

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

غلامرضا انصارى فر\*'، حيدرعلى طالبي' ۱. گروه مهندسی هستهای، دانشکدهی علوم و فن آوریهای نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۷۳٤٤۱-۸۱۷٤٦ اصفهان ـ ایران ۲. دانشکدهی مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۱۵۸۷-۱۵۸۷۵، تهران ـ ایران

**چکیدد:** 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 نیرو گاه هستهای می تواند منجر به خاموش سازی های متعدد رآکتور یا آسیب رسیدن به تیغههای توربین شود. مشکل های طراحی یک کنترل کنندهی مؤثر سطح آب برای مولد بخار هستهای با لولههای U شکل، ناشی از دو عامل اساسی است: ۱) غیرخطی بودن و پیچیدگی بویایی سیستم و ۲) خاصیت ناکمینهی فاز سیستم به دلیل پدیدهی انقباض و انبساط. بنابراین، طراحی یک کنترل کنندهی مناسب، یک گام اساسی در جهت افزایش دسترس پذیری نیروگاه هستهای است. هدف این مقاله، طراحی، تحلیل و ارزیابی یک کنترل کننده ی سطح آب برای مولدهای بخار هستهای با لولههای U شکل با استفاده از کنترل حالت لغزش یویا 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 یویا، مشخصات یویایی مطلوب در طول فرايند كنترل و تعقيب كامل مسير را به طور مستقل از اغتشاش ها و نايقيني ها به دست مي دهد. براي صحه گذاري كنترل طراحي شده، با شبيه سازي یک حادثه در نیروگاه هستهای واقعی از شبیهساز مولد بخار هستهای استفاده شده است. نتایج شبیهسازیها بیانگر کارآیی، مقاوم بودن و یایداری کنترل پیشنهادی در حضور اغتشاش های خارجی است.

كليدواژه ها: مولدهای بخار هسته ای، كنتول حالت لغزش پویا، رآ كتور 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 occurance 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, Nonlineer Model

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



۱. مقدمه

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 مهم ترین اهداف کنترلی در یک نیروگاه هستهای افزایش دسترس پذیری نیروگاه است و از طرفی با توجه به این که این نوع نیروگاهها باید از درجهی مخاطره آمیزی پایینی برخوردار باشند، لذا نحوهی کنترل یک نیروگاه در طول دوره یکاری آن از اهمیت ویژهای برخوردار است.

یکی از اجزای کلیدی نیروگاههای هستهای، مولد بخار است که نقش رابط حرارتی بین خنک کنندهی مدار اولیهی رآکتور و سیال کاری را ایفا می کند. عملکرد این جز از نیرو گاه، به صورت مستقیم روی رآکتور هستهای و توریین 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، زيرا افزايش بيش 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 مشكل ها عبارتاند از:

- ناکمینه فاز بودن سیستم که ناشی از پدیده انبساط و انقباض است؛
- برخورداری از پویایی های مختلف با توجه به تغییرات توان؛
  - غیر خطی و پیچیدہ بودن مدل سیستم؛
  - اندازه گیری نادقیق در توان های پایین.

در این رابطه، استفاده از کنترل کننده های کلاسیک از قبیل PID چندان رضایت بخش نیست. هر چند این نوع کنترل کننده ها می توانند سیستم را در محدوده ی خاصی کنترل کنند، ولی ویژگی های کنترلی از قبیل سرعت سیستم، میزان فراجهش و از همه مهم تر ایجاد توقف های ناخواسته در توان های پایین چندان رضایت بخش نبوده است [۴] و همین امر باعث شده است که طراحان به طراحی کنترل کننده های جدیدی که علاوه بر کنترل سیستم بتوانند الزام های کنترلی موردنظر را نیز بر آورده سازند روی آورده اند.

تاكنون كنترلكنندهاى مختلفي براساس مدل خطي مولد بخار در توانهای مختلف برای کنترل سطح آب ارایه شده است که از آن جمله می توان به روش های 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 سال.های اخیر، ناکار آمد بودن روش های کلاسیک از یکسو و نیز معایب کنترلکننده های 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 کنترل کنندههای جدید نظیر کنترل پیشگوی مبتنی بر مدل، سوق داده است. کنترل کننده های 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 نایقینی ها به خاطر مدلسازی ناقص و شرایط محیطی مانند دما و فشار و سایر اغتشاش های 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 کارآیی سیستم کنترل حلقهی بستهی مولد بخار صورت گر د.

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

- مقاوم بودن در مقابل نوفه و نایقینی های مدل سازی؛
  - حجم كم محاسبهها؛
    - تضمين پايدارى؛
  - معتبر بودن برای تمام نواحی کاری؛
  - سادگی پیادهسازی عملی و سخت افزاری.

کنترل مقاوم به روش حالت لغزش می تواند گزینهی مناسبی برای این کار باشد. امروزه کنترل حالت لغزش استفادهی زیادی در کنترل فرایندهای صنعتی دارد، زیرا این راهبُرد کنترلی روشی است که یک رویکرد سازمان یافته را برای مسئلهی پایدارسازی سیستم ارایه میدهد؛ مزیت اصلی این روش آن است که پاسخ، نسبت به تغییر پارامترها، نایقینی های مدلسازی و اغتشاش، غیرحساس باقی میماند و نیز پیادہسازی آن از نظر عملی و سختافزاری ساده است. از طرف دیگر، استفاده از روش کنترل حالت لغزش برای سیستمهای ناکمینهی فاز، از مسایل چالش برانگیز در علم کنترل است. در مورد سیستمهای ناکمینهی فاز، به علت ناپايدارى پويايىھاى داخلى سيستم، روش كنترل حالت لغزش متعارف پاسخ گو نیست و از این رو برای حل این مشکل، در سال های اخیر روش حالت لغزش پویا ارایه شده است. در این روش مسیرهای حالت به سمت یک چند راههی لغزش پویا حرکت داده می شوند و پایداری سیستم در حالت لغزش مورد تحليل و بررسي قرار مي گيرد.

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

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 نزدیک تر باشد نتایج همان اندازه به واقعیت نزدیک تر بوده و منجر به بهبود عملکرد کنترلکنندهی موردنظر خواهد شد، لذا در این مقاله برای مدلسازی دقیق تر 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

با لولههای U شکل ارایه میشود. برای راستی آزمایی کنترل طراحی شده، از شبیهساز مولد بخار هستهای D-STGN<sup>(۱)</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 خنک کنندهی مدار اولیه (ی رآکتور) است. خنک کنندهی اولیهی گرم با دمای ورودی T<sub>SG</sub> 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<sub>pro</sub> از مولد بخار خارج شده و به رآکتور باز می گردد. دمای سیال خنک کننده در داخل فضای لولههای U شکل به صورت میانگین دماهای ورودی و خروجی آن در نظر گرفته می شود

$$T_{\rm pr} = \frac{1}{\gamma} (T_{\rm SG} + T_{\rm Pro}) \tag{1}$$

با فرض این که خنک کنندهی اولیه سرعت و فشار ثابتی دارد، معادلهی پایستگی انرژی برای این قسمت چنین نوشته می شود

$$\begin{split} \rho_{\rm pr} V_{\rm Pr} C_{\rm Pr} &= \frac{dT_{\rm Pr}}{dt} = C_{\rm pr} W_{\rm Pr} (T_{\rm SG} - T_{\rm Pr^{\circ}}) - \\ \alpha_{\rm Pr} A_{\rm Pr} (T_{\rm Pr} - T_{\rm m}) \end{split}$$
 (Y)

که در آن، V<sub>pr</sub> ، ρ<sub>pr</sub> و C<sub>pr</sub> ، به ترتیب، چگالی، حجم و ظرفیت گرمایی ویژهی سیال خنک کنندهی اولیه، W<sub>pr</sub> نرخ جریان آن به مولد بخار، و α<sub>pr</sub> ضریب انتقال حرارت از طریق جابهجایی خنک کنندهی اولیه به لولههای فلزی، A<sub>pr</sub> و T<sub>m</sub>، به ترتیب، سطح داخلی و دمای لولههای فلزی U شکل است.

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

با توجه به این که سیال خنک کنندهی اولیه به صورت تک فاز و در شرایط زیر سرد<sup>(۲)</sup> در نظر گرفته می شود، می توان از معادلهی بولتر برای استخراج ضریب انتقال حرارت از طریق جابه جایی، م<sub>ا</sub>ستفاده کرد

$$Nu = \cdot \cdot \mathbf{Y} \mathbf{W} \operatorname{Re}^{\cdot \cdot \mathbf{A}} \operatorname{Pr}^{\cdot \cdot \mathbf{V}}$$
(\mathbf{V})

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

که در آن، A<sub>t</sub> سطح مقطع ورودی سیال خنگ کننده 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 خنک کنندهی اولیه انرژی گرمایی می گیرند که بخشی از آن صرف تغییر دمای فلزی (Tm) شده و بخش دیگر به سیال ثانویه با دمای اشباع Tsat انتقال مییابد. با فرض ظرفیت گرمایی ویژهی ثابت برای فلز که از جنس آلیاژ اینکونِل<sup>(۳)</sup> است، موازنه انرژی چنین خواهد بود

$$\rho_{\rm m}C_{\rm m}V_{\rm m}\frac{dT_{\rm m}}{dt} = \alpha_{\rm Pr}A_{\rm Pr}(T_{\rm Pr}-T_{\rm m}) - \alpha_{\rm se}A_{\rm se}(T_{\rm m}-T_{\rm sat})$$
( $\Delta$ )

که در آن، ρ<sub>m</sub> و V<sub>m</sub> به ترتیب، چگالی و حجم لولههای فلزی U شکل، و C<sub>m</sub> ظرفیت گرمایی ویژهی فلز، α<sub>se</sub> ضریب انتقال حرارت از طریق جابهجایی از لولههای فلزی به سیال ثانویه، و A<sub>se</sub> 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 می توان از رابطهی زیر استفاده کرد [۹]

$$\alpha_{se} = \frac{\exp(\mathbf{y} p / \mathbf{A} / \mathbf{v} \times \mathbf{i} \cdot \mathbf{\hat{v}})(\mathbf{T}_{m} - \mathbf{T}_{sat})}{(\mathbf{y} / \mathbf{\hat{v}})^{\mathsf{v}}} \times \mathbf{i} \cdot \mathbf{\hat{v}}$$
(9)

که در آن، P فشار بخش ثانویه برحسب پاسکال است.

# ۳.۲ پايينبر<sup>(٤)</sup> (D)

ورودی این بخش از دو قسمت تشکیل شده است که عبارت اند از: آب ورودی (Wfw) و آب برگشتی از قسمت جداکننده پس از جدا شدن از بخار. آهنگ جریان خروجی از پایین بر، W<sub>d</sub> است که با استفاده از قانون پایستگی تکانه تعیین می شود. با فرض این که آب داخل پایین بر در شرایط اشباع دمای آب تغذیه باشد معادلهی پایستگی جرم در پایین بر این است

$$\frac{A_d}{v_d} \frac{dL_d}{dt} = W_{fw} + (v - x_M)W_{sep} - W_d$$
(V)

که در آن، A<sub>d</sub> سطح جریان در پایینبر، L<sub>d</sub> سطح آب داخل پایینبر، W<sub>fw</sub> آهنگ جریان آب ورودی، v<sub>d</sub> حجم ویژه آب داخل پایینبر (که عکس چگالی آب داخل پایینبر است)، X<sub>M</sub> کیفیت بخار جریان دو فازی ممکن که به جداکننده میرسد، کیفیت بخار جریان خروجی از بالابر و ورودی به جداکننده، W<sub>sep</sub> آهنگ جریان خروجی از ناحیهی پایینبر است. معادلهی پایستگی انرژی نیز چنین است

$$rac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}}(\mathbf{M}_{\mathrm{d}}\mathbf{h}_{\mathrm{d}}) = \mathbf{h}_{\mathrm{fw}}\mathbf{W}_{\mathrm{fw}} + (\mathbf{1} - \mathbf{x}_{\mathrm{M}})\mathbf{h}_{\mathrm{f}}\mathbf{W}_{\mathrm{sep}} - \mathbf{h}_{\mathrm{d}}\mathbf{W}_{\mathrm{d}}^{(\lambda)}$$
 که در آن،  $\mathbf{M}_{\mathrm{d}}$  جرم کل آب داخل پایینبر و  $\rho_{\mathrm{d}}$  چگالی آب داخل آن است

$$\mathbf{M}_{d} = \boldsymbol{\rho}_{d} \mathbf{A}_{d} \mathbf{L}_{d} \tag{4}$$

حجم ویژهی آب داخل پایینبر (۷<sub>d</sub>) تابعی از دمای آب تغذیهی ورودی است

$$\nu_{\rm d} = \frac{d\nu_{\rm d}}{dT} T_{\rm fw} + \nu_{\rm do} \tag{(1.)}$$

$$\frac{dv_{d}}{dT} = v_{\Delta} \times v^{-\varphi}, v_{do} = \mathcal{F}_{/} v \times v^{-\varphi}$$
(11)

www.SID.ir

به علت جرم زیاد آب ورودی، مشتق زمانی v<sub>d</sub> قابل اغماض است. لذا رابطهی (۸) را می توان چنین نوشت

$$\frac{A_{d}}{v_{d}}(h_{d}\frac{dL_{d}}{dt} + L_{d}\frac{dh_{d}}{dt}) = h_{fw}W_{fw} + (1 - x_{M})h_{f}W_{sep} - h_{d}W_{d}$$
(17)

$$\mathbf{h}_{\mathrm{fw}} = \frac{d\mathbf{h}_{\mathrm{fw}}}{dT} \mathbf{T}_{\mathrm{fw}} + \mathbf{h}_{\mathrm{fwo}}, \frac{d\mathbf{L}_{\mathrm{fw}}}{dT} = \mathbf{F}_{\mathbf{f}} \times \mathbf{V}^{\mathbf{r}}, \mathbf{h}_{\mathrm{fwo}} = -\mathbf{V}_{\mathbf{f}} \times \mathbf{V}^{\mathbf{r}}$$
(19)

$$\mathbf{h}_{\rm f} = (\frac{d\mathbf{h}_{\rm f}}{d\mathbf{P}})\mathbf{P} + \mathbf{h}_{\rm fo}, \frac{d\mathbf{h}_{\rm f}}{d\mathbf{P}} = \mathbf{\Delta} \times \mathbf{1} \cdot^{-\mathbf{Y}}, \mathbf{h}_{\rm fo} = \mathbf{A}_{\rm f} \mathbf{Y} \times \mathbf{1} \cdot^{\mathbf{A}_{\rm fo}}$$
(14)

آب خروجی از پایین بر با آهنگ W<sub>d</sub> وارد این ناحیه شده و در نتیجهی گرمایی که از چرخهی اولیه دریافت می کند با عبور از اطراف لولههای U شکل به حالت مخلوط دو فازی آب – بخار درمی آید، و با نرخ جریان دو فازی در این ناحیه به صورت جداکننده می شود. جریان دو فازی در این ناحیه به صورت همگن فرض می شود که در آن نسبت سرعتهای دو فاز یکسان است. لذا با این فرض می توان حجم مخصوص و انتالپی ویژه را به صورت تابعی تک متغیره از کیفیت بخار (x) بیان نمود

$$\mathbf{v}_{s} = \mathbf{v}_{f} + \mathbf{x}\mathbf{v}_{fg}, \mathbf{v}_{fg} = \mathbf{v}_{g} - \mathbf{v}_{f} \tag{10}$$

$$\mathbf{h}_{\mathrm{s}} = \mathbf{h}_{\mathrm{f}} + \mathbf{x}\mathbf{h}_{\mathrm{fg}}, \mathbf{h}_{\mathrm{fg}} = \mathbf{h}_{\mathrm{g}} - \mathbf{h}_{\mathrm{f}} \tag{19}$$

که در آنها، ۷<sub>f</sub> و <sub>v</sub> حجم ویژهی فازهای، به ترتیب، مایع و بخار داخل ناحیهی جوشش و بالابر، <sub>k</sub> و <sub>k</sub>، به ترتیب، انتالپی ویژهی بخار و انتالپی ویژهی متوسط جریان دو فازی، در ناحیهی جوشش و بالابر و vs حجم ویژهی متوسط جریان دو فازی در ناحیهی جوشش و بالابر است.

کر کیفیت بخار به صورت خطی در ناحیهی جوشش افزایش مییابد (L≤L) و پس از ورود به بخش بالابر تا ورود به ناحیهی جداکننده ثابت میماند (L1 ≤ L7)

$$\mathbf{x}(\mathbf{L}) = \frac{\mathbf{X}_{\mathrm{M}}}{\mathbf{L}_{\mathrm{v}}} \mathbf{L} \quad \circ \le \mathbf{L} \le \mathbf{L}_{\mathrm{v}} \tag{1V}$$

$$\mathbf{x}(\mathbf{L}) = \mathbf{x}_{\mathbf{M}} \qquad \mathbf{L}_{\mathbf{y}} \langle \mathbf{L} \leq \mathbf{L}_{\mathbf{y}}$$
 (1A)

$$\overline{\mathbf{x}} = (\mathbf{1} - \frac{\mathbf{L}_{\mathbf{1}}}{\mathbf{Y}\mathbf{L}_{\mathbf{Y}}})\mathbf{X}_{\mathbf{M}} = \mathbf{K}_{\mathbf{1}}\mathbf{X}_{\mathbf{M}}$$
(14)

که در آن، L<sub>۱</sub> طول ناحیهی جوشش و L<sub>۲</sub> طول بخش بالابر است.

تغییرات v<sub>g</sub> ،v<sub>f</sub> و h<sub>fg</sub> با فشار بخار نیز مانند h<sub>f</sub> به صورت خطی در نظر گرفته می شود

$$v_{\rm f} = \frac{dv_{\rm f}}{dp} P + v_{\rm fo} \tag{(1)}$$

$$v_{g} = \frac{dv_{g}}{dp} P + v_{go} \tag{(1)}$$

$$\mathbf{h}_{\rm fg} = \frac{d\mathbf{h}_{\rm fg}}{dp} \mathbf{P} + \mathbf{h}_{\rm fgo} \tag{YY}$$

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

$$\frac{d}{dt}(v_s) = \frac{d}{dt}(v_f) + k_v v_{fg} \frac{dx_M}{dt} + k_v x_M \frac{dv_{fg}}{dt}$$
(74)

$$\frac{d\nu_{f}}{dt} = \frac{d\nu_{f}}{dp}\frac{dp}{dt}, \frac{d\nu_{fg}}{dt} = \frac{d\nu_{fg}}{dp}\frac{dp}{dt}$$
(Ya)

$$\frac{dM_{s}}{dt} = V_{s} \frac{d\rho_{s}}{dt} = V_{s} \frac{d}{dt} \left(\frac{v}{v_{s}}\right) = \frac{-V_{s}}{v_{s}^{r}} \frac{dv_{s}}{dt} \qquad (\Upsilon P)$$

$$\frac{dM_{s}}{dt} = \frac{-k_{v}V_{s}}{\nu_{s}^{v}}\nu_{fg}\frac{dx_{M}}{dt} - \frac{V_{s}}{\nu_{s}^{v}}(\frac{d\nu_{f}}{dp} + k_{v}x_{M}\frac{d\nu_{fg}}{dp})\frac{dp}{dt}$$
(YV)

جدول ۱. ضریب های فشار بخار و قسمت ثابت [۱۱]

جملهی مستقل از فشار	مشتق فشار	نماد
۱,۱×۱۰ <sup>-۳</sup>	۳٫۳×۱۰-۱۱	$\nu_{\rm f}$
۵٫۴×۱۰-۲	-٣, <u>٨×</u> ١٠ <sup>-٩</sup>	$\nu_{g}$
۲×۱۰٬	-&,*×1.**	$h_{fg}$

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

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

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\mathbf{h}_{s}\mathbf{M}_{s}) &= \frac{\mathbf{k}_{s}\mathbf{V}_{s}}{\mathbf{v}_{s}}(\mathbf{h}_{fg} - \mathbf{h}_{s}\frac{\mathbf{v}_{fg}}{\mathbf{v}_{s}})\frac{d\mathbf{x}_{M}}{dt} - \frac{\mathbf{V}_{s}}{\mathbf{v}_{s}}\\ &\left[\frac{\mathbf{h}_{s}}{\mathbf{v}_{s}}(\frac{d\mathbf{v}_{f}}{dp} + \mathbf{k}_{s}\mathbf{x}_{M}\frac{d\mathbf{v}_{fg}}{dp}) - \frac{d\mathbf{h}_{f}}{dp} - \mathbf{k}_{s}\mathbf{x}_{M}\frac{d\mathbf{h}_{fg}}{dp}\right]\frac{dp}{dt} \quad (\mathbf{Y}\mathbf{Q}) \end{aligned}$$

**۰.۲ ناحیهی محفظهی بخار (St) <sup>(۷)</sup>** نرخ جریان بخار خروجی بخش جداکننده و ورودی محفظهی بخار در شرایط اشباع، X<sub>M</sub>W<sub>sep</sub> است. معادلهی پایستگی جرم این است

$$\begin{cases} \frac{dM_{st}}{dt} = x_{M}W_{sep} - W_{st} \\ M_{st} = \rho_{g}V_{st} \end{cases}$$
$$\frac{d}{dt}(\rho_{g}V_{st}) = V_{st}\frac{d\rho_{g}}{dt} = V_{st}\frac{d\rho_{g}}{dp} \times \frac{dp}{dt} = V_{st}\frac{d\rho_{g}}{dp} \times \frac{dp}{dt} = V_{st}\frac{d}{dp}(\frac{1}{\nu_{g}})\frac{dp}{dt} = -V_{st} \times \frac{1}{\nu_{g}}\frac{d\nu_{g}}{dp}\frac{dp}{dt} \end{cases}$$
(7.)

$$\frac{V_{st}}{v_{\sigma}^{\tau}}\frac{dv_{g}}{dp}\frac{dp}{dt} = W_{st} - X_{M}W_{sep}$$
(71)

$$\mathbf{W}_{sep} = \frac{\mathbf{W}_{st}}{\mathbf{x}_{M}} - \frac{\mathbf{V}_{st}}{\mathbf{x}_{M}\mathbf{v}_{g}^{\mathsf{T}}} \frac{d\mathbf{v}_{g}}{dp} \frac{dp}{dt}$$
(**T**)

۲.۲ بخش جداکننده (Sep)

سیال ورودی به این بخش با آهنگ جریان W<sub>sep</sub> از بالابر خارج شده و به صورت دو فازی است. مقدار X<sub>M</sub>W<sub>sep</sub> به صورت بخار اشباع وارد محفظهی بخار شده و بقیه به صورت مایع اشباع به پایین بر برمی گردد.

# 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، بالابر، محفظهی بخار و پایینبر اعمال میکنیم. مختصهی I بیانگر فاصله در ابتدای مسیر جریان است. معادلهی تکانه برای این حلقه این است

$$\frac{d}{dt}\int \frac{wdl}{A} = -F \tag{(77)}$$

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

$$\begin{split} \int \frac{dl}{A} &= \underbrace{\int_{\circ}^{L_{TB}} \frac{dl}{A}}_{\circ} + \underbrace{\int_{\circ}^{L_{R}} \frac{dl}{A}}_{\circ} + \underbrace{\int_{\circ}^{L_{w}} \frac{dl}{A}}_{\circ} & (\regal{eq:product}) \\ F &= F_{f} + F_{\alpha} + F_{g} + F_{1} & (\regal{eq:product}) \\ F_{f} &= \int \frac{fW|W|}{r\rho D_{h}A^{r}} dl & (\regal{eq:product}) \\ F_{\alpha} &= \int \frac{1}{A} d(\frac{\upsilon w^{r}}{A}), \quad \upsilon = \begin{cases} \underbrace{\left[ \underbrace{1 - x^{r}}_{(1 - \alpha)} \rho_{Ls}^{r} + \frac{x^{r}}{\alpha \rho_{vs}} \right]^{-1}}_{\rho & vs} \end{bmatrix}_{r,vs}^{-1} \\ f_{\alpha} &= \int \frac{1}{A} d(\frac{\upsilon w^{r}}{A}), \quad \upsilon = \begin{cases} \underbrace{\left[ \underbrace{1 - x^{r}}_{(1 - \alpha)} \rho_{Ls}^{r} + \frac{x^{r}}{\alpha \rho_{vs}} \right]^{-1}}_{\rho & vs} \end{bmatrix}_{r,vs}^{-1} \end{split}$$

که در آن، α کسر خلأ، ρ<sub>Ls</sub> چگالی فاز مایع اشباع و P<sub>vs</sub> چگالی فاز بخار اشباع است

$$F_{g} = \int \rho g dl \tag{7A}$$

$$F_{i} = \sum_{i} \frac{K_{i} W_{i}^{\textrm{r}}}{\textrm{r} \rho_{i} A_{i}^{\textrm{r}}} = K_{sep} \upsilon_{sep}^{\prime} \frac{W_{sep}^{\textrm{r}}}{\textrm{r} A_{sep}^{\textrm{r}}} + K_{\mathrm{D}} \frac{W_{d}^{\textrm{r}}}{\textrm{r} \rho_{d} A_{d}^{\textrm{r}}} \quad (\texttt{TA})$$

که در آن، K<sub>sep</sub> و K<sub>D</sub> 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<sub>d</sub>) با ریشهی دوم اختلاف فشار ایستایی سطح آب داخل بالابر (L<sub>w</sub>) و سطح آب در پایینبر (L<sub>d</sub>) متناسب و عبارت است از:

$$\mathbf{W}_{\mathrm{d}} = \mathbf{K}_{\mathrm{d}} \sqrt{\frac{\mathbf{L}_{\mathrm{d}}}{\mathbf{v}_{\mathrm{d}}} - \frac{\mathbf{L}_{\mathrm{w}}}{\mathbf{v}_{\mathrm{f}}}} \tag{(f.)}$$

$$1 - \overline{x} = \frac{M_{f}}{M_{s}} = \frac{A_{w}L_{w}\rho_{f}}{A_{1}L_{r}\rho_{s}} \Longrightarrow L_{w} = (1 - k_{1}x_{M})\frac{v_{f}A_{1}}{v_{s}A_{w}}L_{r}$$
 (F1)

$$\mathbf{A}_{w} = \mathbf{A}_{1} - \frac{\mathbf{V}_{pr} + \mathbf{V}_{m}}{\mathbf{L}_{1}}$$
(97)

که در آن، A<sub>۱</sub> سطح مقطع بخش جداکنندهی بخار است. معادلههای (۲)، (۵)، (۷)، (۸)، (۳۲)، (۲۷)، (۲۹)، (۲۹) و (۳۱) همراه با رابطهی (۴۰) معادلههای غیرخطی حاکم بر مولد بخار هستهای را تشکیل میدهند و متغیرهای حالت موردنظر نیز عبارتاند از

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{\mathrm{pr}} \\ \mathbf{T}_{\mathrm{m}} \\ \mathbf{L}_{\mathrm{d}} \\ \mathbf{h}_{\mathrm{d}} \\ \mathbf{X}_{\mathrm{M}} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix}$$
(FT)

# 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.

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

روش کنترل حالت لغزشی با چند راهه ی لغزش پویا به منظور حل مسأله ی 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 اغتشاش های سازگار و عامل های غیرخطی برخوردار است، و یک عمل گر پویا، که در واقع نقش یک جبرانساز پویا را به منظور تطابق و همسازی با اغتشاش های ناسازگار و پایدارسازی پویایی داخلی ایفا میکند. در این روش، قانون کنترل طوری طراحی میشود که مسیرهای حالت به سمت یک چند راهه ی لغزش پویا هدایت شوند و با رسیدن مسیرهای حالت به چند راهه ی پویا، پایداری سیستم در حالت لغزش با توجه به نقش

سیستم غیرخطی و ناکمینه– فاز توصیف شده به شکل زیر را در لظر بگیرید

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

به طوری که  $\mathbf{R} = \mathbf{R}$  بردار متغیرهای حالت،  $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^n$  تابع کنترل،  $\mathbf{v} \in \mathbf{R}^n$  خروجی کنترل شده، A، b، G ماتریس های ثابت با ابعاد مناسب هستند. لازم به ذکر است  $\{\mathbf{A}, \mathbf{b}\}$  یک جفت کنترل پذیر است.  $\mathbf{R} = \mathbf{r}(\mathbf{x}, \mathbf{t})$  یک تابع برداری غیرخطی از زمان است که می توان آن را به صورت زیر در نظر گرفت

$$F(\mathbf{x},t) = F_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}) + F_{\mathbf{y}}(t) \tag{60}$$

$$\begin{cases} \left\| F_{\tau_{i}}(x) \right\| \leq N_{\tau_{i}} \| X \| \\ \left\| F_{\tau_{i}}(t) \right\| \leq N_{\tau_{i}} \end{cases}$$
(F7)

که در آن، (F<sub>1</sub>(x تابع غیرخطی سازگار، (F<sub>1</sub>(t بردار اغتشاش های هموار با ثابتهای N<sub>۱</sub> و N<sub>۱</sub> است.

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

$$u = \begin{cases} u^{+} &, \tau(x, e, t) \rangle \circ \\ u^{-} &, \tau(x, e, t) \langle \circ \end{cases}$$
(FV)

به طوری که  $\circ = (x, e, t)$  یک معادله از چند راهه ی لغزشی است که به عنوان یک عمل گر پویا بر روی بردار متغیرهای حالت (x) و خطای تعقیب خروجی ((e(t) - y(t) - y(t)) عمل می کند.  $u^{-}$  و  $u^{-}$  هر کدام تابع کنترل پیوستهای از x, t هستند که باید اهداف کنترلی زیر را بر آورده نمایند:

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

وجود حالت لغزشی در چند راههی لغزش پویا تضمین شود.

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

$$\begin{bmatrix} z_{i} \\ z_{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{i} \\ M_{r} \end{bmatrix} X, M = \begin{bmatrix} M_{i} \\ M_{r} \end{bmatrix}$$
(F9)

$$\mathbf{MB} = \begin{bmatrix} \circ \\ \mathbf{b}_{\mathbf{y}} \end{bmatrix}, \mathbf{b}_{\mathbf{y}} \neq \circ, \mathbf{MAM}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{11} \\ \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{11} \end{bmatrix} (\mathbf{\delta} \cdot)$$

$$\mathbf{MF} = \begin{bmatrix} f_{1}(t) \\ \Delta \mathbf{A}(z_{1}, z_{r}) + f_{r}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{GM}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{1} & \mathbf{G}_{r} \end{bmatrix} (\Delta 1)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_{,} = A_{,,}z_{,} + A_{,y}z_{y} + f_{,}(t) \\ \dot{z}_{,} = A_{,y}z_{,} + A_{,y}z_{y} + \Delta A(z_{,},z_{y}) + f_{,}(t) + b_{,}u \\ y = G_{,}z_{,} + G_{,y}z_{,} \end{cases}$$
(24)

$$z_{i} \in \mathbb{R}^{n-i}, z_{r} \in \mathbb{R}^{i}, b_{r} \neq 0$$

مجازی، در اولین قدم از طراحی کنترل حالت لغزش پویای مطلوب برای سیستم موردنظر، چند راههی لغزش پویا به صورت زیر ارایه میشود

$$\tau = \mathbf{Z}_{\mathbf{x}} + \boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\circ} \tag{2F}$$

به طوری که تابع **o** به عنوان یک عمل گر پویا طراحی می شود و پارامتر اصلی و مهم در طراحی، چند راهه ی لغزش پویا است که نقش پایدارساز پویایی های ناپایدار داخلی را برعهده دارد. در این مقاله یک چهار چوب مناسب برای طراحی عمل گرهای پویای مبتنی بر مدل و با استفاده از بازخورد خروجی برای سیستم های ناکمینه ی فاز با حداقل متغیرهای قابل اندازه گیری ارایه شده است که می تواند کمک شایانی به حل مسایل مربوط به این نوع راه بُرد کنترلی نماید و از این روش نیز به منظور طراحی کنترل حالت لغزش پویای مولدهای بخار هسته ای استفاده می شود.

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 لیاپانوف به صورت زیر است [۱۴]

$$\tau \dot{\tau} \leq -\rho |\tau|, \rho \rangle \circ \tag{(23)}$$

با فرض این که حالت لغزشی برای سیستم تعریف شده در رابطهی (۵۲) بر روی چند راههی لغزش پویا وجود داشته باشد، معادلههای حرکت سیستم بر روی چند راههی مذکور به صورت زیر در میآید

$$\begin{cases} \dot{Z}_{1} = A_{1,1}Z_{1} - A_{1,2}\sigma + f_{1}(t) \\ y = G_{1}Z_{1} - G_{2}\sigma \end{cases}$$
 (59)

سیستم تعریف شده به وسیلهی معادلهی (۵۶) که وضعیت سیستم اصلی در شرایط حالت لغزشی بر روی چند راههی لغزش پویا را نشان میدهد، با ورودی کنترل مجازی σ و خروجی ۷، یک سیستم کماکان ناکمینه- فاز است. حال به منظور ایجاد پایداری داخلی و تعقیب کامل خروجی به وسیلهی سیستم (۵۲) بر روی چند راههی لغزشی (۵۴)، تابع σ به عنوان یک عمل گر پویا طراحی می شود.

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

$$V = KZ_{\lambda} + \alpha q$$
 (av)

به طوري که

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{1} & \mathbf{k}_{1} \cdots \mathbf{k}_{n-1} \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{e} = \mathbf{y}_{d} - \mathbf{y} \qquad (\Delta A)$$

با توجه به معادلهی (۵۸)، پویایی سیستم میتواند به صورت زیر بیان شود

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_{,} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{,,,} & \circ \\ -G_{,} & \circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{,} \\ q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{,,,} \\ -G_{,} \end{bmatrix} \sigma + \begin{bmatrix} \circ \\ v \end{bmatrix} y_{d} + \begin{bmatrix} I \\ \circ \end{bmatrix} f_{,}(t) \quad (\Delta q)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{A}_{,,} \\ A_{,,,} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \circ \\ b_{,} \end{bmatrix} x_{d} \quad (\Delta q) \quad (\Delta q)$$

$$\overline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1,1} & \circ \\ -\mathbf{G}_{1,1} & \circ \end{bmatrix}, \quad \overline{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{1,1} \\ -\mathbf{G}_{1,1} \end{bmatrix}$$
(\$.)

در نتیجه، ماتریس  $R=[k, \alpha]$  برای جایابی مقادیر ویژه ماتریس  $\overline{A}-\overline{B}R$  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  $\overline{T}$  به صورت زیر به دست آورد

$$\mathbf{R} = \left[\overline{\beta}_{n} - \overline{\alpha}_{n} \middle| \overline{\beta}_{n-1} - \overline{\alpha}_{n-1} \middle| \overline{\beta}_{n-1} - \overline{\alpha}_{n-1} \cdots \beta_{n-1} \cdots \beta_{n-1} \right] \cdot (\overline{T})^{-1} \quad (\pounds \mathbf{N})$$

به طوریکه <u></u>G<sub>i</sub> , i = ۱ : n چندجملهای مطلوب به شرح زیر هستند

$$\overline{P}(s) = s^{n} + \overline{\beta}_{i} s^{n-i} + \dots + \overline{\beta}_{n} = 0$$
(9Y)

فستند (۵۹) مستند مشخصه و رابطه 
$$\overline{\alpha}_i$$
 ,  $i = 1: n$ 

$$\left| sI - \overline{A} \right| = s^{n} + \overline{\alpha}_{, s}^{n-1} + \dots + \overline{\alpha}_{n} = 0$$
 (94)

ماتریس تبدیل  $\overline{\mathbf{T}}$  به وسیلهی رابطهی  $\overline{\mathbf{T}}=\overline{\mathbf{C}}.\overline{\mathbf{W}}$  تعیین میشود، به طوری که،

$$\overline{\mathbf{C}} = \left[\overline{\mathbf{B}} \mid \overline{\mathbf{A}} \, \overline{\mathbf{B}} \mid \overline{\mathbf{A}}^{\mathsf{T}} \, \overline{\mathbf{B}} \dots \overline{\mathbf{A}}^{n-\mathsf{r}} . \overline{\mathbf{B}}\right] \tag{9}$$

$$\overline{\mathbf{W}} = \begin{bmatrix} \overline{\alpha}_{n-\mathsf{r}} & \overline{\alpha}_{n-\mathsf{r}} & \cdots & \overline{\alpha}_{\mathsf{r}} & \mathsf{r} \\ \overline{\alpha}_{n-\mathsf{r}} & \overline{\alpha}_{n-\mathsf{r}} & \cdots & -\mathsf{r} & \circ \\ \overline{\alpha}_{\mathsf{r}} & & \cdots & \circ & \circ \\ -\mathsf{r} & & \cdots & \circ & \circ \\ -\mathsf{r} & & \cdots & \circ & \circ \\ \end{array} \tag{9}$$

در روش جایابی قطب فرض بر این است که کلیهی متغیرهای حالت، قابل اندازه گیری و در دسترس هستند، اما در عمل چنین نیست و همهی متغیرها در دسترس نیستند. لذا برای تخمین متغیرهای غیر قابل اندازه گیری نیاز به طراحی رؤیت گر است، در این قسمت به منظور حذف متغیرهای حالت از معادلهی (۵۷) و استفاده از بازخورد خروجی، یک تابع تبدیل از خطای تعقیب به متغیرهای حالت ارایه می شود. با قرار دادن رابطهی (۵۷) در معادلهی پویای سیستم در حالت لغزش و با حذف اغتشاش ناساز گار (f<sub>1</sub>(t) از آن، می توان نوشت

$$\dot{Z}_{1} = (A_{11} - A_{12}K)Z_{1} - A_{12}\alpha q \qquad (99)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \mathbf{v} & \circ & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \circ & \circ & \frac{\mathbf{A}_{d}}{\mathbf{v}_{d}} & \circ & \circ & \mathbf{m}_{\mathbf{r}\mathbf{r}\mathbf{r}} \\ \circ & \circ & \frac{\mathbf{h}_{d}\mathbf{A}_{d}}{\mathbf{v}_{d}} & \frac{\mathbf{V}_{d}}{\mathbf{v}_{d}} & \circ & \mathbf{m}_{\mathbf{r}\mathbf{r}} \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \mathbf{m}_{\mathbf{s}\mathbf{s}} & \mathbf{m}_{\mathbf{s}\mathbf{r}} \\ \circ & \circ & \circ & \circ & \mathbf{m}_{\mathbf{s}\mathbf{s}} & \mathbf{m}_{\mathbf{s}\mathbf{r}} \end{bmatrix}$$
(VY)

$$m_{r_{\vec{r}}} = x_r \frac{V_{st}}{\upsilon_g^r} \left(\frac{d\upsilon_g}{dp}\right)$$
(VT)

$$m_{rs} = x_r h_f(\frac{V_{st}}{\upsilon_g^r})(\frac{d\upsilon_g}{dp})$$
(Yf)

$$m_{\rm ab} = \frac{-K_{\rm v}V_{\rm s}}{\upsilon_{\rm s}^{\rm r}}\upsilon_{\rm fg} \tag{V\Delta}$$

$$m_{\rm ap} = \frac{-V_{\rm s}}{\upsilon_{\rm s}^{\rm r}} \left(\frac{d\upsilon_{\rm f}}{dp} + K_{\rm v} x_{\rm m} \frac{d\upsilon_{\rm fg}}{dp}\right) \tag{V9}$$

$$m_{_{F\delta}} = \frac{K_{_{1}}V_{_{s}}}{\upsilon_{_{s}}}(h_{_{fg}} - h_{_{s}}\frac{\upsilon_{_{fg}}}{\upsilon_{_{s}}})$$
(VV)

$$m_{\text{FF}} = \frac{-V_s}{\upsilon_s} \left[ \frac{h_s}{\upsilon_s} \left( \frac{d\upsilon_f}{dp} + k_y x_M \frac{d\upsilon_{fg}}{dp} \right) - \frac{dh_f}{dp} - K_y x_M \frac{dh_{fg}}{dp} \right] (VA)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{17} & \circ & \circ & \circ & \circ \\ \alpha_{71} & \alpha_{77} & \circ & \circ & \circ & \alpha_{75} \\ \circ & \circ & \alpha_{77} & \circ & \alpha_{75} & \alpha_{75} \\ \circ & \circ & \alpha_{57} & \alpha_{75} & \alpha_{75} \\ \circ & \circ & \alpha_{57} & \alpha_{57} & \alpha_{55} & \alpha_{55} \\ \circ & \alpha_{57} & \alpha_{57} & \alpha_{55} & \alpha_{55} \end{bmatrix}$$
(Y4)

$$\alpha_{\text{i}} = \frac{-\Upsilon C_{\text{pr}} - W_{\text{pr}} - \alpha_{\text{pr}} A_{\text{pr}}}{\rho_{\text{pr}} V_{\text{pr}} C_{\text{pr}}} \tag{A*}$$

$$\alpha_{\nu\nu} = \frac{\alpha_{\rm pr} A_{\rm pr}}{\rho_{\rm pr} V_{\rm pr} C_{\rm pr}} \tag{A1}$$

$$\alpha_{\rm r_1} = \frac{\alpha_{\rm pr} A_{\rm pr}}{\rho_{\rm m} V_{\rm m} C_{\rm m}} \tag{AY}$$

$$(\mathbf{sI} - \mathbf{A}_{11} + \mathbf{A}_{12}\mathbf{K})\mathbf{Z}_{1}(\mathbf{s}) = -\mathbf{A}_{12}\mathbf{\alpha}\mathbf{Q}(\mathbf{s})$$

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

$$Z_{\gamma}(s) = -\left[(sI - A_{\gamma\gamma} + A_{\gamma\gamma}K)^{-\gamma}A_{\gamma\gamma}G\right]\frac{E(s)}{s} \quad (A)$$

$$\sigma(s) = \left[-K(sI - A_{11} + A_{12}K)^{-1}A_{12}\alpha + \alpha\right]\frac{E(s)}{s} \quad (99)$$

 ییاده سازی کنترل حالت لغزش پویای مبتنی بر بازخورد خروجی بر روی مدل غیرخطی مولدهای بخار هسته ای

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

$$M\dot{x} = Ax + Bu + Wd + Nz \tag{(V.)}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{T}_{pr} \\ \delta \mathbf{T}_{m} \\ \delta \mathbf{L}_{d} \\ \delta \mathbf{h}_{d} \\ \delta \mathbf{x}_{M} \\ \delta \mathbf{p} \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \delta \mathbf{W}_{fw}, \mathbf{d} = \delta \mathbf{W}_{st}, \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{T}_{sG} \\ \delta \mathbf{T}_{fw} \end{bmatrix}$$
(V1)

www.SID.ir

$$\alpha_{ro} = \frac{W_{st}}{x_{M}^{r}} h_{f} + h_{d} \left(\frac{K_{d}}{r} \left(\frac{L_{d}}{\upsilon_{d}} - \frac{L_{w}}{\upsilon_{f}}\right)^{-\frac{1}{r}} \left(\frac{V_{s}}{A_{w}\upsilon_{s}}\right) \left[1 + K_{v}(1 - x_{M})\frac{\upsilon_{fg}}{\upsilon_{s}}\right]$$
(4A)

$$\begin{cases} \alpha_{ss} = h_{d} \frac{k_{d}}{r} \left(\frac{L_{d}}{\upsilon_{d}} - \frac{L_{w}}{\upsilon_{f}}\right)^{-\frac{1}{r}} \left[\frac{V_{s}}{A_{w}} \left(\frac{1 - x_{M}}{\upsilon_{s}^{*}}\right) \left(\frac{d\upsilon_{f}}{dp} + K_{s} x_{M} \frac{d\upsilon_{g}}{dp}\right)\right] \\ -\left[\frac{W_{st}}{x_{M}} \left(\frac{dh_{f}}{dp} + x_{M} \frac{dh_{fg}}{dp}\right) + \alpha_{se} A_{se} \frac{dT_{sat}}{dp}\right]$$
(99)

 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \circ \\ \circ \\ 1 \\ h_{fw} \\ \circ \\ \circ \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W} = \begin{vmatrix} \circ \\ \mathbf{X}_r \\ \mathbf{X}_r h_f \\ \frac{-1}{\mathbf{X}_M} \\ \frac{-(h_f + \mathbf{X}_M h_{fg})}{\mathbf{X}_M} \end{vmatrix}$ 

n,,

 $\mathbf{N} = \begin{vmatrix} \circ & n_{\tau\tau} \\ \circ & n_{\tau\tau} \\ \circ & n_{\varsigma\tau} \end{vmatrix}$ 

ماتریس های N،W،B نیز عبارتاند از

 $(\mathbf{1}\cdots)$ 

 $(1 \cdot 1)$ 

(1.7)

$$\alpha_{\rm vv} = \frac{-(\alpha_{\rm pr}A_{\rm pr} + \alpha_{\rm se}A_{\rm se})}{\rho_{\rm m}V_{\rm m}C_{\rm m}} \tag{AT}$$

$$\alpha_{\rm rs} = \alpha_{\rm se} A_{\rm se} \frac{dT_{\rm sat}}{dp} \tag{A4}$$

$$\alpha_{\tau\tau} = \frac{-k_{\rm d}}{\tau} \left( \frac{L_{\rm d}}{\upsilon_{\rm d}} - \frac{L_{\rm w}}{\upsilon_{\rm f}} \right)^{-\frac{1}{\tau}} \frac{1}{\upsilon_{\rm d}}$$
(A5)

$$\alpha_{\tau s} = \frac{-k_d}{\tau} \left( \frac{L_d}{\upsilon_d} - \frac{L_w}{\upsilon_f} \right)^{-\frac{1}{\tau}} \left( \frac{V_s}{A_w \upsilon_s} \right) \left[ 1 + K_{\tau} (1 - x_M) \frac{\upsilon_{fg}}{\upsilon_s} \right] - \frac{W_{st}}{x_M^{\tau}}$$
(A9)

$$\alpha_{\text{re}} = \frac{-K_{d}}{r} \left(\frac{L_{d}}{\upsilon_{d}} - \frac{L_{w}}{\upsilon_{f}}\right)^{-\frac{1}{r}} \left(\frac{V_{s}}{A_{w}\upsilon_{s}^{r}}\right)(r - x_{M})\left(\frac{d\upsilon_{f}}{dp} + K_{v}x_{M}\frac{d\upsilon_{g}}{dp}\right) \quad (AV)$$

$$\alpha_{rr} = -h_{d} \frac{K_{d}}{r} \left( \frac{L_{d}}{r} - \frac{L_{w}}{\upsilon_{f}} \right)^{\frac{1}{r}} \frac{\upsilon_{d}}{\upsilon_{d}}$$
(AA)

$$\alpha_{**} = -W_{d} \tag{A9}$$

$$\alpha_{rs} = \frac{-h_f W_{st}}{x_M^r} - h_d \frac{k_d}{r} \left(\frac{L_d}{\upsilon_d} - \frac{L_w}{\upsilon_f}\right)^{-\frac{1}{r}} \left(\frac{V_s}{A_w \upsilon_s} \left[1 + K_v (1 - x_M) \frac{\upsilon_{fg}}{\upsilon_s}\right]\right) \quad (\mathbf{q} \cdot \mathbf{)}$$

$$\alpha_{**} = x_r W_{st} \frac{dh_f}{dp} - \frac{h_d k_d}{\gamma} (\frac{L_d}{\upsilon_d} - \frac{L_w}{\upsilon_f})^{-\frac{1}{\gamma}} (\frac{V_s}{A_w}) (\frac{1 - x_M}{\upsilon_s^*}) (\frac{d\upsilon_f}{dp} + K_v x_M \frac{d\upsilon_g}{dp}) (\mathbf{41})$$

$$\alpha_{a\tau} = \frac{k_d}{\tau} \left( \frac{L_d}{\upsilon_d} - \frac{L_w}{\upsilon_f} \right)^{-\frac{1}{\tau}} \left( \frac{1}{\upsilon_d} \right)$$
(47)

$$\alpha_{\mathfrak{s}\mathfrak{s}} = \frac{W_{\mathfrak{s}\mathfrak{t}}}{x_{\mathfrak{M}}^{\mathsf{r}}} + \frac{k_{\mathfrak{d}}}{\mathfrak{r}} \left(\frac{L_{\mathfrak{d}}}{\upsilon_{\mathfrak{d}}} - \frac{L_{\mathfrak{w}}}{\upsilon_{\mathfrak{f}}}\right)^{-\frac{1}{\mathsf{r}}} \frac{V_{\mathfrak{s}}}{A_{\mathfrak{w}}\upsilon_{\mathfrak{s}}} \left[1 + K_{\mathfrak{s}}(1 - x_{\mathfrak{M}})\frac{\upsilon_{\mathfrak{f}\mathfrak{g}}}{\upsilon_{\mathfrak{s}}}\right] \quad (\mathbf{q}\mathbf{r})$$

$$\alpha_{ss} = \frac{k_d}{\gamma} \left( \frac{L_d}{\upsilon_d} - \frac{L_w}{\upsilon_f} \right)^{-\frac{1}{\gamma}} \left( \frac{V_s}{A_w} \left( \frac{1 - x_M}{\upsilon_s^{\gamma}} \right) \left( \frac{d\upsilon_f}{dp} + K_y x_M \frac{d\upsilon_g}{dp} \right) \right) \quad (\mathbf{qs})$$

$$\alpha_{\rm sy} = \alpha_{\rm se} A_{\rm se} \tag{90}$$

$$\alpha_{\mathfrak{sr}} = h_{d} \frac{k_{d}}{\mathfrak{r}} \left( \frac{L_{d}}{\upsilon_{d}} - \frac{L_{w}}{\upsilon_{f}} \right)^{-\frac{1}{\mathfrak{r}}} \left( \frac{\mathfrak{r}}{\upsilon_{d}} \right)$$
(99)

$$\alpha_{\rm PF} = W_{\rm d} \tag{9V}$$

 $n_{sr} = \frac{-K_d}{r} \left(\frac{L_d}{\upsilon_d} - \frac{L_w}{\upsilon_f}\right)^{-\frac{1}{r}} \frac{L_d}{\upsilon_d^*} \left(\frac{d\upsilon_d}{dT}\right)$ (1.4)

 $n_{\text{i}\text{i}} = \frac{\boldsymbol{\gamma} C_{\text{pr}} W_{\text{pr}}}{\rho_{\text{pr}} V_{\text{pr}} C_{\text{pr}}}, \ n_{\text{rv}} = \frac{K_d}{\boldsymbol{\gamma}} \left(\frac{L_d}{\upsilon_d} - \frac{L_w}{\upsilon_f}\right)^{-\frac{1}{\boldsymbol{\gamma}}} \frac{L_d}{\upsilon_d} \left(\frac{d\upsilon_d}{dT}\right)$ 

 $n_{\star\star} = W_{fw} \frac{dh_{fw}}{dT} + h_d \frac{K_d}{\star} \left(\frac{L_d}{\upsilon_d} - \frac{L_w}{\upsilon_f}\right)^{-\frac{1}{\tau}} \frac{L_d}{\upsilon_d^{\tau}} \left(\frac{d\upsilon_d}{dT}\right)$ 

$$n_{_{\text{FT}}} = -h_{_{d}} \frac{K_{_{d}}}{r} \left(\frac{L_{_{d}}}{\upsilon_{_{d}}} - \frac{L_{_{w}}}{\upsilon_{_{f}}}\right)^{-\frac{1}{r}} \frac{L_{_{d}}}{\upsilon_{_{d}}^{r}} \left(\frac{d\upsilon_{_{d}}}{dT}\right)$$
(1.5)

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

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} + \mathbf{W} \mathbf{d} + \mathbf{N} \mathbf{z} \\ \mathbf{y} = \mathbf{c} \mathbf{x}, \, \mathbf{c} = \begin{bmatrix} \cdots \cdots \end{bmatrix}$$
(1.9)

www.SID.ir

لازم به ذکر است که نماد δ تغییرات متغیرهای حالت ارایه شده نسبت به شرایط حالت پایا<sup>(۱۱۱)</sup> است که مربوط به یک سطح توان کاری مشخص نیروگاه هستهای است.

ابتدا دستگاه معادلههای (۱۰۶) باید به شکل دستگاه استاندارد (۵۲) ارایه می شد، برای این منظور یک صافی پایین گذر در مسیر پیشخور بین کنترل کننده و مولد بخار در نظر گرفته شد که با توجه به اندازه گیری نادقیق در توانهای پایین و امکان اشتباه حس گرها در اندازه گیری جریان توانهای پایین و قابلیت اطمینان پایین آنها، استفاده از صافیهای پایین گذر توانست مفید واقع شود. با توجه به استفاده از این نوع صافی، بین آهنگ جریان آب تغذیهی ورودی به مولد بخار (۱) و آهنگ جریان آب تغذیه به عنوان علامت خروجی از کنترل کننده (۵) رابطهی زیر برقرار بود

$$= -\mathbf{u} + \mathbf{u}_{c} \tag{1.V}$$

بنابراین، مدل سیستم همراه با در نظر گرفتن پویایی صافی. (۱۰۷)، به صورت زیر ارایه شد

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{u}_{c} + \hat{\mathbf{W}}\mathbf{d} + \hat{\mathbf{N}}\mathbf{z} \\ \mathbf{y} = \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{x}} \end{cases}$$
(1.4)

به طوري که

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}' & \mathbf{B}' \\ \circ & -\mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \circ \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{W}} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}' \\ \circ \end{bmatrix}$$

$$\hat{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \circ \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{N}} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}' \\ \circ \end{bmatrix}$$

$$(\mathbf{1} \cdot \mathbf{4})$$

$$u_{c} = \begin{cases} u_{c}^{+} , \tau(x,e,t) \rangle \circ \\ u_{c}^{-}, \tau(x,e,t) \langle \circ \end{cases}$$
(111)

که در آن، (x,e,t و t برای ایجاد حرکت روی و uc و uc 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

$$\tau = \sigma + u \tag{11Y}$$

که در آن تابع <del>۵</del> 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

$$u_{c} = -U_{max} \operatorname{sign} \left( \tau \right) \tag{117}$$

برای جلوگیری از نوسان<sup>(۱۱)</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].

 $u_{c} = -U_{max} \tanh(\tau/\phi)$ 

که در آن، \$ پهنای لایهی مرزی حول چندراههی لغزش پویا است. با اعمال علامت کنترلی فوق و با فرض وجود حالت لغزش

روی چندراههی لغزش پویای ۲، معادلهی حرکت لغزشی سیستم روی چندراههی لغزش پویا به صورت زیر بود

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{B} \mathbf{\sigma} + \mathbf{W} \mathbf{d} + \mathbf{N} \mathbf{z} \\ \mathbf{y} = \mathbf{c} \mathbf{x}, \mathbf{c} = \begin{bmatrix} \cdots \cdots \end{bmatrix}$$
(110)

$$\sigma = kx + \alpha q \tag{119}$$

ù

به طوري که،

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{1} & \mathbf{k}_{2} & \mathbf{k}_{3} & \mathbf{k}_{4} \end{bmatrix}$$
(11V)

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}' & \circ \\ -\mathbf{C} & \circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{B}' \\ \circ \end{bmatrix} \mathbf{\sigma} + \begin{bmatrix} \circ \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \mathbf{y}_{d} + \begin{bmatrix} \mathbf{w}' \\ \circ \end{bmatrix} \mathbf{d} + \begin{bmatrix} \mathbf{N}' \\ \circ \end{bmatrix} \mathbf{z} \qquad (\mathbf{N} \mathbf{A})$$

قابل ذکر است که زوج {A´, B´} یک زوج کنترل پذیر است و از اینرو زوج {A, B} در (۱۱۸) نیز یک زوج کنترل پذیر است، به طوری که،

$$\overline{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}' & \circ \\ -\mathbf{C} & \circ \end{bmatrix}, \ \overline{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}' \\ \circ \end{bmatrix}$$
(119)

در نتیجه، ماتریس  $[R = [k \alpha] + R$ برای جایابی مقادیر ویژه ی ماتریس  $\overline{A} - \overline{B}R$ ، مطابق با رابطه ی (۹۱) طراحی شد. لازم به ذکر است روش جایابی قطب بر پایه ی انتگرال زمانی قدر مطلق خطا (I.T.A.E)<sup>(۱۱)</sup> به منظور تعیین ماتریس R در جبرانساز پویا استفاده شد. پس از تعیین ماتریس R، عمل گر پویا مطابق تابع تبدیل (۹۱) به صورت زیر در ساختار چندراهه ی لغزش (۱۱۲) قرار گرفت:

$$\sigma(s) = \left[ -k(sI - A' + B'k)^{-1}B'\alpha + \alpha \right] \frac{E(s)}{s}$$
(17.)

در ادامه نتایج حاصل از اعمال کنترل حالت لغزش پویای مبتنی بر بازخورد خروجی برای کنترل مولد بخار هستهای فلیپسبر<sup>گ(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، ارایه می شود.

## ٥. نتايج

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

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

همچنین کنترل حالت لغزش پویای طراحی شده براساس مدل خطی آیروینگ در توان ٪۸۰ اسمی، بر مدل غیر خطی اعمال شد. شکلهای ۸ و ۹ کارآیی کنترل حالت لغزش پویای مبتنی بر بازخورد خروجی بر پایهی مدل آیروینگ را با کنترل طراحی شده بر مبنای مدل غیر خطی، مقایسه می کنند. همان طور که مشاهده می شود میزان فراجهش<sup>(۵۱)</sup> و زمان نشست<sup>(۹۱)</sup> تغییرات مطح آب مولد بخار ناشی از اعمال کنترل طراحی شده بر مبنای مدل غیر خطی کم تر از مقادیر متناظر آن با اعمال کنترل بر مبنای مدل آیروینگ است و علامت کنترل (تغییرات نرخ جریان آب نتایج حاصل از اعمال کنترل طراحی شده بر مبنای مدل غیر خطی بیان گر برتری و مناسب تر بودن آن نسبت به مدل آیروینگ به لحاظ کارآیی و عملکرد کنترل کننده است.

# ۲. 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 ۸. مقایسهی تغییرات سطح آب مولد بخار بر مبنای مدل آیروینگ و



شکل ۹. مقایسهی تغییرات نرخ جریان آب تغذیه بر پایهی مدل آیروینگ و مدل غير خطى ارايه شده.

#### D-STGN شبیه ساز 1.٦

مدل غير خطي ارايه شده.

شبیهساز مولد بخار هستهای D-STGN که هستهی مرکزی آن یک نرم افزار کامپیوتری توسعه یافته برای شبیهسازی رفتار پویای یک مولد بخار عمودی با لولههای U شکل است و توسط شرکت اِدیس(۱۸) طراحی شده است، توانایی شبیهسازی رفتار پویا و پیش بینی مشخصه های کارکردی مولد بخار در شرایط گذار (۱۹) 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 توربين يا رآكتور از مدار را نيز فراهم مينمايد.

به منظور شبیهسازی مولد بخار این آخری به تعدادی ناحیه به عنوان حجم کنترل تقسیمبندی و قوانین پایستگی ترمودینامیکی در هر كدام 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 تقسيم بندي اين بود :

- بخش اولیّه به سه ناحیه، مجرای ورودی<sup>(۲۰)</sup> خنک کننده، مجراي خروجي<sup>(۲۱)</sup> خنک کننده و ناحيهي لولههاي U شکل تقسیمبندی شد. دمای خنک کننده، فشار و نرخ جریان، شرایط مرزی بخش اول هستند که به عنوان ورودیهای شىيەساز تعريف 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 می شد عبارت بودند از: دمای آب تغذیه (T<sub>fw</sub>)، آهنگ جریان آب تغذیه (W<sub>fw</sub>) و نرخ جریان بخار خروجی از محفظهی بخار (W<sub>st</sub>). جریان در ناحیهی جوشش و بالابر به صورت دو فازي (آب-بخار) و در سایر نواحی تکفاز فرض شد. همچنین در تمام ناحیههای بخش اولیه، سیال خنگ کنندهی اولیه در شرایط زیر سرد قرار داشت.



شکل ۱۰. مدل سازی مولد بخار هسته ای به صورت ۷ حجم کنترل در دو بخش.



**شکل 11.** تغییرات نرخ جریان بخار خروجی و دمای سیال خنک کنندهی ورودی در جریان حادثهی خروج ناخواستهی یک مجتمع میلهی کنترل.



شکل ۱۲. تغییرات نرخ جریان آب تغدیه با زمان.

۲.۲ حادثهی خروج ناخواستهی یک مجتمع میلهی کنترل<sup>(۳۳)</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 (s) t=۷۲ رآکتور و به دنبال آن توربین از مدار خارج شدند. شرایط مرزی وابسته به زمان این حادثه در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

# ۳.٦ 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>(۳۳)</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 کنترل کنندهی ورودی به شبیه ساز اعمال شد. نتایج حاصل از این کنترل کننده در شکل های ۱۲ تا ۱۸ ارایه 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 میلی متر لحاظ شده است و شرایط اولیهی سطح آب مولد بخار نیز معادل ۱۰/۱۲ متر تعیین شده است.





۲. جمع بندی و نتیجه گیری

پىنوشتھا

- 1. Dynamic Analysis of a STeam GeNerator
- Y. Sub-Cold
- ۳. Inconel
- F. Down-Comer
- ۵. Tube Bundle
- 9. Riser
- V. Steam-Dome
- A. Steam-Separator
- Zero-Dynamics
- **\.** Feedback Linearization
- 11. Steady-State
- ۱۲. Chattering
- ۱۳. Integration of Time with the Absoulute Magnitude of the Error
- ۱۴. Philipsburg 2(FRG)
- ۱۵. Overshoot
- ۱۶. Settling-Time
- v. Main Yankee
- ۱۸. Edis.Co
- ۱۹. Transient-Situations
- ۲۰. Inlet Plenum
- ۲۱. Outlet-Plenum
- YY. Uncontrolled Withdrawal of a Control Element Assembly
- ۲۳. Full-Power

یک چهارچوب مناسب برای طراحی عمل گرهای پویای مبتنی بر مدل با استفاده از بازخورد خروجی برای سیستمهای ناکمینهی فاز با حداقل متغیرهای قابل اندازه گیری به عنوان یک کاربرد مهم و عملی از چهارچوب ارایه شده برای طراحی کنترل کنندههای حالت لغزش پویا، از آن برای کنترل سطح آب مولد بخار در یک نیرو گاه هستهای به عنوان یک سیستم ناکمینهی فاز پیچیده که به علت نوار وسیع جریانهای موجود اعم از جریان بخار و جریان آب تغذیه، معمولاً حس گرهای استفاده شده به اندازهی کافی مطالعه، یعنی مولدهای بخار هستهای و راستی آزمایی کنترل کننده یک مدل غیرخطی براساس قوانین ترمودینامیکی و پایستگی هستهای ارایه 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 راستی آزمایی 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 مین یانکی در جریان حادثهی مربوط به خروج یک مجتمع میلهی کنترل بر روی شبیه ساز D-STGN استفاده شد. نتایج به دست آمده با استفاده از مشخصات نیروگاه هستهای مین یانکی در شرایط توان اسمی ۲۰۰۴ نیروگاه، بیان گر کارآیی مناسب کنترل کنندهی ارایه شده و برآورد شرایط پایداری و مناسب بودن و اعتبار مدل غیر خطی ارایه شده برای طراحی کنترل کننده را نیز نشان می دهد.

### مرجعها

- 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.
- 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.
- 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 stabilityguaranteed neurofuzzy logic controller for nuclear steam generators, Nuclear Engineering and Design, 166 (1996) 17-29.
- 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. lsidori, 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).
- 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).