مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۴۸-۳۷

مدل‌سازی غیرخطی درام - بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان و کنترل سطح درام به ویژه در شرایط تریپ

محمد مقصودی[۱]، ابراهیم سالاری زاده[۲]، میثم یحیی‌زاده[۳]، ملیحه مغفوری[۴]، حسن فاتحی مرج[۵]

[۱] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکاترونیک، گروه برق، دانشگاه ولیعصر(عج) رفسنجان، mechatronic.arshad@gmail.com

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کنترل، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان، ebrahim.salarizadeh@gmail.com

[۳] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه ولیعصر(عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران، Yahyazadeh@vru.ac.ir

[۴] استاد، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، mmaghfoori@uk.ac.ir

[۵] استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه ولیعصر(عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران، H.Fatehi@vru.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۰۹ ویرایش: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۳

چکیده: روش‌های مختلفی برای تولید نیرو از جمله نیروگاه‌های سیکل ترکیبی وجود دارد. در یک واحد بویلر نیروگاه، متغیرهای زیادی وجود دارد اما فشار و به‌ویژه سطح درام از متغیرهای بسیار مهم می‌باشند و لازم است که سیستم کنترل آن را در محدوده امن قرار دهد. هدف از این مقاله، کاهش نوسان‌های سطح درام نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان و به‌طور خاص کنترل سطح درام در شرایط بحرانی و تریپ می‌باشد. در این مقاله ابتدا درام فشار بالا نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان مدل‌سازی و تحلیل دقیق می‌شود. سپس منطق کنترلی سطح درام نیروگاه تحلیل و اصلاحاتی جهت بهبود این منطق انجام می‌شود و نتایج به‌طور عملی با هم مقایسه می‌شوند. در منطق جدید از یک حلقه کنترل داخلی (PI) برای خطای حاصل از بخار خروجی و آب ورودی به درام و یک حلقه کنترل خارجی (PID) برای خطای سطح استفاده شده و فشار نیز برای تخمین دقیق‌تر، محدود کردن آب ورودی به درام و شرایط حفاظتی، استفاده شده است. در واقع منطق جدید کنترل سری با اندازه‌گیری چهار المان برای تخمین آب ورودی به درام می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که منطق جدید نوسان‌های سطح درام نیروگاه کرمان را کاهش می‌دهد و هنگام تریپ واحد، سطح درام را به‌خوبی در محدوده امن نگه می‌دارد.

کلمات کلیدی: کنترل سطح درام بویلر، نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان، کنترل سری (چهار المانه)، کنترل‌کننده PID

Nonlinear Modelling of Kerman Combined Cycle Power Plant Drum-Boiler and Drum Level control especially in trip conditions

Mohammad Maghsoudi, Ebrahim Salarizadeh, Meisam Yahyazadeh

Malihe Maghfoori, Hassan Fatehi Marj

Abstract: There are various methods of power generation such as combined cycle power plants. There are many variables in a power plant boiler unit, but the most important variables are Pressure and specially drum level that control system should be put it in the safe range. The purpose of this article is, modifying the oscillatory behavior of the drum level of Kerman combined cycle power plant and especially control of drum level in trip conditions. At first in this article, high pressure drum boiler of Kerman combined cycle power plant is modeled and analyzed. Then drum level control logic of power plant is analyzed and modifications are being made to improve this logic and the results are compared in practice. In the new logic, a control loop (PI) is used for the error signal of the output steam and the input water to the drum and a control loop (PID) for the level error signal and for more accurate estimation, limiting the drum input water and protective conditions, drum pressure signal is used. In fact the new logic is cascade control by measuring four elements for estimating the input water to the drum. The results show that the new logic reduces the Kerman power plant drum boiler level oscillations and keeps the drum level in the safe range very well in trip conditions.

Keywords: drum boiler level control, Kerman Combined Cycle Power Plants, cascade control (four element), PID controller

نویسنده عهده دار مکاتبات: محمد مقصودی

به دلیل تغییرات صورت گرفته در اسامی نویسندگان، مقاله با اصلاحات نویسندگان مجدد بارگذاری شده است.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]

۱- مقدمه

با توجه به رشد زیاد صنایع در زمینه‌های مختلف و افزایش جمعیت، تقاضا برای تولید نیرو افزایش پیدا کرده است. روش‌های مختلفی برای تولید نیرو از جمله نیروگاه‌های سیکل ترکیبی (بخار و گاز) وجود دارد. نیروگاه سیکل ترکیبی باعث افزایش چشم‌گیر راندمان نسبت به عملکرد جداگانه نیروگاه‌های گاز یا بخار، عملکرد اقتصادی بهتر، برطرف کردن نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از گازهای خروجی از نیروگاه‌های گازی و به‌طور کلی استفاده بهینه از منابع شده است [۱]. با توجه به افزایش و کاهش سریع بار در شبکه سراسری، لازم است که نیروگاه‌ها به‌طور سریع به این تغییرات پاسخ دهند. یک راه مناسب برای تحقق این امر این است که سیستم‌های کنترل به‌خوبی طراحی شوند. اگر مدل عملی و دقیق از سیستم‌های مد نظر داشته باشیم، می‌توانیم دینامیک‌های اساسی سیستم را بهتر شناسایی کنیم و این امر جهت طراحی کنترل‌کننده به مهندسین کمک شایانی می‌کند. در [۱] مدل غیرخطی و کاملاً عملی از درام بویلر پیشنهاد شده که بر اساس اصول فیزیکی، شناسایی سیستم، داده‌های تجربی و تعداد کمی پارامتر به‌دست آمده است که مربوط به داده‌های فیزیکی درام بویلر می‌باشند. در [۲] از مدل [۱] استفاده کرده و مدلی پیچیده برای توزیع آب و بخار داخل درام پیشنهاد شده به‌طوری که حجم مایع درام را به بخار بالای سطح، بخار زیر سطح درام و آب (مایع) تقسیم کرده اما این مدل دارای پیچیدگی زیادی می‌باشد به‌همین دلیل مورد توجه پژوهش‌گرها قرار نگرفته است. در [۳] مقایسه‌ای بین مدل غیرخطی و مدل به‌دست آمده با استفاده از شبکه عصبی انجام شده و نتایج نشان داده که در شرایط غیر نرمال مدل غیرخطی دینامیک اساسی درام بویلر را به‌خوبی نشان می‌دهد. در [۴] مدل غیرخطی برای بویلر یک بار گذر پیشنهاد شده است اما بویلر نیروگاه کرمان از نوع درام‌دار و بازیافت عمودی می‌باشد.

در [۵] برای کنترل سطح درام از کنترل مد لغزشی استفاده شده و نتایج با کنترل با روش H_∞ مقایسه شده است. در [۶] از منطق فازی برای تغییر ضرایب کنترل‌کننده PID استفاده شده است. در [۷] از کنترل مد لغزشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای کنترل سطح آب درام بویلر کشتی[1] استفاده شده است اما هیچ‌کدام از این کارها دارای مدل عملی نمی‌باشند. در [۸] پس از به‌دست آوردن فضای خطی درام بویلر، یک روئیت‌گر مقاوم H_∞ مد لغزشی برای تخمین حالت‌ها با وجود عدم قطعیت و آشوب‌ها طراحی کرده است. در [۹] پس از به‌دست آوردن فضای خطی مدل از کنترل مد لغزشی مرتبه دو برای کنترل سطح درام استفاده شده است. در [۱۰] که دارای مدل عملی می‌باشد و به [۱] ارجاع داده از کنترل تک المانه برای کنترل سطح درام استفاده شده است اما کنترل تک المانه نمی‌تواند در شرایط کاری مختلف سطح درام را به‌خوبی کنترل نماید.

در منطق فعلی نیروگاه کرمان از یک کنترل‌کننده برای کنترل سطح درام استفاده می‌شود و این موضوع باعث ایجاد نوسان در سطح درام، بهم ریختگی سطح در شرایط تریپ واحد و تریپ بویلر ناشی از سطح در شرایط بحرانی می‌شود. در این مقاله مدل غیرخطی درام بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان انجام می‌شود که از بخش‌های قابل توجه این مقاله می‌باشد. این بویلرها ساخت کشور کره جنوبی می‌باشند که با همکاری شرکت مپنا در ایران راه‌اندازی شده‌اند. در بخش کنترل سطح درام نیز از دو حلقه کنترل داخلی و خارجی به‌طور سری[2] با اندازه‌گیری چهار المان که شامل سیگنال آب ورودی، بخار خروجی، خطای سطح و فشار درام برای تخمین دقیق آب ورودی به درام جهت اصلاح سطح استفاده شده است که از نقاط برجسته این مقاله می‌باشد. به‌دلیل اینکه اکثر نیروگاه‌ها از جمله نیروگاه کرمان از کنترل‌کننده PID استفاده می‌شود در نتیجه از همین کنترل‌کننده برای ایجاد دو حلقه کنترل داخلی و خارجی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط بحرانی سطح درام نیروگاه به‌خوبی کنترل می‌شود و از فعال شدن شرایط حفاظتی و تریپ ناشی از نوسان شدید سطح جلوگیری می‌شود و همچنین در شرایط تریپ، سطح درام را در محدوده امن نگه می‌دارد. در [۱۱] کنترل سری به روش جدول‌بندی بهره برای سطح درام-بویلر بررسی شده است.

۲- نیروگاه کرمان

شکل (۱) نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان را نشان می‌دهد [۱۱]. نیروگاه کرمان با توان اسمی معادل (MW) ۱۹۱۲ دارای ۸ واحد گازی که هرکدام با توان اسمی (MW) ۱۵۹ و ۴ واحد بخار که هرکدام با توان اسمی (MW) ۱۶۰ می‌باشد که هر واحد بخار دارای دو بویلر بازیاب حرارت[3] از نوع عمودی و ساخت دوسان کره جنوبی می‌باشند که شرکت مپنا مجری نصب و راه‌اندازی آن در ایران می‌باشد. بخار خروجی از دو بویلر که هر بویلر شامل دو درام فشار بالا و فشار پایین و درام هوازدا می‌باشد، به یک توربین بخار منتقل می‌شود. بخار خروجی از درام فشار بالا و فشار پایین به ترتیب پس از سه و یک مرحله سوپرهیت شدن به توربین‌ها منتقل می‌شود. در فصل‌های سرد از گازوئیل و در فصل‌های گرم از گاز در واحد گازی استفاده می‌شود و خنک‌سازی بخار نیز به‌وسیله ۱۲۸ فن که در سمت چپ شکل (۱-الف) نشان داده شده، انجام می‌شود. واحد گازی و بویلر دارای دودکش مجزا می‌باشند تا در مواقعی که بویلر در مدار نیست، بتوان واحد گازی را به‌طور جداگانه راه‌اندازی کرد. لازم به ذکر است که plc های نیروگاه از نوع زیمنس S5 ساخت کشور آلمان می‌باشند.

شکل (۱-ب) حلقه درام بویلر گردش طبیعی[4] را نشان می‌دهد. آب از مخزن ذخیره وارد درام می‌شود و از لوله‌های پایین‌رونده پایین می‌رود و در لوله‌های تحت حرارت به ترکیب آب و بخار تبدیل شده و سپس از

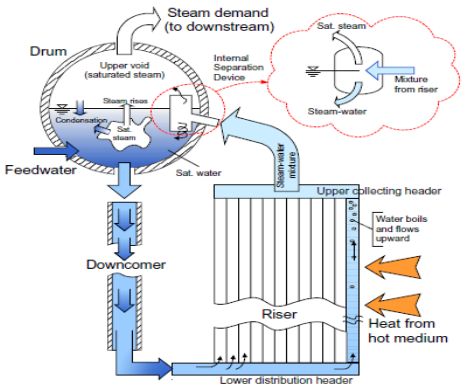
[1] Boiler Ship
[2] Cascade
[3] Heat Recovery Steam Generator
[4] Natural Circulation

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]

لوله‌های بالابرنده وارد درام می‌شود. بخار از سطح درام خارج می‌شود و به سوپرهیترها و توربین بخار منتقل می‌شود و آب مجددا از لوله‌های پایین-برنده پایین می‌رود و این گردش طبیعی ادامه پیدا می‌کند.



شکل ۱- الف: واحد گازی، بویلر و خنک‌کنندگی



شکل ۱-ب: حلقه درام-بویلر گردش طبیعی

شکل ۱: نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان

۳- مدل‌سازی درام-بویلر

در [۱] مدل غیرخطی برای درام بویلر پیشنهاد شده است. مدل‌های [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]نشان می‌دهد که این مدل چگونه توسعه یافته است که در نهایت آن را یک مدل کامل نامیدند که پدیده تورم و جمع شدگی[1] زیر سطح را به‌خوبی نشان می‌دهد. در [۱۱] و [۱۲] یک مدل ساده از درام بررسی شده که فشار درام و حجم کل آب سیستم به‌عنوان مدل مرتبه دو درام بویلر می‌باشند. در [۱۳] دینامیک لوله‌های بالابرنده و درام نیز به مدل افزوده شده است که در واقع مدل مرتبه سه و چهار درام می‌باشد و مدل ارایه شده در [۱] اصلاح شده این مدل است. در این مقاله از مدل [۱] استفاده و درام بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان مدل‌سازی شده است.

۳-۱ مدل مرتبه دو درام بویلر

اغلب رفتار سیستم درام بویلر توسط روابط تعادل جرم و انرژی قابل بیان است. ورودی‌های سیستم شامل حرارت ورودی به بویلر (Q)، جریان آب ورودی (q_f) و جریان بخار خروجی از درام (q_s) می‌باشند. خروجی-های سیستم شامل فشار (p) و سطح درام (L) می‌باشد. برای نوشتن روابط دینامیکی سیستم متغیرهای حجم (V)، چگالی(ρ)، انرژی داخلی (u)، آنتالپی (h) و دما (T) تعریف شده‌اند. همچنین اندیس‌های s، w، f و m به ترتیب بیانگر بخار، آب، آب ورودی به درام و فلز می‌باشند. در برخی روابط از دو زیرنویس استفاده شده که (t) بیانگر کل سیستم، (d) بیانگر درام و (r) بیانگر لوله‌های بالابرنده می‌باشد. کل جرم محفظه فلزی و درام (m_t) و ظرفیت گرمایی فلز (C_p) می‌باشد.

موازنه جرم کلی سیستم با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d}{dt}\left[\rho_s V_{st}+\rho_w V_{wt}\right]=q_f-q_s \qquad (۱)$$

موازنه انرژی کلی سیستم با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d}{dt}\left[\rho_s u_s V_{st}+\rho_w u_w V_{wt}+m_t C_p t_m\right] =Q+q_f h_f-q_s h_s \qquad (۲)$$

از آن‌جایی که انرژی درونی $u=h-\frac{p}{\rho}$ می‌باشد در نتیجه موازنه انرژی کلی برابر است با:

$$\frac{d}{dt}\left[\rho_s h_s V_{st}+\rho_w h_w V_{wt}-pV_t+m_t C_p t_m\right] =Q+q_f h_f-q_s h_s \qquad (۳)$$

جایی که (V_{st}) و (V_{wt}) معرف حجم کل بخار[2] و حجم کل آب[3] سیستم می‌باشند. حجم کل سیستم برابر با (V_t) است.

$$V_t=V_{st}+V_{wt} \qquad (۴)$$

با ترکیب معادله‌های (۱)، (۳) و (۴) مدل مرتبه دو سیستم با معادله (۵) بیان می‌شود. طبیعی است که فشار به‌عنوان یک متغیر در نظر گرفته شود. با توجه به جدول اشباع بخار، متغیرهای (ρ_s)، (ρ_w) ، (h_s) و (h_w) به وسیله تابعی از فشار بخار بیان می‌شوند. متغیر دیگر نیز حجم کل آب سیستم می‌باشد. مدل مرتبه دو سیستم شامل فشار درام و حجم کل آب سیستم با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} e_{21}\frac{dV_{wt}}{dt}+e_{22}\frac{dp}{dt}&=Q+q_f h_f-q_s h_s \\ e_{11}\frac{dV_{wt}}{dt}+e_{12}\frac{dp}{dt}&=q_f-q_s \end{aligned} \qquad (۵)$$

[1] Swelling and Shrinkage
[2] Total Steam Volume
[3] Total Water Volume

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]

که در آن ضرایب نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned}
e_{11} &= \rho_w - \rho_s \\
e_{12} &= V_{wt}\frac{\partial \rho_w}{\partial p} + V_{st}\frac{\partial \rho_s}{\partial p} \\
e_{21} &= \rho_w h_w - \rho_s h_s \\
e_{22} &= V_{wt}\left(h_w\frac{\partial \rho_w}{\partial p} + \rho_w\frac{\partial h_w}{\partial p}\right) \\
&\quad + V_{st}\left(h_s\frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s\frac{\partial h_s}{\partial p}\right) \\
&\quad - V_t + m_t C_p\frac{\partial t_s}{\partial p}
\end{aligned} \qquad (۶)$$

۳-۲ مدل مرتبه سه درام بویلر

انتقال جرم و انرژی بین آب و بخار به وسیله‌ی کندانس و تبخیر اساسی‌ترین نکته در مدل‌سازی می‌باشد. متغیر سوم کیفیت جرمی بخار خروجی از لوله‌های بالابرنده (α_r) می‌باشد. موازنه جرمی برای لوله‌های بالابرنده به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d}{dt}(\bar{\alpha}_V \rho_s V_r + \rho_w(1-\bar{\alpha}_V)V_r) = q_{dc} - q_r \qquad (۷)$$

($\bar{\alpha}_V$) متوسط کسر حجمی بخار در بالابرنده‌ها، (q_r) جریان جرمی خروجی از لوله‌های بالابرنده و (q_{dc}) جریان جرمی ورودی به لوله‌های پایین برنده می‌باشد. موازنه انرژی برای لوله‌های بالابرنده نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned}
&\frac{d}{dt}\left(\rho_s h_s \bar{\alpha}_v V_r + \rho_w h_w(1-\bar{a}_v)V_r - pV_r + m_r C_p t_s\right) \\
&= Q + q_{dc} h_w - (\alpha_r h_c + h_w) q_r
\end{aligned} \qquad (۸)$$

برای گردش اجباری[1] میزان جریان لوله‌های پایین‌برنده متغیر قابل کنترل است اما برای یک بویلر جریان طبیعی میزان جریان در حال گردش به وسیله تغییر چگالی مایع درون لوله‌های بالابرنده و لوله‌های پایین‌برنده می‌باشد. موازنه ممنتوم برای لوله‌های بالابرنده و پایین‌برنده به‌صورت زیر تعرف می‌شود:

$$(L_r + L_{dc})\frac{dq_{dc}}{dt} = (\rho_w - \rho_s)\bar{\alpha}_v V_r\, g - \frac{k}{2}\frac{q_{dc}^2}{\rho_w A_{dc}}$$

که در این معادله (k) ضریب اصطکاک ابعاد، (L_r) و (L_{dc}) طول لوله‌های بالابرنده و پایین‌برنده و (A_{dc}) سطح مقطع لوله‌های پایین‌برنده است. جریان جرمی در گردش با معادله زیر بیان می‌شود:

$$q_{dc}^2 = \frac{2\rho_w A_{dc}(\rho_w - \rho_S)\,g\,\bar{\alpha}_V V_r}{k} \qquad (۹)$$

با ترکیب معادله جرمی (۶) و انرژی (۷) برای لوله‌های بالابرنده و ساده‌سازی، معادله مربوط به متغیر سوم با معادله زیر بیان می‌شود.

$$e_{32}\frac{dp}{dt} + e_{33}\frac{da_r}{dt} = Q + a_r h_c q_{dc} \qquad (۱۰)$$

که در آن ضرایب به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned}
e_{32} &= \left(\rho_w\frac{\partial h_w}{\partial p} + \alpha_r h_c\frac{\partial \rho_w}{\partial p}\right)(1-\bar{\alpha}_V)V_r \\
&\quad + \left((1-\alpha_r)h_c\frac{\partial \rho_s}{\partial p} + \rho_s\frac{\partial h_s}{\partial p}\right)\bar{\alpha}_V V_r \\
&\quad + \left(\rho_s + (\rho_W - \rho_s)\alpha_r\right)h_c V_r\frac{\partial \bar{\alpha}_V}{\partial p} \\
&\quad - V_r + m_r C_p\frac{\partial t_s}{\partial p} \\
e_{33} &= \left((1-\alpha_r)\rho_s + \alpha_r\rho_W\right)h_c V_r\frac{\partial \bar{\alpha}_V}{\partial \alpha_r}
\end{aligned} \qquad (۱۱)$$

جریان جرمی در لوله‌های بالابرنده نیز با استفاده از موازنه جرم و انرژی در معادله‌های (۶) و (۷) و کمی ساده‌سازی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned}
q_r &= q_{dc} - V_r\left(\bar{\alpha}_V\frac{\partial \rho_s}{\partial p} + (1-\bar{a}_v)\frac{\partial \rho_s}{\partial p} + (\rho_w - \rho_s)\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial p}\right)\frac{dp}{dt} \\
&\quad + (\rho_w - \rho_s)V_r\frac{\partial \bar{\alpha}_v}{\partial \alpha_r}\frac{d\alpha_r}{dt}
\end{aligned} \qquad (۱۲)$$

۳-۳ مدل مرتبه چهار درام بویلر

پدیده فیزیکی داخل درام پیچیده است. بخار از چندین لوله بالابرنده از درام خارج می‌شود و آب ورودی به ترتیب پیچیده‌ای وارد درام می‌شود. آب می‌تواند از لوله‌های پایین‌برنده پایین رود و بخار نیز از شیر بخار خارج می‌شود. به این ترتیب متغیر چهارم نیز حجم بخار زیر سطح درام (V_{sd}) می‌باشد. آب زیر سطح مایع[2] (V_{wd}) و نرخ جریان بخار خروجی از سطح مایع (q_{sd}) می‌باشد. موازنه جرمی برای بخار زیر سطح مایع با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d}{dt}(\rho_s V_{sd}) = \alpha_r q_r - q_{sd} - q_{cd} \qquad (۱۳)$$

جریان کندانس داخل درام (q_{cd}) می‌باشد که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$q_{cd} = \frac{h_w - h_{fw}}{h_c}q_f + \frac{1}{h_c}\begin{pmatrix}\rho_s V_{sd}\dfrac{\partial h_s}{\partial_P} + \rho_w V_{wd}\dfrac{\partial h_w}{\partial_P} \\ (-V_{sd} + V_{wd})\dfrac{dp}{dt} + m_d C_p\dfrac{\partial t_s}{\partial_P}\end{pmatrix} \qquad (۱۴)$$

بخار خروجی از سطح مایع نیز به وسیله اختلاف چگالی آب و بخار و ممنتوم جریان ورودی به درام به‌صورت زیر استخراج می‌شود:

$$q_{sd} = \frac{\rho_s}{T_d}(V_{sd} - V_{sd}^0) + \alpha_r q_{dc} + \alpha_r\beta(q_{dc} - q_r) \qquad (۱۵)$$

[1] Force Circulation

[2] Volume of the Water and Steam under the liquid level

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]

که (V_{sd}^{0}) نشان دهنده حجم بخار داخل درام در شرایط فرضی[1] که کندانس در درام وجود ندارد و (T_d) زمان نشست بخار داخل درام است. حجم آب داخل درام نیز به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$V_{wd} = V_{wt} - V_{dc} - (1-\bar{\alpha}_v)V_r \qquad (۱۶)$$

درام یک هندسه خاصی دارد و رفتار خطی را می‌توان با سطح مرطوب (A_d) در سطح کاری نرمال به دست آورد. انحراف سطح درام از عملکرد نرمال درام استخراج می‌شود که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$l = \frac{V_{Wd}+V_{Sd}}{A_d}, l_w = \frac{V_{wd}}{A_d}, l_s = \frac{V_{sd}}{A_d} \qquad (۱۷)$$

با موازنه جرمی بخار زیر سطح در معادله (۱۳) و با ترکیب معادله‌های (۱۲)، (۱۴) و (۱۵) که به ترتیب دبی جرمی در گردش لوله‌های بالابرنده، نرخ کندانس داخل درام و نرخ بخار خروجی از سطح درام می‌باشند، معادله مربوط به متغیر چهارم به‌صورت بیان می‌شود:

$$e_{42}\frac{dp}{dt} + e_{43}\frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44}\frac{dV_{sd}}{dt} = \frac{\rho_s}{T_d}\left(V_{sd}^{0} - V_{sd}\right) + \frac{h_f - h_w}{h_c}q_f \qquad (۱۸)$$

که ضرایب به‌صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\begin{aligned} e_{42} &= V_{sd}\frac{\partial\rho_s}{\partial p} + \frac{1}{h_c}\left(\rho_s V_{sd}\frac{\partial h_s}{\partial p} + \rho_W V_{Wd}\frac{\partial h_w}{\partial p} - V_{sd} - V_{Wd} + m_d C_p\frac{\partial t_s}{\partial p}\right) \\ &\quad + \alpha_r(1+\beta)V_r\left(\bar{\alpha}_V\frac{\partial\rho_s}{\partial p} + (1-\bar{\alpha}_V)\frac{\partial\rho_W}{\partial p} + (\rho_s-\rho_W)\frac{\partial\bar{\alpha}_V}{\partial p}\right) \\ e_{43} &= \alpha_r(1+\beta)(\rho_s-\rho_W)V_r\frac{\partial\bar{\alpha}_V}{\partial\alpha_r} \\ e_{44} &= \rho_s \end{aligned} \qquad (۱۹)$$

۳-۴ مدل کلی

مدل مرتبه چهار درام شامل فشار درام (p)، حجم کل آب (V_{wt})، کیفیت جرمی بخار خروجی از بالابرنده‌ها (α_r) و حجم بخار زیر سطح مایع (V_{sd}) به‌طور کلی در معادله (۲۰) بیان شده و ضرایب e_{11} تا e_{44} نیز در معادله‌های (۶)، (۱۱) و (۱۹) ارایه شده است.

$$\begin{aligned} e_{11}\frac{dV_{wt}}{dt} + e_{12}\frac{dp}{dt} &= q_f - q_s \\ e_{21}\frac{dV_{wt}}{dt} + e_{22}\frac{dp}{dt} &= Q + q_f h_f - q_s h_s \\ e_{32}\frac{dp}{dt} + e_{33}\frac{da_r}{dt} &= Q + a_r h_c q_{dc} \\ e_{42}\frac{dp}{dt} + e_{43}\frac{d\alpha_r}{dt} + e_{44}\frac{dV_{sd}}{dt} &= \frac{\rho_s}{T_d}\left(V_{sd}^{0} - V_{sd}\right) + \frac{h_f - h_w}{h_c}q_f \end{aligned} \qquad (۲۰)$$

برای تعریف خواص ترمودینامیکی آب از برنامه (XSTEAM) که خواص ترمودینامیکی آب بر اساس استاندارد (IAPWS IF-97) تعریف شده، استفاده شده است.

این کدها از سایت (MATH WORK) قابل دانلود می‌باشند.

۳-۵ شرایط اولیه سیستم

یک راه مناسب برای پیدا کردن مقادیر اولیه شرایط کاری سیستم این است که ابتدا یک مقدار برای جریان آب ورودی به درام و فشار درام در نظر بگیریم. سپس جریان بخار خروجی از درام، حرارت ورودی به سیستم و حجم بخار زیر سطح درام از معادله (۲۱) به‌دست می‌آید. اگر معادله (۲۱) برقرار باشد، سیستم همیشه در حالت تعادل خواهد بود.

$$\begin{aligned} q_f &= q_s \\ Q &= q_s h_s - q_f h_{fw} \\ Q &= q_{dc}\alpha_r h_c \\ V_{sd} &= V_{sd}^{0} - \frac{T_d(h_w - h_f)}{\rho_s h_c}q_f \end{aligned} \qquad (۲۱)$$

با استفاده از نرخ جریان در گردش در معادله (۹)، کیفیت جرمی بخار خروجی از لوله‌های بالابرنده نیز با حل همزمان معادله غیرخطی زیر به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned} Q &= \alpha h_c\sqrt{\frac{2\rho_w A_{dc}(\rho_w - \rho_S)g\bar{\alpha}_V V_r}{k}} \\ \bar{\alpha}_v &= \frac{\rho_W}{\rho_W - \rho_s}\left(1 - \frac{\rho_s}{(\rho_W - \rho_s)\alpha_r}\ln\left(1 + \frac{\rho_W - \rho_s}{\rho_s}\alpha_r\right)\right) \end{aligned} \qquad (۲۲)$$

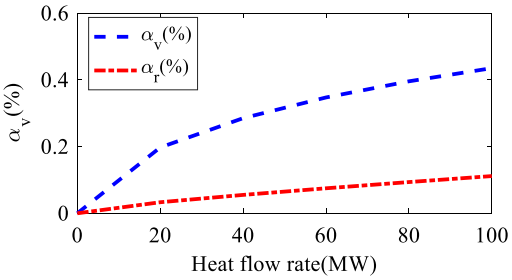
معادله (۲۲) نسبت حجمی بخار $(\bar{\alpha}_V)$ را به‌عنوان یک تابع از انتقال حرارت ورودی (Q) تعیین می‌کند. این تابع که نتایج آن در شکل(۲) نشان داده شده است یک بینش خوبی از پدیده تورم و جمع شدگی را به ما نشان می‌دهد.

منحنی نشان می‌دهد که در بارهای پایین، تغییرات کوچکی در حرارت ورودی باعث ایجاد تغییرات بزرگی در نسبت حجمی بخار می‌شود. به‌عنوان مثال در نیروگاه کرمان اگر به هر دلیلی دایورتر دمپر بسته شود و توان ورودی (حرارت) از (MW) ۱۰۰ به (MW) ۶۰ کاهش یابد، نسبت حجمی بخار ۰.۰۸۷ کاهش پیدا می‌کند در صورتی که اگر توان ورودی از (MW) ۸۰ به (MW) ۴۰ کاهش یابد، نسبت حجمی بخار ۰.۱۱ کاهش پیدا می‌کند. این نتیجه نشان می‌دهد که در صورت تغییر حرارت ورودی، تغییرات نسبت حجمی در بار بالا کمتر از زمانی است که بویلر در بار پایین قرار دارد. در واقع این شکل نشان می‌دهد که پدیده تورم و جمع‌شدگی در بارهای پایین، شدیدتر از بارهای بالا می‌باشد و از لحاظ

[1] Volume of the Steam in hypothetical situation

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]

کنترلی نیز اثبات می‌شود که کنترل کردن سطح درام در بار بالا به مراتب آسان‌تر از بار پایین می‌باشد.



شکل ۲: ارتباط نسبت حجمی بخار با حرارت ورودی

۳-۶ شرایط اولیه سیستم

با استفاده از اسناد مرتبط با بویلرهای نیروگاه کرمان و محاسبات مربوط به تعداد لوله‌ها، ابعاد و ضخامت آن‌ها، داده‌های فیزیکی درام بویلر نیروگاه کرمان با جدول (۱) بیان می‌شود. پس از در نظر گرفتن آب ورودی، بخار خروجی و فشار درام از روی داده‌های عملی نیروگاه، مدل درام بویلر نیروگاه کرمان به‌دست آمده است. جدول (۲) داده‌های ورودی و مقادیر حالت تعادل درام بویلر را نشان می‌دهد.

جدول(۱): داده‌های فیزیکی درام بویلر نیروگاه کرمان

کمیت	واحد	مقدار
حجم درام(v_d)	(m^3)	۳۰.۲۴
حجم لوله‌های بالابرنده(v_r)	(m^3)	۲۱.۰۴
حجم لوله‌های پایین‌برنده (v_{dc})	(m^3)	۶.۵۶
وزن درام(m_d)	(kg)	۶۶۳۰۰
وزن لوله‌های بالابرنده(m_r)	(kg)	۹۹۲۲۷.۳۲
وزن کل(m_t)	(kg)	۱۸۵۷۶۴.۲۶
سطح مقطع لوله پایین‌برنده(A_{dc})	(m^2)	۰.۱۱۷۸

جدول(۲): ورودی‌ها و شرایط تعادل درام بویلر

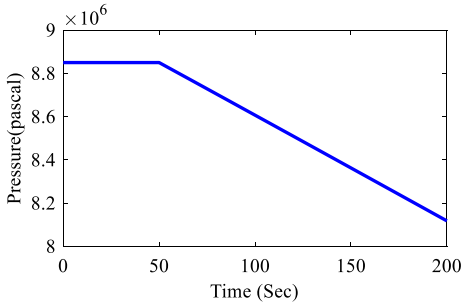
کمیت	واحد	مقدار
آب ورودی (q_f)	(kg/s)	۶۰
بخار خروجی (q_s)	(kg/s)	۶۰
حرارت ورودی(Q)	(MW)	۸.۵۷
فشار درام (P)	Bar	۸۸.۵
حجم بخار زیر سطح (V_{sd})	m^3	۵.۰۶
حجم کل آب (V_{wt})	m^3	۲۹.۱۸
کیفیت جرمی بخار (α_r)	-	۰.۱۰۲

٤- پاسخ حلقه باز سیستم به ورودی پله

برای نشان دادن رفتار غیرخطی درام بویلر نیروگاه کرمان می‌توان ورودی‌های بخار، حرارت ورودی به بویلر و بخار خروجی از درام را تغییر داد و دینامیک سیستم را تحلیل کرد. نیروگاه‌های سیکل ترکیبی پس از راه‌اندازی در بار نامی قرار می‌گیرند و معمولاً بسته شدن دایورتر دمپر و به‌دنبال آن کاهش حرارت ورودی به بویلر، از دلایل تریپ واحد می‌باشد در نتیجه پاسخ حلقه باز سیستم درام بویلر نیروگاه کرمان به ازای کاهش پله حرارت ورودی به بویلر معادل (MW) ۱۰ نشان داده شده است. ورودی پله در زمان ۵۰ ثانیه به سیستم اعمال می‌شود و پاسخ‌ها تحلیل می‌گردد.

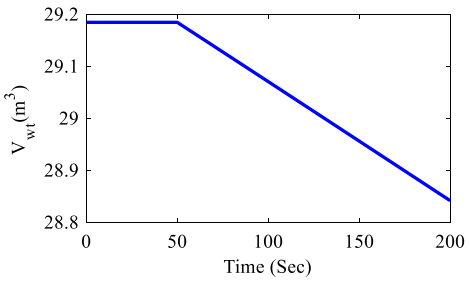
شکل (۳-الف) فشار درام را نشان می‌دهد که به‌دلیل کاهش حرارت ورودی به بویلر و ثابت بودن بخار خروجی از درام، فشار کاهش پیدا کرده است. شکل (۳-ب) حجم کل آب سیستم را نشان می دهد که به‌دلیل کاهش فشار و در نتیجه افزایش تبخیر، کاهش پیدا می‌کند. شکل (۳-پ) کیفیت جرمی بخار خروجی از لوله‌های بالابرنده را نشان می‌دهد که به‌دلیل کاهش سریع فشار، ابتدا سریع کاهش پیدا می‌کند سپس این کاهش به آرامی انجام می‌شود. شکل (۳-ت) حجم بخار زیر سطح درام را نشان می‌دهد. به‌دلیل کاهش فشار و افزایش تبخیر در نتیجه حجم بخار زیر سطح درام افزایش پیدا می‌کند.

شکل (۳-ث) جریان جرمی لوله‌های بالابرنده و پایین‌برنده را نشان می‌دهد. به‌دلیل کاهش خطی و سریع فشار، ابتدا جریان لوله‌های بالابرنده به‌سرعت کاهش پیدا می‌کند و همچنین جریان لوله‌های پایین‌برنده نیز کاهش پیدا می‌کند سپس بعد از این شرایط گذرا جریان لوله‌های بالابرنده افزایش پیدا می‌کند تا با جریان لوله‌های پایین‌برنده برابر شود. شکل (۳-ج) تغییرات سطح درام را نشان می‌دهد. در معادله (۱۷) نشان داده شد که سطح درام برابر با جمع سطح آب و سطح بخار می باشد در نتیجه پاسخ سطح درام پیچیده و بستگی به ترکیب دینامیک آب و بخار دارد. کاهش بخش اول سطح به‌دلیل افت فشار و کاهش حجم آب سیستم می‌باشد که در واقع سطح درام مرتبط با آب کاهش پیدا کرده است. سپس سطح افزایش پیدا می‌کند زیرا حجم بخار افزایش پیدا کرده است.

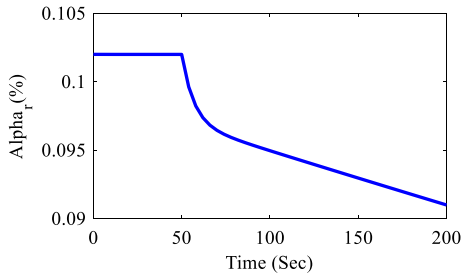


شکل ۳-الف: فشار درام

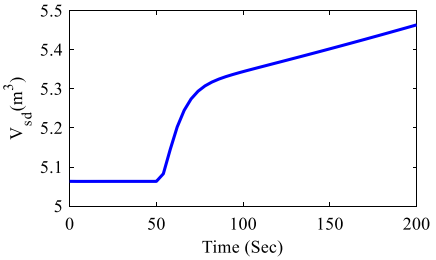
[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]



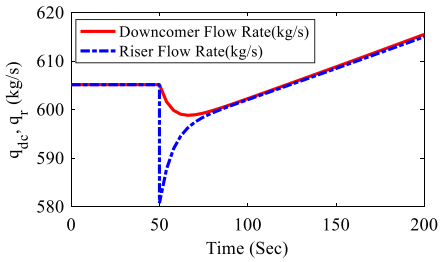
شکل ۳-ب: حجم کل آب



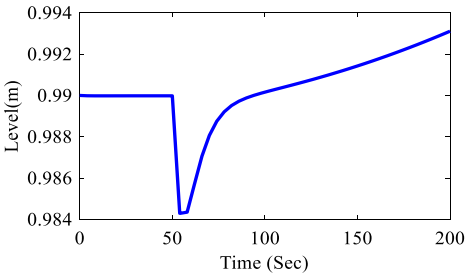
شکل ۳-پ: کیفیت جرمی بخار خروجی از لوله‌های بالابرنده



شکل ۳-ت: حجم بخار زیر سطح درام



شکل ۳-ث: جریان لوله‌های بالابرنده و پایین‌برنده



شکل ۳-ج: سطح درام

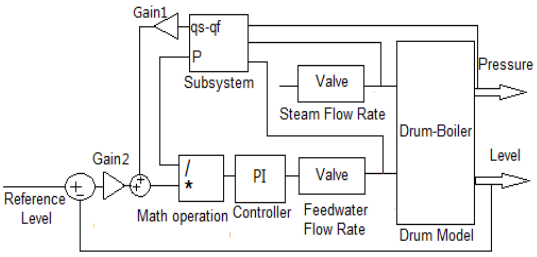
شکل ۳: پاسخ ورودی پله به ازای کاهش حرارت ورودی به بویلر معادل ۱۰ MW

۵- منطق فعلی کنترل سطح درام نیروگاه کرمان

در [۱۰] کنترل تک المانه برای سطح درام نیروگاه بخار بررسی شده است. سطح درام با سطح مرجع مقایسه می‌شود و سیگنال خطا به شیر کنترل آب ورودی به درام اعمال می‌شود. به‌دلیل پدیده تورم و جمع-شدگی سطح درام که در شرایط مختلف کاری به وجود می‌آید و اندازه-گیر سطح نمی‌تواند تخمین دقیقی از سطح داشته باشد در نتیجه می‌توان گفت این نوع کنترل‌کننده از نظر عملی منسوخ شده است. در [۱۰]کنترل سه المانه برای سطح درام نیروگاه بخار بررسی شده است. با افزایش ۵ (kg/s) بخار خروجی از درام، شیر آب ورودی به درام با نرخ انتقال آب ۵۰ (kg/s) به‌طور کامل بسته شده و سپس به‌سرعت باز شده و به (kg/s) ۷۰ رسیده است که این پاسخ‌های شدید شیر برای افزایش ۵ (kg/s) آب ورودی به درام جهت اصلاح سطح، هیچ‌گونه توجیه عملی نداشته و در چنین شرایطی در نیروگاه احتمال خرابی شیر وجود دارد. برای کنترل فشار نیز، فشار انتهای سوپرهیتر (فشار روی شیر بخار ورودی به توربین) با فشار مرجع مقایسه می‌شود و سیگنال خطا جهت افزایش یا کاهش حرارت مشعل‌ها جهت کنترل فشار انجام می‌شود. در [۱۴] کنترل سه المانه برای سطح درام نیروگاه بخار بررسی شده است. سطح درام با سطح مرجع مقایسه شده و خطا به کنترل‌کننده اول (حلقه خارجی) ارسال می‌شود و همچنین آب ورودی با بخار برداشتی مقایسه می‌شود و سیگنال خطا به کنترل‌کننده دوم (حلقه داخلی) جهت اصلاح وضعیت شیر ارسال می‌شود که به این طرح کنترلی سری می‌گویند اما به‌دلیل عدم تسلط بر مدل‌سازی و به‌دنبال آن اشتباه در طراحی کنترل‌کننده، پاسخ‌ها به‌درستی به‌دست نیامده است. اما در نیروگاه سیکل ترکیبی چون حرارت ورودی به بویلر از واحد گازی وارد بویلر می‌شود در نتیجه متغیر قابل کنترل نیست و لازم است که تاثیر آن را به‌عنوان اغتشاش در سطح درام در نظر گرفته شود به‌همین دلیل شرایط و منطق کنترل سطح و فشار در نیروگاه سیکل ترکیبی نسبت به نیروگاه بخار متفاوت و پیچیده‌تر می‌باشد. شکل (۴) منطق فعلی کنترل سطح درام نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان را نشان می‌دهد. در این منطق سیگنال اختلاف سطح درام از سطح مرجع در ضریب ثابت (Gain1) ضرب می‌شود و همچنین سیگنال اختلاف آب ورودی با بخار خروجی از درام در ضریب ثابت (Gain2) ضرب می‌شود و این دو سیگنال خطا با هم جمع می‌شوند و به شیر آب ورودی به درام اعمال می-شود. در واقع این ضرایب ثابت برای هم نرخ کردن خطای سطح با خطای جریان‌های آب ورودی و بخار خروجی می‌باشد. لازم به ذکر است که از سیگنال فشار نیز برای تخمین آب ورودی به درام استفاده می‌شود که در شکل (۶) توضیحات ارایه می‌شود. این منطق در شرایط کار عادی به‌خوبی جواب می‌دهد اما در شرایط غیرمعمول از جمله بسته‌شدن ناگهانی دایورتر دمپر، اختلال در شرایط دمایی بخار ورودی به توربین و غیره، نه‌تنها کنترل‌کننده پاسخ دقیقی نسبت به تغییرات سطح ندارد بلکه به ناپایدار کردن سیستم و خروج اضطراری و یا بهم ریختگی شدید سطح درام کمک می‌کند. در واقع به‌دلیل تفاوت جنس خطای جریان‌ها و خطای سطح در

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]

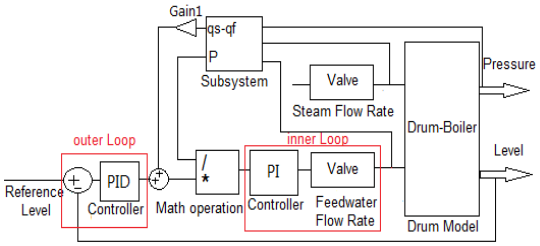
نتیجه کنترل‌کننده در شرایط غیر معمول نمی‌تواند تخمین دقیقی از آب ورودی به درام جهت اصلاح سطح درام داشته باشد.



شکل ۴: منطق فعلی کنترل سطح درام

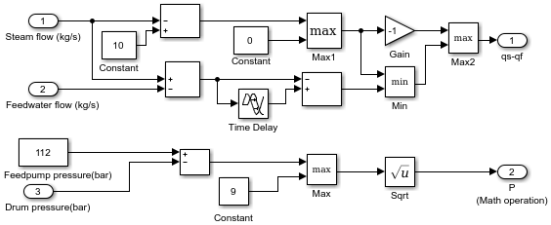
٦- منطق پیاده‌سازی شده برای کنترل سطح درام نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان

شکل (۵) منطق جدید پیاده‌سازی شده برای کنترل سطح درام نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان را نشان می‌دهد. در منطق جدید از یک کنترل‌کننده در حلقه خارجی (برای سیگنال خطای سطح) و یک کنترل‌کننده در حلقه داخلی (برای سیگنال خطای آب ورودی و بخار خروجی از درام) استفاده شده است. کنترل‌کننده فعلی نیروگاه به‌عنوان کنترل‌کننده حلقه داخلی با همان ضرایب تناسبی و انتگرالی ۱ و ۴۰ برای درام فشار بالا و همچنین ۱ و ۶۰ برای درام فشار پایین استفاده شده با این تفاوت که در حلقه داخلی، ضریب ثابت برای خطای جریان‌ها (Gain1) برای درام فشار بالا از ۲۵۰ به ۲۶۵ و برای درام فشار پایین از ۲۷۰ به ۲۹۵ افزایش یافته تا به سیگنال خطا پاسخ دقیق و سریع‌تری داده شود. لازم به ذکر است که خروجی کنترل‌کننده حلقه داخلی به شیر ورودی درام ارسال می‌شود. در حلقه خارجی ضریب ثابت برای خطای سطح (Gain2) برای درام فشار بالا ۱۶۰ و درام فشار پایین ۱۸۰ بوده که در منطق جدید حذف شده‌اند و کنترل‌کننده (PID) به‌صورت موازی به‌جای آن قرار گرفته است. این کنترل‌کننده نسبت به منطق قبلی کندتر تنظیم شده تا به نوسان‌های سطح پاسخ سریع داده نشود زیرا سطح درام به‌طور ذاتی دارای نوسان می‌باشد و همچنین به‌دلیل وجود پدیده تورم و جمع‌شدگی که در شرایط غیرنرمال اتفاق می‌افتد، لازم است کنترل‌کننده با سرعت کمتری پاسخ دهد تا اگر شرایط گذرایی وجود دارد از بین برود. ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتق‌گیر برای درام فشار بالا به ترتیب (۶۴، ۲.۷ و ۱.۴) و برای درام فشار پایین (۷۶، ۳ و ۲) طراحی شده است. از مزایای این منطق نسبت به حالت قبل می‌توان به تنظیم مجزا کنترل‌کننده هر حلقه متناسب با جنس سیگنال خطا و سرعت پاسخ سریع و دقیق‌تر اشاره کرد که در شرایط غیر معمول می‌تواند سطح درام را به‌خوبی کنترل کند و حتی در شرایط تریپ از بهم ریختگی سطح جلوگیری می‌کند تا مشکلات مربوط به آب‌گیری مجدد درام، اتلاف زمان، هزینه و غیره جلوگیری شود. تغییرات نرخ حرارت ورودی به بویلر و یا بسته شدن دایورتر دمپر یک حالت بسیار بحرانی است که دلیل اصلی تریپ‌های نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان می‌باشد. سایر نیروگاه‌های سیکل ترکیبی نیز دارای چنین مشکلی می‌باشند اما مهمترین مزیت کنترل‌کننده پیشنهادی، کنترل سطح درام در شرایط بحرانی و تریپ می‌باشد و از بهم ریختگی سطح در این شرایط جلوگیری می‌کند. برای سادگی، منطق کنترل به شکل زیر نشان داده شده است اما در عمل این منطق بسیار پیچیده‌تر می‌باشد.



شکل ۵: منطق پیشنهادی کنترل سطح درام

زیر سیستم واقع در شکل (۴ و ۵) در شکل (۶) نشان داده شده است. چهار المان در تخمین آب ورودی به درام موثر می‌باشند که خطای سطح درام در حلقه خارجی یکی از چهار المان می‌باشد. سه المان دیگر نیز آب ورودی، بخار خروجی و فشار درام می‌باشند که در زیرسیستم شکل (۶) نحوه ساخت خطاها نشان داده شده است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که خطای جریان‌ها با یک تاخیر زمانی به خروجی ارسال می‌شود. همچنین جذر اختلاف فشار درام با فشار پمپ به عملگر منطقی نشان داده شده در شکل (۴ و ۵) ارسال می‌شود تا این سیگنال در تخمین آب ورودی موثر باشد اما این سیگنال کاربرد محدود کننده و حفاظتی نیز دارد که در واقع اختلاف فشار درام با پمپ نمی‌تواند از مقدار ۹ کمتر باشد زیرا اگر فشار درام افزایش یابد و به فشار پمپ برابر شود در این صورت آب ورودی درام صفر می‌شود. لازم به ذکر است که اعداد نشان داده شده در شکل (۶) مربوط به درام فشار بالا می‌باشد.



شکل ۶: منطق ساخت سیگنال خطای جریان‌ها و فشار

۶-۱ طراحی کنترل‌کننده

همانطور که در بخش (۵) توضیحات ارایه در روش کنترل تک المانه سطح درام با سطح مرجع مقایسه می‌شود و سیگنال خطا جهت اصلاح سطح به شیر آب ورودی درام ارسال می‌شود. برای کنترل تک المانه سطح می‌توان از روش زیگر - نیکولز استفاده کرد [۱۰]. در این روش ابتدا بخش تناسبی کنترل‌کننده فعال می‌شود و این بهره را افزایش می‌دهیم تا سیستم نوسانی (دامنه نوسانات یکسان) شود که در این صورت دامنه نوسانات بهره

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]

نوسانی و اختلاف زمان بین دو سیکل نیز دوره نوسانی می‌باشد که ضرایب کنترل‌کننده (PI) از معادله زیر به دست می‌آید.

$$Kp = .45\,K_u$$
$$Ki = {1.2\,K_p}\,/\,{p_u} \qquad (۲۵-۳)$$

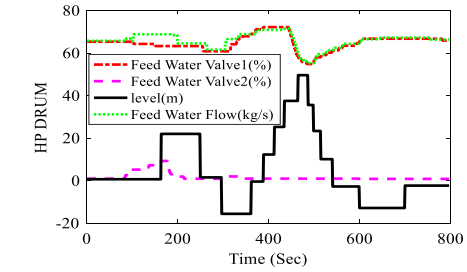
در نیروگاه‌های حرارتی به دلیل وجود حلقه کنترل فشار مجزا لازم است که ابتدا حلقه کنترل فشار سپس حلقه کنترل سطح تنظیم شود زیرا دوره نوسانی حلقه کنترل فشار بسیار کمتر از حلقه کنترل سطح می‌باشد. اما در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به دلیل ثابت بودن حرارت ورودی به بویلر در نتیجه اغتشاشات فشار همانند شکل (۵) در تنظیم کنترل‌کننده سطح در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که برای تنظیم یک کنترل‌کننده در عمل باید شرایط کاری محرک‌ها، عملگرها و غیره مد نظر قرار گیرد و این موضوع باعث می‌شود که برای تنظیم دقیق کنترل‌کننده از روش‌های تجربی و تنظیمات دستی برای کنترل دقیق‌تر استفاده شود. در نیروگاه کرمان نیز برای تنظیم دقیق کنترل‌کننده متناسب با محدودیت شیرها و شرایط واحد ابتدا حلقه خارجی باز شده و کنترل‌کننده حلقه داخلی و گین‌ها به گونه‌ای تنظیم شده که حداکثر سرعت و پاسخ دقیق را داشته باشد. سپس حلقه خارجی بسته شده و کنترل‌کننده آن طوری تنظیم شده که سرعت کمتری نسبت به حلقه داخلی داشته باشد زیرا اغتشاشات سطح در این حلقه کنترل می‌شود. حلقه داخلی به‌طور ذاتی نوعی کنترل پیش‌بین می‌باشد و به سرعت به تغییر جریان‌ها پاسخ می‌دهد و نوسانات سطح نیز در حلقه خارجی به دلیل کند بودن این حلقه از بین می‌رود. نتایج عملی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده پیشنهادی از خروج‌های اضطراری و بهم ریختگی سطح جلوگیری می‌کند.

۷- نتایج پیاده‌سازی

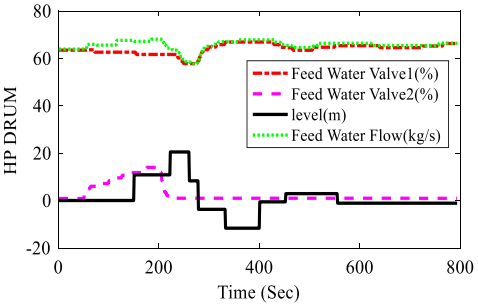
منطق جدید در واحد سوم بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان پیاده‌سازی شده و در شرایط یکسان با منطق قبلی مقایسه شده است. تست‌های اولیه از جمله تست اغتشاش نشان دهنده بهبود کنترل سطح درام نسبت به حالت قبل می‌باشد. به‌دلیل وجود محدودیت‌های نیروگاهی و احتمال بروز مشکلات در اثر ایجاد مصنوعی تست‌های بحرانی در نتیجه این منطق به مدت ۶ ماه در شرایط مختلف کاری قرار گرفت تا تحت تست بحرانی قرار گیرد. به‌دلیل وجود اختلال در واحدگازی، دایورتر دمپر کاملاً بسته شده و منطق جدید تحت بحرانی‌ترین شرایط قرار گرفته است که در این شرایط، سطح درام به‌خوبی کنترل شده و نتایج با مورد مشابه منطق قبلی که بهم ریختگی سطح و خروج اضطراری رخ داده، مقایسه شده است.

۷-۱ تست اغتشاش

شکل (۷) نتایج تست مقایسه کنترل فعلی و پیشنهادی سطح درام نیروگاه برای درام فشار بالا را نشان می‌دهد. شکل (۷-الف) نتایج تست اغتشاش منطق فعلی و شکل (۷-ب) منطق جدید پیاده‌سازی شده را نشان می‌دهد. در این تست نحوه مقایسه به این صورت می‌باشد که در شرایط یکسان درام برای منطق فعلی و منطق جدید، از شیر دوم آب ورودی به درام به‌عنوان اغتشاش در عملکرد شیر اول (سیگنال کنترل به این شیر ارسال می‌شود) استفاده شده است به‌طوری که شیر دوم معادل ده درصد باز شده است و پس از گذشت بیش از یک دقیقه بسته می‌شود و سپس نوسان‌ها و زمان نشست سطح درام مورد بررسی قرار می‌گیرد.نتایج نشان می‌دهد که با وجود این‌که در منطق جدید، شیر دوم بیش از ده درصد باز شده است اما به‌دلیل سریع‌تر شدن حلقه داخلی و تنظیم جداگانه کنترل‌کننده‌ها برای حلقه‌های داخلی و خارجی که در بخش (۵ و ۶) توضیحات ارایه شد، در نتیجه نوسان‌های سطح درام به‌شدت کاهش پیدا کرده است. در منطق فعلی زمان نوسان‌ها بیش از ۵۳۰ ثانیه و حداکثر فراجهش ۵۰mm و در منطق جدید زمان نوسان‌ها ۲۵۰ ثانیه و حداکثر فراجهش ۲۲ mm می‌باشد. در منطق فعلی سطح درام در زمان ۱۶۴ ثانیه فراجهش ۲۰ mm دارد و با وجود اینکه شیر دوم باز و بسته شده است اما شیر اول با تاخیر نزدیک به ۱۵۰ ثانیه بسته شده و بیش از ۶۰ ثانیه در این شرایط نگه داشته شده است که در واقع عدم دقت و سرعت کنترل‌کننده را نشان می‌دهد. در منطق فعلی در شرایطی که سطح درام کاهش پیدا کرده و باید شیر اول باز شود اما هنوز شیر بسته مانده و سپس شیر باز شده و باعث فراجهش ۵۰mm در زمان ۴۷۰ ثانیه شده است.کنترل‌کننده به‌دلیل تاخیر زیاد و عدم تخمین مناسب جهت افزایش یا کاهش جریان ورودی، باعث افزایش نوسان‌های سطح شده و قطعاً با این شرایط در مواقع بحرانی باعث تریپ بویلر خواهد شد.



شکل ۷-الف: منطق کنترل فعلی سطح درام



شکل ۷-ب: منطق کنترل پیشنهادی سطح درام

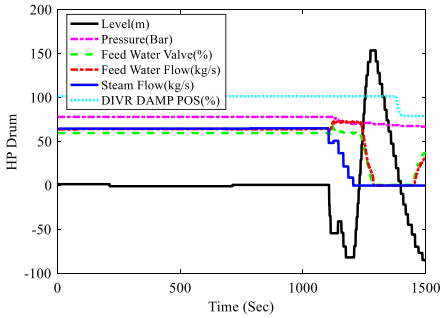
شکل ۷: مقایسه نتایج منطق کنترل فعلی و جدید سطح درام نیروگاه کرمان

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]

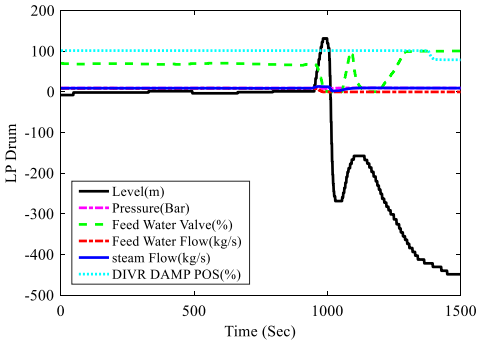
۷-۲ تست اغتشاش

تغییر در حرارت ورودی به بویلر و به‌دنبال آن تغییر در کیفیت بخار و نداشتن شرایط لازم جهت ورود بخار به توربین و بسته شدن شیر بخار توربین و نوسانی شدن سطح درام و در نتیجه فعال شدن شرایط حفاظتی ناشی از سطح و تریپ بویلر یا تریپ بویلر ناشی از عوامل بیرونی از جمله جدایش بار و اشکال در توربین بخار و در نتیجه بسته شدن دایورتر دمپر و به‌دنبال آن بهم ریختگی سطح درام از مهمترین مواردی است که معمولاً در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی از جمله کرمان وجود دارد و بخش قابل ملاحظه‌ای از تریپ‌های نیروگاه کرمان از این مورد می‌باشد. یک سیستم کنترل مناسب در شرایطی که دایورتر دمپر بسته می‌شود و یا به هر دلیلی واحد تریپ می‌دهد باید بتواند سطح درام را به‌خوبی نگه داشته تا خسارت‌های ناشی از خروج اضطراری بویلر، آب‌گیری مجدد درام، صرف انرژی، زمان و غیره جلوگیری شود.

شکل (۸) نتایج کنترل فعلی درام فشار بالا و فشار پایین نیروگاه کرمان در شرایط بحرانی را نشان می‌دهد. شکل (۸-الف) نتایج درام فشار بالا و شکل (۸-ب) نتایج درام فشار پایین در شرایط بحرانی که نرخ حرارت ورودی کاهش یافته و دایورتر دمپر ۲۵٪ بسته شده را نشان می‌دهد. سطح درام فشار پایین ابتدا یک فراجهش داشته سپس کاهش پیدا کرده است. فشار درام ابتدا بیش از ۲ bar کاهش یافته و سپس این کاهش به کمتر از ۱ bar رسیده است که با اقدامات کنترلی انجام شده، سطح درام نوسانی شده است. به‌دلیل کنترل نامناسب و تغییر شدید شیر آب ورودی و اخلال در عملکرد پمپ، در نتیجه آب ورودی درام به صفر رسیده و همچنین به‌دلیل اینکه شیر بخار خروجی از درام (ورودی توربین بخار) بسته نشده، باعث تخلیه شدن لحظه به لحظه درام می‌شود. با وجود اینکه شیر آب ورودی متناسب با نوسان‌های سطح تغییرات شدیدی دارد و نهایتاً به‌طور کاملاً باز شده اما به‌دلیل اخلال در سیستم آب ورودی، افزایش آب ورودی ندارد. نوسان‌های درام فشار بالا به‌دلیل بزرگ‌تر بودن درام با کمی تاخیر شروع شده است. به‌دلیل بسته شدن سریع شیر بخار خروجی از درام و کمی تاخیر در کاهش فشار درام در نتیجه ابتدا کمی سطح کاهش پیدا کرده و شیر آب ورودی برای این کاهش سطح باز شده است اما در واقع این یک سطح گذرا بوده و همین افزایش آب ورودی باعث افزایش شدید سطح شده است. سپس به‌دلیل بسته شدن شیر ورودی در نتیجه سطح مجدداً کاهش پیدا کرده است. پدیده تورم و جمع‌شدگی در درام فشار بالا به وضوح قابل مشاهده است و در چنین شرایطی کنترل‌کننده به نوسانی شدن سطح کمک می‌کند. این شرایط بحرانی باعث فعال شدن شرایط حفاظتی ناشی از سطح و نهایتاً تریپ بویلر شده و به‌دلیل اقدامات دستی اپراتور برای جلوگیری از خطرهای احتمالی در نتیجه داده‌های بعد از تریپ قابل استناد و تحلیل علمی نمی‌باشند. به‌طور کلی می‌توان گفت که پاسخ‌های نامناسب کنترل‌کننده باعث نوسانی شدن شدید سطح و اخلال در عملکرد سیستم و نهایتاً فعال شدن شرایط حفاظتی و تریپ واحد شده است. درام فشار پایین تقریباً خالی شده و درام فشار بالا بیش از ۱۰۰ mm کاهش پیدا کرده است و باید بویلر مجدداً آب‌گیری شود که باعث صرف زمان، انرژی، هزینه، کاهش تولید و غیره می‌شود.



شکل ۸-الف: درام فشار بالا

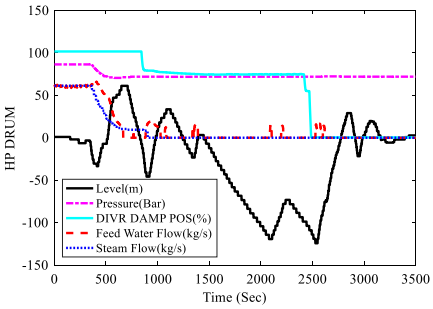


شکل ۸-ب: درام فشار پایین

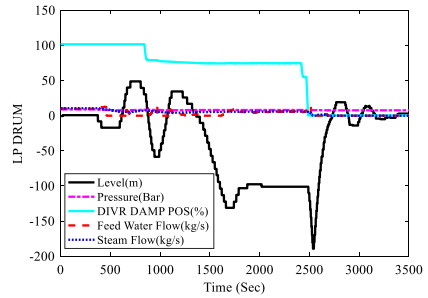
شکل ۸: تست حالت بحرانی منطق فعلی کنترل سطح درام فشار پایین و فشار بالا نیروگاه کرمان

شکل (۹) نتایج منطق کنترل جدید پیاده‌سازی شده در نیروگاه کرمان را نشان می‌دهد. شکل (۹-الف) و (۹-ب) پاسخ‌های مربوط به درام فشار بالا و فشار پایین نیروگاه با وجود منطق جدید در شرایط کاملاً بحرانی که به‌دلیل اخلال در عملکرد توربین و نهایتاً تریپ بویلر شده است، را نشان می‌دهد. شرایط حفاظتی فعال شده و دایورتر دمپر و شیر بخار ورودی توربین کاملاً بسته شده و سطح درام نیز هر لحظه در حال نوسانی شدن می‌باشد (پدیده تورم و جمع‌شدگی). در این شرایط اگر کنترل‌کننده بتواند سطح درام را در محدوده امن نگه دارد، بلا فاصله پس از رفع اشکال، می‌توان بویلر را مجدداً راه‌اندازی کرد و از اتلاف زمان، انرژی، کاهش تولید و خسارت‌های دیگر جلوگیری کرد. به‌دنبال بسته شدن شیر بخار، شیر آب ورودی به‌سرعت بسته شده است (حلقه داخلی). اما همان‌طور که در شکل نشان داده شده، با وجود پدیده تورم و جمع‌شدگی شدید، کنترل‌کننده به این نوسان‌ها واکنش کندی نشان می‌دهد (حلقه خارجی) تا نهایتاً این شرایط گذرا از بین برود. همانطور که در بخش (۶) بررسی شد، به‌دلیل کند بودن حلقه خارجی، نوسان‌های گذرا از بین رفته و سطح درام در محدوده امن نگه داشته شده است. در این شرایط می‌توان بویلر را مجدداً راه‌اندازی کرد و کاهش تولید را به‌سرعت جبران کرد.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]



شکل ۹-الف: درام فشار بالا



شکل ۹-ب: درام فشار پایین

شکل ۹: نتایج منطق جدید کنترل سطح درام نیروگاه

۷- نتایج پیاده‌سازی

در این مقاله ابتد درام بویلر نیروگاه سیکل ترکیبی کرمان مدل‌سازی شده و پس از تحلیل رفتار دینامیک اساسی سیستم، در بخش (۳-۵) اثبات شد که در بارهای پایین، پدیده تورم و جمع‌شدگی شدیدتر از بارهای بالا می‌باشد و برای اینکه کنترل سطح درام راحت‌تر انجام شود باید بویلر در بار نامی خود قرار داشته باشد. در بخش (۵) توضیحاتی در مورد روش‌های کنترلی نیروگاه بخار و منطق فعلی کنترل سطح درام ارایه شد. در بخش (۶) این نتیجه حاصل شد که بهتر است از دو حلقه کنترل جهت تخمین آب ورودی به درام جهت اصلاح سطح استفاده شود تا بتوان در شرایط غیر معمول و اغتشاش، سطح درام را کنترل نمود که نتایج بخش (۱-۷) این موضوع را اثبات کرد. در بخش (۲-۷) نیز نتایج نشان داد که منطق جدید در شرایط بحرانی و تریپ، از بهم ریختگی سطح جلوگیری می‌کند و سطح درام را در محدوده امن نگه می‌دارد. لازم به ذکر است که با توجه به ظهور شرایط بحرانی دیگری که روی واحدهای با منطق کنترلی جدید اتفاق افتاده، پایداری سیستم بارها محک خورده و مزیت این روش نسبت به قبل بسیار مشهود است به‌طوری که برخی از تست های ناپایدار ساز سیستم که مصداق ورود اغتشاش و نامعینی به سیستم هستند و تا پیش از این با دخالت انسانی قابلیت انجام داشتند را در حال حاضر بهره بردار بدون دخالت انسانی و به اتکای سیستم کنترل انجام می‌دهد.

مراجع

[1] Åström, K. J. and Bell, R. D. 2000. Drum-boiler dynamics. *Automatica*, 36: 363-378.

[2] Kim, H. and Choi, S. 2005. A model on water level dynamics in natural circulation drum-type boilers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32: 786 -796.

[3] Lu, S. and Hogg, B. 2000. Dynamic nonlinear modelling of power plant by physical principles and neural networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 22: 67-78.

[4] Fan, H., Zhang, Y. F., Su, Z. G., Wang, B. 2017. A dynamic mathematical model of an ultra-supercritical coal fired once-through boiler-turbine unit. *Applied Energy*, 189: 654-666.

[5] Moradi, H., Saffar-Avval, M. and Bakhtiari-Nejad, F. 2012. Sliding mode control of drum water level in an industrial boiler unit with time varying parameters: A comparison with H∞-robust control approach. *Journal of Process Control*, 22: 1844 - 1855.

[6] Li,L. and Ding, W. 2016. Optimization control strategy of boiler water level based on fuzzy PID. *Control and Decision Conference (CCDC), Chinese.IEEE*. 5893-5896.

[7] Sheng, L., Shiquan, Z. and Yuchao, W.2015. Sliding mode controller with AGA for drum water level of ship boiler. *Control Conference (CCC), 34th Chinese.IEEE*. 3116-3120.

[8] Alaei, H. J. and Yazdizadeh, A. 2016. A new robust H∞ sliding mode observer-based state estimation and fault reconstruction for nonlinear uncertain boiler system. *Soft Computing*. 21: 3957-3968.

[9] Aliakbari, S., Ayati, M., Osman, J. H. and Sam, Y. M. 2013. Second-order sliding mode fault-tolerant control of heat recovery steam generator boiler in combined cycle power plants. *Applied Thermal Engineering*, 50: 1326-1338.

[10] Alvandi M, Fadaee A. 2010. Nonlinear Modeling and PID Control System Design for a Typical Drum Steam Generator. *JoC*, 4 (2):66 -79.

[۱۱] محمد مقصودی، میثم یحیی‌زاده، حسن فاتحی مرج. کنترل سری سطح آب درام نیروگاه سیکل ترکیبی به روش جدول‌بندی بهره. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه ولیعصر(عج) رفسنجان، ۱۳۹۵.

[12] Åström, K. J. and Eklund, K. 1972. A simplified non-linear model of a drum boiler-turbine unit. *International Journal of Control*, 16: 145-169.

[13] Åström, K. and Eklund, K. 1975. A simple non-linear drum boiler model. *International Journal of Control*, 22: 739 -740.

[14] Åström, K. J. and Bell, R. D. 1996. A fourth order non-linear model for drum-boiler dynamics. *In*

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]

IFAC '96, Preprints 13th World Congress of IFAC, San Francisco, 13: 31-36.

[15] Lacob, M., Andreescu, G.D. 2011. Drum-boiler control system employing shrink and swell effect remission in thermal power plants. Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT),3rd International Congress on IEEE, 1-8.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-09]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1398.13.4.3.0]
[DOI: 10.29252/joc.13.4.37]