

شناسایی و مدل سازی فضای حالت و بهبود عملکرد سیستم خنک سازی آب واحدهای گازی نیروگاهی مبتنی بر تخمین دمای آب خروجی

^۱ نصراله اعظم بالغی، ^۲ علی کارساز

^۱ موسسه آموزش عالی خراسان، شرکت مدیریت تولید نیروگاههای گازی خراسان، baleghy@gmail.com

^۲ موسسه آموزش عالی خراسان، a_karsaz1@yahoo.com

چکیده

سیستم خنک سازی آب در واحدهای گازی V94.2 از نوع مدار بسته بوده، که گرمای تولید شده توسط اجزای توربین و ژنراتور را گرفته و به بیرون از محیط منتقل می کند. در حال حاضر فرمان ورود و خروج فن ها در این سیستم توسط ترانسیمتر دمایی که در خروجی پمپ ها نصب شده است، انجام می گیرد. چنانچه خطایی در این ترانسیمتر بوجود آید، ورود و خروج فن ها دچار مشکل می شود. لذا لزوم شناسایی این سیستم و تخمین دمای این سنسور توسط عوامل تاثیرگذار دیگر در سیستم باعث شد تا مدلی از این سیستم به روش تحلیل زیرفضا، که یکی از روشهای کارآمد برای سیستم های چندمتغیره می باشد، ارائه گردد. در این مقاله از معیار خطای پیش بینی FPE که معیار متداولی برای تعیین درجه مدل می باشد، استفاده شده است.

واژه های کلیدی: شناسایی، خنک سازی آب، تحلیل زیرفضا، معیار FPE.

۱- مقدمه

آب از دیرباز به عنوان سیال کمکی در سیستم های خنک سازی مورد استفاده قرار می گرفته است. رادیاتور وسایل نقلیه نمونه ساده و قابل مشاهده آن می باشد که وظیفه خنک سازی روغن موتور را برعهده دارد. در نیروگاه ها نیز آب به عنوان واسط جهت خنک سازی قسمت های مختلف مورد استفاده قرار می گیرد.

در این مقاله شناسایی سیستم خنک سازی آب^۱ در یک واحد گازی مورد بررسی قرار گرفته است. دو روش کلی برای بدست آوردن مدل سیستم وجود دارد [1]: روش اول استفاده از قواعد ریاضی و روش دیگر استفاده از روشهای پارامتری و غیرپارامتری می باشد [2]، [11] و [12].

در اکثر مقالات، مدل سازی سیستم های خنک سازی با استفاده از روشهای ریاضی و معادلات حاکم بر سیستم انجام شده است [6]، [10]. با توجه به تغییرات موجود در سیستم و نامعینی آن ها این روش ها اگرچه کارآمد هستند، اما تعیین ضرایب مدل به صورت جبری کاری سخت و زمان بر می باشد.

روش مدنظر در این مقاله تلفیقی از دو روش پارامتری و غیر پارامتری می باشد. با استفاده از آنالیز گذرا که از روشهای غیر پارامتری بوده، حالت گذرای سیستم شناسایی و سپس با استفاده از مدل فضای حالت

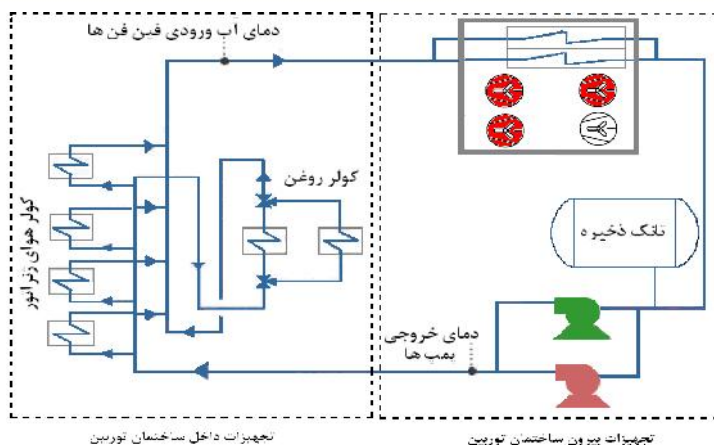
که از روشهای پارامتری محسوب شده و برای سیستم های چند متغیره مفید می باشد، مدل کلی سیستم ارائه شده است.

۲- توصیف کلی سیستم

سیستم خنک سازی آب در واحدهای گازی V94.2 از نوع مدار بسته بوده که دارای دو قسمت کلی است. یک مجموعه شامل مبدل های حرارتی ژنراتور و سیستم روغن کاری در داخل ساختمان توربین بوده و مجموعه دوم شامل پمپ ها، مبدل حرارتی هوا - آب، مخزن ذخیره و فن ها در خارج ساختمان توربین و در فضای آزاد می باشد.

شکل ۱ اجزاء کلی این سیستم را نشان می دهد. آب توسط دو عدد پمپ که یکی از آنها ذخیره می باشد، از خنک کن های هوای ژنراتور و روغن روانکاری گذشته و در نتیجه حرارت تولید شده توسط سیستمهای فوق را جذب می کند. سپس به مجموعه ای از مبدلهای حرارتی هوا - آب وارد شده که در این مبدلها گرمای ذخیره شده در آب به هوای محیط منتقل می گردد. چهار عدد فن که یکی از آنها ذخیره می باشد، وظیفه خنک سازی مبدلهای حرارتی هوا- آب را برعهده دارند. فرمان ورود و خروج فن ها توسط ترانسیمتر دمایی از نوع PT100 که در خروجی پمپ ها نصب شده است، صادر می گردد. در ورودی پمپ ها یک مخزن با هدف جبران سازی تغییرات حجم آب و حفظ یک فشار تقریباً ثابت نصب شده است [3].

¹ Closed cooling water



شکل ۱: شمای کلی سیستم خنک سازی آب (Closed cooling water)

نمی باشد. از روشهای پارامتری نیز می توان روش ARX، فضای حالت و... را نام برد.

در شناسایی مراحل زیر انجام می پذیرد :

انتخاب ورودی و خروجی مناسب ، دریافت داده ها ، تعیین مناسب روش و ساختار مدل ، شناسایی ضرایب مدل و اعتبارسنجی مدل.

یکی از کارهای مهم در شناسایی سیستم ، طراحی سیگنالهای تحریک مناسب برای جمع آوری داده های شناسایی است. سیگنال ورودی یک فرآیند، مهمترین نقش را در شناسایی سیستم دینامیکی بازی می کند. در حقیقت سیگنال ورودی تنها وسیله ای است که می توان با استفاده از آن، فرآیند را طوری تحریک کرد که اطلاعات مورد نیاز جمع آوری شود.

دومین موضوع مهم در شناسایی انتخاب نوع روش شناسایی می باشد. باتوجه به پیچیدگی سیستم می توان مدلسازی خطی یا غیرخطی را انتخاب نمود. در این مقاله از میان روشهای خطی، با توجه به تعداد ورودی مدل فضای حالت انتخاب شده است. چراکه دقت مدل فضای حالت در هنگام چند ورودی نسبت به روشهای دیگر زیادتر است [9] و [13]. همچنین برای بدست آوردن تاخیر در سیستم از آنالیز گذرا استفاده شده است.

آخرین موضوع مهم در شناسایی اعتبارسنجی مدل توسط دسته ای دیگر از داده های آزمایش می باشد که دقت مدل بدست آمده توسط معیارهایی نظیر SSE، MSE، RMSE و... مورد بررسی قرار می گیرد.

۱-۳ تعیین درجه مدل

معیارهای زیادی برای تعیین درجه مدل وجود دارد. اگرچه که در شناسایی به روش فضای حالت، مدل سیستم را می توان تعیین نمود،

۳- شناسایی سیستم

شناسایی سیستم بهترین راه برای استخراج مشخصه های یک سیستم از داده های اندازه گیری شده می باشد. شناسایی به فرآیند ساخت مدل برای سیستم های دینامیکی از روی مشاهدات و دانش قبلی اطلاق می شود. [2]

دو روش کلی برای بدست آوردن مدل سیستم وجود دارد: [1]

- مدل سازی با استفاده از قواعد ریاضی.
- مدل سازی با بکارگیری روشهای پارامتری و غیرپارامتری.

هنگامی که نتوان با استفاده از قواعد ریاضی مدلی برای سیستم ارائه داد، از روشهای پارامتری و غیرپارامتری برای شناسایی استفاده می شود. این روشها به سیستم بصورت یک جعبه سیاه^۲ یا جعبه خاکستری^۳ که دارای تعدادی ورودی و خروجی است نگاه می کنند.

روشهای غیرپارامتری، روشهایی هستند که در آنها پاسخ ضربه مستقیماً و بدون در نظر گرفتن یک مدل مشخص شده از قبل، بدست می آید. آنالیز حالت گذرا یکی از این روشها بوده که براساس پاسخ سیستم به ورودی های ضربه یا پله می باشد. از آنالیز حالت گذرا نه برای تخمین دقیق سیستم، بلکه برای بدست آوردن تخمین هایی درباره تاخیر، بهره استاتیک و ثابت زمانی سیستم، استفاده می شود [1]. از روشهای دیگر غیر پارامتری می توان مدلسازی با استفاده از شبکه های عصبی یا فازی را نام برد که یک انتخاب عمومی در سالهای اخیر بوده و مورد بحث ما

² Black Box

³ Grey Box

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + w(k) \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k) + v(k) \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن $u(k) \in R^m$ بردار ورودی با بعد m ، $y(k) \in R^l$ بردار خروجی با بعد l و $x(k) \in R^n$ بردار حالت سیستم با بعد n می باشد. بردارهای $v(k) \in R^l$ و $w(k) \in R^n$ به ترتیب نویزهای اندازه گیری و فرآیند بوده که به صورت نویز سفید با میانگین صفر در نظر گرفته می شوند. رابطه (۳) ماتریس های کواریانس این سیگنال ها را نشان می دهد.

$$E \left[\begin{pmatrix} w_p \\ v_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_q^T & v_q^T \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{pmatrix} d_{pq} \geq 0 \quad (3)$$

که در آن $S \in R^{n \times l}$ ، $R \in R^{l \times l}$ ، $Q \in R^{n \times n}$ به ترتیب ماتریس کواریانس مربوط به سیگنال نویز فرآیند، اندازه گیری و ارتباط بین نویز اندازه گیری و فرآیند می باشند.

ضرایب A, B, C, D ماتریس های سیستم می باشند که در شناسایی هدف تعیین این ماتریس ها از روی داده های ورودی و خروجی بدست آمده از آزمایش می باشد.

بطور کلی الگوریتم های زیرفضا در دو مرحله انجام می گیرد [5] و [13]:

۱- تعیین درجه مدل و تخمین سری حالت های سیستم

$$\hat{x}(i) \parallel \hat{x}(i+1) \parallel \dots \parallel \hat{x}(i+j)$$

۲- تعیین ماتریس های سیستم از روی داده های ورودی و

خروجی و سری حالت های تخمین زده شده از مرحله ۱.

در ابتدا از روی داده های ورودی و خروجی ماتریس بلوکی هنکل را می سازیم. روابط (۴) و (۵) این ماتریس ها را نشان می دهند.

$$U(0|2i-1) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} U(0|i-1) \\ U(i|2i-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_p \\ U_f \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} u(0) & u(1) & \dots & u(j-1) \\ u(1) & u(2) & & u(j) \\ \vdots & & & \\ u(i-1) & u(i) & \dots & u(i+j-2) \\ u(i) & u(i+1) & \dots & u(i+j-1) \\ u(i+1) & & & \\ \vdots & & & \\ u(2i-1) & u(2i) & & u(2i+j-2) \end{pmatrix} \quad (4)$$

اما یکی از این معیارهای متداول که در اکثر مقالات مورد استفاده قرار گرفته است [7]، [8] و [11]، معیار FPE^4 می باشد [4]. این معیار از رابطه (۱) برای تعیین درجه مدل استفاده می کند. معیار FPE برای پیدا کردن بهترین درجه مدل می باشد، طوری که بیشترین تطبیق اطلاعات بر مدل وجود داشته باشد. این معیار چه در سیستم های خطی و چه غیر خطی قابل استفاده می باشد.

$$FPE = V \left(\frac{1+d/N}{1-d/N} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه V تابع هزینه، d تعداد پارامترهای تخمین و N تعداد مقادیر در مجموعه اطلاعات تخمین می باشد.

۲-۳ روش پیشنهادی براساس تحلیل زیرفضا^۵

شناسایی به روش فضای حالت یکی از روش های کلاسیک می باشد که هم برای سیستم های تک ورودی- تک خروجی و هم برای سیستم های چند ورودی - چند خروجی قابل استفاده می باشد [2]. روش های مختلفی برای بدست آوردن فرم فضای حالت وجود دارد که از آن جمله می توان روش تحقق سیستم ویژه [2] و روش زیرفضا یا 4SID [5] را نام برد.

جذابیت روشهای تحلیل زیر فضا در این است که تحقق فضای حالت سیستم را از روی داده های ورودی-خروجی، تخمین می زند. مزیت این روش در استفاده از روش های مقاوم نظیر تجزیه مقادیر تکین^۶ و تجزیه QR می باشد. از مزایای دیگر این روش می توان تعداد کم پارامترهای آزاد را نام برد که باعث می شود مدل نسبتاً دقیقی برای سیستم بدست بیاید (تنها پارامتر آزاد این روش بلوک ردیفی در ماتریس هنکل^۷ می باشد، که قابل تغییر است). به علت بازگشتی نبودن الگوریتم زیرفضا، مشکل همگرایی که در دیگر روشهای شناسایی وجود دارد در این روش اتفاق نمی افتد. این روش را می توان برای تعداد زیاد داده و همچنین سیستم های با مقیاس بالا با تعداد زیاد ورودی و خروجی و حالت های سیستم به کار برد. نیاز به تعداد زیاد نمونه از ورودی و خروجی یکی از معایب این روش است که با تجهیزات نمونه برداری با دقت بالا در سیستم های جدید این مشکل به راحتی قابل برطرف شدن می باشد.

برای شناسایی به روش زیر فضا بایستی یک مدل فضای حالت گسسته، خطی و نامتغیر با زمان در نظر بگیریم. مدل (۲) حالت کلی فضای حالت را نشان می دهد.

⁴ Akaike Final Prediction Error

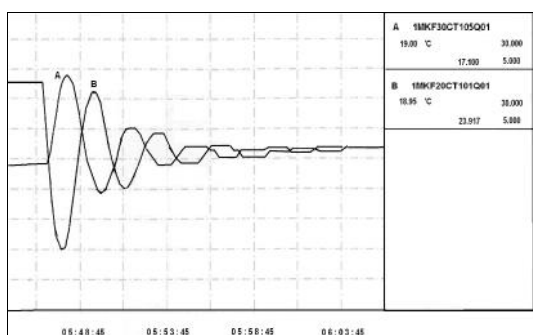
⁵ Subspace-based State Space System Identification

⁶ Singular Value Decomposition (SVD)

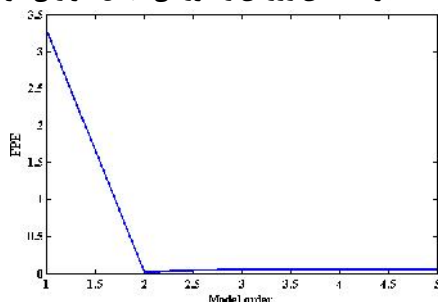
⁷ Hankel

باشد. در زیر سیستم اول خروجی مدل، دمای آب ورودی به فین فن ها و در زیر سیستم دوم، خروجی دمای آب خروجی پمپ ها می باشد. ابتدا جهت شناسایی تاخیر موجود در سیستم با استفاده از آنالیز گذرا، سیستم را از حالت سکون راه اندازی می کنیم (همان ورودی پله). شکل ۲ تغییرات دمای آب ورودی و خروجی فین فن ها را نشان می دهد. از روی فاصله بین قله ها یا دره ها می توان تاخیر موجود در فین فن ها را محاسبه نمود.

جهت شناسایی سیستم به فرم فضای حالت، ابتدا تعداد ۹۰۰۰ داده بصورت هر ۱۵ ثانیه یک بار توسط DCS^A نیروگاه نمونه برداری شده است. در ابتدا مرتبه دو زیر سیستم را با استفاده از معیار FPE بدست می آوریم. اشکال ۳ و ۴ تغییرات این معیار را برای زیر سیستم های ۱ و ۲ نشان می دهد. همانطور که این نمودارها نشان می دهند، درجه ۲ بهینه ترین نوع انتخاب می باشد.



شکل ۲: تغییرات دمای ورودی و خروجی مبدل حرارتی هوا-آب



شکل ۳: انتخاب مدل در زیر سیستم ۱

$$Y(0 | 2i-1) \stackrel{\text{def}}{=} \begin{pmatrix} Y(0 | i-1) \\ Y(i | 2i-1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{pmatrix} y(0) & y(1) & \dots & y(j-1) \\ y(1) & y(2) & & y(j) \\ \vdots & & & \\ y(i-1) & y(i) & \dots & y(i+j-2) \\ y(i) & y(i+1) & \dots & y(i+j-1) \\ y(i+1) & & & \\ y(2i-1) & y(2i) & & y(2i+j-2) \end{pmatrix}$$

تعداد ردیف های بلوک، از پارامترهای قابل تنظیم می باشد. تعداد ستون ها با توجه به نمونه ها تعیین می شود. می توان نشان داد [5] که درجه سیستم از رابطه (۶) بدست می آید.

$$n = \text{rank} \begin{pmatrix} U_p \\ Y_p \end{pmatrix} + \text{rank} \begin{pmatrix} U_f \\ Y_f \end{pmatrix} - \text{rank} \begin{pmatrix} U_p \\ Y_p \\ U_f \\ Y_f \end{pmatrix} \quad (6)$$

همچنین با استفاده از تجزیه مقادیر تکین یا LQ می توان سری حالت های سیستم را تخمین زد. حال با داشتن Y, X, U می توان ماتریس های حالت سیستم در معادله (۲) را با استفاده از روش حداقل مربعات تخمین زد [5]. معادله (۷) این رابطه را نشان می دهد.

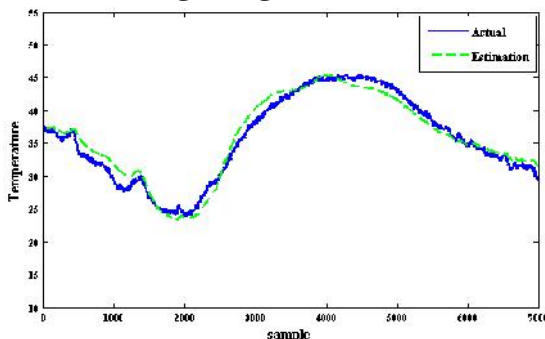
$$\underbrace{\begin{pmatrix} X(i+1) \\ Y(i|i) \end{pmatrix}}_{\text{Known}} = \underbrace{\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}}_{\text{to be found}} \underbrace{\begin{pmatrix} X(i) \\ U(i|i) \end{pmatrix}}_{\text{Known}} \quad (7)$$

که در آن $U(i|i), Y(i|i)$ ماتریس های بلوکی هنکل با تنها یک ردیف بلوکی از داده های خروجی و ورودی می باشند (به عنوان مثال $U(i|i) = (u(i), u(i+1), \dots, u(i+j-1))$).

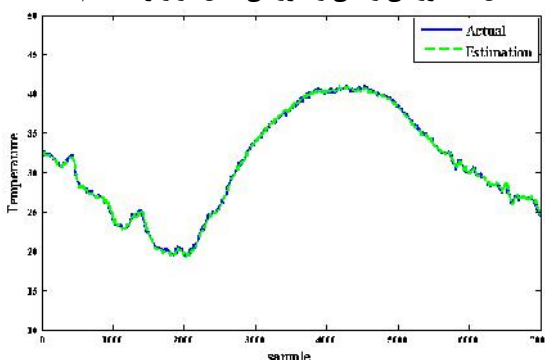
۴- نتایج آزمایشگاهی

همانطور که قبلاً اشاره شد، هدف تخمین دمای خروجی پمپ ها در شکل ۱ می باشد. به جهت اینکه سیستم توصیف شده از دو مجموعه یکی در داخل و دیگری در خارج توربین هال تشکیل شده است، ابتدا دمای آب ورودی به فین فن ها از روی دمای اولیه آب ورودی به سیستم، دمای روغن و دمای هوای ژنراتور تخمین زده می شود و سپس دمای خروجی پمپ ها از روی دمای محیط و دمای آب ورودی به فین فن ها تخمین زده می شود. در واقع نتیجه کلی دو دسته معادله می

خوبی، خروجی مدل بدست آمده را دنبال می کند. همچنین جدول ۱ میانگین مربعات خطا را برای دو خروجی نشان می دهد.



شکل ۵: خروجی واقعی و خروجی مدل در زیرسیستم ۱



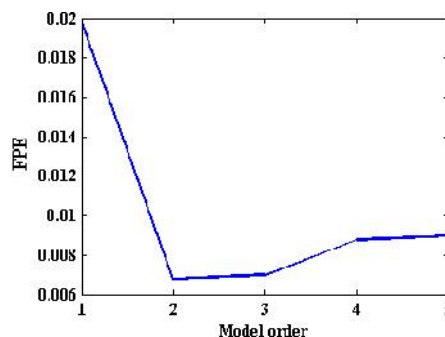
شکل ۶: خروجی واقعی و خروجی مدل در زیرسیستم ۲

جدول ۱: میانگین مربعات خطا

درجه مدل	1	2
زیرسیستم ۱	4.2861	2.0616
زیرسیستم ۲	0.1201	0.1051

۶- نتیجه گیری

سیستم خنک سازی آب در واحدهای گازی نقش مهمی در کارکرد بهینه و مناسب توربوکمپرسور و ژنراتور دارد. در این مقاله شناسایی این سیستم خنک سازی و تخمین دمای آب خروجی از پمپ ها مورد بررسی قرار گرفت. عوامل تاثیرگذار نظیر دمای روغن، دمای هوای ژنراتور و دمای هوای محیط را، به عنوان ورودی سیستم در نظر گرفته و با استفاده از مدل فضای حالت دمای آب با دقت مناسبی از روی این پارامترها تخمین زده شد. داده های واقعی از سیستم نشان می دهد که خروجی بدست آمده از مدل با دقت خوبی دمای آب خروجی از پمپ ها را دنبال می کند.



شکل ۴: انتخاب مدل در زیرسیستم ۲

سپس جهت تعیین ضرایب A, B, C, D در معادله (۲) از جعبه ابزار شناسایی سیستم در نرم افزار Matlab کمک گرفته و معادلات فضای حالت شناسایی گردیده است.

رابطه (۸) ضرایب معادله حالت درجه ۲ را در حالتی که دمای ورودی به فین فن ها به عنوان خروجی انتخاب شده است را نشان می دهد. رابطه (۹) این ضرایب را برای حالتی که خروجی دمای آب خارج شده از پمپ ها می باشد را نشان می دهد.

$$A = \begin{bmatrix} 0.997 & -0.042 \\ -0.0009 & 0.82 \end{bmatrix} \quad C = [188.05 \quad -6.79] \\ B = \begin{bmatrix} 0.00146 & 0.00046 \\ 0.0062 & 0.002 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0.954 & 0.0908 \\ 0.0124 & 0.944 \end{bmatrix} \quad C = [32.281 \quad -1.107] \\ B = \begin{bmatrix} 0.00277 & 0.00068 \\ -0.0015 & -0.00014 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

۵- اعتبارسنجی مدل

در قسمت قبل با استفاده از یک دسته از اطلاعات اقدام به شناسایی و بدست آوردن مدل کردیم. در این قسمت مدل توسط دسته دیگر از داده ها مورد ارزیابی قرار می گیرد. مدل بدست آمده برای سیستم را می توان با استفاده از معیاری نظیر میانگین مربعات خطا (۱۰) سنجید.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t)]^2 \quad (10)$$

به منظور اعتبار سنجی مدل تعداد ۷۰۰۰ نمونه به صورت هر ۱۵ ثانیه یکبار در نوبتی دیگر از سیستم نمونه برداری شده است.

اشکال ۵ و ۶ خروجی واقعی و خروجی بدست آمده از دو زیرسیستم را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، خروجی واقعی با دقت



چهارمین کنفرانس مهندسی برق و الکترونیک ایران

4th Iranian Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE2012)

دانشگاه آزاد اسلامی گناباد - ۷ و ۸ و ۹ شهریور ماه ۱۳۹۱



system identification: a review, International Journal of Systems Science, vol. 39, no. 10, pp. 925–946, 2008.

- [8] Kiriakidis K. and O'Brien R.T. Source Detection by Model-Order Selection in State Space, In Proceedings of the 15th International Conference on Digital Signal Processing, Cardiff, Wales, UK, July 2007.
- [9] Ljung L. System identification: theory for the user, 2nd, Prentice-Hall, 1999.
- [10] Ma ZJ, Wang SW, Xu XH, Xiao F. A supervisory control strategy for building cooling water systems for practical and real time applications. Energy Conversion and Management, 2008.
- [11] Shibata R. Selection of the order of an autoregressive model by Akaike's information criterion, Biometrika, vol.63, no. 1, pp. 117–126, 1976.
- [12] Soderstrom T, Stoica P. System identification, Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1989.
- [13] Zhu Y. Multivariable system identification for process control, New York, USA: Elsevier Science Inc.; 2001. p. 199–216.

۷- مراجع

- [۱] عیسی پور علی، شناسایی سیستم، انتشارات شیوه، ۱۳۸۷.
- [۲] کراری مهدی، شناسایی سیستم، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۸۸.
- [۳] مستندات فنی واحدهای گازی V94.2، نیروگاه سیکل ترکیبی شیروان.
- [4] Akaike H. A new look at the statistical model identification, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 19, no. 6, pp.716–723, 1974.
- [5] De Cock K, De Moor B. Subspace identification methods, Control systems, robotics and automation. In: EOLSS, UNESCO encyclopedia of life support systems, vol. 1. Oxford, Great Britain: Eolss Publishers Co., Ltd; 2003. p. 933–79.
- [6] Giorgia F, Coitinovis M, Ribeiro T, Paiva J. L, Tah S. W. and Pinto J. M. Integrated analysis of cooling water systems: Modeling and experimental validation. Applied Thermal Engineering, 29, 3124-3131, 2009.
- [7] Hong X, Mitchell R. J, Chen S, Harris C. J, Li K, and Irwin G. W. Model selection approaches for non-linear