



## کنترل حالت لغزش پویای مولدهای بخار هسته‌ای با استفاده از بازخورد خروجی بر مبنای یک مدل غیر خطی

غلامرضا انصاری فر\*<sup>۱</sup>، حیدرعلی طالبی<sup>۲</sup>

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده‌ی علوم و فن آوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان - ایران  
۲. دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳، تهران - ایران

**چکیده:** مولد بخار هسته‌ای با لوله‌های U شکل، یک مؤلفه‌ی مهم و حیاتی در نیروگاه‌های هسته‌ای با رآکتور آب تحت فشار است. کنترل ضعیف سطح آب مولد بخار در مدار ثانویه‌ی یک نیروگاه هسته‌ای می‌تواند منجر به خاموش‌سازی‌های متعدد رآکتور یا آسیب رسیدن به تیغه‌های توربین شود. مشکل‌های طراحی یک کنترل‌کننده‌ی مؤثر سطح آب برای مولد بخار هسته‌ای با لوله‌های U شکل، ناشی از دو عامل اساسی است: (۱) غیرخطی بودن و پیچیدگی پویایی سیستم و (۲) خاصیت ناکمینه‌ی فاز سیستم به دلیل پدیده‌ی انقباض و انبساط. بنابراین، طراحی یک کنترل‌کننده‌ی مناسب، یک گام اساسی در جهت افزایش دسترس‌پذیری نیروگاه هسته‌ای است. هدف این مقاله، طراحی، تحلیل و ارزیابی یک کنترل‌کننده‌ی سطح آب برای مولدهای بخار هسته‌ای با لوله‌های U شکل با استفاده از کنترل حالت لغزش پویا بر مبنای یک مدل غیرخطی است. روش به کار گرفته شده، از نقطه‌نظر پیاده‌سازی عملی و سخت‌افزاری ساده است و علاوه بر این، کنترل حالت لغزش پویا، مشخصات پویایی مطلوب در طول فرایند کنترل و تعقیب کامل مسیر را به طور مستقل از اغتشاش‌ها و ناپیچینی‌ها به دست می‌دهد. برای صحت‌گذاری کنترل طراحی شده، با شبیه‌سازی یک حادثه در نیروگاه هسته‌ای واقعی از شبیه‌ساز مولد بخار هسته‌ای استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها بیان‌گر کارایی، مقاوم بودن و پایداری کنترل پیشنهادی در حضور اغتشاش‌های خارجی است.

**کلیدواژه‌ها:** مولدهای بخار هسته‌ای، کنترل حالت لغزش پویا، رآکتور آب تحت فشار، مدل غیرخطی

## Dynamic Sliding Mode Control of Nuclear Steam Generators Using Out-Put Feedback Based on a Nonlinear Model

G.R. Ansarifar\*<sup>1</sup>, H.A. Talebi<sup>2</sup>

1. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Advanced Sciences & Technologies, University of Isfahan, P.O.Box: 81746-73441, Isfahan - Iran  
2. Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technologies, P.O.Box: 15875-4413, Tehran - Iran

**Abstract:** U-Tube Steam Generator (UTSG) is a crucial component in nuclear power plant with the pressurized-water reactor. Ineffective control of the Steam Generator (SG) water level in the secondary circuit of a nuclear power plant can lead to frequent reactor shutdowns or damage the turbine blades. The difficulties in designing an effective level controller for UTSG arise mainly from the following two factors: first, high nonlinearity and second, non-minimum phase characteristics due to the so-called "swell and shrink" effect. Therefore, designing a suitable controller is a necessary step to enhance the nuclear power plant availability factor. The purpose of this paper is to design, analyze and evaluate a water level controller for U-tube steam generators using dynamic sliding mode control based on a nonlinear model of them. The above mentioned method is easy to implement in practical applications. Moreover, the dynamic sliding mode control exhibits the desired dynamic properties during the entire output-tracking process, independent of disturbances and uncertainties. To validate the designed controller, a steam generator simulator is used with simulation of an accident in a real nuclear power plant. The simulation results show the performance, robustness, and stability of the proposed controller.

**Keywords:** Nuclear Steam Generators, Dynamic Sliding Mode Control, Pressurized-Water Reactor, Nonlinear Model

\*email: ghr.ansarifar@ast.ui.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۳/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۲/۲۲



## ۱. مقدمه

در این رابطه، استفاده از کنترل‌کننده‌های کلاسیک از قبیل PID چندان رضایت‌بخش نیست. هر چند این نوع کنترل‌کننده‌ها می‌توانند سیستم را در محدوده‌ی خاصی کنترل کنند، ولی ویژگی‌های کنترلی از قبیل سرعت سیستم، میزان فراجهدش و از همه مهم‌تر ایجاد توقف‌های ناخواسته در توان‌های پایین چندان رضایت‌بخش نبوده است [۴] و همین امر باعث شده است که طراحان به طراحی کنترل‌کننده‌های جدیدی که علاوه بر کنترل سیستم بتوانند الزام‌های کنترلی موردنظر را نیز برآورده سازند روی آورده‌اند.

تاکنون کنترل‌کننده‌های مختلفی براساس مدل خطی مولد بخار در توان‌های مختلف برای کنترل سطح آب ارایه شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های پیشگو، فازی، عصبی، خودتنظیم و یا ترکیبی از این روش‌ها اشاره کرد [۵، ۶، ۷]. در بررسی سیر تحولی روش‌های کنترلی مختلف به کار گرفته شده برای کنترل سطح آب مولدهای بخار هسته‌ای از سال ۱۹۸۰ میلادی تا سال‌های اخیر، ناکارآمد بودن روش‌های کلاسیک از یک سو و نیز معایب کنترل‌کننده‌های فازی به علت تعداد زیاد قوانین فازی، پیچیدگی زیاد در پیاده‌سازی و نیز عدم تحلیل مناسب پایداری برای آن‌ها از سوی دیگر، طراحان را به استفاده از کنترل‌کننده‌های جدید نظیر کنترل پیشگوی مبتنی بر مدل، سوق داده است. کنترل‌کننده‌های پیشگوی مبتنی بر مدل، به علت معایبی چون حجم زیاد و انبوه محاسبه‌ها، پیچیدگی پیاده‌سازی در عمل و نیز با توجه به این نکته‌ی مهم که در سیستم‌های پویا اجتناب از نایقینی‌ها به خاطر مدل‌سازی ناقص و شرایط محیطی مانند دما و فشار و سایر اغتشاش‌های خارجی ناممکن است، مقاومت مناسبی از خود نشان نمی‌دهند و نیز روش‌هایی که به منظور بهبود آن‌ها به کار رفته است علاوه بر افزودن بر حجم محاسبه‌های لازم، به پیچیدگی و مشکل‌های سخت‌افزاری سیستم کنترلی نیز می‌افزایند؛ لذا در طول ۱۰ سال اخیر پژوهش‌های زیادی در به کارگیری نظریه‌ی کنترل مقاوم خطی برای کنترل مولد بخار انجام شده است. اما با توجه به پویایی غیرخطی، پیچیده و نیز ویژگی «ناکمینه فازی» مولد بخار لازم است مطالعاتی بر روی سیستم‌های کنترل غیرخطی کارآمد برای افزایش کارایی سیستم کنترل حلقه‌ی بسته‌ی مولد بخار صورت گیرد.

کنترل‌کننده‌ی طراحی شده، برای این که در عمل معتبر باشد، باید دارای چندین ویژگی باشد:

در حال حاضر نیروگاه‌های هسته‌ای نقش عمده‌ای در تأمین انرژی الکتریکی مورد استفاده در دنیا بر عهده دارند؛ در این نوع نیروگاه‌ها، انرژی اولیه‌ی لازم به وسیله‌ی یک رآکتور هسته‌ای تأمین می‌شود. خاموش و روشن شدن مجدد این نوع رآکتورها برخلاف سایر رآکتورها باعث صرف هزینه‌ی زیادی می‌شود. بنابراین باید از خاموش‌سازی مکرر این رآکتورها اجتناب شود. لذا یکی از مهم‌ترین اهداف کنترلی در یک نیروگاه هسته‌ای افزایش دسترس‌پذیری نیروگاه است و از طرفی با توجه به این که این نوع نیروگاه‌ها باید از درجه‌ی مخاطره‌آمیزی پایینی برخوردار باشند، لذا نحوه‌ی کنترل یک نیروگاه در طول دوره‌ی کاری آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یکی از اجزای کلیدی نیروگاه‌های هسته‌ای، مولد بخار است که نقش رابط حرارتی بین خنک‌کننده‌ی مدار اولیه‌ی رآکتور و سیال کاری را ایفا می‌کند. عملکرد این جز از نیروگاه، به صورت مستقیم روی رآکتور هسته‌ای و توربین تأثیر می‌گذارد، به طوری که اگر مولد بخار نتواند بخار کاملاً خشکی را تولید نماید، ذرات آب موجود در بخار باعث ضربه زدن به پره‌های توربین شده و در نتیجه بعد از مدتی، خرابی پره‌های توربین را سبب خواهد شد. هم‌چنین اگر سیال کاری نتواند به خوبی حرارت تولید شده توسط رآکتور هسته‌ای را خارج نماید، خاموشی رآکتور را به دنبال خواهد داشت [۱]. لذا بسیار مهم است که سطح آب مولد بخار در یک محدوده‌ی مشخص نگه داشته شود، زیرا افزایش بیش از حد سطح آب در مولد بخار باعث وارد شدن بخار مرطوب به توربین و کاهش سطح آب باعث کاهش حرارت خارج شده از رآکتور خواهد شد که در حالت اول خرابی پره‌های توربین و در حالت دوم خاموش شدن رآکتور را به دنبال خواهد داشت [۲، ۳]. کنترل سطح آب در داخل مولد بخار به دلیل وجود مسایل کنترلی مشکل است. منابع این مشکل‌ها عبارت‌اند از:

- ناکمینه فاز بودن سیستم که ناشی از پدیده‌ی انبساط و انقباض است؛
- برخورداری از پویایی‌های مختلف با توجه به تغییرات توان؛
- غیرخطی و پیچیده بودن مدل سیستم؛
- اندازه‌گیری نادقیق در توان‌های پایین.



با لوله‌های U شکل ارایه می‌شود. برای راستی آزمایشی کنترل طراحی شده، از شبیه‌ساز مولد بخار هسته‌ای D-STGN<sup>(1)</sup>، با مدل‌سازی یک سانحه از نیروگاه هسته‌ای واقعی استفاده شده است.

## ۲. مدل‌سازی مولد بخار هسته‌ای

برای مدل‌سازی دقیق‌تر مولدهای بخار هسته‌ای بر پایه‌ی قوانین ترمودینامیکی حاکم (پایستگی جرم- انرژی و تکانه)، در این مقاله یک مدل غیرخطی برای مولدهای بخار با لوله‌های U شکل ارایه شده است. این کار با توجه به دو بخش اولیه و ثانویه در مولدهای بخار هسته‌ای و با در نظر گرفتن ۶ حجم کنترل به انجام رسیده است.

### ۱.۲ بخش اولیه (Pr)

این بخش، شامل حجم داخلی لوله‌های U شکل و دو قسمت ورودی و خروجی سیال خنک‌کننده‌ی مدار اولیه (ی رآکتور) است. خنک‌کننده‌ی اولیه‌ی گرم با دمای ورودی  $T_{SG}$  وارد لوله‌های U شکل شده، در آن جریان می‌یابد. در طی این حرکت، سیال گرم ورودی بخشی از انرژی خود را به لوله‌های فلزی انتقال داده و با دمای خروجی  $T_{pro}$  از مولد بخار خارج شده و به رآکتور باز می‌گردد. دمای سیال خنک‌کننده در داخل فضای لوله‌های U شکل به صورت میانگین دماهای ورودی و خروجی آن در نظر گرفته می‌شود

$$T_{Pr} = \frac{1}{2}(T_{SG} + T_{Pro}) \quad (1)$$

با فرض این که خنک‌کننده‌ی اولیه سرعت و فشار ثابتی دارد، معادله‌ی پایستگی انرژی برای این قسمت چنین نوشته می‌شود

$$\rho_{pr} V_{pr} C_{pr} = \frac{dT_{Pr}}{dt} = C_{pr} W_{pr} (T_{SG} - T_{Pro}) - \alpha_{Pr} A_{Pr} (T_{Pr} - T_m) \quad (2)$$

که در آن،  $\rho_{pr}$ ،  $V_{pr}$  و  $C_{pr}$ ، به ترتیب، چگالی، حجم و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی سیال خنک‌کننده‌ی اولیه،  $W_{pr}$  نرخ جریان آن به مولد بخار، و  $\alpha_{Pr}$  ضریب انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی خنک‌کننده‌ی اولیه به لوله‌های فلزی،  $A_{Pr}$  و  $T_m$ ، به ترتیب، سطح داخلی و دمای لوله‌های فلزی U شکل است.

- مقاوم بودن در مقابل نوفه و ناپیچینی‌های مدل‌سازی؛
- حجم کم محاسباتی؛
- تضمین پایداری؛
- معتبر بودن برای تمام نواحی کاری؛
- سادگی پیاده‌سازی عملی و سخت‌افزاری.

کنترل مقاوم به روش حالت لغزش می‌تواند گزینه‌ی مناسبی برای این کار باشد. امروزه کنترل حالت لغزش استفاده‌ی زیادی در کنترل فرایندهای صنعتی دارد، زیرا این راه‌برد کنترلی روشی است که یک رویکرد سازمان یافته را برای مسئله‌ی پایداری سیستم ارایه می‌دهد؛ مزیت اصلی این روش آن است که پاسخ، نسبت به تغییر پارامترها، ناپیچینی‌های مدل‌سازی و اغتشاش، غیرحساس باقی می‌ماند و نیز پیاده‌سازی آن از نظر عملی و سخت‌افزاری ساده است. از طرف دیگر، استفاده از روش کنترل حالت لغزش برای سیستم‌های ناکمپنه‌ی فاز، از مسایل چالش برانگیز در علم کنترل است. در مورد سیستم‌های ناکمپنه‌ی فاز، به علت ناپایداری پویایی‌های داخلی سیستم، روش کنترل حالت لغزش متعارف پاسخ‌گو نیست و از این رو برای حل این مشکل، در سال‌های اخیر روش حالت لغزش پویا ارایه شده است. در این روش مسیرهای حالت به سمت یک چند راهه‌ی لغزش پویا حرکت داده می‌شوند و پایداری سیستم در حالت لغزش مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

کنترل حالت لغزش پویا در واقع ترکیبی از کنترل حالت لغزش معمولی و یک عمل‌گر پویا است و پارامتر اساسی در طراحی چند راهه‌ی لغزش پویا، عمل‌گر پویا است که با هدف پایداری پویایی داخلی و تطابق و هم‌سازی با اغتشاش‌های ناسازگار باید طراحی شود. در کارهای قبلی کنترل حالت لغزش پویا براساس مدل پاسخ پله‌ای مولد بخار (مدل آبروینگ) که یک مدل خطی است، طراحی شده است [۸، ۱].

با توجه به این که کنترل‌های طراحی شده باید روی سیستم واقعی اعمال شوند، لذا هر قدر مدل مورد استفاده به منظور طراحی کنترل‌کننده به مدل فیزیکی نزدیک‌تر باشد نتایج همان اندازه به واقعیت نزدیک‌تر بوده و منجر به بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌ی موردنظر خواهد شد، لذا در این مقاله برای مدل‌سازی دقیق‌تر بر پایه‌ی قوانین ترمودینامیکی پایستگی جرم- انرژی و تکانه‌ی حاکم بر مولدهای بخار هسته‌ای، یک مدل غیرخطی مبتنی بر بازخورد خروجی برای کنترل سطح آب مولدهای بخار



که در آن،  $P$  فشار بخش ثانویه بر حسب پاسکال است.

### ۳.۲ پایین‌بر (D)

ورودی این بخش از دو قسمت تشکیل شده است که عبارت‌اند از: آب ورودی ( $W_{fw}$ ) و آب برگشتی از قسمت جداکننده پس از جدا شدن از بخار. آهنگ جریان خروجی از پایین‌بر،  $W_d$  است که با استفاده از قانون پایستگی تکانه تعیین می‌شود. با فرض این که آب داخل پایین‌بر در شرایط اشباع دمای آب تغذیه باشد معادله‌ی پایستگی جرم در پایین‌بر این است

$$\frac{A_d}{v_d} \frac{dL_d}{dt} = W_{fw} + (1 - x_M)W_{sep} - W_d \quad (7)$$

که در آن،  $A_d$  سطح جریان در پایین‌بر،  $L_d$  سطح آب داخل پایین‌بر،  $W_{fw}$  آهنگ جریان آب ورودی،  $v_d$  حجم ویژه آب داخل پایین‌بر (که عکس چگالی آب داخل پایین‌بر است)،  $x_M$  کیفیت بخار جریان دو فاز می‌مکن که به جداکننده می‌رسد،  $W_{sep}$  آهنگ جریان خروجی از بالا بر و ورودی به جداکننده،  $W_d$  آهنگ جریان خروجی از ناحیه‌ی پایین‌بر است.

معادله‌ی پایستگی انرژی نیز چنین است

$$\frac{d}{dt}(M_d h_d) = h_{fw} W_{fw} + (1 - x_M)h_f W_{sep} - h_d W_d \quad (8)$$

که در آن،  $M_d$  جرم کل آب داخل پایین‌بر و  $\rho_d$  چگالی آب داخل آن است

$$M_d = \rho_d A_d L_d \quad (9)$$

حجم ویژه‌ی آب داخل پایین‌بر ( $v_d$ ) تابعی از دمای آب تغذیه‌ی ورودی است

$$v_d = \frac{dv_d}{dT} T_{fw} + v_{do} \quad (10)$$

مقادیر مشتق دما و جمله‌ی مستقل از دما عبارت‌اند از [۱۰]:

$$\frac{dv_d}{dT} = 1.5 \times 10^{-6}, v_{do} = 4.7 \times 10^{-4} \quad (11)$$

در واقع رابطه‌ی (۲) بیان‌کننده‌ی آن است که کسری از توان گرمایی سیال خنک‌کننده‌ی رآکتور صرف تغییر دمای آن و بخش دیگری نیز به صورت گرمای انتقال یافته از آن به لوله‌های فلزی صرف بالا رفتن دمای لوله‌ها می‌شود.

با توجه به این که سیال خنک‌کننده‌ی اولیه به صورت تک فاز و در شرایط زیر سرد<sup>(۲)</sup> در نظر گرفته می‌شود، می‌توان از معادله‌ی بولتر برای استخراج ضریب انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی،  $\alpha_{pr}$  استفاده کرد

$$Nu = 0.73 Re^{1/4} Pr^{1/3} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{\alpha_{pr} D_h}{k_{bulk}}, Re = G \frac{D_h}{\mu_{bulk}}, Pr = \left( \frac{C_{pr} \mu}{K} \right)_{bulk}, G = \frac{W_{pr}}{A_t} \quad (4)$$

که در آن،  $A_t$  سطح مقطع ورودی سیال خنک‌کننده به مولد بخار است (بقیه‌ی پارامترها، پارامترهای بدون بعد تعریف شده در مکانیک سیالات و انتقال حرارت هستند).

### ۲.۲ لوله‌های فلزی U شکل

در این قسمت رفتار لوله‌های U شکل مدل‌سازی شد. لوله‌ها از سیال خنک‌کننده‌ی اولیه انرژی گرمایی می‌گیرند که بخشی از آن صرف تغییر دمای فلزی ( $T_m$ ) شده و بخش دیگر به سیال ثانویه با دمای اشباع  $T_{sat}$  انتقال می‌یابد. با فرض ظرفیت گرمایی ویژه‌ی ثابت برای فلز که از جنس آلایژ اینکونل<sup>(۳)</sup> است، موازنه انرژی چنین خواهد بود

$$\rho_m C_m V_m \frac{dT_m}{dt} = \alpha_{pr} A_{pr} (T_{pr} - T_m) - \alpha_{se} A_{se} (T_m - T_{sat}) \quad (5)$$

که در آن،  $\rho_m$  و  $V_m$ ، به ترتیب، چگالی و حجم لوله‌های فلزی U شکل، و  $C_m$  ظرفیت گرمایی ویژه‌ی فلز،  $\alpha_{se}$  ضریب انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی از لوله‌های فلزی به سیال ثانویه، و  $A_{se}$  سطح خارجی لوله‌های U شکل است.

با فرض این که سیال ثانویه در اطراف لوله‌های فلزی در شرایط اشباع باشد، برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی از لوله‌ها به بخش ثانویه می‌توان از رابطه‌ی زیر استفاده کرد [۹]

$$\alpha_{se} = \frac{\exp(2p / 8.7 \times 10^6) (T_m - T_{sat})}{(22.65)^2} \times 10^6 \quad (6)$$



کیفیت بخار به صورت خطی در ناحیه‌ی جوشش افزایش می‌یابد ( $L_1 \leq L$ ) و پس از ورود به بخش بالابر تا ورود به ناحیه‌ی جداکننده ثابت می‌ماند ( $L_1 < L \leq L_2$ )

$$x(L) = \frac{x_M}{L_1} L \quad 0 \leq L \leq L_1 \quad (17)$$

$$x(L) = x_M \quad L_1 < L \leq L_2 \quad (18)$$

$$\bar{x} = (1 - \frac{L_1}{2L_2})x_M = K_1 x_M \quad (19)$$

که در آن،  $L_1$  طول ناحیه‌ی جوشش و  $L_2$  طول بخش بالابر است.

تغییرات  $v_f$ ،  $v_g$  و  $h_{fg}$  با فشار بخار نیز مانند  $h_f$  به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود

$$v_f = \frac{dv_f}{dp} P + v_{fo} \quad (20)$$

$$v_g = \frac{dv_g}{dp} P + v_{go} \quad (21)$$

$$h_{fg} = \frac{dh_{fg}}{dp} P + h_{fgo} \quad (22)$$

ضریب‌های فشار بخار و قسمت ثابت [11] در جدول ۱ داده شده است.

معادله‌ی پایستگی جرم برای این بخش این است

$$\begin{cases} \frac{dM_s}{dt} = W_d - W_{sep} \\ M_s = \rho_s V_s \end{cases} \quad (23)$$

که در آن،  $M_s$  جرم کل جریان دو فاز در داخل بالابر و ناحیه‌ی جوشش،  $V_s$  حجم کل ناحیه‌ی جوشش و بالابر،  $\rho_s$  چگالی متوسط جریان دو فاز در ناحیه‌ی جوشش و بالابر است. با توجه به رابطه‌های (15)، (20) و (23) می‌توان نوشت

$$\frac{d}{dt}(v_s) = \frac{d}{dt}(v_f) + k_1 v_{fg} \frac{dx_M}{dt} + k_2 x_M \frac{dv_{fg}}{dt} \quad (24)$$

$$\frac{dv_f}{dt} = \frac{dv_f}{dp} \frac{dp}{dt}, \quad \frac{dv_{fg}}{dt} = \frac{dv_{fg}}{dp} \frac{dp}{dt} \quad (25)$$

$$\frac{dM_s}{dt} = V_s \frac{d\rho_s}{dt} = V_s \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{v_s} \right) = -\frac{V_s}{v_s^2} \frac{dv_s}{dt} \quad (26)$$

$$\frac{dM_s}{dt} = -\frac{k_1 V_s}{v_s^2} v_{fg} \frac{dx_M}{dt} - \frac{V_s}{v_s^2} \left( \frac{dv_f}{dp} + k_2 x_M \frac{dv_{fg}}{dp} \right) \frac{dp}{dt} \quad (27)$$

به علت جرم زیاد آب ورودی، مشتق زمانی  $v_d$  قابل اغماض است. لذا رابطه‌ی (8) را می‌توان چنین نوشت

$$\begin{aligned} \frac{A_d}{v_d} \left( h_d \frac{dL_d}{dt} + L_d \frac{dh_d}{dt} \right) &= h_{fw} W_{fw} + \\ (1 - x_M) h_f W_{sep} - h_d W_d \end{aligned} \quad (12)$$

که در آن،  $h_f$  انتالپی آب مایع داخل بالابر،  $h_d$  انتالپی آب داخل پایین‌بر،  $h_{fw}$  انتالپی آب تغذیه‌ی ورودی است.

$h_{fw}$  نیز نظیر  $v_d$  به صورت تابعی خطی از دمای آب تغذیه‌ی ورودی ( $T_{fw}$ ) در نظر گرفته می‌شود [11]

$$h_{fw} = \frac{dh_{fw}}{dT} T_{fw} + h_{fwo}, \quad \frac{dh_{fw}}{dT} = 4.6 \times 10^3, \quad h_{fwo} = -1.3 \times 10^6 \quad (13)$$

برای  $h_f$  بستگی خطی به فشار بخار چنین لحاظ می‌شود

$$h_f = \left( \frac{dh_f}{dP} \right) P + h_{fo}, \quad \frac{dh_f}{dP} = 5 \times 10^{-2}, \quad h_{fo} = 9.2 \times 10^5 \quad (14)$$

#### ۴.۲ مجموعه‌ی ناحیه‌ی جوشش<sup>(۵)</sup> و بالابر<sup>(۶)</sup> (S)

آب خروجی از پایین‌بر با آهنگ  $W_d$  وارد این ناحیه شده و در نتیجه‌ی گرمایی که از چرخه‌ی اولیه دریافت می‌کند با عبور از اطراف لوله‌های U شکل به حالت مخلوط دو فاز آب-بخار درمی‌آید، و با نرخ جریان  $W_{sep}$  از این ناحیه خارج و وارد بخش جداکننده می‌شود. جریان دو فاز در این ناحیه به صورت همگن فرض می‌شود که در آن نسبت سرعت‌های دو فاز یکسان است. لذا با این فرض می‌توان حجم مخصوص و انتالپی ویژه را به صورت تابعی تک‌متغیره از کیفیت بخار ( $x$ ) بیان نمود

$$v_s = v_f + x v_{fg}, \quad v_{fg} = v_g - v_f \quad (15)$$

$$h_s = h_f + x h_{fg}, \quad h_{fg} = h_g - h_f \quad (16)$$

که در آن‌ها،  $v_f$  و  $v_g$  حجم ویژه فازهای، به ترتیب، مایع و بخار داخل ناحیه‌ی جوشش و بالابر،  $h_g$  و  $h_s$  به ترتیب، انتالپی ویژه بخار و انتالپی ویژه متوسط جریان دو فاز، در ناحیه‌ی جوشش و بالابر و  $v_s$  حجم ویژه متوسط جریان دو فاز در ناحیه‌ی جوشش و بالابر است.

۶.۲ بخش جداکننده (Sep)<sup>(۸)</sup>

سیال ورودی به این بخش با آهنگ جریان  $W_{sep}$  از بالا بر خارج شده و به صورت دو فازی است. مقدار  $X_M W_{sep}$  به صورت بخار اشباع وارد محفظه‌ی بخار شده و بقیه به صورت مایع اشباع به پایین بر برمی‌گردد.

## ۷.۲ قانون پایستگی اندازه‌ی حرکت (تکانه)

در این قسمت معادله‌ی پایستگی تکانه را به یک حلقه‌ی یک بعدی شامل مسیرهای جریان گذرنده از میان ناحیه‌ی جوشش، بالا بر، محفظه‌ی بخار و پایین بر اعمال می‌کنیم. مختصه‌ی  $l$  بیان‌گر فاصله در ابتدای مسیر جریان است. معادله‌ی تکانه برای این حلقه این است

$$\frac{d}{dt} \int \frac{w dl}{A} = -F \quad (۳۳)$$

که در آن،  $F$  اختلاف فشار ناشی از نیروهای اصطکاک، شتاب، جاذبه و دیگر افت‌های فشار است.

$$\int \frac{dl}{A} = \underbrace{\int_0^{L_{TB}} \frac{dl}{A}}_{\text{ناحیه‌ی جوشش}} + \underbrace{\int_0^{L_R} \frac{dl}{A}}_{\text{بالا بر}} + \underbrace{\int_0^{L_w} \frac{dl}{A}}_{\text{محفظه‌ی بخار و پایین بر}} \quad (۳۴)$$

$$F = F_f + F_\alpha + F_g + F_l \quad (۳۵)$$

$$F_f = \int \frac{fW|W|}{2\rho D_h A^3} dl \quad (۳۶)$$

$$F_\alpha = \int \frac{1}{A} d\left(\frac{vW^2}{A}\right), \quad v = \begin{cases} \left[ \frac{1-x^2}{(1-\alpha)\rho_{Ls}} + \frac{x^2}{\alpha\rho_{vs}} \right]^{-1} & \text{جریان دو فازی} \\ \frac{1}{\rho} & \text{جریان تک فازی} \end{cases} \quad (۳۷)$$

که در آن،  $\alpha$  کسر خلأ،  $\rho_{Ls}$  چگالی فاز مایع اشباع و  $\rho_{vs}$  چگالی فاز بخار اشباع است

$$F_g = \int \rho g dl \quad (۳۸)$$

$$F_l = \sum_i \frac{K_i W_i^2}{2\rho_i A_i^3} = K_{sep} v_{sep}' \frac{W_{sep}^2}{2A_{sep}^3} + K_D \frac{W_d^2}{2\rho_d A_d^3} \quad (۳۹)$$

جدول ۱. ضریب‌های فشار بخار و قسمت ثابت [۱۱]

نماد	مشتق فشار	جمله‌ی مستقل از فشار
$v_f$	$۳۳ \times ۱۰^{-۱۱}$	$۱,۱ \times ۱۰^{-۳}$
$v_g$	$-۳,۸ \times ۱۰^{-۹}$	$۵,۴ \times ۱۰^{-۲}$
$h_{fg}$	$-۶,۳ \times ۱۰^{-۲}$	$۲ \times ۱۰^۶$

در این ناحیه معادله‌ی پایستگی انرژی براساس انتقال انرژی از لوله‌های فلزی و آب تغذیه‌ی ورودی پایین بر و جریان خروجی بخش بالا بر به جداکننده، به صورت زیر استنتاج می‌شود

$$\frac{d}{dt} (h_s M_s) = \alpha_{se} A_{se} (T_m - T_{sat}) + h_d w_d - h_s (L_r) W_{sep} \quad (۲۸)$$

با توجه به رابطه‌های (۱۴)، (۱۶) و (۲۷) داریم

$$\frac{d}{dt} (h_s M_s) = \frac{k_s V_s}{v_s} (h_{fg} - h_s \frac{v_{fg}}{v_s}) \frac{dx_M}{dt} - \frac{V_s}{v_s} \left[ \frac{h_s}{v_s} \left( \frac{dv_f}{dp} + k_r x_M \frac{dv_{fg}}{dp} \right) - \frac{dh_f}{dp} - k_r x_M \frac{dh_{fg}}{dp} \right] \frac{dp}{dt} \quad (۲۹)$$

۵.۲ ناحیه‌ی محفظه‌ی بخار (St)<sup>(۹)</sup>

نرخ جریان بخار خروجی بخش جداکننده و ورودی محفظه‌ی بخار در شرایط اشباع،  $X_M W_{sep}$  است. معادله‌ی پایستگی جرم این است

$$\begin{cases} \frac{dM_{st}}{dt} = X_M W_{sep} - W_{st} \\ M_{st} = \rho_g V_{st} \end{cases} \quad (۳۰)$$

$$\frac{d}{dt} (\rho_g V_{st}) = V_{st} \frac{d\rho_g}{dt} = V_{st} \frac{d\rho_g}{dp} \times \frac{dp}{dt} = V_{st} \frac{d}{dp} \left( \frac{1}{v_g} \right) \frac{dp}{dt} = -V_{st} \times \frac{1}{v_g^2} \frac{dv_g}{dp} \frac{dp}{dt}$$

که در آن،  $M_{st}$  جرم کل بخار داخل محفظه‌ی بخار،  $W_{st}$  آهنگ جریان بخار خروجی محفظه‌ی بخار،  $\rho_g$  چگالی بخار اشباع داخل محفظه‌ی بخار، و  $V_{st}$  حجم محفظه‌ی بخار است.

$$\frac{V_{st}}{v_g^2} \frac{dv_g}{dp} \frac{dp}{dt} = W_{st} - X_M W_{sep} \quad (۳۱)$$

$$W_{sep} = \frac{W_{st}}{X_M} - \frac{V_{st}}{X_M v_g^2} \frac{dv_g}{dp} \frac{dp}{dt} \quad (۳۲)$$



طبیعت ناکمینه فازی یک سیستم، کاربرد روش‌های قوی و مؤثر کنترل غیرخطی چون کنترل خطی‌سازی با بازخورد<sup>(۱۰)</sup> [۱۱] و کنترل حالت لغزشی [۱۳، ۱۴] را محدود می‌سازد.

روش کنترل حالت لغزشی با چند راهی لغزش پویا به منظور حل مسأله‌ی تعقیب کامل سیستم‌های ناکمینه- فاز غیرخطی توسط اشتسل در سال ۱۹۹۸ میلادی مطرح شد [۱۵]. کنترل حالت لغزش پایای ارایه شده، ترکیبی است از کنترل حالت لغزش معمولی، که از عدم حساسیت و مقاوم بودن نسبت به اغتشاش‌های سازگار و عامل‌های غیرخطی برخوردار است، و یک عمل‌گر پویا، که در واقع نقش یک جبران‌ساز پویا را به منظور تطابق و هم‌سازی با اغتشاش‌های ناسازگار و پایدارسازی پویایی داخلی ایفا می‌کند. در این روش، قانون کنترل طوری طراحی می‌شود که مسیرهای حالت به سمت یک چند راهی لغزش پویا هدایت شوند و با رسیدن مسیرهای حالت به چند راهی پویا، پایداری سیستم در حالت لغزش با توجه به نقش عمل‌گر پویا ارضاء می‌شود.

### ۱.۳ فرمول‌بندی کنترل حالت لغزش پویا

سیستم غیرخطی و ناکمینه- فاز توصیف شده به شکل زیر را در نظر بگیرید

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + bu + F(x, t) \\ y = Gx \end{cases} \quad (44)$$

به طوری که  $x \in \mathbb{R}^n$  بردار متغیرهای حالت،  $u \in \mathbb{R}^1$  تابع کنترل،  $y \in \mathbb{R}^1$  خروجی کنترل شده،  $A$ ،  $b$ ،  $G$  ماتریس‌های ثابت با ابعاد مناسب هستند. لازم به ذکر است  $\{A, b\}$  یک جفت کنترل‌پذیر است.  $F(x, t) \in \mathbb{R}^n$  یک تابع برداری غیرخطی از زمان است که می‌توان آن را به صورت زیر در نظر گرفت

$$F(x, t) = F_1(x) + F_2(t) \quad (45)$$

به طوری که

$$\begin{cases} \|F_1(x)\| \leq N_1 \|x\| \\ \|F_2(t)\| \leq N_{r1} \end{cases} \quad (46)$$

که در آن،  $K_{sep}$  و  $K_D$  ضریب افت، به ترتیب، در بخش جداکننده و پایین‌بر است.

با استفاده از اصل پایستگی تکانه و تناسب افت فشارهای اصطکاکی و شتاب با مجذور نرخ جریان آب، نرخ جریان آب خروجی از پایین‌بر و ورودی به بالابر ( $w_d$ ) با ریشه‌ی دوم اختلاف فشار ایستایی سطح آب داخل بالابر ( $L_w$ ) و سطح آب در پایین‌بر ( $L_d$ ) متناسب و عبارت است از:

$$W_d = K_d \sqrt{\frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f}} \quad (40)$$

$$1 - \bar{x} = \frac{M_f}{M_s} = \frac{A_w L_w \rho_f}{A_1 L_r \rho_s} \Rightarrow L_w = (1 - k_1 x_M) \frac{v_f A_1}{v_s A_w} L_r \quad (41)$$

که در آن،  $A_w$  سطح مقطع جریان داخل بالابر است که چنین محاسبه می‌شود

$$A_w = A_1 - \frac{V_{pr} + V_m}{L_1} \quad (42)$$

که در آن،  $A_1$  سطح مقطع بخش جداکننده‌ی بخار است. معادله‌های (۲)، (۵)، (۷)، (۸)، (۲۳)، (۲۷)، (۲۸)، (۲۹) و (۳۱) همراه با رابطه‌ی (۴۰) معادله‌های غیرخطی حاکم بر مولد بخار هسته‌ای را تشکیل می‌دهند و متغیرهای حالت موردنظر نیز عبارت‌اند از

$$X = \begin{bmatrix} T_{pr} \\ T_m \\ L_d \\ h_d \\ x_M \\ P \end{bmatrix} \quad (43)$$

### ۳. راه‌بُرد کنترل حالت لغزش پویا

بسیاری از سیستم‌های واقعی دارای طبیعت «ناکمینه‌ی فاز» هستند. یک سیستم غیرخطی، ناکمینه- فاز است اگر پویایی‌های داخلی و به عبارت بهتر پویایی‌های صفر<sup>(۹)</sup> آن ناپایدار باشند [۱۲]. در موارد خاص، یک سیستم خطی تک ورودی- تک خروجی (SISO)، ناکمینه- فاز است اگر تابع تبدیل معرف سیستم دارای صفرهای سمت راست در صفحه‌ی مختلط باشد.



با استفاده از رابطه‌های (۴۹) تا (۵۱) معادله‌های (۴۴) به صورت زیر بازنویسی می‌شوند

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = A_{11}z_1 + A_{12}z_2 + f_1(t) \\ \dot{z}_2 = A_{21}z_1 + A_{22}z_2 + \Delta A(z_1, z_2) + f_2(t) + b_2 u \\ y = G_1 z_1 + G_2 z_2 \end{cases} \quad (52)$$

$$z_1 \in \mathbb{R}^{n-1}, z_2 \in \mathbb{R}^1, b_2 \neq 0 \quad (53)$$

واضح است که کاربرد مستقیم کنترل حالت لغزش متعارف برای تعقیب خروجی مطلوب در سیستم با معادله‌های (۵۲) به دلیل طبیعت ناکمینه-فازی سیستم امکان‌پذیر نیست. با در نظر گرفتن متغیر حالت  $z_2$  به عنوان یک ورودی کنترلی مجازی، در اولین قدم از طراحی کنترل حالت لغزش پویای مطلوب برای سیستم مورد نظر، چند راهه‌ی لغزش پویا به صورت زیر ارایه می‌شود

$$\tau = z_2 + \sigma = 0 \quad (54)$$

به طوری که تابع  $\sigma$  به عنوان یک عمل‌گر پویا طراحی می‌شود و پارامتر اصلی و مهم در طراحی، چند راهه‌ی لغزش پویا است که نقش پایدارساز پویایی‌های ناپایدار داخلی را برعهده دارد. در این مقاله یک چهارچوب مناسب برای طراحی عمل‌گرهای پویای مبتنی بر مدل و با استفاده از بازخورد خروجی برای سیستم‌های ناکمینه‌ی فاز با حداقل متغیرهای قابل اندازه‌گیری ارایه شده است که می‌تواند کمک شایانی به حل مسایل مربوط به این نوع راه‌برد کنترلی نماید و از این روش نیز به منظور طراحی کنترل حالت لغزش پویای مولدهای بخار هسته‌ای استفاده می‌شود.

### ۲.۳ طراحی چند راهه‌ی لغزش پویا با استفاده از بازخورد

#### خروجی

با در نظر گرفتن چند راهه‌ی لغزش پویا (۵۴)، شرط وجود حالت لغزشی برای سیستم ناکمینه‌ی فاز (۵۲) بر روی چند راهه‌ی مذکور، برآورد شرط لغزش لیپانوف به صورت زیر است [۱۴]

$$\tau \dot{\tau} \leq -\rho |\tau|, \rho > 0 \quad (55)$$

که در آن،  $F_1(x)$  تابع غیرخطی سازگار، بردار اغتشاش‌های هموار با ثابت‌های  $N_1$  و  $N_2$  است.

استفاده از کنترل حالت لغزش با استفاده از چند راهه‌ی پویا، مستلزم قانون ناپیوسته‌ای به شکل زیر است

$$u = \begin{cases} u^+ & , \tau(x, e, t) > 0 \\ u^- & , \tau(x, e, t) < 0 \end{cases} \quad (47)$$

به طوری که  $\tau(x, e, t) = 0$  یک معادله از چند راهه‌ی لغزشی است که به عنوان یک عمل‌گر پویا بر روی بردار متغیرهای حالت  $(x)$  و خطای تعقیب خروجی  $(e(t) = y_d(t) - y(t))$  عمل می‌کند.  $u^+$  و  $u^-$  هر کدام تابع کنترل پیوسته‌ای از  $x, t$  هستند که باید اهداف کنترلی زیر را برآورده نمایند:

- خروجی سیستم ناکمینه‌ی فاز (۴۴) باید به طور مجانبی مسیر مطلوب خروجی را در حالت لغزشی دنبال کند. به عبارتی باید داشته باشیم

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|y_d(t) - y(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0 \quad (48)$$

- متغیرهای داخلی سیستم پایدار، و مشکل ناپایداری داخلی سیستم حل شود.
- وجود حالت لغزشی در چند راهه‌ی لغزش پویا تضمین شود.

برای طراحی یک چند راهه‌ی لغزش پویای مناسب، ابتدا با استفاده از یک تبدیل ناکمینه‌ی می‌توان معادلات سیستم (۴۴) را به شکل یک دستگاه استاندارد تبدیل نمود [۱۵]

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} X, M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$MB = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix}, b_2 \neq 0, MAM^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$MF = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ \Delta A(z_1, z_2) + f_2(t) \end{bmatrix}, GM^{-1} = [G_1 \quad G_2] \quad (51)$$





در نتیجه، ماتریس  $R=[k, \alpha]$  برای جابجایی مقادیر ویژه‌ی ماتریس  $\bar{A}-\bar{B}R$  می‌تواند طراحی شود. انتگرال‌گیر نیز به منظور حذف اثر اغتشاش ناسازگار  $f_1(t)$  بر روی خطای تعقیب خروجی ( $e$ ) در حالت ماندگار استفاده می‌شود. ماتریس  $R$  را می‌توان با استفاده از ماتریس تبدیل  $\bar{T}$  به صورت زیر به دست آورد

$$R = [\bar{\beta}_n - \bar{\alpha}_n | \bar{\beta}_{n-1} - \bar{\alpha}_{n-1} | \bar{\beta}_{n-2} - \bar{\alpha}_{n-2} \cdots \beta_1 - \bar{\alpha}_1] \cdot (\bar{T})^{-1} \quad (61)$$

به طوری که  $\bar{\beta}_i, i=1:n$  ضرایب‌های چندجمله‌ای مطلوب به شرح زیر هستند

$$\bar{P}(s) = s^n + \bar{\beta}_1 s^{n-1} + \cdots + \bar{\beta}_n = 0 \quad (62)$$

$\bar{\alpha}_i, i=1:n$  ضرایب‌های مشخصه‌ی رابطه‌ی (59) هستند

$$|sI - \bar{A}| = s^n + \bar{\alpha}_1 s^{n-1} + \cdots + \bar{\alpha}_n = 0 \quad (63)$$

ماتریس تبدیل  $\bar{T}$  به وسیله‌ی رابطه‌ی  $\bar{T} = \bar{C} \cdot \bar{W}$  تعیین می‌شود، به طوری که،

$$\bar{C} = [\bar{B} | \bar{A}\bar{B} | \bar{A}^2\bar{B} \cdots \bar{A}^{n-1}\bar{B}] \quad (64)$$

$$\bar{W} = \begin{bmatrix} \bar{\alpha}_{n-1} & \bar{\alpha}_{n-2} & \cdots & \bar{\alpha}_1 & 1 \\ \bar{\alpha}_{n-2} & \bar{\alpha}_{n-3} & \cdots & -1 & 0 \\ \bar{\alpha}_1 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \\ -1 & \cdots & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (65)$$

در روش جابجایی قطب فرض بر این است که کلیه‌ی متغیرهای حالت، قابل اندازه‌گیری و در دسترس هستند، اما در عمل چنین نیست و همه‌ی متغیرها در دسترس نیستند. لذا برای تخمین متغیرهای غیر قابل اندازه‌گیری نیاز به طراحی رؤیت‌گر است، در این قسمت به منظور حذف متغیرهای حالت از معادله‌ی (57) و استفاده از بازخورد خروجی، یک تابع تبدیل از خطای تعقیب به متغیرهای حالت ارایه می‌شود. با قرار دادن رابطه‌ی (57) در معادله‌ی پویای سیستم در حالت لغزش و با حذف اغتشاش ناسازگار  $f_1(t)$  از آن، می‌توان نوشت

$$\dot{Z}_1 = (A_{11} - A_{1r}K)Z_1 - A_{1r}\alpha q \quad (66)$$

با فرض این که حالت لغزشی برای سیستم تعریف شده در رابطه‌ی (52) بر روی چند راهه‌ی لغزش پویا وجود داشته باشد، معادله‌های حرکت سیستم بر روی چند راهه‌ی مذکور به صورت زیر در می‌آید

$$\begin{cases} \dot{Z}_1 = A_{11}Z_1 - A_{1r}\sigma + f_1(t) \\ y = G_r Z_1 - G_r \sigma \end{cases} \quad (56)$$

سیستم تعریف شده به وسیله‌ی معادله‌ی (56) که وضعیت سیستم اصلی در شرایط حالت لغزشی بر روی چند راهه‌ی لغزش پویا را نشان می‌دهد، با ورودی کنترل مجازی  $\sigma$  و خروجی  $y$ ، یک سیستم کماکان ناکمینه- فاز است. حال به منظور ایجاد پایداری داخلی و تعقیب کامل خروجی به وسیله‌ی سیستم (52) بر روی چند راهه‌ی لغزشی (54)، تابع  $\sigma$  به عنوان یک عمل‌گر پویا طراحی می‌شود.

در اولین قدم، ابتدا ساختار کنترل بازخورد حالت به صورت زیر استفاده می‌شود

$$\sigma = KZ_1 + \alpha q \quad (57)$$

به طوری که

$$K = [k_1 \quad k_r \cdots k_{n-1}], \quad \dot{q} = e = y_d - y \quad (58)$$

با توجه به معادله‌ی (58)، پویایی سیستم می‌تواند به صورت زیر بیان شود

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ -G_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{1r} \\ -G_r \end{bmatrix} \sigma + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_d + \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} f_1(t) \quad (59)$$

اگر زوج  $\left\{ \begin{bmatrix} A_{11} & A_{1r} \\ A_{r1} & A_{rr} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ b_r \end{bmatrix} \right\}$  در رابطه‌ی (52) کنترل‌پذیر باشد، زوج  $\{A_{11}, A_{1r}\}$  در معادله‌ی (56) نیز کنترل‌پذیر است. با توجه به کنترل‌پذیری  $\{A_{11}, A_{1r}\}$ ، کنترل‌پذیری  $\{\bar{A}, \bar{B}\}$  را می‌توان نتیجه‌گیری نمود، به طوری که،

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ -G_r & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} A_{1r} \\ -G_r \end{bmatrix} \quad (60)$$



$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{A_d}{V_d} & 0 & 0 & m_{r\phi} \\ 0 & 0 & \frac{h_d A_d}{V_d} & \frac{V_d}{V_d} & 0 & m_{f\phi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{\delta\delta} & m_{\delta\phi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{\phi\delta} & m_{\phi\phi} \end{bmatrix} \quad (72)$$

$$m_{r\phi} = x_r \frac{V_{st}}{V_g} \left( \frac{dv_g}{dp} \right) \quad (73)$$

$$m_{f\phi} = x_r h_f \left( \frac{V_{st}}{V_g} \right) \left( \frac{dv_g}{dp} \right) \quad (74)$$

$$m_{\delta\delta} = \frac{-K_s V_s}{V_s} v_{fg} \quad (75)$$

$$m_{\delta\phi} = \frac{-V_s}{V_s} \left( \frac{dv_f}{dp} + K_s x_m \frac{dv_{fg}}{dp} \right) \quad (76)$$

$$m_{\phi\delta} = \frac{K_s V_s}{V_s} (h_{fg} - h_s \frac{v_{fg}}{V_s}) \quad (77)$$

$$m_{\phi\phi} = \frac{-V_s}{V_s} \left[ \frac{h_s}{V_s} \left( \frac{dv_f}{dp} + k_s x_m \frac{dv_{fg}}{dp} \right) - \frac{dh_f}{dp} - K_s x_m \frac{dh_{fg}}{dp} \right] \quad (78)$$

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & 0 & 0 & 0 & \alpha_{26} \\ 0 & 0 & \alpha_{33} & 0 & \alpha_{35} & \alpha_{36} \\ 0 & 0 & \alpha_{43} & \alpha_{44} & \alpha_{45} & \alpha_{46} \\ 0 & 0 & \alpha_{53} & 0 & \alpha_{55} & \alpha_{56} \\ 0 & \alpha_{62} & \alpha_{63} & \alpha_{64} & \alpha_{65} & \alpha_{66} \end{bmatrix} \quad (79)$$

$$\alpha_{11} = \frac{-\gamma C_{pr} - W_{pr} - \alpha_{pr} A_{pr}}{\rho_{pr} V_{pr} C_{pr}} \quad (80)$$

$$\alpha_{12} = \frac{\alpha_{pr} A_{pr}}{\rho_{pr} V_{pr} C_{pr}} \quad (81)$$

$$\alpha_{21} = \frac{\alpha_{pr} A_{pr}}{\rho_m V_m C_m} \quad (82)$$

از تبدیل لاپلاس معادله‌ی فوق چنین به دست می‌آید

$$(sI - A_{11} + A_{11}K)Z_1(s) = -A_{11}\alpha Q(s) \quad (67)$$

از طرفی با توجه به تعریف  $q$ ،  $Q(s) = \frac{E(s)}{s}$ ، لذا تابع تبدیل مطلوب به شکل زیر استنتاج می‌شود

$$Z_1(s) = -[(sI - A_{11} + A_{11}K)^{-1} A_{11} \alpha] \frac{E(s)}{s} \quad (68)$$

با توجه به تابع تبدیل فوق، رابطه‌ی عمل‌گر پویا (۵۷) به شکل زیر قابل بازنویسی است

$$\sigma(s) = [-K(sI - A_{11} + A_{11}K)^{-1} A_{11} \alpha + \alpha] \frac{E(s)}{s} \quad (69)$$

#### ۴. پیاده‌سازی کنترل حالت لغزش پویای مبتنی بر بازخورد خروجی بر روی مدل غیرخطی مولدهای بخار هسته‌ای

در این قسمت با هدف استفاده از مزایای کنترل حالت لغزشی برای کنترل سطح آب مولدهای بخار هسته‌ای و نیز با توجه به طبیعت ناکمینه-فازی مولدهای بخار هسته‌ای، از روش ارایه شده در قسمت قبل به منظور طراحی کنترل حالت لغزش پویای مولدهای بخار هسته‌ای استفاده شد. با در نظر گرفتن مدل غیرخطی ارایه شده برای مولد بخار هسته‌ای، ابتدا به منظور استفاده از الگوریتم ارایه شده، معادله‌های غیرخطی حاکم بر سیستم، با خطی‌سازی حول نقاط کاری در سطوح توان مشخص، به صورت معادله‌های خطی شده‌ی زیر ارایه شدند

$$M\dot{x} = Ax + Bu + Wd + Nz \quad (70)$$

به طوری که،

$$x = \begin{bmatrix} \delta T_{pr} \\ \delta T_m \\ \delta L_d \\ \delta h_d \\ \delta x_M \\ \delta p \end{bmatrix}, u = \delta W_{fw}, d = \delta W_{st}, z = \begin{bmatrix} \delta T_{SG} \\ \delta T_{fw} \end{bmatrix} \quad (71)$$



$$\alpha_{r_2} = \frac{W_{st}}{x_M^*} h_f + h_d \left( \frac{k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{V_s}{A_w v_s} \right) \right) \left[ 1 + K_1 (1 - x_M) \frac{v_{fg}}{v_s} \right] \quad (98)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{r_3} &= h_d \frac{k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left[ \frac{V_s}{A_w} \left( \frac{1 - x_M}{v_s} \right) \left( \frac{dv_f}{dp} + K_1 x_M \frac{dv_g}{dp} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left[ \frac{W_{st}}{x_M} \left( \frac{dh_f}{dp} + x_M \frac{dh_{fg}}{dp} \right) + \alpha_{se} A_{se} \frac{dT_{sat}}{dp} \right] \right] \end{aligned} \right. \quad (99)$$

ماتریس‌های  $N$ ،  $W$ ،  $B$  نیز عبارت‌اند از

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ h_{fw} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ x_r \\ x_r h_f \\ -1 \\ x_M \\ -\frac{(h_f + x_M h_{fg})}{x_M} \end{bmatrix} \quad (100)$$

$$N = \begin{bmatrix} n_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & n_{r_2} \\ 0 & n_{r_3} \\ 0 & n_{s_2} \\ 0 & n_{s_3} \end{bmatrix} \quad (101)$$

$$n_{11} = \frac{\gamma C_{pr} W_{pr}}{\rho_{pr} V_{pr} C_{pr}}, \quad n_{r_2} = \frac{K_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \frac{L_d}{v_d} \left( \frac{dv_d}{dT} \right) \quad (102)$$

$$n_{r_3} = W_{fw} \frac{dh_{fw}}{dT} + h_d \frac{K_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \frac{L_d}{v_d} \left( \frac{dv_d}{dT} \right) \quad (103)$$

$$n_{s_2} = \frac{-K_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \frac{L_d}{v_d} \left( \frac{dv_d}{dT} \right) \quad (104)$$

$$n_{s_3} = -h_d \frac{K_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \frac{L_d}{v_d} \left( \frac{dv_d}{dT} \right) \quad (105)$$

با استفاده از وارون ماتریس  $M$  و حاصل ضرب آن در طرفین دستگاه معادله‌های خطی شده‌ی (۷۰)، معادله‌های خطی شده‌ی مولد بخار در یک سطح توان مشخص به صورت زیر نوشته شدند

$$\begin{cases} \dot{x} = A \cdot x + B \cdot u + W \cdot d + N \cdot z \\ y = c x, \quad c = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (106)$$

$$\alpha_{r_1} = \frac{-(\alpha_{pr} A_{pr} + \alpha_{se} A_{se})}{\rho_m V_m C_m} \quad (83)$$

$$\alpha_{r_4} = \alpha_{se} A_{se} \frac{dT_{sat}}{dp} \quad (84)$$

$$\alpha_{r_5} = \frac{-k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \frac{1}{v_d} \quad (85)$$

$$\alpha_{r_6} = \frac{-k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{V_s}{A_w v_s} \right) \left[ 1 + K_1 (1 - x_M) \frac{v_{fg}}{v_s} \right] - \frac{W_{st}}{x_M^*} \quad (86)$$

$$\alpha_{r_7} = \frac{-K_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{V_s}{A_w v_s} \right) (1 - x_M) \left( \frac{dv_f}{dp} + K_1 x_M \frac{dv_g}{dp} \right) \quad (87)$$

$$\alpha_{r_8} = -h_d \frac{K_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \frac{1}{v_d} \quad (88)$$

$$\alpha_{r_9} = -W_d \quad (89)$$

$$\alpha_{r_{10}} = \frac{-h_f W_{st}}{x_M^*} - h_d \frac{k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{V_s}{A_w v_s} \right) \left[ 1 + K_1 (1 - x_M) \frac{v_{fg}}{v_s} \right] \quad (90)$$

$$\alpha_{r_{11}} = x_r W_{st} \frac{dh_f}{dp} - \frac{h_f k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{V_s}{A_w} \right) \left( \frac{1 - x_M}{v_s} \right) \left( \frac{dv_f}{dp} + K_1 x_M \frac{dv_g}{dp} \right) \quad (91)$$

$$\alpha_{s_1} = \frac{k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{1}{v_d} \right) \quad (92)$$

$$\alpha_{s_2} = \frac{W_{st}}{x_M^*} + \frac{k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \frac{V_s}{A_w v_s} \left[ 1 + K_1 (1 - x_M) \frac{v_{fg}}{v_s} \right] \quad (93)$$

$$\alpha_{s_3} = \frac{k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{V_s}{A_w} \right) \left( \frac{1 - x_M}{v_s} \right) \left( \frac{dv_f}{dp} + K_1 x_M \frac{dv_g}{dp} \right) \quad (94)$$

$$\alpha_{s_4} = \alpha_{se} A_{se} \quad (95)$$

$$\alpha_{s_5} = h_d \frac{k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{v_d} - \frac{L_w}{v_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{1}{v_d} \right) \quad (96)$$

$$\alpha_{s_6} = W_d \quad (97)$$



که در آن، چندراهه‌ی لغزش پویا و  $u_c^+$  و  $u_c^-$  تابع‌های پیوسته‌ای از  $x$  و  $t$  برای ایجاد حرکت روی چندراهه‌ی لغزش پویا هستند. چندراهه‌ی لغزش پویای مطلوب برای طراحی کنترل حالت لغزش پویای سطح آب مولد بخار هسته‌ای با استفاده از الگوریتم بازخورد خروجی ارایه شده، به صورت زیر طراحی شد

$$\tau = \sigma + u \quad (112)$$

که در آن تابع  $\sigma$  یک جبران‌ساز پویا برای پایدارسازی پویایی‌های ناپایدار داخلی است و براساس روش ارایه شده در این مقاله طراحی شد. برای برآورد شرط لغزش (۵۵) به منظور تضمین وجود حالت لغزش سیستم (۱۰۸) روی چندراهه‌ی لغزش پویا (۱۱۲)، قانون کنترل به صورت زیر تعیین شد

$$u_c = -U_{\max} \text{sign}(\tau) \quad (113)$$

برای جلوگیری از نوسان<sup>(۱۲)</sup> در حالت لغزش که به نوبه‌ی خود پدیده‌ی نامطلوبی است و باعث فعالیت بالای کنترل‌کننده می‌شود، قانون کنترل ناپیوسته با استفاده از نظریه‌ی لایه‌ی مرزی به صورت پیوسته‌ی زیر اصلاح شد [۱۲].

$$u_c = -U_{\max} \tanh(\tau/\phi) \quad (114)$$

که در آن،  $\phi$  پهنای لایه‌ی مرزی حول چندراهه‌ی لغزش پویا است.

با اعمال علامت کنترلی فوق و با فرض وجود حالت لغزش روی چندراهه‌ی لغزش پویای  $\tau$ ، معادله‌ی حرکت لغزشی سیستم روی چندراهه‌ی لغزش پویا به صورت زیر بود

$$\begin{cases} \dot{x} = A'x - B'\sigma + W'd + N'z \\ y = cx, c = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (115)$$

تابع  $\sigma$  براساس معادله‌ی (۵۷) به صورت زیر طراحی شد

$$\sigma = kx + \alpha q \quad (116)$$

لازم به ذکر است که نماد  $\delta$  تغییرات متغیرهای حالت ارایه شده نسبت به شرایط حالت پایا<sup>(۱۱)</sup> است که مربوط به یک سطح توان کاری مشخص نیروگاه هسته‌ای است.

ابتدا دستگاه معادله‌های (۱۰۶) باید به شکل دستگاه استاندارد (۵۲) ارایه می‌شد، برای این منظور یک صافی پایین‌گذر در مسیر پیشخور بین کنترل‌کننده و مولد بخار در نظر گرفته شد که با توجه به اندازه‌گیری نادقیق در توان‌های پایین و امکان اشتباه حس‌گرها در اندازه‌گیری جریان توان‌های پایین و قابلیت اطمینان پایین آن‌ها، استفاده از صافی‌های پایین‌گذر توانست مفید واقع شود. با توجه به استفاده از این نوع صافی، بین آهنگ جریان آب تغذیه‌ی ورودی به مولد بخار ( $u$ ) و آهنگ جریان آب تغذیه به عنوان علامت خروجی از کنترل‌کننده ( $u_c$ ) رابطه‌ی زیر برقرار بود

$$\dot{u} = -u + u_c \quad (107)$$

بنابراین، مدل سیستم همراه با در نظر گرفتن پویایی صافی، به صورت زیر ارایه شد

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + \hat{B}u_c + \hat{W}d + \hat{N}z \\ y = \hat{C}\hat{x} \end{cases} \quad (108)$$

به طوری که

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \hat{W} = \begin{bmatrix} W' \\ 0 \end{bmatrix} \\ \hat{C} = [C \quad 0], \quad \hat{N} = \begin{bmatrix} N' \\ 0 \end{bmatrix} \quad (109)$$

$\hat{x}(t) = [x(t) \ u]^T$  و  $u_c$  علامت کنترلی است.

با در نظر گرفتن شکل دستگاهی استاندارد (۵۲) و مقایسه‌ی آن با رابطه‌ی (۱۰۸) چنین نوشته شد

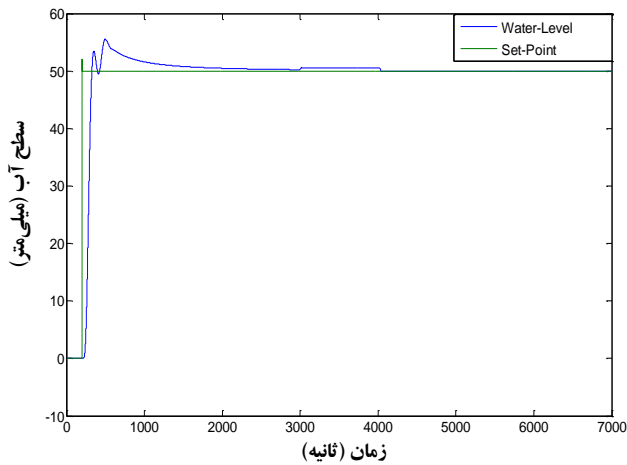
$$z_1 = x, \quad z_2 = u \quad (110)$$

مطابق روش بیان شده، هدف طراحی علامت کنترلی این بود

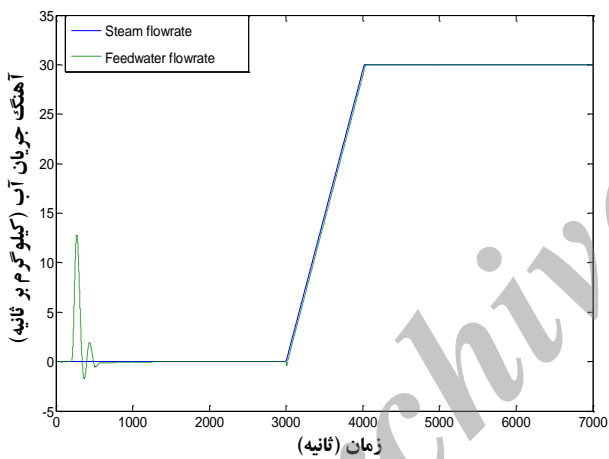
$$u_c = \begin{cases} u_c^+, \tau(x, e, t) \circ \\ u_c^-, \tau(x, e, t) \circ \end{cases} \quad (111)$$



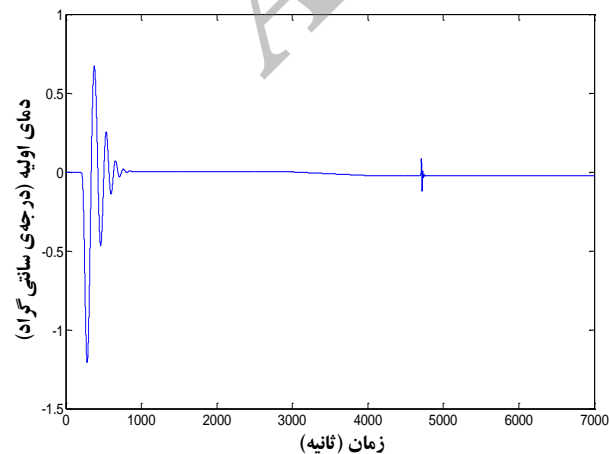
به طوری که، شرایط حالت پایای سیستم در توان ۸۰ درصد نیروگاه در نظر گرفته شد. همهی نتایج (شکل‌های ۱ تا ۷) بیان‌گر اختلاف با مقادیر حالت پایا است.



شکل ۱. تغییرات سطح آب مولد بخار با زمان.



شکل ۲. تغییرات نرخ جریان آب تغذیه با زمان.



شکل ۳. تغییرات دمای خروجی خنک‌کننده با زمان.

$$k = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4 \quad k_5 \quad k_6] \quad (117)$$

از روی مانستگی با معادله‌ی (۵۹)، پویایی سیستم به صورت زیر بیان شد

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B' \\ 0 \end{bmatrix} \sigma + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} y_d + \begin{bmatrix} w' \\ 0 \end{bmatrix} d + \begin{bmatrix} N' \\ 0 \end{bmatrix} z \quad (118)$$

قابل ذکر است که زوج  $\{A', B'\}$  یک زوج کنترل‌پذیر است و از این‌رو زوج  $\{\bar{A}, \bar{B}\}$  در (۱۱۸) نیز یک زوج کنترل‌پذیر است، به طوری که،

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A' & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} B' \\ 0 \end{bmatrix} \quad (119)$$

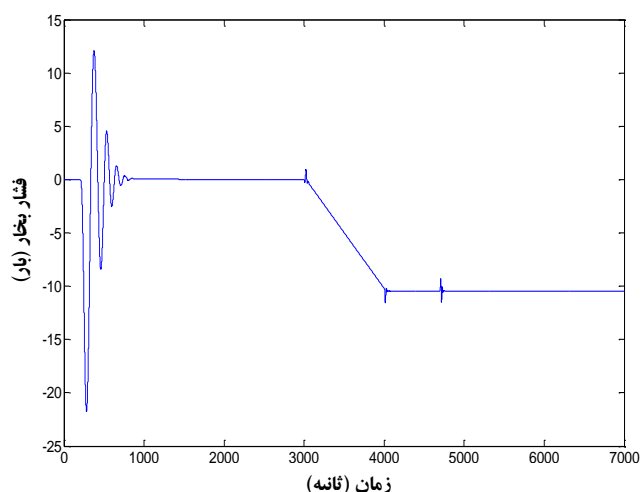
در نتیجه، ماتریس  $R = [k \quad \alpha]$  برای جابجایی مقادیر ویژه‌ی ماتریس  $\bar{A} - \bar{B}R$ ، مطابق با رابطه‌ی (۶۱) طراحی شد. لازم به ذکر است روش جابجایی قطب بر پایه‌ی انتگرال زمانی قدر مطلق خطا (I.T.A.E)<sup>(۱۳)</sup> به منظور تعیین ماتریس  $R$  در جبران‌ساز پویا استفاده شد. پس از تعیین ماتریس  $R$ ، عمل‌گر پویا مطابق تابع تبدیل (۶۱) به صورت زیر در ساختار چندراهه‌ی لغزش (۱۱۲) قرار گرفت:

$$\sigma(s) = [-k(sI - A' + B'k)^{-1}B'\alpha + \alpha] \frac{E(s)}{s} \quad (120)$$

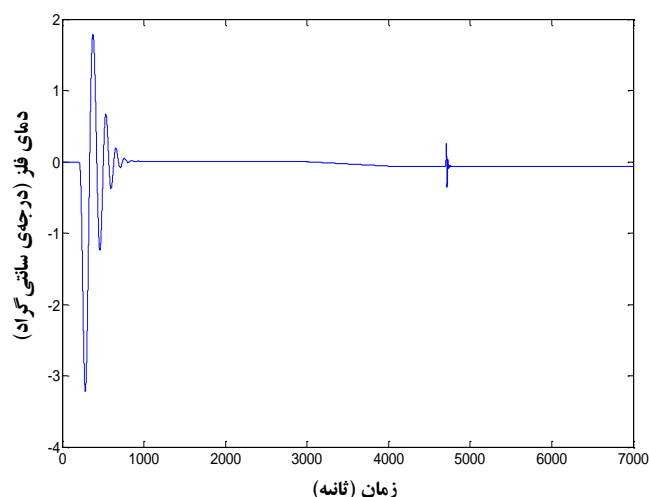
در ادامه نتایج حاصل از اعمال کنترل حالت لغزش پویای مبتنی بر بازخورد خروجی برای کنترل مولد بخار هسته‌ای فلیسبرگ<sup>(۱۴)</sup> کشور آلمان، که اطلاعات ساختاری و هم‌چنین مقادیر مورد نیاز پارامترهای آن در توان ۸۰ درصد نامی نیروگاه، از مرجع [۱۶] در دسترس است، ارائه می‌شود.

## ۵. نتایج

به منظور اعمال و پیاده‌سازی الگوریتم کنترل حالت لغزش پویا توسعه داده شده براساس بازخورد خروجی، بر روی مدل غیرخطی، از آن برای کنترل مولد بخار هسته‌ای فلیسبرگ استفاده شد. در این فرایند، شرایط اولیه‌ی مدل غیرخطی برابر با



شکل ۷. رابطه‌ی بین فشار بخار خروجی (بخش ثانویه) با زمان.

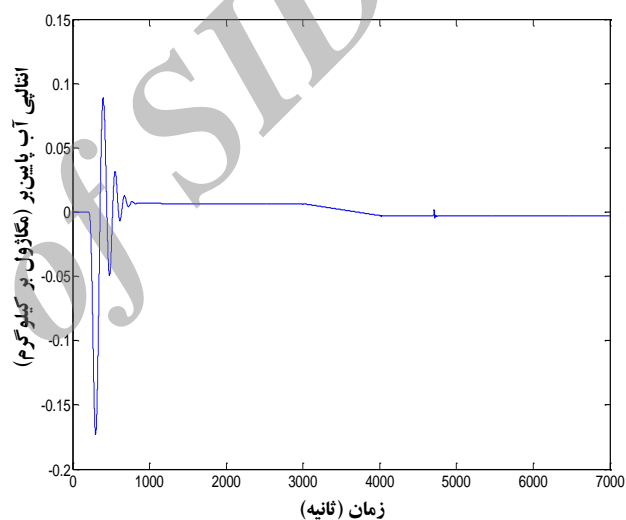


شکل ۸. تغییرات دمای فلز لوله‌های U شکل با زمان.

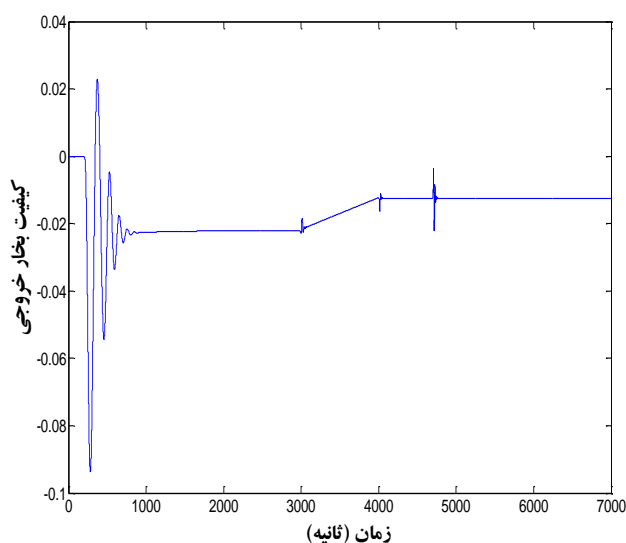
هم‌چنین کنترل حالت لغزش پویای طراحی شده براساس مدل خطی آبروینگ در توان ۸۰٪ اسمی، بر مدل غیرخطی اعمال شد. شکل‌های ۸ و ۹ کارآیی کنترل حالت لغزش پویای مبتنی بر بازخورد خروجی بر پایه‌ی مدل آبروینگ را با کنترل طراحی شده بر مبنای مدل غیرخطی، مقایسه می‌کنند. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان فراجاهش<sup>(۱۵)</sup> و زمان نشست<sup>(۱۶)</sup> تغییرات سطح آب مولد بخار ناشی از اعمال کنترل طراحی شده بر مبنای مدل غیرخطی کم‌تر از مقادیر متناظر آن با اعمال کنترل بر مبنای مدل آبروینگ است و علامت کنترل (تغییرات نرخ جریان آب تغذیه) نیز براساس مدل غیرخطی عملکرد بهتری دارد. در واقع نتایج حاصل از اعمال کنترل طراحی شده بر مبنای مدل غیرخطی بیان‌گر برتری و مناسب‌تر بودن آن نسبت به مدل آبروینگ به لحاظ کارآیی و عملکرد کنترل‌کننده است.

## ۶. راستی آزمایی کنترل‌های طراحی شده براساس مدل غیرخطی

در این قسمت به منظور راستی آزمایی کنترل حالت لغزش پویایی طراحی شده بر مبنای بازخورد خروجی و مدل غیرخطی ارایه شده، از کنترل طراحی شده به منظور کنترل سطح آب مولد بخار هسته‌ای مین یانکی<sup>(۱۷)</sup> در جریان حادثه‌ی مربوط به خروج یک مجموعه میله‌ی کنترل به صورت کنترل نشده، بر روی شبیه‌ساز D-STGN استفاده شد.



شکل ۹. تغییرات انتالی آب پایین بر با زمان.



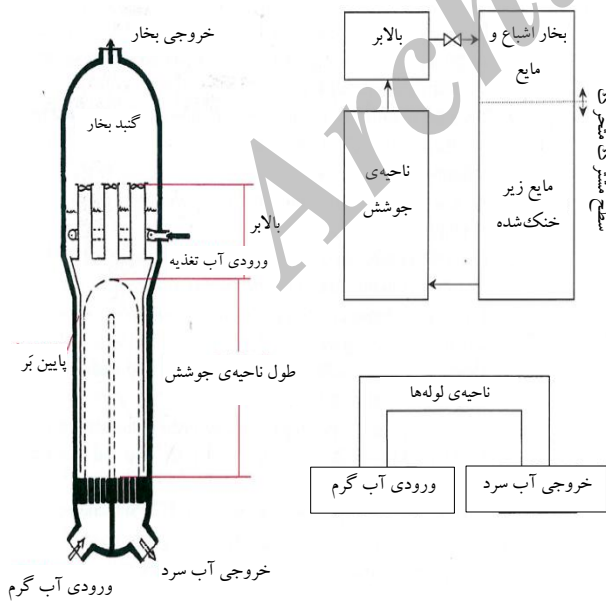
شکل ۱۰. تغییرات کیفیت بخار خروجی از بالا بر با زمان.



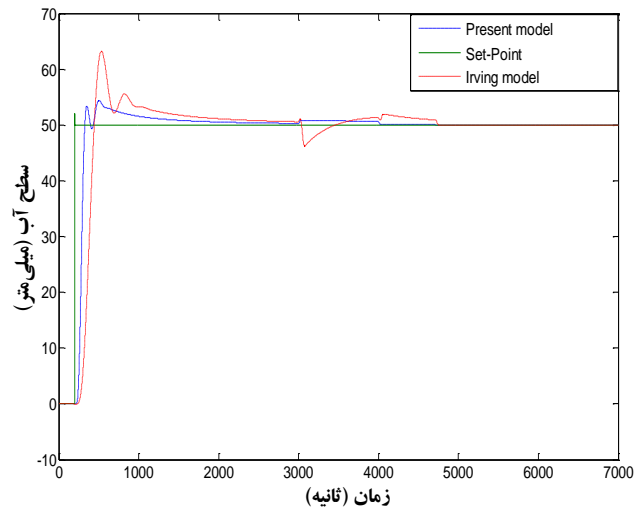
به منظور شبیه‌سازی مولد بخار این آخری به تعدادی ناحیه به عنوان حجم کنترل تقسیم‌بندی و قوانین پایستگی ترمودینامیکی در هر کدام از این نواحی اعمال شد. مولد بخار هسته‌ای به صورت هفت حجم کنترل (ناحیه)، سه ناحیه در بخش اول و چهار ناحیه آن در بخش ثانویه تقسیم‌بندی شد (شکل ۱۰). این تقسیم‌بندی این بود:

- بخش اولیه به سه ناحیه، مجرای ورودی<sup>(۲۰)</sup> خنک‌کننده، مجرای خروجی<sup>(۲۱)</sup> خنک‌کننده و ناحیه‌ی لوله‌های U شکل تقسیم‌بندی شد. دمای خنک‌کننده، فشار و نرخ جریان، شرایط مرزی بخش اول هستند که به عنوان ورودی‌های شبیه‌ساز تعریف شدند.
- بخش ثانویه به چهار ناحیه، پایین‌بر، ناحیه‌ی جوشش، بالابر و محفظه‌ی بخار تقسیم شد.

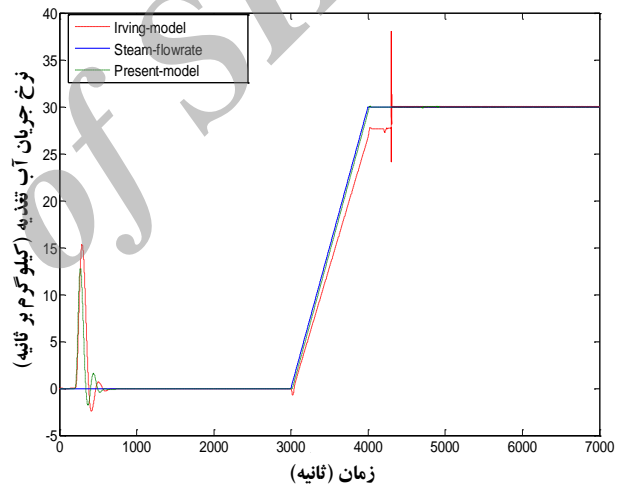
شرایط مرزی مربوط به بخش ثانویه که باید به صورت فایل ورودی به نرم‌افزار داده می‌شد عبارت بودند از: دمای آب تغذیه ( $T_{fw}$ )، آهنگ جریان آب تغذیه ( $W_{fw}$ ) و نرخ جریان بخار خروجی از محفظه‌ی بخار ( $W_{st}$ ). جریان در ناحیه‌ی جوشش و بالابر به صورت دو فازی (آب-بخار) و در سایر نواحی تک‌فاز فرض شد. هم‌چنین در تمام ناحیه‌های بخش اولیه، سیال خنک‌کننده‌ی اولیه در شرایط زیر سرد قرار داشت.



شکل ۱۰. مدل‌سازی مولد بخار هسته‌ای به صورت ۷ حجم کنترل در دو بخش.



شکل ۸. مقایسه‌ی تغییرات سطح آب مولد بخار بر مبنای مدل آیروینگ و مدل غیرخطی ارایه شده.

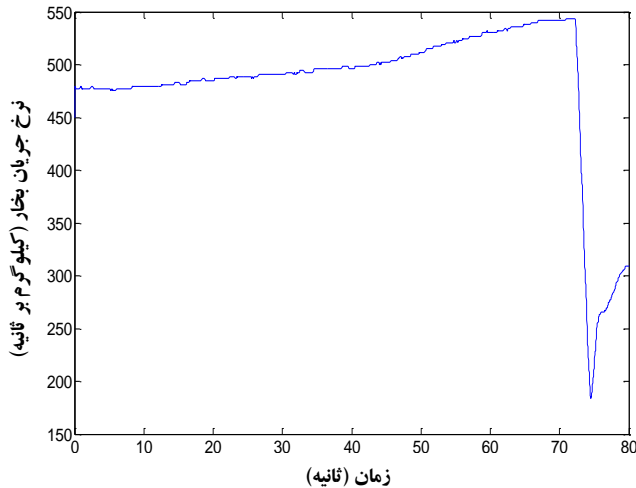


شکل ۹. مقایسه‌ی تغییرات نرخ جریان آب تغذیه بر پایه‌ی مدل آیروینگ و مدل غیرخطی ارایه شده.

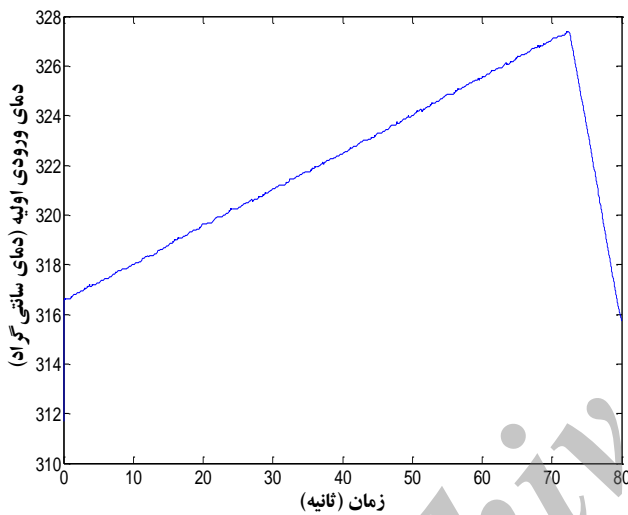
### ۱.۶ شبیه‌ساز D-STGN

شبیه‌ساز مولد بخار هسته‌ای D-STGN که هسته‌ی مرکزی آن یک نرم‌افزار کامپیوتری توسعه یافته برای شبیه‌سازی رفتار پویای یک مولد بخار عمودی با لوله‌های U شکل است و توسط شرکت ادیس<sup>(۱۸)</sup> طراحی شده است، توانایی شبیه‌سازی رفتار پویا و پیش‌بینی مشخصه‌های کارکردی مولد بخار در شرایط گذار<sup>(۱۹)</sup> و عملیاتی رآکتور را دارا است و علاوه بر فراهم آوردن امکان ایجاد تغییرات دلخواه در شرایط مرزی مدل، امکان بررسی سناریوهای مربوط به حادثه‌های نیروگاه‌های هسته‌ای مانند خارج شدن توربین یا رآکتور از مدار را نیز فراهم می‌نماید.

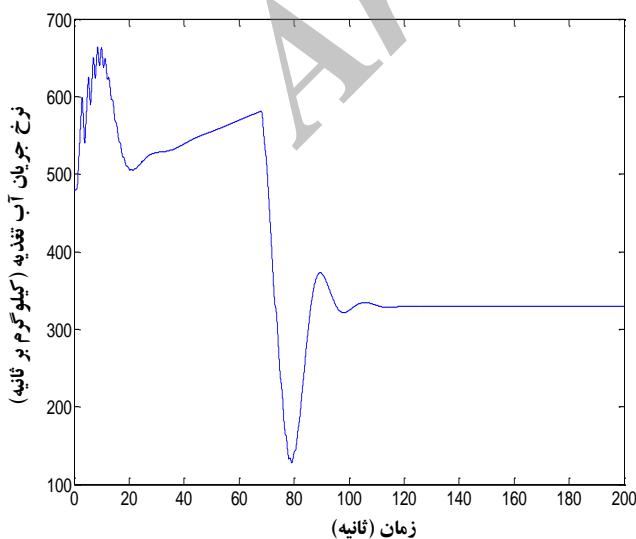
(الف)



(ب)



شکل ۱۱. تغییرات نرخ جریان بخار خروجی و دمای سیال خنک‌کننده ورودی در جریان حادثه‌ی خروج ناخواسته‌ی یک مجتمع میله‌ی کنترل.



شکل ۱۲. تغییرات نرخ جریان آب تغذیه با زمان.

## ۲.۶ حادثه‌ی خروج ناخواسته‌ی یک مجتمع میله‌ی کنترل<sup>(۲۲)</sup> در

### نیروگاه هسته‌ای مین یانکی

دنباله‌ی وقایع مربوط به این حادثه چنین است:

- شروع حادثه با خروج یک مجتمع میله‌ی کنترل آغاز شد.
- تقریباً ۴۳ ثانیه بعد به علت افزایش نرخ جریان بخار خروجی از مولد بخار، شیرهای کمکی و کنارگذر توربین باز شدند.
- در  $t=72(s)$  رآکتور و به دنبال آن توربین از مدار خارج شدند. شرایط مرزی وابسته به زمان این حادثه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

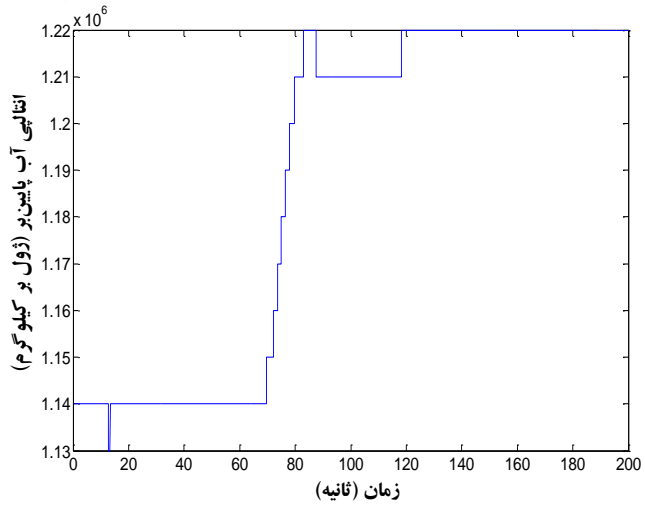
## ۳.۶ اعمال کنترل حالت لغزش پویا بر پایه‌ی بازخورد خروجی بر

### شبیه‌ساز D-STGN

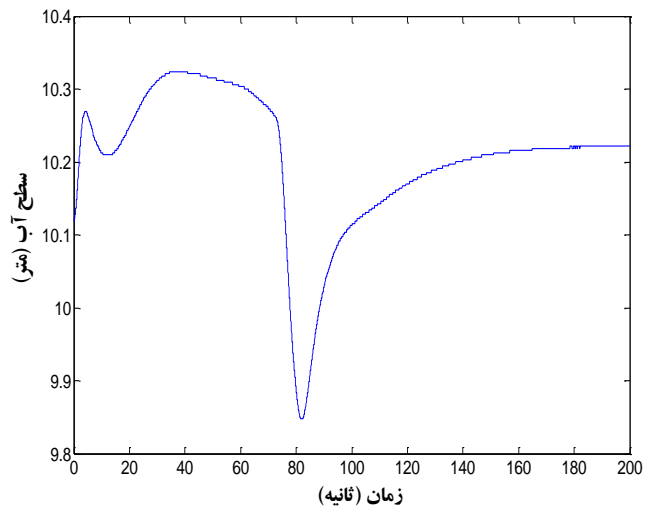
در این قسمت به منظور کنترل سطح آب مولد بخار هسته‌ای مین یانکی در جریان حادثه‌ی خروج ناخواسته‌ی یک مجتمع میله‌ی کنترل از قلب رآکتور، روش در شرایط توان اسمی<sup>(۲۳)</sup> ۱۰۰٪، کنترل حالت لغزش پویای مبتنی بر بازخورد خروجی با قانون کنترل ورودی داده شده در شکل ۱۲ طراحی و با استفاده از فایل متن «scenario» به عنوان علامت کنترل‌کننده‌ی ورودی به شبیه‌ساز اعمال شد. نتایج حاصل از این کنترل‌کننده در شکل‌های ۱۲ تا ۱۸ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که در طراحی کنترل، علامت مرجع ورودی برای تغییرات مجاز سطح آب مولد بخار به صورت یک علامت پله‌ی بین صفر تا صد میلی‌متر لحاظ شده است و شرایط اولیه‌ی سطح آب مولد بخار نیز معادل ۱۰/۱۲ متر تعیین شده است.

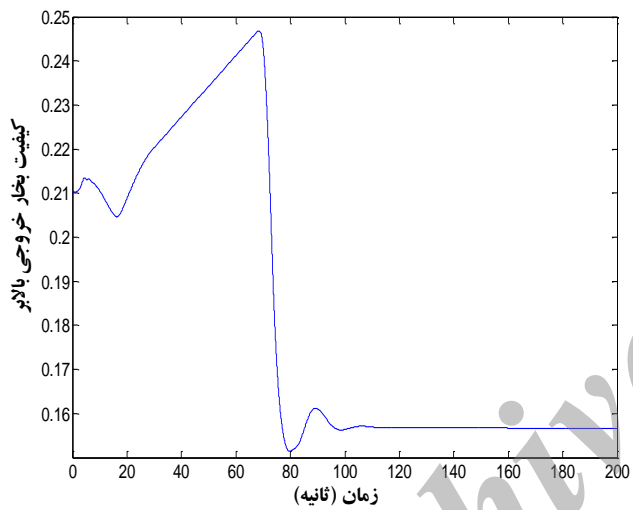




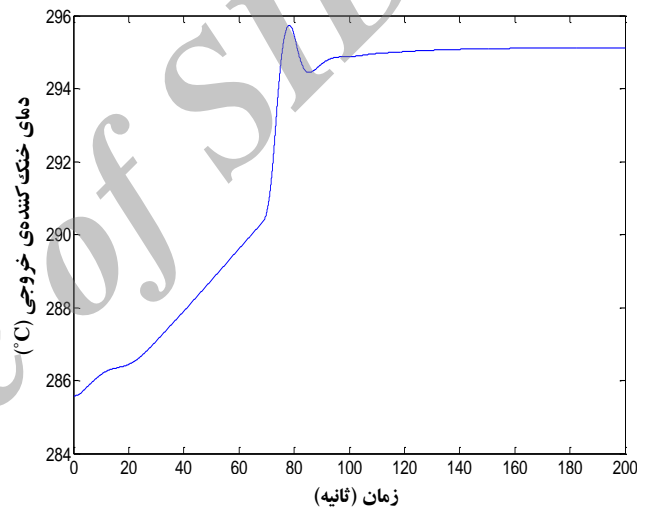
شکل ۱۶. رابطه بین تغییرات انتالی آب پایین‌تر با زمان.



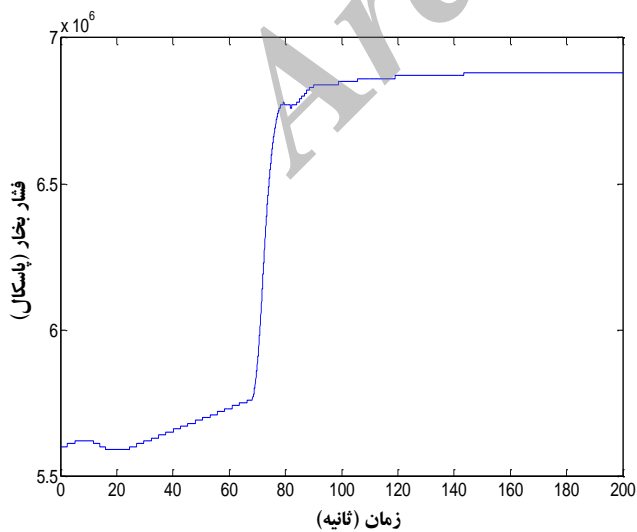
شکل ۱۳. رابطه بین سطح آب مولد بخار و زمان.



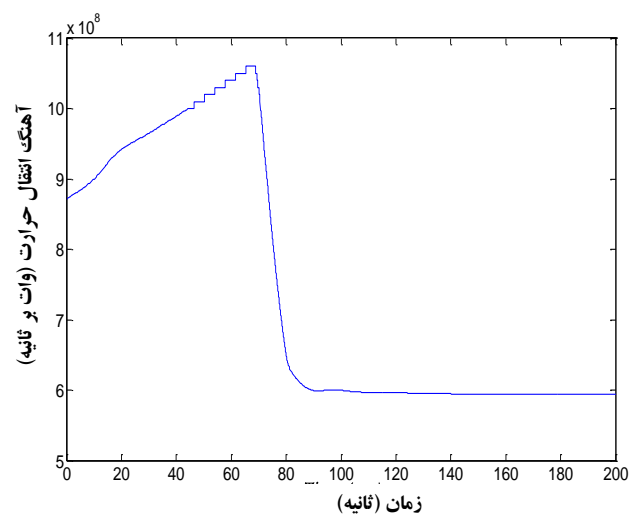
شکل ۱۷. تغییرات کیفیت بخار خروجی بالابر با زمان.



شکل ۱۴. رابطه بین دمای خنک‌کننده‌ی خروجی و زمان.



شکل ۱۸. تغییرات فشار بخار خروجی (بخش ثانویه) با زمان.



شکل ۱۵. تغییرات آهنک انتقال حرارت با زمان.



## پی‌نوشت‌ها

۱. Dynamic Analysis of a Steam Generator
۲. Sub-Cold
۳. Inconel
۴. Down-Corner
۵. Tube Bundle
۶. Riser
۷. Steam-Dome
۸. Steam-Separator
۹. Zero-Dynamics
۱۰. Feedback Linearization
۱۱. Steady-State
۱۲. Chattering
۱۳. Integration of Time with the Absolute Magnitude of the Error
۱۴. Philipsburg 2(FRG)
۱۵. Overshoot
۱۶. Settling-Time
۱۷. Main Yankee
۱۸. Edis.Co
۱۹. Transient-Situations
۲۰. Inlet Plenum
۲۱. Outlet-Plenum
۲۲. Uncontrolled Withdrawal of a Control Element Assembly
۲۳. Full-Power

## ۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یک چهارچوب مناسب برای طراحی عمل‌گرهای پویای مبتنی بر مدل با استفاده از بازخورد خروجی برای سیستم‌های ناکمینه‌ی فاز با حداقل متغیرهای قابل اندازه‌گیری به عنوان یک کاربرد مهم و عملی از چهارچوب ارائه شده برای طراحی کنترل‌کننده‌های حالت لغزش پویا، از آن برای کنترل سطح آب مولد بخار در یک نیروگاه هسته‌ای به عنوان یک سیستم ناکمینه‌ی فاز پیچیده که به علت نوار وسیع جریان‌های موجود اعم از جریان بخار و جریان آب تغذیه، معمولاً حس‌گرهای استفاده شده به اندازه‌ی کافی دقیق نیستند، استفاده شد. با هدف مدل‌سازی دقیق‌تر سیستم مورد مطالعه، یعنی مولدهای بخار هسته‌ای و راستی‌آزمایی کنترل‌کننده، یک مدل غیرخطی براساس قوانین ترمودینامیکی و پایداری جرم، انرژی و اندازه‌ی حرکت (تکانه‌ی) حاکم بر مولدهای بخار هسته‌ای ارائه شد. در ادامه الگوریتم کنترل حالت لغزش پویای توسعه یافته، بر روی مدل غیرخطی اعمال شد که نتایج قابل قبول و مناسبی را برای سیستم کنترل طراحی شده نشان داد.

در پایان نیز به منظور راستی‌آزمایی کنترل حالت لغزش پویای طراحی شده بر پایه‌ی بازخورد خروجی مبتنی بر مدل غیرخطی، از کنترل طراحی شده برای کنترل سطح آب مولد بخار هسته‌ای مین‌یانکی در جریان حادثه‌ی مربوط به خروج یک مجتمع میله‌ی کنترل بر روی شبیه‌ساز D-STGN استفاده شد. نتایج به دست آمده با استفاده از مشخصات نیروگاه هسته‌ای مین‌یانکی در شرایط توان اسمی ۱۰۰٪ نیروگاه، بیان‌گر کارایی مناسب کنترل‌کننده‌ی ارائه شده و برآورد شرایط پایداری و تعقیب کامل خروجی در حضور اغتشاش‌ها است علاوه بر این، مناسب بودن و اعتبار مدل غیرخطی ارائه شده برای طراحی کنترل‌کننده را نیز نشان می‌دهد.



## مرجع‌ها

1. G. R. Ansarifar, H. Davilu, H. A. Talebi, Gain scheduled dynamic sliding mode control for nuclear steam generators, *Progress in Nuclear Energy*, 53 (2011) 651-663.
2. M. V. Kothare, B. Mettler, M. Morari, P. Bendotti, C. M. Falinower, Level control in the steam generator of a nuclear power plant, *IEEE, Proceeding of the 35th Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan, December (1996).
3. M. V. Kothare, B. Mettler, M. Morari, P. Bendotti, C. M. Falinower, Level control in the steam generator of a nuclear power plant, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8 (January 2000) 55-59.
4. E. Irving, C. Miossec, J. Tassart, Towards efficient full automatic operation of the PWR steam generator with water level adaptive control, *Proc. 2nd Int. conf. on Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Stations*, Bournemouth, October 1979, British Nuclear Energy Society, London, (1980) 309-329.
5. A. Feliachi and L. A. Belbelidia, Optimal level controller for steam generators in pressurized water reactors, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, EC-2 (June 1987) 161-167.
6. B. H. Cho and H. C. No, Design of stability-guaranteed neurofuzzy logic controller for nuclear steam generators, *Nuclear Engineering and Design*, 166 (1996) 17-29.
7. Ke Hu, Jingqi Yuan, Multi-model predictive control method for nuclear steam generator water level, *Energy Conversion and Management*, 49 (2008) 1167-1174.
8. G. R. Ansarifar, H. A. Talebi, H. Davilu, Adaptive estimator-based dynamic sliding mode control for the water level of nuclear steam generators, *Progress in Nuclear Energy*, 56 (2012) 61-70.
9. D. C. Arwood and T. W. Kerlin, A mathematical model for an integral economizer U-tube steam generator, *Nucl. Technol*, 35 (1977) 12-32.
10. G. W. Suh and H. C. No, Dynamic modeling and optimum level controller design for steam generators in pressurized water reactors, *Nuclear Science and Engineering*, 90 (1985) 236-247.
11. W. H. Strohmayer, *Dynamic Modeling of Vertical U-tube Steam Generators for Operational Safety Systems*, Ph.D. MIT University, Boston, USA (1982).
12. A. Isidori, *Nonlinear Control Systems*, Springer, New York (1989).
13. R. DeCarlo, S. H. Zak, G. P. Matthews, Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A Tutorial, *Proc. IEEE Proc.*, 76 (1988) 212-232.
14. V. I. Utkin, *Sliding modes in control and optimization*, Springer, Berlin (1992).
15. Y. Shtessel, Nonlinear Nonminimum phase output tracking via dynamic sliding manifolds, *J. Franklin Inst.*, 335B (1998) 841-850.
16. Kernkraftwerk Philippsburg 2, *Inbetriebsetzung-Ergebnisbericht Lastabwurf auf Eigenbedarf*. Nr. D-080-305 (1985).