

بررسی عددی پدیده ضربه آبی ناشی از خاموشی ناگهانی سیستم پمپاژ در خطوط انتقال آب به کمک روش مشخصه

سعید باغدار حسینی^۱، علیرضا اتحادی نیا^۲، زهرا اسدی کپورچالی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی

۲- سرپرست بخش مکانیک، شرکت مهندسی مشاور طوس آب

۳- معاونت مطالعات و طراحی، شرکت مهندسی مشاور طوس آب

آدرس رایانامه نویسنده رابط s_baghdar@sbu.ac.ir

خلاصه

هر پدیده ضربه آبی در خطوط انتقال مایعات مانند آب یا نفت در اثر تغییر سرعت جریان سیال ایجاد می شود. با وقوع این پدیده، فشارهای مثبت و منفی و جدایش ستونی در طول خط بوجود آمده که اگر در حد تحمل لوله و تاسیسات نصب شده نباشد؛ منجر به ترکیدگی لوله، شکسته شدن شیرها و پمپ ها می گردد. لذا ضرورت استفاده از تجهیزات ضربه گیر اجتناب ناپذیر است. در این پژوهش ضربه آبی ناشی از خاموشی ناگهانی سیستم پمپاژ یک خط انتقال آب به طول ۶۷ کیلومتر که از فراز و نشیب های متنوعی می گذرد؛ توسط یک کد عددی باز به زبان فرترن و یک نرم افزار HAMMER استاندارد، شبیه سازی شده و تجهیزات مناسب ضربه گیر بمنظور کاهش و یا حذف اثرات مخرب ضربه تعبیه شده است. نتایج حاصل از دو روش مختلف تحلیل با هم مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که در صورت وقوع ضربه فشار خط انتقال تا $450\text{m H}_2\text{O}$ افزایش می یابد که با نصب مخازن هوای فشرده در ابتدای خط انتقال این مقدار به کمتر از $400\text{m H}_2\text{O}$ کاهش می یابد. علاوه بر این با نصب مخازن اتمسفریک در نقاط کم فشار، خلاء نسبی حذف شده و مناطق وقوع فشارهای منفی تا حد چشمگیری کاهش یافته است. نتایج حاصل از دو روش در توافق با هم می باشند.

کلمات کلیدی: تجهیزات ضربه گیر، ضربه آبی، روش مشخصه، کد عددی.

۱. مقدمه

این پدیده ضربه آبی یا ضربه قوچ عمدتاً در خطوط انتقال آب، نفت یا شبکه های توزیع و همچنین در لوله های آب بر منتهی به توربین های آبی که آب تحت فشار جریان دارد در اثر تغییر سرعت جریان آب ایجاد می شود. این پدیده با ایجاد موج های سریع و زودگذر و میرا موجب خطرات گوناگونی نظیر ترکیدگی لوله، شکسته شدن شیرها، درجه های کنترل و پمپ ها می شود. تغییر سرعت ممکن است به دلیل قطع ناگهانی کار پمپ (یا مثلاً بسته شدن یک شیر اتفاق بیافتد)، در این صورت یک موج فشاری از طرف پمپ به انتهای خط لوله با سرعتی معادل سرعت موج در خط لوله به حرکت در می آید و پس از رسیدن به انتهای مسیر، با فشار اولیه سامانه منعکس می شود تا به شیر یک طرفه که پس از پمپ قرار دارد، برسد و پس از برخورد با شیر یک طرفه به صورت موج فشار مثبت دو باره منعکس می شود. این چرخه تکراری آنقدر تکرار می شود تا بالاخره انرژی حامل توسط اصطکاک خط لوله و سایر عوامل کاهنده، مستهلک شده و نهایتاً به سکون برسد. طول مدت زمان وقوع ضربه آبی یکی از پارامترهای مهم در تحلیل آن و انتخاب تجهیزات مناسب می باشد. تغییر سرعت آب در واحد زمان، مشخصات هندسی و خواص فیزیکی جنس لوله در تعیین مقدار و شدت موج فشاری موثر هستند. در اثر اتفاق افتادن ضربه قوچ و رفتار الاستیک لوله و آب، یک موج فشاری طول لوله را طی می کند. در برخی نقاط لوله فشار افزایش و در برخی نقاط دیگر فشار کاهش می یابد. لذا لازم است پیش بینی های لازم صورت گیرد تا مقدار فشار در خط لوله در هیچ کجا از حد تحمل لوله تجاوز نکند. علاوه بر این کاهش فشار، به زیر فشار اتمسفریک در یک نقطه می تواند به فرآیند کاویتاسیون (جدایش ستونی) کمک کرده و تبعات ناشی از رفتار جریان دوفازی در لوله ها را به همراه داشته باشد. ضمن اینکه با کاهش فشار آب در خط انتقال، خاک، لجن و هوا می توانند از

نقاط نشستی لوله به داخل آن نفوذ پیدا کند. بمنظور کاهش اثرات مخرب این پدیده لازم است فشار خط انتقال به کمک تجهیزات ضربه گیر به مقدار قابل قبولی کاهش یابد، لذا تحلیل ضربه آبی در دو حالت بدون تجهیزات و با تجهیزات متنوع برای دست یابی به مناسب ترین سیستم کنترل ضربه ضرورت می یابد. مطالعات در این زمینه به صورت تجربی و حل عددی صورت گرفته است [۱۰-۱].
در این مقاله پدیده ضربه آبی در یک خط انتقال آب به طول ۶۷ کیلومتر به صورت عددی با استفاده از کد نویسی به زبان فرترن و همچنین به کمک نرم افزار استاندارد HAMMER، در دو حالت استفاده از تجهیزات ضربه گیر و عدم استفاده از این تجهیزات مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل از دروش با هم مقایسه گردیده است.

۲. معرفی بسته تحلیل عددی Hammer

بسته تحلیل عددی Water HAMMER یک برنامه کامپیوتری است که الگوریتم ها و معادلات جریانات ناپایدار در سیالات مختلف را حل می کند. این نرم افزار تحت سیستم عامل Windows بوده و از تمامی قابلیت های تحت پوشش این سیستم عامل استفاده می نماید. از ویژگی های این نرم افزار قابلیت دریافت فایل های سایر نرم افزارها از جمله Epanet، Water CAD، و Water Gems می باشد. این نرم افزار ضمن محاسبه فشار بخار سیال، جریان سیال را به صورت پایدار و کاملاً مغشوش می تواند مدل کند. مدل سازی پمپ ها و الکتروموتورها با سرعت ثابت و متغیر فراهم بوده و انواع مختلف شیرهای موجود در خط انتقال از قبیل شیرهای قطع جریان، شیرهای یکطرفه، شیرهای تنظیم کننده فشار شامل شیرهای آزادکننده فشار شیرهای نگهدارنده فشار، شیرهای شکننده فشار و شیرهای کنترل کننده دبی را می توان مدل سازی نمود.

۳. روش حل عددی

برای محاسبه حداکثر تغییرات فشار ناشی از تغییرات ناگهانی سرعت و وقوع ضربه آبی چندین رابطه ارائه گردیده است که رابطه ارائه شده توسط ژوکوفسکی بیشترین کاربرد را دارد. طبق این رابطه حداکثر تغییر فشار ناشی از ضربه آبی (ΔH) تابعی از سرعت موج (a)، تغییرات سرعت (ΔV) و شتاب جاذبه (g) می باشد. سرعت انتشار موج در لوله های مختلف متفاوت بوده و تابعی از مشخصات فیزیکی لوله و سیال می باشد. سرعت موج با توجه به اصل پیوستگی مطابق ذیل بدست می آید که در آن ρ چگالی سیال، K مدول الاستیسیته حجمی سیال، E مدول الاستیسیته یا ضریب ارتجاعی لوله، D قطر داخلی لوله و t_w ضخامت جداره لوله می باشد.

$$\Delta H = \frac{a \times \Delta V}{g} \quad (1)$$

$$a = \sqrt{\frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1}{k} + \frac{D}{t_w E}}} \quad (2)$$

برای حل معادلات پیوستگی و مومنوم از روش مشخصه (Method of Characteristic) استفاده می شود، با توجه به اینکه در برقراری هر جریان باید معادلات دینامیک سیالات یعنی پیوستگی و مومنوم برقرار باقی بمانند و در خطوط انتقال آب نسبت طول لوله به قطر آن بسیار زیاد می باشد، فرآیند تغییرات در لوله ها یک بعدی و در امتداد طول آن در نظر گرفته می شود. معادله یک بعدی مومنوم و معادله پیوستگی بصورت تفاضلی به شکل زیر نوشته می شوند:

$$pA - \left[pA + \frac{\partial(pA)}{\partial x} \delta x \right] + p \frac{\partial A}{\partial x} \delta x - \gamma A \delta x \sin \theta - \tau \cdot \pi \cdot D \delta x = \rho A \delta x \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

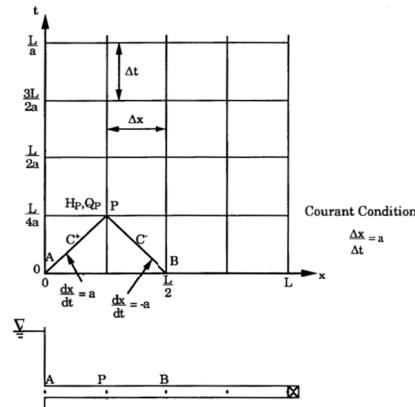
$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho AV) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho A \delta x) = 0 \quad (4)$$

در روش مشخصه معادلات ۳ و ۴ پس از ساده سازی های لازم بصورت دو معادله خطی زیر نوشته می شوند:

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0$$

$$L_2 = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$
(5)

در روابط فوق فشار استاتیکی و V سرعت در هر نقطه از خط انتقال می باشد. همچنین هر دو معادله تابع زمان هستند. در هر نقطه که دو خط مشخصه یکدیگر را قطع کنند یک پاسخ از مسئله بدست می آید، به عبارت دیگر هر نقطه که پاسخ مسئله باشد (مثل مرزها و شرایط مرزی) محل تلاقی دو خط مشخصه محسوب می شود. اگر حل حالت پایدار مسئله را در طول لوله داشته باشیم، یعنی در هر نقطه از لوله مقادیر P و V معلوم باشند، از هر نقطه لوله می توان دو خط مشخصه رسم کرد. در هر کجای دیگر که دو خط مشخصه یکدیگر را قطع کنند، حل جدید در آن نقطه بدست آمده است. شکل ۱ روش استفاده از خطوط مشخصه در حل طولی خط لوله و در گره های تعیین شده در طول لوله را بدست می دهد. در این شکل محور X امتداد لوله و نقاط pi گره هائی است که در طول محاسبات مقادیر سرعت و فشار در آنها محاسبه می شوند.



شکل ۱- شیوه استفاده از خطوط مشخصه برای یافتن تغییرات سرعت و فشار در طول لوله

در آغاز محاسبات، فرض می شود که در لوله جریان دائمی برقرار است. یعنی در هر گره تعیین شده مقادیر سرعت و فشار معلوم هستند. لذا هر گره محل تلاقی دو خط مشخصه محسوب می شوند. از هر گره می توان دو خط مشخصه یکی با شیب a/g و دیگری با شیب $-a/g$ رسم نمود که محل تلاقی این دو خط مشخصه با سایر خطوط، یک حل برای زمان $t+1$ برای گره های مشخص شده روی خط لوله، یعنی pi می باشند. اثر هر تغییر در هر گره از طریق این تلاقی ها در طول لوله منتشر می شود. برای اینکه معادلات تفاضلی (۵) برای خط لوله حل شوند، باید طول مسیر به فواصل مساوی تقسیم گردد، بطوریکه موج حاصل در لوله ها در هر فاصله زمانی فقط فاصله دو گره متوالی را طی کند و فقط از یک گره به گره بعدی رسیده باشد. گام زمانی برای محاسبات مطابق رابطه زیر محاسبه می شود که در این رابطه C سرعت صوت در لوله، l فاصله بین دو گره متوالی در روی لوله ها از یکدیگر و بالاخره Δt گام زمانی است که باید در تمام لوله ثابت فرض شود. در تحلیل عددی حاضر هر گام زمانی برابر 0.01906 ثانیه بدست آمده است.

$$\Delta t = l/c$$
(6)

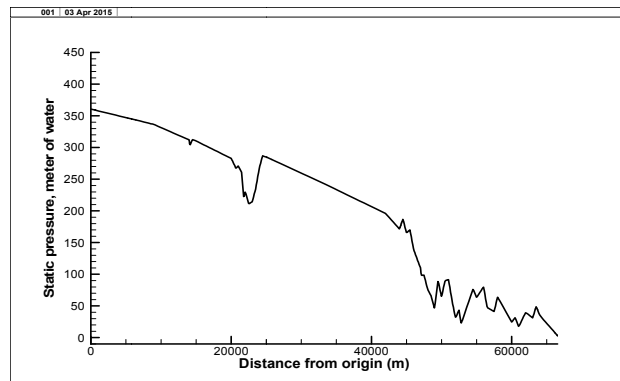
۴. مشخصات هیدرولیکی خط انتقال

خط انتقال آب از رقوم ارتفاعی تراز دریای آزاد، صفر، شروع شده و با طی کردن ۶۷ کیلومتر مسیر پر فراز و نشیب به رقوم ارتفاعی ۲۱۷/۶ نسبت به تراز دریای آزاد می رسد. دمای آب در تحلیل عددی $20^\circ C$ ، مدول الاستیسیته آن $210,000 \text{ m H}_2\text{O}$ و فشار بخار آب برابر $10 \text{ m H}_2\text{O}$ فرض شده است. جنس لوله ها فولادی و مدول یانگ و ضریب هیزن ویلیامز به ترتیب $210,000,000 \text{ m H}_2\text{O}$ و 125 در نظر گرفته شده است. ایستگاه پمپاژ خط انتقال شامل چهار پمپ می باشد که هر کدام دبی $1 \text{ m}^3/\text{s}$ آب را با هد 355 متر پمپاژ می کنند. توان پمپ ها مطابق دیتاشیت سازنده برابر kW 4474 ، دور 1493 RPM و اینرسی آن ها $36/75 \text{ kg.m}^2$ و اینرسی الکتروموتورها برابر 260 kg.m^2 در نظر گرفته شده است. راندمان پمپ ها و

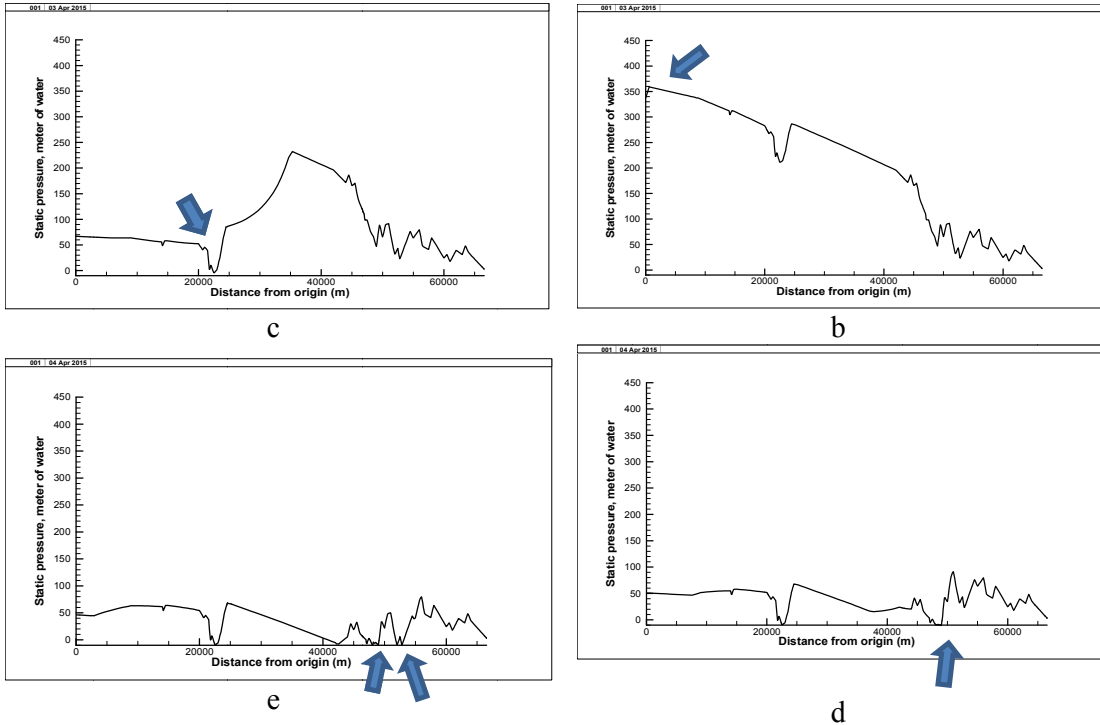
الکتروموتورها بترتیب ۸۷/۵ و ۹۷ درصد لحاظ شده است. ضریب افت اصطکاک (K) مخازن هوای فشرده برابر ۲/۵ و این مقدار برای مخازن اتمسفریک یک مسیره برابر ۳ انتخاب شده است. اثر حوضچه مخزن مکش انتهای مسیر به کمک یک مخزن اتمسفریک به حجم 3 m^3 در تحلیل ضربه آبی در نظر گرفته شده است. زمان تحلیل ضربه برابر ۲۰ رفت و برگشت موج ۲۵۰۰ ثانیه انتخاب شده است. تحلیل ضربه در بدترین حالت یعنی از کار افتادن ناگهانی کل پمپ ها در یک لحظه و بدون هر گونه تأخیر انجام شده است.

۵. نتایج حاصل از تحلیل ضربه آبی

پدیده ضربه آبی در خط انتقال با خاموش شدن ناگهانی پمپ ها و قطع جریان به کمک نرم افزار HAMMER و همچنین نگارش کد عددی فرتن مدل سازی شده است. شکل ۲-a تغییرات فشار روی هر نقطه در طول خط انتقال در حالت کار دائم و شکل ۲-b تا ۲-c، پس از وقوع ضربه آبی در لحظات حساس را نشان می دهد. شکل ۲-b اولین لحظات خاموشی پمپ را نشان می دهد. در شکل ۲-c زمان ۳۹/۲۵۷ ثانیه بعد از خاموش شدن پمپ، در فاصله ۲۲۴۹۴ متر از مبدا فشار منفی ایجاد می شود. طول منطقه فشار منفی در همین لحظه آغازین ۲۰۰ متر از طول لوله است. بررسی جزئیات عددی نشان می دهد حدود ۵۰ متر از این طول در وضعیت کاویتاسیون قرار دارد، یعنی جدایش ستونی اتفاق افتاده است. منطقه فشار منفی در همین نقطه از لوله به سرعت توسعه یافته و طول قسمت تحت تأثیر آن به یک کیلومتر و طول لوله که در آن کاویتاسیون اتفاق می افتد حدود ۲۰۰ متر محاسبه می شود. تمام این مراحل در ۰/۸ ثانیه اتفاق می افتد. در ثانیه ۴۴/۶ پس از خاموش شدن پمپ دومین منطقه فشار منفی در فاصله ۴۴۰۲۸ متری از ایستگاه پمپاژ تولید می شود و تا فاصله ۴۹۰۸۳ متری ادامه می یابد، (۵ کیلومتر). در فواصل ۴۷۲۳۵ و ۴۷۹۸۷ متری نیز کاویتاسیون بطول ۲۰۰ متر و در فاصله ۴۸۶۸۷ متری از ایستگاه پمپاژ کاویتاسیون بطول ۴۰۰ متر لوله را اشغال کرده اند، شکل ۲-d. همچنین در این زمان در فاصله ۵۱۶۸۶ متر و ۵۲۷۶۶ متر به ترتیب به طول ۵۰۰ متر و به طول ۶۰۰ متر فشار منفی و در نقطه ای کاویتاسیون ایجاد می شود. بعدها در فواصل ۶۴۸۱۶ متر، یعنی بسیار نزدیک به انتهای خروجی لوله نیز، شرایط خلاء نسبی با طولی نزدیک به ۷۰۰ متر ظاهر می شود. بمنظور کاهش اثر فشارهای مثبت و منفی از مخازن هوای فشرده در ایستگاه پمپاژ و مخازن اتمسفریک در طول خط انتقال استفاده می شود. در برآورد بهینه حجم هوای فشرده داخل مخزن، حالت های مختلفی در نظر گرفته شدند و تحلیل عددی صورت گرفت. نهایتاً مخزن هوای فشرده با حجم هوای حدود حداقل 3 m^3 در ۱۲۰ bar فشار و ذخیره آبی حداقل 3 m^3 برای نصب انتخاب شد. این حجم می تواند بصورت مخازن کوچکتر که در مجموع 3 m^3 را تامین می کنند، در ایستگاه پمپاژ نصب شوند. انتخاب حجم هوا هنگام کار دائم خط لوله حداقل 3 m^3 و حجم آب حداقل 3 m^3 ، موجب کاهش فشارهای ناشی از ضربه قوچ به زیر ۴۰ بار (۴۰ متر آب ارتفاع) می شود. نقاط کم فشار در خط لوله به صورت جذب کننده امواج پر فشار عمل می کنند و به کاهش آثار ضربه قوچ کمک می کنند. اما اگر فشار به $0/98\text{ bar}$ - کاهش یابد، در اینصورت کاویتاسیون شکل می گیرد و دو سمت کاویتاسیون، ستون های آب از یکدیگر جدا می شوند. چنانچه شرایط جدیدی پیش آید و کاویتاسیون مضمحل شود، در این صورت ستون های آب از طرفین به هم نزدیک شده و با یکدیگر برخورد می کنند. در خطوط با طول زیاد، ممکن است در چند نقطه جدایش ستونی بوجود آید و موج های ناشی از ضربه های قوچ در طول لوله منتشر شوند و در مقطع خاصی ترکیب دامنه های امواج فشاری هم فاز شوند و فشار قدرتمندتری را در آن نقطه بوجود آورند. یعنی فشار ماکزیمم خط در نقطه جدایش ستونی بوجود نمی آید بلکه از ترکیب دامنه های فشاری امواج همفاز در نقطه دیگری ایجاد می شوند که لازم است روند توسعه و حرکت امواج را در نظر بگیریم.

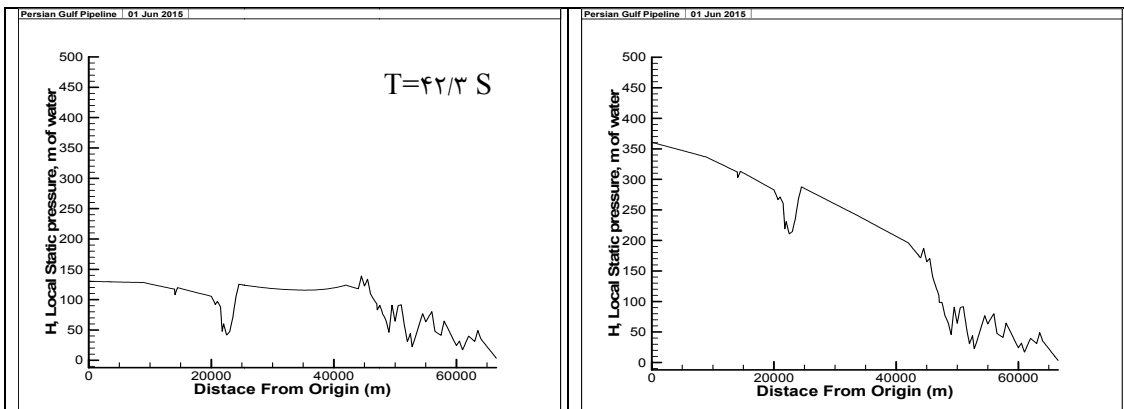


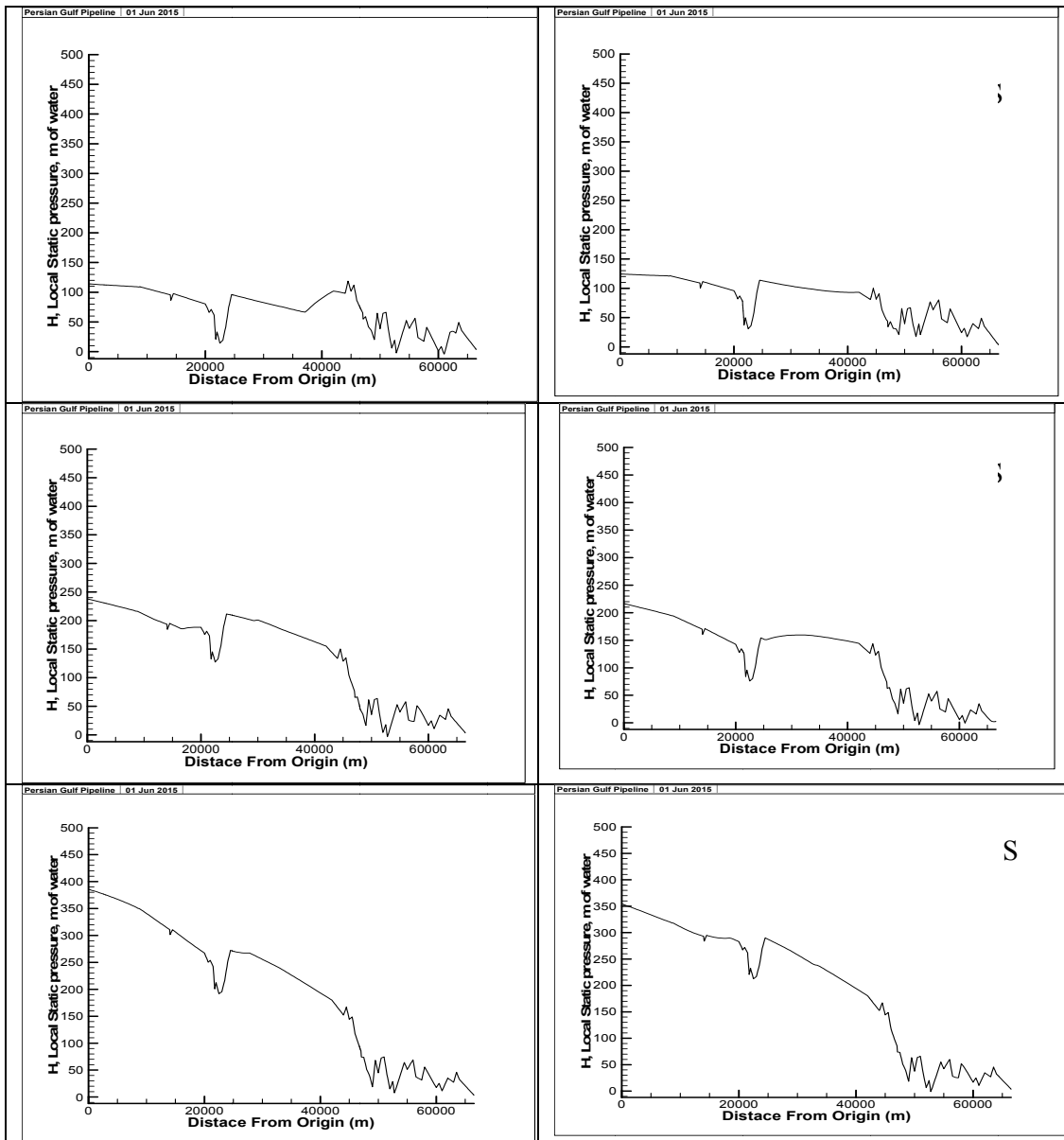
a



شکل ۲- تغییرات فشار در طول خط انتقال در حالت پایدار و هنگام وقوع ضربه آبی

لذا ضروری است که به منظور حذف خلا و فشار های منفی در طول خط انتقال اثر تعبیه مخازن اتمسفریک مورد بررسی قرار گرفته است. ملاحظه می شود که تنها در دو نقطه اثر نصب این تجهیزات قابل توجه می باشند. مخزن اول در فاصله ۴۹/۱ کیلومتری از ایستگاه پمپاژ قرار گرفته و در صورت وقوع ضربه آبی ۱۲۸۰ متر مکعب آب به داخل خط لوله تزریق می کند و مخزن دوم که در فاصله ۶۱ کیلومتری از ایستگاه پمپاژ قرار گرفته حداقل ۸ متر مکعب آب به داخل خط لوله تزریق می کند. مطابق شکل ۳ مشاهده می شود که با نصب این دو مخزن فشار اتمسفریک و همچنین مخزن هوای فشرده با حجم هوای ۱۲۰ متر مکعب، در هیچ نقطه از خط انتقال جدایش ستون آب اتفاق نخواهد افتاد. می توان به وضوح مشاهده کرد که پس از نصب تانک های اتمسفریک آب، در هیچ نقطه ای جدایش ستونی ایجاد نمی شود. در شکل ۴ و ۵ نتایج حاصل از تحلیل آبی به کمک نرم افزار HAMMER برای دو حالت بدون تجهیزات ضربه گیر و با تجهیزات ضربه گیر نشان داده شده است. مشاهده می شود که در صورت خاموش شدن پمپ های ایستگاه پمپاژ و عدم نصب تجهیزات ضربه، فشار مثبت و منفی به ترتیب معادل $450 \text{ m H}_2\text{O}$ و $-10 \text{ m H}_2\text{O}$ می گردد.

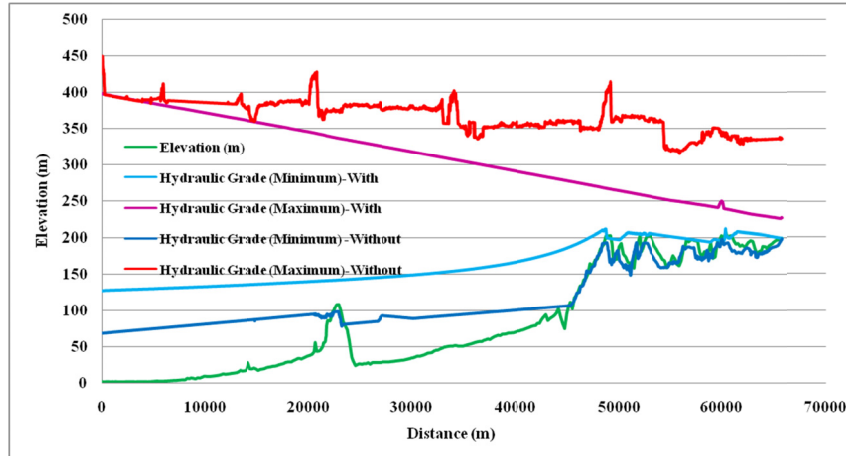




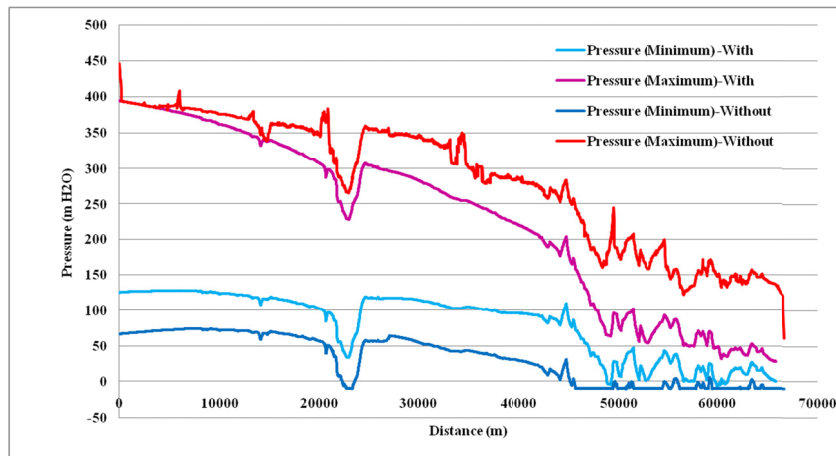
شکل ۳- تجهیزات نصب شده، تانک هوای فشرده و دو مخزن آب فشار اتمسفریک ST-1 و ST-2

موقعیت وقوع فشار مثبت در حالت بدون تجهیزات ضربه بعد از ایستگاه پمپاژ بوده و فشار H_2O m - در حدود ۱۹ کیلومتر از مسیر به وقوع می پیوندد. با توجه به اینکه فشار کاری خط انتقال و شیرآلات برابر ۴۰ bar در نظر گرفته شده است، این مقدار برای ماکزیمم فشار حاصل از ضربه آبی مخرب بوده و لازم است کاهش یابد. علاوه بر این در فشار H_2O m ۱۰- آب به بخار تبدیل شده، کاویتاسیون شکل می گیرد و احتمال وقوع جدایش ستون آب بویژه در خط الرأس های پروفیل خط انتقال افزایش می یابد. تحت این شرایط دو ستون آب در لوله از یکدیگر فاصله گرفته و با از میان رفتن این شرایط ستون های آب به سمت یکدیگر برگشته و برخورد آن ها تولید موج فشار مخربی می کند. در شکل ۴ مشاهده می شود که احتمال وقوع فشار منفی در مناطق مرتفع و خط الرأس ها بیشتر می باشد. علاوه بر این حوضچه مخزن تعادلی انتهای مسیر نیز نقش مؤثری در وقوع فشارهای منفی انتهای خط دارد. در شکل ۵ مشاهده می شود که محل بیشترین فشارها در ابتدای خط و بعد از ایستگاه پمپاژ می باشد، زیرا با وقوع ضربه آبی، اختلاف فشار ستون آب موجود در خط انتقال با برگشت موج ضربه از انتهای مسیر به مقادیر فشار در این نقاط اضافه شده و فشار افزایش می یابد. به منظور

کاهش و یا حذف اثرات ضربه آبی دو مخزن هوای فشرده به حجم 120 m^3 در داخل ایستگاه پمپاژ و دو مخزن اتمسفریک به حجم 1200 m^3 و 50 در طول مسیر و در نقاطی که بیشترین مقدار فشار منفی و همچنین احتمال وقوع جدایش ستون آب وجود دارد، تعبیه گردیده است.



شکل ۴- گرادیان هیدرولیکی در طول خط انتقال



شکل ۵- تغییرات فشار در طول خط انتقال

مشخصات مخازن هوای فشرده و اتمسفریک تعبیه شده در طول خط انتقال در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل ۵ مشاهده می شود که با نصب این تجهیزات فشار مثبت و منفی به ترتیب معادل $395 \text{ m H}_2\text{O}$ و $-6 \text{ m H}_2\text{O}$ گردیده است. محل وقوع فشار ماکزیمم بعد از ایستگاه پمپاژ و محل وقوع فشار منفی در کیلومتر ۶۰ خط انتقال می باشد.

جدول ۱- مشخصات مخازن هوای فشرده

تعداد مخازن	طول (متر)	قطر مخزن (متر)	سطح مقطع (متر مربع)	حجم (متر مکعب)	قطر لوله ورودی (میلیمتر)	حجم کل (متر مکعب)
۲	۱۴/۹۳	۳/۲	۸/۰۴	۱۲۰	۸۰۰	۲۴۰

جدول ۲- مشخصات مخازن اتمسفریک

قطر لوله ورودی (میلیمتر)	حجم (متر مکعب)	سطح مقطع (متر مربع)	ارتفاع آب در مخزن		رقوم کف مخزن (متر)	فاصله تقریبی از مبدأ (کیلومتر)
			حداقل	حداکثر		
			(متر)			
۱۰۰۰	۱۲۰۰	۳۰۰	۲۱۶	۲۱۳	۲۱۲	۴۸/۷۵
۱۰۰۰	۵۰	۱۲/۵	۲۱۴	۲۱۱	۲۰۹	۶۰/۳۹
۱۶۰۰	۴۰۰	۱۰۰	۲۲۴	۲۲۱	۲۲۰	حوضچه

۶. نتیجه گیری

- در این مقاله پدیده ضربه آبی در یک خط انتقال آب به طول ۶۷ کیلومتر مورد بررسی قرار گرفته و تجهیزات ضربه گیر مناسب انتخاب گردیده است. تحلیل عددی به دو روش نگارش کد عددی به زبان فرترن و نرم افزار HAMMER صورت گرفته است. نتایج به شرح ذیل می باشند:
- با نصب مخزن هوای فشرده در ابتدای خط انتقال فشار بالای ناشی از ضربه به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.
 - نصب مخزن هوای فشرده اثر فشارهای منفی که می توان به وقوع فشارهای بسیار بالا کمک کند را کاهش می دهد.
 - تعبیه مخازن اتمسفریک در طول مسیر خط انتقال خلا ناشی از پدیده ضربه آبی را از بین برده و محدوده وقوع فشارهای منفی را کاهش می دهد.
 - نتایج حاصل از دو روش محاسباتی در توافق خوبی با هم می باشند.

مراجع

1. Ismaier A., Schlucker E., "Fluid dynamic interaction between water hammer and centrifugal pumps", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 239, pp. 3151-3154, 2009.
2. Giuseppe D. M., Nicola F., "Simplified approach for the optimal sizing of throttled air chambers", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 138(12), pp.1101-1109, 2012.
3. Graze H. R., "Disussion of pressure surge attenuation utilizing an air chamber by Wood D. J.", *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, Vol. 97(3), pp. 455-459, 1979.
4. Don J. Wood, S. Lindiredy, P.F. Boulos, B. Karney and D.L. McPherson, "Numerical methods for modeling transient flow", *Journal of American Water Works Association (AWWA)*, Vol. 97(7), pp. 104-115, 2005.
5. Ghidaoui M.S., Kolyshkin A.A., "Stability analysis of velocity profiles in water hammer flows", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127(6), pp. 499-512, 2011.
۶. باغدارحسینی س.، اسدی ز.، "بررسی اثر افزایش حجم مخازن هوای فشرده در انتخاب سایر تجهیزات ضربه گیر"، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و زیرساخت های شهری، تبریز، ۱۳۹۴.
۷. رخشنده روغ، عباسپور ح.، "بررسی آزمایشگاهی پدیده ضربه آبی در لوله های متداول در ایران، سومین کنفرانس هیدرولیک ایران"، دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.
۸. سلیمی آ، ظریف خلیلی ع.، قلمبرع.، "بررسی تجربی و عددی پدیده ضربه قوچ در نیروگاههای کوچک با پنستاکهای طویل"، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه های برقابی، ۱۳۸۷.
۹. اکبرزاده پ.، "تحلیل پدیده ضربه قوچ در نیروگاه های آبی ایران به کمک برنامه نویسی با Matlab"، کنفرانس ملی نیروگاههای آبی کشور، تهران، ۱۳۸۲.
10. Sang-Gyun K., Kye-Bock L., Kyung-Yup K., "Water hammer in the pump-rising pipeline system with an air chamber", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 26(6), pp. 960-964, 2014.