



## Experimental Investigation of Water Level Control System of Liquid-Gas Separator in the Fuel Cell

A. Shojaei<sup>1</sup>, S. M. Rahgoshay<sup>2\*</sup>, M. Rahimi<sup>2</sup>, A. H. Pahnabi<sup>3</sup>, K. Mohammadi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Fereydunkenar, Iran

**ABSTRACT:** Water is the product of the interaction between reactants in the fuel cell. The purpose of this study is to introduce a water level control system that prevents the loss of reactant gases by improving the process of water separation from these gases. In this paper, due to fuel cell characteristics and construction constraints, the performance of a venturi-based flow control system is quantified. Effective parameters for controlling the discharge valve, such as the length of the connection path, the angle of the sensor, the time lags, have been investigated. The path length check showed that if the path length being too high, the pressure changes oscillate, failing to establish a pressure condition for the minimum critical time, and the system loses its performance. Finally, in order to control the water level control system automatically, relations are proposed based on the pressure. The performance of the fuel cell has been investigated at 0.4 to 2 bar and the system is efficient in this range. The sensor angle only affects the maximum critical time, somehow reaches its maximum by placing the sensor at the 90-degree angle. In addition, according to the tests performed, the time between 0.3 and 0.5 seconds is recommended for the minimum critical time.

### Review History:

Received: 2019-04-14

Revised: 2019-09-29

Accepted: 2019-11-05

Available Online: 2019-11-13

### Keywords:

Fuel cell

Venturi

Water level control

Quantification

Reactant gas

## 1. INTRODUCTION

A lot of research has been done to find ways for separating produced water from reactant gases at the fuel cell. Charlat [1] used the centrifugal force to separate water from gas in a fuel cell. Bette et al. [2] used the voltage drop as a control signal to open the discharge valve for separating. orifice and venturi are the equipment used in the separation process, which operates based on the pressure difference of the passing fluid. Zhou et al. [3] investigated the dynamic cavitation properties of nitrogen passing through a venturi at different pressures. Lavante et al, [4] conducted a numerical and laboratory study of the flow in critical ventilation nozzles to measure gas flow. This paper introduces a water level control system; although, the control system process has been qualitatively described by Illner et al. [5].

## 2. METHODOLOGY

The performance of the water level control system is shown in Fig. 1, in the first stage, the valve is open. According to the experimental results, a mixture of gas and water passes through the system at the initial moment, so the pressure measurement begins after  $\Delta T_{cr-H}$  in order to discharge the remaining gas from the previous cycle. The water then enters the venturi through the separator outlet, and simultaneously the differential pressure of the passing fluid is measured by a pressure sensor and sent to the electrical control system. The electrical control checks whether a sudden change in

differential pressure has occurred or not. The sudden change indicates that the flow is changing from liquid to gas, but if the phase change does not occur (-), the differential pressure is still measured and sent to the control unit. However, if a sudden change occurs (+) the controller waits for  $\Delta T_{cr-L}$ , then sends a message to close the valve. After closing the drain valve, the control unit checks whether the fuel cell is on. If the fuel cell is switched off, the cycle ends. However, if the fuel cell is turned on, it holds the discharge valve shut for  $\Delta T_{off}$  seconds.

## 3. DISCUSSION AND RESULTS

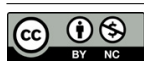
### 3.1. Pipe length

As the length of the connection pipe becomes longer, the volume of gas inside the pipe increases. The small amount of gas remaining in the pipe is combined with gases, resulting in the pressure changes oscillate and the system becomes disrupted. However, if the length of the pipe is short, not only a smaller volume of gas is trapped in the pipe, but also a mixture of water and gas does not form during gas discharge. As a result, the system operates with the least reactant losses.

### 3.2. Angle of the pressure sensor

The maximum value of the maximum critical time is tested for 5 different angles of the pressure sensor at the inlet pressure of 1 bar. According to Fig. 2, the magnitude of this parameter at 90 and 270 angles is slightly less than other angles.

\*Corresponding author's email: rahgoshay@mut.ac.ir



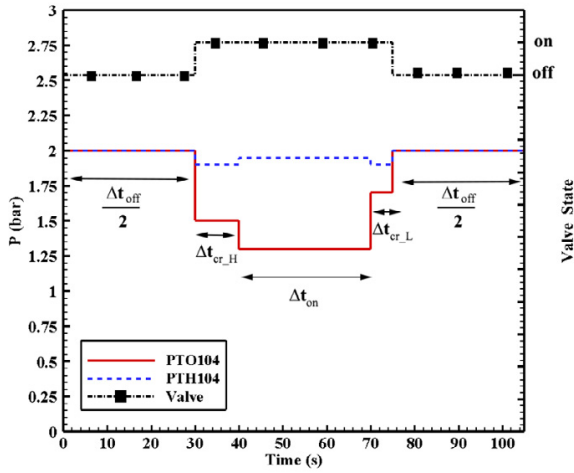


Fig. 1. Diagram of the proposed algorithm

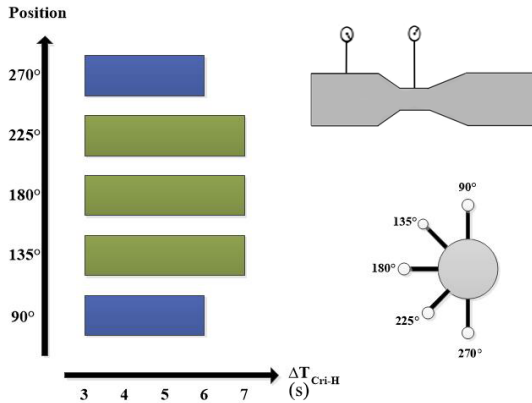


Fig. 2. Maximum of Maximum critical time based on different angles of the pressure sensor

3.3. Duration of the shut-off discharge valve

In each cycle, the discharge valve closes for a certain period. During this time, water collects in the separator tank. In the experimental sample, the separator volume is 25 cc. On the other hand, the inlet discharge at a current of 300 amp and 1 bar pressure is 0.38 cc/s. So  $\Delta T_{off}$  is calculated as follows:

$$\Delta t_{off} = \frac{25 \text{ cc}}{0.38 \text{ cc/s}} = 65.8 \text{ s} \tag{1}$$

3.4. Minimum critical time

The minimum critical time is the time required to ensure that the fluid passing through the water is converted to gas. In this case, the discharge valve will be closed if the gas flows continuously for  $\Delta T_{cr-L}$ . According to the experimental results, this time interval should be large enough somehow that the passage of bubbles does not cause of closing the discharge valve and remaining the water in the separator and should be small enough to waste a small amount of gas. According to the tests performed, a critical time of 0.3 to 0.5 seconds is recommended.

Table 1. Mixed discharge at 3 different pressures

Pressure (bar)	min[ $\Delta T_{cr-H}$ ] (s)	$\dot{Q}_{mix}$ (lpm)
0.6	2.5	8.64
1	2.25	9.59
1.4	2	10.79

3.5. Maximum critical time

By closing the discharge valve, the amount of gases from the previous cycle remains in the pipeline. Thus, by opening the discharge valve, the available gas first passes through the venturi. This causes the establishing of the pressure condition and closing the discharge valve, without draining the water. Therefore,  $\Delta T_{cr-H}$  provides the time needed to pass through the confined gas. For this purpose, the following procedure is used to calculate the critical time.

The control system assembly consists of two sections of the separator tank and the connection path.  $V1$  is the volume of the separator calculated as follows:

$$\Delta t_{purge-wtr} = \frac{V1}{\dot{Q}_{wtr}} \tag{2}$$

The amount of gas left in each cycle is equal to the volume of the connecting pipe,  $V2$ . The critical time must be greater than the time required to discharge this volume of gas in order to that water does not remain in the tank. This time variable is calculated as follows:

$$\Delta t_{purge-gas} = \frac{V2}{\dot{Q}_{mix}} = \frac{A_c L_c}{\dot{Q}_{mix}} \tag{3}$$

According to Eqs. (2) and (3), to calculate the  $\Delta T_{cr-H}$ , it is necessary to calculate the  $\dot{Q}_{mix}$  obtained by the following equation:

$$\dot{Q}_{mix} = \frac{V2}{\min[\Delta t_{cr-H}]} \tag{4}$$

For this purpose, a minimum of  $\Delta t_{cr-H}$  is required by experimental testing at various pressures. Table 1 shows the mixture flow for three different pressures.

However, to calculate the mixture flow at any pressure we need a general relation defined as follows.

$$\dot{Q}_{mix} \text{ (lpm)} = (\dot{Q}_{gas} \times X) + \dot{Q}_{wtr} \times (1 - X) \tag{5}$$

In the above relation  $X$  is the mass fraction of the passing fluid which, with respect to water and nitrogen gas discharge, and the results from Table 1, fall within the range of 0.044 to 0.074. In the following calculation, the value of  $X$  is considered 0.05. Finally, the critical time of the adenine is calculated as follows:

$$\Delta T_{cr-H} = (\alpha \times \Delta t_{purge-wtr}) + (\Delta t_{purge-gas} \times (1 - \alpha)) \tag{6}$$

In the above relation,  $\alpha$  is considered to be 0.3.

#### 4. CONCLUSIONS

Water is one of the products of the interaction between hydrogen and oxygen in a fuel cell. The presence of this product can reduce fuel cell efficiency. The purpose of this study was to introduce a water level control system, a system that can prevent the loss of reactant gases. Therefore, unused gases are returned to the fuel cell, thereby reducing the cost of using reactant gases to generate electricity. The system consists of a mechanical unit (venturi) and a control unit which is designed based on various reactant gases such as air and oxygen. At first, an algorithm was proposed for the control system. Then, in order to find a relationship for automatic control of the system, the parameters expressed in the algorithm were investigated.

#### REFERENCES

- [1] P. Charlat, Gas/liquid phase separator and the fuel cell-based power production unit equipped with one such separator, in, Google Patents, 2006.
- [2] W. Bette, D. Coerlin, W. Stuhler, Fuel Cell System and Method for Operating a Fuel Cell System, in, Google Patents, 2008.
- [3] J. Zhu, H. Xie, K. Feng, X. Zhang, M. Si, Unsteady cavitation characteristics of liquid nitrogen flows through venturi tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, 112 (2017) 544-552.
- [4] E. Von Lavante, A. Zachcial, B. Nath, H. Dietrich, Numerical and experimental investigation of unsteady effects in critical venturi nozzles, Flow measurement and instrumentation, 11(4) (2000) 257-264.
- [5] D. Illner, I. Mehlretter, O. Voitlein, Method for monitoring the discharge of media out of fuel cell, and a fuel cell system, in, Google Patents, 2008.

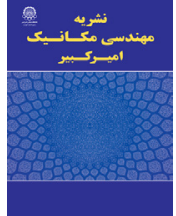
#### HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Shojaei, S.M. Rahgoshay, M. Rahimi, A.H. Pahnabi, K. Mohammadi, *Experimental investigation of water level control system of Liquid-Gas separator in the fuel cell*, Amirkabir J. Mech Eng., 53(3) (2021) 145-148.

DOI: 10.22060/mej.2019.16127.6281







## بررسی آزمایشگاهی سیستم کنترل سطح آب جداساز مایع-گاز در پیل سوختی

احمدرضا شجاعی<sup>۱</sup>، سید مجید رهگشای<sup>۲\*</sup>، مظاهر رحیمی<sup>۲</sup>، امیرحسین پهنابی<sup>۲</sup>، کمال محمدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی برق کنترل، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۱-۲۵

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۷-۰۷

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۸-۱۴

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۸-۲۲

### کلمات کلیدی:

پیل سوختی

ونتوری

سیستم کنترل سطح آب

کمی سازی

واکنش دهنده گازی

**خلاصه:** تعامل بین واکنش دهنده‌ها در پیل سوختی سبب تولید آب می‌شود. هدف از این مطالعه، معرفی نوعی سیستم کنترل سطح آب است که علاوه بر کنترل آب خروجی از جداساز، از اتلاف گازهای واکنش دهنده جلوگیری کند. در این مقاله با توجه به مشخصات پیل سوختی و محدودیت ساخت به کمی‌سازی عملکرد سیستم کنترلی مبتنی بر جریان عبوری از ونتوری پرداخته شده است. پارامترهای موثر در کنترل شیر تخلیه همچون طول مسیر اتصال، زاویه قرارگیری سنسور، وقفه‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بررسی طول مسیر نشان داد اگر طول مسیر زیاد باشد، تغییرات فشار حالت نوسانی گرفته و شرط فشار را برای زمان بحرانی کمینه برقرار نمی‌کند و سیستم کارایی خود را از دست می‌دهد. زاویه سنسور نیز تنها در زمان بحرانی بیشینه تاثیرگذار است به نحوی که با قرارگیری سنسور در زاویه ۹۰ درجه به ماکزیمم مقدار می‌رسد. در ضمن بنابر نتایج انجام شده زمان بین ۰/۳ تا ۰/۵ ثانیه برای زمان بحرانی کمینه پیشنهاد می‌شود. در نهایت به منظور کنترل اتوماتیک سیستم کنترل سطح آب جداساز، روابطی بر اساس فشار کاری پیل سوختی ارائه شده است. عملکرد سیستم کنترلی در فشارهای کاری ۰/۴ تا ۲ بار گیج مورد بررسی قرار گرفته و در این بازه کارا می‌باشد.

### ۱- مقدمه

در پیل سوختی به دلیل استفاده از اکسیژن و هیدروژن به عنوان سوخت، با تولید آب همراه است. جمع شدن آب می‌تواند در دسترس بودن مواد واکنش دهنده را در سطح الکترود محدود کند و در نتیجه سبب افت عملکرد پیل سوختی شود. افت ناشی از جمع شدن آب مایع معمولاً غرقابی نامیده می‌شود. بنابراین برای مدیریت آب تولید شده در پیل سوختی به طوری که از یک سو آب به میزان کافی برای اجزاء مختلف آن وجود داشته باشد و از سوی دیگر از ایجاد غرقابی در پیل سوختی جلوگیری شود، از جداساز استفاده می‌شود.

انتخاب روش جداسازی مایع از گاز به فاکتورهایی همچون هدف جداسازی، خاصیت فیزیکی سیالات، اندازه قطرات، بازده جداساز و هزینه ساخت و ... بستگی دارد. برای رسیدن به ولتاژهای عملکردی بالا، تعداد زیادی از سل‌های پیل سوختی را به هم متصل می‌کنند تا یک سری را تشکیل دهند که یک بخش از بلوک پیل سوختی

در زمان حاضر استفاده از منابع جدید انرژی با توجه به بحران انرژی، محدودیت‌های سوخت فسیلی و مشکلات ناشی از آلودگی هوا بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، دیدگاه نوینی برای استفاده از هیدروژن با توجه به خصوصیات منحصر به فرد آن ایجاد شده است. کاربرد هیدروژن به عنوان سوخت، می‌تواند موجب کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و حذف اکسیدهای گوگرد ناشی از سوخت‌های فسیلی شود. یکی از فناوری‌های نوین که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از پیل سوختی، جهت تامین همزمان الکتریسیته و حرارت به روش الکتروشیمیایی می‌باشد. این روش از نظر تولید آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن، مونواکسید کربن و هیدروکربن سوخته، منحصر به فرد است. از طرفی فرآیند تولید انرژی

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: rahgoshay@mut.ac.ir



پدیده غرقابی در پیل سوختی جلوگیری شود، بلکه اتلاف گازهای واکنش‌دهنده را که طی فرآیند جداسازی اتفاق می‌افتد به حداقل رساند.

#### ۱-۱- پیشینه پژوهش

تحقیقات زیادی برای یافتن روش‌های جداسازی یا تشخیص آب تولید شده از گازهای واکنش‌دهنده در خروجی پیل سوختی با کمترین میزان اتلاف گازهای واکنش‌دهنده، انجام شده است. شارل و همکاران [۲] از نیروی گریز از مرکز برای جدا کردن آب از گاز در یک پیل سوختی استفاده کردند. آن‌ها از یک کانال دو لوله‌ای که در آن دیوار لوله داخلی و قسمت داخلی لوله بیرونی آبدوست بود، استفاده کردند. در ضمن یک پروانه در لوله داخلی وجود داشت که سبب تولید جریان چرخشی می‌شد. مخلوط تولید شده توسط پروانه یک مسیر مارپیچی را طی می‌کرد و در نتیجه نیروی گریز از مرکز، آب موجود در مخلوط را به سمت دیوارهای کانال داخلی کشیده و فشرده می‌کرد. در پایان روند، با اعمال مکش در لوله خارجی، آب جمع‌آوری شده از سیستم خارج می‌شد. در یک سیستم پیل سوختی، آب و گازهای واکنش‌دهنده در آخرین استک جمع‌آوری می‌شوند، در حالی که همچنان گازهای واکنش‌دهنده به پیل سوختی اضافه می‌شود. در نتیجه گازهای واکنش‌دهنده موجود در آخرین استک پیل سوختی رقیق شده و ولتاژ تولیدی افت می‌کند. بت و همکاران [۳] از این افت ولتاژ به عنوان یک سیگنال کنترل برای باز کردن شیر تصفیه استفاده کردند. در واقع، پالس ولتاژ پایین از خروجی گاز به سمت شیر تخلیه هدایت می‌شود و کنترلی با حساسیت و دقتی بالاتر نسبت به یک پالس با ولتاژ بالا فراهم می‌آورد.

علاوه بر روش‌های ارائه شده، آریفیس و ونتوری نیز یکی دیگر از تجهیزاتی هستند که در فرآیند جداسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این تجهیزات که بر اساس اختلاف فشار سیال عبوری عمل می‌کنند، از جمله رایج‌ترین وسایل برای اندازه‌گیری دبی جریان تک‌فاز و دو فاز هستند. تحقیقات زیادی در زمینه شناخت بهتر ونتوری صورت گرفته است. این تحقیقات موجب به‌کارگیری ونتوری در صنایع مختلف همچون هوافضا، هسته‌ای، تهویه مطبوع، پتروشیمی و غیره شده است. ژو و همکاران [۴] به بررسی ویژگی‌های کاپیتاسیون دینامیکی

را تشکیل می‌دهد. لازم است بین هر دو مرحله متوالی در بلوک پیل سوختی، یک جداساز آب جهت حذف قطرات آب تعبیه شود. جداسازهای مورد استفاده در پیل سوختی به دو گروه عمده داخلی و خارجی تقسیم می‌شوند.

جداسازهای خارجی در خارج از بلوک اصلی پیل سوختی قرار می‌گیرند. این نوع جداسازها به هر دو صورت فعال و غیرفعال وجود دارند اما جداسازهای داخلی معمولاً به علت پیچیدگی‌های خاص خود به صورت غیرفعال ساخته می‌شوند. ساده‌ترین و یکی از پرکاربردترین نمونه‌های جداساز خارجی آب، جداساز کاسه‌ای می‌باشد که از نوع غیرفعال می‌باشد. در این نمونه جریان گاز از مجموعه پیل سوختی خارج شده و به درون هندسه‌ای کاسه‌ای شکل وارد می‌شود. جریان چرخشی گاز و همچنین قرار دادن فیلترهای خاص در این جداساز سبب جدا شدن قطرات آب از درون جریان گاز می‌شود. جداساز غشایی نمونه دیگری از جداساز خارجی است که شامل مجموعه‌ای محدودی از غشاء آبدوست و آبگریز است که ما بین دو صفحه انتهایی بزرگ از جنس فولاد قرار گرفته‌اند. این جداساز همچنین شامل یک برآمدگی تنظیم‌کننده فشار برگشتی است که فشار آب داخل جداساز را کنترل می‌کند. این جداساز در پیل‌های سوختی غشاء پلیمری مورد استفاده در صنایع فضایی به کار برده می‌شود [۱].

در برخی از پیل‌های سوختی دما پایین، به خصوص پیل‌های سوختی غشاء پلیمری، گازهای واکنش‌دهنده ورودی به پیل سوختی برای مرطوب نگه‌داشتن الکترولیت باید مرطوب باشند. در این نوع از پیل‌های سوختی امکان دارد که رطوبت موجود در جریان گاز تقطیر شده و مجرای گاز را پر کند، به همین دلیل از جداکننده آب یکپارچه شده با سری سل‌ها (جداساز داخلی) در مسیر انتقال واکنشگر به سری پیل سوختی استفاده می‌شود. جداساز داخلی معمولاً از دو مکانیزم اختلاف مومنتوم و استفاده از صفحات متخلخل آبدوست برای جداسازی آب استفاده می‌کند. این جداساز غیر فعال، بدون استفاده از اجزاء دارای چرخش یا دیگر اجزاء مصرف‌کننده انرژی، آب را از مخلوط جداسازی می‌کند. همچنین می‌تواند به آسانی در اندازه‌های مختلف برای مطابقت با توان‌های مختلف استک پیل سوختی، با اضافه نمودن صفحات جداساز آب اضافی، ساخته شود.

در این پژوهش یک سیستم کنترلی برای تخلیه آب جمع‌شده درون جداساز ارائه شده است تا با استفاده از آن نه تنها از بروز

توسط ترکیب ونتوری و سنسور الکتریکی پروتوگرافی ارائه دادند. ابتدا زمان واقعی الگوی جریان بررسی شد و سپس نسبت کسری آب و هوا، کیفیت جرمی و دبی جرمی دو فاز محاسبه شده است. در این روش تاثیر الگوی جریان در فرآیند محاسبه دبی کاهش یافته است. در واقع این روش بر سختی موجود در محاسبه کیفیت جرمی که در روش‌های پیشین وجود داشت غلبه پیدا کرده است.

لو و همکاران [۹] ونتوری را به منظور حفظ فشار خط لوله در پنوماتیک فاز متراکم انتقال سیستم زغال سنگ، برای استفاده از آن در فرآیند گازسیون زغال سنگ تحت فشار، به کار بردند. بدین منظور زوایای مختلف همگرایی و واگرایی، طول‌های مختلف ونتوری مورد بررسی قرار گرفت.

قاسمی و فصیح [۱۰] به منظور بررسی تاثیر سایز ونتوری در دبی جریان سه ونتوری با طول گلوبی ۱، ۲/۵ و ۵ مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور هر سه مدل ونتوری تحت فشارهای ورودی و خروجی مختلف و فشار خروجی متغیر با زمان به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که برای نسبت فشار ورودی به خروجی کمتر از ۰/۸ دبی جریان مستقل از فشار جریان در پایین دست خواهد بود ولی از این نسبت به بعد ونتوری همچون اریفیس عمل خواهد کرد. در ضمن نتایج نشان داد که تغییر سایز گلوبی ونتوری تاثیری در ثابت ماندن یا تغییر آن دبی جریان ندارد.

جنگ و همکاران [۱۱] به بررسی تاثیر ناحیه متغیر ونتوری پرداختند. و نشان دادند که از نسبت فشار ۰/۸ کمتر، دبی جریان مستقل از فشار بالادست عمل می‌کند. از طرفی دبی جریان اکثر موارد به صورت خطی با ناحیه سخته جریان در فشار بالادست ثابت مرتبط است. همچنین سخته جریان تاثیر به‌سزایی در ضریب تخلیه ونتوری دارد در حالی که فشار بالادست و پایین دست تاثیرپذیری ناچیزی از ضریب تخلیه دارند.

تیتراچ و همکاران [۱۲] از ونتوری به عنوان دستگاه اندازه‌گیری دبی در سیستم‌های تهویه استفاده کردند آن‌ها توانستند دبی هوای بین ۱ تا ۸ لیتر بر ثانیه را با توجه به فشار ورودی صفر تا ۱۰۰۰ پاسکال اندازه‌گیری نمایند.

لاوانته و همکاران [۱۳] به بررسی عددی و آزمایشگاهی جریان در نازل‌های ونتوری بحرانی به منظور اندازه‌گیری جریان گازی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که نسبت فشار بازگشتی و رینولدز بحرانی تاثیر

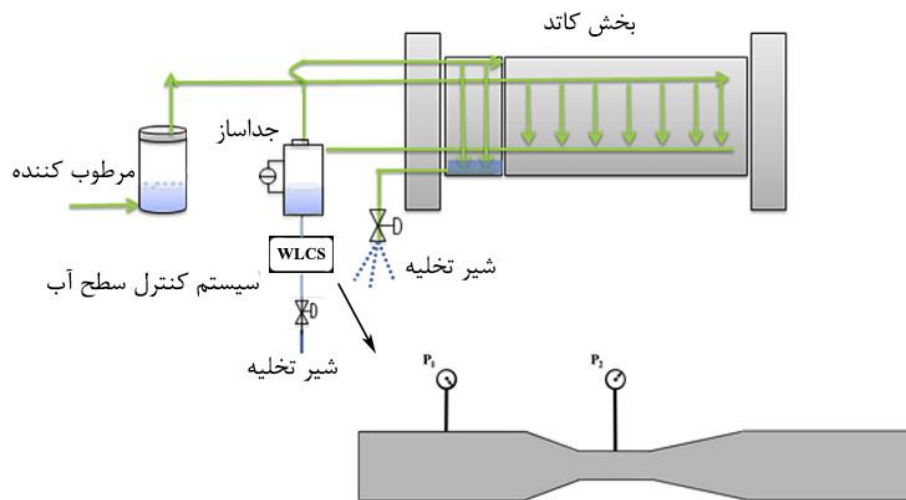
نیتروژن مایع عبوری از یک ونتوری در فشارهای مختلف پرداختند. نتایج حاصل از بررسی فشار دینامیکی نشان داد که با افزایش نسبت فشار، فرکانس و طول کواپتاسیون به صورت خطی افزایش یافته است. این در حالی است که فشار یک رشد نمایی را شاهد بود. به‌ویژه با بیشتر شدن نسبت فشار از ۲/۳۲ یک موج شوک در ونتوری به دلیل تراکم القا می‌شود. بدین منظور معادله تئوری یک‌بعدی از تاثیرات حرارتی برای محاسبه سرعت در ناحیه متراکم جلو توسعه دادند. برای هر دو سیال نیتروژن مایع و آب عدد هیسترو هال ۰/۵ بدست آمده است.

وانگ و همکاران [۵] به بررسی دمای دیواره‌های ونتوری هنگام عبور جریان پرداختند. انبساط جریان گاز عبوری از نازل ونتوری جریان بحرانی<sup>۱</sup> سبب کاهش ۵۰ درجه‌ای دما در سیال در ناحیه گلوبی ونتوری شده است. این کاهش حرارت سبب سرد شدن ونتوری و در نتیجه تاثیرات حرارتی بر روی ساختار ونتوری شده است. در این تحقیق دمای ۱۲ نقطه از یک نازل ونتوری جریان بحرانی با جنس استیل مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش نشان داده شده است که زمان پاسخگویی استیل در حدود صدها تا هزار ثانیه باشد. کاهش دما در ونتوری حداکثر ۱۶/۵ درجه می‌باشد که نتایج به کمک شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> و تجربی بدست آمده است. سوبیسکی و همکاران [۶] به بررسی تاثیر اندازه زاویه همگرایی و واگرایی بر نحوه عملکرد و سایر عوامل موثر در ونتوری پرداخته‌اند. در این تحقیق آن‌ها یک ونتوری با طول گلوبی ۳ میلی‌متر و با زوایای همگرایی و واگرایی (۴۵-۴۵)، (۳۰-۳۰) و (۶۰-۳۰) مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌ها از اثرگذاری زاویه همگرایی در فشار بالادست جریان و عدد رینولدز می‌باشد، در واقع کاهش زاویه این قسمت سبب کاهش عدد رینولدز می‌شود.

الیور و همکاران [۷] مقایسه‌ای بین عملکرد ونتوری و اریفیس برای جریان دو فازی آب و هوا با نسبت  $(x < 0/011)$  انجام دادند. نسبت افت فشار بین اریفیس و ونتوری ۱/۸۱ اندازه‌گیری شد. تاثیر نیروی گرانش برای هر دو نوع ونتوری افقی و عمودی نیز بررسی شد و نتایج حاکی از تاثیر اندک این نیرو در افت فشار ایجاد شده در ونتوری بود.

منگ و همکاران [۸] یک روش جدید برای اندازه‌گیری دبی

1 Critical Flow Venturi Nozzel  
2 Computational Fluid Dynamic



شکل ۱. موقعیت سیستم کنترل سطح آب جداساز  
 Fig. 1. Water separator control system position

همکاران [۱۷] توصیف شده است، این مقاله قصد دارد این روش را با توجه به خصوصیات پیل سوختی و محدودیت ساخت تعیین کند. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این سیستم بین دو استک پیل سوختی قرار می‌گیرد و وظیفه کنترل سطح آب انباشته شده در مخزن جداساز را به عهده دارد. این سیستم شامل یک بخش مکانیکی (ونتوری) و یک واحد کنترل است. در ابتدا، واحد مکانیکی که شامل یک ونتوری و یک سنسور فشار دیفرانسیل است، تغییرات فشار سیال را از طریق ونتوری اندازه‌گیری می‌کند. در مرحله دوم، دستگاه کنترل نوع سیال را با تجزیه و تحلیل داده‌های دریافت شده از واحد مکانیکی مشخص می‌کند و دستورات بعدی مانند باز کردن یا بسته کردن شیر تخلیه را به واحدهای دیگر صادر می‌کند. در واقع، این سیستم به جای سیستم کنترل جداساز معمولی مانند سنسور سطح مایع در مخزن جداسازی استفاده می‌شود. هزینه ساخت این سیستم جدید نه تنها کم است، بلکه دارای حساسیت و دقت بالا در تعیین نوع سیال است. در ضمن دوام بیشتری نسبت به سایر سیستم‌های کنترل دارد. این سیستم بر اساس فشار کاری مختلف پیل سوختی عمل می‌کند.

## ۲- بیان سیستم کنترلی

### ۲-۱- ونتوری

ونتوری به نام باتسیتا ونتوری دانشمند ایتالیایی نامگذاری شده

به‌سزایی در پیچیدگی جریان دارند به نحوی می‌تواند سبب جدایش ناحیه‌های مختلف سیال و ایجاد موج فشاری ناپایا شوند.

لانگ و همکاران [۱۴] به بررسی رفتار کاویتاسیون و عوامل موثر در شکل‌گیری و رشد طولی کاویتاسیون به‌صورت آزمایشگاهی پرداختند. نتایج حاکی از آن است که تشکیل کاویتاسیون تأثیری در دبی جریان نداشته (بدون در نظر گرفتن فشار خروجی متغییر) و دبی همچنان ثابت باقی می‌ماند. از طرف دیگر بین تعداد کاویتاسیون و نسبت فشار رابطه خطی وجود دارد.

هی و بای [۱۵] یک رابطه جدید برای محاسبه دبی جریان گاز مرطوب در ونتوری با استفاده از یک ضریب جریان دو فاز پیشنهاد کردند. نتایج نشان‌دهنده دقت بیشتر این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد.

حسن و لوکاس [۱۶] روشی نوین برای محاسبه ویژگی‌های جریان دو فاز گاز مایع حلقوی که در صنایع هسته‌ای به‌کار برده می‌شود، ارائه دادند. ونتوری متر چند فاز ادغام شده با تکنولوژی رسانش الکتریکی، قابلیت اندازه‌گیری کسر حجمی گاز در ورودی و گلویی ونتوری را دارد. در این روش از تکنولوژی رسانش الکتریکی به جای دانش کیفیت جرمی جریان استفاده شده است.

مقاله حاضر یک سیستم کنترل سطح آب داخلی را معرفی می‌کند. اگرچه فرایند سیستم کنترل به صورت کیفی توسط اینر و



خوب آب سودمند بوده و از هدر رفت گاز جلوگیری می‌کند. در خط ورودی گاز نیز می‌توان از نازل و نتوری استفاده کرد. به عنوان مثال می‌توان نازل و نتوری را در خط جریان گاز تغذیه شده به پیل سوختی قرار داد و توسط سنسور فشار دیفرانسیلی مقدار جریان را کنترل کرده و در یک حالت بهینه تنظیم کرد. علاوه بر آن از نازل و نتوری در مسیر جریان خروجی گاز واکنشگر و یا گاز بی‌اثر می‌توان استفاده کرد. همچنین اگر پیل سوختی چند مرحله‌ای باشد از این وسیله می‌توان در بین مراحل استفاده کرد تا مقدار مصرف گاز هر مرحله محاسبه شود و شرایط کلی کاری بدست آید. بنابراین با کنترل و مانیتور کردن فشار دیفرانسیلی این امکان وجود دارد که عبور جریان یا عدم آن را از خط جریان تخلیه آب تشخیص داده و یا زمان بسته بودن شیر و یا خرابی و نشت شیر را تشخیص داد. اگر در زمانی که شیر تخلیه باید بسته بود و اختلاف فشار دیفرانسیلی بیشتر از مقدار حد آن شده، مطمئناً شیر تخلیه خراب شده یا نشتی ناخواسته در سیستم وجود دارد که باعث خارج شدن بیش از حد گازهای واکنشگر می‌شود. در این حالت سیستم دستور به متوقف کردن پیل سوختی را می‌دهد.

کنترل خروج آب و گاز از پیل سوختی بدین صورت است که پس از خروج کامل آب از خط، تغییر جریان خروجی از آب به گاز توسط کنترل فشار دیفرانسیلی در نازل و نتوری تشخیص داده شده و توسط شیر خط بسته می‌شود و به گاز اجازه خروج داده نمی‌شود. نازل و نتوری نه تنها برای اندازه‌گیری جریان یک فاز بکار می‌رود بلکه می‌تواند برای زمانی بکار رود که جریان آب خارج شده و پس از آن گاز شروع به خروج نماید. بدین صورت که زمانی که مرز دو فاز به عنوان مثال گاز و مایع از نازل عبور می‌کند تغییرات فشار ناگهانی ظاهر می‌شود و از این عامل می‌توان برای مقیاس بستن شیر استفاده نمود. پس از تشخیص تغییر فاز در نازل، شیر پس از یک تاخیر زمانی بسته می‌شود تا بخشی از گاز که به صورت بی‌اثر است همراه با آب خارج شود. بنابراین بر اساس این روش در ابتدا آب تولیدی و پس از آن مقدار مشخصی از گازهای بی‌اثر خارج می‌شود و پس از آن شیر بسته می‌شود، که اگر بسته نشود پیل سوختی از کار می‌افتد. این تاخیر زمانی ممکن است ثابت در نظر گرفته شود و یا وابسته به مقدار آب خروجی باشد. مقدار آب خروجی از فشار دیفرانسیلی و زمان عبور آب تشخیص داده می‌شود.

است. و نتوری جهت اندازه‌گیری دبی سیال در لوله‌ها به کار برده می‌شود. برای سیال تراکم‌ناپذیر هنگام عبور از یک و نتوری، سرعت سیال هنگام عبور از یک محفظه به واسطه پیوستگی جرمی افزایش می‌یابد، این درحالی است که فشار آن با توجه به پیوستگی انرژی کاهش می‌یابد. این امر نشان از این دارد که افزایش سرعت در پی کاهش فشار می‌باشد. بنابراین با اندازه‌گیری تغییرات فشار می‌توان دبی را محاسبه نمود و در ادامه با استفاده از اصل بقای جرم، می‌توان سرعت سیال در دو نقطه مختلف از و نتوری را به صورت زیر به هم مرتبط کرد.

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \rightarrow v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} \quad (1)$$

حال با استفاده از رابطه برنولی بین دو نقطه، تغییرات فشار در دو نقطه به صورت روابط (۱) و (۲) بیان می‌شود.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + f \quad (2)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (h_2 - h_1) + f \quad (3)$$

با فرض این‌که سیال عبوری اتلاف فشار نداشته باشد و دو نقطه انتخابی دارای ارتفاع یکسانی باشند، رابطه بالا به صورت رابطه (۴) خلاصه می‌شود.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (4)$$

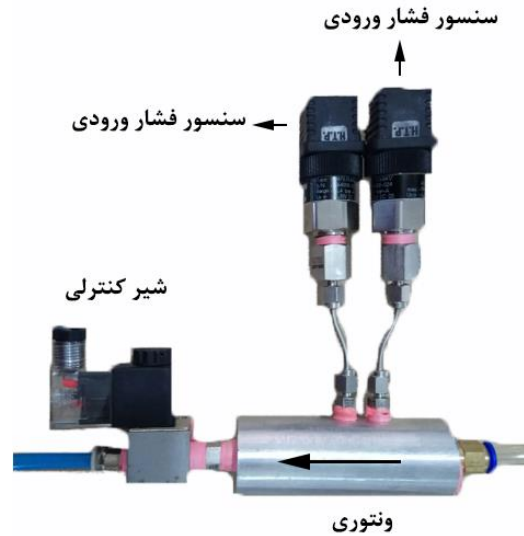
## ۲-۲- نحوه کارکرد و نتوری در پیل سوختی

ساختار نازل و نتوری بدین صورت است که با تنگ شدن مسیر عرض مقطع در یک نقطه به کمترین مقدار رسیده و دوباره به مقطع اولیه باز می‌گردد. با عبور گاز یا مایع از نازل و نتوری سرعت افزایش یافته و در باریک‌ترین به بالاترین سرعت و کمترین فشار خود می‌رسد. سنسور اندازه‌گیری فشار دیفرانسیلی، اختلاف فشار جریان بین بخش بالادست و باریک‌ترین نقطه در نازل و نتوری را اندازه می‌گیرد. این اختلاف فشار معیاری از جریان گاز یا مایع عبوری از نازل و نتوری می‌باشد.

کاربرد و نتوری در خط خروجی آب به دلیل کنترل دقیق و



(ب)



(الف)

شکل ۲. (الف) سیستم کنترلی. (ب) مخزن جداساز  
Fig. 2. (A) Control system. (B) Separator tank

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- اندازه‌گیری تغییرات فشار دیفرانسیلی

در ابتدا هر یک از دو سیال آب و نیتروژن در فشارهای ورودی مختلف برای محاسبه تغییرات فشار استاتیکی و دبی به صورت جدا از هم مورد بررسی قرار می‌گیرند. فشارهای کاری این آزمایش بین ۰/۲ تا ۲ بار گیج است. بدین منظور ابتدا سیستم کنترل سطح را از حالت اتوماتیک خارج کرده و به صورت دستی کنترل می‌کنیم. در ابتدا شیر تخلیه بسته است تا با استفاده از شیر تنظیم فشار نیتروژن ورودی به جداساز، فشار کاری سیستم تنظیم شود. سپس زمانی که فشار تنظیم شد، شیر خروجی باز می‌شود، حال با عبور سیال از ونتوری هم تغییرات فشار سیال عبوری و هم دبی سیال عبوری اندازه‌گیری می‌شود. فرآیند اشاره شده برای هر دو سیال در تمامی فشارهای کاری و به صورت مجزا انجام می‌شود.

شکل ۳ نمودار تغییرات فشار بخش ورودی (PTH104 (P1 و بخش گلوبی (PTO104 (P2 را برای آب و گاز نیتروژن نشان می‌دهند. همان‌طور که قابل ملاحظه است افت فشار ناشی از عبور آب بیشتر از گاز نیتروژن است. در ضمن با افزایش فشار مطلق سیستم، افت فشار در هر دو حالت افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که برای فشار مطلق ۱/۲ بار (فشار گیج ۰/۲)، افت فشار گاز نیتروژن بیشتر از

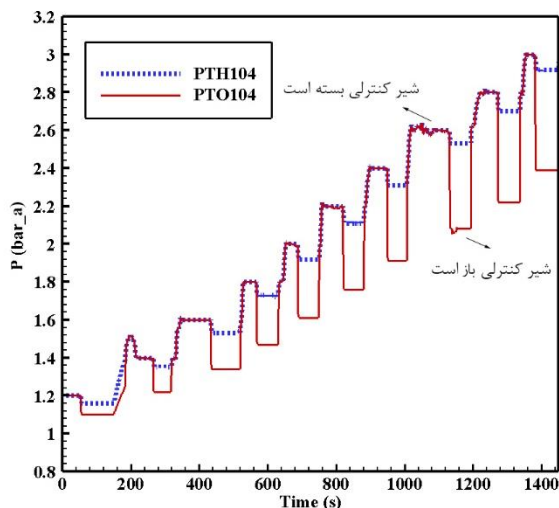
#### ۳-۲- بیان اجزاء نمونه آزمایشگاهی

شکل ۲ شماتیک مجموعه جداساز و سیستم کنترل سطح آب را نمایش می‌دهد. با توجه به این که در نمونه مورد بررسی پیل سوختی وارد مدار نشده است، آب تولیدی توسط منبع خارجی تامین می‌شود. در ضمن فشار کاری سیستم بر اساس فشار گاز نیتروژن ورودی به جداساز کنترل و تنظیم می‌شود.

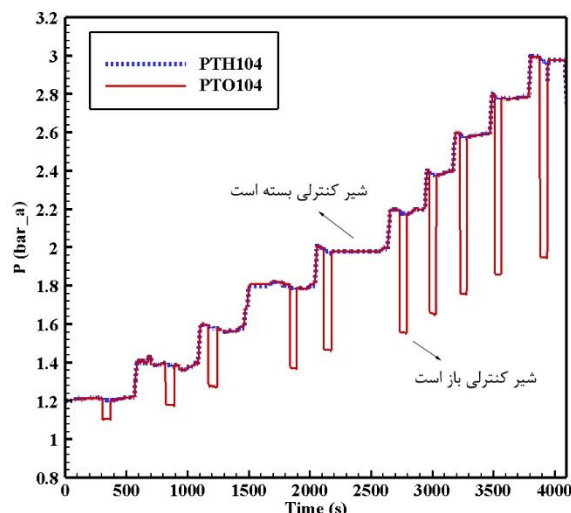
شکل ۲ (ب) مخزن جداساز و شکل ۲ (الف) اجزا سیستم کنترل سطح آب جداساز و موقعیت سنسورهای فشار را نشان می‌دهد که شامل اجزاء زیر می‌باشد:

- ۱- ونتوری
- ۲- سنسور فشار ورودی (PTH104-P1)
- ۳- سنسور فشار گلوبی (PTO104-P2)
- ۴- شیر کنترلی

ابعاد هندسی ونتوری مورد استفاده بدین صورت است که زاویه همگرایی و واگرایی به ترتیب ۲۱ و ۱۱ درجه در نظر گرفته شده است. سنسور فشار ورودی و گلوبی به نام های PTH104 و PTO104 نامگذاری شده‌اند و در فاصله ۲۱ و ۳۵ میلی‌متر از ورودی ونتوری قرار دارند. در ضمن قطر گلوبی با توجه به محدودیت ساخت ۰/۶ میلی‌متر است.

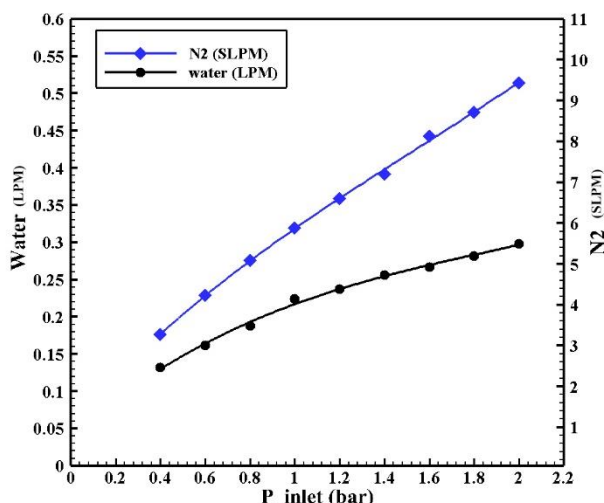


(ب)

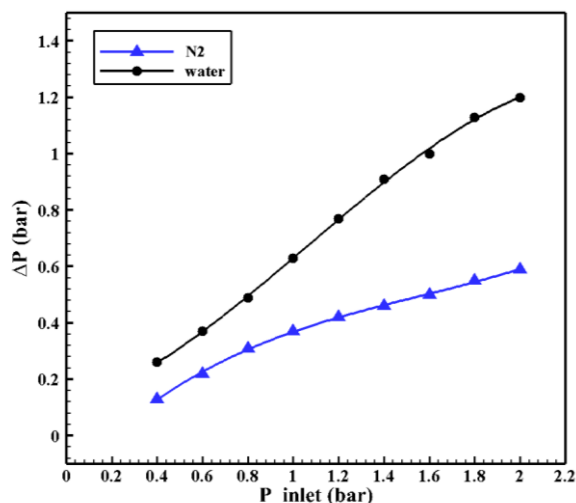


(الف)

شکل ۳. نمودار تغییرات (الف) فشار گلوبی (PTO ۱۰۴) و (ب) بخش ورودی (PTH ۱۰۴) در فشارهای مطلق مختلف برای آب و نیتروژن  
 Fig. 3. Diagram of changes in (a) throat pressure (PTO 104) and (b) inlet section (PTH 104) at different absolute pressures for nitrogen



(ب)



(الف)

شکل ۴. (الف) فشار دیفرانسیلی استاتیکی و (ب) دبی ایجاد در ونتوری در فشار کاری مختلف برای دو سیال آب و نیتروژن  
 Fig. 4. (a) Static differential pressure and (b) flow rate of water and nitrogen through the venturi at different inlet pressures

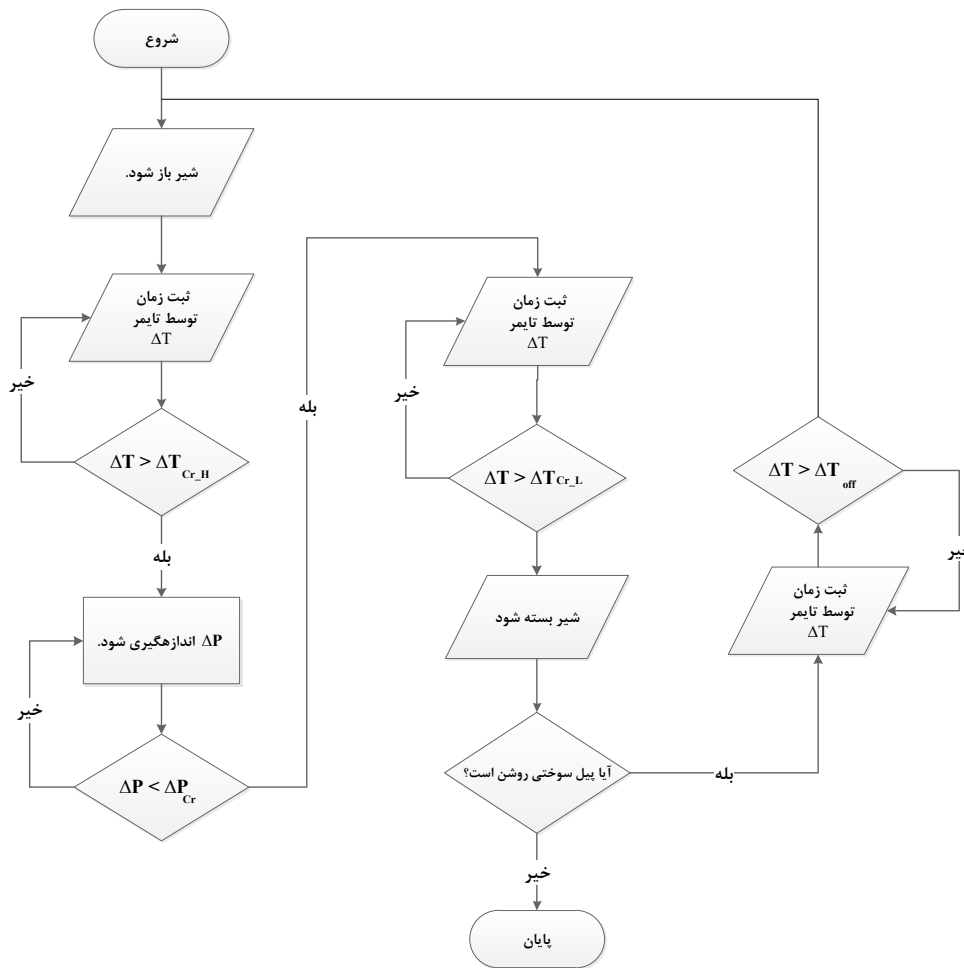
مختلف که به کمک دبی‌سنج اندازه‌گیری شده است در شکل ۴ (ب) نشان داده شده است،

### ۳-۲- بیان عملکرد سیستم کنترلی و پارامترهای دخیل

عملکرد سیستم کنترل سطح آب جداساز در شکل ۵ نشان داده شده است.

آب است و این بدین معنی است که سیستم کنترل سطح آب جداساز برای محدوده فشار مطلق بزرگتر و برابر ۱/۴ (فشار گیج ۰/۴) کارا می‌باشد.

در نتیجه تغییرات فشار استاتیکی برای دو سیال در فشارهای مختلف به صورت شکل ۴ (الف) خواهد بود. در ضمن نمودار دبی خروجی از ونتوری برای هر دو سیال آب و نیتروژن در فشارهای



شکل ۵. الگوریتم پیشنهادی  
Fig. 5. Diagram of proposed algorithm

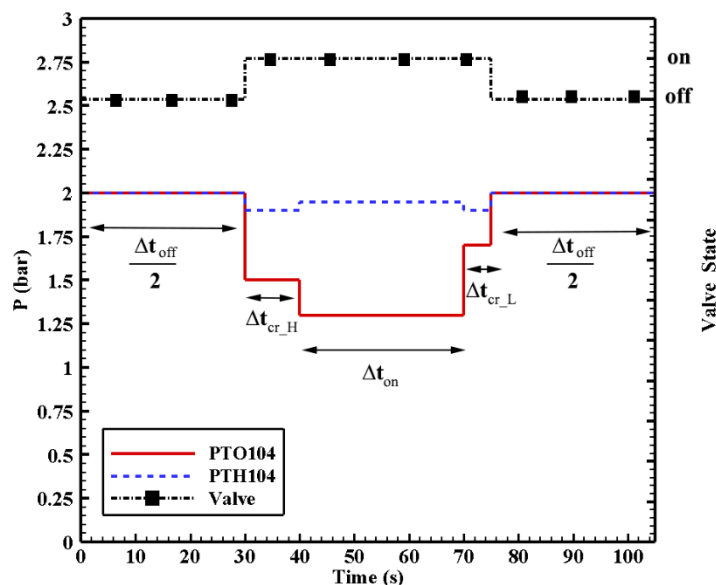
تخلیه، واحد کنترل چک می‌کند پیل سوختی روشن است یا خیر. اگر پیل سوختی خاموش شده باشد، سیکل به پایان می‌رسد. اما اگر پیل سوختی روشن باشد، شیر تخلیه را به مدت  $\Delta t_{off}$  شیر تخلیه را بسته نگه می‌دارد. با باز شدن شیر تخلیه سیکل تکرار می‌شود.

بر اساس این الگوریتم چهار بازه زمانی به نام‌های  $\Delta t_{cr,H}$ ،  $\Delta t_{off}$ ،  $\Delta t_{cr,L}$  و  $\Delta t_{on}$  وجود دارد که به ترتیب بیانگر، مدت زمان بسته بودن شیر تخلیه، زمان بحرانی بیشینه، زمان باز عبور آب و زمان بحرانی کمینه می‌باشند. تغییرات فشار گلوبی و محدوده هر یک از زمان‌های بیان شده به صورت فرضی برای فشار مطلق ۲ بار در شکل ۶ نشان داده شده است.

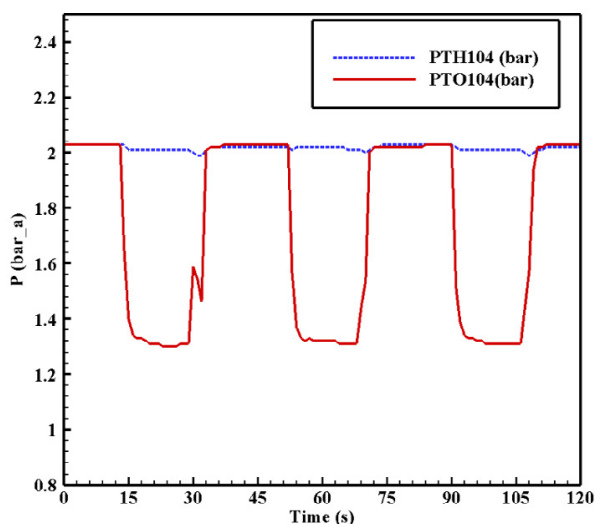
### ۱-۲-۳- بررسی طول لوله

با توجه به این‌که قطر لوله اتصال ثابت است، طول لوله

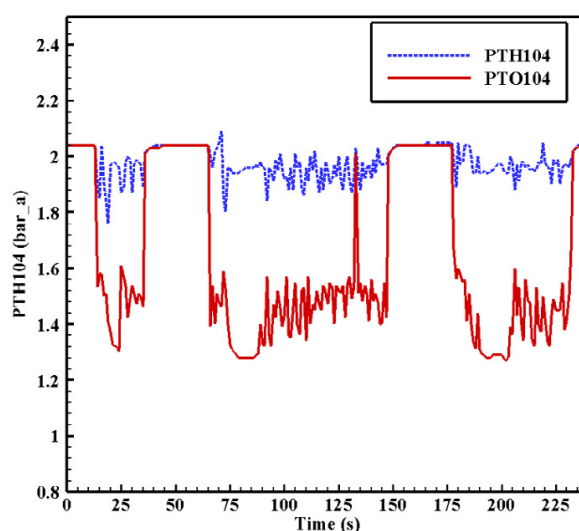
در اولین مرحله شیر باز است. با توجه به نتایج تجربی، در لحظه اولیه مخلوط آب و هوا از سیستم عبور می‌کنند، بنابراین به اندازه  $\Delta t_{cr,L}$  در اندازه‌گیری فشار وقفه داده می‌شود تا اگر گازی از سیکل قبل باقی مانده است تخلیه گردد. سپس آب از طریق خط خروجی از نازل عبور کرده و همزمان فشار دیفرانسیلی توسط سنسور اندازه‌گیری می‌شود و به سمت کنترل الکتریکی فرستاده می‌شود. کنترل الکتریکی چک می‌کند که آیا تغییر ناگهانی در فشار دیفرانسیلی رخ داده است. تغییر ناگهانی نشان می‌دهد جریان عبوری در حال تغییر از مایع به گاز می‌باشد ولی اگر تغییر فاز رخ ندهد (-)، فشار دیفرانسیلی همچنان اندازه‌گیری و به واحد کنترل فرستاده می‌شود (مدت زمان باز بودن شیر تخلیه را با  $\Delta t_{on}$  نمایش می‌دهند). ولی اگر تغییر ناگهانی رخ دهد (+) کنترلر به مدت زمان مشخصی  $\Delta t_{cr,H}$  صبر می‌کند، سپس پیامی را برای بستن شیر ارسال می‌نماید. پس از بسته شدن شیر



شکل ۶. محدوده تاثیرگذاری پارامترهای زمانی  
 Fig. 6. Influence range of time dependent parameters



(ب)



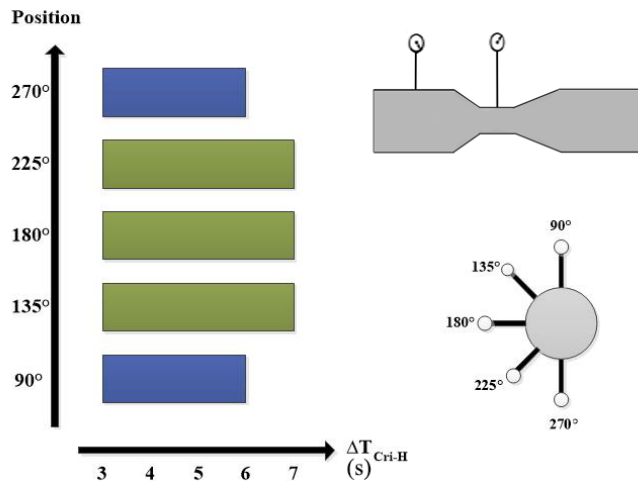
(الف)

شکل ۷. نمودار تغییرات فشار برای طول مسیر ۳/۲۵ و ۰/۵ متر  
 Fig. 7. Diagram of pressure changes for the path length of (a) 3.25m and (b) 0.5m

ترکیب می‌شود. در نتیجه تغییرات فشار حالت نوسانی گرفته و برای مدت زمان  $\Delta t_{cr\_L}$  شرط فشار را برقرار نمی‌کند. در این حالت در اکثر سیکل‌ها مقدار زیادی گاز هدر می‌رود.

این در حالی است که اگر طول مسیر کوتاه باشد، شکل ۷ (ب)، نه تنها حجم کمتری از گاز در لوله محبوس می‌شود، بلکه مخلوط آب و گاز در هنگام تخلیه گاز شکل نمی‌گیرد. در نتیجه سیستم با کمترین

تعیین‌کننده بخش متصل‌کننده مخزن جداساز ( $V_2$ ) خواهد بود. شکل ۷ بیانگر عملکرد سیستم در دو طول متفاوت ۳/۲۵ و ۰/۵ متر می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است، اولاً با زیاد شدن طول مسیر حجم گاز درون لوله افزایش پیدا کرده و در نتیجه  $\Delta t_{cr\_H}$  افزایش می‌یابد. ثانیاً پس از تخلیه آب از مخزن جداساز، به دلیل طولانی بودن مسیر، اندک آب موجود در لوله با هوا



شکل ۸. ماکزیمم زمان بحرانی بیشینه بر اساس زوایای مختلف سنسور فشار

Fig. 8. Maximum of maximum critical time based on different angles of the pressure sensor

شده است. برای هر فشار کاری این عمل تکرار می‌شود تا در تمامی حالات مورد بررسی زمان بسته بودن یکسان باشد.

#### ۳-۲-۴- بررسی زمان بحرانی کمینه

زمان بحرانی کمینه یا همان  $\Delta t_{cr\_L}$  مدت لازم برای اطمینان تغییر سیال عبوری از آب به گاز می‌باشد. در این حالت اگر سیال گازی به طور پیوسته به مدت زمان  $\Delta t_{cr\_L}$  از سیستم عبور کند، شیر تخلیه بسته و آب به طور کامل از جداساز تخلیه می‌شود. بر اساس نتایج آزمایشگاهی و به صورت تجربی این بازه زمانی نه باید به اندازه‌ای کوچک باشد که عبور یک حباب موجود در آب سبب بسته شدن شیر و ماندن آب در جداساز شود و نه باید آنقدر بزرگ باشد که مقدار زیادی گاز نیتروژن تلف شود. بنابر تست‌های انجام شده زمان بحرانی عددی بین ۰/۳ تا ۰/۵ ثانیه پیشنهاد می‌شود. اگرچه می‌توان زمان بحرانی را بیشتر در نظر گرفت.

#### ۳-۲-۵- بررسی زمان بحرانی بیشینه

با بسته شدن شیر تخلیه، مقداری گاز درون لوله متصل‌کننده جداساز و سیستم کنترل سطح آب، ناشی از سیکل قبل، باقی می‌ماند. بنابراین با باز شدن شیر تخلیه در ابتدا گاز موجود از ونتوری عبور می‌کند و در نتیجه شرط فشار برقرار شده و شیر تخلیه، بدون آن که آبی تخلیه شود، بسته می‌شود. بنابراین بازه زمانی  $\Delta t_{cr\_H}$ ، زمان

اتلاف گاز واکنش‌دهنده عمل می‌کند.

فاصله بین مخزن جداساز و ونتوری در شرایط آزمایشگاهی و در بیشترین حالت ۱/۱ متر و قطر لوله ۵ میلی‌متر است. بنابراین حجم مسیر (V2) بر اساس اطلاعات بیان شده به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_2 = A_c L_c = \pi(2.5 \times 10^{-3}) \times 1.1 \times 10^3 = 21.587 \text{ ml} \quad (5)$$

که در عبارت بالا  $L_c$  و  $A_c$  به ترتیب ماکزیمم طول خط اتصال و قطر لوله می‌باشد.

#### ۳-۲-۲- تاثیر زاویه سنسور در حساسیت سیستم

با توجه به این که نیروی گرانش در راستای عمودی وارد می‌شود، هندسه نسبت به محور عمودی متقارن خواهد بود و بر این اساس زاویه قرارگیری سنسور بین ۹۰ تا ۲۷۰ درجه در نظر گرفته شده است.

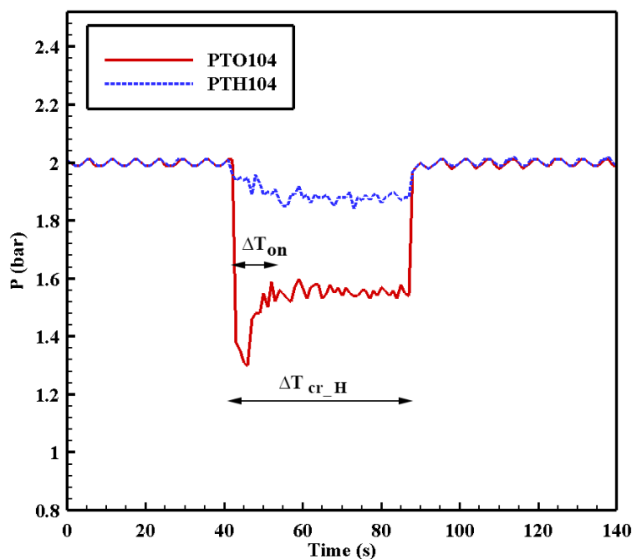
بر همین اساس ماکزیمم زمان بحرانی بیشینه برای ۵ زاویه مختلف از سنسور فشار در فشار ورودی ۱ بار تست شد که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. انتخاب زاویه سنسور امری اختیاری است. بنابراین در این تحقیق، با توجه به موقعیت فیزیکی موجود برای جانمایی سنسور، سنسور فشار در زاویه ۹۰ درجه قرار می‌گیرد.

#### ۳-۲-۳- بررسی زمان بسته بودن شیر تخلیه

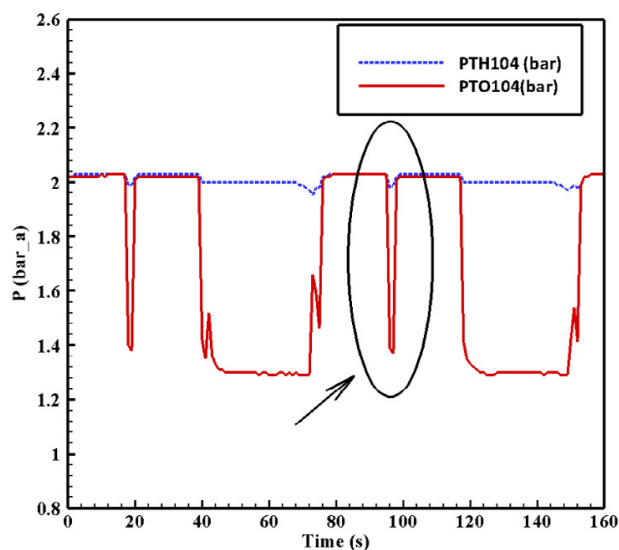
در هر سیکل شیر تخلیه مدت زمانی مشخصی بسته می‌شود. در این بازه زمانی آب درون مخزن جداساز جمع می‌شود. دبی تولیدی و حجم مخزن عوامل تعیین‌کننده  $\Delta t_{off}$  هستند. در نمونه جداساز تجربی حجم مخزن برابر ۲۵ CC در نظر گرفته شده است. از سویی دیگر دبی ورودی به جداساز خود به فشار کاری پیل سوختی و جریان تولیدی وابسته است. دبی ورودی برابر دبی تولیدی در شدت جریان الکتریکی ۳۰۰ آمپر و فشار ۱ بار گیج که برابر ۰/۳۸ در نظر گرفته شده است. بنابراین  $\Delta t_{off}$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta t_{off} = \frac{25 \text{ cc}}{0.38 \text{ cc/s}} = 65.8 \text{ s} \quad (6)$$

با توجه به این که دبی سنج قبل از ورودی مخزن جداساز برای آب ورودی وجود ندارد، با تنظیم شیر آب ورودی، شرط  $\Delta t_{off}$  را برقرار



(ب)



(الف)

شکل ۹. نمودار تغییرات فشار برای زمان بحرانی (الف) خیلی کوچک و (ب) بیشینه

Fig. 9. Diagram of pressure changes with maximum critical time, while it is (a) maximum and (b) minimum

هوا باشد تا سیستم دچار مشکل نشود و آب در مخزن باقی نماند. این متغیر زمانی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta t_{\text{purge\_gas}} = \frac{V 2}{\dot{Q}_{\text{mix}}} = \frac{A_c L_c}{\dot{Q}_{\text{mix}}} \quad (8)$$

در نهایت محدوده زیر برای این متغیر بیان می‌شود:

$$\Delta t_{\text{purge\_gas}} < \Delta t_{\text{cr\_H}} < \Delta t_{\text{purge\_wtr}} \quad (9)$$

طبق روابط (۷) تا (۹)، برای محاسبه زمان بحرانی نیاز به محاسبه دبی مخلوط  $\dot{Q}_{\text{mix}}$  است که طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\dot{Q}_{\text{mix}} = \frac{V 2}{\min[\Delta t_{\text{cr\_H}}]} \quad (10)$$

بدین منظور مینیمم مقدار  $\Delta t_{\text{cr\_H}}$  بر اساس تست آزمایشگاهی در فشارهای مختلف نیاز است. جدول ۱ دبی مخلوط را برای سه فشار مختلف بر اساس مینیمم زمان بحرانی بیشینه اندازه‌گیری شده توسط تست آزمایشگاهی پس از اعمال طول جدید، نشان می‌دهد. اما برای محاسبه دبی مخلوط در هر فشاری نیازمند یک رابطه کلی می‌باشیم که به صورت زیر تعریف می‌شود.

لازم برای عبور گاز حبس شده را فراهم می‌آورد. در انتخاب این متغیر باید به دو نکته زیر توجه شود:

❖ اگر زمان بحرانی بیشینه از حد معینی کوچک‌تر باشد، بدون آن که آبی تخلیه شود، شیر بسته می‌شود. (شکل ۹-الف)

❖ اگر زمان بحرانی بیشینه از حد معینی بیشتر شود، این زمان علاوه بر پوشش دادن زمان باز بودن  $\Delta t_{\text{on}}$ ، زمان بحرانی کمینه  $\Delta t_{\text{cr\_L}}$  را نیز در خود جای می‌دهد. در این حالت نه تنها پارامترهای اشاره شده کارایی خود را از دست می‌دهند بلکه در برخی موارد میزان اتلاف گاز نیتروژن نیز افزایش می‌یابد (شکل ۹-ب).

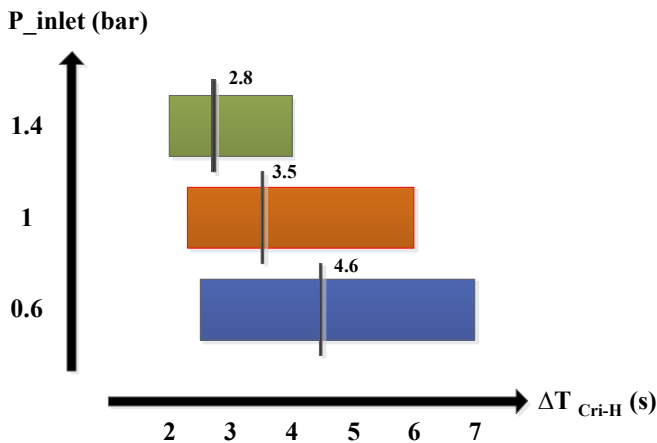
بدین منظور از رویه زیر برای محاسبه زمان بحرانی مناسب استفاده می‌شود. مجموعه سیستم کنترلی از دو بخش مخزن جداساز و مسیر اتصال است. بر این اساس  $V1$  حجم جداساز و در واقع حجم آبی است که باید در هر سیکل تخلیه شود. این حجم معیاری برای تعیین ماکزیمم زمان  $\Delta t_{\text{cr\_H}}$  است که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta t_{\text{purge\_wtr}} = \frac{V 1}{\dot{Q}_{\text{wtr}}} \quad (7)$$

در رابطه بالا  $\dot{Q}_{\text{wtr}}$  دبی آب عبوری از ونتوری می‌باشد. میزان هوای باقی مانده در هر سیکل برابر حجم لوله اتصال،  $V2$ ، می‌باشد. یعنی زمان بحرانی باید بزرگتر از زمان لازم برای تخلیه این حجم از

جدول ۱. دبی مخلوط در ۳ فشار مختلف  
Table 1. Mixed flowrate at 3 different pressures

فشار اولیه (bar)	دبی مخلوط (lpm)	مینیمم زمان بحرانی بیشینه (s)
۰/۶	۸/۶۴	۲/۵
۱	۹/۵۹	۲/۲۵
۱/۴	۱۰/۷۹	۲



شکل ۱۰. ماکزیمم و مینیمم زمان بحرانی بیشینه در فشارهای مختلف  
Fig. 10. Maximum and minimum value of maximum critical time at different pressures

فشار کنترل کرد. در نتیجه پارامترهای دبی عبوری  $Q$ ،  $\Delta P_{cr}$  و  $P_{cr}$  در فشارهای کاری مختلف توسط تست استخراج شده و به کمک نرم‌افزار اکسل، روابط ریاضی همخوان با نتایج برای آن‌ها استخراج شد. بر این اساس پارامترهای  $\Delta P_{cr}$  و  $P_{cr}$  مستقیماً با استفاده از فشار اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای فشار محاسبه می‌شوند. دبی آب و گاز تخلیه شده نیز توسط دبی‌سنج در فشارهای مختلف اندازه‌گیری شده اند. دبی مخلوط  $Q_{mix}$  با استفاده از دبی آب و گاز تخلیه شده و کسر جرمی محاسبه می‌شود که با توجه به این که دبی تخلیه تابعی از فشار است،  $Q_{mix}$  نیز بر اساس فشار خواهد بود. این روند برای سه پارامتر زمانی بیان شده در جدول ۳ نیز تکرار می‌شود. در نهایت با اعمال روابط بدست آمده برای تغییرات فشار گلوبی بر اساس فشار بخش ورودی سیال به ونتوری، به بررسی عملکرد آن در فشارهای بحرانی پرداخته شد. فشارهای مورد بررسی شامل دو فشار بالا، ۲/۶ و ۲/۴ بار و دو فشار پایین ۱/۸ و ۱/۴ بار می‌باشد. که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. شکل ۱۲ عملکرد سیستم را بر اساس پارامترهای نهایی در فشار

$$\dot{Q}_{mix} (lpm) = (\dot{Q}_{gas} \times X) + \dot{Q}_{wtr} \times (1 - X) \quad (11)$$

در رابطه بالا  $X$  کسر جرمی سیال عبوری می‌باشد که با توجه به دبی آب و گاز نیتروژن و نتایج حاصل از جدول ۱، این متغیر در بازه ۰/۰۴۴ تا ۰/۰۷۴ قرار می‌گیرد. در ادامه محاسبات مقدار  $X$  برابر ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. در نهایت زمان بحرانی بیشینه طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta T_{cr\_H} = (\alpha \times \Delta t_{purge-wtr}) + (\Delta t_{purge-gas} \times (1 - \alpha)) \quad (12)$$

که در رابطه بالا  $\alpha$  میزان تاثیرگذاری کران بالای زمان بحرانی بیشینه است که بر اساس نتایج تجربی برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است. ماکزیمم و مینیمم زمان بحرانی بیشینه برای ۳ فشار مختلف استفاده شده برای محاسبه  $X$  به صورت شکل ۱۰ خواهد بود. سیاه رنگ زمان بحرانی بیشینه را بر مبنای رابطه (۱۲) برای سه فشار اشاره شده نشان می‌دهد.

### ۳-۳- روابط استخراج شده

جدول ۲ خلاصه‌ای از روابط پایه بیان شده برای پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد، که شامل پارامترهای زمانی و دبی مخلوط برای محاسبه  $\Delta T_{cr-H}$  (s) است.

با توجه به اینکه فشار عامل تعیین‌کننده عملکرد سیستم کنترلی می‌باشد، بنابراین با استفاده از نتایج بدست آمده از تست‌های مختلف بر اساس فشار کاری  $P$ ، تمامی پارامترها به صورت تابعی از فشار تعیین شده‌اند که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند.

با توجه به این که معیار اصلی تعیین نوع سیال عبوری از ونتوری فشار گلوبی یا تغییرات فشار است، بنابراین با انجام تست در فشارهای کاری مختلف، پارامترهای بیان شده را به صورت تابعی از فشار بیان نموده (شکل‌های ۳ و ۴) تا بتوان سیستم کنترلی را تنها به کمک



جدول ۲. روابط پایه  
Table 2. Basic correlations

روابط	نماد	پارامتر
$(\dot{Q}_{gas} \times X) + \dot{Q}_{wtr} \times (1 - X)$	$\dot{Q}_{mix}$ (lpm)	دبی مخلوط
$V 2 / \dot{Q}_{mix}$	$\Delta t_{purge-gas}$ (s)	زمان تخلیه گاز
$V 1 / \dot{Q}_{wtr}$	$\Delta t_{purge-wtr}$ (s)	زمان تخلیه آب
$(\alpha \times \Delta t_{purge-wtr}) + (\Delta t_{purge-gas} \times (1 - \alpha))$	$\Delta T_{cr-H}$ (s)	زمان بحرانی بیشینه

جدول ۳. خلاصه روابط استخراج شده برای پارامترهای کنترلی بر اساس فشار کاری پیل سوختی  
Table 3. Summary of the extracted correlations for control parameters based on the fuel cell operating pressure

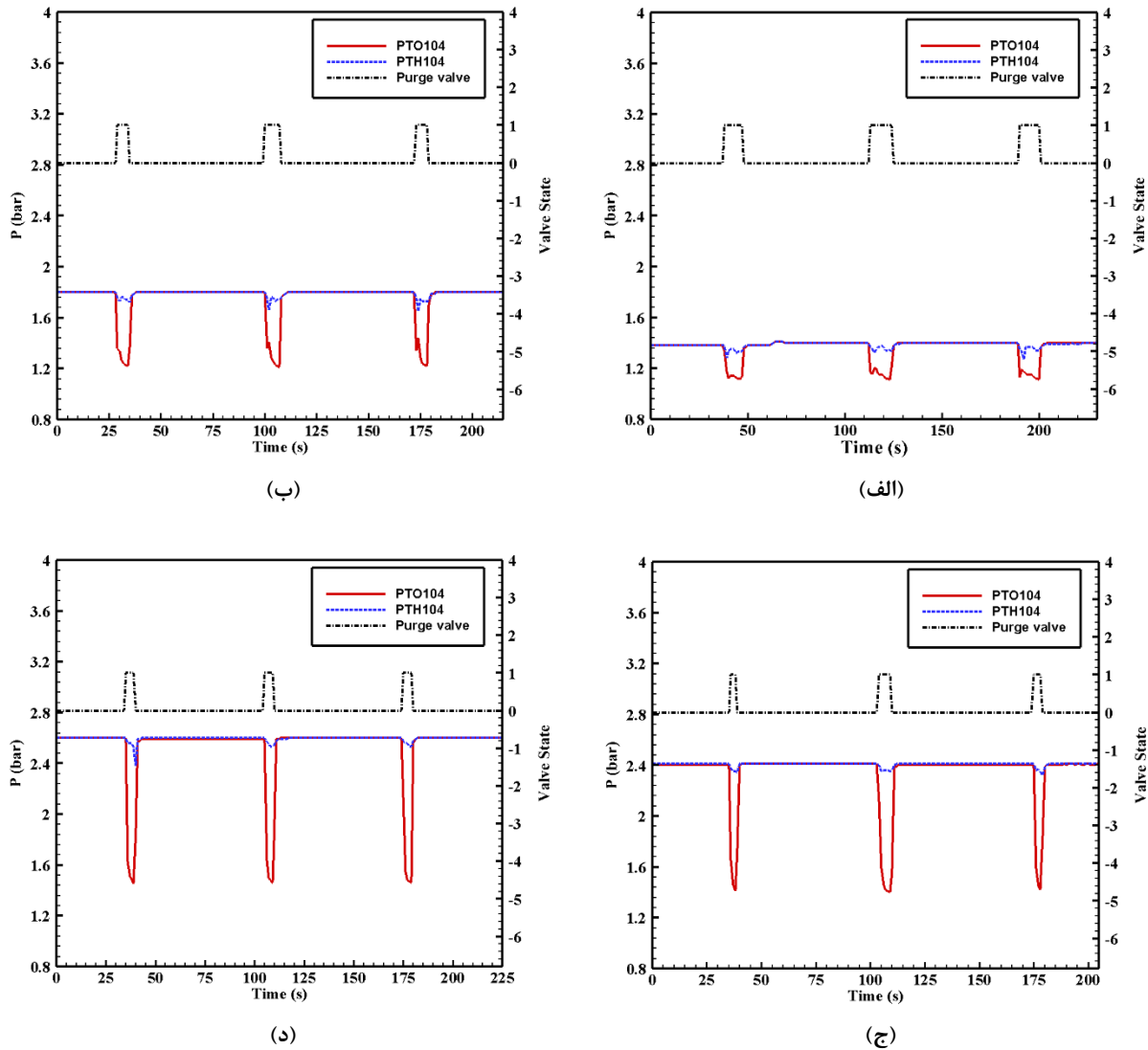
روابط	نماد	پارامتر
$0/1823(P+1)^2 + 1/125(P+1)^2 - 1/5958(P+1) + 0/78$	$\Delta P_{cr}$ (bar)	تغییرات فشار دیفرانسیلی بحرانی
$0/1042(P+1)^2 - 0/5937(P+1)^2 + 1/3958(P+1) + 0/08$	$P_{cr}$ (bar)	فشار بحرانی
$-0/0055(P)^4 + 0/5859(P)^3 - 0/2002(P)^2 + 0/3918(P) + 0/008$	$\dot{Q}_{wtr}$ (lpm)	دبی آب
$-0/3736(P)^2 + 3/6259(P) + 2/0078$	$\dot{Q}_{gas}$ (slpm)	دبی گاز
$-0/056(P)^2 + 0/4073(P) + 0/15$	$\dot{Q}_{mix}$ (lpm)	دبی مخلوط
$-0/9349(P)^2 + 4/4807(P)^2 - 7/7237(P) + 6/7181$	$\Delta t_{purge-gas}$ (s)	زمان تخلیه گاز
$-3/0405(P)^2 + 13/93(P)^2 - 22/17(P) + 18/387$	$\Delta t_{purge-wtr}$ (s)	زمان تخلیه آب
$1/3449(P)^2 - 5/0221(P)^2 + 18/052(P)^2 - 19/232(P) + 11/201$	$\Delta T_{cr-H}$ (s)	زمان بحرانی بیشینه

نشدن شیر کنترلی به غیر از زمان تعیین شده در فشارهای کاری مختلف نشان‌دهنده عملکرد درست سیستم می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است شیر تخلیه پس از گذراندن زمان  $\Delta T_{off}$  (درست زمانی که سطح آب درون جداساز به مقدار تعیین شده می‌رسد)، باز می‌شود. سپس حداقل به مدت زمان  $\Delta T_{cr-H}$  (که از حداقل زمان عبوری آب بزرگتر و از ماکزیمم زمان عبوری آب کوچکتر است) باز می‌ماند و پس از این زمان با تغییر فشار گلویی به مدت  $\Delta T_{cr-L}$  و تشخیص تغییر سیال عبوری از بسته می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

آب یکی از محصولات تعامل بین هیدروژن و اکسیژن در یک پیل سوختی است. حضور این محصول می‌تواند کارایی پیل سوختی را کاهش دهد. هدف از این مطالعه معرفی سیستم کنترل

مطلق ۱/۸ بار (فشار گیج ۰/۸ بار) نشان می‌دهد. طبق روابط ارائه شده در فشار گیج ۱/۸ بار،  $\Delta P_{cr}$  و  $P_{cr}$  به ترتیب برابر ۰/۴۸۹ و ۱/۳۰۹ بار و  $\Delta T_{cr-H}$  برابر ۳/۷۱ ثانیه خواهد بود. در ضمن  $\Delta T_{off}$  و  $\Delta T_{cr-L}$  نیز برابر ۶۵ و ۰/۳ ثانیه هستند. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، در هر سیکل پس از بسته شدن شیر کنترلی، آب تولیدی از پیل سوختی به مدت ۶۵ ثانیه وارد مخزن می‌شود. سپس شیر باز شده و با عبور آب از ونتوری، عمل تخلیه آب صورت می‌پذیرد. زمان تخلیه آب در این فشار بیشتر از ۳/۷۱ ثانیه می‌باشد. پس از تخلیه آب، مخلوط آب و گاز از ونتوری عبور کرده در نتیجه کاهش ( $\Delta P$  افزایش) پیدا می‌کند. در نتیجه با بزرگتر بودن  $P2$  از ۱/۳۰۹ بار (کوچکتر بودن  $\Delta P$  از ۰/۴۸۹ بار) به مدت ۰/۳ ثانیه شیر بسته می‌شود تا از تخلیه گاز جلوگیری کند. به همین صورت سیکل‌های بعدی تکرار می‌شوند. باز یا بسته



شکل ۱۱. نمودار عملکردی سیستم کنترل سطح آب جداساز در نمونه آزمایشگاهی در چهار فشار مطلق (الف) ۱/۴، (ب) ۱/۸، (ج) ۲/۴ و (د) ۲/۶ بار  
**Fig. 11. The functional diagram of the separator water level control system in experimental sample at four absolute pressures: (a) 1.4 bar, (b) 1.8bar, (c) 2.4bar and (d) 2.6 bar**

۱- طول مسیر اتصال: اگر طول مسیر زیاد باشد، حجم گاز درون لوله افزایش پیدا کرده و در نتیجه  $\Delta t_{cr_H}$  افزایش می‌یابد. در نتیجه در هنگام تخلیه اندک آب موجود در لوله با هوا ترکیب می‌شود، در نتیجه تغییرات فشار حالت نوسانی گرفته و برای مدت زمان  $\Delta t_{cr_L}$  شرط فشار را برقرار نمی‌کند. در این حالت در اکثر سیکل‌ها مقدار زیادی گاز هدر می‌رود. این در حالی است که اگر طول مسیر کوتاه باشد، نه تنها حجم کمتری از گاز محبوس در لوله محبوس می‌شود، بلکه مخلوط آب و گاز در هنگام تخلیه گاز شکل نمی‌گیرد. در نتیجه سیستم با کمترین اتلاف گاز واکنش‌دهنده عمل می‌کند.

سطح آب است که از اتلاف گازهای واکنش‌دهنده مانند هیدروژن و اکسیژن، جلوگیری کند. بنابراین، گازهای استفاده نشده به پیل سوختی باز گردانده می‌شوند و در نتیجه هزینه ناشی از استفاده از گازهای واکنش‌دهنده برای تولید برق کاهش می‌یابد. این سیستم شامل یک واحد مکانیکی (ونتوری) و یک واحد کنترل است و بر اساس گازهای مختلف واکنش‌دهنده مانند هوا و اکسیژن طراحی شده است. در ابتدا یک الگوریتم برای سیستم کنترلی پیشنهاد شد. و سپس به منظور یافتن رابطه‌ای برای کنترل اتوماتیک سیستم، پارامترهای بیان شده در الگوریتم بررسی شدند که به قرار زیر می‌باشند.

جای می‌دهد. در این حالت نه تنها پارامترهای اشاره شده کارایی خود را از دست می‌دهند بلکه در برخی موارد میزان اتلاف گاز نیتروژن نیز افزایش می‌یابد. بنابراین  $\Delta t_{cr\_H}$  بین این دو زمان در نظر گرفته می‌شود.

### فهرست علائم

#### علائم انگلیسی

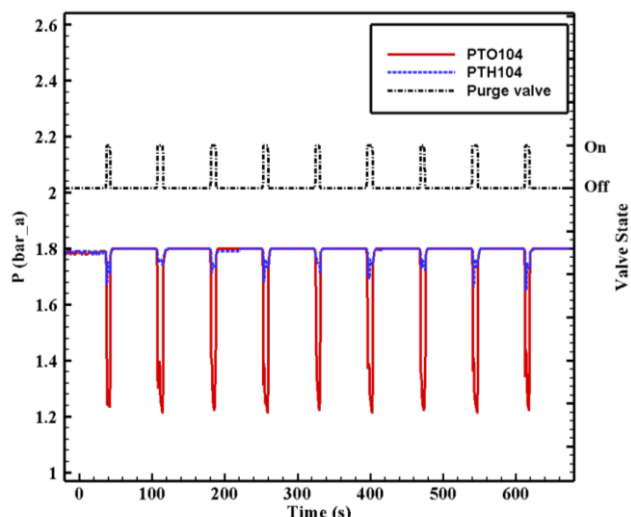
$A$	مساحت، $m^2$
$E$	مدول الاستیسیته، $N/m^2$
$f$	اتلاف فشار، Pa
$g$	شتاب گرانش، $m/s^2$
$h$	ارتفاع، m
$L$	طول مسیر، m
$N_2$	گاز نیتروژن
$P$	فشار، Pa
$Q$	دبی حجمی، l
$t$	زمان، s
$V1$	حجم مخزن جداساز، CC
$V2$	حجم مسیر اتصال، CC
$X$	کسر جرمی سیال عبوری

#### علائم یونانی

$\alpha$	تأثیرگذاری کران بالای زمان بحرانی بیشینه
$\Delta$	تغییرات
$v$	سرعت، m/s
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$

#### زیرنویس

$a$	مطلق
$cr$	بحرانی
$cr\_L$	بحرانی کمینه
$cr\_H$	بحرانی بیشینه
$gas$	گاز
$mix$	مخلوط
$off$	بسته
$on$	باز
$purge$	تخلیه
$wtr$	آب



شکل ۱۲. نمودار عملکردی سیستم کنترل سطح آب جداساز در نمونه آزمایشگاهی در فشار مطلق ۱/۸ بار

Fig. 12. Functional diagram of separator water level control system in experimental sample at absolute pressure of 1.8 bar

۲- زاویه سنسور: زاویه قرارگیری سنسور در  $\Delta t_{cr\_H}$  تأثیرگذار است. به نحوی که اگر سنسور در حالت عمودی باشد، ماکزیمم زمان بحرانی بیشینه افزایش پیدا می‌کند.

۳-  $\Delta t_{off}$ : در هر سیکل شیر تخلیه مدت زمانی مشخصی بسته می‌شود. در این بازه زمانی آب درون مخزن جداساز جمع می‌شود. دبی تولیدی و حجم مخزن عوامل تعیین‌کننده هستند. در نمونه جداساز تجربی حجم مخزن برابر ۲۵ CC در نظر گرفته شده است. از سویی دیگر دبی ورودی به جداساز خود به فشار کاری پیل سوختی و جریان تولیدی وابسته است. با تقسیم حجم بر دبی تولیدی  $\Delta t_{off}$  مشخص می‌شود.

۴-  $\Delta t_{cr\_L}$ : زمان بحرانی کمینه که تعیین‌کننده تغییر سیال عبوری از ونتوری است. بنابر تست‌های انجام شده زمان بحرانی عددی بین ۰/۳ تا ۰/۵ ثانیه پیشنهاد می‌شود. اگرچه می‌توان زمان بحرانی را بیشتر در نظر گرفت.

۵-  $\Delta t_{cr\_H}$ : زمان لازم برای تخلیه گاز محبوس شده از سیکل قبل را فراهم می‌آورد. در انتخاب این متغیر باید به دو نکته زیر توجه شود: اگر زمان بحرانی بیشینه از حد معینی کوچکتر باشد، بدون آن که آبی تخلیه شود، شیر بسته می‌شود. از سوی دیگر اگر زمان بحرانی بیشینه از حد معینی بیشتر شود، این زمان علاوه بر پوشش دادن زمان باز بودن  $\Delta t_{on}$ ، زمان بحرانی کمینه  $\Delta t_{cr\_L}$  را نیز در خود

[9] H. Lu, X. Guo, P. Li, K. Liu, X. Gong, Design optimization of a venturi tube geometry in dense-phase pneumatic conveying of pulverized coal for entrained-flow gasification, *Chemical Engineering Research and Design*, 120 (2017) 208-217.

[10] H. Ghassemi, H.F. Fasih, Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter, *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(5) (2011) 406-412.

[11] H. Tian, P. Zeng, N. Yu, G. Cai, Application of variable area cavitating venturi as a dynamic flow controller, *Flow Measurement and Instrumentation*, 38 (2014) 21-26.

[12] P.J. Titheradge, R. Robergs, Venturi tube calibration for airflow and volume measurement, *Flow Measurement and Instrumentation*, 60 (2018) 200-207.

[13] E. Von Lavante, A. Zachcial, B. Nath, H. Dietrich, Numerical and experimental investigation of unsteady effects in critical venturi nozzles, *Flow measurement and instrumentation*, 11(4) (2000) 257-264.

[14] X. Long, J. Zhang, J. Wang, M. Xu, Q. Lyu, B. Ji, Experimental investigation of the global cavitation dynamic behavior in a venturi tube with special emphasis on the cavity length variation, *International Journal of Multiphase Flow*, 89 (2017) 290-298.

[15] D. He, B. Bai, A new correlation for wet gas flow rate measurement with Venturi meter based on two-phase mass flow coefficient, *Measurement*, 58 (2014) 61-67.

[16] A.H. Hasan, G. Lucas, Experimental and theoretical study of the gas-water two phase flow through a conductance multiphase Venturi meter in vertical annular (wet gas) flow, *Nuclear Engineering and Design*, 241(6) (2011) 1998-2005.

[17] D. Illner, I. Mehlretter, O. Voitlein, Method for monitoring the discharge of media out of fuel cell, and a fuel cell system, in, *Google Patents*, 2008.

بخش همگرا 1  
بخش گلوبی 2

### مراجع

[1] A. Vasquez, K.L. McCurdy, K.F. Bradley, Water outlet control mechanism for fuel cell system operation in variable gravity environments, in, *Google Patents*, 2007.

[2] P. Charlat, Gas/liquid phase separator and the fuel cell-based power production unit equipped with one such separator, in, *Google Patents*, 2006.

[3] W. Bette, D. Coerlin, W. Stuhler, Fuel Cell System and Method for Operating a Fuel Cell System, in, *Google Patents*, 2008.

[4] J. Zhu, H. Xie, K. Feng, X. Zhang, M. Si, Unsteady cavitation characteristics of liquid nitrogen flows through venturi tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 112 (2017) 544-552.

[5] C. Wang, G. Wang, H. Ding, Thermal effect on body temperature distribution of the critical flow Venturi nozzle, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 79 (2016) 187-194.

[6] A. Niedźwiedzka, W. Sobieski, Analytical Analysis of cavitating flow in venturi tube on the basis of experimental data, *Technical Sciences/University of Warmia and Mazury in Olsztyn*, (2016).

[7] J.L.G. Oliveira, J.C. Passos, R. Verschaeren, C. Van Der Geld, Mass flow rate measurements in gas-liquid flows by means of a venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33(2) (2009) 253-260.

[8] Z. Meng, Z. Huang, B. Wang, H. Ji, H. Li, Y. Yan, Air-water two-phase flow measurement using a Venturi meter and an electrical resistance tomography sensor, *Flow Measurement and Instrumentation*, 21(3) (2010) 268-276.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم  
A. Shojaei, S.M. Rahgoshay, M. Rahimi, A.H. Pahnabi, K. Mohammadi, *Experimental investigation of water level control system of Liquid-Gas separator in the fuel cell*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(3) (2021) 589-604.  
DOI: 10.22060/mej.2019.16127.6281

