

بررسی اثرات غیرماندگاری افت بر سیستم انتقال آب نیروگاه برقایی

زهرا کنعانی تودشکی^{۱*} و منوچهر فتحی مقدم^۲

^{۱*} - نویسنده مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۲ - استاد گروه سازه های آبی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش: ۹۴/۳/۲۳

تاریخ دریافت: ۹۳/۹/۲۳

چکیده

شایع ترین عامل به وجود آورنده جریان غیر ماندگار، باز و بسته کردن شیرهای قطع و وصل جریان است. این عمل باعث انتشار امواج فشاری در سیستم می شود. شدت امواج فشاری به عواملی از قبیل نوع شیر، سرعت باز و بسته شدن شیر، هیدرولیک سیستم و خواص الاستیکی لوله ها بستگی دارد. یکی از مکان هایی که محاسبه ضربه قوچ در آن دارای اهمیت می باشد، سیستم انتقال آب نیروگاه های برقایی است. اگر در زمان بهره برداری از نیروگاه های برقایی به هر دلیل توربین از مدار خارج گردد، ضربه قوچ ایجاد می شود. وقوع این پدیده نه تنها به خطوط لوله، بلکه به توربین و تأسیسات نیروگاه خسارت وارد می کند. از این رو موضوع ضربه قوچ در سیستم انتقال آب نیروگاه های برقایی مورد توجه محققین بوده است. در این تحقیق برای بررسی تأثیر تنش برشی غیرماندگار بر اثر بستن سریع و آهسته شیر ویکت گیت از کد رایانه ای استفاده گردید. بدین منظور برای محاسبه تنش برشی از دو معادله اصطکاک دیلی و همکاران و معادله توسعه یافته بروننی و همکاران در کد رایانه ای استفاده شد. نتایج به دست آمده حاکی از این است که در یک عدد رینولدز ثابت موج فشاری در سیکل اول، در هر دو روش اصطکاکی تقریباً یکسان بوده است و در سیکل های بعدی امواج فشاری حاصل از روش دوم (معادله توسعه یافته بروننی و همکاران) میرایی بیشتری نسبت به زمان داشته است. در این صورت که در هر دو بستن سریع و آهسته شیر ویکت گیت بیشینه میرایی، در حالت بدون بعد به طور متوسط، حدود 75 درصد می باشد.

کلیدواژه ها: جریان غیرماندگار، نیروگاه برقایی، اصطکاک غیرماندگار.

Evaluation of Unsteady Friction in Hydropower Plant Transport

Z. Kanani Toudeshki^{1*} and M. Fathi Moghadam²

^{1*} - M.Sc. Student, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

² - Professor, Faculty of Water Sciences Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

Received: 14 December 2014

Accepted: 13 June 2015

Abstract

The most common underlying cause of unsteady flow, opening and closing the valve fusing of current. This action will cause pressure waves in the system. Pressure wave speed depends on the type of valve, the valve opening and closing speed, hydraulics system and property of elastic pipes. One of places where it is important to calculate hammer, water conveyance systems are hydro power plants. If for any reason during the operation of the hydro power station turbines out of the circuit, the water hammer will be caused. This phenomenon not only pipelines, but also damage the turbine and power plant installation. Therefore, issue of water hammer in the transmission system is a concern for many researchers' hydro power plants. In this study to determine the effect of unsteady shear stress in fast and slow closing of the wicket gate valve used computer code. In order to calculate the shear stress from two equations Daily et al and the equation of friction developed Brunone et al a computer code was used. The results obtains that the pressure wave in a fixed the Reynolds number in the first cycle was almost identical in both methods of friction and in the next cycle, pressure waves generated by the second method (equation developed Brunone et al) damping

is greater than the time. In which case, both fast and slow closing of the wicket gate valve, the non-dimensional maximum damping the second method by 75%.

Keywords: Unsteady flow, Hydropower plant, Unsteady friction.

محسوب نمی‌شود. علت تفاوت نتایج در مدل‌های عددی و نتایج آزمایشگاهی به دلیل استفاده از تنش برشی ماندگار یا همان معادله دارسی و ایسباخ برای حالت غیرماندگار است. مدل‌های بسیاری به منظور توصیف افت‌های اضافی ناشی از غیرماندگاری جریان معرفی شده‌اند. گروهی از این مدل‌ها، افت‌های اضافی اصطکاک را وابسته به تاریخچه شتاب‌های وزنی در حین پدیده گذرا و گروهی دیگر وابسته به شتاب لحظه‌ای جریان می‌دانند. توسعه گروه اول این مدل‌ها توسط زیلک^۲ (۱۹۶۸) آغاز گردید. در این مدل تنش برشی لحظه‌ای دیواره (که مستقیماً متناسب است با افت اصطکاک) برابر است با مجموع مقادیر شبه ماندگار به علاوه یک تابع وزنی که از تغییرات گذشته سرعت به دست می‌آید. این روش برای جریان گذرای آرام ارائه شده است. واردی و همکاران^۳ (۱۹۹۳) رابطه زیلک را برای جریان آشفته با رینولدز کم در لوله‌های صاف گسترش دادند. واردی و براون^۴ (۱۹۹۵) برای لوله صاف با رینولدزهای بالا روابط را گسترش دادند و در نهایت منجر به تولید مدلی برای رژیم آرام تا رینولدزهای بالا شد.

در گروه دوم مدل‌های ذکر شده، فرض می‌شود تنش برشی ناشی از غیرماندگاری جریان با شتاب جریان متغیر متناسب است. این روش توسط یک گروه محقق به سرپرستی دیلی معرفی شد^۵ (دیلی و همکاران، ۱۹۵۶). ضریب تناسب، بر پایه اندازه گیری‌های انجام شده توسط کارتنس و رولر^۶ (۱۹۵۹) وضع شد. نتایج ارائه شده توسط دیلی، توسط بروننی و همکاران^۷ (۱۹۹۵) توسعه یافت. در رابطه ارائه شده توسط بروننی و همکاران^۸ (۱۹۹۵) پارامتر شتاب مکانی و شتاب زمانی در معادله تنش برشی منظور می‌گردد.

دوئن و همکاران^۹ (۲۰۱۲) در پژوهشی به بررسی اثر مقیاس به خصوص قطر و طول لوله روی اصطکاک گذرا پرداختند. در این پژوهش شیر کامل و ناگهانی بسته می‌شود، پارامترهای مورد مطالعه قطر، طول و عدد رینولدز می‌باشد. نتایج نشان داد که اصطکاک غیرماندگار میرایی کمتری نسبت به اصطکاک ماندگار دارد. دوئن و همکاران^{۱۰} (۲۰۱۲) علت این تفاوت را در دو مورد بیان نمودند: نسبت زمان رفت و برگشت موج به انتشار امواج شعاعی افزایش پیدا می‌کند.

مقدمه

جریان غیرماندگار در مهندسی آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا، این جریان می‌تواند باعث ایجاد فشارهای اضافی، کلویتاسیون و ارتعاش‌هایی در سیستم شود. میزان تخریب ناشی از جریان غیرماندگار در نیروگاه‌های برقی، به عوامل مختلفی از قبیل تجهیزات به کار رفته در سیستم، خواص فیزیکی لوله‌ها، سیال و وجود هوا در آب بستگی دارد. بنابراین فشارهای ایجاد شده در سیستم، ممکن است در مدت کوتاهی آسیبی به سیستم وارد نکند، ولی تداوم ایجاد چنین فشارهایی که منجر به آسیب به سیستم می‌گردد، هزینه‌های هنگفتی را به بار می‌آورد (تائبی و چمنی، ۱۳۹۱). اگرچه طراحی سیستم‌های انتقال آب با استفاده از روابط جریان ماندگار صورت می‌گیرد، اما بررسی و پیش‌بینی دقیق آثار غیرماندگاری جریان در این سیستم‌ها از جنبه‌های مختلف ضروری است. غیرماندگاری جریان در مجاری تحت فشار (سیستم‌های انتقال آب) می‌تواند به تولید فشارهای بزرگی منجر شود که امنیت و عملکرد معمول سیستم را به مخاطره می‌اندازد. سیستم‌های هیدرولیکی نیاز به دانش دقیق از چگونگی رفتار جریان گذرا دارد. مدل‌های دیفرانسیل یک بعدی و دو بعدی موجود در مدل‌های تجاری بر مبنای چندین فرضیه نامطمئن شکل گرفته است. این مدل‌ها بر مبنای این فرض که هیچ‌گونه گردابه حلزونی در هنگام وقوع جریان گذرا شکل نمی‌گیرد، به دست آمده است. درحالی‌که در مدت زمان کوتاهی بعد از عبور موج، جریان معکوسی به طول کم، به طور همزمان در بالا و همچنین در کف لوله نمایان می‌گردد که باعث ناپایداری جریان، تشکیل گردابه و عدم تقارن جریان نسبت به محور لوله می‌گردد، که خود باعث تشکیل تنش برشی بزرگی می‌شود. در صورتی‌که در مدل‌های شبه ماندگار بعد از قطع جریان تنش برشی صفر می‌شود، معادله مورد استفاده در مدل‌های تجاری شبه ماندگار به شرح ذیل است (دیلی و همکاران^{۱۱}، ۱۹۵۶):

$$\tau_{ws} = \frac{\rho f(t)|V(t)|V(t)}{8} \quad (1)$$

که در آن $\tau_{ws}(t)$ تنش برشی جداره در حالت شبه پایدار و تابعی از زمان می‌باشد. استفاده از روابط تنش برشی جداره در حالت ماندگار برای حالت غیرماندگار، در جریان میرای بسیار کند، قابل قبول می‌باشد که در واقع این نوع جریان‌ها، جریان‌های ضربه قوچ

- 2- Zielke
- 3- Vardy et al.
- 4- Brunone
- 5- Carstens and Roller
- 6- Brunone et al.
- 7- Duan et al.

- 1- Daily et al.

افزایش عدد رینولدز

ریاسی و همکاران (۲۰۱۰) در مقاله‌ای اثر مخازن موج شکن را روی جریان گذرای تولید شده توسط تغییرات گشودگی دریچه توربین، به صورت مدل عددی و به روش غیرماندگار بررسی نمودند. نتایج بررسی نشان داد که وجود مخازن موج شکن در بالادست و پایین دست توربین موجب تعدیل فشار ایجاد شده می‌گردد. فتیحی مقدم و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی به مطالعه موردی سد مارون پرداخته و در روش تحقیق خود با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ایجاد جریان غیرماندگار به تعیین قطر بهینه مخازن موج شکن پرداخته شد. حال با توجه به اهمیت پدیده ضربه قوچ و گستردگی آن در شرایط مختلف، در این تحقیق سعی شده تأثیر تنش برشی غیرماندگار بر میزان میرایی امواج فشاری تعیین شود.

مواد و روش‌ها

تحلیل جریان گذرا

معادله‌های حاکم بر مجاری تحت فشار شامل معادله‌های دیفرانسیل هذلولوی یک‌بعدی می‌باشد و به عنوان معادله‌های پیوستگی و مومنتوم معرفی می‌گردد.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{4\tau}{D} + g \sin \theta + \frac{dV}{dt} = 0 \quad (3)$$

که در آن، $H(x,t)$: ارتفاع پیزومتریک و $V(x,t)$: میانگین سرعت طولی تنش برشی دیواره به صورت مجموعه‌ای از تنش برشی شبه ماندگار و تنش برشی غیرماندگار تعریف می‌گردد (دیلی و همکاران، ۱۹۵۶):

$$\tau_w(t) = \tau_{ws}(t) + \tau_{wu}(t) \quad (4)$$

بخش شبه ماندگار از طریق معادله (۱) حل می‌گردد. جهت تخمین تنش برشی غیرماندگار از معادله‌های دیلی و همکاران (۱۹۵۶) و معادله توسعه یافته بروننی و همکاران (۱۹۹۵) استفاده گردید. معادله‌های ذکر شده به ترتیب به صورت زیر است:

$$t_w(t) = t_{ws} + \frac{KpD}{4} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (5)$$

$$t_w(t) = t_{ws}(t) + \frac{1}{gA} \left(K_1 \frac{\partial V}{\partial t} - K_2 a \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) \right) \quad (6)$$

شرایط مرزی

مخزن بالادست

در یک مخزن بزرگ در بالادست جریان، معمولاً می‌توان خط هیدرولیکی را در طی یک جریان گذرا ثابت در نظر گرفت، در واقع از افت سرعت و افت‌های ورودی در محل مخزن چشم پوشی نمود (چوهدری، ۲۰۱۴؛ فتیحی مقدم و همکاران، ۲۰۱۳). این شرط مرزی بیان می‌کند:

$$H(X_0, t) = H_{Res} \quad (7)$$

که در آن X_0 : موقعیت مخزن می‌باشد.

شیر

روابط روزنه برای محاسبه دبی عبوری از شیر در لحظه t استفاده می‌گردد (چوهدری، ۲۰۱۴؛ فتیحی مقدم و همکاران، ۲۰۱۳). در واقع شیر ویکت گیت به‌عنوان یک شیر با ضریب تخلیه ثابت در نظر گرفته می‌شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱).

$$Q = Q_0 \frac{A_g}{A_{g0}} \left(\frac{H}{H_0} \right) 0.5 \quad (8)$$

که در آن $H_0=H(0)$ ، $Q_0=Q(0)$ ، $A_{g0}=A_g(0)$ به‌عنوان شرایط اولیه شیر شناخته می‌شوند و هد لحظه‌ای و دبی لحظه‌ای بر اساس روابط سطح مقطع شیر در هر زمان به‌دست می‌آیند. سطح مقطع شیر بر اساس منحنی گشودگی شیر نسبت به زمان موجود است.

اتصال لوله‌های سری

به طور کلی نیروگاه‌های برقایی تشکیل شده از یک یا چند تونل بتنی بزرگ که به یک یا چند لوله تحت فشار پنستاک متصل شده، در محل اتصالات مجموع دبی برابر صفر و افت بار در اتصالات بین دو لوله برابر می‌گردد.

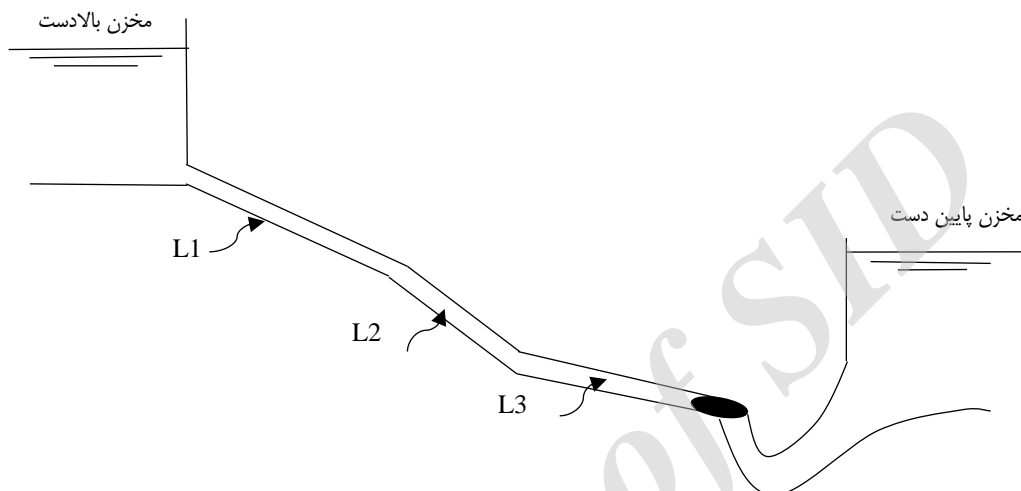
مطالعه موردی

برای بررسی تغییرات فشار بر اثر وقوع جریان گذرا در نیروگاه برقایی به مطالعه موردی نیروگاه برقایی سد کارون چهار پرداخته شده است. سد کارون چهار در استان چهارمحال و بختیاری در چهار کیلومتری محل رودخانه‌های بازفت و ارمند قرار گرفته است. این نیروگاه با ظرفیت ۲۰۰۰ مگاوات (۱۰۰۰ مگاوات برای توسعه) درحال بهره برداری می‌باشد. جدول (۱) مشخصات اصلی این نیروگاه را نشان می‌دهد. شمای کلی از نیروگاه در شکل (۱) ارائه شده است. جدول (۲) مشخصات فیزیکی لوله‌های سیستم انتقال آب نیروگاه را نشان می‌دهد.

کنعانی تودشکی و فتحی مقدم: بررسی اثرات غیرماندگاری افت بر سیستم...

جدول ۱- مشخصات اصلی نیروگاه برقایی کارون چهار

| توان تولیدی (مگاوات) | تراز مخزن بالادست (متر از سطح دریا) | تراز مخزن پایین دست (متر از سطح دریا) | تراز توربین (متر از سطح دریا) | دبی عبوری (متر مکعب بر ثانیه) | موقعیت دریچه (درصد) |
|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| ۲۹۵ | ۱۰۲۵ | ۸۴۳٫۲ | ۸۴۵٫۴ | ۱۷۸٫۵ | ۱۰۰ |



شکل ۱- شمای کلی از نیروگاه برقایی کارون ۴

جدول ۲- مشخصات فیزیکی لوله‌های نیروگاه برقایی کارون ۴

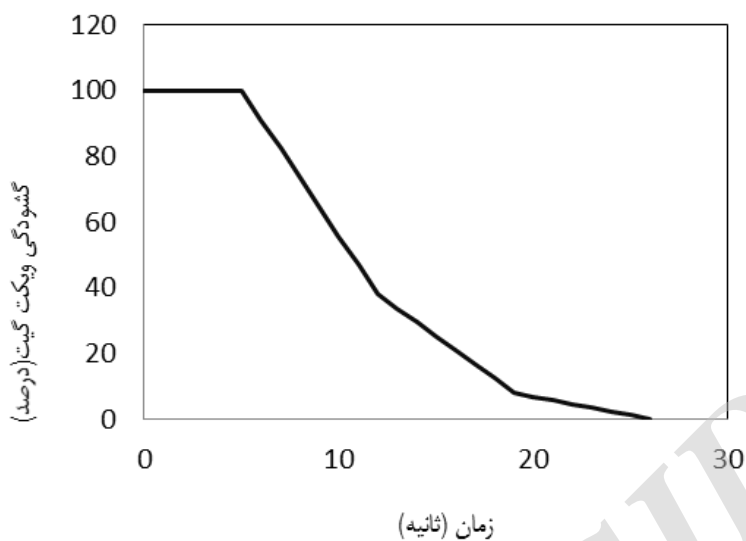
| شماره لوله | قطر لوله (متر) | طول لوله (متر) |
|------------|----------------|----------------|
| L1 | ۶٫۵ | ۱۲۰ |
| L2 | ۶ | ۱۸۵٫۷۵ |
| L3 | ۵ | ۱۴٫۹ |

از نیروگاه در زمان بهره برداری پرداخته شد. شکل (۲) منحنی فرمان بستن شیر در نیروگاه کارون چهار و شکل (۳) نتایج مقایسه بین داده‌های گزارش شده نیروگاه و نتایج حاصل از مدل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضرایب $K_1=0,0037$ و $K_2=0,0325$ نتایج نزدیک‌تری نسبت به نتایج گزارش شده نیروگاه نشان می‌دهد.

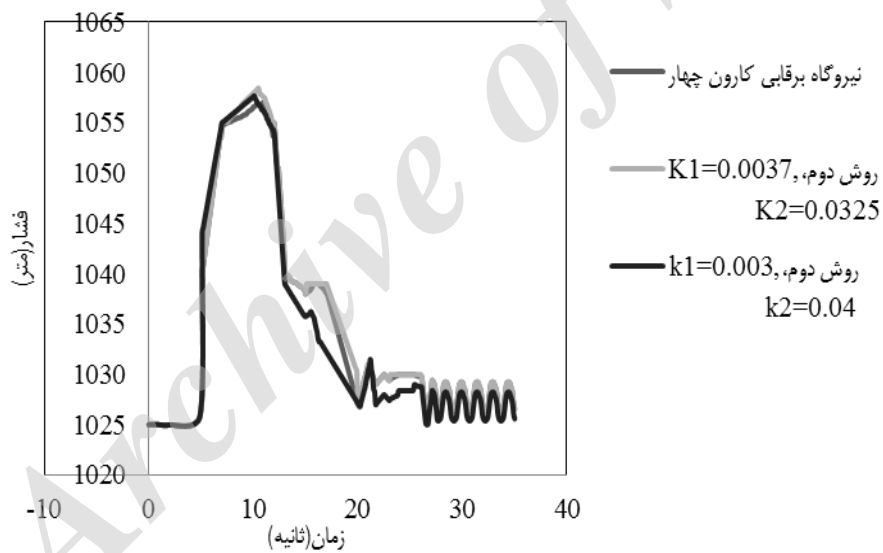
نتایج و بحث

اعتبار بخشی به کد رایانه‌ای

در این تحقیق به بررسی اثر بستن سریع و آهسته شیر در نیروگاه، با دو روش اصطکاک غیر ماندگار (معادله‌های ۵ و ۶) پرداخته شده است. به منظور تخمین نتایج قابل اعتماد رابطه تنش برشی غیرماندگار، ضرایب معادله (۶) واسنجی گردید. برای تعیین ضرایب K_1 و K_2 به مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی و نتایج گزارش شده

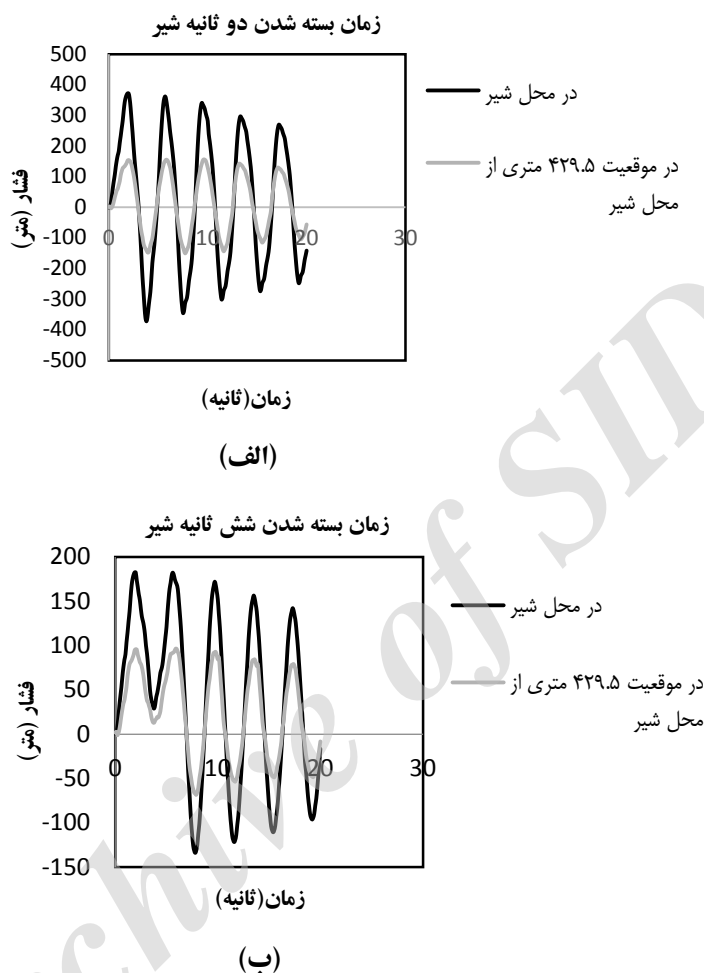


شکل ۲- منحنی فرمان بستن شیر نیروگاه برقایی کارون چهار



شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از کد رایانه‌ای و نتایج نیروگاه در بستن ۲۶ ثانیه

کنعانی تودشکی و فتیحی مقدم: بررسی اثرات غیرماندگاری افت بر سیستم...



شکل ۴- تغییرات فشار در روش اول، (الف): بستن سریع، (ب): بستن آهسته

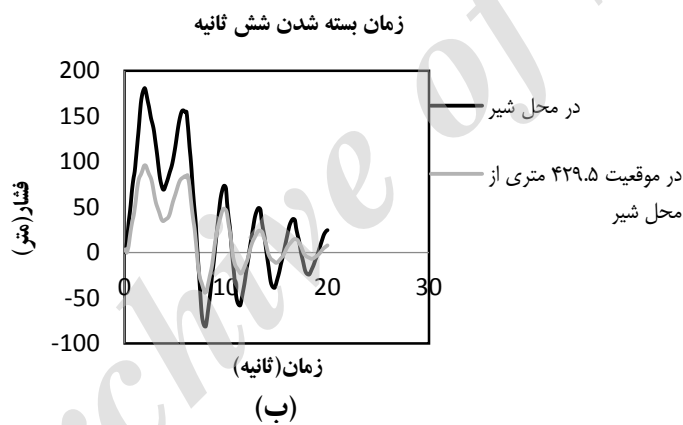
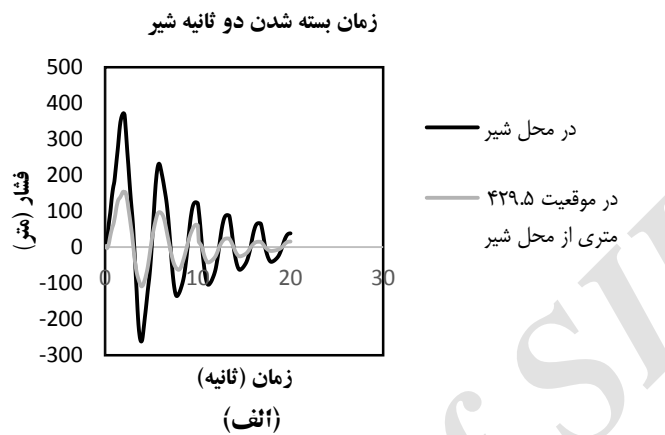
اصطکاک محاسبه شده در مدل، شبیه سازی در بستن های خطی با زمان های دو و شش ثانیه صورت گرفت. معادله (۵) به کار رفته در مدل برای تخمین تنش برشی، روش اول نام گذاری شده است و نتایج حاصل از روش اصطکاک معادله (۶)، روش دوم نام گذاری شده است.

بعد از تعیین ضرایب، برای تخمین تنش برشی به شبیه سازی در دو حالت اصطکاک در بستن های سریع و آهسته شیر نیروگاهی پرداخته شد. آرایش بستن شیر به صورت خطی و مطابق با رابطه آزوری و همکاران^۹ (۱۹۸۶) صورت گرفت. این رابطه به شرح ذیل است:

$$\tau = \left(1 - \frac{t}{t_c}\right)^m \quad (9)$$

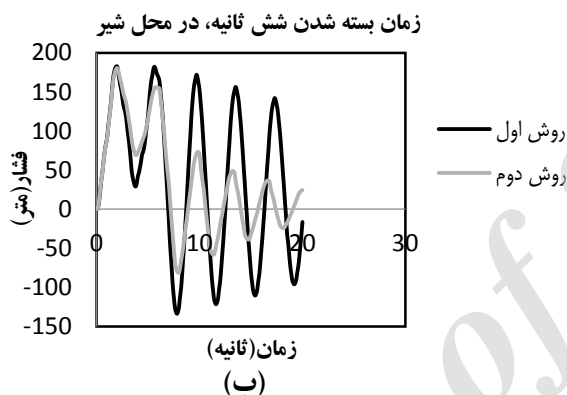
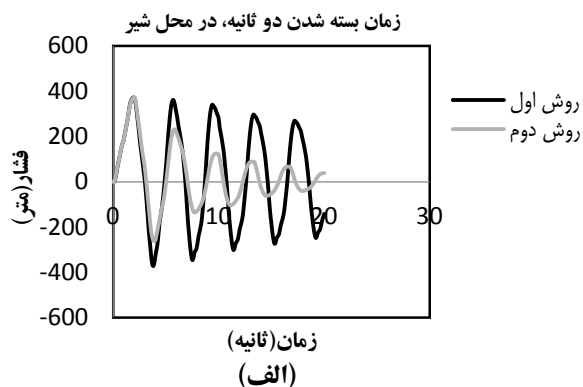
برای بستن خطی پارامتر m موجود در معادله (۹) برابر یک در نظر گرفته می شود، برای مقایسه نتایج حاصل از دو روش

9- Azoury et al.

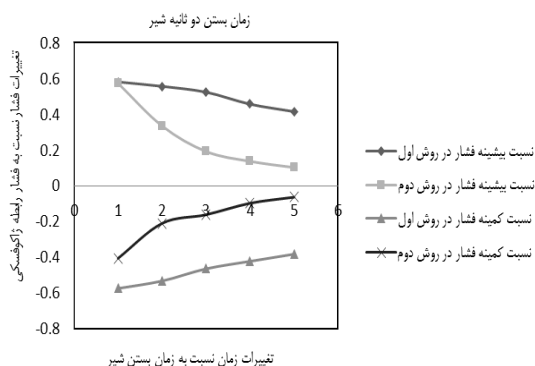
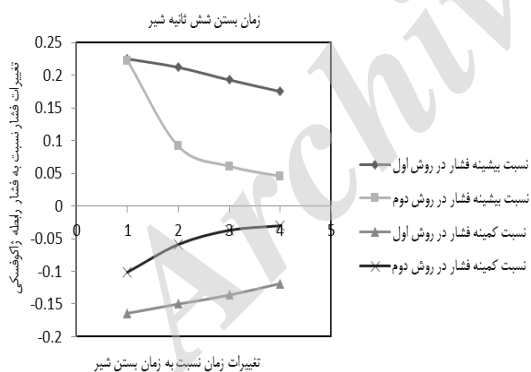


شکل ۵- تغییرات فشار در روش دوم، الف): بستن سریع، ب): بستن آهسته

کنعانی تودشکی و فتحی مقدم: بررسی اثرات غیرماندگاری افت بر سیستم...

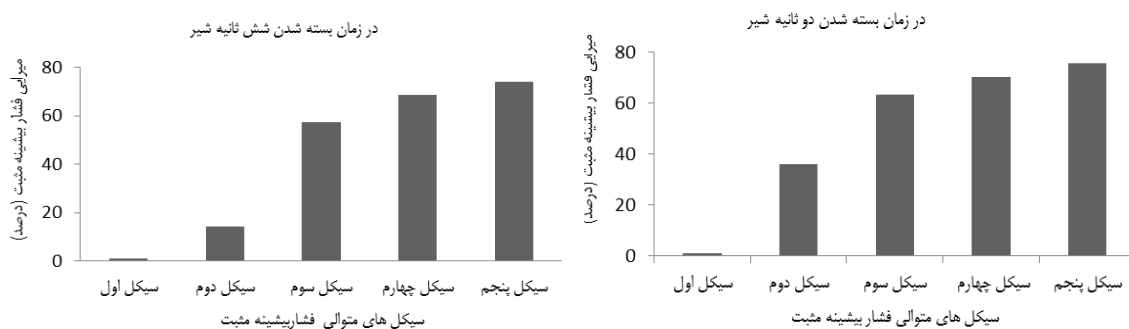


شکل ۶- مقایسه میرایی با زمان در هر دو روش اصطکاکی، (الف): بستن سریع، (ب): بستن آهسته



شکل ۷- منحنی بی بعد تغییرات فشار نسبت به زمان در هر دو روش اصطکاکی در محل شیر،

(الف): بستن سریع، (ب): بستن آهسته



شکل ۸- نسبت میرایی بیشینه فشاری روش دوم نسبت به روش اول، (الف): در زمان بسته شدن دو ثانیه، (ب) در زمان بسته شدن شش ثانیه

جدول ۳- مشخصات مدل شبیه سازی استریتر و وایلی (۱۹۸۲)

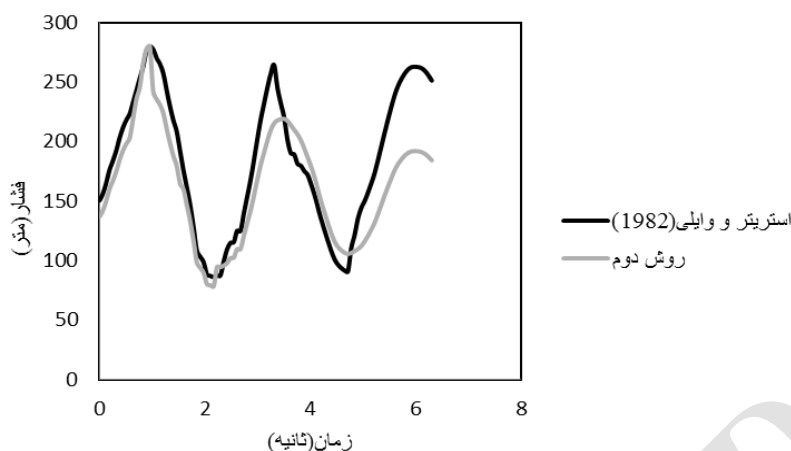
| ارتفاع مخزن بالادست (متر) | طول لوله (متر) | قطر لوله (متر) | ضریب دارسی وایسباخ | سرعت موج (متر بر ثانیه) |
|---------------------------|----------------|----------------|--------------------|-------------------------|
| ۱۵۰ | ۱۲۱/۱ | ۰/۵ | ۰/۰۱۸ | ۱۲۰۰ |

هر دو زمان بسته شدن با گذشت زمان کمتر شده و در واقع موج سریع تر به میرایی می رسد. شکل (۸ الف و ب) نسبت میرایی امواج فشاری مثبت روش دوم را در دو بستن سریع و آهسته نسبت به روش اول (معادله دیلی و همکاران، ۱۹۵۶) نشان می دهد، همانطور که در شکل نشان داده شده تفاوت درصد میرایی در سیکل پنجم به طور متوسط به حدود ۷۵ درصد می رسد، به این معنی که با گذشت زمان امواج فشاری ایجاد شده با روش دوم به تعدیل می رسد. در واقع تنش برشی موجب استهلاک امواج فشاری ایجاد شده می گردد. در معادله (۶) تنش برشی با لحاظ نمودن اینرسی در معادله های به دست آمده است، در حالی که معادله تنش برشی (معادله ۵)، برگرفته از معادله تنش شبه ماندگار توسط دیلی و همکاران (۱۹۵۶) استخراج گردید، در این معادله پارامتر اصطکاک وابسته به شتاب زمانی می باشد. بنابراین با توجه به مطالبی که گفته شد، در هنگام وقوع جریان گذرا، جریان معکوسی در بالا و کف لوله به طول کم پدیدار می شود و منجر به ایجاد گردابان معکوس در این نواحی شده که خود، باعث ایجاد تنش برشی بزرگی می شود. در این تحقیق همچنین به مقایسه نتایج حاصل از تحقیقات استریتر و وایلی (۱۹۸۲) و نتایج حاصل از کد رایانه ای پرداخته شد. در جدول (۳) مشخصات مدل استریتر و وایلی (۱۹۸۲) ارائه شده است. جهت مقایسه نتایج اصطکاک غیرماندگار و مدل بدون اصطکاک شکل (۹) ارائه شده است.

برای بررسی تغییرات فشار در روش اول و دوم در زمان های دو و شش ثانیه در محل شیر و در فاصله ۴۲۹/۵ متری به صورت شکل های (۴ الف و ب) و (۵ الف و ب) ارائه شده است. با توجه به ثابت بودن ارتفاع سطح آب مخزن نتایج نشان دهنده حداکثر اختلاف فشار در محل شیر ($x=0$) می باشد. در بستن سریع شیر، موج فشاری ایجاد شده بعد از انتشار و یک رفت و برگشت کامل به محل شیر بسته برخورد کرده و موجب تشکیل فشار منفی می گردد. در حالی که در بستن آهسته موج بعد از انتشار در ابتدا فرصت ایجاد فشار منفی را نداشته، در واقع بعد از یک رفت و برگشت از شیر به مخزن و بالعکس، مجدداً به شیر نیمه باز برخورد می کند. به همین دلیل در بستن آهسته شکل موج فشاری شامل دو فشار بیشینه مثبت می باشد.

برای مقایسه نتایج حاصل از روش تخمین اصطکاک غیرماندگار، نتایج در شکل های (۶ الف و ب) و (۷ الف و ب) ارائه گردید. نتایج مشاهده شده در شکل (۶) نشان می دهد که مقدار اولیه فشار بیشینه در هر دو روش اصطکاک غیرماندگار در بستن های سریع و آهسته تقریباً یکسان بوده و در سیکل های بعدی موج فشاری بیشینه در روش دوم (معادله توسعه یافته بروننی و همکاران، ۱۹۹۵) مقدار کمتری داشته است. شکل (۷ الف و ب) به مقایسه نسبت فشار اندازه گیری شده به فشار حاصل از معادله ژاکوفسکی نسبت به زمان بسته شدن شیر پرداخته شده است (تائی و چمنی، ۱۳۹۱). همانطور که مشاهده می شود اختلاف فشارهای مثبت و منفی در روش دوم در

کنعانی تودشکی و فتحی مقدم: بررسی اثرات غیرماندگاری افت بر سیستم...



شکل ۹- مقایسه نتایج تغییرات فشار در روش‌های بدون اصطکاک و اصطکاک غیرماندگار

چندین فرضیه نامطمئن و ضعیف بنا نهاده شده است، که محدود کننده کاربرد این معادله‌ها در همه‌ی شرایط کاری، که جریان میرا در آن‌ها به وقوع می‌پیوندد، می‌باشد. مدل‌های جریان میرای موجود بر پایه این فرض که هیچ‌گونه گردابه حلزونی هنگام وقوع ضربه قوچ در جریان پدیدار نمی‌شود، به دست آمده است (یعنی فرض بر این است که جریان هنگام رخ دادن جریان میرا، به صورت پایدار باقی می‌ماند). در این تحقیق با استفاده از دو روش اصطکاک غیر ماندگار اقدام به مدل‌سازی سیستم انتقال آب نیروگاه در حین وقوع جریان گذرا بر اثر بستن شیر ویکت گیت شد. نتایج مربوط به مقایسه دو روش اصطکاکی غیر ماندگار، در حالت بدون بعد به‌طور متوسط، بیشینه میرایی (امواج فشاری مثبت) ۷۵ درصدی هر دو روش را نسبت به روش بدون اصطکاک (معادله داری وایسباخ) نشان داد. همچنین مقایسه بی‌بعد نتایج، نیز نشان‌دهنده کاهش اختلاف فشار-های بیشینه و کمینه در روش دوم با گذشت زمان است. نتایج هر دو روش نشان داد که بستن سریع شیر موجب وقوع فشارهای مخرب می‌گردد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات میرایی در روش دوم نسبت به روش بدون اصطکاک (معادلات داری وایسباخ) در طی زمان کوتاهی صورت می‌گیرد. به کار بردن معادله (۱) جهت محاسبه ضربه قوچ در سیستم‌های انتقال آب فرضیه نادرستی است، زیرا با بسته شدن شیر و توقف جریان سرعت به صفر رسیده بنابراین مطابق با معادله (۱) تنش برشی صفر می‌شود. با صفر شدن تنش برشی امواج فشاری ایجاد شده بر اثر وقوع جریان گذرا مستهلک نمی‌گردد، بنابراین موج بعد از گذشت چندین سیکل به میرایی نمی‌رسد (بروننی و همکاران، ۲۰۰۰؛ چوهدری، ۲۰۱۴). لازم به ذکر است، بروننی و همکاران (۲۰۰۰) نشان دادند که تفاوت بین مدل‌های ضربه قوچ موجود (داری وایسباخ) و داده‌های آزمایشگاهی در شرایط وجود گردابه در جریان (جریان ناپایدار) بعد از گذشت شش سیکل موج تا ۱۰۰ درصد می‌رسد. این تفاوت معنی دار بین مدل‌ها و داده‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده اثر زیاد ناپایداری بر جریان میرا می‌باشد، لذا از تأثیر آن نمی‌توان چشم‌پوشی نمود.

نتیجه‌گیری

مدل‌های دیفرانسیلی یک بعدی و دو بعدی حاکم بر جریان‌های میرا، که هم‌اکنون در مدل‌های تجاری رایج می‌باشد، بر مبنای،

منابع

۱- تائی، ا. و چمنی، م. ۱۳۹۱. شبکه‌های توزیع آب شهری. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.

2- Azoury, P.H., Basiiri, M. And H. Najm. 1986. Effect of valve closure on water hammer. Journal of Hydraulic Engineering, 112: 890-903.

3- Brunone, B., Golia, U. M. and M.Greco. 1995. Effects of two dimensionality on pipe transients modeling. Journal of Hydraulic Engineering, 121(12): 906-912.

- 4- Brunone, B., Karney, B. W., Mecarelli, M. And M. Ferrante. 2000. Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(4): 236-244.
- 5- Carstens, M. R. and J. E. Roller. 1959. Boundary-shear stress in unsteady turbulent pipe flow. *Journal of Hydraulic Division American Society of Civil Engineers*, 85(2): 67-81.
- 6- Choudhry, M.H. 2014. *Applied hydraulic transient*. (Third Edition), Springer.
- 7- Daily, J. W., Hankey, W. L., Olive, R. W. and J. M. Jordaan. 1956. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flows through smooth tubes and orifices. *Trans, American Society of Mechanical Engineers*, 78: 1071-1077.
- 8- Duan, H.F., Ghidaoui, M.S. and Y.K. Tung. 2012. Relevance of unsteady friction to pipe size and length in pipe fluid transients. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138: 154-166.
- 9- Fathi.Moghadam, M., Haghhighipour, S. and H.Mohammad.Vali. Samani, 2013. Design variable optimization of hydropower tunnels and surge tanks using a genetic algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139: 200-208.
- 10-Riasi, A., Raisee, M. And A. Nourbakhsh. 2010. Simulation of transient flow in hydroelectric power plants using unsteady friction. *Journal of Mechanical Engineering*, 56(6): 377-384.
- 11-Streeter, V. L. and E. B. Wylie. 1982. *Hydraulic Transients*. McGraw-Hill, New York.
- 12-Vardy, A. E., Hwang, K. L. and J. M. B. Brown. 1993. A weighting model of transient turbulent pipe friction. *Journal of Hydraulic Research*, 31: 533-548.
- 13-Vardy, A.E. and J.M.B. Brown. 1995. Transient, turbulent, smooth pipe friction. *Hydraulic Research*, 33(4): 435-455.
- 14-Zhang, Q., Karney, B., Suo, L. and F. Colombo. 2011. Stochastic analysis of water hammer and applications in reliability-based structural design for hydro turbine penstocks. *American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11): 1509-1521.
- 15- Zielke, W. 1968. Frequency-dependent friction in transient pipe flow. *American Society of Mechanical Engineers, Journal of Basic Engineering*, 90(1): 109-115.