NAISL
Volume 4, Number 2, 2020
Pages: 11-16
Print ISSN: 2588-6401
Online ISSN: 2588-641X
Website: shaajournal.msrt.ir
Article type: Scientific extension
Date Received: 2020/09/21
Acceptance date: 2021/01/03
Online publishing: 2021/01/03

Design and manufacturing of a simple linear first order system for laboratory experiments

Majid Emami-Meibodi[1*], Mohammad Javad Sistani[2], Zohreh Panahi[3], Fatemeh Kazemi[4], Ashkan Bagheri[5]

Abstract

Evaluation of the transfer function is one of the most important subjects in the process control lesson in chemical engineering. However, in the process control labs, transfer function is not usually evaluated and tested. In the current study, a simple equipment is designed in which transfer function of the level against rate variations are being studied. This system may be cited at the other subjects of processes control like linear and non-linear, and also interacting and non-interacting systems. In the first test, the level-flowrate relation is derived in the situation which the discharge valve of the tank is fully opened, and it is proved that this relation and the system are both linear. In the second test, the level variations are derived by the related transfer function, and being compared to experimental values. In the third test, the rate variations, derived by the transfer function, are compared to experimental values. In the fourth test, the last third tests are done for the situation which the discharge valve is in partially opened position. The experimental values of time constant are derived in the order of 200 s for fully-opened valve and about 800 s for partially opened valve. Results show that, the manufactured system with fully opened ¾ inch valve, is completely linear, and there is an acceptable accommodation between calculated (via transfer function) outlet flowrate and level variations against time, and the corresponding experimental data. The mentioned conclusions are true in the situation of partially opened valve too.

Key Words:

process control, flowrate-level, linear system, first order system, time constant

Authors:
1*. Asistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran.
E-mail: emami@ardakan.ac.ir
Tel: 03532248271
2. BS Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran
E-mail: sistani76@yahoo.com
Tel: 03532248271
3. BS Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran.
E-mail:panahizohre98@gmail.com
Tel: 03532248271
4. BS Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran.
E-mail: kazemif750@gmail.com
Tel:03532248271
5. BS Student, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ardakan University, Ardakan, Iran.
E-mail: ashkbaran3@gmail.com
Tel: 03532248271
*. Corrosponding author

طراحی و ساخت تجهیزات ارزیابی تابع انتقال مربوط به آزمایشگاه کنترل فرآیندهای مهندسی شیمی

مجید امامی میبدی[1*]، محمد جواد سیستانی[2]، زهره پناهی[3] ، فاطمه کاظمی[4]، اشکان باقری[5]

نشریه رویکردهای نوین در آزمایشگاه‌های علمی ایران
سال چهارم، شماره ۲، ۱۳۹۹
صفحات: ۱۶-۱۱
شاپای چاپی: ۶۴۰۱-۲۵۸۸
شاپای الکترونیکی: ۶۴۱X-۲۵۸۸
وب‌سایت: shaajournal.msrt.ir
نوع مقاله: علمی -ترویجی
تاریخ ارسال: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴
نشر آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۱۴

چکیده

به دست‌آوردن تابع انتقال یکی از مباحث مهم درس کنترل فرآیندها در مهندسی شیمی است. با این حال، درتجهیزات مرسوم در آزمایشگاههای کنترل فرآیند، تابع انتقال هیچکدام از تجهیزات، برآورد و تست نمی‌شود. در مقاله حاضر، تجهیزات نسبتاً ساده ای طراحی و ساخته شده است که در آن تابع انتقال سامانه تغییرات سطح و دبی مطالعه می شود. سامانه مورد نظر در مباحث مختلف کنترل فرآیندها مثل بحث سیستمهای خطی و غیر خطی و نیز تداخلی و غیر تداخلی مورد استناد قرار می گیرد. در آزمایش اول، رابطه بین ارتفاع و دبی در شرایطی که شیر خروجی مخزن کاملاً باز است به دست می آید و ثابت می شود این رابطه خطی و سیستم نیز خطی می باشد. در آزمایش دوم، تغییرات ارتفاع توسط تابع انتقال حاکم بر سامانه به دست آمده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود. در آزمایش سوم، تغییرات دبی به دست آمده از تابع انتقال با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود. در آزمایش چهارم، آزمایشهای اول تا سوم برای حالت شیر خروجی نیمه باز انجام می شود. نتایج نشان می دهد سامانه ساخته شده با شیر $\frac{3}{4}$اینچ کاملاً باز، خطی بوده و بین تغییرات ارتفاع و دبی خروجی محاسبه شده و اندازه گیری شده تطابق قابل قبولی وجود دارد. همچنین در حالت شیر نیمه باز نیز نتیجه گیری های فوق صادق می باشد.

مجید امامی میبدی

محمد جواد سیستانی

زهره پناهی

فاطمه کاظمی

اشکان باقری فرادنبه

نویسندگان:
۱*. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.
ایمیل: emami@ardakan.ac.ir
تلفن: ۰۳۵۳۲۲۴۸۲۷۱
۲. دانشجو، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.
ایمیل: sistani76@yahoo.com
تلفن: ۰۳۵۳۲۲۴۸۲۷۱
۳. دانشجو، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.
ایمیل: panahizohre98@gmail.com
تلفن: ۰۳۵۳۲۲۴۸۲۷۱
۴. دانشجو، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.
ایمیل: kazemif057@gmail.com
تلفن: ۰۳۵۳۲۲۴۸۲۷۱
۴. دانشجو، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.
ایمیل: ashkbaran3@gmail.com
تلفن: ۰۳۵۳۲۲۴۸۲۷۱
*. نویسنده مسئول

واژگان کلیدی:

**کنترل،
تابع انتقال،
دبی-سطح،
سیستم خطی،
ثابت زمانی**

۱- مقدمه

در مدل‌سازی سامانه‌های کنترل، تابع انتقال سامانه یک نقش اساسی دارد. بسیار مناسب است که در آزمایشگاه کنترل فرآیندها (برنامه‌ریزی درسی مقطع کارشناسی مهندسی شیمی، ۱۹۳۱)، آزمایشی وجود داشته باشد که تابع انتقال تئوری که معمولاً با استفاده موازنه جرم، انرژی یا ممنتوم نوشته می‌شود، با نتایج تجربی مقایسه شود و دانشجویان درستی مباحث تئوری در مورد تابع انتقال را مشاهده کنند.

در نوشتن تابع انتقال، بین یک ورودی یا تابع محرکه و یک خروجی یا پاسخ، رابطه ای در ترم‌های تبدیل لاپلاس نوشته می‌شود که در نهایت با مشخص بودن تابع انتقال و اعمال ورودی داده شده، می‌توان پاسخ را بر حسب زمان رسم کرد (Ogata, ۲۰۱۰). یکی از متداول‌ترین سامانه‌های مورد بررسی، تغییرات ارتفاع سیال عبوری از یک مخزن برحسب دبی، سیال است (Leblanc and ,۲۰۰۰۹ Coughanowr). در این سامانه تابع ورودی یا محرکه، دبی ورودی است و پاسخ می‌تواند ارتفاع سیال داخل تانک یا دبی خروجی در نظر گرفته شود. ارتفاع سیال و دبی خروجی از مخزن به هم مربوطند. شکل رابطه به شرایط جریان بستگی دارد. از لحاظ تئوری اگر مخزن به قدری بزرگ در نظر گرفته شود که بتوان از اثرات دیواره صرف نظر کرد و جریان خروجی از طریق یک لوله در شرایط جریان آرام کاملاً توسعه یافته خارج شود، با استفاده از رابطه هیگن – پوازیه یا روابط انرژی می توان نشان داد دبی خروجی متناسب است با ارتفاع سیال که با جایگذاری در رابطه موازنه جرم ناپایدار، یک رابطه خطی به دست می‌آید (Munson et al . ۲۰۱۲). از دیدگاه کنترل، چنین سامانه‌ای، مرتبه اول خطی نامیده می‌شود. متاسفانه از لحاظ تئوری برقراری جریان آرام توسعه یافته در لوله خروجی در شرایط آزمایشگاهی مرسوم و سیال آب، غیرممکن به نظر می‌رسد. اگر جریان داخل لوله خروجی در شرایط ورودی یا متلاطم قرار داشته باشد، یا اثرات دیواره مخزن قابل صرف نظر نباشد، از لحاظ تئوری، سامانه خطی نخواهد بود. در عین حال ممکن است بتوان در محدوده‌ای از دبی و ارتفاع رابطه خطی مناسبی با داده‌های تجربی برازش داد. در ساده‌ترین حالت که از اثرات دیواره مخزن صرف نظر شود و در خروجی هم هیچ مقاومتی وجود نداشته باشد، دبی خروجی از رابطه برنولی تبعیت می‌کند (White, ۲۰۱۱) که در نهایت یک سیستم غیرخطی را تشکیل خواهد داد.

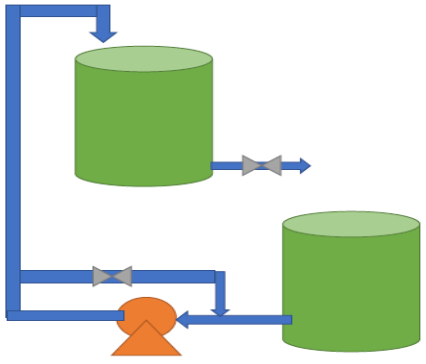
در این تحقیق هدف، دستیابی به سیستم خطی می‌باشد. بنابراین از ابتدا سامانه به گونه‌ای طراحی می‌شود که قابلیت کار با سیالات مختلف وجود داشته باشد و خطاها تا حد ممکن قابل صرف نظر باشند.

۱- ایده اولیه طرح

در درس کنترل فرآیندهای مقطع کارشناسی مهندسی شیمی، برای معرفی سیستم‌های خطی مرتبه اول چند مثال بررسی شده که یکی از آن‌ها ارتفاع سیال داخل تانک برحسب دبی است. آزمایش مناسب برای آزمایشگاه کنترل مقطع کارشناسی مهندسی شیمی باید تا حد ممکن مشابه سیستمی باشد که در درس کنترل فرآیند بررسی می‌شود، تا دانشجویان با آن آشنا باشند. قسمت اصلی آزمایش مخزنی است که سیال داخل آن با یک لوله به سمت خارج هدایت می‌شود. البته همانطور که در قسمت مقدمه توضیح داده شد اگر لوله کوتاه باشد، شرایط جریان، توسعه یافته کامل نخواهد بود و با آب نمی‌توان در لوله‌های مرسوم، جریان آرام ایجاد کرد. بنابراین از پمپ مناسبی استفاده می‌شود تا در صورت نیاز از یک سیال ویسکوزتر استفاده شود. از طرف دیگر مخزن را بزرگ انتخاب می‌کنیم به دو دلیل: الف) از اثرات دیواره، فرسایش و رسوب‌گذاری سیال و غیره که باعث ایجاد خطا می‌شود بتوان صرف نظر کرد. ب) به منظور ثبت تغییرات ارتفاع با زمان، بازه زمانی مناسب باشد تا با کرونومترهای معمول، خطای کمی وجود داشته باشد. با توجه به اینکه مخزن بزرگ خواهد بود، محلول آب و کربوکسی متیل سلولز (cmc) به عنوان سیال ویسکوزی که هزینه کمی داشته باشد، مطرح است. البته همانطور که توضیح داده خواهد شد، خوشبختانه سامانه با آب هم رفتار خطی نشان داد و نیازی به استفاده از محلول ویسکوز نبود.

۲- سامانه آزمایشگاهی

برای قسمت اصلی آزمایش، یک مخزن پلیمری نیمه شفاف ۱۰۰ لیتری انتخاب شد تا هم هزینه زیادی نداشته باشد و هم سطح آب داخل مخزن قابل تشخیص باشد. در خروجی مخزن یک لوله کوتاه و شیر برای انجام تست اولیه در نظر گرفته شد که خوشبختانه همین طرح اولیه، سیستم خطی را نتیجه داد. با توجه به اینکه در خروجی مخزن نباید تجهیزات دیگری مثل دبی سنج قرار گیرد و به منظور تکمیل سامانه، طرح کامل به صورتی که در شکل ۱ نشان داده شده است، اجرا شد.



شکل ۱ طرح‌واره سامانه آزمایش تابع انتقال دبی-ارتفاع

قسمت اصلی آزمایش، مخزن بالایی و شیر و لوله خروجی متصل به آن است. برای تعیین دبی در شرایط پایدار می‌توان یک دبی سنج بعد از پمپ و قبل از مخزن بالایی استفاده کرد ولی بعد از مخزن بالایی به دلیل به همزدن تابع انتقال حاکم و افزایش مقاومت در برابر جریان، نباید دبی‌سنج استفاده شود. مسیر فرعی برگشتی از خروجی به ورودی پمپ برای اطمینان از عدم مسدود شدن مسیر خروجی پمپ در نظر گرفته شد ولی شیر تعبیه شده روی این مسیر در صورتی که کاملاً باز باشد کل آب از همین مسیر بر می‌گردد و آبی به مخزن بالا وارد نمی‌شود. این شیر برای تنظیم دبی ورودی به مخزن بالا در کل بازه دبی پمپ می‌تواند استفاده شود. تصویری از سامانه ساخته شده نهایی در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل ۲ تصویر سامانه ساخته شده

پمپ مورد استفاده نوع SDB۶۰ از شرکت استریم با دبی ۵-۳۵ لیتر بر دقیقه و هد ۲ متر می‌باشد. شیرها نوع گازی سه چهارم اینچ، لوله ۲/۵ سفید و هر دو مخزن مشابه و ۱۰۰ لیتری، با قطر حدود ۴۰ سانتیمتر می‌باشند. دبی سنج از نوع روتامتر با حداکثر دبی ۱۰۰۰ لیتر بر ساعت می‌باشد.

میزان باز بودن شیر خروجی مخزن بالا اثر بسیار مهمی بر نتایج دارد. بنابراین در سه آزمایش اول برای حالت شیر کاملاً باز، نتایج گزارش می‌شود و در آزمایش چهارم، شیر در حالت نیمه باز قرار داده می‌شود.

- آزمایش اول: رابطه ارتفاع سیال و دبی

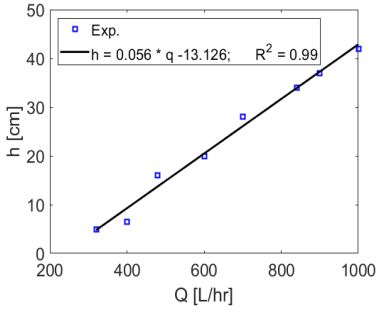
برای به دست آوردن رابطه دبی و ارتفاع، باید در دبی‌های مختلف، زمان لازم برای آزمایش در نظر گرفته شود تا جریان به حالت پایدار برسد. به این منظور در هر مقدار دبی تنظیم شده، لازم است مراحل زیر انجام شود:

۱. با استفاده از شیر مسیر برگشتی، دبی سیال ورودی به مخزن اصلی در یک مقدار مشخص تنظیم شود. دبی‌سنج بر حسب لیتر بر ساعت می‌باشد.

۲. برای بررسی پایداری، دبی خروجی باید با ورودی برابر باشد. با استفاده از بشر یک لیتری، زمان پر شدن بر حسب ثانیه باید برابر باشد با ۳۶۰۰ تقسیم بر دبی تنظیم شده برحسب لیتر بر ساعت.

۳. با رسیدن به شرایط پایدار، ارتفاع توسط یک خطکش اندازه‌گیری و نظیر دبی تنظیم شده یادداشت می‌شود.

مقادیر به دست آمده در شرایطی که شیر خروجی مخزن کاملاً باز باشد در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ رفتار ارتفاع بر حسب دبی برای حالت شیر کاملاً

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، رفتار خطی، تقریب خوبی است. البته در دبی صفر قطعاً ارتفاع هم باید صفر باشد ولی رابطه به دست آمده برای بازه خاصی از دبی است (۳۰۰ -۱۰۰۰ لیتر بر ساعت) و چون همه آزمایش‌ها در این بازه انجام می‌شوند، قابل قبول می‌باشد.

-آزمایش دوم: مقایسه ارتفاع آزمایشگاهی با پاسخ به دست آمده از تابع انتقال

با استفاده از رابطه شکل ۳ می‌توان نوشت:

$$\left.\begin{aligned} h &= Rq + h_0 \\ h_s &= Rq_s + h_0 \end{aligned}\right\} \bar{H} = R\bar{Q} \qquad (۱)$$

که توابع انحرافی هستند و مقاومت R = ۰/۰۵۶ cm/(L/hr) می‌باشد. زیرنویس s حالت پایدار اولیه یعنی قبل از ایجاد تغییر را نشان می‌دهد. بنابراین معادله نهایی مانند زمانی که عرض از مبدأ وجود نداشته باشد، به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{R}{\tau s + 1}; H = RQ \qquad (۲)$$

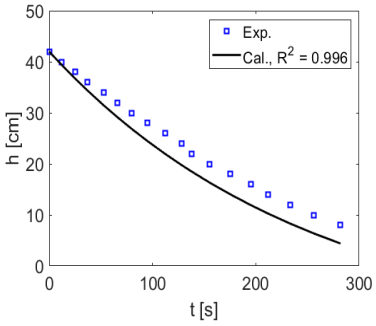
که با توجه به اینکه قطر مخزن ۴۰ سانتیمتر می‌باشد، مقدار

$$\tau = RA = R\,\frac{\pi(0.4)^2}{4}\times 36000 = 253.338s$$

می‌باشد. برای تست رفتار پاسخ ارتفاع به تغییر دبی، ارتفاع در ۴۲ سانتیمتر که نظیر ۱۰۰۰ لیتر بر ساعت است تنظیم شده و در شرایطی که پمپ خاموش است، شیر خروجی را کامل باز کرده و زمان‌های نظیر ارتفاع‌های مختلف یادداشت می‌شوند. این فرآیند مشابه زمانی خواهد بود که دبی ورودی تغییر پله‌ای از ۱۰۰۰ لیتر بر ساعت به صفر داشته باشد. بنابراین مقدار تغییر پله‌ای سیستم خطی برابر R ۱۰۰۰- سانتیمتر در نظر گفته می‌شود. بنابراین رابطه نهایی ارتفاع برحسب زمان با استفاده از تابع انتقال به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$h = 42 - 1000R\,(1-e^{-t/\tau}) \qquad (۳)$$

شکل ٤ پاسخ تجربی را با نتایج معادله فوق مقایسه می‌کند.



شکل ٤ مقادیر ارتفاع بر حسب زمان در اثر کاهش پله‌ای ۱۰۰۰ لیتر بر ساعت در دبی ورودی مربوط به شیر کاملاً باز

نتایج به دست آمده با پیش بینی تابع انتقال تطابق خوبی نشان می‌دهد.

-آزمایش سوم: مقایسه دبی خروجی آزمایشگاهی با پاسخ به دست آمده از تابع انتقال

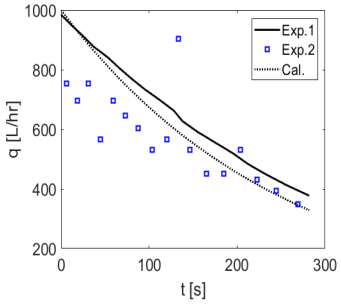
دبی خروجی در پاسخ به کاهش پله‌ای ۱۰۰۰ لیتر بر ساعت در دبی ورودی به صورت زیر بر حسب زمان بیان می‌شود:

$$q = 1000 - 1000(1-e^{-t/\tau}) \qquad (٤)$$

برای تخمین مقدار آزمایشگاهی دبی خروجی بر حسب زمان دو دیدگاه را می‌توان بررسی کرد.

الف) می‌توان از ارتفاع خوانده شده و رابطه به دست آمده در شکل ۳، مقدار دبی خروجی را به دست آورد.

ب) با توجه به سطح مقطع مخزن معلوم و تغییر ارتفاع خوانده شده، تغییر حجم مربوط به هر بازه زمانی را محاسبه کرده و دبی متوسط مربوط به آن بازه را نیز به دست آورد. نتایج این دو دیدگاه در شکل ۵ نشان داده شده است.



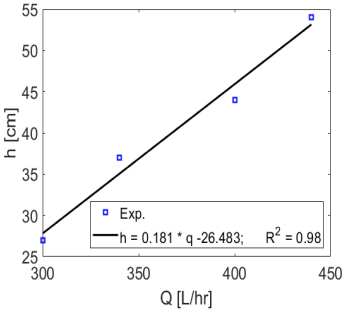
شکل ۵ مقادیر دبی خروجی بر حسب زمان در اثر کاهش پله ای ۱۰۰۰ لیتر بر ساعت در دبی ورودی مربوط به شیر کاملاً باز

شکل ۵ به وضوح نشان می‌دهد دیدگاه اول بهتر است و این مشاهده منطقی می‌باشد زیرا در دیدگاه دوم مقدار لحظه‌ای به دست نمی‌آید بلکه میانگین روی یک بازه زمانی محاسبه می‌شود. در عین حال می‌توان گفت هر دو روش به صورت کیفی مقادیر قابل قبولی را دارند و مقادیر محاسبه شده از تابع انتقال نیز با داده‌های آزمایشگاهی سازگارند.

آزمایش چهارم: تکرار آزمایش‌های اول تا سوم برای شیر نیمه باز

شیر خروجی در حالت نیمه باز قرار گرفت و حداکثر دبی ٤٤۰ لیتر بر ساعت نظیر ارتفاع ٥٤ سانتی‌متر، تست شد. رابطه ارتفاع و دبی در این حالت نیز همانطور که در شکل ٦ نشان داده شده است خطی می‌باشد.

مقدار مقاومت در این حالت R= ۰/۱۸۱ cm/(L/hr) می‌باشد. مقدار ثابت زمانی نیز tau = ۸۱۸/۸۲s است.

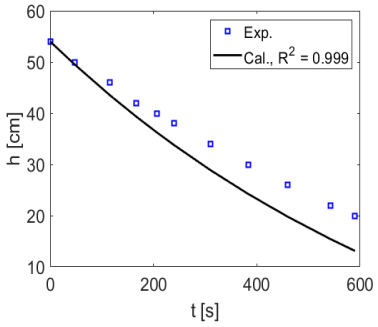


شکل ٦ رفتار ارتفاع بر حسب دبی برای حالت شیر نیمه باز

پاسخ ارتفاع بر حسب زمان به صورت زیر نوشته می‌شود:

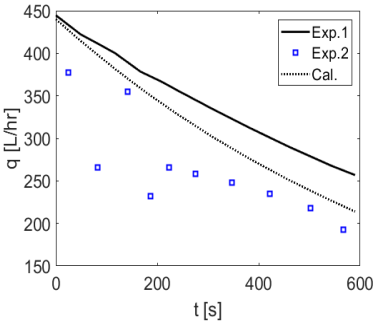
$$h = 54 - 440R\,(1-e^{-t/\tau}) \qquad (5)$$

نتایج پیش بینی این معادله در مقایسه با داده‌های تجربی زمانی که ارتفاع اولیه در ٥٤ سانتیمتری تنظیم شود و مشابه حالت قبل دبی ورودی صفر شود، در شکل ٧ نشان داده شده است.



شکل ٧ مقادیر ارتفاع بر حسب زمان در اثر کاهش پله‌ای ٤٤٠ لیتر بر ساعت در دبی ورودی مربوط به شیر نیمه باز

پاسخ دبی خروجی به کاهش پله‌ای ٤٤٠ لیتر بر ساعت در دبی ورودی، مشابه حالت شیر کاملاً باز با دو دیدگاه برای تخمین مقادیر تجربی در شکل ٨ نشان داده شده است.



شکل ٨ مقادیر دبی خروجی بر حسب زمان در اثر کاهش پله‌ای ٤٤٠ لیتر بر ساعت در دبی ورودی مربوط به شیر نیمه باز

همه نتایج تجربی به دست آمده قابل مقایسه با پیش بینی تابع انتقال می‌باشد.

٣- نتیجه‌گیری

یک مخزن بزرگ ١٠٠ لیتری با یک شیر $\frac{٣}{٤}$ اینچ در خروجی رابطه خطی بین ارتفاع و دبی را نشان می‌دهد که از لحاظ تئوری با پیش بینی معادله برنولی که دبی را متناسب با جذر ارتفاع در نظر می‌گیرد تفاوت دارد. بنابراین می‌توان از چنین سیستمی برای آزمایش تابع انتقال سیستم خطی مرتبه اول استفاده کرد و نیمه باز بودن شیر نیز خطای زیادی ایجاد نمی‌کند. همچنین آزمایش طراحی شده، دید مناسبی از مفهوم تابع انتقال و ثابت زمانی مربوط که برای شیر باز از مرتبه ٢٠٠ ثانیه و شیر نیمه باز از مرتبه ٨٠٠ ثانیه به دست آمد، ایجاد می‌کند.

٤- مراجع

[١]. برنامه درسی مقطع کارشناسی مهندسی شیمی (١٩٣١) مصوبه هشتصد و بیست و چهارمین جلسه شورای برنامه‌ریزی آموزش عالی.

[1]. Coughanowr, L. B. (2009). Process Systems Analysis and Control Process Systems Analysis and Control, Third Edition McGraw-Hill.

[2]. Munson, B. R. Rothmayer AP. Okiishi TH (2012). Fundamentals of Fluid Mechanics, 7th Edition

[3]. Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering, 5th ed. Prentice Hall.

[4]. White, F.M. (2011). Fluid Mechanics, 7th ed. The McGraw-Hill Companies, Inc.