و تغییر دبی(نسبت دبی ثانویه به دبی اولیه) توسط پارامتر $ratio$ معرفی می گردد. لازم به ذکر است در تمامی موارد، مجموع سطح مقطع رایزر و مخزن اصلی در مخزن موج گیر تفاضلی برابر با سطح مقطع مخزن موج گیر ساده برابر در نظر گرفته شده است.

۴-۱- طراحی مخزن موج گیر تفاضلی

هدف از طراحی مخازن موج گیر تفاضلی، انتخاب بهترین گزینه برای قسمتهای مختلف مخزن موج گیر می باشد. پارامترهای اصلی در طراحی مخزن موج گیر تفاضلی شامل سطح مقطع مخزن اصلی، ارتفاع مخزن اصلی ، سطح مقطع رایزر، ارتفاع رایزر و سطح مقطع روزنه می باشد بطوریکه هر یک، شرایط مختلفی را برای مخزن موج گیر تعریف می کند و می توان از میان گزینه های مختلف گزینه برتر را انتخاب نمود.

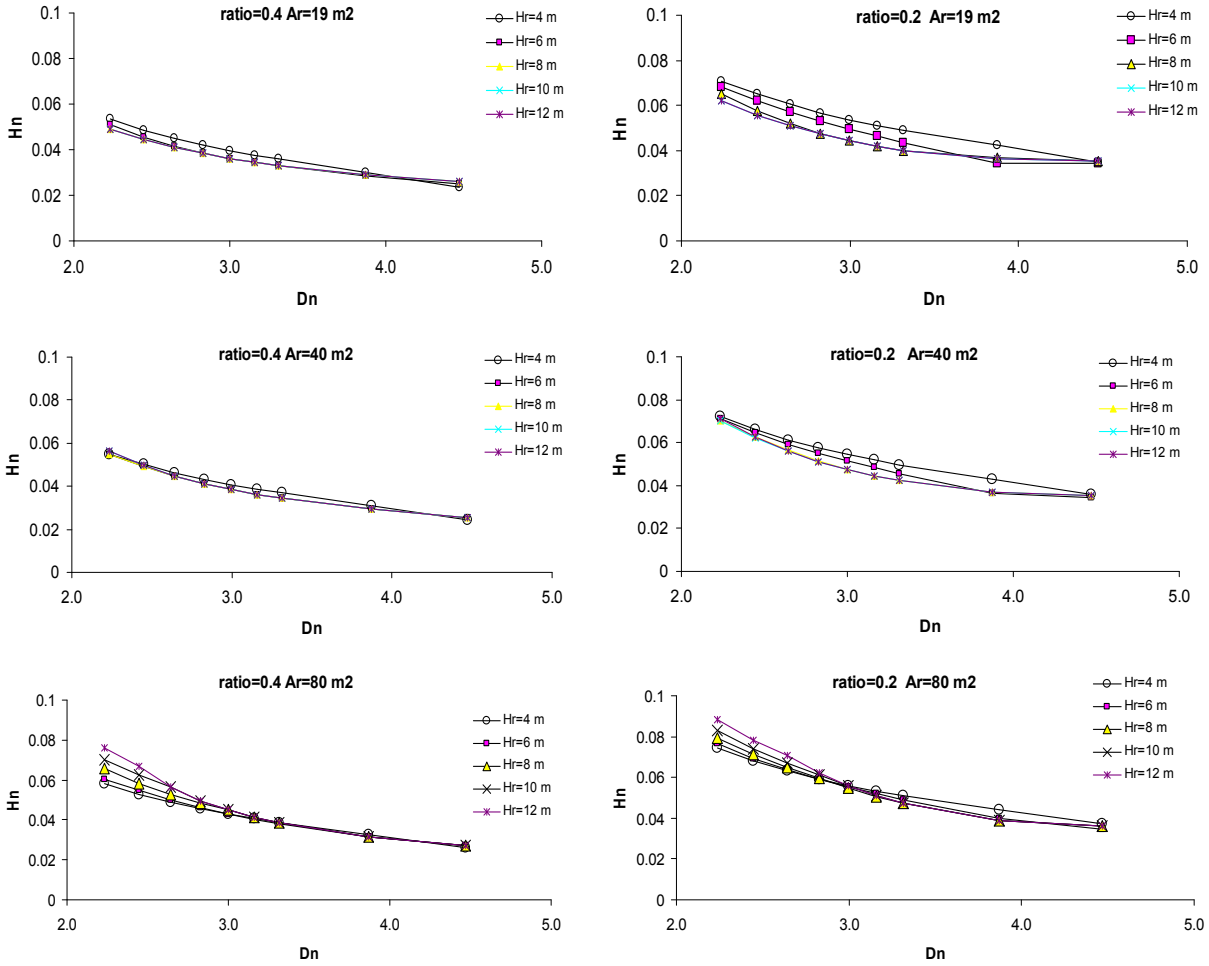
۴-۱-۱- رایزر

انتخاب سطح مقطع و ارتفاع مناسب برای رایزر، یکی از مراحل اصلی در طراحی مخازن موج گیر تفاضلی می باشد. زیرا با تغییر هر یک از پارامترهای فوق، مخزن موج گیر تفاضلی مطابق هر یک از چهار حالت نشان داده شده در شکل(۵) عمل نموده و رفتار متفاوتی از خود نشان می دهد. در این تحقیق، با انتخاب مقادیر مختلف ارتفاع رایزر، سطح مقطع رایزر و قطر مخزن اصلی، تغییرات پارامتر معیار محاسبه و در اشکال(۶) و (۷) نشان داده شده است. لازم به ذکر است ارتفاع نهایی مخرن موج گیر، ماکزیمم ارتفاع رایزر و مخزن اصلی بوده و نیز پارامترهای بی بعد زیر جهت معرفی محورهای مختصات مورد استفاده قرار می گیرد:

$$D_n = \frac{D_r}{D_P} \qquad H_n = \frac{\max(H_r, H_t)}{\overline{H}}$$

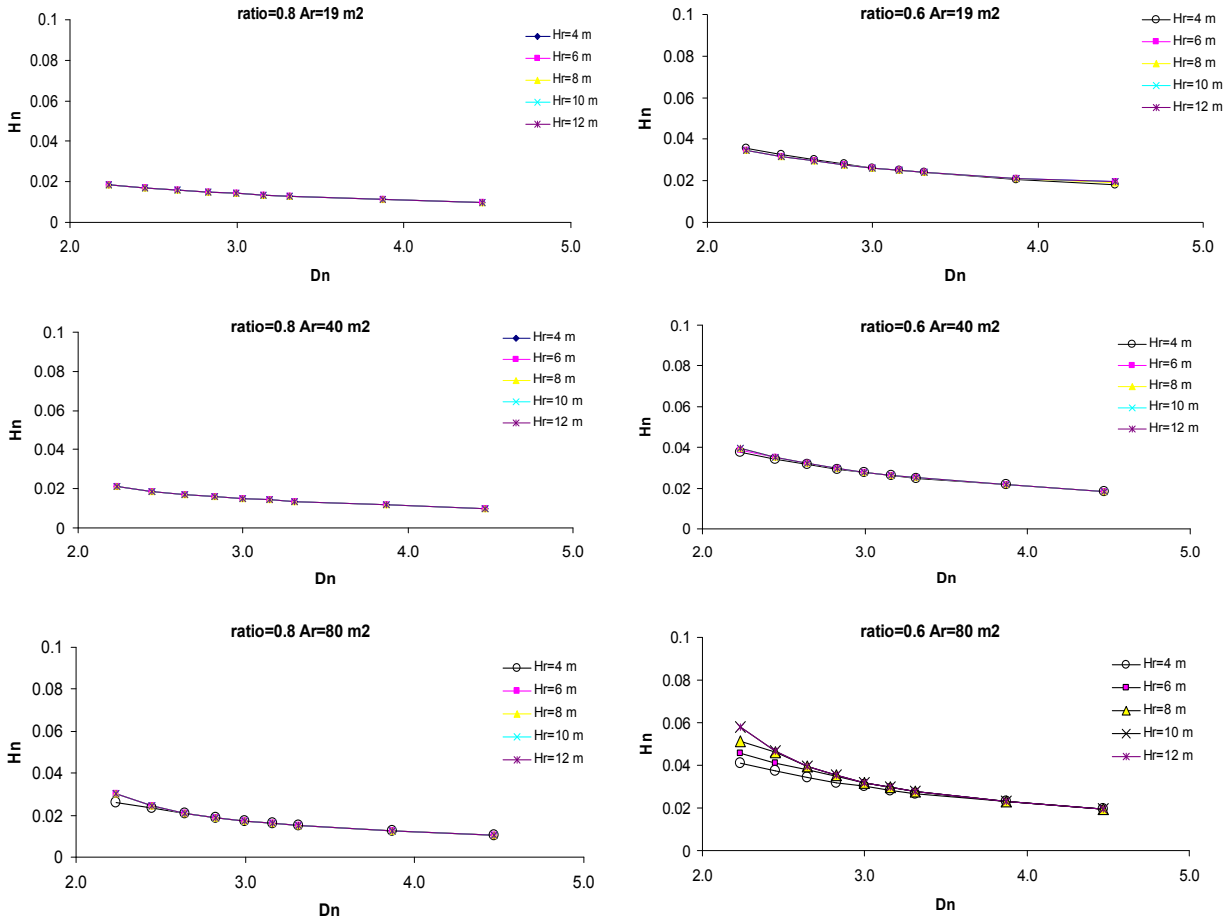
در این روابط، D_r قطر رایزر، D_P قطر لوله آب بر سد، H_r ارتفاع رایزر، H_t ارتفاع مخزن اصلی و $\overline{H}$ ارتفاع ذخیره آب در مخزن سد می باشد. ا بررسی اشکال (۶) و (۷) می توان گفت، در حالت $A_r = 19m^2$ ، $ratio = 0.2$ و نیز با افزایش ارتفاع رایزر، عملکرد مخزن به تدریج از حالت (الف) به حالت (ب)،(ج) و (د) تغییر نموده و این تغییر رفتار باعث کاهش ارتفاع نهایی مخزن موج گیر می گردد.

از طرفی، با افزایش سطح مقطع رایزر و نیز با کاهش ارتفاع رایزر، ارتفاع نهایی مخزن موج گیر به تدریج کاهش می یابد. به عنوان مثال در شرایط $A_r = 80m^2$ و قطر مخزن $D \le 15m$ ، پارامتر مبنا به ازاء $H_r = 4m$ کمترین مقدار را دارا می باشد. بنابراین، در مجموع دو گزینه: ۱- رایزر با سطح مقطع کوچک و ارتفاع بلند در صورتیکه رفتار جریان مطابق حالات (ب) و (ج) باشد و ۲- رایزر با سطح مقطع بزرگ و ارتفاع کم بطوریکه رفتار جریان مطابق حالت (الف) باشد، به عنوان دو گزینه برتر پیشنهاد گردید.



(الف) به ازاء نسبت تغییر دبی $ratio = 0.2$ (الف) به ازاء نسبت تغییر دبی $ratio = 0.4$

شکل (٦): ادامه منحنی تغییرات پارامتر معیار به ازاء مقادیر مختلف ارتفاع رایزر، سطح مقطع رایزر و در شرایط مختلف



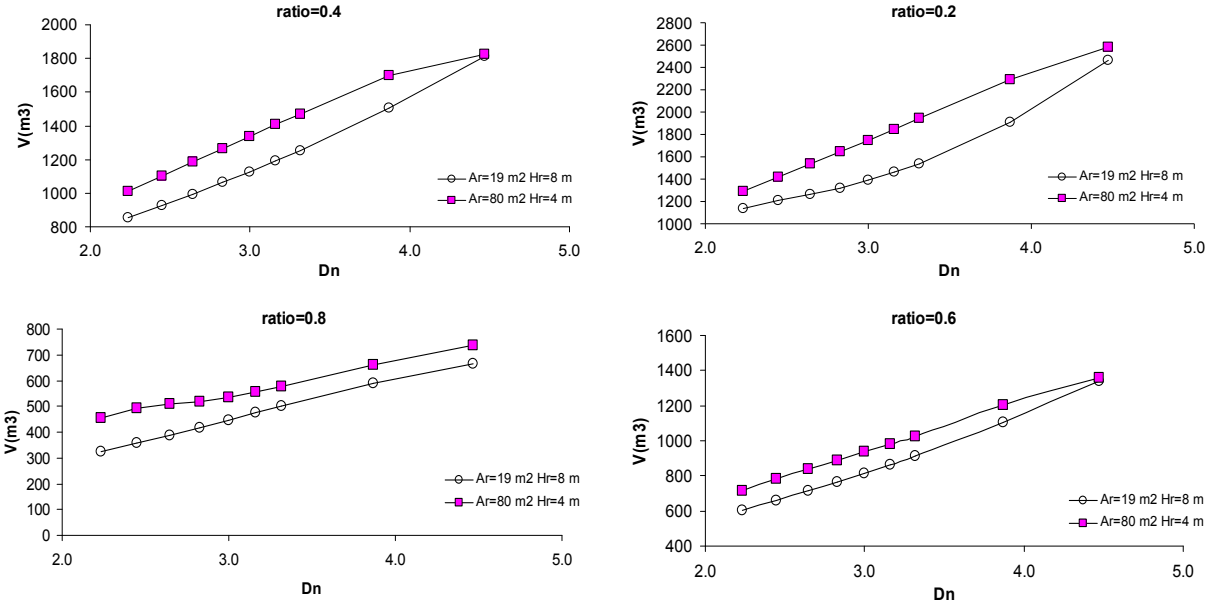
(الف) به ازاء نسبت تغییر دبی $ratio = 0.6$ (الف) به ازاء نسبت تغییر دبی $ratio = 0.8$

شکل (۷): منحنی تغییرات پارامتر معیار به ازاء مقادیر مختلف ارتفاع رایزر، سطح مقطع رایزر و در شرایط مختلف

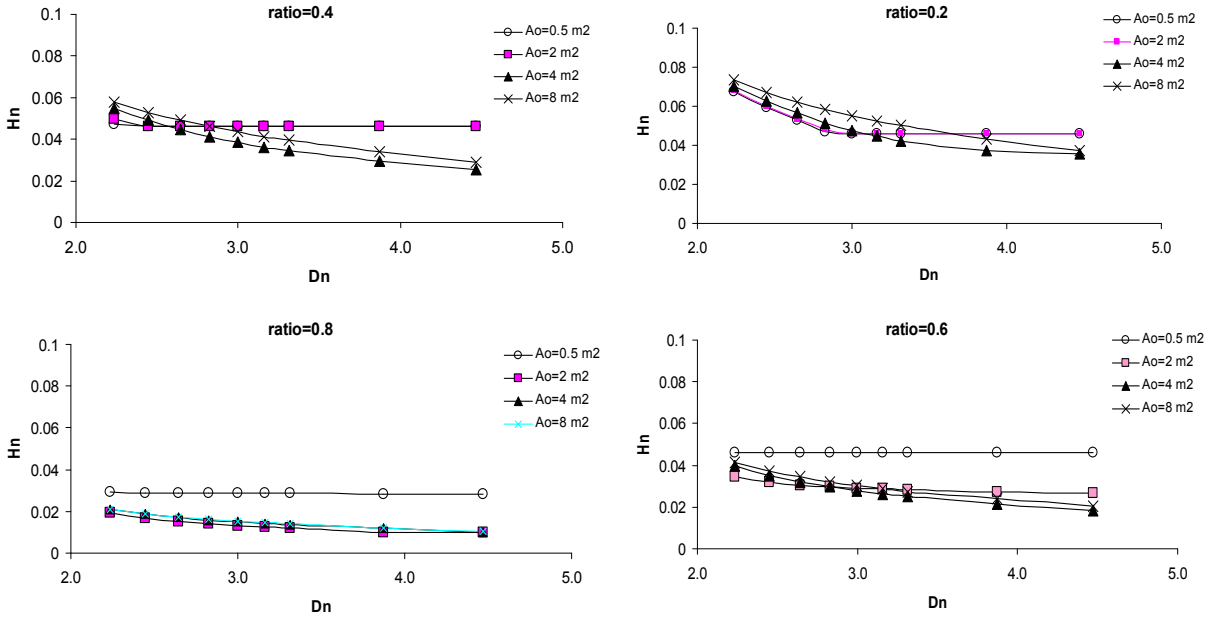
در این مرحله، به منظور مقایسه دو گزینه پیشنهادی، معیار حجم مخزن معرفی و مطابق شکل (۸) محاسبه و با یکدیگر مقایسه گردید. مطابق نتایج به دست آمده همواره حجم مخزن موج گیر در شرایط استفاده از رایزر با سطح مقطع کوچک و ارتفاع بلند(گزینه ۱) نسبت به گزینه دوم کمتر بوده و لذا گزینه ۱ به عنوان گزینه نهایی پیشنهاد گردید.

۴-۱-۲- روزنه

به منظور بررسی تأثیر سطح مقطع روزنه بر روی ارتفاع نهایی مخزن موج گیر ، با استفاده از مقادیر مختلف سطح مقطع روزنه (A_o) و به ازاء مقادیر ثابت $A_r = 19m^2$ و $H_r = 8m$ ، طراحی مخزن موج گیر انجام گردید که نتیجه محاسبات در شکل (۹) نشان داده شده است. با بررسی نتایج به دست آمده و مقایسه ارتفاع نهایی مخزن موج گیر در حالتهای مختلف، در نهایت سطح مقطع روزنه معادل $A_o = 4\,m^2$ انتخاب گردید. بدیهی است در مسائل مختلف نیز می توان به صورت مشابه سطح مقطع بهینه روزنه را تعیین نمود.



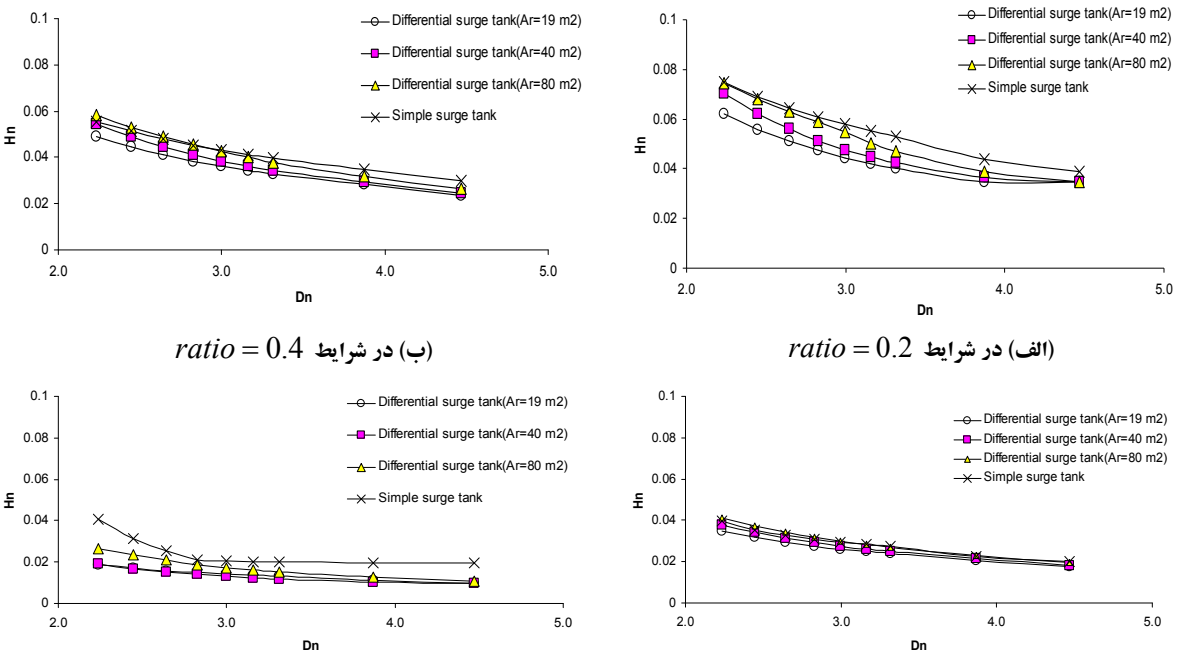
شکل (۸): مقایسه گزینه های مختلف رایزر در شرایط مختلف تغییر دبی



شکل (۹): منحنی تغییرات پارامتر معیار به ازاء مقادیر مختلف سطح مقطع روزنه و در شرایط مختلف

۴-۲- مقایسه مخزن موج گیر تفاضلی و ساده

در این مرحله، به منظور مقایسه رفتار مخزن موج گیر ساده و تفاضلی، ارتفاع نهایی مخزن موج گیر برای دو گزینه محاسبه و در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در نهایت می توان گفت ارتفاع نهایی مخزن موج گیر تفاضلی همواره نسبت به مخزن موج گیر ساده کمتر بوده و با کاهش میزان دبی(کاهش پارامتر $ratio$) ، میزان کاهش ارتفاع نهایی مخزن موج گیر تفاضلی نیز افزایش می یابد.



(الف) در شرایط $ratio = 0.2$ (ب) در شرایط $ratio = 0.4$

(ج) در شرایط $ratio = 0.6$ (د) در شرایط $ratio = 0.8$

شکل (۱۰): مقایسه مخزن موج گیر ساده و تفاضلی

۴-۳- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، تأثیر پارامترهای اصلی در طراحی مخازن موج گیر تفاضلی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت دو گزینه مخزن موج گیر تفاضلی و ساده با یکدیگر مقایسه گردید که نتایج کلی حاصل از آنها را می توان به شرح زیر ارائه نمود:

۱- در مجموع، طراحی مخزن موج گیر تفاضلی در شرایطی که رفتار مخزن موج گیر مطابق یکی از دو حالت نشان داده شده در شکل ۵(ب) و ۵(ج) باشد، باعث کاهش ارتفاع نهایی مخزن موج می گردد. البته با افزایش سطح مقطع رایزر می توان شرایطی را تعریف نمود که عملکرد بهینه مخزن موج گیر مطابق شمل ۵(الف) بوجود آید. به عنوان مثال در شرایط $ratio = 0.2$ $A_r = 80m^2$ و به ازاء $D \le 15.1m$ به ازاء $H_r = 4m$ ارتفاع نهایی مخزن موج گیر کمتر از سایر حالات بوده و رفتار مخزن نیز در این حالت مطابق شکل ۵(الف) می باشد.

۲- به منظور انتخاب یکی از دو گزینه: ۱- رایزر با سطح مقطع کم و ارتفاع زیاد و ۲- رایزر با سطح مقطع زیاد و ارتفاع کم، معیار حجم مخزن جهت مقایسه دو گزینه انتخاب و پس از مقایسه نتایج، در نهایت گزینه ۱ (رایزر با سطح مقطع کم و ارتفاع زیاد)، به عنوان گزینه نهایی انتخاب گردید.

۳- همواره در طراحی مخازن موج گیر تفاضلی می توان مقدار بهینه ای جهت سطح مقطع روزنه تعیین نمود تا ارتفاع نهایی مخزن موج گیر به حداقل مقدار ممکن کاهش یابد. در مسئله مورد بررسی، سطح مقطع مناسب برای روزنه معادل $A_o = 4m^2$ پیشنهاد گردید.

۴- عملکرد مخزن موح گیر تفاضلی مطابق شکل ۵(ب) را در مجموع می توان به عنوان مناسب ترین شرایط برای مخازن موج گیر تفاضلی پیشنهاد نمود.

۵- در نهایت، دو گزینه مخزن موج گیر ساده و تفاضلی با یکدیگر مقایسه و ملاحظه گردید ارتفاع نهایی مخزن موج گیر تفاضلی نسبت به مخزن موج گیر ساده کمتر بوده و با کاهش میزان دبی(کاهش پارامتر *ratio*) ، این اختلاف افزایش می یابد.

۴-۴- مراجع

[1] Fox, J. A.,(1983), "Transient Flow in Pipes, Open Channels and Sewers", John Wiley & Sons, New York.

[2] Watters, G. Z.,(1979), "Modern Analysis and Control of Unsteady Flow in Pipeline", Ann Arbor, Science, Michigan.

[۳] ساقی،حسن و فغفور مغربی محمود،(1387)," کنترل موج فشار جریان گذرا در خطوط انتقال آب توسط مخازن موج گیر ساده"،دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاههای برق آبی.

[4] Thorley, A. R. D.; Enever, K. J, (1979), "Control and Suppression of Pressure Surge in Pipelines and Tunnels", CIRIA Report 84,, London.

[5] Li, W. H., (1983), "Fluid Mechanics in Water Resources Engineering", Allyn and Bacon, Massachusetts.

[6] Gabutti, B., (1983), "On two Upwind Finite-Difference Schemes for Hyperbolic Equations in Non-Conservation Form", Computer and Fluids, Vol. 11(3), pp. 207-230.

[7] Swaffield, J. A.; Boldy, A. P., (1994), "Pressure Surge in Pipe and Duct Systems", Avebury Technical, Aldershot.

[8] Larock, B. E.; Jeppson, R. W.; Watters, G. Z, "Hydraulics of Pipeline Systems", CRC Press, Boca ration, Florida.