

شبیه‌سازی پدیده ضربه قوچ با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی CFD

محمد رضا نیک‌پور^{1*}، علی حسین زاده دلیر²، امیر حسین ناظمی³، فرزین سلماسی⁴ و داود فرسادی زاده²

تاریخ دریافت: 88/5/8 تاریخ پذیرش: 89/2/29

1- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

2 و 3- به ترتیب دانشیار، استاد و استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبه: E-mail: rezanikpoor@yahoo.com

چکیده

ضربه قوچ یکی از پدیده‌های مخرب هیدرولیکی است که در جریان‌های تحت فشار سیستم‌هایی از قبیل ایستگاه‌های پمپاژ، خطوط انتقال آب و نفت و تأسیسات برق‌آبی به صورت امواج فشاری ایجاد می‌شود. نظر به اهمیت بررسی دقیق ضربه قوچ در شبکه‌های لوله‌کشی و خطوط انتقال مایعات، در تحقیق حاضر این پدیده با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی برای دو حالت با استفاده از لوله موج‌گیر و بدون آن مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های جمع‌آوری شده از مدل آزمایشگاهی به ازای دبی‌های مختلف در بازه‌های زمانی دلخواه با نتایج حاصل از مدل عددی CFD مقایسه گردید. با توجه به کارایی نرم‌افزار FLUENT در شبیه‌سازی حرکت سیالات و اندرکنش آب و سازه، پس از تعیین بهترین شبکه و بهترین مدل آشفتگی، پدیده مذکور در حالت خاص قطع ناگهانی شیر فلکه با استفاده از مدل حجم سیال شبیه‌سازی گردید. لازم به ذکر است که پس از آزمون مدل‌های آشفتگی $k-\varepsilon$ و RSM مدل $k-\varepsilon$ REALIZABLE به عنوان بهترین مدل شناخته شد. در نهایت با استفاده از پارامترهای آماری R^2 ، RMSE و RE نتایج حاصل از مدل عددی با مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مدل عددی CFD در شبیه‌سازی پدیده ضربه قوچ از قابلیت بالایی برخوردار بوده و می‌توان از آن به عنوان یک مدل عددی مناسب جهت محاسبه مقادیر فشارهای حداکثر و حداقل بهره برد.

واژه‌های کلیدی: ضربه قوچ، لوله موج‌گیر، مدل آشفتگی، مدل حجم سیال، CFD، FLUENT

Water Hammer Simulation Using Experimental and CFD Numerical Models

MR Nikpour^{1*}, A Hosseinzadeh Dalir², AH Nazemi³, F Salmasi⁴, D Farsadizadeh²

Received: 30 July 2009 Accepted: 19 May 2010

¹ PhD Student., Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran.

^{2,3,4} Assoc. Prof., Prof. and Assist. Prof., Water Engin. Dept., Faculty of Agric., Univ. of Tabriz, Iran.

*Corresponding author: E-mail: rezanikpoor@yahoo.com

Abstract

Water hammer is one of the destructive hydraulic phenomena that occurs in the form of pressure waves in the Pressurized fluid flow systems such as pumping stations, water and oil pipe lines, and hydro-electric installations. Due to importance of water hammer and its destructive effect on pipeline networks, this phenomenon was studied in this investigation by using experimental and numerical models considering two different cases, with and without surge pipe. Data collected for different discharges in arbitrary time intervals were compared with results of CFD numerical model. After determining the optimum network and proper turbulence model the effect of unexpected stopping of water valve on fluid motion and reaction between water and structure was simulated using Fluent software. After testing $k-\varepsilon$ and RSM turbulence models, the $k-\varepsilon$ Realizable model found to be the best model. Finally, the results of the numerical model were compared with those of experimental model using the statistical analysis, R^2 , RMSE and RE. The results showed a good agreement between CFD numerical model and experimental model. So CFD model can be used as a suitable numerical model for computing maximum and minimum pressure.

Keywords: CFD, Fluent, Optimum network, Surge pipe, Turbulence model, Water hammer

مقدمه

کامپیوترهای دیجیتالی و توانایی و سرعت عمل زیاد آنها در حل معادلات دیفرانسیل، دستگاه‌های معادلات خطی و غیر خطی و روش‌های عددی متعدد، این روش‌ها کنار گذاشته شدند.

وود¹ در سال 1970 و میچاود² در سال 1978 اولین کسانی بودند که ضربه قوچ را مورد بررسی قرار دادند. میچاود مسأله ضربه قوچ و طراحی استفاده از

مطالعه جریان‌های غیر ماندگار با بررسی پدیده انتشار امواج صوتی در هوا و انتشار امواج در آب‌های کم‌عمق و همچنین جریان خون در شریان‌ها شروع شد. با این وجود هیچ یک از این مسائل تا زمانیکه تئوری الاستیسیته، حساب انتگرال و حل معادلات دیفرانسیل جزئی توسعه نیافته بود، قابل حل نبودند.

در گذشته جهت تحلیل جریان‌های غیر ماندگار از روش‌های ترسیمی استفاده می‌شد. ولی با ظهور

¹ Wood

² Michaud

سیستم خط لوله، دست پیدا کردند. در نهایت مدل GA نسبت به PSO نتیجه بهتری داد.

کیم (2008) با کاربرد ماتریس‌های امیدانس ارتباط شرایط جریان از حالت ورقه‌ای به آشفتگی و برعکس را شبیه‌سازی نمود. با استفاده از این روش که اصطلاحاً روش پاسخ ضربه‌ای⁴ (IRM) نامیده می‌شود، می‌توان موقعیت نصب و هندسه ابزارهای هیدرولیکی محافظ خطوط انتقال آب را با دقت بالا طراحی و پیاده نمود. مثالهای کاربردی نشان می‌دهد که شبیه‌سازیهای صورت گرفته توسط روش IRM با نتایج بدست آمده از روش MOC⁵ مطابقت دارد.

حسن‌زاده و همکاران (1382) طی یک کار تحقیقاتی وقوع پدیده ضربه قوچ را در یک ایستگاه پمپاژ فشار قوی مورد مطالعه قرار داده و پس از تحلیل معادلات حاکم بر پدیده به روش خطوط مشخصه، ایستگاه پمپاژ مورد نظر را با در نظر گرفتن ابزارهای مختلف کنترل فشار از قبیل محفظه هوا، چرخ طیار، تانک موج گیر و ترکیبی از محفظه هوا و تانک موج گیر مورد بررسی قرار دادند. در نهایت محفظه هوا به عنوان بهترین وسیله جهت کنترل فشارهای ناشی از ضربه قوچ شناخته شد.

علیرغم تحقیقات وسیع صورت گرفته در زمینه وقوع پدیده ضربه قوچ و راه‌های کنترل آن، از مدل عددی CFD⁶ هم می‌توان به عنوان روشی جدید جهت شبیه‌سازی این پدیده استفاده کرد. با توجه به کارایی نرم افزار FLUENT در شبیه‌سازی حرکت سیالات و اندرکنش آب و سازه، در تحقیق حاضر پدیده مذکور در حالت قطع ناگهانی شیر فلکه به روش حجم محدود با استفاده از مدل حجم سیال⁷ شبیه‌سازی گردید.

محفظه‌های هوایی تحت فشار و شیر اطمینان را مورد مطالعه قرار داد (حسنی 1380).

استریتر و وایلی (1993) برای تحلیل خطوط انتقال آب مجهز به مخزن موج‌گیر و لوله هوا از روش خطوط مشخصه استفاده نمودند. آنها همچنین با استفاده از آزمایشات خود نشان دادند که جریان‌های میرا در سیستم‌های انتقال آب می‌تواند منجر به بروز فشارهای بیش از حد یا فشارهای منفی شود که برای محافظت سیستم و جلوگیری از بروز خسارت نیازمند لوله‌های ضخیم و ابزارهای محافظتی مانند مخزن موج‌گیر یا لوله هوا¹ می‌باشد.

لینگریدی و همکاران (2000) طرح بهینه‌سازی مخزن موج‌گیر را با یک سری محدودیت‌های فشاری تحت عنوان بهینه‌سازی مقید حالت غیر ماندگار با روش‌های عمومی بهینه‌سازی مثل الگوریتم ژنتیک ارائه دادند که شروع کار بهینه‌سازی مقید در جریان غیر ماندگار لوله‌ها با روش فوق به شمار می‌آید.

استیفنسن (2002) بر اساس نتایج بدست آمده از مدل فیزیکی، لوله‌های هوا دهنده را ابزاری مناسب جهت محافظت از خط لوله در مقابل پدیده ضربه قوچ معرفی کرد. او با استفاده از آزمایشات خود نشان داد که استفاده از لوله هوا می‌تواند خسارات ناشی از امواج به وجود آمده در سیستم خط انتقال در اثر قطع ناگهانی پمپ، حرکات سریع شیر فلکه و... را تا حدود زیادی کنترل نماید.

جانگ و کارنی (2006) از مدل‌های GA² و PSO³ برای بهینه‌سازی خطوط انتقال آب و کاهش خسارات ناشی از ضربه قوچ استفاده کردند. آنها با تعیین موقعیت بهینه تجهیزات کنترل سیستم انتقال آب و همچنین انتخاب قطر، جنس و ضخامت مناسب برای لوله‌ها به توابع هدف سیستم که عبارت بودند از حداقل کردن فشار مثبت، حداکثر نمودن فشار منفی و حداقل کردن اختلاف میان حداقل و حداکثر بار موجود در

⁴ Impulse response method

⁵ Method of characteristic

⁶ Computational fluids dynamic

⁷ Volume of fluid model

¹ Air pipe

² Genetic algorithm

³ Particle swarm optimization

مواد و روشها

مدل آزمایشگاهی

تحقیق بر روی دستگاهی که در آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز واقع شده است، انجام گرفت. مشخصات هندسی دستگاه همان گونه که در شکل 1 نشان داده شده است به شرح زیر می باشد:



شکل 1- شمای کلی دستگاه آزمایش ضربه قوچ

که به لوله موج گیر¹ نزدیکتر است به منظور قطع ناگهانی جریان به کار گرفته می شود. شیر فلکه دوم که قابلیت باز و بسته شدن با دور بالا را دارا می باشد، به عنوان شیر تنظیم دبی خروجی دستگاه به کار گرفته شده است. برای برقراری جریان ماندگار در دستگاه باید دبی ورودی با خروجی یکسان باشد که مدتی پس از باز نمودن شیر فلکه دوم این تعادل برقرار می شود. به منظور مستهلک کردن امواج فشاری ناشی از پدیده ضربه قوچ لوله موج گیر پلاستیکی به طول 2/38 متر و قطر داخلی 63 میلیمتر در فاصله 23 سانتیمتری شیر اول نصب شده است. در محل کار گذاری لوله مبدلی² جهت ثبت تغییرات فشار هیدرواستاتیکی آب تعبیه شده است. لازم به توضیح است که مقادیر ثبت شده توسط مبدل فشار به کامپیوتر منتقل شده و به صورت فایل EXCEL قابل مشاهده است.

آزمایشات به ازای دبی های بین 20-50 لیتر بر دقیقه و در دو دسته مجزا انجام گرفتند:

مدل آزمایشگاهی با استفاده از لوله موج گیر

ابتدا با تنظیم دبی پمپاژ مورد نیاز توسط روتامتر، جریان در دستگاه برقرار می شود. با باز و بستن آهسته و تدریجی شیر فلکه دوم، جریان دستگاه ماندگار می گردد.

در این حالت معیار ماندگاری جریان، ثابت شدن سطح آب در مخزن دوم و لوله موج گیر است. همچنین با توجه به اینکه مبدل قادر به ثبت لحظه ای مقادیر فشار آب می باشد، با استفاده از آن نیز می توان ماندگاری جریان را تشخیص داد. پس از برقراری جریان ماندگار با استفاده از شیر فلکه اول جریان به طور ناگهانی قطع گردید. در این شرایط جریان میرای هیدرولیکی تشکیل می شود. پس از گذشت مدت زمانی بسته به میزان فشار ایجاد شده، دوباره جریان به حالت ماندگار تبدیل می شود که متفاوت از جریان ماندگار اولیه است. در این حالت لوله موج گیر نقش استهلاك انرژی ناشی از ضربه

دستگاه دارای 2 مخزن یکسان به ابعاد 30×90×90 سانتی متر می باشد که به صورت 2 طبقه روی شاسی دستگاه نصب شده اند. مخزن بالایی به یک لوله تغذیه 20 میلی متری متصل است. تغذیه مخزن توسط یک پمپ که دبی و هد پمپاژ آن به ترتیب 70-15 لیتر بر دقیقه و 21-12/5 متر می باشد، صورت می گیرد. دبی پمپاژ توسط یک روتامتر که در مسیر لوله تغذیه تعبیه شده است، در محدوده 50-5 لیتر بر دقیقه قابل اندازه گیری می باشد.

مخزن دوم نیز از مخزن بالایی آگیری می کند. لوله ای از جنس PVC به طول 4 متر و قطر 40 میلیمتر از مخزن دوم آگیری می کند. در انتهای لوله انتقال آب، 2 عدد شیر فلکه کار گذاشته شده است. شیر فلکه اول

¹ Surge pipe

² Transducer

- (1) $a_q = 0$ ، سلول از سیال q خالی می‌باشد.
 (2) $a_q = 1$ ، سلول پر از سیال q می‌باشد.
 (3) $0 < a_q < 1$ ، سلول حاوی سطح مشترک بین سیال q و یک یا چند سیال دیگر می‌باشد (بی‌نام (2006).

معادله کلی حاکم بر جریان، معادلات پیوستگی و مومنتوم ناویر-استوکس می‌باشد.
 معادله پیوستگی رینولدز به صورت زیر می‌باشد (اندرسون و همکاران 1997):

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{r} u_j + \bar{r}' u'_j) = 0 \quad [1]$$

معادله مومنتوم ناویر-استوکس متوسط رینولدزی بصورت زیر می‌باشد (اندرسون و همکاران 1997):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [(\bar{r} + \bar{r}')(\bar{u} + \bar{u}')] + \\ & \frac{\partial}{\partial x} [(\bar{r} + \bar{r}')(\bar{u} + \bar{u}')(u + \bar{u}) + (\bar{p} + \bar{p}') - t_{xx}] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} [(\bar{r} + \bar{r}')(\bar{u} + \bar{u}')(v + \bar{v})] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} [(\bar{r} + \bar{r}')(\bar{u} + \bar{u}')(w + \bar{w}) - t_{xz}] = 0 \end{aligned} \quad [2]$$

مدل **k-ε**: مدل $k-\epsilon$ که شامل سه نوع STANDARD، RNG⁷ و REALIZABLE می‌باشد دارای دو معادله مستقل براساس k, e هستند. در این مدل k معرف انرژی جنبشی اغتشاش⁸ و e معرف نرخ تلفات انرژی جنبشی اغتشاش⁹ می‌باشد.
 مدل **RSM**: در مدل‌های تنش رینولدز که به عنوان مدل‌های معادله تنش نیز نامیده می‌شوند، علاوه بر معادلات k, e سه معادله اضافه نیز جهت تحلیل تنش حل می‌گردد. در این مدل تنش برشی اغتشاش درصدی از نرخ متوسط کرنش در نظر گرفته می‌شود

قوچ را به عهده دارد و تا زمانیکه فشار ضربه قوچ به طور کامل مستهلک گردد، سطح آب داخل لوله نوسان خواهد داشت

مدل آزمایشگاهی بدون استفاده از لوله موج‌گیر

دسته دوم آزمایشات با غیر فعال کردن لوله موج‌گیر انجام گرفت. هدف از انجام این آزمایشات پیدا کردن مقدار واقعی فشار ضربه قوچ می‌باشد. در این حالت نیز با کنترل شیر فلکه دوم و مشاهده مقادیر فشار آب توسط مبدل فشار جریان ماندگار در سیستم برقرار شده و پس از برقراری جریان ماندگار، با استفاده از شیر فلکه اول جریان به طور ناگهانی قطع شد و مقادیر بار آبی نیز بر اساس گام‌های زمانی تعیین شده ثبت گردید. در این حالت نیز جریان میرای هیدرولیکی تشکیل می‌شود. با اینکه فشار ایجاد شده در این حالت بیشتر از حالت قبل یعنی انجام آزمایش در حضور لوله موج‌گیر بود، اما مدت زمان کمتری لازم است تا دوباره جریان به حالت ماندگار بازگردد.

مدل عددی

در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار FLUENT بر اساس معادلات پیوستگی و مومنتوم، و کاربرد مدل‌های آشفتگی برای جریان چندفازی¹ و با استفاده از تکنیک حل عددی حجم محدود² و الگوریتم‌های حل همزمان سرعت-فشار (SIMPLE³ و PISO⁴) پدیده ضربه قوچ در حالت قطع ناگهانی شیر فلکه شبیه‌سازی گردید. برای شبیه‌سازی جریان چند فازی از مدل حجم سیال⁵ و برای شبیه‌سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی $k-e$ و مدل RSM⁶ استفاده گردید.

روش حجم سیال: اگر نسبت حجمی سیال q در سلول بصورت a_q نشان داده شود، بنابراین یکی از سه شرط زیر وجود دارد:

¹Multi phase flow
²Finite volume method
³Semi-implicit method for pressure-linked equations
⁴Pressure-implicit with splitting of operators
⁵Volume of fluid (VOF)
⁶Reynolds stress model

⁷ Renormalization-group $k-e$ model (RNG)
⁸Turbulent kinetic energy
⁹Dissipation rate of turbulent kinetic energy

که در جریان‌های تراکم ناپذیر فرم کلی معادله آن به صورت زیر است:

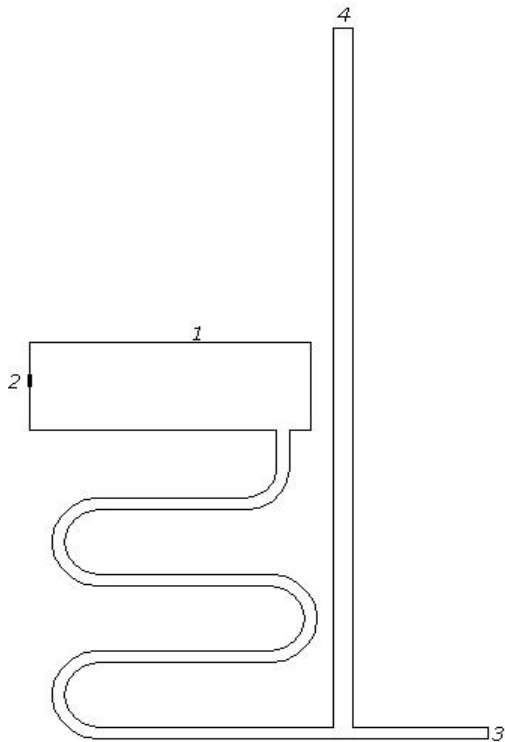
$$-ru \overline{v'} = m_T \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad [3]$$

که در آن m_T بیانگر گرانشی اغتشاش و u', v' معرف سرعت لحظه‌ای در جهت‌های x, y می‌باشند.

مراحل انجام کار

به منظور مستقل کردن سازه از شبکه، 4 مدل با تعداد شبکه‌های مختلف به ازای یک دبی و شرایط هیدرولیکی ثابت برای هر دو حالت مورد ارزیابی قرار گرفت. تعداد کل المان‌های بهینه در حالت همراه با لوله موج‌گیر 12000 و در حالت بدون آن 9180 عدد در نظر گرفته شد. برای شبکه‌بندی زانوها از المان‌های مثلثی (Tri) نوع Pave و در بقیه موارد از المان‌های مربعی (Quad) نوع Map استفاده گردید. در مرحله بعد نوع شرایط مرزی موجود در مدل تعریف شدند. شرایط مرزی مورد استفاده با توجه به شکل 2 به شرح زیر می‌باشند:

برای مرزهای 1 و 4 چون در معرض مستقیم هوا قرار دارند، خروجی فشار¹ برابر فشار هوا در نظر گرفته شد. مرز 1، سطح آزاد مخزن و مرز 4، سطح آزاد لوله موج‌گیر می‌باشد. همچنین برای مرزهای 2 و 3 که به عنوان ورودی و خروجی مدل در نظر گرفته شده‌اند، شرط مرزی ورودی سرعت² انتخاب گردید. مرز 2، منفذی است که از آن آب وارد مخزن می‌شود و مرز 3، انتهای خروجی لوله انتقال می‌باشد. لازم به توضیح است که به ازای هر دبی، سرعت ورودی متناسب با آن در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر با توجه به اینکه مخزن اولی نقشی در محاسبات ندارد، از مدل عددی حذف گردید. سایر شرایط مرزی نیز دیواره در نظر گرفته شدند.



شکل 2- شمای مورد استفاده در مدل عددی

در نهایت مدل شبکه‌بندی شده به همراه شرایط مرزی اعمال شده با فرمت msh^3 به نرم‌افزار FLUENT منتقل می‌شود. اولین گام پس از ورود به نرم افزار، کنترل شبکه موجود از لحاظ نداشتن حجم منفی، تطابق تعداد گره‌ها و المان‌های موجود و کنترل شرایط مرزی است. سپس رژیم جریان را به صورت غیر ماندگار به مدل معرفی کرده و گام زمانی مورد نیاز جهت حل و همگرایی معادلات تعیین می‌شود. در مسأله موجود گام زمانی مناسب 0/1 ثانیه اختیار گردید. مرحله بعد معرفی جریان دو فاز آب و هوا و تعیین مدل جهت شبیه سازی جریان دو فاز است. با توجه به اینکه در مدل حجم سیال تمام معادلات برای فاز ثانویه حل شده و به فاز اولیه تعمیم داده می‌شود، لذا فاز اولیه و ثانویه به ترتیب هوا و آب در نظر گرفته می‌شوند. سپس معادله آشفتگی مناسب انتخاب می‌شود. در مسأله موجود جهت تحلیل آشفتگی از معادلات k-ε و RSM استفاده گردید. جهت تعیین بهترین مدل

¹ Pressure outlet

² Velocity inlet

³ Mesh

شده است، به عنوان محل برداشت مقادیر فشار هیدرواستاتیکی به نرم افزار معرفی شد.

همچنین مقدار سرعت انتشار موج برای حالت بدون لوله موج‌گیر بر اساس زمان رفت و برگشت موج و طول مسیر پیموده شده، محاسبه و با نتیجه حاصل از رابطه هالیول² مقایسه گردید. هالیول رابطه عمومی زیر را برای سرعت موج پیشنهاد کرده است (آشفته و پزشکی‌نژاد 1369):

$$a = \sqrt{\frac{k}{r(1 + \frac{kD}{Ee})}} \quad [4]$$

که در آن a سرعت انتشار موج، k مدول حجمی سیال، ρ چگالی سیال، D قطر لوله، E مدول الاستیسیته جدار لوله و e ضخامت جدار لوله می‌باشد.

نتایج و بحث

در شکل 3 درصد خطای محاسباتی مربوط به مدل‌های آشفته‌گی مختلف برای حالت با استفاده از لوله موج‌گیر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مدل RSM با 0/59 درصد خطا و مدل $k-\varepsilon$ STANDARD با 0/75 درصد خطا به ترتیب از کمترین و بیشترین درصد خطا برخوردار بودند، اما با توجه به اینکه خطای مدل $k-\varepsilon$ REALIZABLE نسبت به مدل RSM تفاوت ناچیزی داشته و از سوی دیگر به مدت زمان خیلی کمتری نسبت به مدل RSM برای ماندگار شدن جریان نیاز دارد، لذا مدل $k-\varepsilon$ REALIZABLE به عنوان مدل بهینه انتخاب گردید. در شکل 4 نیز نموداری مشابه نمودار 3 برای حالت بدون استفاده از لوله موج‌گیر نشان داده شده است. در این حالت نیز مدل‌های RSM و $k-\varepsilon$ STANDARD کمترین و بیشترین خطا را شامل می‌شوند که در این حالت نیز مدل $k-\varepsilon$ REALIZABLE به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید.

آشفته‌گی به ازای شرایط مرزی و هیدرولیکی یکسان هر یک از مدل‌های آشفته‌گی جریان دو بعدی را مورد ارزیابی قرار داده و در نهایت بر اساس درصد خطای نسبی و زمان مورد نیاز برای اجرای برنامه، بهترین مدل آشفته‌گی تعیین شد.

یکی از مراحل مهم، تعیین پارامترهای شرایط مرزی از قبیل مقادیر سرعت‌های ورودی و خروجی، زبری دیواره‌ها و همچنین مقادیر k و ε است که در حالت پیش فرض نرم افزار FLUENT این مقادیر به صورت ثابت تعریف می‌شوند. از سوی دیگر با توجه به اینکه برای اعمال ضربه قوچ نیاز به تعریف شرایط مرزی به صورت متغیر زمانی است، برای مرزهای 2 و 3 که شرط مرزی آنها سرعت ورودی است، برنامه‌ای به زبان C (UDF)¹ تعریف گردید که بر اساس آن سرعت ورود و خروج جریان به سیستم پس از رسیدن جریان به حالت ماندگار، به صفر می‌رسد. در واقع رسیدن سرعت به مقدار صفر در ورودی و خروجی معادل خاموش کردن ناگهانی پمپ و بستن آنی شیر فلکه در مدل آزمایشگاهی می‌باشد. به منظور تعیین زمان مورد نیاز برای ماندگار شدن جریان قبل از اعمال ضربه قوچ، تمام مدل‌های موجود به ازای دبی‌های معلوم و بدون استفاده از UDF اجرا گردید که در این حالت برای سرعت‌های ورودی و خروجی مدل، مقادیر ثابت جریان ماندگار در نظر گرفته شدند. پس از اعمال ضربه قوچ، مدت زمانی نیز برای مدل عددی (تا ثابت شدن پارامترهای جریان مانند سرعت و فشار) در نظر گرفته شد تا دوباره جریان به حالت ماندگار دیگری برسد که متفاوت از جریان ماندگار اولیه است. با توجه به اینکه نرم‌افزار FLUENT از این قابلیت برخوردار می‌باشد که در نقطه‌ای معین از مدل شبیه‌سازی شده پارامترهای هیدرولیکی از قبیل فشار هیدرواستاتیکی، سرعت جریان و... را بر اساس گام زمانی تعیین شده برداشت کند، لذا مختصات نقطه کارگذاری مبدل فشار که در مدل آزمایشگاهی دقیقاً زیر لوله موج‌گیر نصب

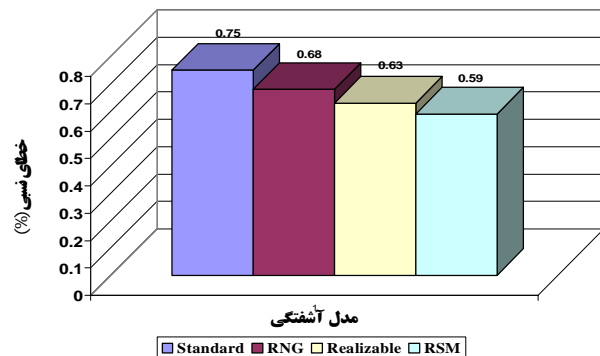
² Halliwell

¹ User defined function

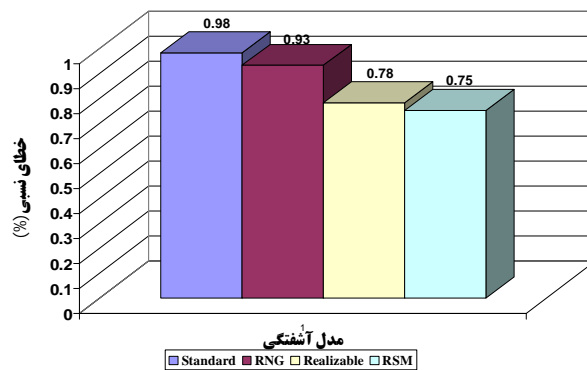
شیر فلکه سرعت جریان ناگهانی به صفر می‌رسد و فشار به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. افزایش سریع فشار باعث ایجاد یک جبهه تند فشار می‌گردد که با سرعتی به اندازه سرعت انتشار موج به سمت مخزن حرکت می‌کند. پس از رسیدن جبهه موج مثبت به مخزن به علت اختلاف فشار موجود بین مخزن و شیر فلکه، جبهه موج به سمت شیر فلکه باز می‌گردد. با رسیدن موج به ابتدای شیر فلکه چون منبعی برای ادامه جریان وجود ندارد، موج فشاری تغییر جهت داده و این بار جبهه موج منفی به سمت مخزن حرکت می‌کند. در هر رفت و برگشت جبهه موج به علت افت اصطکاکی موجود، از میزان فشار اولیه کاسته شده و تا مستهلک شدن کامل آن این نوسانات ادامه دارد.

با توجه به اینکه اضافه فشار ایجاد شده با سرعت اولیه جریان رابطه مستقیم دارد، با افزایش دبی جریان مقادیر فشارهای حداکثر و حداقل افزایش یافته و مدت زمان بیشتری نیز برای مستهلک شدن کامل آن لازم است. با مقایسه شکل‌های 5 و 6 می‌توان مستهلک شدن موج ناشی از ضربه قوچ را در حالت با استفاده از لوله موج‌گیر و بدون آن مورد بررسی قرار داد. نحوه عملکرد لوله موج‌گیر به این صورت است که با خارج کردن آب از خط لوله در هنگام عبور امواج فشاری مثبت و تزریق آب به خط لوله در هنگام عبور امواج فشاری منفی از شدت موج ایجاد شده کاسته و محدوده تغییرات فشار را کاهش می‌دهد. در صورت عدم استفاده از لوله موج‌گیر، فشارهای حداکثر و حداقل ایجاد شده به مراتب از مقادیر بزرگتری برخوردار می‌باشند اما مدت زمان کمتری لازم است تا موج ایجاد شده مستهلک گردد و جریان به حالت ماندگار ثانویه برسد. با توجه به اینکه در این حالت ابزار مستهلک کننده فشار وجود ندارد، مقادیر واقعی فشار ایجاد شده از ضربه قوچ توسط مبدل گزارش می‌شود.

شکل‌های 7 و 8 نیز نمودارهای حاصل از مدل عددی را نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌کنید دامنه نوسانات موجود و همچنین زمان لازم برای مستهلک شدن موج از تطابق خوبی با مدل آزمایشگاهی برخوردار است.

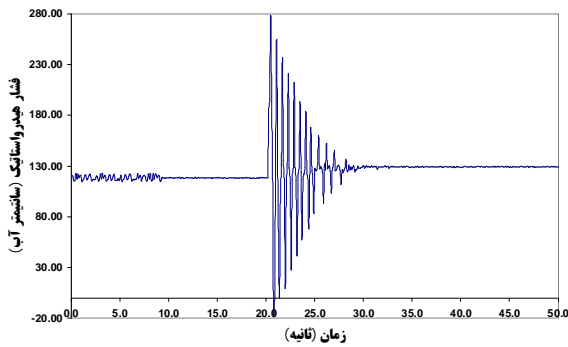


شکل 3- نمودار مربوط به تعیین مدل آشفتگی با استفاده از لوله موج‌گیر

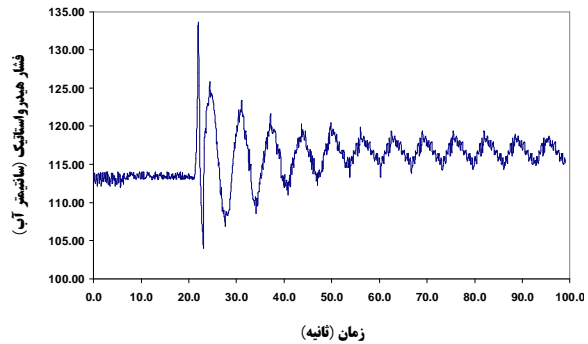


شکل 4- نمودار مربوط به تعیین مدل آشفتگی بدون استفاده از لوله موج‌گیر

همان‌گونه که اشاره گردید تحقیق حاضر شامل دو بخش کار آزمایشگاهی و محاسباتی بوده که در بخش آزمایشگاهی 31 آزمایش به ازای دبی‌های 20-50 لیتر بر دقیقه با استفاده از لوله موج‌گیر و 31 آزمایش نیز به ازای همان مقادیر دبی بدون استفاده از لوله موج‌گیر انجام گرفت. در بخش محاسباتی نیز به ازای هر آزمایش یک مدل عددی اجرا و نتایج آن استخراج گردید. از بین آزمایشات انجام گرفته، نمودار تغییرات فشار هیدرواستاتیک بر حسب زمان به ازای دبی 35 لیتر بر دقیقه به عنوان نمونه برای حالت‌های با استفاده از لوله موج‌گیر و بدون آن در شکل‌های 5 و 6 آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پس از رسیدن سیستم به حالت جریان ماندگار با بستن ناگهانی شیر فلکه جریان خروجی قطع می‌شود. در این حالت در محل

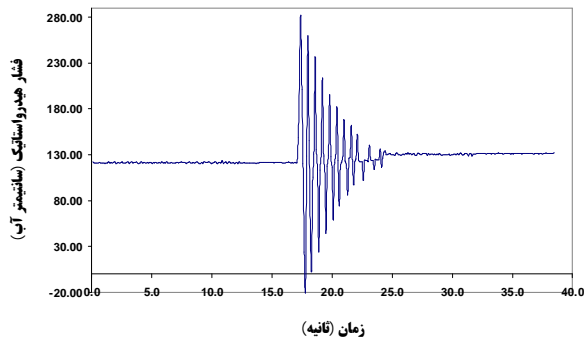


شکل 8- نمودار تغییرات فشار حاصل از مدل عددی به ازای دبی 35 لیتر بر دقیقه بدون لوله موج گیر

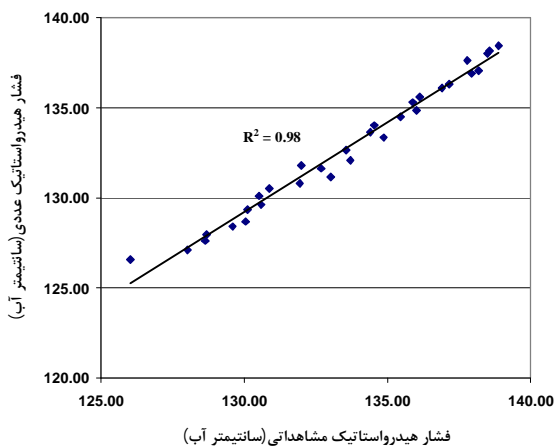


شکل 5- نمودار تغییرات فشار هیدرواستاتیک به ازای دبی 35 لیتر بر دقیقه با لوله موج گیر

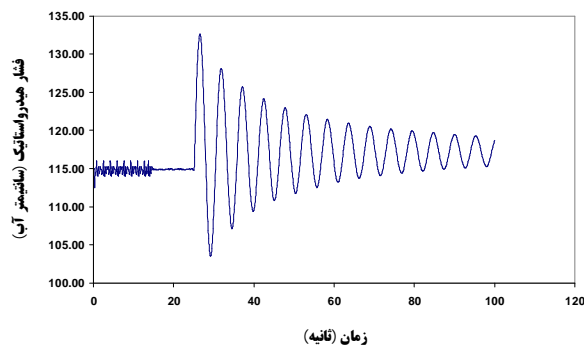
شکل‌های 9 و 10 نمودارهای نکویی برازش مقادیر H_{min} و H_{max} را نسبت به داده‌های مشاهداتی در حالت استفاده از لوله موج‌گیر نشان می‌دهد. شکل‌های 11 و 12 نیز نمودارهای مشابه را برای حالت بدون لوله موج‌گیر نشان می‌دهد. مقادیر R^2 بدست آمده نشان می‌دهند که نتایج حاصل از مدل عددی برای هر دو حالت از تطابق خوبی با مدل آزمایشگاهی برخوردار می‌باشد.



شکل 6- نمودار تغییرات فشار هیدرواستاتیک به ازای دبی 35 لیتر بر دقیقه بدون لوله موج گیر



شکل 9- نمودار نکویی برازش مقادیر H_{max} با استفاده از لوله موج گیر



شکل 7- نمودار تغییرات فشار حاصل از مدل عددی به ازای دبی 35 لیتر بر دقیقه با لوله موج گیر

ازای دبی 35 لیتر بر دقیقه و نتیجه حاصل از رابطه هالیول به همراه درصد خطای نسبی در جدول 1 نشان داده شده است. با توجه به اینکه برای محاسبه سرعت موج از رابطه $a = \frac{2L}{T}$ استفاده گردید، به نظر می رسد خطای موجود مربوط به برآورد زمان رفت و برگشت موج (T) باشد. لذا در صورت استفاده از ابزار دقیق اندازه گیری سرعت موج، احتمالاً خطای حاصل کمتر خواهد شد.

جدول 1- مقادیر محاسبه شده سرعت موج به ازای دبی

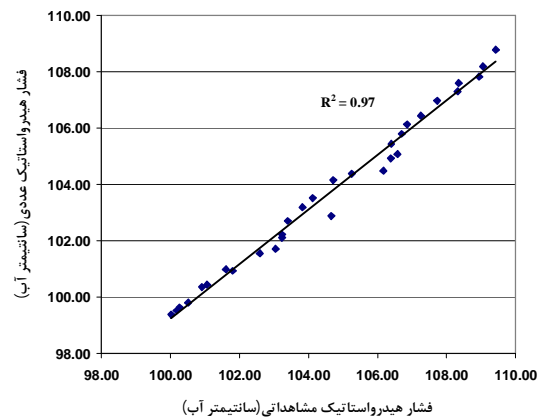
35 لیتر بر دقیقه بدون لوله موج گیر

مقدار	رابطه	مدل	مدل
	هالیول	عددی	آزمایشگاهی
a (m/s)	514/1	529/4	526/9
ER (%)	-	2/97	2/49

مقایسه نتایج مدل فیزیکی و عددی

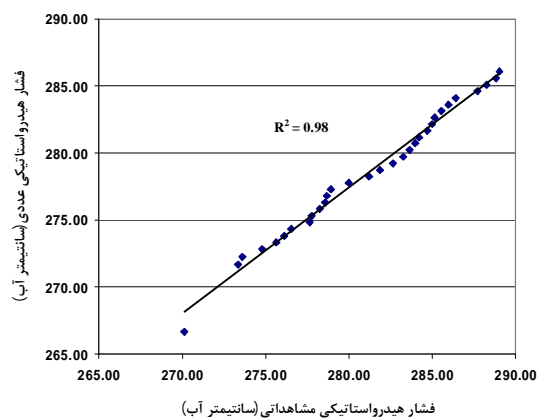
با توجه به اینکه مهمترین پارامتر در پدیده ضربه قوچ مقادیر H_{min} و H_{max} می باشد، لذا پس از انجام کلیه آزمایشات و اجرای مدل های عددی بهینه این مقادیر استخراج گردیده و با استفاده از پارامترهای آماری مختلف مورد آزمون و مقایسه قرار گرفتند.

به منظور بررسی کارایی مدل عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی پارامترهای آماری درصد خطای نسبی (RE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجذور ضریب همبستگی (R^2) محاسبه و مقادیر آنها در جدول 2 و 3 در حالت با لوله موج گیر و بدون آن نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود نتایج مدل عددی از دقت قابل قبولی برخوردار است.



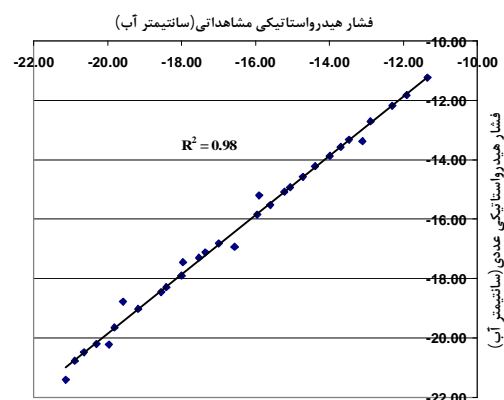
شکل 10- نمودار نکویی برازش مقادیر H_{min}

با استفاده از لوله موج گیر



شکل 11- نمودار نکویی برازش مقادیر H_{max}

بدون استفاده از لوله موج گیر



شکل 12- نمودار نکویی برازش مقادیر H_{min}

بدون استفاده از لوله موج گیر

مقادیر محاسبه شده سرعت موج در مدل آزمایشگاهی و عددی برای حالت بدون لوله موج گیر به

نتیجه گیری کلی

با توجه به اهمیت پدیده ضربه قوچ در سیستم‌های انتقال آب و اثرات مخرب آن، در این تحقیق با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی CFD به بررسی این پدیده در دو حالت با استفاده از لوله موج-گیر و بدون آن پرداخته شد. همان‌گونه که اشاره گردید مهمترین پارامتر در پدیده ضربه قوچ مقادیر H_{max} و H_{min} می‌باشد، زیرا با آگاهی از این مقادیر می‌توان مخزن موج‌گیر و سایر ادوات کنترل ضربه قوچ و همچنین محل نصب آن‌ها را در سیستم انتقال آب طراحی نمود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مدل عددی CFD در شبیه‌سازی پدیده ضربه قوچ از قابلیت بالایی برخوردار بوده و می‌توان از آن به عنوان یک مدل عددی مناسب جهت محاسبه مقادیر فشارهای حداکثر و حداقل بهره برد.

جدول 2- پارامترهای آماری بررسی کارآیی مدل عددی

(با لوله موج‌گیر)

مقدار	R^2	RMSE (cm)	RE (%)
H_{max}	0/98	0/94	0/64
H_{min}	0/97	0/97	0/87

جدول 3- پارامترهای آماری بررسی کارآیی مدل عددی

(بدون لوله موج‌گیر)

مقدار	R^2	RMSE (cm)	RE (%)
H_{max}	0/98	2/7	0/93
H_{min}	0/98	0/16	0/90

منابع مورد استفاده

- آشفته ج و پزشکی‌نژاد ع، 1369. هیدرولیک کاربردی جریان‌های میرا. جلد اول، انتشارات دهخدا، تهران.
- حسن‌زاده ی، ابریشمی ج و زمانیان ج، 1382. بررسی روش‌های کنترل فشارهای ماکزیمم و مینیمم ناشی از پدیده ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ فشار قوی، صفحه‌های 668-679. مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه تبریز، تبریز.
- حسنی الف، 1380. بررسی روش‌های مناسب کنترل امواج فشاری ناشی از پدیده ضربه قوچ در ایستگاه پمپاژ (مطالعه موردی: ایستگاه پمپاژ بوشهر). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.
- Anderson D, Tannehill J and Pletcher R, 1997. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Second edition, Taylor & Francis Publishers, Philadelphia USA.
- Anonymous, 2006. Fluent 6.2 User's Guide. Fluent Inc group.
- Jung B and Karney W, 2006. Hydraulic optimization of transient protection devices using GA and PSO approaches. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 132(1): 44-52.
- Kim S, 2008. Impulse response method for pipeline systems equipped with water hammer protection devices. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 134(7): 961-969.

Lingridy S, Funk JE and Wang H, 2000. Genetic algorithm in optimizing transient suppression device. Pp. 205-211. Proceeding of the 20th International Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning and Management. Visakapatnam, India.

Streeter VL and Wylie EB, 1993. Fluid Transient in Systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Stephenson D, 2002. Simple guide for design of air vessels for water hammer protection of pumping lines. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE 128(8): 792-797.