

Investigation of Porous Structures for Protection of Pipelines against Water Hammer

P. Asiaban¹, M. Fathi Moghadam²

1. PhD Student in Hydraulic Structures, Department of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran
(Corresponding Author) P_asiaban@ut.ac.ir
2. Prof. of Hydraulic Structures, Department of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran

(Received Jan. 30, 2017 Accepted July 28, 2016)

To cite this article :

Asiaban, P., Fathi Moghadam, M., 2018, "Using porous structures to protect pipelines against water hammer." Journal of Water and Wastewater, 29(5), 72-84. Doi: 10.22093/wwj. 2017.75224.2341 (In Persian)

Abstract

This study was initiated to investigate the use of a porous structure in some parts of a pipeline to protect it against water hammer pressure wave. This study was inspired by the utilization of porous breakwaters which are commonly used to protect coastal areas. To fulfill the main objective of the study, different porous structures were installed in an experimental pipeline fed by a pump. The water hammer was induced by an upstream valve. The homogeneous porous structures were made up of spherical beads or broken rocks in different sizes and filled them in pipes with different lengths and subject them under different water hammer conditions. Results obtained from this study showed that during the first cycle of water hammer wave, the ratio of maximum pressure downstream of porous structure to the corresponding value in upstream is between 0.6 to 0.95, respectively. This pressure difference decreased drastically in next cycles. Generally, it can be conclude that an insignificant protection gained from a porous structure in downstream from water hammer; however, the overall pressure fluctuations in the pipe filled with a porous structure was less than a fully open pipe under the same discharge rates and the same water hammer condition. The results showed that porous structures in particular condition could be used to control pressure oscillations in pipelines and it is proposed to consider practical aspects of this idea in future researches.

Keywords: Porous Structure, Water Hammer, Pressure Fluctuations, Attenuation Rate.



به کارگیری ساختارهای متخلخل برای حفاظت خط لوله در مقابل ضربه قوچ

پوریا آسیابان^۱، منوچهر فتحی مقدم^۲

۱- دانشجوی دکترای گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران
p_asiaban@ut.ac.ir (نویسنده مسئول)
۲- استاد گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

دریافت ۹۵/۱۱/۱۱ پذیرش ۹۶/۵/۷

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

آسیابان، پ.، فتحی مقدم، م.، ۱۳۹۷، "به کارگیری ساختارهای متخلخل برای حفاظت خط لوله در مقابل ضربه قوچ"
مجله آب و فاضلاب، ۲۹(۵)، ۸۴-۷۲. Doi: 10.22093/wwj.2017.75224.2341

چکیده

هدف این پژوهش بررسی امکان حفاظت بخش‌هایی از خط لوله در مقابل ضربه قوچ بود که با ایجاد ساختارهای متخلخل در مسیر خط لوله انجام شد و برای انجام آن از موج‌شکن‌های متخلخل که برای حفاظت سواحل ایجاد می‌شود، الهام گرفته شد. از این رو در یک سامانه آزمایشگاهی که در آن خط لوله توسط یک پمپ تغذیه می‌شد و توسط شیرری در بالادست امکان ایجاد ضربه قوچ وجود داشت، ساختارهای متخلخلی تعبیه شد. این ساختارهای متخلخل همگن توسط ذرات کاملاً کروی با قطرهای متفاوت، سنگدانه‌های تیز گوشه با قطرهای متفاوت و در طول‌های متفاوت ایجاد شد و در خط لوله تحت شرایط وقوع ضربه قوچ مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشینه فشار در سیکل اول ضربه قوچ، در پایین دست ساختار متخلخل به مقدار ۰/۹۵ تا ۰/۶ از مقدار متناظر در بالادست ساختار متخلخل کمتر است؛ اما در سایر سیکل‌ها فشار بالادست و پایین دست بسیار به هم نزدیک است. به طور کلی نمی‌توان گفت که یک ساختار متخلخل نواحی پایین دست خود را در مقابل امواج فشاری ضربه قوچ حفاظت می‌کند اما نوسانات فشاری در یک لوله حاوی ساختار متخلخل کمتر از نوسانات فشار در یک لوله با مسیر کاملاً باز در دی مشابه است. این مسئله در بالادست و پایین دست ساختار متخلخل صادق است. مطابق نتایج، دلیل آن کاهش سرعت انتشار موج فشاری بر اثر وجود ساختار متخلخل تشخیص داده شد. نتایج نشان می‌دهد که ساختارهای متخلخل می‌توانند در شرایط خاص برای کنترل نوسانات فشار در خطوط لوله به کار برده شوند و پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده، اجرای عملیاتی آن بررسی شود.

واژه‌های کلیدی: ساختار متخلخل، ضربه قوچ، نوسانات فشار، نرخ میرایی

۱- مقدمه

تونل‌های آب‌بر بدون پوشش و بتن مسلح و حتی رگ‌های موجود در سیستم انتقال خون بدن از این نوع مجاری هستند، که در فشارهای بالا با خطر ترکیدن و در فشارهای پایین با خطر مچاله شدن و تغییر شکل دائمی مواجه هستند. اهمیت هیدرولیکی فشار و نوسانات آن نیز به این دلیل است که در روزنه‌ها مقدار جریان برقرار شده تابع اختلاف فشار دو طرف روزنه است. این روزنه ممکن است یک شیر آب باشد که نوسان فشار در آن، باعث دبی

انتقال و تحویل مایعات از طریق مجاری تحت فشار، موضوعی است که کاربردهای فراوانی دارد و در مهندسی از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این نوع انتقال، فشار و نوسانات سیال که معمولاً تحت تأثیر گرادیان فشار صورت می‌گیرد، از دو جنبه سازه‌ای و هیدرولیکی اهمیت دارد. جنبه سازه‌ای، مجرای احاطه کننده جریان است و از این نظر اهمیت دارد که مشخصات و مقاومت مجرا را تعیین می‌کند. خط لوله‌های فلزی و پلیمری،



این تغییر مقدار مایع خود را در قالب افزایش یا کاهش عمق و افزایش یا کاهش فشار در یک مکان مشخص نشان می‌دهد. سپس این ناحیه با مقدار عمق و یا فشار متفاوت خاصیت خود را از طریق نیروی گرانش در جریان منتشر می‌کند که این انتشار، با عنوان موج شناخته می‌شود. در جریان‌های تحت فشار نیز مشابه جریان‌های سطح آزاد، برای تشکیل موج باید در یک طول خاص از مجرا مقدار مایع نسبت به طول مشابه بازه‌های مجاور تغییر کند، اما به دلیل این که عمق در جریان‌های تحت فشار بی‌معنی است، این تغییر مقدار مایع از طریق تغییر چگالی مایع در یک بازه خاص رخ می‌دهد؛ سپس ناحیه افزایش یا کاهش چگالی مایع (افزایش یا کاهش فشار) خاصیت خود را از طریق نیروهای الاستیک در تمام مجرا منتشر می‌کند. می‌توان گفت مکانیسم امواج سطح آزاد با امواج فشاری مشابه یکدیگر است اما نیروهایی که باعث انتشار آن‌ها می‌شوند، متفاوت‌اند. از این رو شاید بتوان روش‌های کنترل امواج سطح آزاد را برای کنترل امواج فشاری ضربه قوچ نیز به کار برد.

متداول‌ترین روش برای کنترل امواج سطح آزاد ایجاد مانع در مسیر آن‌ها است. این مانع می‌تواند به صورت یک تل انباشته از سنگ (محیط متخلخل) و یا یک کمر بند از پوشش گیاهی باشد (Anderson and Smith, 2014, Huang and Chao, 1992). این پژوهش نیز با الهام گرفتن از روش‌های حفاظت در مقابل امواج سطح آزاد، به بررسی استقرار موانعی به شکل ساختارهای متخلخل در مسیر مجاری تحت فشار به منظور حفاظت از مجرا در مقابل امواج فشاری ضربه قوچ می‌پردازد.

۲- مبانی تئوریک

محیط‌های متخلخل بنا به دلایل مختلف در مسیر مجاری تحت فشار انتقال مایعات قرار می‌گیرند. به عنوان پرتعدادترین این موارد می‌توان به قرارگیری فیلترهای دانه‌ای تصفیه در مسیر جریان اشاره کرد. در صنایع پتروشیمی نیز در مواردی کاتالیزور یا ماده جاذب را به شکل یک محیط متخلخل در مسیر جریان قرار می‌دهند تا واکنش‌های لازم بین آن‌ها انجام شود. در برخی نمونه‌های مبدل‌های حرارتی نیز سیال مبرد در مسیر حرکت خود در مجرای تحت فشار از درون یک محیط متخلخل عبور داده می‌شود. در صورتی که توانایی خاصی در محیط‌های متخلخل برای حفاظت از

متغیر می‌شود؛ یا یک نشستی در بدنه یک خط لوله مدفون که در حین نوسان فشار و در لحظه بروز فشارهای کم، باعث ورود آب‌های زیرزمینی آلوده اطراف لوله از محل نشستی به آن می‌شود (Mora-rodriguez et al., 2014).

در مسیر مجاری تحت فشار، هر تغییر موضعی در فشار و یا دبی باعث به وجود آمدن نوسانات فشاری می‌شود که این نوسانات در قالب امواج متوالی افزایش و کاهش فشار در تمام طول مجرا منتشر خواهد شد. این پدیده در صورت شدید بودن نوسانات، با عنوان ضربه قوچ شناخته می‌شود (Chaudhry, 2014). برخی از مواردی که باعث بروز این نوسانات فشاری می‌شوند عبارت‌اند از بستن ناگهانی شیرها، پر کردن ناگهانی تونل‌ها، قطع برق و از کار افتادن ناگهانی پمپ‌ها و تقطیر ناگهانی پاکت‌های محبوس بخار آب در مسیر سیکل‌های ترمودینامیکی (Rdige, 2010).

یکی از عمده‌ترین این راهکارها استفاده از مخازن موج‌گیر روباز و تحت فشار است. در صورت استفاده از این مخازن، حد فاصل بین محل ایجاد موج فشاری و مخزن، حداکثر فشار را تحمل می‌کند اما خط لوله بعد از مخزن، فشارهای متعادل‌تری را متحمل خواهد شد. راهکار دیگر، تزریق هوا درون خط لوله است زیرا با این کار سرعت انتشار موج فشاری در لوله کاهش می‌یابد و مقدار شوک فشاری نیز تابع مستقیم سرعت انتشار موج است (Stephenson, 1997). روش دیگر استفاده از دیسک پرنده است. در این روش اجازه وقوع شوک فشاری به سیستم داده می‌شود اما در مسیر خط، یک ناحیه ضعیف شده در بدنه لوله پیش‌بینی می‌شود تا در صورت بروز فشار بیش از حد، قسمت ضعیف شده پرتاب شود و بین لوله و محیط پیرامون ارتباط برقرار کند تا مایع اضافه تخلیه شود و از ترکیدن لوله جلوگیری شود (Sharp and Sharp, 1996). روش دیگر استفاده از چرخ طیار روی پمپ‌ها است که با افزایش ممان اینرسی قطعات در حال چرخش، باعث می‌شود بعد از قطع برق زمان بیشتری صرف شود تا پمپ از حرکت متوقف شود و در نتیجه ضربه قوچ کوچک‌تری به سیستم وارد شود.

از نظر مکانیکی بین امواج جریان‌های سطح آزاد با امواج مورد بحث در جریان‌های تحت فشار شباهت‌هایی وجود دارد. برای ایجاد موج در جریان‌های سطح آزاد، ابتدا باید در یک طول مشخص مقدار مایع نسبت به طول مشابه بازه‌های اطراف تغییر کند.



که در آن‌ها

Δp افت فشار پیرومتریک در محیط متخلخل، ρ جرم واحد حجم سیال، V سرعت جریان در لوله، L طول محیط متخلخل، d_p قطر کره‌های تشکیل دهنده محیط متخلخل، ε تخلخل، μ لزجت دینامیک سیال و Re عدد رینولدز جریان ذره یعنی $\frac{\rho V d_p}{\mu}$ می‌باشد. برای استفاده از معادلات ۱ تا ۳ و محاسبه افت، همچنین برای توصیف شرایط محیط متخلخل باید مقدار تخلخل مشخص شود. تخلخل، نسبت فضای خالی به کل فضای اشغال شده (مجموع فضای خالی و بخش جامد) توسط محیط متخلخل است. معادله تجربی ۴ برای محاسبه تخلخل به عنوان تابعی از قطر ذرات و قطر لوله در محیط متشکل از ذرات کاملاً کروی هم اندازه به کار برده می‌شود (Abbas, 2011).

$$\varepsilon = 0.375 + 0.034 \frac{D_p}{D} \quad (4)$$

که در آن D قطر لوله است.

به دلیل پیچیده بودن ماهیت جریان‌های غیرماندگار، تنوع در نحوه به وجود آمدن آن‌ها، شرایط متنوع هندسی پروفایل خط لوله و درجه خاصی از حفاظت که ممکن است مد نظر باشد، ارائه فرمول‌های ریاضی مستقیم برای طراحی ساختارهای متخلخل عملی به نظر نمی‌رسد. به عنوان مثال، پرکاربردترین تجهیز کنترل نوسانات فشار در سیستم‌ها، مخزن موج‌گیر است که با گذشت بیش از ۱۳۸ سال از ابداع آن هنوز روابط ریاضی مستقیم برای طراحی آن وجود ندارد (Vereide, 2016). روش طراحی به این شکل است که با استفاده از روابط موجود که رفتار این مخازن را مدل می‌کند، یک ضربه قوچ خاص، در یک سیستم خط لوله خاص و با یک مخزن موج‌گیر خاص شبیه‌سازی می‌شود، سپس در محل قرارگیری و ابعاد مخزن موج‌گیر به قدری تغییرات ایجاد می‌شود که مقادیر نوسان فشار شبیه‌سازی شده در تمام نقاط در دامنه مجاز از پیش تعریف شده قرار گیرد. این بحث در مورد روش پیشنهادی حاضر، یعنی استفاده از ساختارهای متخلخل صادق است. برای طراحی باید با شبیه‌سازی رفتار این ساختارها در یک سیستم خاص، فرایندی به صورت سعی و خطا طی شود تا به ابعاد و محل مناسب نصب سازه متخلخل دست یافت. در این پژوهش آزمایش‌های گسترده بر روی

خط لوله‌ها در مقابل ضربه قوچ شناخته شود نیز می‌توان آن‌ها را در مسیر مجاری تعبیه کرد. هرچند که قرار دادن چنین موانعی باعث ایجاد افت انرژی در مسیر می‌شود اما با توجه به گستردگی شرایط طرح‌های مهندسی، در موارد خاص می‌تواند کاربردی باشد. به عنوان مثال در برخی پروژه‌ها بار هیدرولیکی مازاد وجود دارد که برای استهلاک آن از شیرهای فشارشکن استفاده می‌کنند، حال آنکه در همان پروژه‌ها خطر بروز پدیده ضربه قوچ نیز وجود دارد؛ لذا در چنین طرح‌هایی، استفاده از روشی برای کنترل ضربه قوچ که موجب افت در بار هیدرولیکی شود، قابل قبول است.

به طور کلی افت انرژی در محیط‌های متخلخل به دو نوع خطی و غیرخطی تقسیم می‌شود (Asiaban et al., 2015).

نوع خطی در جریان‌های ورقه‌ای اتفاق می‌افتد که در آن رابطه افت با سرعت خطی است، یعنی افت با توان اول سرعت رابطه دارد. نوع غیرخطی در جریان‌های متلاطم رخ می‌دهد و در آن رابطه افت با سرعت غیرخطی است. در محدوده شرایط مورد بحث در این پژوهش و به کار بردن محیط متخلخل درشت‌دانه در لوله‌ها برای کنترل ضربه قوچ، جریان در محیط متخلخل همواره متلاطم است.

بنابراین در ادامه روابط برآورد افت غیرخطی بیان خواهد شد. به علاوه، بیشتر تمرکز این پژوهش در محیط‌های متخلخل معطوف به محیط متخلخل، متشکل از دانه‌های کاملاً کروی مصنوعی است که با عنوان مجموعه کرات^۱ شناخته می‌شوند. به دلیل اهمیت محاسبه افت در چنین ساختارهایی در ۶۰ سال گذشته معادلات زیادی توسط پژوهشگران مختلف برای این منظور توسعه یافته است (Erdim et al., 2015). معادلات ۱ تا ۳ برای محاسبه افت در مجموعه کرات به کار می‌روند (Erdim, 2015)

$$\Delta p = \left[\frac{\rho V^2 L}{d_p} \right] \left[(180 + 2.871 \left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^{0.9} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 Re} \right] \quad (1)$$

$$\Delta p = \left[\frac{\rho V^2 L}{d_p} \right] \left[6.8 \frac{(1-\varepsilon)^{1.2}}{Re^{0.2} \varepsilon^{0.3}} \right] \quad (2)$$

$$\Delta p = \left[\frac{\mu V L}{d_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right] \left[160 + 2.81 \left(\frac{Re}{1-\varepsilon} \right)^{0.904} \right] \quad (3)$$

¹ Sphere Packing



تنظیم دبی تعبیه شد که قابلیت بسته شدن سریع را نیز داشت. در مسیر خط لوله پلی اتیلن یک قسمت قابل پیاده شدن از جنس پلکسی گلس شفاف قرار داده شد. این لوله پلکسی گلس به طول ۱۵ سانتی متر دارای قطر داخلی و خارجی برابر با لوله پلی اتیلن بود و از آن به عنوان محل قرار گرفتن نمونه مورد آزمایش استفاده شد. در بالادست و پایین دست این لوله یعنی محل قرارگیری ساختار متخلخل، اتصالاتی به فاصله ۵۰ سانتی متر از هم تعبیه شد که محل نصب ترنسمیترهای اندازه گیری فشار بود. شکل ۱ نمایی از لوله پلکسی گلس که با ذرات کروی به قطر ۱۰ میلی متر پر شده است را نشان می دهد و در شکل ۲ نمایه کلی سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده نشان داده شده است.

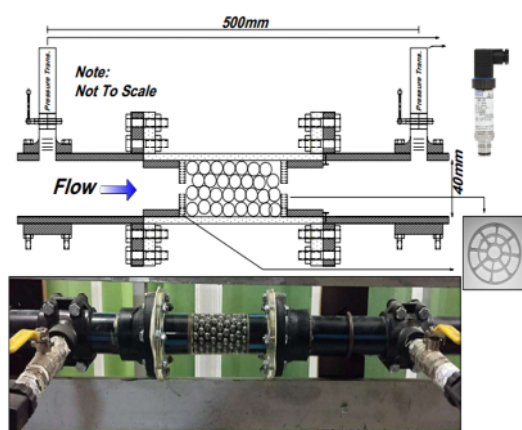


Fig 1. Transparent part of the pipe filled with 10 mm spherical beads

شکل ۱- قسمت شفاف خط لوله، پر شده با ذرات کروی ۱۰ میلی متری

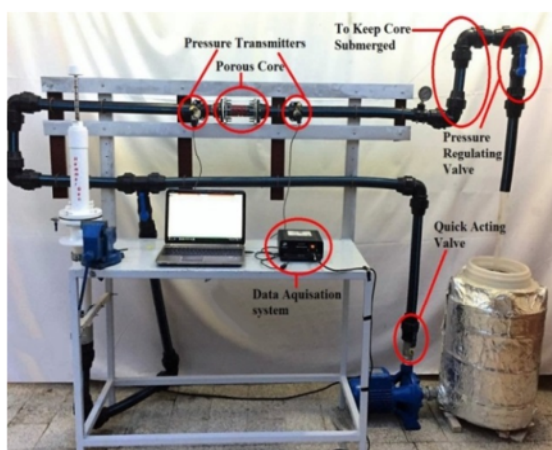


Fig 2. Experimental apparatus

شکل ۲- سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده

محیط متخلخل در شرایط ضربه قوچی انجام شد تا با حصول برداشت های فیزیکی قابل اعتماد مشخص شود که ساختارهای متخلخل چگونه بر ضربه قوچ تأثیر می گذارند و چه پتانسیلی برای کنترل آن دارند

برای شبیه سازی عددی رفتار ساختارهای متخلخل در شرایط ضربه قوچی از روش مدل سازی شبه ماندگار استفاده می شود. در روش شبه ماندگار برای مدل کردن یک عارضه، از معادلات حاکم بر آن عارضه در حالت جریان ماندگار استفاده می شود با این توضیح که در هر گام زمانی از محاسبات، شرایط جریان مربوط به همان گام زمانی به معادلات حالت ماندگار داده می شود و حاصل آن در معادلات ضربه قوچ تأثیر داده خواهد شد. هرچند رفتار غیرماندگار یک عارضه تا حدودی با رفتار ماندگار آن تفاوت دارد که این امر ممکن است موجب بروز مقداری خطا در این روش شبیه سازی شود. کیم و همکاران در سال ۲۰۰۷ رفتار یک روزنه در شرایط ضربه قوچی را با استفاده از روش شبه ماندگار و همچنین با استفاده از روابط موجود برای شبیه سازی رفتار غیرماندگار روزنه مدل کردند (Kim et al., 2007). آن ها برای استفاده از حالت شبه ماندگار، روابط حاکم بر افت روزنه که در ANSI/API 2530 استاندارد شده است را به کار بردند و برای توصیف رفتار غیرماندگار روزنه از رابطه توسعه داده شده توسط فانک و همکاران در سال ۱۹۷۲ استفاده کردند. نتایج مقایسه نشان داد که تفاوت قابل ملاحظه ای بین دو روش مذکور وجود ندارد. بنابراین در این پژوهش به توسعه روابطی برای توصیف افت غیرماندگار در محیط های متخلخل پرداخته نشد. مطابق این پژوهش برای شبیه سازی رفتار ساختارهای متخلخل، روش مدل سازی شبه ماندگار با به کار بردن معادلات ۱ تا ۴ توصیه می شود.

۳- مواد و روش ها

برای ارزیابی ایده مطرح شده در این پژوهش یک سیستم آزمایشگاهی ساخته شد. در این سیستم آزمایشگاهی جریان در یک مدار باز چرخان برقرار شد. یک مخزن ۱۰۰ لیتری از طریق یک پمپ جریان شعاعی دو طبقه، آب را به یک خط لوله به طول ۶ متر وارد می کرد، در انتهای خط لوله، آب به مخزن ابتدایی تخلیه می شد. خط لوله از جنس پلی اتیلن با قطر خارجی ۵۰ و قطر داخلی ۴۰ میلی متر بود. در ابتدای خط رانش پمپ یک شیر فولادی برای



آزمایش به وسیله بستن ناگهانی شیر بالادست، یک ضربه قوچ به سیستم اعمال شد که توسط ترنسمیترها ثبت شد.

۴- نتایج و بحث

در پژوهش‌های مربوط به جریان، مانند این پژوهش که افت انرژی در آن‌ها تأثیر گذار است، شرایط هندسی مسیر جریان بسیار اهمیت دارد. محیط متخلخل را از نظر هندسی می‌توان به‌عنوان مجموعه‌ای از مسیرهای به هم مرتبط دانست. تغییر جهت حرکت در محیط متخلخل (به‌طور مثال تغییر جهت حرکت در یک دیفیوزر باعث تغییر در خاصیت همگرایی یا واگرایی مسیر می‌شود) و تخلیه ذرات تشکیل دهنده محیط متخلخل از لوله و پر کردن مجدد آن با همان ذرات باعث تغییر در این مسیرها می‌شود. اما انتظار می‌رود در صورتی که ذرات تشکیل دهنده محیط متخلخل همگن باشند، خصوصیات میانگین این مسیرها تغییر نکند. به عبارت دیگر انتظار می‌رود که تغییر جهت حرکت در محیط متخلخل همگن یا تخلیه و پر کردن مجدد آن روی مقدار افتی که محیط متخلخل به وجود می‌آورد تأثیری نداشته باشد. شکل ۳ مقدار افت را در مغزه متخلخل متشکل از ذرات ۱۶ میلی‌متری در حالت اولیه و تخلیه و پر کردن مجدد نشان می‌دهد. به علاوه در این شکل مقدار افت در مغزه متخلخل متشکل از ذرات ۱۰ میلی‌متری در دو جهت نصب (عوض شدن جهت حرکت سیال در مغزه) مغزه نشان داده شده است. در نمودارهای شکل ۳ که مقدار افت اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهند، حاصل افت محاسباتی که با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ به دست آمده نیز نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، تخلیه و پر کردن محیط متخلخل و جهت حرکت سیال در آن تأثیری در مقدار افت ایجاد شده ندارد زیرا مقدار افت اندازه‌گیری شده در این شرایط به خوبی روی یک خط روند قرار می‌گیرند و تفاوتی با هم نشان نمی‌دهند. این موضوع در اعتماد به نتایجی که در ادامه ارائه خواهد شد بسیار تأثیرگذار است زیرا نشان می‌دهد که این نتایج به هر محیط متخلخل، متشکل از ذرات مشابه قابل تعمیم است و علی‌رغم استوکستیک بودن ماهیت مسیرها در محیط متخلخل، جهت حرکت سیال و پر و خالی کردن مغزه روی خاصیت افت انرژی آن‌ها بی‌تأثیر است. همچنین نمودارهای شکل ۳ نشان می‌دهد که بین معادلات مطرح شده، معادله هیکس بیشترین دقت را در محاسبه

در این پژوهش اندازه‌گیری دبی به روش حجمی انجام شد و برای اندازه‌گیری فشار و نوسانات آن از ترنسمیترهای پیزوالکتریک WIKA استفاده شد. این ترنسمیترها که اندازه‌گیری فشار را با نرخ ۱۰۰۰ برداشت در ثانیه انجام می‌دهند، به تجهیزاتی متصل خواهند شد که در آنجا خروجی میلی‌آمپری ترنسمیترها به سیگنال‌های دیجیتال تبدیل می‌شود و سپس به کامپیوتر منتقل می‌شود.

در این نوشتار به ساختارهایی که برای کنترل ضربه قوچ به کار برده می‌شوند و درون خط لوله قرار داده دارند، عنوان مغزه ارجاع می‌شود. دسته اصلی مغزه‌های متخلخل در این پژوهش متشکل از ذرات کاملاً کروی همگن است. این ذرات کروی با قطرهای ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر برای ساخت مغزه به کار برده شدند. به علاوه با استفاده از سنگدانه‌های تیزگوشه با قطر میان ۱۰ و ۱۳ میلی‌متر نیز مغزه‌هایی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

با توجه به توضیحاتی که در مورد سامانه آزمایشگاهی ساخته شده بیان شد، مشخص شد که نمونه مغزه در مسیر خط لوله است و در دو طرف آن ترنسمیترهای اندازه‌گیری فشار نصب شده است. خط لوله از بالادست توسط پمپ تغذیه می‌شود و در انتها به اتمسفر تخلیه می‌شود.

از کار افتادن ناگهانی پمپ‌ها در مسیر پمپاژ، باعث ایجاد ضربه قوچ بیشتر و شدیدتر نسبت به ضربه قوچ ناشی از بستن شیر در مسیر خط می‌شود (Stephenson et al., 2002). با توجه به این مطلب در این پژوهش برای ایجاد ضربه قوچ، شیر بالادست خط لوله که در مجاورت پمپ قرار داشت به سرعت بسته شد تا نقش از کار افتادن ناگهانی پمپ را ایفا کند و منجر به ایجاد ضربه قوچ شود. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا دبی ماندگار در خط لوله برقرار شد. مقدار اختلاف فشاری که در این حالت ترنسمیترهای دو طرف نمونه نشان می‌دهند، معادل افت ماندگار ایجاد شده توسط مغزه است.

در ابتدای فرایند آزمایشگاهی، بدون قرار دادن محیط متخلخل چنین آزمایش‌هایی انجام گرفت تا افت مربوط به ضمام نگه‌دارنده محیط متخلخل نظیر صفحات مشبک نشان داده در شکل ۱ به دست آید. آنچه در ادامه به‌عنوان مقدار افت محیط متخلخل معرفی شد، مقدار افت خالص ناشی از وجود محیط متخلخل است و افت مربوط به ضمام نگه‌دارنده از آن کم شده است. در ادامه روند



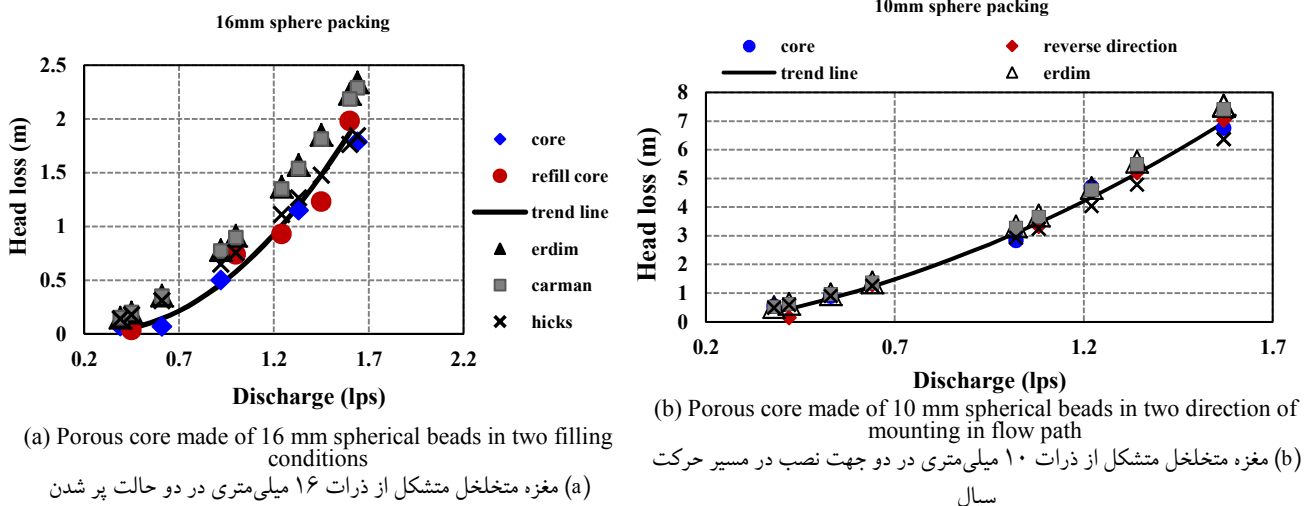


Fig 3. Measured and calculated head loss in porous media against discharge rate based on different filling and flow direction
 شکل ۳- افت ماندگار اندازه گیری شده و محاسباتی در محیط متخلخل و تاثیر ساختار محیط متخلخل (پر شدن و جهت حرکت سیال) بر افت

در لوله قرار داده شد و فشارهای ضربه قوچ در بالادست و پایین دست آن ثبت شد. مطابق شکل ۴ در ابتدای بازه زمانی که حرکت نمودار افقی است، فشارها مربوط به قبل از بستن شیر و حالت جریان ماندگار است. مشاهده می شود که به دلیل افت زیاد مغزه متخلخل، فشار در بالادست مغزه زیاد و بلافاصله بعد از مغزه به شدت افت می کند. اما در لوله کاملاً باز اختلافی با هم ندارند و روی هم قرار گرفته اند زیرا افت طولی در فاصله ۵۰ سانتی متر مقدار قابل توجهی نیست. شکل ۴ نشان می دهد که علی رغم اختلاف فشار زیاد در سر مغزه متخلخل در حالت جریان ماندگار، با شروع پدیده ضربه قوچ، فشار بالادست و پایین دست نمونه به شدت به هم نزدیک می شوند. این مسئله چنین توجیه می شود که مقدار اختلاف فشار در سر مغزه متخلخل در حالت جریان ماندگار، با شروع پدیده ضربه قوچ، فشار بالادست و پایین دست نمونه به شدت به هم نزدیک می شوند. این مسئله چنین توجیه می شود که مقدار اختلاف فشار در سر مغزه متخلخل در حالت جریان ناشی از حرکت جریان در محیط متخلخل، ایجاد اصطکاک و به تبع آن افت انرژی در طول مغزه است، اما ضربه قوچ با بستن ناگهانی شیر ایجاد می شود، بنابراین جریان و اصطکاک وجود نخواهد داشت که باعث افت فشار در مغزه شود. هر چند که در حین پدیده ضربه قوچ علی رغم بسته بودن شیر هم انتقال جرم و به نوعی جریان وجود دارد. برنون و همکاران در سال ۲۰۰۰ پروفیل سرعت این جریان را مورد بررسی قرار دادند، اما مقدار این جریان به دلیل مقدار کم، اصطکاک کمی به وجود می آورد و همچنین جهت این جریان نسبت به زمان تغییر می کند یعنی در بازه های خاص زمانی، جهت جریان از پایین دست به طرف بالادست است (Brunone et al., 2000).

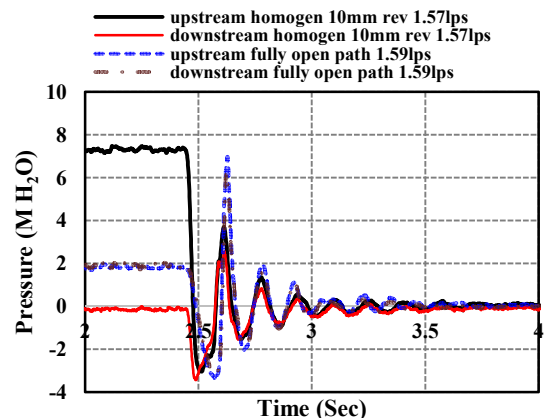


Fig 4. Water hammer in pipe with open path and pipe filled with porous core
 شکل ۴- ضربه قوچ در لوله با مسیر کاملاً باز و لوله دارای مغزه متخلخل

افت محیط متخلخل دارد و توصیه می شود در صورت نیاز به شبیه سازی ضربه قوچ در مسیری که دارای محیط متخلخل است از روش مدل سازی شبه ماندگار با به کارگیری معادله هیکس استفاده شود. اثری که وجود یک مغزه متخلخل در مسیر خط لوله بر موج ضربه قوچ می گذارد در شکل ۴ نشان داده شده است. در این آزمایش که در دبی ۱/۵۸ لیتر در ثانیه انجام شده است، یک بار موج ضربه قوچ در لوله با مسیر کاملاً باز توسط دو ترنسدمیتر بالادست و پایین دست ثبت شد و بار دیگر در همان دبی مغزه ای به طول ۸ سانتی متر و متشکل از ذرات کاملاً کروی به قطر ۱۰ میلی متر



مقابل ضریب افت رسم شده است. ضریب افت از تقسیم کردن مقدار افت بین دو ترنسمیتر به ارتفاع معادل سرعت محاسبه می شود و با k نشان داده خواهد شد.

شکل ۵ نشان می دهد که فشاری که در اولین قله ضربه قوچ به ترنسمیتر پایین دست می رسد، کمتر از فشار ثبت شده در محل ترنسمیتر بالادست است. وجود مغزه و یا به عبارت دیگر ساختاری که باعث افت انرژی در مسیر شود، باعث می شود اختلاف فشار بین ترنسمیترها بیشتر شود. دلیل این مسئله انعکاس فشاری است که بعد از برخورد موج ضربه قوچ با یک افت جزئی رخ می دهد (Contractor, 1965). مطابق مقادیر ارائه شده در این نمودار، نسبت مقادیر فشار بیشینه در سیکل اول ضربه قوچ در ترنسمیتر پایین دست به بالادست بین ۰/۹۵ تا ۰/۶ است. با توجه به نمودار می توان گفت با افزایش ضریب افت نسبت فشارهای بیشینه کاهش می یابد؛ یعنی ترنسمیتر پایین دست فشار کمتری را ثبت می کند. داده های نشان داده شده در شکل ۵ دارای پراکندگی زیادی هستند و از یک روند دقیق پیروی نمی کنند. دلیل این امر این است که در شرایط برقراری جریان آشفته در محیط متخلخل نمی توان مشابه افت ضمام خط لوله مانند یک شیر، مقدار افت را به وسیله یک ضریب k به ارتفاع معادل سرعت ($V^2/2g$) مرتبط ساخت. مطابق نظریه فرشهایمیر در جریان متلاطم در محیط متخلخل، افت انرژی از یک معادله دو جمله ای به دست می آید که در آن ضرایبی مانند a و b برای نمای اول و دوم سرعت وجود دارد ($a(V)+b(V^2)$)

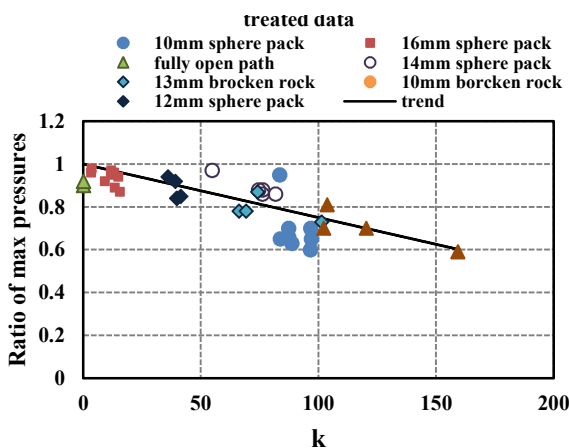


Fig 5. Ratio of maximum pressure against head loss coefficient from downstream to upstream in first cycle of water hammer

شکل ۵- نسبت بیشینه فشار پایین دست به بالادست در اولین قله فشاری ضربه قوچ در مقابل ضریب افت

نتیجه این نمودار نشان می دهد که برخلاف آنچه که در امواج جریان های سطح آزاد رخ می دهد، در مجاری تحت فشار و با وقوع ضربه قوچ، مقدار فشار در هر لحظه در دو طرف مغزه متخلخل تفاوت قابل توجهی نخواهد داشت. البته وجود مغزه به طور کلی باعث کاهش بیشینه فشار ضربه قوچ می شود. در شکل ۴ در محل ترنسمیتر بالادست، وجود مغزه باعث شده حداکثر فشار از محل تراز ۴ به تراز ۲ کاهش یابد و در محل ترنسمیتر پایین دست، حداکثر فشار از تراز ۳ به تراز ۱ کاهش یافته است. در شکل ۴ مشاهده می شود که در اولین سیکل ضربه قوچ، قله بیشینه فشار در دو حالت لوله باز و لوله دارای مغزه روی هم منطبق هستند، اما با گذشت چند سیکل به تدریج وقوع قله فشاری در لوله دارای مغزه نسبت به لوله کاملاً باز به تأخیر می افتد. این مسئله یعنی سرعت حرکت موج فشاری در لوله دارای مغزه نسبت به لوله کاملاً باز کمتر است. در پژوهش های دیگر نیز بیان شده بود که وجود عوارضی نظیر روزه یا مخزن در مسیر انتشار موج فشاری باعث کاهش سرعت آن می شود که این مطلب با مطلب بیان شده در پژوهش حاضر در توافق است و اعتمادپذیری آن را بالاتر می برد (Kim et al., 2007, Mitosek and Szymkiewicz, 2016).

بر اساس تئوری معروف ژاکفسکی در ضربه قوچ، حداکثر فشاری که در طی ضربه رخ می دهد مستقیماً تابع سرعت انتشار موج فشاری است. بنابراین وجود مغزه در خط لوله باعث کاهش سرعت انتشار موج فشاری و در نتیجه کاهش بیشینه فشار ضربه قوچ می شود.

نکته دیگر که در شکل ۴ مشاهده می شود، اختلاف فشار بین ترنسمیتر بالادست و پایین دست در اولین قله فشار مثبت است. این اختلاف فشار حتی در لوله کاملاً باز که هیچ مانعی در مسیر حرکت موج نیست، هم وجود دارد (اختلاف بین تراز ۳ و ۴). این اختلاف به دلیل پخشیدگی و پراکندگی جبهه موج فشاری در مسیر حرکت است که مطابق پژوهش های انجام شده در این زمینه، در فاصله های بیشتر از ۱۰ برابر قطر لوله معنی دار است (Tijsseling et al., 2008). البته این مقدار اختلاف فشار در لوله دارای مغزه (اختلاف بین تراز ۱ و ۲) بیشتر است. نسبت فشاری که در تراز ۱ به تراز ۲ از محور عمودی خوانده می شود، یک عدد بدون بعد است که نشان دهنده نسبت بیشینه فشار در ترنسمیتر پایین دست به بالادست است. در شکل ۵ این نسبت فشار بیشینه در



برای مشاهده این اثر مغزه متخلخل متشکل از ذرات کروی ۱۰ میلی متری با طول‌های مختلف ۸، ۵ و ۲/۵ سانتی متری در مسیر لوله قرار داده شد و در دبی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. در شکل ۷ نتایج حاصل از وجود این مغزه‌ها با طول‌های مختلف مقایسه شده است. شکل ۷-a نتایج ثبت شده توسط ترنسمیتر بالادست و شکل ۷-b نتایج ثبت شده توسط ترنسمیتر پایین دست را در دبی ۱/۲ لیتر بر ثانیه نشان می‌دهند.

شکل ۷ نشان می‌دهد که با کاهش طول مغزه متخلخل و به تبع آن، کاهش افت انرژی در مغزه، نوسانات فشار افزایش پیدا می‌کند. این افزایش نوسانات علاوه بر این که خود را در قالب افزایش مقدار عددی اکسیرم‌های فشار نشان می‌دهد، به معنی طولانی‌تر شدن زمان وقوع نوسانات فشار نیز می‌باشد. به عنوان مثال در مغزه با طول ۸ سانتی متر بعد از ۱/۵ ثانیه نوسانی مشاهده نمی‌شود حال آن که در مغزه‌های با طول کمتر، نوسانات بعد از این زمان نیز ادامه خواهد داشت. نکته حائز اهمیت دیگر که در مورد نوسانات فشار وجود دارد، در شکل‌های ۴ و ۶ نیز قابل مشاهده است اما مقایسه نمودارهای (۷-a) و (۷-b) این مطلب را ملموس تر ارائه می‌کند. در سیکل اول ضربه قوچ مقدار کمینه فشار ثبت شده توسط ترنسمیتر پایین دست، کمتر از کمینه فشاری است که ترنسمیتر بالادست ثبت می‌کند؛ به عبارت دیگر فشار منفی در ترنسمیتر پایین دست شدیدتر است. چنین امری از دیدگاه جریان ماندگار کاملاً منطقی است زیرا در جهت گرایان هیدرولیکی، به ویژه با عبور از یک افت موضعی، مقدار فشار بر اثر اصطکاک کم می‌شود. اما در فرایند ضربه قوچ موج کم فشار بر اثر یک کشش الاستیک در مایع به وجود می‌آید و نه بر اثر اصطکاک که بتوان انتظار داشت با عبور از یک افت موضعی مقدار آن تشدید شود. در سیستم آزمایشگاهی این پژوهش که ضربه قوچ با بستن ناگهانی شیر بالادست خط لوله ایجاد می‌شود، افت فشار به یک مقدار کمینه خاصیتی است که منشاء آن در بالادست خط لوله یعنی محل شیر است. این خاصیت در قالب یک موج در طول خط لوله منتشر می‌شود و تصور می‌شود که تحت تأثیر فرایند پخشیدگی موج باید در مسیر حرکت به طرف پایین دست از شدت این خاصیت، یعنی کم فشار بودن، کاسته شود. اما مشاهده می‌شود که کمینه فشار ثبت شده در ترنسمیتر پایین دست شدیدتر است. همان طور که بیان شد انتهای خط لوله به اتمسفر تخلیه می‌شود، با بستن شیر در بالادست

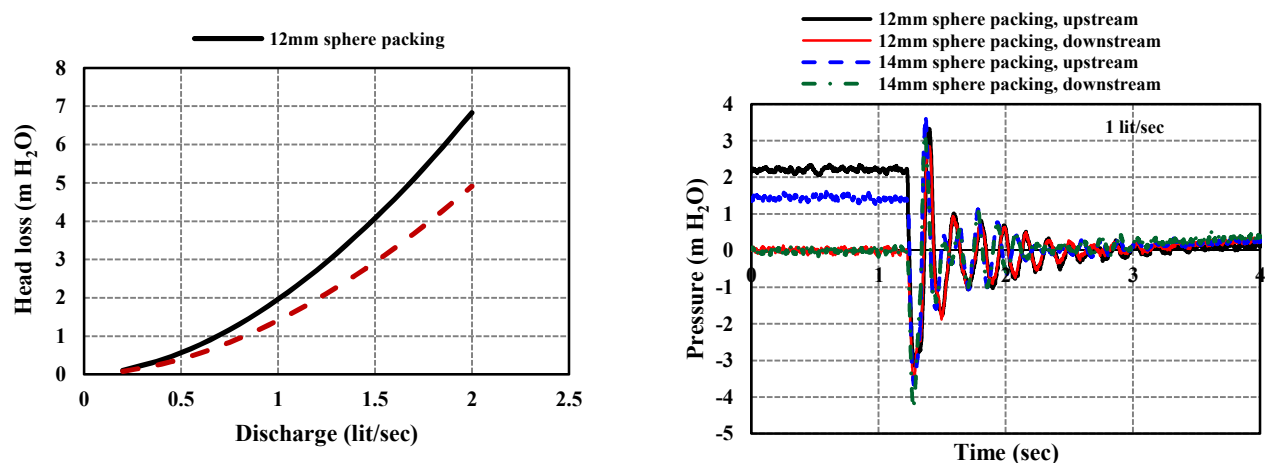
(Macini et al., 2011). از آنجا که در یک نمودار دو بعدی فقط یک پارامتر را می‌توان در مقابل نسبت فشارهای بیشینه رسم کرد به ناچار از ضریب k برای ترسیم نمودار استفاده شده است که پراکندگی موجود در شکل ۵ به این مسئله نسبت داده می‌شود. حدود نسبت فشارهای بیشینه بین ۰/۹۵ تا ۰/۶ است.

شکل‌های ۴ و ۵ تأثیر کلی وجود مغزه بر ضربه قوچ را نشان می‌دهد. امکان مقایسه فشارها در بالادست و پایین دست در این دو شکل میسر است. به علاوه مشخص شد که در اولین قله فشار، در پایین دست، فشار کمتری نسبت به بالادست ثبت می‌شود و نسبت این فشارها مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۶ نشان می‌دهد که مقدار افت انرژی که مغزه ایجاد می‌کند، چه تأثیری بر تیپ موج ضربه قوچ می‌گذارد. داده‌های شکل ۶ مربوط به نتایج آزمایش روی مغزه متخلخل متشکل از ذرات کروی همگن با قطر ۱۲ و ۱۴ میلی متر است. در قسمت (a) این شکل مقدار افت انرژی ایجاد شده توسط این مغزه‌ها در جریان ماندگار، در دبی‌های مختلف که از رابطه هیکس به دست آمده با هم مقایسه شده است و در قسمت (b) ضربه قوچ در مسیر حاوی این مغزه‌ها در دبی ۱ لیتر بر ثانیه با هم مقایسه شده است.

قسمت (a) در شکل ۶ نشان می‌دهد که محیط متخلخل متشکل از ذرات کروی ۱۲ میلی متری افت بیشتری نسبت به محیط متشکل از ذرات کروی ۱۴ میلی متری ایجاد می‌کند و مقدار تفاوت در پتانسیل آن‌ها برای ایجاد افت در این شکل مشهود است. شکل (۶-b) نشان می‌دهد که در ابتدا یعنی در زمان برقراری جریان ماندگار مقدار اختلاف فشار در محل ترنسمیتر بالادست به نسبت زیاد است یعنی مغزه با افت بیشتر، فشار بیشتری در بالادست خود به وجود می‌آورد تا بر افت غلبه کند اما با بستن ناگهانی شیر و شروع ضربه قوچ، مقدار فشارها اختلاف خیلی کمتری با هم دارد. این مطلب بدان معناست که تأثیر افت جزئی بر جریان ماندگار و فشار آن به مراتب بیش از تأثیر آن بر جریان گذرا یا همان ضربه قوچ است. به علاوه هم از شکل ۶ و هم از شکل ۴ استنباط می‌شود که تأثیر وجود مغزه و ضریب افت آن بیشتر در سیکل اول ضربه قوچ خود را نشان می‌دهد و در سیکل‌های بعدی تأثیر به مراتب کمتری دارد.

طول مغزه متخلخل به عنوان عاملی که بر افت در حالت ماندگار تأثیر دارد بر نوسانات فشار در حالت غیرماندگار نیز مؤثر است.





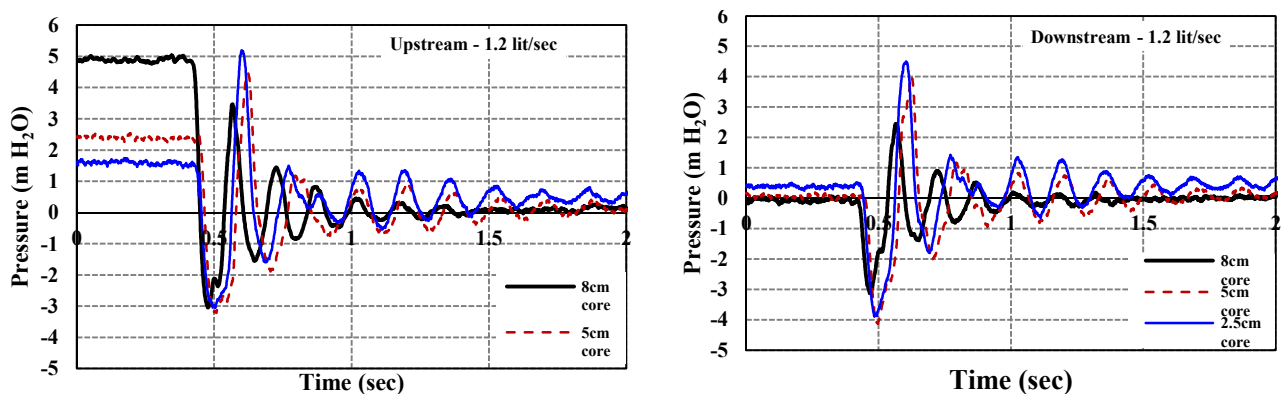
a) Head loss in porous core made of 12 and 14 mm spherical beads in steady flow

(a) مقدار افت در جریان ماندگار در مغزه متشکل از ذرات کروی ۱۲ و ۱۴ میلی متری

b) Water hammer in a pipe filled with cores made of 12 and 14 mm spherical beads in the discharge of 1 lit/sec

(b) ضربه قوچ در مسیر حاوی مغزه متشکل از ذرات کروی ۱۲ و ۱۴ میلی متری در دبی ۱ لیتر بر ثانیه

Fig 6. Comparing water hammer wave in porous media with different head loss factors
شکل ۶- مقایسه موج ضربه قوچ در محیط‌های متخلخل با ضریب افت متفاوت



a) Upstream transmitter, 1.2 lit/sec discharge, porous core made of 10 mm spherical beads

(a) ترنسیمیتر بالادست، دبی ۱/۲ لیتر بر ثانیه، مغزه متشکل از ذرات کروی ۱۰ میلی متری

b) Downstream transmitter, 1.2 lit/sec discharge, porous core made of 10 mm spherical beads

(b) ترنسیمیتر پایین دست، دبی ۱/۲ لیتر بر ثانیه، مغزه متشکل از ذرات کروی ۱۰ میلی متری

Fig 7. Effect of core length on water hammer pressure fluctuations during the experiment time
شکل ۷- تاثیر طول مغزه متخلخل بر نوسانات فشار ضربه قوچ

جانشین شونده فقط تحت تأثیر اینرسی خود در محیط متخلخل به پیش می‌رود. لذا در پایین دست محیط متخلخل فرایند جانشین شدن برای مایع تخلیه شده به دشواری انجام می‌شود و این مسئله موجب بروز افت فشار شدیدتری در این ناحیه می‌شود در حالی که در بالادست محیط متخلخل این مسئله وجود ندارد. بنابراین در لوله حاوی مغزه متخلخل، افت فشار در پایین دست مغزه شدیدتر است.

خط لوله، مایع موجود در آن در لحظه‌های اولیه تحت اینرسی خود به طرف انتهای لوله حرکت می‌کند تا به اتمسفر تخلیه شود. در پایین دست، ساختار متخلخل مایع تحت تأثیر اینرسی خود به طرف انتهای لوله می‌رود در حالی که مایعی که باید جانشین آن شود، باید از محیط متخلخل عبور کند؛ از آنجا که شیر نیز بسته شده است، فشاری برای غلبه بر افت محیط متخلخل وجود ندارد و مایع



شده‌اند.

شکل ۹ نشان می‌دهد که بر خلاف آنچه در شکل ۴ قابل تشخیص است ضربه قوچ در لوله با مسیر کاملاً باز زودتر از لوله حاوی مغزه متخلخل میرا شده و نوسانات آن سرکوب شده است.

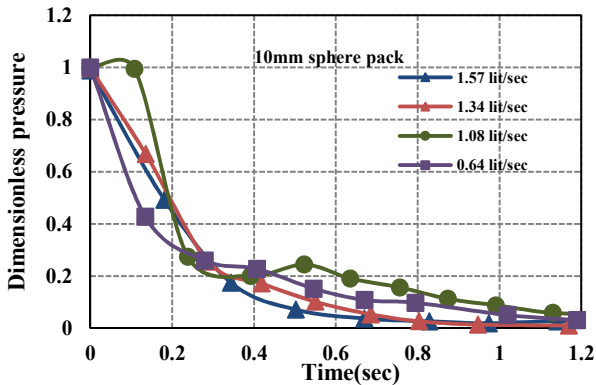


Fig 8. Dimensionless pressure attenuation envelope during experiment time under different discharge rates in a pipe filled with core made of 10 mm spherical beads

شکل ۸- منحنی پوش میرایی بی بعد برای دی‌های مختلف در لوله حاوی مغزه متخلخل متشکل از ذرات ۱۰ میلی‌متری

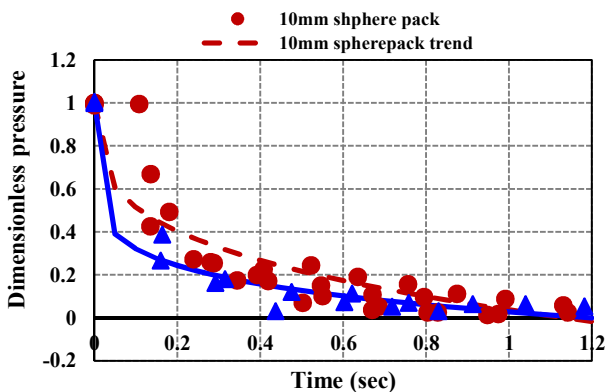


Fig 9. Comparison of dimensionless pressure attenuation envelope against experiment time for water hammer in pipe with open path and pipe filled with porous core made of 10mm spheres

شکل ۹- مقایسه منحنی پوش میرایی ضربه قوچ بی بعد در لوله دارای مغزه متخلخل ۱۰ میلی‌متری و لوله کاملاً باز

فرایند میرایی و استهلاک نوسانات فشار ضربه قوچ بر اثر وجود دو عامل صورت می‌گیرد؛ عامل اول اصطکاک است که جمله محاسباتی مربوط به آن، خود را در معادله اندازه حرکت ضربه قوچ نشان می‌دهد. پیش‌تر نیز گفته شده بود که حتی بعد از بستن ناگهانی شیر و وقوع ضربه قوچ در مسیر لوله، انتقال جرم و یا به عبارت دیگر

میرایی نوسانات فشار ضربه قوچ مسئله مهم دیگری است که به عنوان یک شاخص، تأثیر وجود مغزه روی آن بررسی می‌شود. با گذشت زمان از شروع پدیده ضربه قوچ دامنه نوسانات فشار کاهش می‌یابد تا پس از گذشت مدت زمانی خاص، فشار مجدداً به یک مقدار ثابت برسد. ارتباط بین دامنه نوسانات فشار و مدت زمان استهلاک این نوسانات، نرخ میرایی موج را تعیین می‌کند. نرخ میرایی از جنبه‌های مختلف اهمیت دارد، به عنوان مثال در شوک‌های الکتریکی (قطع و وصل جریان برق) که در ایستگاه‌های پمپاژ رخ می‌دهد، پمپ‌ها ابتدا خاموش شده و یک ضربه قوچ را به سیستم وارد می‌کنند و پس از چند لحظه با وصل مجدد جریان برق پمپ‌ها روشن شده و ضربه قوچ دیگری به سیستم وارد می‌کنند. اگر قبل از آنکه ضربه قوچ اول در سیر میرایی خود از بین رفته باشد، ضربه قوچ دوم به وجود آید، این دو نوسان فشار ممکن است هم فاز و تشدید شوند و یک فشار اضافه بسیار بزرگ را به سیستم تحمیل کنند. اگر در یک نمودار نوسانات فشار ضربه قوچ، تمام قله‌های فشار به هم وصل شود، یک منحنی به وجود می‌آید که با عنوان منحنی پوش میرایی ضربه قوچ شناخته می‌شود. در شکل ۴ به وضوح مشخص است که مساحت زیرین نمودار پوش میرایی در مسیر لوله کاملاً باز، بزرگ‌تر از لوله حاوی مغزه متخلخل است. یعنی وجود مغزه متخلخل باعث شده که دامنه شدت نوسانات کمتر باشد و نوسانات فشار در زمان کمتر و با سرعت بیشتری از بین بروند. اگر در یک نمودار ضربه قوچ تمام مقادیر فشار بر مقدار بیشینه فشار تقسیم شود، منحنی بدون بعد شده و مقادیر فشار بین صفر و یک قرار خواهد گرفت. این کار در لوله حاوی مغزه متخلخل متشکل از ذرات ۱۰ میلی‌متری برای تمام دی‌ها انجام شد و بعد از بی‌بعدسازی آن نمودارها منحنی پوش میرایی برای آن‌ها ترسیم شد که در شکل ۸ نشان داده شده است. هرکدام از نقطه‌های نشان داده شده در نمودار شکل ۸ نشان دهنده یک قله موج است که از به هم وصل کردن آن‌ها منحنی پوش میرایی برای ضربه قوچ در هر دی به دست آمده است. در هم تنیدگی این منحنی‌ها نشان می‌دهد که بعد از بی‌بعدسازی، دی‌ها تأثیر خود را روی منحنی پوش میرایی از دست می‌دهند. لذا از بین تمام این نقاط، یک منحنی برازش داده می‌شود که معرف منحنی پوش میرایی در لوله حاوی مغزه متخلخل ۱۰ میلی‌متری در تمام دی‌ها است. همین کار برای لوله کاملاً باز بدون مغزه انجام شده و منحنی‌های حاصل در شکل ۹ با هم مقایسه



مسیرها در محیط متخلخل مانند نصب مغزه متخلخل در جهت عکس و خالی و پر کردن مجدد محیط متخلخل تاثیری بر هیدرولیک جریان نخواهد داشت زیرا خواص میانگین مسیرها از بین خلخل و فرج محیط متخلخل همگن بدون تغییر خواهد ماند. نتایج اندازه‌گیری افت ماندگار در محیط متخلخل متشکل از ذرات کروی با نتایج حاصل از محاسبه افت با استفاده از روابط تجربی مطابقت خوبی داشت و از بین معادلات به کار برده شده، معادله هیکس دقت بیشتری برای محاسبه افت ماندگار داشت. مقایسه نوسانات فشار ضربه قوچ در لوله کاملاً باز و لوله حاوی مغزه متخلخل نشان می‌دهد که بر خلاف امواج سطح آزاد، محیط متخلخل تأثیر چندانی بر حفاظت پایین دست خود در مقابل ضربه قوچ ندارد و نوسانات فشار در پایین دست و بالادست تقریباً مشابه است اما وجود مغزه متخلخل شدت نوسانات فشار در بالادست و پایین دست را نسبت به حالت عدم وجود مغزه کاهش می‌دهد. دلیل این امر کاهش سرعت انتشار موج فشاری در لوله حاوی مغزه متخلخل است. در سیکل اول ضربه قوچ مقدار بیشینه فشاری که در پایین دست مغزه ثبت می‌شود کمتر از مقدار متناظر ثبت شده در بالادست مغزه است و نسبت این فشار در پایین دست به بالادست بین ۰/۹۵ تا ۰/۶ است که با افزایش ضریب افت محیط متخلخل کاهش پیدا می‌کند. افزایش افتی که محیط متخلخل ایجاد می‌کند از طریق کاهش قطر ذرات، افزایش زبری آن‌ها و افزایش طول محیط متخلخل، موجب کاهش نوسانات فشار می‌شود ولی در همه این حالت‌ها مقدار نوسانات در بالادست و پایین دست مغزه به یک میزان کاهش پیدا می‌کند. نرخ کلی میرایی موج در لوله حاوی مغزه متخلخل بیشتر از نرخ میرایی موج در لوله کاملاً باز است زیرا اصطکاک در این حالت بیشتر است اما با بی‌بعد سازی نوسانات ضربه قوچ، منحنی پوش میرایی نشان می‌دهد که نرخ میرایی ضربه که صرفاً بر اثر مصرف انرژی برای تغییر شکل لوله اتفاق می‌افتد، در لوله کاملاً باز بیشتر از لوله حاوی محیط متخلخل است.

حرکات رفت و برگشتی در مایع درون لوله وجود دارد که موجب بروز اصطکاک می‌شود و نوسانات فشار را مستهلک می‌سازد. وجود مغزه متخلخل در مسیر لوله باعث تشدید این اصطکاک شده و مطابق شکل ۴ استهلاک نوسانات فشار را تسریع می‌کند. عامل دوم ایجاد کننده میرایی در نوسانات اندرکنش مایع درون لوله با ساختار مکانیکی خط لوله است. به عبارت دیگر بخشی از انرژی ضربه، صرف ایجاد تغییر شکل در لوله می‌شود. برای مثال نوع اتصال لوله به محیط اطراف خود و همچنین رفتار ارتجاعی لوله که در لوله‌های فلزی الاستیک و در لوله‌های پلیمری ویسکوالاستیک است، به شدت بر روی میرایی موج مؤثر است. برای رسم منحنی‌های شکل ۹ از منحنی‌های بدون بعد ضربه قوچ استفاده شد، یعنی تمام فشارهای روی منحنی مربوط به هر دبی به بالاترین فشار آن منحنی تقسیم شد، به همین خاطر ضربه قوچ تمام منحنی‌ها بین صفر تا ۱ خواهد بود. این یعنی اثر دبی از آن منحنی‌ها خارج شده است زیرا طبق تئوری ژاکوفسکی بیشترین مقدار فشار ضربه قوچ مستقیماً تابع سرعت جریان در لوله است و سرعت با در نظر گرفتن اثر سطح مقطع لوله که یک مقدار ثابت است، همان دبی است. با تقسیم تمام فشارها بر این مقدار در هر منحنی اثر سرعت از آن حذف شده و به تبع آن اثر اصطکاک نیز حذف شد. لذا آنچه در شکل ۹ در مورد میرایی موج دیده می‌شود، مربوط به اصطکاک نیست و بر اثر گرفتن انرژی از ضربه قوچ و صرف آن برای تغییر شکل (انبساط و انقباض) لوله ایجاد شده است که مشاهده می‌شود نرخ این نوع میرایی در لوله بدون مغزه بیشتر است. پژوهشگران دلیل این مسئله را کمتر بودن سرعت انتشار موج فشاری در لوله حاوی مغزه متخلخل نسبت به لوله با مسیر کاملاً باز می‌دانند.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌ها روی محیط متخلخل نشان داد که علی‌رغم این که هیدرولیک جریان تابع مسیرها است، عوامل تأثیرگذار روی

References

- Anderson, M.E. & Smith, J.M. 2014. Wave attenuation by flexible, idealized salt marsh vegetation. *Journal of Coastal Engineering*, 83, 82-92.
- Asiabab, P., Amir, E. & Tahmasebi nasab, M. 2015. Simulation of water surface profile in vertically stratified rockfill dams. *International Journal of Environmental Research*, 9(4), 1193-1200.



- Abbas, M.N. 2011. Modeling of porosity equation for water flow through packed bed of monosize spherical packing. *Journal of Engineering and Development*, 15, 205-226.
- Brunone, B., Karney, B.W., Mecarelli, M. & Ferrante, M. 2000. Velocity profile and unsteady pipe friction in transient flow. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(4), 236-244.
- Chaudhry, M. H. 2014. *Applied hydraulic transients*, 3th Ed., Springer, New York.
- Contractor, D.N. 1965. The reflection of water hammer pressure wave from minor losses. *Journal of Basic Engineering*, 87 (2), 445-451.
- Erdim, E., Akgiray, O. & Demir I. 2015. A revisit of pressure drop-flow rate correlations for packed beds of spheres. *Journal of Powder Technology*, 283, 488-504.
- Funk, J.E., Wood, D.J. & Chao, S.P. 1972. The transient response of orifices and very short lines. *Journal of Basic Engineering*, 94 (2), 483-489.
- Huang, L.H. & Chao, H.I. 1992. Reflection and transmission of water wave by porous breakwater. *Journal of Waterways Ports Coasts and Ocean Engineering*, 118(5), doi: io.1061/(ASCE)0733-950.
- Kim, Y.I., Simpson, A.R. & Lambert, M.F. 2007. Behavior of orifices and blockages in unsteady pipe flow. *9th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis*, ASCE, Tampa, Florida, USA.
- Macini, P., Mesini, E. & Viola R. 2011. Laboratory measurements of non-Darcy flow coefficients in natural and artificial unconsolidated porous media. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 77, 365-374.
- Mitosek, M. & Szymkiewicz, R. 2016. Reservoir influence on pressure wave propagation in steel pipes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(8), doi: 10.1061/(ASCE) HY. 1943-7900. 0001140.
- Mora-rodriguez, J., Delgado-galvan, X., Ortiz-medel, J., Ramos, H., Fuertes, V. & Lopez-jimenez, P. 2014. CFD simulation of pathogen intrusion during hydraulic transients in water distribution networks. *7th International Congress on Environmental Modeling and Software*, San Diego, USA.
- Rdige, S. 2010. *Condensation induced water hammer events – potential consequences of allowing steam and sub-cooled water or slurry to mix*, Mines Safety Bulletin No.92, Mineral House, Australia.
- Sharp, B.B. & Sharp, D.B. 1996. *Water hammer practical solutions*, Butterworth-Heinemann publications, UK.
- Stephenson, D. 1997. Effect of air valves and pipework on water hammer pressures. *Journal of Transportation Engineering*, 123(2), 101-106.
- Stephenson, D. 2002. Simple guide for design of air vessels for water hammer protection of pumping lines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128, 792-797.
- Tijsseling, A.S., Lambert, M.F., Simpson, A.R., Stephens, M.L., Vitkovsky, J.P. & Bergant, A. 2008. Skalak's extended theory of water hammer. *Journal of Sound and Vibration*, 310, 718-728.
- Vereide, K.V. 2016. *Hydraulics and thermodynamics of surge tanks for hydropower plant*. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

