



## بررسی اثر افزایش حجم مخازن هوای فشرده در انتخاب سایر تجهیزات ضربه گیر

سعید باغدار حسینی<sup>۱\*</sup>، زهرا اسدی کپورچالی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی

کارشناس مکانیک، شرکت مهندسی مشاور طوس آب، s\_baghdar@sbu.ac.ir

۲- مدیر امور پروژه های ویژه، شرکت مهندسی مشاور طوس آب، z.asadi@toosab.net

### چکیده

ضربه آبی در خطوط انتقال آب پمپاژ در اثر خاموشی ناگهانی پمپ ها و یا به عبارت دیگر در اثر تغییرات ناگهانی سرعت سیال به وقوع می پیوندد. با وقوع ضربه، فشار سیال در بازه زمانی کوچکی تغییر کرده و می تواند اثرات مخربی در خط انتقال آب ایجاد نماید. در این مقاله پدیده ضربه آبی در یک خط انتقال آب به طول ۶۷ کیلومتر مورد تحلیل عددی قرار گرفته و مناسب ترین تجهیزات ضربه گیر انتخاب گردیده اند. به منظور انجام تحلیل عددی ضربه آبی از بسته نرم افزاری Water Hammer استفاده شده است. اثر افزایش حجم مخازن هوای فشرده در انتخاب تجهیزات مناسب بررسی گردیده و مشاهده می شود که با افزایش حجم مخازن هوای فشرده، نیاز به استفاده از مخازن اتمسفریک کمتری می باشد.

**واژه های کلیدی:** انتقال آب، پمپاژ، شیرآلات، ضربه آبی، مخزن هوای فشرده، مخزن اتمسفریک.

### ۱- مقدمه

ضربه آبی یا ضربه قوچ، پدیده ای است که در خطوط لوله جریان تحت فشار اتفاق می افتد و بر قوانین فشار، تغییرات دبی یا سرعت جریان و شرایط مکانی، زمانی حرکت سیال استوار است. این پدیده در خطوط انتقال آب، نفت یا شبکه های توزیع و همچنین در لوله های آبر منتهی به توربین های آبی با ایجاد موج های سریع و زودگذر و میرا موجب خطرات گوناگونی نظیر ترکیدگی لوله، شکسته شدن شیرها، دریچه های کنترل و پمپ ها می شود. این پدیده در اثر تغییر ناگهانی سرعت جریان آب و در نتیجه تغییر ناگهانی فشار سیال در خط لوله به وجود می آید. به عنوان مثال بعد از خاموش شدن ناگهانی پمپ این پدیده شکل گرفته یک موج فشار منفی از طرف پمپ به انتهای خط لوله با سرعتی معادل سرعت موج در خط لوله به حرکت در می آید، از انتهای مسیر با فشار اولیه سامانه منعکس می شود تا به شیر یک طرفه پمپ برسد و پس از برخورد با شیر یک طرفه به صورت موج فشار مثبت منعکس می شود. این سیکل تناوب چندین بار تکرار می شود و با هربار تکرار شدن به علت اصطکاک خط لوله و سایر عوامل کاهنده، مقداری از قدرت یا فشار آن کاسته می شود تا به حالت سکون برسد. 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 [۱-۱۵]. بررسی ضربه آبی در لوله های متداول در ایران به صورت آزمایشگاهی توسط رخشنده رو و همکارش [۶] انجام شده است. سلیمی و همکارانش [۷] پدیده ضربه قوچ در نیروگاه های کوچک با پنستاک های طویل به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. اکبرزاده [۸] پدیده ضربه قوچ در نیروگاه های آبی ایران را به کمک برنامه نویسی Matlab مورد تحلیل قرار داده است.

سنگ گیان و همکارانش [۹] اثرات ضربه قوچ ناشی از خاموشی ناگهانی پمپ ها را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامترهای موثر در انتخاب تجهیزات ضربه را بررسی کرده و نشان دادند که انتخاب مقادیر مناسب ضریب تخلیه مخازن ضربه و سرعت موج ضربه تأثیر زیادی بر روی نتایج حاصله دارد. در این مقاله پدیده ضربه آبی در یک خط انتقال آب به طول ۶۷ کیلومتر به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفته و اثر تغییرات حجم مخازن هوای فشرده در انتخاب تجهیزات مورد بررسی قرار گرفته 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 قابلیت‌های 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 ( $\Delta H$ ) تابعی از سرعت موج ( $a$ )، تغییرات سرعت ( $\Delta V$ ) و شتاب جاذبه ( $g$ ) می باشد. سرعت انتشار موج در لول 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  $\rho$  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<sup>۱</sup> (MOC) 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:

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

<sup>1</sup> Method of Characteristic

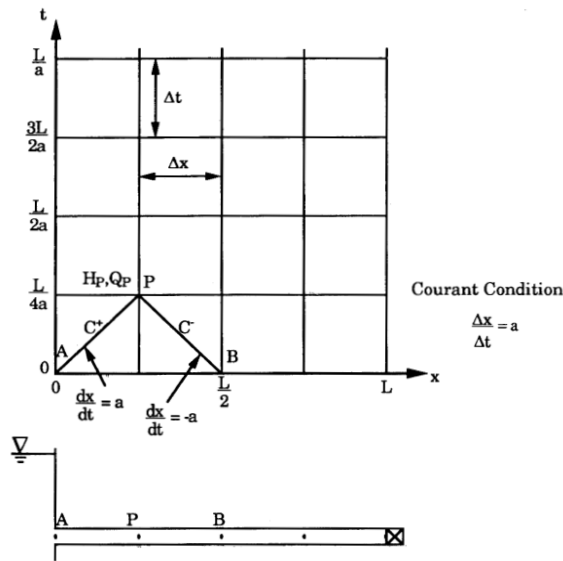
$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho AV) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho A \delta x) = 0 \quad (4)$$

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

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

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

در روابط فوق  $P$  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  $p_i$  گره هائی است که در طول محاسبات مقادیر سرعت و فشار در آنها محاسبه می شوند.



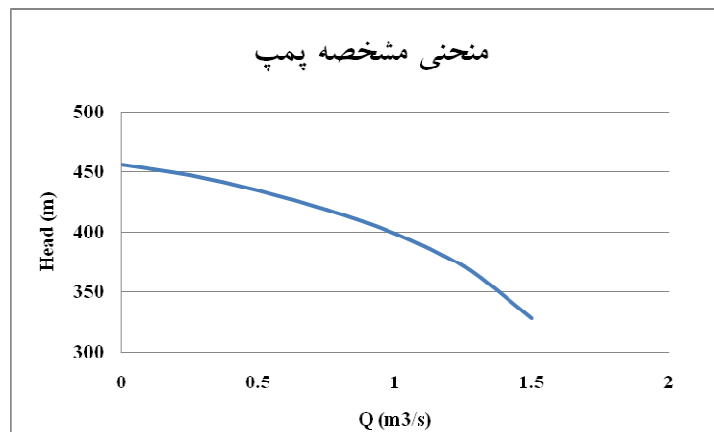
شکل ۱: شیوه استفاده از خطوط مشخصه برای یافتن تغییرات سرعت و فشار در طول لوله

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  $a$  و دیگری با شیب  $-a$  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، نقاط  $p_i$  می باشند. اثر هر تغییر در هر گره از طریق این تلاقی ها در طول لوله منتشر می شود.

#### ۴- مشخصات هیدرولیکی خط انتقال

خط انتقال آب از رقوم ارتفاعی تراز دریای آزاد، صفر، شروع شده و با طی کردن ۶۷ کیلومتر مسیر به رقوم ارتفاعی ۲۱۷/۶ نسبت به تراز دریای آزاد می رسد. دمای آب در تحلیل عددی  $20^\circ C$ ، مدول الاستیسیته آن ۲۱۰,۰۰۰ متر ستون آب و فشار بخار آب برابر ۱۰- متر ستون آب فرض شده است. جنس لوله ها فولادی بودی و مدول یانگ و ضریب هیزن ویلیامز به ترتیب

۲۱۰,۰۰۰,۰۰۰ متر ستون آب و ۱۲۵ 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 ۳۵۵ متر پمپاژ می کنند. توان پمپ ها مطابق دیتاشیت سازنده برابر  $4474 \text{ kW}$ ، دور  $\text{RPM}$  ۱۴۹۳ و اینرسی آن ها  $36/75 \text{ kg.m}^2$  و اینرسی الکتروموتورها برابر  $260 \text{ kg.m}^2$  در نظر گرفته شده است. راندمان پمپ ها و الکتروموتورها بترتیب  $87/5$  و  $97$  درصد لحاظ شده است. شکل ۲ منحنی مشخصه پمپ ها را نشان می دهد. ضریب افت اصطکاک ( $K$ ) مخازن هوای فشرده برابر  $2/5$  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  $400 \text{ m}^3$  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 هرگونه تأخیر انجام شده است.

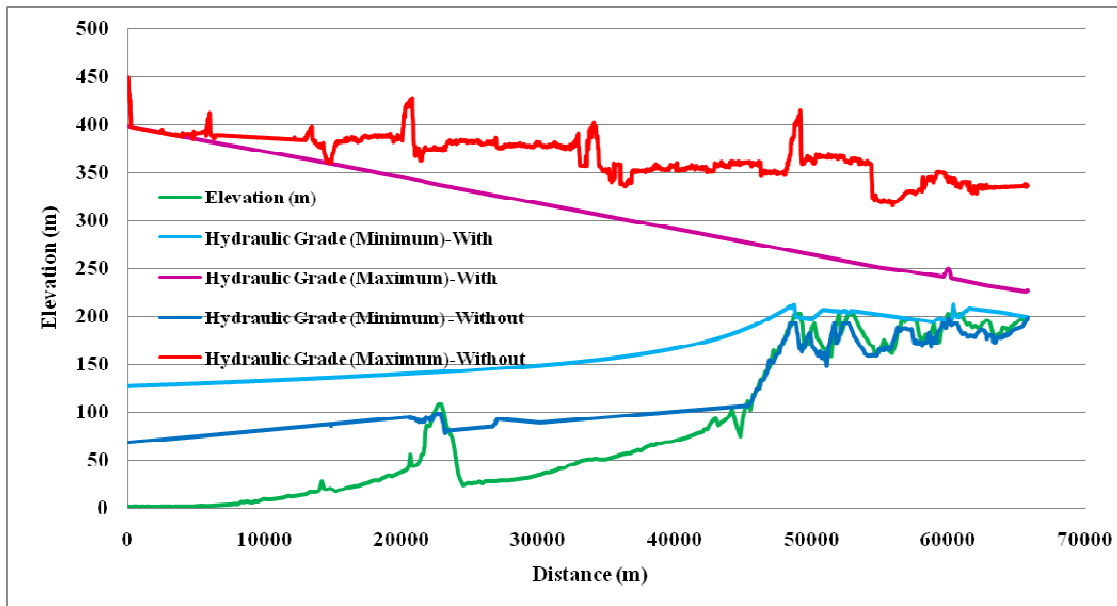


شکل ۲: منحنی مشخصه پمپ ها

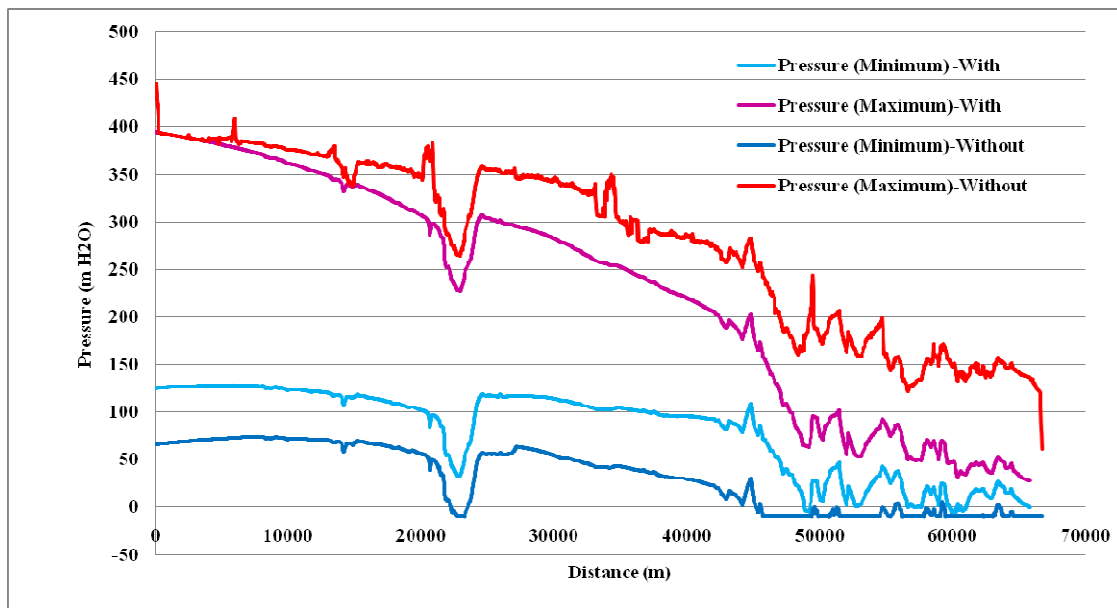
## ۵- نتایج حاصل از تحلیل ضربه آبی

### ۵-۱- تحلیل ضربه آبی و انتخاب مناسب ترین تجهیزات ضربه گیر

پدیده ضربه آبی در خط انتقال با خاموش شدن ناگهانی پمپ ها و قطع جریان مدل سازی شده است. شکل ۳ گرادیان هیدرولیک در طول خط انتقال و شکل ۴ تغییرات فشار را نشان می دهد، مشاهده می شود که در صورت خاموش شدن پمپ های ایستگاه پمپاژ و عدم نصب تجهیزات ضربه، فشار مثبت و منفی به ترتیب معادل  $450$  و  $-10$  متر ستون آب می گردد. موقعیت وقوع فشار مثبت در حالت بدون تجهیزات ضربه بعد از ایستگاه پمپاژ بوده و فشار  $10 \text{ m H}_2\text{O}$  - در حدود ۱۹ کیلومتر از مسیر به وقوع می پیوندد. با توجه به اینکه فشار کاری خط انتقال و شیرآلات برابر  $40 \text{ bar}$  می باشد، ماکزیمم فشار حاصل از ضربه آبی مخرب بوده و لازم است کاهش یابد. علاوه بر این در فشار  $10 \text{ m H}_2\text{O}$  - 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 ۳ 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 ۴ 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  $120 \text{ m}^3$  در داخل ایستگاه پمپاژ و دو مخزن اتمسفریک به حجم  $1200 \text{ m}^3$  و  $50 \text{ m}^3$  در طول مسیر و در نقاطی که بیشترین مقدار فشار منفی و همچنین احتمال وقوع جدایش ستون آب وجود دارد، تعبیه گردیده است.



شکل ۳: گرادیان هیدرولیکی در طول خط انتقال



شکل ۴: 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. حوضچه مخزن تعادلی انتهایی مسیر به وسیله یک مخزن اتمسفریک در همان موقعیت مدل شده است. مطابق شکل ۴ 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.

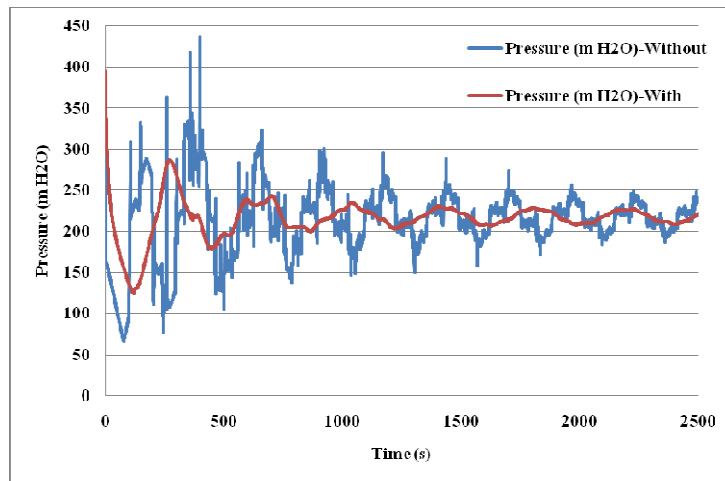
جدول ۱: مشخصات مخازن هوای فشرده

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)
			حداکثر (متر)	حداقل (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

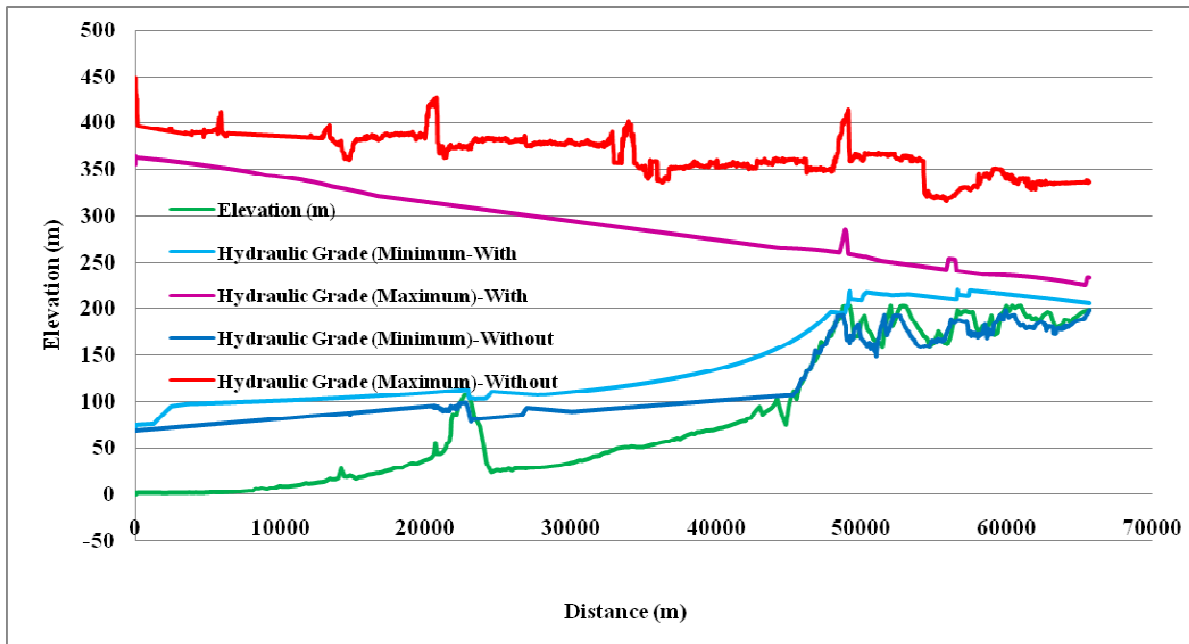
در شکل ۵ تغییرات فشار بلافاصله بعد از ایستگاه پمپاژ بر حسب زمان نشان داده شده است. مشاهده می شود که با خاموشی پمپ ها و وقوع ضربه آبی تغییرات فشار، بدون تجهیزات ضربه، بسیار شدید می باشد در حالیکه با نصب تجهیزات ضربه در طول خط انتقال تغییرات فشار کاهش یافته و با عملکرد صحیح تجهیزات نوسانات فشار مضمحل می گردد.



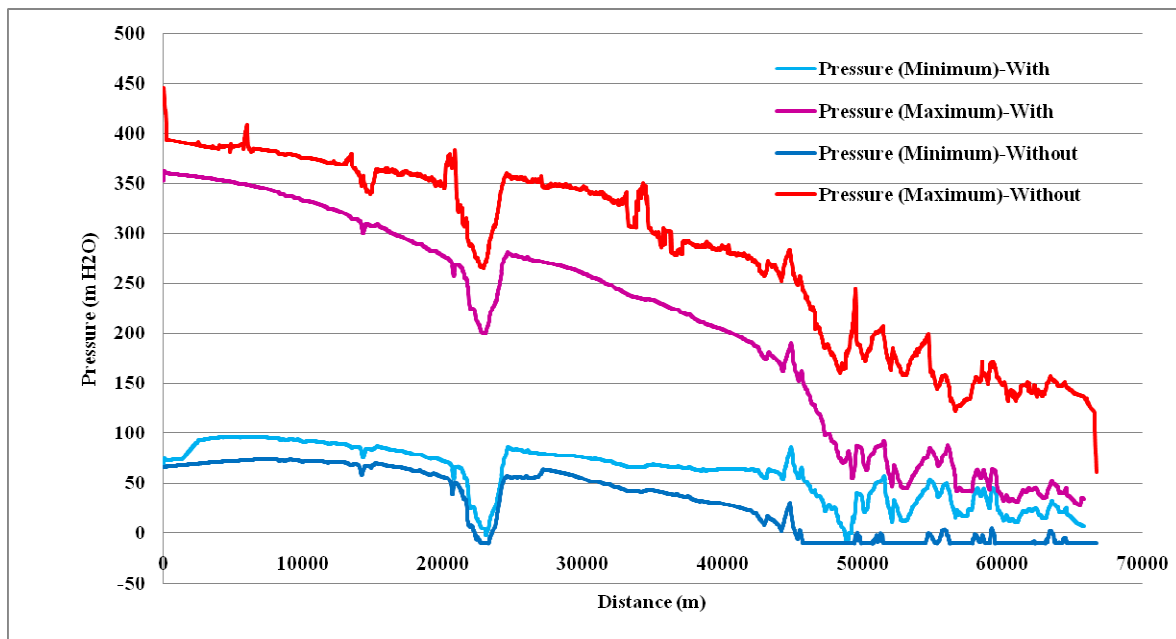
شکل ۵: تغییرات فشار نسبت به زمان در موقعیت بعد از پمپ

#### ۲-۵- بررسی اثر افزایش ظرفیت مخازن هوای فشرده

به منظور بررسی اثر افزایش ظرفیت مخازن هوای فشرده، تحلیل ضربه ابتدا با استفاده از دو مخزن هوای فشرده به حجم هر کدام  $85 m^3$  صورت گرفته است و پس از آن برای کاهش مناطق فشار منفی در خط انتقال از چهار مخزن اتمسفریک در طول مسیر استفاده شده است. جداول ۳ و ۴ مشخصات تجهیزات استفاده شده را نشان می دهد. سپس نتایج حاصل از تعبیه این تجهیزات در خط انتقال با نتایج حاصل از نصب مناسب ترین تجهیزات مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل ۶ و ۷ گرادیان هیدرولیکی و تغییرات فشار در طول خط انتقال با استفاده از این تجهیزات نشان داده شده است. مشاهده می شود که ماکزیمم فشار  $361 m H_2O$  در خروجی ایستگاه پمپاژ و مینیمم فشار  $7 m H_2O$  در کیلومتر ۴۹ خط انتقال بوقوع پیوسته است. مقایسه نتایج نشان می دهد که در این حالت نسبت به حالت قبل مقدار فشار ماکزیمم بهبود یافته در صورتیکه مقدار فشار مینیمم کاهش یافته است. علاوه بر این مشاهده می شود که تعداد مخازن اتمسفریک و بالطبع حجم کل مخازن اتمسفریک افزایش یافته است. نتایج نشان می دهد که حجم کل مخازن اتمسفریک با افزایش حجم مخازن هوای فشرده کاهش یافته و از مقدار  $4020 m^3$  به مقدار  $1700 m^3$  کاهش می یابد، علاوه بر این فرآیند نصب، تعمیر و نگهداری نیز تسهیل می گردد. زیرا مخازن هوای فشرده در ایستگاه پمپاژ تعبیه می گردند و مخازن اتمسفریک در طول خط نصب می شوند.



شکل ۶: گرادیان هیدرولیکی در طول خط انتقال



شکل ۷: تغییرات فشار در طول خط انتقال

جدول ۳: مشخصات مخازن هوای فشرده

حجم کل	قطر لوله ورودی	حجم	سطح مقطع	قطر مخزن	طول	تعداد مخازن
(متر مکعب)	(میلیمتر)	(متر مکعب)	(متر مربع)	(متر)	(متر)	
۱۷۰	۷۰۰	۸۵	۸/۰۴	۳/۲	۱۰/۵۷	۲



**International Conference on Civil Engineering  
Architecture and urban infrastructure  
29-30 July 2015, Tabriz , Iran**

**جدول ۴: مشخصات مخازن اتمسفریک**

فاصله تقریبی از مبدأ (کیلومتر)	رقوم کف مخزن (متر)	ارتفاع آب در مخزن		سطح مقطع (متر مربع)	حجم (متر مکعب)	قطر لوله ورودی (میلیمتر)
		حداقل	حداکثر			
		(متر)				
۲۳	۱۱۰	۱۱۱	۱۱۴	۲/۵	۱۰	۱۰۰۰
۴۹	۲۲۰	۲۲۱	۲۲۴	۶۲۵	۲۵۰۰	۱۰۰۰
۵۶/۵	۲۲۰	۲۲۱	۲۲۴	۳۷۵	۱۵۰۰	۱۰۰۰
۶۶	۲۱۴	۲۱۵	۲۱۸	۲/۵	۱۰	۱۰۰۰
حوضچه	۲۲۰	۲۲۱	۲۲۴	۱۰۰	۴۰۰	۱۶۰۰

### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله پدیده ضربه آبی در یک خط انتقال آب مورد بررسی قرار گرفته و تجهیزات ضربه گیر مناسب انتخاب گردیده است. بعلاوه اثر افزایش حجم مخازن هوای فشرده بر انتخاب سایر تجهیزات بررسی شده است. نتایج به شرح ذیل می باشد:

- افزایش حجم مخازن هوای فشرده منجر به کاهش حجم و تعداد مخازن اتمسفریک می شود.
- افزایش حجم مخازن هوای فشرده و همچنین قطر لوله ورودی به آن ها، ماکزیمم فشار را افزایش می دهد.
- با افزایش حجم مخازن هوای فشرده، ضمن کاهش کیلومترهای وقوع فشار منفی مقادیر آن بهبود می یابد.

### 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. Lindireddy, 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", Vol. 127(6), pp. 499-512, 2011.
- [۶] رخشنده رو غ، عباسپور ح، "بررسی آزمایشگاهی پدیده ضربه آبی در لوله های متداول در ایران، سومین کنفرانس هیدرولیک ایران"، دانشگاه تهران، ۱۳۸۰.
- [۷] سلیمی آ، ظریف خلیلی ع، قلمبر ع، "بررسی تجربی و عددی پدیده ضربه قوچ در نیروگاههای کوچک با پنستاکهای طولی"، دومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه های برقابی، ۱۳۸۷.
- [۸] اکبرزاده پ، "تحلیل پدیده ضربه قوچ در نیروگاه های آبی ایران به کمک برنامه نویسی با Matlab"، کنفرانس ملی نیروگاههای آبی کشور، تهران، ۱۳۸۲.
- [9] 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.