

تحلیل سیستم کنترل راکتور در یک نیروگاه PWR

علی کرباسیان
کارشناس

شهرام شیرانی
دانشجوی دکترا

بخش مهندسی کنترل، شرکت توسعه صنایع انرژی
پیشگام وابسته به سازمان انرژی اتمی ایران

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تهران

ولی... طحانی
دانشیار

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

در این مقاله سعی بر این است تا با اجزاء سیستم کنترل راکتور یک نیروگاه هسته ای PWR آشنا شویم و رفتار آن را بررسی کنیم. در این راستا ابتدا اهداف کنترل و مشخصات عملکرد سیستم کنترل معرفی گردیده، سپس ساختار بلوکی جهت برقراری این اهداف و مشخصات عملکرد مطلوب مطالعه می گردد. توصیف کیفی ساختار بلوکی تا اندازه ای زمینه ارضاء مشخصات عملکرد و اهداف سیستم کنترل را روشن می سازد. درک کمی از رفتار سیستم کنترل با توجه به مدل نقطه ای قلب راکتور و سایر اجزاء آن صورت گرفته است. طراحی اجزاء سیستم براساس اطلاعات جمع آوری شده از مدارک موجود همراه با نظریات ذهنی و تجربیات نویسندگان به دست آمده است. نتایج شبیه سازی مبین تحقق اهداف کنترلی در سیستم مذکور می باشد.

Analysis of Reactor Control System in a PWR Nuclear Power Plant

S. Shirani
Ph. D. Student Dept. of EE

College of Engin. Univ. of Tehran

A. Karbassian

Nuclear Engin, Control Engin. Dept.
Pioneer Energy Industries Develop-
ment Company,

V. Tahani
Associate Professor

Dept. of EECS Isfahan Univ. of Tech.

Abstract

In this paper various parts of a reactor control system in a PWR nuclear power plant are introduced and the behaviour of the system is studied. First, the control objectives and the required control specifications are introduced. Then, a structure which can fulfill these objectives and specifications is presented. A qualitative description of the system is also given. This description shows qualitatively how the objectives and specifications of the control system are satisfied.

A quantitative understanding of the system is obtained using point kinetic model of the core and models of other components of the system. Models of these components are based on the information obtained from power plant documents, intuition and the experiences of the authors. Results of simulations reveal that the control objectives are fulfilled using the described system.

کلمات کلیدی

کنترل راکتور هسته‌ای - نیروگاه هسته‌ای - سیستم‌های کنترل.

۱- مقدمه

در جامعه رو به رشد صنعتی ما، اطلاع از عملکرد سیستم‌های طراحی شده و در حال اجرا امری ضروری است، بدین معنی که متخصصین، طراحان و پژوهشگران ضمن اینکه باید به دست‌آوردهای علمی و تکنولوژیکی گذشته توجه کنند، از طرف دیگر باید نتایج تحقیقات و پیشرفت‌های حال و آینده را نیز زیر نظر داشته باشند. مجموع این دو نگرش زمینه را برای طراحی و ساخت سیستم‌های مفید و مؤثر مهیا می‌سازد.

در این مقاله در رابطه با بررسی رفتار سیستم‌های طراحی و ساخته شده موجود، تحلیل رفتار یک نوع از این سیستم‌ها مورد نظر می‌باشد. در واقع سعی بر این است تا ضمن معرفی اجزاء و ساختار سیستم کنترل راکتور در نیروگاه هسته‌ای بوشهر (طرح آلمانی) رفتار این سیستم را نیز از دیدگاه کنترل بررسی نماییم.

تحلیل سیستم کنترل به گونه‌ای دنبال می‌گردد که ضمن بررسی کیفی و کمی رفتار سیستم موجود، زمینه را برای طراحی کنترل‌کننده‌های جدید نیز آماده سازد. به همین دلیل در بخش دوم، گزارش اجزاء کلی یک نیروگاه هسته‌ای PWR^۱ معرفی و توصیف شده‌اند. تدبیرهای فنی (استراتژی) و اهداف سیستم کنترل راکتور PWR در بخش سوم مقاله ارائه خواهد شد.

در بخش چهارم، اجزاء و ساختار بلوکی سیستم کنترل راکتور PWR نیروگاه هسته‌ای بوشهر معرفی

می‌شود و رفتار سیستم به طور کیفی مطالعه خواهد شد. مشاهده می‌شود که جهت برقراری مشخصات صحیح برای سیستم کنترل از روش‌های کنترل غیر مستقیم^۲ به نحو مؤثری استفاده شده است.

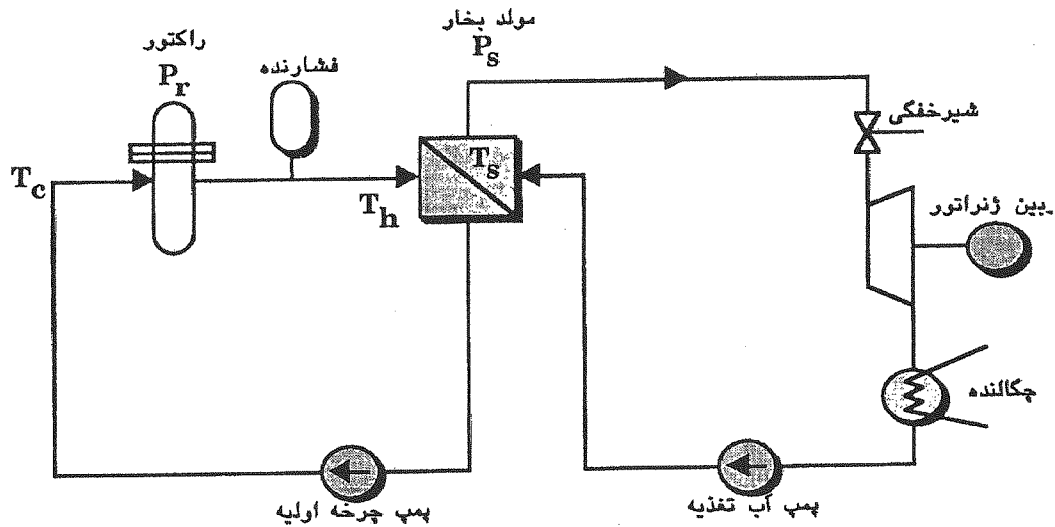
رفتار کمی سیستم کنترل راکتور براساس مدل نقطه‌ای راکتور و سایر اجزاء حلقه‌های کنترلی، در بخش پنجم مقاله ارائه خواهد شد. طرح راکتور و مشخصات سایر اجزاء با استفاده از اطلاعات و مدارک موجود نیروگاه و تجربیات شخصی و نظریات ذهنی نویسندگان تدوین شده است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر تحقق اهداف کنترلی در سیستم مورد نظر می‌باشد.

۲- اجزاء نیروگاه‌های هسته‌ای آبی تحت فشار

نمودار ساده شده یک نیروگاه هسته‌ای آبی تحت فشار (PWR) در شکل ۱ نشان داده شده است [۱]. آب تحت فشار موسوم به خنک‌کننده^۲ در هنگام عبور از کنار میله‌های سوخت که در اثر واکنش هسته‌ای گرم شده‌اند، گرما می‌گیرد و دمایش بالا می‌رود. آب داغ و پرفشار چرخه اول در مولد بخار^۳ نیروگاه، تبادل حرارت نموده و بخار لازم با کیفیت مطلوب، تولید می‌گردد. بخار تولید شده در مولد بخار، همانطور که در شکل نشان داده شده است وارد یک توربین شده و در نهایت پس از انجام کار، در چکالنده تقطیر می‌شود. (همانگونه که از نمودار مشخص است چرخه دوم نیروگاه PWR همانند یک نیروگاه سوخت فسیلی متداول عمل می‌نماید).

نوترونی را تغییر می دهند، مثل دمای سیال خنک کننده، دمای سوخت و غلظت مواد جاذب نوترون در قلب (مانند سموم و میله های کنترل) نتیجه می شود [۲].

توان حرارتی یک راکتور قدرت از طریق راکتیویته داخل قلب تنظیم می شود. راکتیویته عاملی است که باعث افزایش یا کاهش شدت تولید نوترون در قلب راکتور می شود و خود نیز توسط تمام متغیرهایی که اقتصاد



Pr = فشار راکتور (۱۵۰ bar)
 Th = دمای سیال خنک کننده در خروج از راکتور (۳۲۰ °C)
 Tc = دمای سیال خنک کننده در ورود به راکتور (۲۹۰ °C)
 Ps = فشار بخار تولیدی (۷۰ bar)
 Ts = دمای بخار تولیدی (۲۹۰ °C)
 برای جریان و فشار ثابت سیال خنک کننده در چرخه اولیه.

شکل (۱) نمودار ساده شده یک نیروگاه هسته ای با راکتور آبی تحت فشار - نمادها و مقادیر نمونه برای برخی پارامترهای کنترلی

به منظور بهبود مشخصه های زمانی نیروگاه (مثل تسریع در دنبال کردن بار درخواستی) و نیز ثابت نگاه داشتن برخی پارامترهای واحد^۶ (مانند درجه حرارت متوسط سیال خنک کننده) در مقادیر عادی، می بایست پایداری PWR در زمان تغییر بار حفظ گردد. این عمل از طریق استفاده از حلقه های کنترلی خارجی امکان پذیر است.

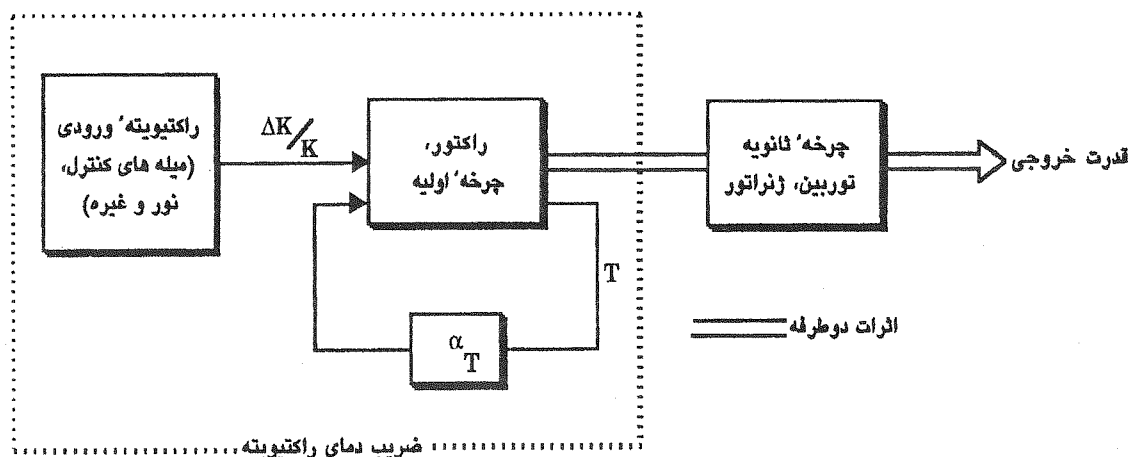
دمای متوسط سیال خنک کننده، T_{av} و فشار بخار خروجی از مولد بخار، P_s از جمله پارامترهای با اهمیت ویژه می باشند. فشار سیال خنک کننده چرخه اول و جریان آن ثابت در نظر گرفته می شوند.

افزایش توان خروجی از یک PWR از طریق افزایش اختلاف دما بین سیال چرخه اولیه و سیال چرخه ثانویه

در عمل تمام راکتورهای آبی تحت فشار دارای ضریب راکتیویته دمایی منفی برای سوخت هستند. این مفهوم بدان معنی است که افزایش دمای سوخت، باعث افزایش جذب نوترون در U^{238} (جذب نامطلوب که شکافت حرارتی را در پی ندارد) و در نهایت جلوگیری از افزایش قدرت راکتور خواهد شد. ضریب دمایی کلی راکتور به تعداد زیادی از پارامترهای راکتور بستگی دارد. در حالت کلی، افزایش قدرت راکتور باعث افزایش دمای سیال خنک کننده و کند کننده^۵ خواهد شد که راکتیویته درون قلب را تغییر می دهد و بر پایداری سیستم می افزاید. پس خوراند منفی که در شکل ۲ نمایش داده شده است، یک مشخصه ذاتی است و به صورت یک سیستم کنترل عمل می کند.

در تقاضای بار با حداقل حرکت میله های کنترلی جبران می شود، چرا که سیستم خود به خود دارای مشخصه پایداری است. حجم سیال خنک کننده اولیه ثابت باقی خواهد ماند و حجم مورد نیاز برای محفظه فشارنده^۹ به حداقل خواهد رسید. چنین شرایطی برای راکتور مطلوب تر است. به هر حال همانطوری که در شکل ۴-الف آشکار است، فشار بخار تولیدی در چنین برنامه ای در یک دامنه وسیع تغییر خواهد کرد که خود مستلزم تجهیزات بزرگتر و سنگین تر در چرخه ثانویه است.

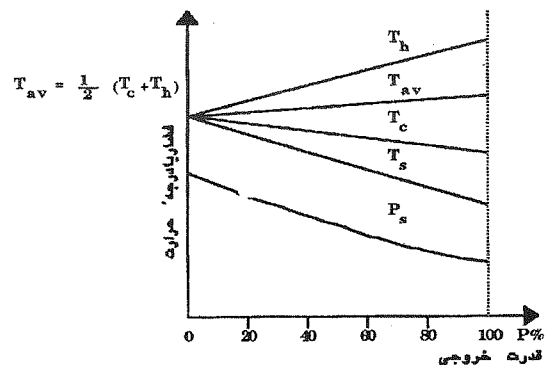
صورت می پذیرد. افزایش اختلاف دما، جریان حرارتی لازم رادر عرض مولد بخار بوجود می آورد. شکل ۳ چنین تغییراتی را در یک نمودار بارگذاری^۷ نمایش می دهد. همانطور که در شکل مشخص است، مسیر تغییرات T_{av} و P_s برحسب بار درخواستی (یا تولیدی) توسط این نمودار مشخص می گردد. از حلقه های کنترلی خارجی برای کنترل این پارامترها، طبق برنامه بارگذاری از قبل تنظیم شده استفاده می شود [۳].
برنامه طبیعی برای یک راکتور با ضریب دمایی منفی، برنامه T_{av} ثابت^۸ می باشد. در این برنامه تغییر



شکل (۲) پس خوراند ذاتی راکتیویته در نیروگاه هسته ای PWR (حلقه ضریب دمایی)

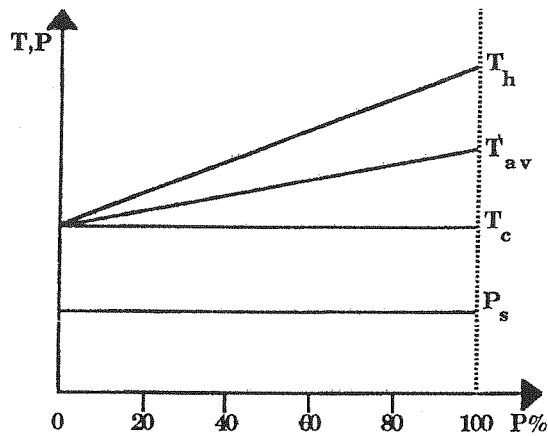
برای ثابت نگاه داشتن فشار بخار، دمای متوسط سیال اولیه را افزود (شکل ۴ - ب). معایب و مزیت های این دو برنامه عکس یکدیگرند. اگرچه چرخه ثانویه در برنامه اخیر بهینه است، اما دامنه وسیعی از تغییرات دمایی سیال اولیه و متعاقب آن مسایل مربوط به اندازه و ابعاد فشارنده و سیستم کنترل حجم سیال اولیه بوجود خواهند آمد. حرکت میله های کنترلی در این حالت بیشتر خواهد شد تا آنکه بتوان بر تمایل ذاتی راکتور در ثابت نگه داشتن دما غلبه نمود.

امروزه هر دو برنامه کنترلی فوق در حال استفاده هستند. برخی سازندگان ترکیبی از دو برنامه را ترجیح می دهند. این ترکیب می تواند به صورت ترکیب خطی (شکل ۵ - الف) یا تغییر از یک نوع برنامه به برنامه دیگر در سطح قدرت خاص، باشد (شکل ۵ - ب).

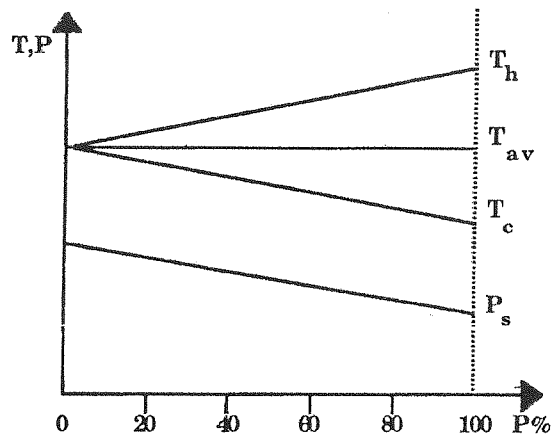


شکل (۳) تغییرات دما و فشار با قدرت خروجی (نمودار بارگذاری)

روش دیگر، برنامه کنترلی است که در آن فشار بخار ثانویه (P_s) ثابت نگاه داشته می شود. در این برنامه باید

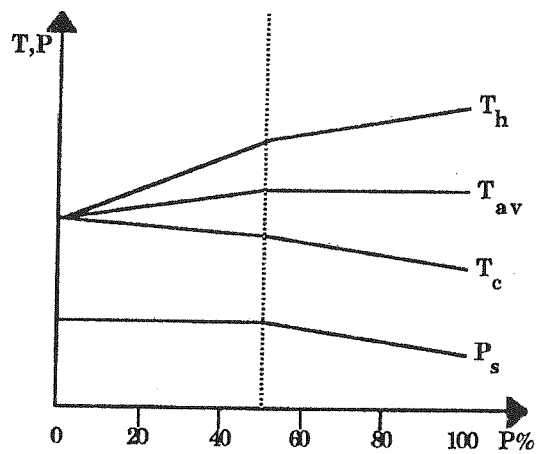


(ب)

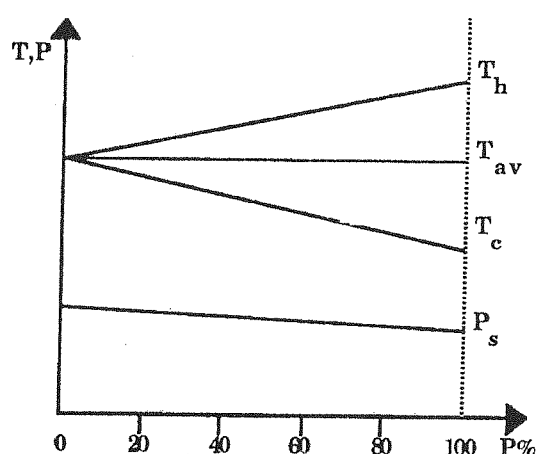


(الف)

شکل (۴) برنامه های مختلف برای کنترل PWR (الف) برنامه T_{av} ثابت (ب) برنامه P_s ثابت



(ب)



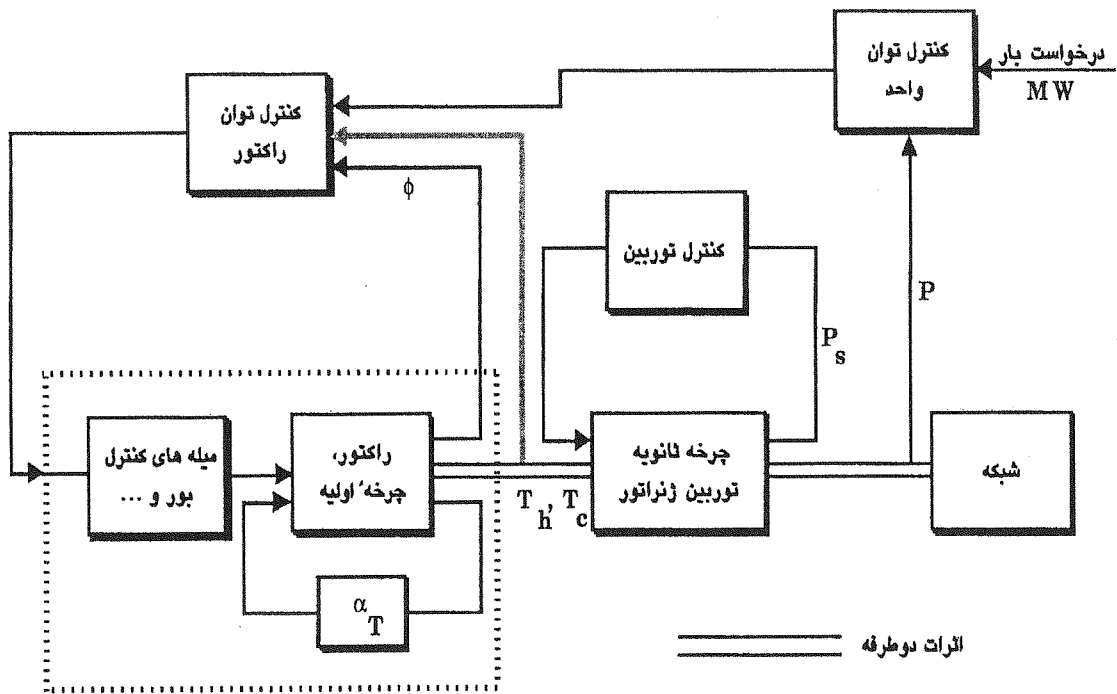
(الف)

شکل (۵) برنامه های مختلف برای کنترل PWR (الف) برنامه توافقی $T_{av} - P_s$ (ب) برنامه وابسته به بار

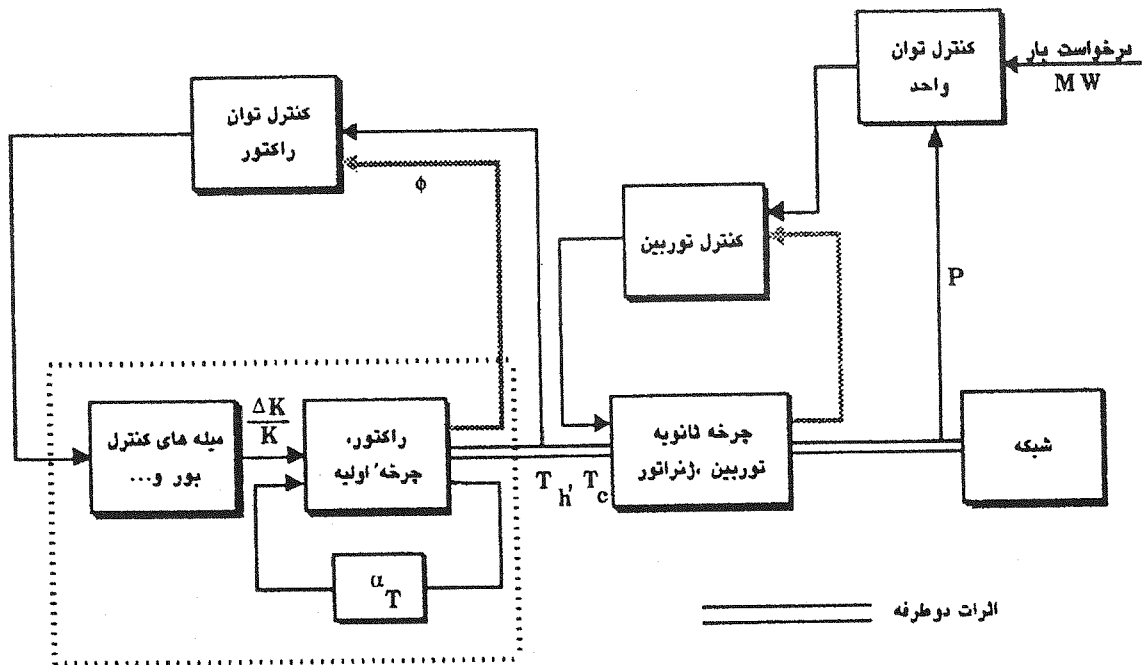
طول راه اندازی یا خاموش سازی^{۱۲} استفاده می شود، در صورتی که اصل دوم یا ترکیبی از این دو اصل در طول عملکرد عادی در بار پایه، یا به هنگام دنبال کردن بار، مورد استفاده قرار می گیرد. توجه کنید که نوع برنامه حالت پایدار الزاماً به انواع کنترل توصیف شده وابسته نیست [۲ و ۳].

شکل های ۶ و ۷ استفاده از سیگنال شارنوترون برای کنترل راکتور را نیز نشان می دهند. این کاربرد در قدرت های کم، وقتی پس خوراند ناشی از تغییرات دما کوچک است، بخصوص در حالت کنترل پیشرو مفید می باشد. لازم به ذکر است که دربارهای کم از کنترل مدار باز استفاده می شود.

راکتور و توربو ژنراتور سیستم های کاملاً وابسته ای هستند. نیاز قدرت شبکه را می توان به راکتور وارد نمود، «توربین راکتور را دنبال نماید» یا «کنترل پیشرو»^(۱) که در شکل ۶ نمایش داده شده است. در این روش، فشار بخار چرخه ثانویه از طریق توربین یا شیرهای مسیر کنارگذر کنترل می شود. روش دوم اعمال نیاز قدرت شبکه به توربین است. در روش دوم (شکل ۷) توان حرارتی راکتور کنترل می شود و بنابر این تغییرات دمای سیال خنک کننده به حداقل می رسد (در این روش «راکتور توربین را دنبال می کند» که «کنترل پس رو» نیز نامیده می شود^(۱۱)). در نیروگاه های بزرگ و مدرن امروزی روش اول به صورت عمده در



شکل (۶) حلقه های کنترل، «راکتور توربین را دنبال می نماید» (نمودار ساده شده).
نیاز قدرت شبکه به طور عمده بر کنترل توربین وارد می شود. این روش کنترلی برای عملکرد دربارهای کم ترجیح دارد.



شکل (۷) حلقه های کنترل، «راکتور توربین را دنبال می نماید» (نمودار ساده شده).
نیاز قدرت شبکه به طور عمده بر کنترل توربین وارد می شود. این روش کنترلی برای عملکرد دربارهای زیاد ترجیح دارد.

۳- اهداف و تدبیرهای فنی کنترل نیروگاه‌های PWR [۳]

سوخت و کند کننده می‌تواند منجر به تغییرات وسیع در راکتیویته شود. در راکتورهای آبی تحت فشار و با طراحی معمولی، این تغییرات اثرات پایدار کننده دارد (پس خوراند منفی). راکتیویته کند دیگری که وجود دارد مربوط به محصولات شکافت و به طور مشخص زنون^{۱۵} است.

همانطور که اشاره گردید تغییرات سریع راکتیویته توسط میله‌های کنترل جبران می‌شود. راکتیویته‌های متغیر طولانی مدت یعنی فرسایش سوخت و غلظت زنون با تغییر غلظت اسید بوریک در خنک کننده جبران می‌گردد. تزریق اسید بوریک یا آب خالص به جای خنک کننده (که به صورت پیوسته برای خالص سازی از چرخه اولیه خارج می‌شود) به چرخه اولیه، غلظت اسید را در خنک کننده تغییر می‌دهد.

۴- ساختار سیستم کنترل راکتور در نیروگاه

بوشهر

۴-۱- کلیات سیستم کنترل راکتور [۴ و ۵ و ۶]

برای کنترل راکتور نیروگاه هسته‌ای بوشهر (طرح آلمانی « $2 \times 1300 \text{ MWe}$ »)، همانند دیگر راکتورهای آبی تحت فشار از دو امکان کنترلی اصلی، میله‌های کنترلی و سموم مایع استفاده شده است. در قلب راکتور ۶۱ میله کنترلی وجود دارند که در موقعیت‌های مشخصی در مجموعه‌های سوخت^{۱۶} و از بالا به درون قلب وارد می‌شوند. میله‌های کنترل می‌توانند به صورت پله‌ای در جهات بالا و پایین در درون قلب حرکت نمایند. تغییر وضعیت پله‌ای میله‌های کنترل برابر ۱ سانتی متر می‌باشد. و قتیکه میله کنترل به صورت کامل به درون قلب وارد شده باشد، حدود ۲۸۲ سانتی متر از آن در درون قلب خواهد بود. این وضعیت، موقعیت حدی پایینی نامیده می‌شود. در موقعیت حدی بالایی تنها نوک فولادی میله‌های کنترل در قسمت فعال قلب وارد می‌شود و قسمت جاذب نوترون که از جنس آلایاژ نقره / ایندیم / کادمیم است بدون قلب وارد نمی‌شود. میله‌ها حداکثر می‌توانند با سرعت یک پله در ثانیه حرکت نمایند.

تدبیرهای فنی حرکت میله‌های کنترل در راکتور نیروگاه بوشهر براساس موارد زیر می‌باشد [۶ و ۷]:
- در شرایط حالت دائمی و کار تحت بار ثابت تا آنجا که ممکن است راکتور بایستی بدون استفاده از میله‌های کنترل کار نماید، چرا که تنها به این صورت است که

کنترل توان حرارتی تولیدی در یک راکتور، از طریق کنترل واکنش زنجیره‌ای انجام می‌شود و آن عبارت است از کاهش یا افزایش تعداد نوترون‌هایی که منجر به شکافت هسته می‌شوند. این عمل با افزودن یا کاستن موادی که جاذب نوترون هستند و راکتیویته درون قلب را تغییر می‌دهند، صورت می‌پذیرد. ابزارهای مناسب و متداول برای کنترل راکتیویته قلب، میله‌های جامد و مایعات جاذب نوترون هستند. متداول ترین مواد مورد استفاده در میله‌های جامد کنترلی عناصر کادمیم، ایندیم، نقره و فولاد ضد زنگ و برای جاذب‌های مایع، اسید بوریک می‌باشند. هر یک از دو ابزار فوق مزایایی دارند که لزوم استفاده از آنها را به صورت همزمان در قلب راکتور روشن می‌سازد و در ادامه به آنها توجه خواهیم کرد.

در عمل بسیار مطلوب است که میله‌های سوخت در داخل راکتور به صورت یکنواخت فرسایش^{۱۳} یابند و از تمام سوخت درون آنها بتوان به یک اندازه توان حرارتی دریافت نمود. در نتیجه یکنواختی شار نوترون در همه نقاط قلب راکتور در جهت دستیابی به هدف یاد شده لازم است. در حالت عادی کارکرد راکتور و بدون حضور مواد جاذب نوترون در درون آن، توزیع شار نوترون‌های حرارتی در قلب (در هر دو جهت محوری و شعاعی) کسینوسی است. وارد کردن میله‌های جاذب به طور موضعی در قلب راکتور باعث تخریب توزیع شار نوترون می‌شود. بنابراین عمده مزیت استفاده از مواد جاذب نوترون به صورت مایع که «سم»^{۱۴} نامیده می‌شوند، تغییر شکل شار نوترونی قلب به صورت یکنواخت و در همه نقاط است.

نکته دیگری که در رابطه با میله‌های کنترلی و سموم مایع باید در نظر داشت، سرعت عمل آنها در کنترل توان حرارتی قلب است. قلب راکتور هسته‌ای به دلایل مختلف و مهمی نظیر ایمنی، باید به سرعت قابل کنترل باشد یعنی بتوان سطح توان حرارتی تولیدی آن را کاهش داد. این خواسته فقط با استفاده از میله‌های کنترلی که قدرت جذب بسیار بالایی دارند، امکان پذیر است. ثابت زمانی اثر میله‌های کنترل در قلب راکتور بسیار کوچکتر از مقدار مربوطه برای سموم مایع می‌باشد.

تغییرات توان خروجی راکتور و فرسایش سوخت، راکتیویته قلب را تغییر می‌دهند، همچنین تغییر درجه حرارت

استفاده بهینه از سوخت درون قلب میسر می‌باشد.
- راکتیویته ذخیره کافی که برای افزایش سریع توان لازم است، وجود داشته باشد. به عبارت دیگر تحت بار جزئی میله‌های کنترل بیشتر درون قلب وارد شده باشند.

- توزیع فضایی چگالی توان (یا شار نوترون) در درون قلب راکتور تا آنجا که ممکن است کمتر توسط میله‌های کنترل تحت تأثیر قرار گیرد. این بدان معنا است که اولاً حداقل میله‌های کنترل در هنگام کار راکتور بدون قلب وارد شده باشند و ثانیاً میله‌های کنترل تنها به شکل متقارن حرکت داده شوند تا توزیع فضایی توان در امتداد شعاعی، تقارن خود را حفظ نماید. علاوه بر این با در نظر گرفتن توزیع محوری توان، هدف بایستی آن باشد که یکی از دو شکل «قلب بدون میله‌های کنترل» و یا «قلب در شرایطی که میله‌های کنترل به طور کامل در آن وارد شده‌اند» حاصل شود.

- برای آن که راکتیویته لازم جهت خاموش کردن راکتور همواره وجود داشته باشد، میله‌های کنترل تنها تا آنجا می‌توانند در درون قلب وارد شوند که همواره راکتیویته لازم برای خاموش کردن سریع راکتور از طریق رها کردن میله‌ها در درون قلب فراهم باشد.

به منظور پیروی از این موارد، در طرح سیستم کنترل راکتور نیروگاه بوشهر، میله‌های کنترل به دو گروه دسته L و دسته D^{17} تقسیم شده‌اند. از مجموع ۶۱ میله کنترل، ۱۶ میله متعلق به دسته D و بقیه متعلق به دسته L هستند. ۱۶ میله متعلق به دسته D به چهار گروه هر یک شامل چهار میله تقسیم می‌شوند. موقعیت چهار میله متعلق به هر گروه به گونه‌ای در قلب انتخاب شده‌اند که تقارن شعاعی توان در قلب با حرکت آنها حفظ شود (شکل ۸). گروه‌ها در یک دنباله از قبل تعیین شده و به صورت ترتیبی به درون قلب وارد و یا از آن خارج می‌شوند. هر گروه هنگامی به درون قلب وارد و یا از آن خارج می‌شود که گروه قبلی در دنباله گروه‌ها به موقعیت انتهایی خود رسیده باشد. این مسئله موجب می‌شود که کنترل توان با حداقل تعداد میله‌های کنترل وارد شده در قلب میسر گردد [۶].

تمامی میله‌های دسته L به صورت همزمان توسط سیگنال‌های مربوط به کنترل راکتور حرکت داده می‌شوند. این بدان معنا است که دسته L را می‌توان به عنوان یک عنصر کنترل راکتیویته فشرده^{۱۸} در نظر گرفت. این میله‌ها هیچگاه بیشتر از ۲۵ سانتی‌متر چه در

هنگام کار در شرایط بدون بار و چه در شرایط بار کامل، به درون قلب وارد نمی‌شوند. میله‌های دسته L وظایف زیر را به عهده دارند:

- ایجاد این اطمینان که راکتیویته برای خاموش کردن راکتور همواره وجود دارد.

- کنترل توزیع محوری توان

- جبران تغییرات سریع و بزرگ در درجه حرارت متوسط خنک‌کننده یا توان، با همکاری میله‌های دسته D.

میله‌های دسته D- وظایف زیر را انجام می‌دهند:

- کنترل نوسانات درجه حرارت متوسط خنک‌کننده و توان در هنگام کار تحت شرایط بار ثابت.

- جبران نمودن تغییرات در راکتیویته که می‌تواند در حین کنترل موقعیت میله‌های دسته L رخ دهد.

- پیش‌بینی راکتیویته ذخیره لازم برای عملیات دنبال نمودن بار و راه‌اندازی و خاموش کردن راکتور.

به منظور اجرای وظایف کنترلی، تنها یک گروه از میله‌های دسته D- تقریباً به میزان ۶۰ سانتی‌متر در هنگام کار در حالت پایدار و بار ثابت به درون قلب وارد می‌شود. برای تغییر توان، حرکت تنها یک گروه از میله‌های دسته D- کافی است.

۴-۲- ویژگی‌های سیستم کنترل راکتور

نمودار بلوکی سیستم کنترل راکتور نیروگاه بوشهر (طرح آلمانی) در شکل ۹ نشان داده شده است [۷]. سیستم کنترل یک سیستم چند متغیره است که از حلقه‌های کنترل درجه حرارت متوسط خنک‌کننده در مدار اولیه، کنترل شار نوترون، کنترل موقعیت میله‌های دسته L، کنترل موقعیت میله‌های دسته D و کنترل توزیع محوری توان تشکیل شده است.

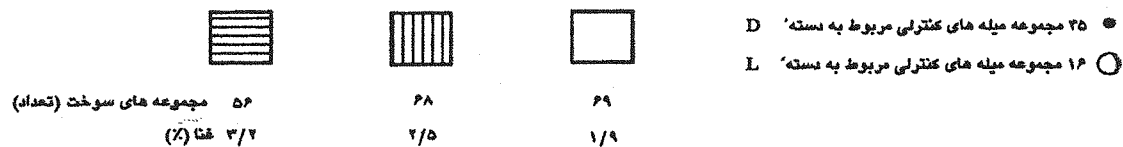
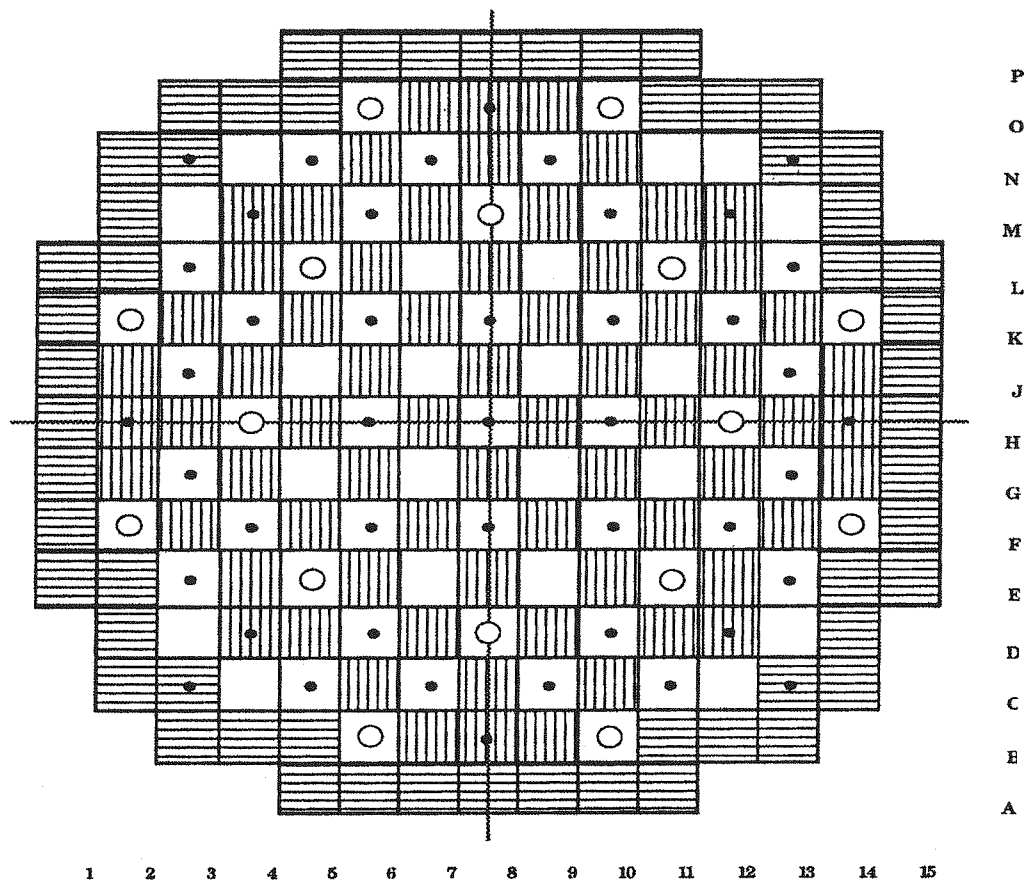
الف- کنترل درجه حرارت متوسط خنک‌کننده

همانگونه که قبلاً اشاره شد در راکتورهای آبی تحت فشار به خاطر ظرفیت حرارتی بالای سیستم خنک‌کننده و به منظور حداقل کردن اندازه فشارنده، بهتر است که دمای متوسط سیال خنک‌کننده ثابت نگاه داشته شود (در محدوده توانهای پایین دمای متوسط خنک‌کننده کاهش داده می‌شود تا فشار نامی مدار آب/ بخار را در حد پایینی نگاه دارد) [۲].

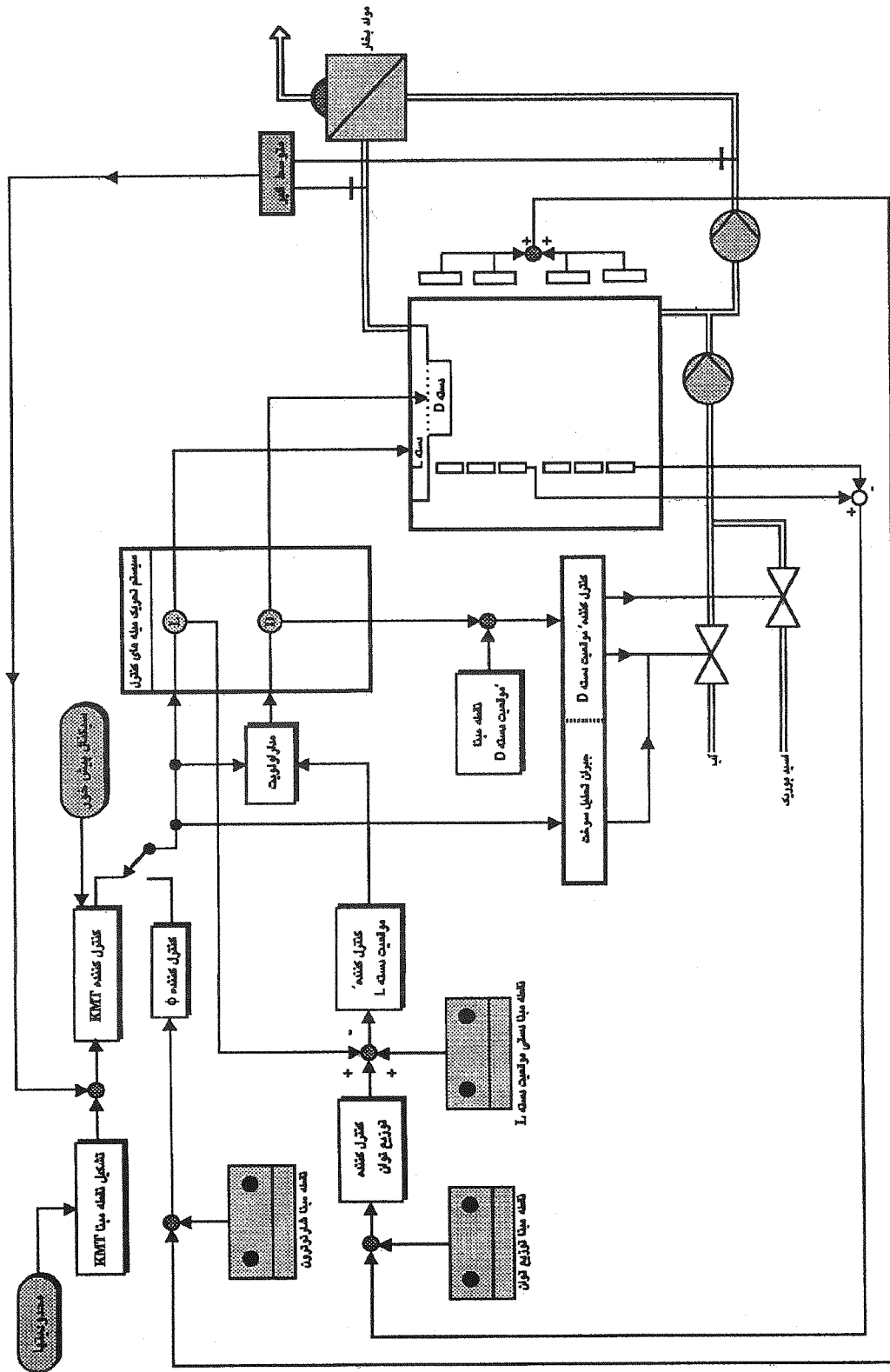
حلقه کنترل درجه حرارت خنک‌کننده در مدار اولیه درجه حرارت متوسط سیال خنک‌کننده را، در محدوده‌ای از قبل تعیین شده حول نقطه مینا^{۱۱} نگاه

کنترل به صورت تفاضل بین نقطه مبنا و مقدار اندازه‌گیری شده شکل می‌گیرد. این سیگنال خطا پس از پردازش توسط یک کنترل کننده، باعث تحریک میله‌های کنترل می‌گردد. سیگنال خطای بزرگ باعث حرکت میله‌های دسته L و دسته D با سرعتی متناسب با دامنه سیگنال خطا می‌گردد. سیگنال خطای کوچک جابجایی دسته D را سبب می‌شود. حرکت این میله‌ها به گونه‌ای است که دمای متوسط سیال خنک کننده را به مقدار نقطه مبنا (یا محدوده‌ای اطراف آن) بازگرداند.

می‌دارد. نقاط مبنا براساس نمودار بارگذاری (شکل ۳) انتخاب می‌شوند. این حلقه کنترل به اختصار KMT^۲ نامیده می‌شود [۵]، محرک‌های کنترلی حلقه کنترل KMT میله‌های دسته L و دسته D هستند. همانطور که در شکل ۹ ملاحظه می‌گردد، در حلقه کنترل KMT، متغیر اندازه‌گیری شده دمای متوسط خنک کننده است. این مقدار به صورت متوسط دو دمای اندازه‌گیری شده، یکی درست قبل از مولد بخار و دیگری قبل از پمپ اصلی خنک کننده به دست می‌آید. خطای



شکل (۸) سطح مقطع قلب راکتور با ۱۹۳ مجموعه سوخت و موقعیت مجموعه‌های کنترلی دسته‌های L و D



شکل (۹) نمودار بلوکی سیستم کنترل راکتور

ب- کنترل شارنوترون [۵ و ۶]

حلقه کنترل شارنوترون می تواند برای کنترل توان راکتور در تمامی شرایط کاری که در آنها حلقه کنترل درجه حرارت متوسط خنک کننده فعال نیست، مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال:

- کار طولانی در بارهای خیلی پایین

- کار در حالت توربین به دنبال راکتور (راکتور در حالت کنترل پیشرو)

همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می شود، محرک های این حلقه کنترل، مانند حلقه کنترل KMT، میله های کنترل دسته های L و D هستند. متغیر اندازه گیری شده در این حلقه کنترل، شارنوترون است. نقطه مبنای شارنوترون به صورت دستی از کنسول کنترل تعیین می شود. خطای کنترل به صورت اختلاف بین نقطه مبنا و مقدار اندازه گیری شده، شکل می گیرد. سیگنال خطا از یک کنترل کننده تناسبی عبور می کند و سیگنال خروجی کنترل کننده به حلقه کنترل موقعیت میله ها ارسال می شود. توسط یک کلید انتخاب^{۲۱} که بر روی کنسول کنترل قرار دارد، همیشه یکی از دو حلقه کنترل شار و کنترل درجه حرارت متوسط خنک کننده در سیستم کنترل راکتور فعال می باشند. در حقیقت حلقه کنترل شارنوترون، یک کنترل کمکی است که می تواند به عنوان جانشین برای حلقه کنترل دمای متوسط خنک کننده هنگامی که سیستم مذکور در حال کار نمی باشد (به عنوان مثال هنگامی که راکتور در بار پایین در حال کار است یا خرابی در سیستم کنترل درجه حرارت متوسط خنک کننده رخ داده است) و برای حفظ راکتور در یک توان ثابت به کار می رود.

اگر چه به صورت نظری می توان راکتور را در هر توانی با کنترل شار نوترون مورد بهره برداری قرار داد، این سیستم معمولاً در بارهای پایین و زیر نقطه زانو^{۲۲} در نمودار بارگذاری، یعنی محدوده ای که در آن ثابت نگاه داشتن درجه حرارت متوسط سیال خنک کننده لازم نیست (توربین به دنبال راکتور)، مورد استفاده قرار می گیرد. به طور کلی این سیستم تنها هنگام راه اندازی و خاموش کردن کل نیروگاه و یا دوره های طولانی کار در توان پایین در مدار قرار داده می شود.

ج- کنترل موقعیت میله های کنترلی [۵ و ۶]

حلقه کنترل موقعیت میله های کنترل، تدبیرهای فنی حرکت میله های کنترل را که قبلاً توضیح داده شد، اجرا

می نماید. حلقه کنترل موقعیت میله های دسته L، میله ها را با تغییر موقعیت محرک های این حلقه یعنی میله های دسته D در وضعیت مورد نظر نگاه می دارد. همانطوری که در شکل ۹ نشان داده شده است، نقطه مبنای موقعیت میله های دسته L متشکل از یک مقدار قابل تنظیم به صورت دستی و یک مؤلفه وابسته به توزیع محوری توان تشکیل شده است. نکته قابل توجه در این سیستم آن است که برخلاف سیستم های کنترل معمول، سیگنال خطای موقعیت دسته L به جای اعمال شدن به موتور محرک میله های دسته L به میله های دسته D اعمال می گردد و تثبیت وضعیت میله های L در نهایت از طریق حلقه کنترل KMT انجام می شود. در ادامه خواهیم دید که چگونه با این ساختار، تدبیرهای فنی حرکت میله های کنترل عملی شده است. مهمترین مؤلفه های تشکیل دهنده نقطه مبنای حلقه کنترل موقعیت دسته D همان مؤلفه های تشکیل دهنده موقعیت مبنا در حلقه کنترل موقعیت دسته L هستند که به خاطر سادگی در شکل ۹ نشان داده نشده اند. محرک های حلقه کنترل دسته D، خطوط تزریق اسید بوریک و آب خالص می باشند. در اینجا نیز برخلاف سیستم های کنترل معمول خطای موقعیت میله های دسته D به جای اعمال شدن به موتور محرک آنها، به شیرهای کنترل خطوط تزریق اسید بوریک و آب خالص اعمال می گردد. یکی دیگر از وظایف میله های دسته D این است که اثر راکتیویته پس خور مربوط به تغییر درجه حرارت سوخت را جبران نماید. همچنین از طریق خطوط تزریق اسید بوریک می توان با اعمال تغییرات در غلظت بور در خنک کننده، تغییرات کند راکتیویته از قبیل اثر فرسایش سوخت و تغییر در غلظت زنون و ساماریوم را جبران کرد. تغییرات کوچک KMT (درجه حرارت متوسط خنک کننده) توسط جابجایی میله های دسته D به تنهایی، جبران می شود. این بدان معنا است که میله های دسته D بایستی هم به عنوان محرک حلقه کنترل موقعیت دسته L و هم به عنوان محرک حلقه کنترل درجه حرارت متوسط خنک کننده (یا شار نوترون)، عمل نمایند. همانگونه که در شکل ۹ مشاهده می شود، توسط یک مدار منطقی سیگنال های خروجی کنترل کننده های حلقه کنترل KMT و حلقه کنترل موقعیت دسته L بررسی می شود. در صورت تقاضای حرکت های مخالف برای میله های دسته D، اولویت به حلقه کنترل دسته L داده می شود. (مدار اولویت در شکل ۹).

همانگونه که اشاره شد، میله های دسته L اکثر میله های کنترل را شامل می شوند و یک وسیله تنظیم برای کنترل درجه حرارت خنک کننده و توزیع توان هستند. نقطه مبنای موقعیت این میله ها در شرایط عملیاتی راکتور به نحوی انتخاب می شود که باعث داخل شدن مقدار کمی از میله ها در قلب شود. به این ترتیب در تمامی محدوده های بار، توان راکتور به صورت قابل قبولی در قلب توزیع می گردد. علاوه بر این در تمامی توان های عملیاتی راکتور، راکتیویته کافی برای خاموش کردن راکتور موجود خواهد بود. قابل توجه است که طبق شکل ۹، مؤلفه دیگر نقطه مبنای حلقه کنترل دسته L، سیگنالی است متناسب با اختلاف شار متوسط بالا و پایین قلب راکتور. در صورتی که شارنوترون در نیمه بالای قلب بیشتر از نیمه پایین باشد، این مؤلفه سیگنال مبنای باعث حرکت میله های دسته L به درون قلب می گردد. نتیجه این عمل کاهش شارنوترون در نیمه بالای قلب است. البته عکس این روند نیز صادق است.

د- کنترل توزیع محوری توان [۵]

حلقه کنترل توزیع محوری توان برای کنترل نوسانات ناپایدار که در اثر تغییرات فضایی در غلظت زنون بوجود می آید، در نظر گرفته شده است. محرک این حلقه کنترل، میله های دسته L می باشند. اندازه گیری های مربوط به نحوه توزیع محوری توان در قلب راکتور به کمک دستگاه های اندازه گیر شار نوترون که در داخل و خارج قلب قرار دارند، انجام می پذیرد. تفاوت شارنوترون در نیمه های بالایی و پایینی قلب با یک نقطه مبنای که به صورت دستی قابل تنظیم می باشد، مقایسه می گردد. خطای کنترل به حلقه کنترل موقعیت میله های دسته L ارسال می شود. حلقه کنترل موقعیت میله های دسته L، فرآیند واحد^{۲۳} و سیستم کنترل دمای خنک کننده موجب می شوند که میله های دسته L در صورت وجود چگالی توان بالا در نیمه فوقانی قلب به درون آن ناحیه وارد و در چگالی توان بالا در نیمه پایینی قلب از ناحیه فوقانی خارج گردند. به عبارت دیگر میله های دسته L به طور مستقیم توسط سیگنال های حلقه کنترل توزیع محوری توان تحریک نمی شوند. تغییر نقطه مبنای حلقه کنترل موقعیت میله های دسته L توسط سیگنال های حلقه کنترل توزیع محوری توان باعث حرکت میله های دسته D می شود. این حرکت، دمای خنک کننده را تغییر می دهد و سیستم کنترل دمای خنک کننده میله های دسته L را وادار به حرکت می نماید.

ه- کنترل موقعیت میله های کنترل [۵ و ۶]

سیستم تحریک میله های کنترل وظیفه حرکت دادن میله های دسته L و دسته D و اجرای برنامه نحوه حرکت گروه های مختلف میله های دسته D که ذیلاً به آن اشاره می شود را بر عهده دارد. برای حرکت دادن میله های کنترل از موتورهای گامی^{۲۴} استفاده گردیده است. لذا سیگنال آنالوگ خروجی مدارهای کنترل بایستی به دنباله ای از پالس ها تبدیل شود تا برای تحریک این موتورها مناسب باشد. تعداد پالس ها در واحد زمان متناسب با دامنه سیگنال آنالوگ است. به ازاء وارد شدن هر پالس، موتور گامی یک پله حرکت می نماید، به این ترتیب سرعت حرکت موتور متناسب با دامنه سیگنال آنالوگ ورودی است.

۱۶ میله متعلق به دسته D در چهار گروه قرار می گیرند. هر گروه شامل چهار میله می باشد. گروه ها به گونه ای انتخاب شده اند که تقارن شعاعی در سطح مقطع قلب حفظ شود. گروه ها در حالت عادی تنها به صورت متوالی و با ترتیبی از قبل تعیین شده حرکت داده می شوند. در پاسخ به افزایش احتمالی T_{av} ، میله های دسته D یا به عبارت دقیقتر، اولین گروه در ترتیب فوق الذکر، بایستی بیشتر به درون قلب وارد شوند. این وارد شدن حتی می تواند تا آنجا ادامه یابد که این گروه به موقعیت انتهای پایینی خود برسد. در این شرایط و در صورت لزوم گروه دوم به داخل قلب وارد می شود تا خطای T_{av} را تصحیح نماید. این مسئله می تواند در مورد گروه بعدی نیز تکرار شود. خارج کردن میله های دسته D از درون قلب از نظر اصول شبیه به نحوه وارد کردن آنها است که در بالا به آن اشاره شد ولی به ترتیبی معکوس.

۴-۳- بررسی کیفی رفتار سیستم کنترل راکتور

در این قسمت به صورت کیفی سیستم کنترل راکتور نیروگاه هسته ای بوشهر (طرح آلمانی) را بررسی می نماییم. شکل ۱۰ نمودار بلوکی سیستم کنترل راکتور را با جزئیات بیشتر در مقایسه با شکل ۹ نشان می دهد. جهت سادگی در بررسی رفتار کیفی سیستم کنترل، حلقه کنترل توزیع محوری توان در نظر گرفته نشده است. به هر حال همانطور که در بخش ۵ خواهیم دید چون از مدل تک نقطه ای قلب راکتور جهت بررسی کمی استفاده شده است، بنابراین این حلقه کنترل توزیع محوری توان نقش خود را از دست می دهد.

فرض می‌کنیم به دلایلی مقدار مبنای درجه حرارت متوسط خنک کننده کاهش داده شده باشد. در این صورت سیگنال e_{KMT} در شکل ۱۰ که در حقیقت برابر است با:

$$e_{KMT} = T_{av,r} - T_{av} \quad (1)$$

منفی خواهد شد. در نتیجه خروجی کنترل کننده (فعال آن را تناسبی در نظر می‌گیریم) یعنی u نیز منفی خواهد شد. اگر سیگنال u کوچک باشد یعنی $-0.5 < u < 0$ تنها میله‌های دسته D از طریق کلید S_2 که بسته شده است حرکت خواهند کرد. اگر میله‌های دسته L را در موقعیت مبنای خود فرض کنیم، سیگنال u که منفی است موجب می‌شود که میله‌های دسته D یا به عبارت دقیقتر اولین گروه از میله‌های دسته D به درون قلب وارد شوند (سیگنال m در شکل ۱۰ چنانچه مثبت باشد باعث خارج شدن میله‌ها و اگر منفی باشد موجب وارد شدن آنها به قلب می‌گردد). وارد کردن میله‌های دسته D موجب کاهش توان تولید شده توسط راکتور و در نهایت کاهش T_{av} می‌گردد. به علت تعداد کم میله‌های دسته D در مقایسه با میله‌های دسته L ، وارد شدن جزئی آنها اثر چندانی بر توزیع محوری توان ندارد.

حال همان شرایط فوق را در نظر می‌گیریم ولی فرض می‌کنیم که مقدار مبنای درجه حرارت متوسط خنک کننده به مقدار زیادی کاهش داده شده باشد. پایه بیان دیگر $u < -0.5$ باشد. در این شرایط میله‌های دسته L به درون قلب وارد می‌شوند. کلید S_2 تحت این شرایط باز است و میله‌های دسته D از طریق سیگنال u تحریک نمی‌شوند. ولی حرکت میله‌های دسته L به سمت پایین موجب افزایش سیگنال «موقعیت میله‌های دسته L » یعنی سیگنال L_P در شکل ۱۰ می‌شود. باتوجه به ثابت بودن مقدار مبنای موقعیت میله‌های دسته L و علامت سیگنال‌های جمع شده در شکل ۱۰، یک سیگنال خطای منفی e_L به حلقه کنترل موقعیت میله‌های دسته D اعمال می‌شود (توجه شود که در این شرایط کلید S_2 باز است). بنابراین این میله‌های دسته D نیز به داخل قلب وارد می‌شوند. وارد شدن همزمان میله‌های دسته L و دسته D راکتیویته منفی زیادی به راکتور وارد کرده و آن را در حالت زیر بحرانی قرار می‌دهد. این پدیده موجب کاهش توان تولید شده توسط راکتور و پایین آمدن T_{av} می‌گردد. هنگامی که u در فاصله $[-0.5 / 0]$ قرار گیرد، حرکت

میله‌های دسته L متوقف شده، آنها در جای خود درون قلب ثابت می‌مانند. در این شرایط سیگنال‌های u و e_L هر دو منفی هستند. در نتیجه کلید S_2 بسته می‌شود و حرکت میله‌های دسته D به سمت پایین همچنان ادامه می‌یابد. ثابت شدن موقعیت میله‌های دسته L در درون قلب و حفظ وضعیت زیر بحرانی باعث می‌گردد که T_{av} حتی به زیر مقدار مبنای، سقوط کند. این امر موجب حرکت میله‌های دسته L به خارج قلب می‌گردد. هنگامی که میله‌های دسته L به موقعیت اولیه خود (خارج قلب) برگردند و دسته D نیز به موقعیتی کم و بیش برابر موقعیت اولیه خود برسد، عمل کنترل خاتمه یافته است. به این ترتیب T_{av} کاهش یافته است، ضمن آنکه میله‌های دسته L نیز از قلب خارج شده‌اند. مشاهده می‌شود که این نحوه پیاده‌سازی حلقه‌های کنترل، موجب دستیابی همزمان به کنترل و تدبیرهای فنی مربوط به خارج نگاه داشتن میله‌های دسته L از قلب می‌گردد. واضح است که اگر خطای موقعیت میله‌های دسته L به میله‌های دسته D اعمال نمی‌شد، دستیابی همزمان به کنترل و تدبیرهای فنی مذکور غیر ممکن بود. در تحلیل فوق از حلقه انتهایی زنجیره کنترل یعنی حلقه تزریق آب خالص و اسید بوریک که به عنوان محرک حلقه کنترل موقعیت میله‌های دسته D عمل می‌کند، صرف‌نظر گردید. در ادامه بحث اثر این حلقه را هم در نظر خواهیم گرفت. فرض می‌کنیم میله‌های دسته D در یکی از فرآیندهایی که در بالا به آن اشاره شد به درون قلب وارد شوند. در این صورت سیگنال DPI (معرف موقعیت اولین گروه از میله‌های دسته D) افزایش پیدا می‌کند. افزایش این سیگنال موجب منفی شدن سیگنال e_D می‌شود. منفی شدن سیگنال e_D باعث تزریق اسید بوریک به درون سیال خنک کننده می‌گردد. بنابراین همان فرآیندی که قبلاً برای میله‌های دسته L و دسته D رخ داد، در مورد میله‌های دسته D و اسید بوریک صورت می‌پذیرد. بدین معنا که میله‌های دسته D با اثر میانی درجه حرارت متوسط خنک کننده به خارج قلب هدایت می‌شوند.

۵- شبیه‌سازی سیستم کنترل راکتور در نیروگاه بوشهر

۵-۱- کلیات

در شبیه‌سازی سیستم کنترل راکتور در نیروگاه هسته‌ای بوشهر فرض‌هایی وجود دارند که در این

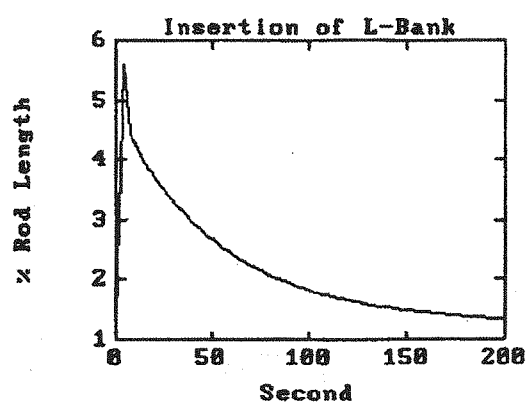
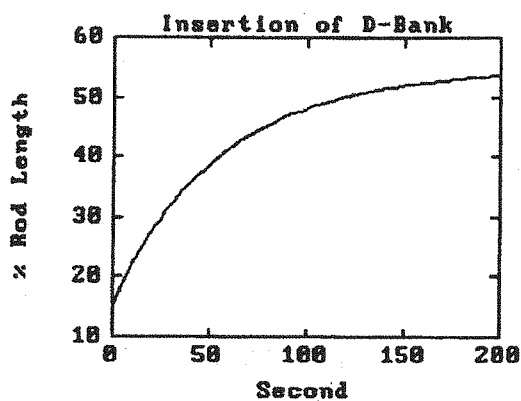
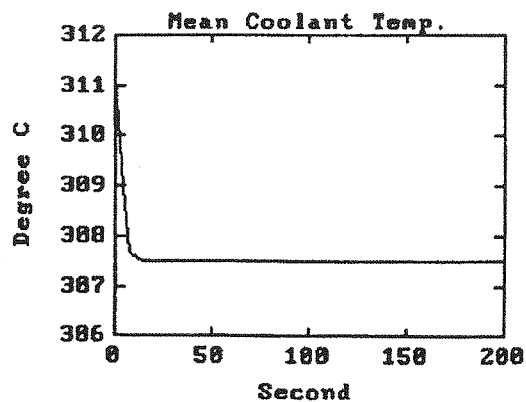
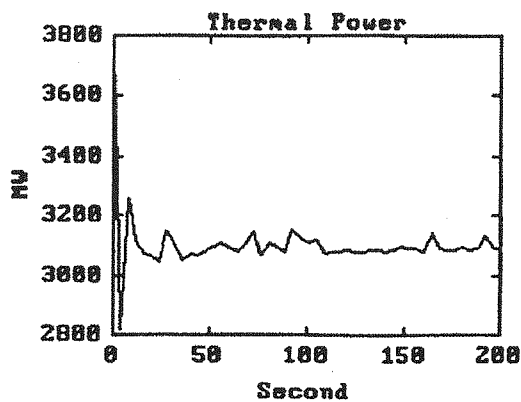
پیوست آمده است. پارامترهای مدل به کار گرفته شده برای قلب راکتور و سیستم های جانبی از مدارک نیروگاه بوشهر [۴ و ۵] استخراج گردیده که در فرآوری آنها از مطالعات قبلی [۸] و تجارب نویسنندگان نیز استفاده شده است.

چنان که در قسمت ۴-۱ اشاره شد، در هنگام کار عادی راکتور، عملاً تنها یک گروه (گروه اول) از میله های دسته D حرکت می کند. به همین دلیل در شبیه سازی تنها این گروه در نظر گرفته شده اند. در حقیقت دسته D مرکب از چهار میله کنترل باراکتیویته مساوی فرض شده است.

از آنجایی که رفتار سیستم کنترل در محدوده زمانی چند دقیقه مورد بررسی قرار گرفته، از اثرات مربوط به سموم زنون و ساماریوم که ثابت زمانی آنها در حدود ساعت می باشد نیز چشم پوشی شده است.

قسمت به معرفی آنها می پردازیم. از آنجا که در این شبیه سازی نحوه کار سیستم کنترل راکتور مورد نظر بوده، از اجزاء حلقه ثانویه از قبیل توربین، ژنراتور و چگالنده صرف نظر شده است. همچنین اثر مولد بخار نیز در نظر گرفته نشده است. در حقیقت فرض شده که حرارت تولیدی در قلب به یک چاه حرارتی بی نهایت 25°C داده می شود. به این ترتیب درجه حرارت خنک کننده در ورود به قلب ثابت فرض می گردد.

برای قلب از مدل یک نقطه ای به همراه سه گروه از نوترون های تأخیری استفاده شده است، به این ترتیب توزیع فضایی نوترون وجود ندارد و به همین دلیل از خطوط و سیگنال های مربوط به کنترل توزیع محوری توان صرف نظر شده است. در حقیقت این فرض معادل آن است که شار نوترون را در نیمه بالایی قلب با نیمه پایینی مساوی فرض کنیم. معادلات مدل نقطه ای قلب راکتور در



شکل (۱۱) نحوه تغییرات توان حرارتی درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L و موقعیت میله های دسته D وقتی درجه حرارت متوسط مینا از $311/2^{\circ}\text{C}$ به 308°C کاهش داده شود (شبیه سازی بدون در نظر گرفتن حلقه تزریق اسید بوریک)

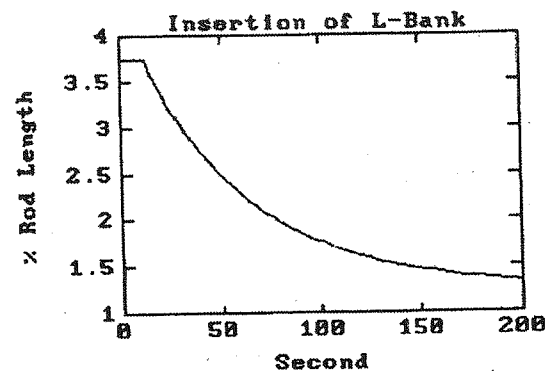
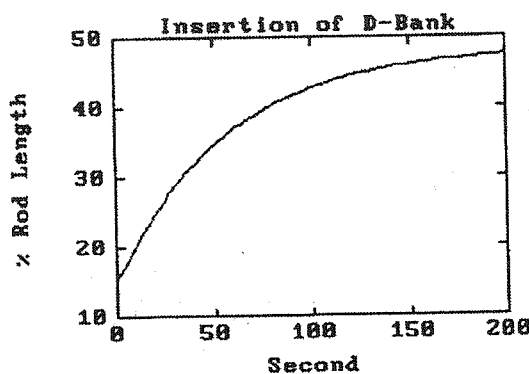
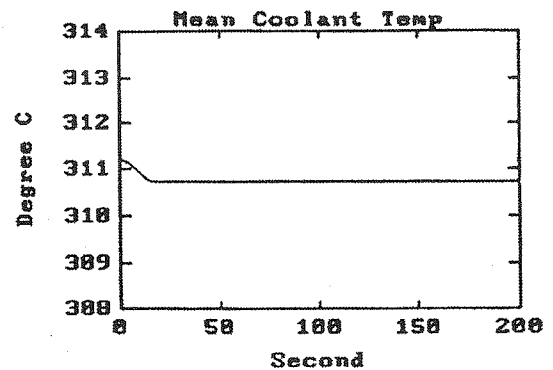
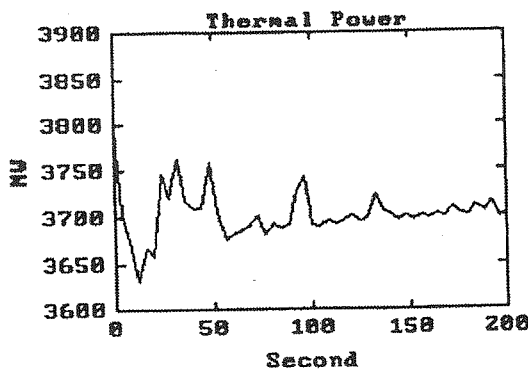
۵-۲. سیستم کنترل بدون حلقه تزریق اسید بوریک

الف. رفتار سیستم در اثر تغییر درجه حرارت متوسط مینا

در اولین گروه شبیه سازی، سیستم کنترل بدون حلقه تزریق اسید بوریک و آب خالص مورد توجه قرار گرفت. تحت این شرایط وجود میله های دسته D باعث تثبیت موقعیت میله های دسته L در موقعیت مینایشان می شود. شکل ۱۱ نحوه تغییرات توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L و موقعیت میله های دسته D را وقتی درجه حرارت متوسط مینا از $311/2^{\circ}\text{C}$ به 308°C کاهش داده شده است، برحسب زمان نشان می دهد. همانگونه که در نمودارهای شکل ۱۱ مشاهده می شود، دمای متوسط خنک کننده کاهش یافته و در یک محدوده از قبل تعیین شده با خطای خیلی کم اطراف نقطه مینا قرار می گیرد. در عین حال میله های دسته L پس از حرکت به سمت داخل قلب و تنظیم درجه حرارت متوسط خنک کننده، در اثر حرکت میله های دسته D، به موقعیت مینای خود بازگشته اند.

باید توجه داشت که جهش های ناگهانی که در توان حرارتی راکتور بوجود آمده، واقعی نیستند. زیرا ظرفیت حرارتی راکتور به اندازه کافی زیاد است تا تغییرات راکتیویته را که به صورت تغییرات توان ظاهر می شوند، مستهلک نماید. این جهش ها به خاطر استفاده از مدل ساده فشرده در شبیه سازی بوجود آمده است.

ب. رفتار سیستم در اثر تغییر موقعیت مینای میله های دسته L در شکل ۱۲ نحوه تغییرات توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L و موقعیت میله های دسته D در اثر تغییر موقعیت مینای میله های دسته L آورده شده است. در این شبیه سازی موقعیت مینای میله های دسته L از ۱۵ سانتی متر به ۵ سانتیمتر تغییر داده شده است. همانطور که نمودارها نشان می دهند ضمن آن که میله های دسته L به خاطر حرکت میله های دسته D به موقعیت مینای مورد نظر بازگشته اند، درجه حرارت نیز در یک ناحیه مرده از قبل تعیین شده اطراف نقطه مینا قرار می گیرد.



شکل (۱۲) نحوه تغییرات توان حرارتی درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L و موقعیت میله های دسته D وقتی موقعیت مینای میله های دسته L از ۳/۷۵ درصد به ۱/۲۵ درصد کاهش داده شود (شبیه سازی بدون در نظر گرفتن تزریق اسید بوریک)

۳-۵- سیستم کنترل با در نظر گرفتن حلقه تزریق اسید بوریک

در دومین گروه شبیه سازی، سیستم کنترل به صورت کامل، مشتمل بر میله های دسته L، دسته D و حلقه تزریق اسید بوریک و آب خالص مورد بررسی قرار گرفت. در این شرایط نیز وجود میله های دسته D، موجب تثبیت موقعیت میله های دسته L می گردد. از طرف دیگر حلقه تزریق اسید بوریک و آب خالص، میله های دسته D را پس از وارد شدن به درون قلب، به خارج آن برمی گرداند. شکل ۱۳ نحوه تغییر توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L و موقعیت میله های دسته D و تغییرات غلظت اسید بوریک را تحت همان تغییر درجه حرارت متوسط مینا که در قسمت ۲-۵ الف به آن اشاره شده نشان می دهد.

شکل (۱۴) نحوه تغییر توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L، موقعیت میله های دسته D و تغییر غلظت اسید بوریک را در اثر تغییر موقعیت مینای میله های دسته L نشان می دهد. در این شبیه سازی موقعیت مینای میله های دسته L از ۱۵ سانتی متر به ۵ سانتی متر تغییر داده شده است. حرکت میله های دسته D میله های دسته L را به موقعیت مینای آنها باز می گرداند.

۴-۵- بررسی رفتار سیستم ناشی از اختلال در درجه حرارت خنک کننده ورودی

در بخش ۱-۵ اشاره شد که در شبیه سازی از مدل سازی حلقه ثانویه صرف نظر شده و فرض شده است که حرارت تولید شده در قلب به یک چاه حرارتی بی نهایت داده می شود. به گونه ای که درجه حرارت سیال خنک کننده در ورود به قلب ثابت می باشد. در این قسمت اثر حلقه ثانویه را به صورت یک تغییر در درجه حرارت سیال خنک کننده در ورود به قلب طراحی می نمایم. می دانیم اگر بار اعمالی به توربین افزایش پیدا کند، به دلیل مصرف بخار زیادتر و لزوم تولید بیشتر بخار، حرارت بیشتری از مولد بخار گرفته می شود و به این ترتیب دمای سیال خنک کننده در خروج از مولد بخار و ورود به قلب کاهش می یابد. برعکس اگر تقاضای بار کاهش یابد، درجه حرارت سیال خنک کننده در ورود به قلب بالا می رود. باتوجه به این نکته اختلال ورودی به صورت یک پله به اندازه 5°C که در لحظه $t=10$ ثانیه شروع می شود طراحی گردید. پاسخ سیستم به این

اختلال که شامل نحوه تغییرات توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L و موقعیت میله های دسته D در سیستم کنترل بدون حلقه تزریق اسید بوریک می باشد، در شکل ۱۵ آورده شده است. مشاهده می شود که سیستم کنترل به خوبی توانسته است این اختلال را دفع کند. یعنی برخلاف افزایش درجه حرارت سیال خنک کننده در ورود به قلب، درجه حرارت متوسط سیال خنک کننده در مقدار مینای خود ثابت باقی مانده است. شکل (۱۶) اثر اعمال همان اختلال را به سیستم کنترل کامل (مشتمل بر حلقه تزریق اسید بوریک) نشان می دهد.

۵-۵- بررسی رفتار سیستم در هنگام وجود نویز اندازه گیری

در این قسمت رفتار سیستم را هنگام وجود نویز در اندازه گیری درجه حرارت متوسط خنک کننده مورد بررسی قرار می دهیم. نویز اندازه گیری به صورت یک متغیر تصادفی با دامنه ای بین 2°C و 2°C طراحی گردیده است. شکل ۱۷ پاسخ متغیرهای مختلف را در سیستم کنترل بدون حلقه تزریق اسید بوریک به این نویز نشان می دهد. پاسخ سیستم کنترل کامل (شامل حلقه تزریق اسید بوریک) در شکل ۱۸ آورده شده است. شکل های ۱۷ و ۱۸ نشان می دهند که سیستم کنترل در مقابل نویز اندازه گیری مقاوم است. لازم به ذکر است که منفی شدن تغییر غلظت اسید بوریک در شکل ۱۸ به معنای تزریق آب به جای سیال خنک کننده و کاهش غلظت اولیه اسید بوریک می باشد.

۶- خلاصه و نتیجه گیری

در مطالب قبل پس از معرفی رفتار کلی یک نیروگاه هسته ای و بررسی تدبیرهای فنی کنترل راکتور، هدف های کنترل قلب راکتور در یک نیروگاه PWR معرفی گردید. سپس ساختار بلوکی قلب راکتور جهت تأمین اهداف کنترل بررسی شد. رفتار سیستم کنترل براساس مدل یک نقطه ای قلب و پارامترهای حلقه های کنترل شبیه سازی شد. نتایج شبیه سازی برای حالات مختلف بر این اساس است که اهداف کنترل یا به کار بردن سیستم کنترل مربوطه، به صورت مطلوب تحقق یافته اند. از نتایج قابل توجه تحلیل سیستم کنترل فوق این است که:

۱- میله های دسته L ضمن اینکه به عنوان محرک اصلی جهت تنظیم درجه حرارت متوسط سیال خنک کننده عمل می نمایند، به خاطر مسئله حفاظت راکتور بایستی تا حد امکان در خارج قلب قرار گیرند. تثبیت وضعیت میله های دسته L خود از طریق میله های دسته D انجام می گیرد. تثبیت این میله ها نیز (به خاطر مسائل حفاظتی و عملیاتی قلب راکتور) توسط حلقه تزریق اسید بوریک و آب انجام می پذیرد.

۲- با وجودی که فرآیند سیستم کنترل، یک سیستم چند متغیره است، حلقه های کنترل به نحوی طراحی شده اند که در حالت دائمی رفتار مستقلی داشته باشند. به عبارت دیگر در حالت دائمی حلقه های کنترل، نامداخل هستند. مسئله نامداخل سازی در این طراحی به نوع ابتکاری حل شده است. تطبیق این روش، با روش های تحلیلی موجود مسئله جالب و قابل بررسی است.

۳- اثر بارگذاری مولد بخار نیروگاه به صورت یک سیگنال اختلال در درجه حرارت متوسط خنک کننده در ورود به قلب در نظر گرفته شد. بدین صورت امکان بررسی مستقل رفتار سیستم کنترل قلب راکتور فراهم گردید.

۴- بررسی رفتار سیستم در قبال اختلال های وارده به سیستم، نشان دهنده قدرتمندی^{۲۶} سیستم کنترل در مقابله با آنها می باشد.

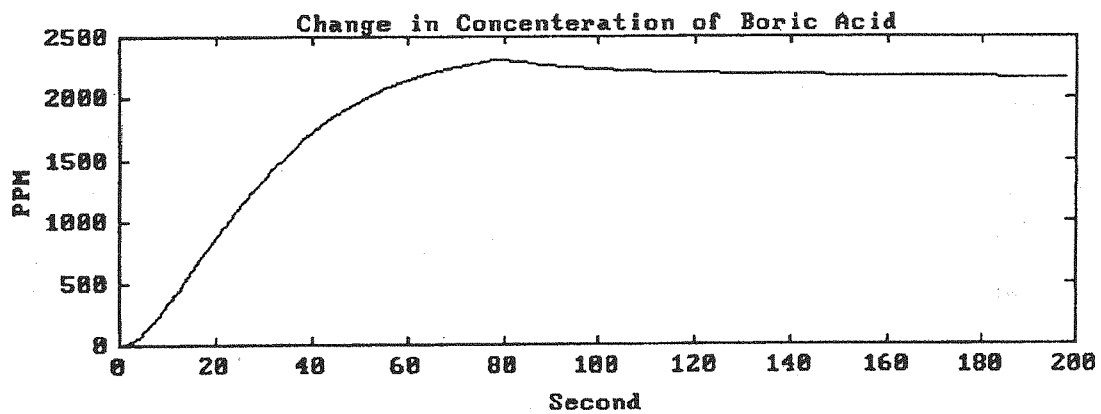
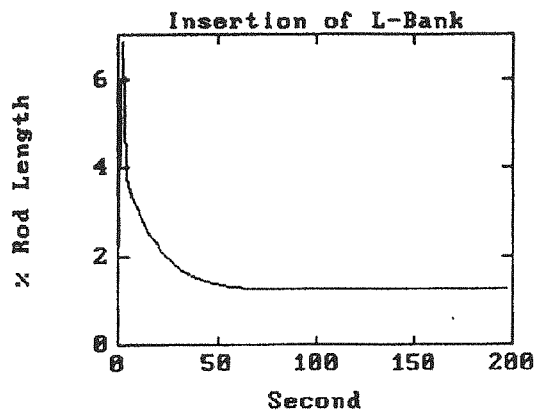
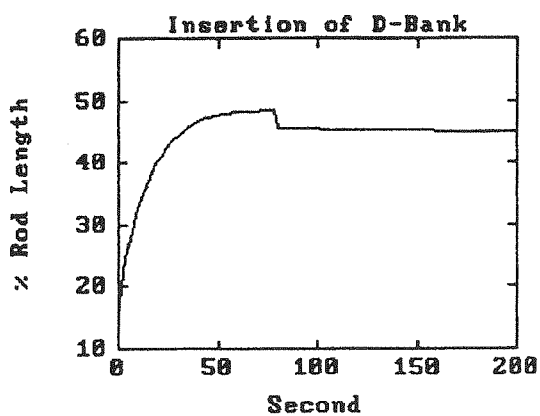
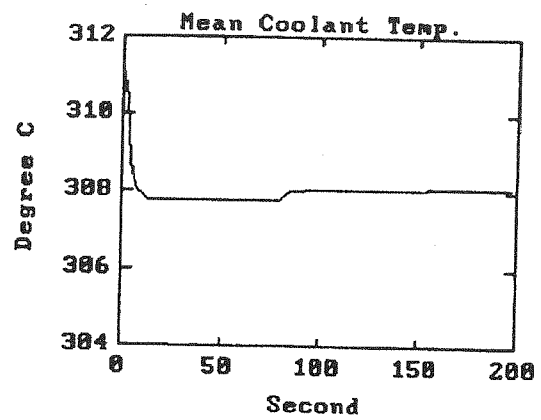
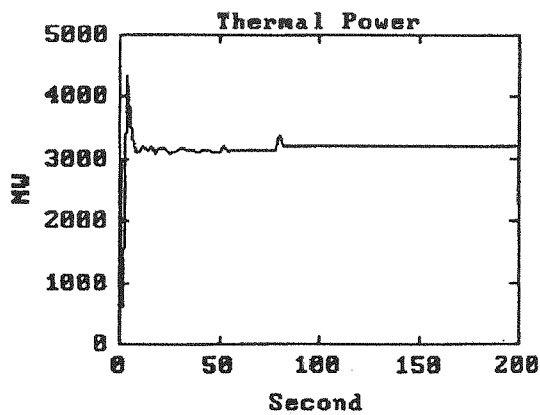
۷- تشکر و قدردانی

شایسته است که از همکاران بخش کنترل و ابزار دقیق شرکت توسعه صنایع انرژی پیشگام (وابسته به سازمان انرژی اتمی ایران) به خصوص آقایان مهندس کاظم آیت الهی و مهندس مهدی تفویضی مسئولین محترم این بخش، به خاطر حمایت های بی دریغ و رهنمودهای مؤثرشان تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از خانم ها، اکرم باقر صاد دانشجوی دانشگاه صنعتی اصفهان به خاطر کمک در تهیه برنامه های شبیه سازی و کارمن امیرچیان به خاطر تایپ مقاله سپاسگزاری می شود.

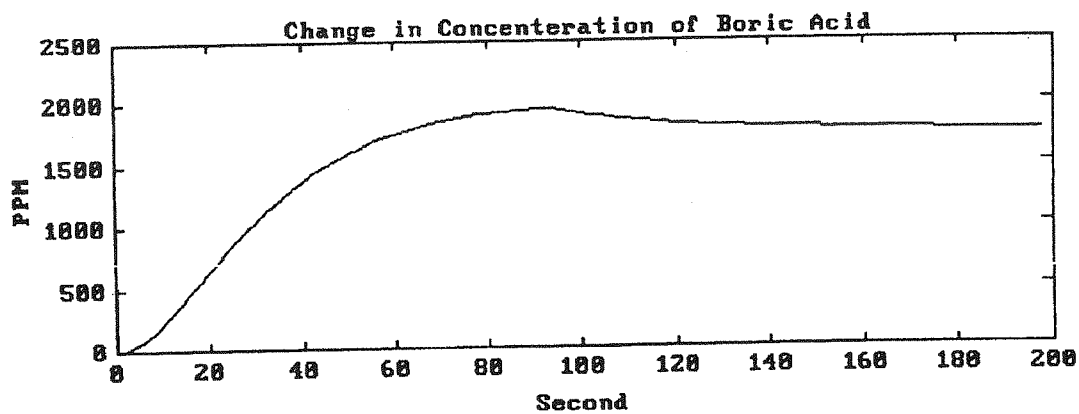
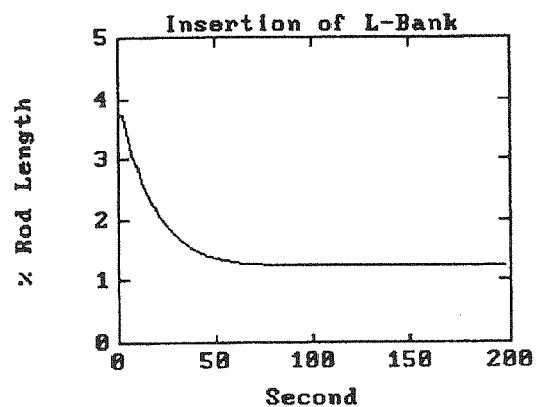
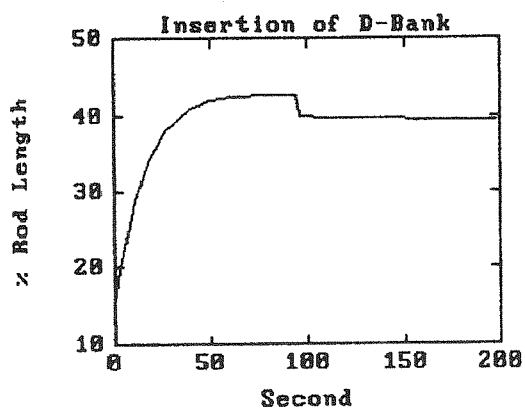
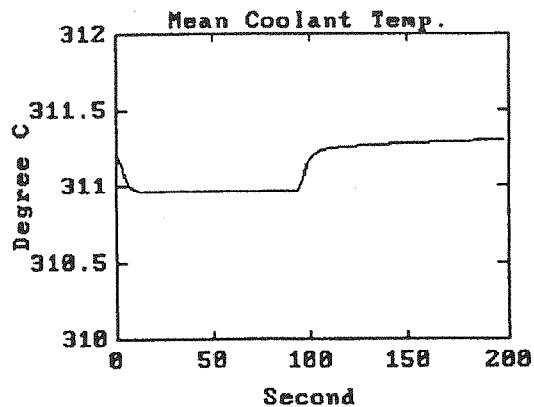
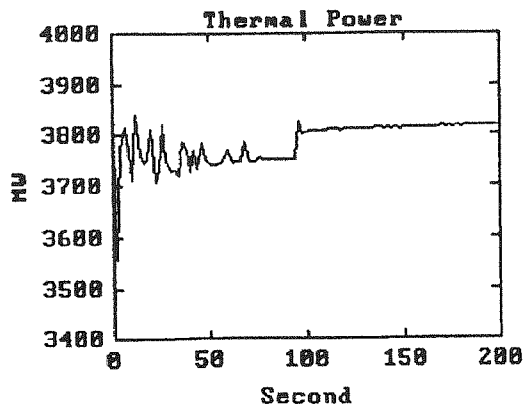
فهرست نمادها

l^* : طول عمر متوسط مؤثر برای یک راکتور با ابعاد محدود
 m^0 : جریان جرمی سیال خنک کننده در قلب راکتور

- t: متغیر زمان
A: سطح انتقال حرارت قلب راکتور
 C_c : گرمای ویژه سیال خنک کننده
 C_i : غلظت پیش رسان های گروه i- ام
 C_F : گرمای ویژه سوخت
D: دسته ای از میله های کنترل
KMT: سیستم کنترل درجه حرارت متوسط قلب راکتور
L: دسته ای از میله های کنترل
 M_c : جرم سیال خنک کننده در قلب راکتور
 M_F : جرم سوخت در قلب راکتور
P: توان حرارتی تولیدی توسط قلب راکتور
 P_S : فشار بخار خروجی از مولد بخار هسته ای
 T_{av} : دمای متوسط سیال خنک کننده
 T_{av0} : دمای متوسط اولیه سیال خنک کننده
 T_c : دمای سیال خنک کننده در ورود به قلب
 T_F : دمای سوخت در داخل قلب
 T_{F0} : دمای اولیه سوخت در قلب راکتور
 T_H : دمای سیال خنک کننده در خروج از قلب
 T_S : دمای بخار خروجی از کمولد بخار هسته ای
U: ضریب انتقال حرارت کلی از سوخت به خنک کننده
 α_c : ضریب پس خوراند راکتیویته سیال خنک کننده
 α_F : ضریب پس خوراند راکتیویته سوخت
 β : کسر نوترونهاى تأخیری
 β_i : کسر نوترونهاى تأخیری که توسط گروه i- ام از پیش رسان ها تولید می شوند
 λ_i : نیمه عمر گروه i- ام پیش رسانهای نوترون
 ρ : راکتیویته ورودی به قلب راکتور
 ρ_A : راکتیویته مربوط به اسید بوریک
 ρ_c : راکتیویته پس خوراند مربوط به سیال خنک کننده
 ρ_D : راکتیویته مربوط به میله های دسته D
 ρ_F : راکتیویته پس خوراند مربوط به سوخت
 ρ_L : راکتیویته مربوط به میله های دسته L

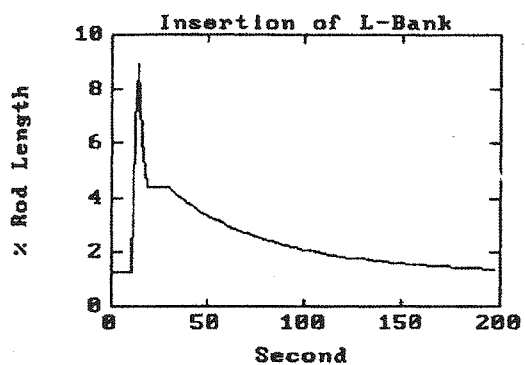
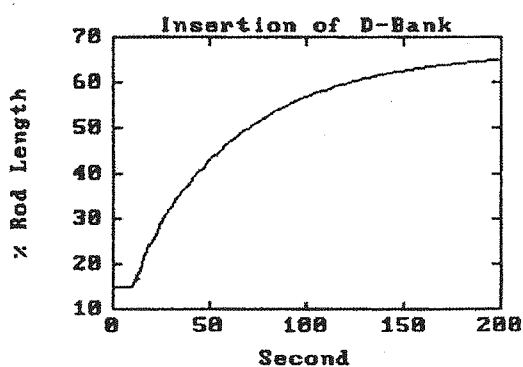
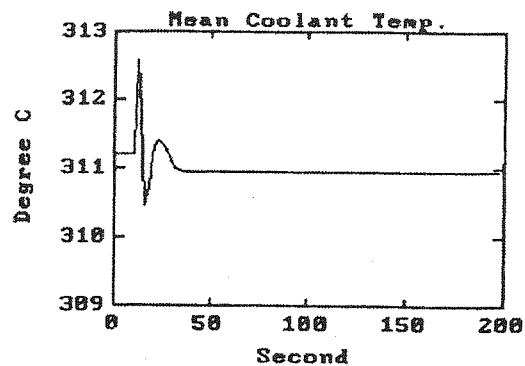
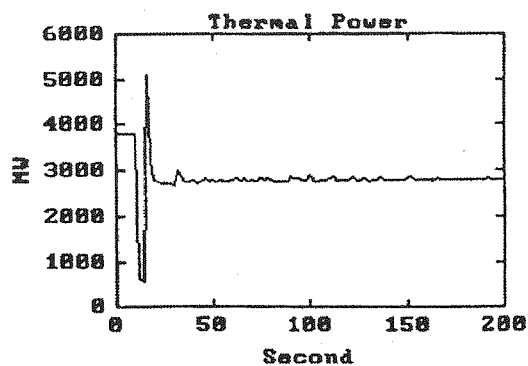


شکل (۱۳) نحوه تغییرات توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L، موقعیت میله های دسته D و تغییرات غلظت اسید بوریک وقتی درجه حرارت متوسط مینا از $311/2^{\circ}\text{C}$ به 308°C کاهش داده شود.

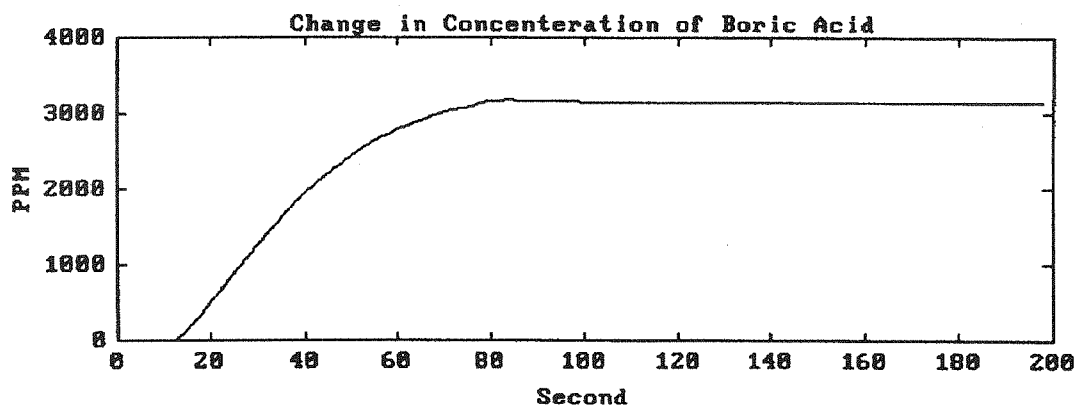
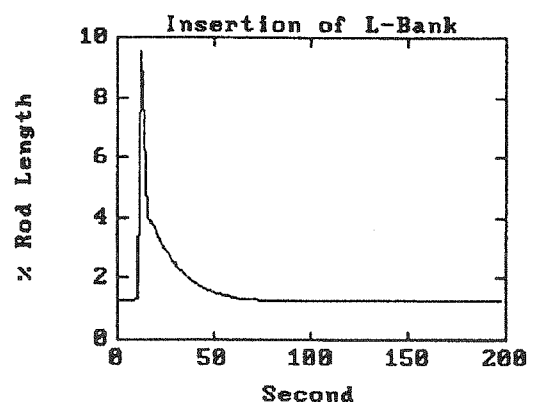
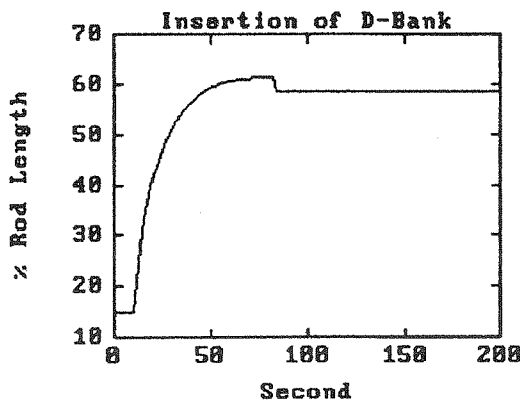
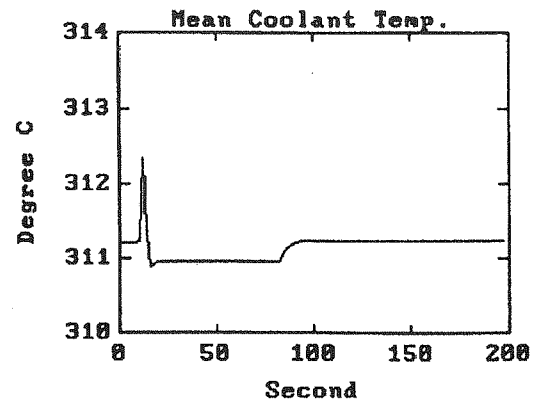
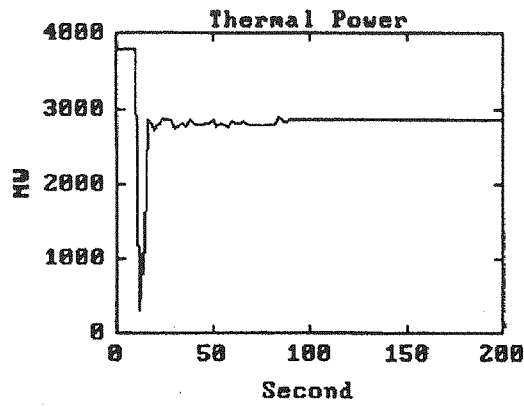


شکل (۱۴) نحوه تغییرات توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L، موقعیت میله های دسته D و تغییرات غلظت اسید بوریک وقتی موقعیت مبنای میله های دسته L از ۳/۷۵ درصد به ۱/۲۵ درصد کاهش داده شود.

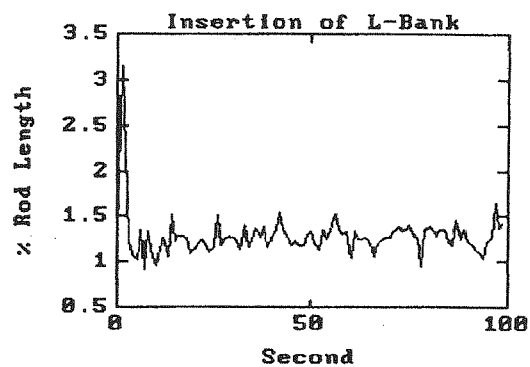
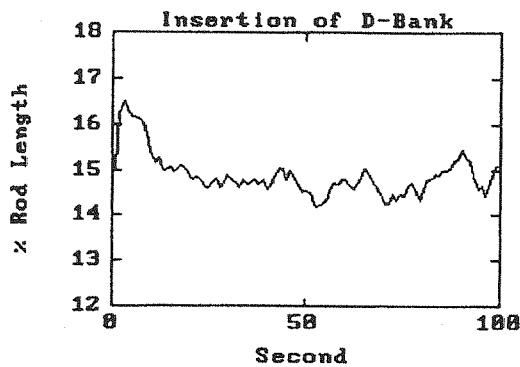
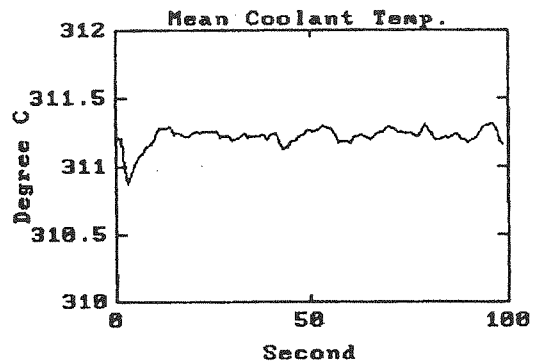
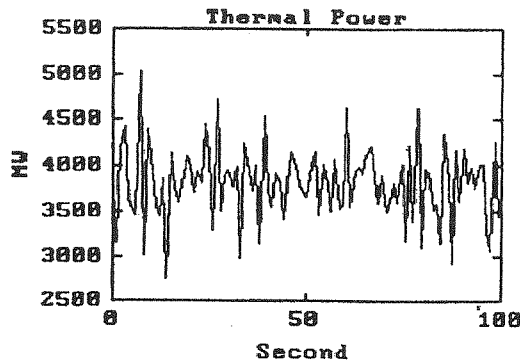
- | | |
|---|------------------------------|
| 1- Pressurized Water Reactor | 14- Poison |
| 2- Indirect Control Systems | 15- Xenon |
| 3- Coolant | 16- Fuel Assembly |
| 4- Steam Generator | 17- L-Bank & D-Bank |
| 5- Moderator | 18- Lumped |
| 6- Plant | 19- Set Point |
| 7- Part Load Diagram | 20- Coolant Mean Temperature |
| 8- Constant T_{av} Program | 21- Selector |
| 9- Pressurizer | 22- Knee Point |
| 10- Turbine Follows Reactor or Forward Control | 23- Plant Process |
| 11- Reactor Follows Turbine or Backward Control | 24- Steper Motor |
| 12- Start up or Shut down | 25- Infinite Heat Sink |
| 13- Burn up | 26- Robustness |



شکل (۱۵) نحوه تغییرات توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L و موقعیت میله های دسته D وقتی اختلالی به صورت افزایش پله ای دمای سیال خنک کننده در ورود به راکتور به اندازه 5°C در لحظه $t=10\text{S}$ به سیستم وارد شود (شبیه سازی بدون در نظر گرفتن حلقه تزریق اسید بوریک)



شکل (۱۶) نحوه تغییرات توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L، موقعیت میله های دسته D و تغییرات غلظت اسید بوریک وقتی اختلالی به صورت افزایش پله ای دمای سیال خنک کننده در ورود به راکتور به اندازه 5°C در لحظه $t = 10\text{S}$ به سیستم وارد شود.



شکل (۱۷) نحوه تغییرات توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L و موقعیت میله های دسته D وقتی نویزی با دامنه تصادفی بین $+2^{\circ}\text{C}$ و -2°C در اندازه گیری درجه حرارت متوسط خنک کننده وجود دارد (شبیه سازی بدون در نظر گرفتن حلقه تزریق اسید بوریک)

پیوست

$$T_{av} = \frac{1}{2}(T_C + T_H) \quad (5)$$

معادلاتی که به عنوان مدل در شبیه سازی قلب راکتور مورد استفاده قرار گرفته اند به شرح زیر می باشند [۹ و ۱۰]:

و پس خوراند منفی راکتیویته مربوط به سوخت و خنک کننده نیز به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{(\rho - \beta)}{l^*} P + \sum_i^3 \lambda_i C_i \quad (1)$$

$$\rho_F = \alpha_F (T_F - T_{F0}) \quad (6)$$

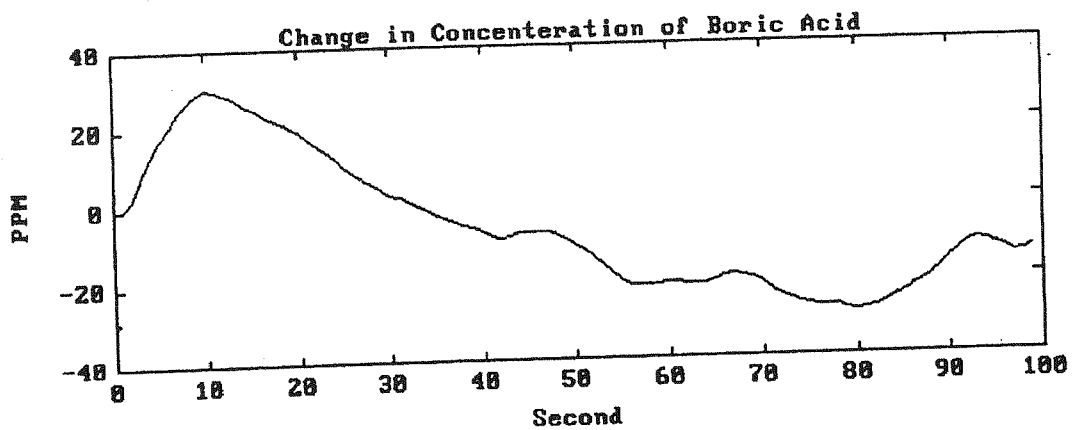
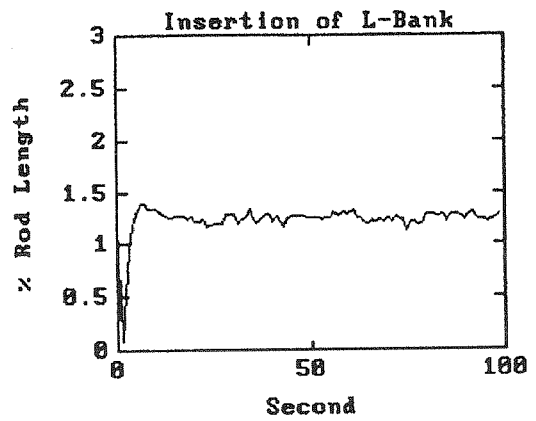
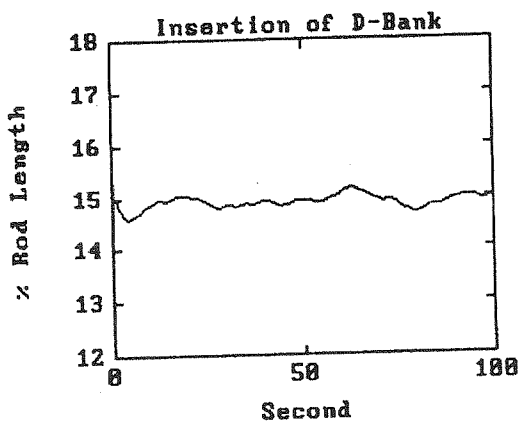
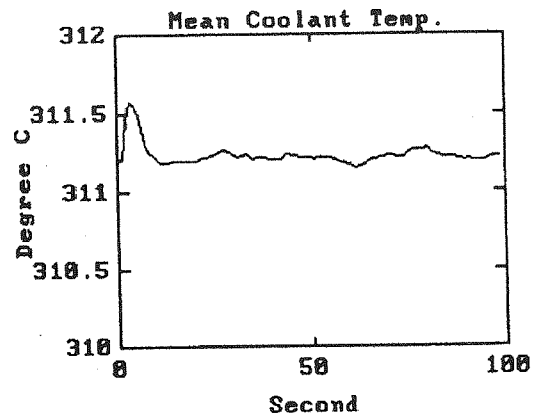
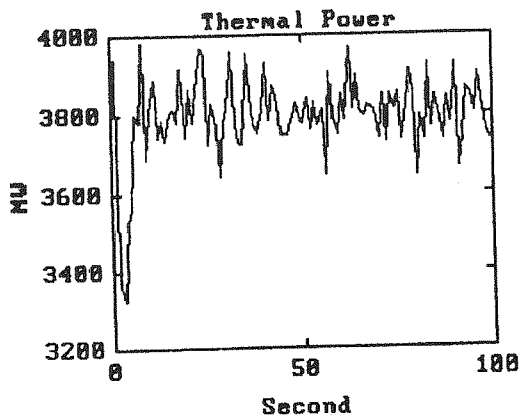
$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{l^*} P - \lambda_i C_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$\rho_C = \alpha_C (T_{av} - T_{av0}) \quad (7)$$

$$\frac{dT_F}{dt} = \frac{P}{M_F C_F} - \frac{U.A}{M_F C_F} (T_F - T_{av}) \quad (3)$$

$$\rho = \rho_L + \rho_D + \rho_A + \rho_F + \rho_C \quad (8)$$

$$\frac{dT_{av}}{dt} = \frac{U.A}{M_C C_C} (T_F - T_{av}) - \frac{m_c}{M_C} (T_H - T_C) \quad (4)$$



شکل (۱۸) نحوه تغییرات توان حرارتی، درجه حرارت متوسط خنک کننده، موقعیت میله های دسته L، موقعیت میله های دسته D و تغییرات غلظت اسید بوریک وقتی نوبتی با دامنه تصادفی بین $+2^{\circ}\text{C}$ و -2°C در اندازه گیری درجه حرارت متوسط خنک کننده وجود دارد.

مراجع

- [1] Todreas, N. E. & Kazimi, M. S. "Nuclear System I", Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1990.
- [2] Schultz, M. A. "Control of Nuclear Reactors and Power Plants", McGraw-Hill, New York, 1961
- [3] International Atomic Energy Agency, "Nuclear Power Plant Instrumentation and Control, A Guide Book", Technical Reports No. 239, Vienna, 1984.
- [4] KWU, "Preliminary Safety Analysis Report of Nuclear Power Plant Iran 1 & 2", Vol. 1,2 1976.
- [5] KWU, "Nuclear Power Plant Iran 1 & 2, Control and Instrumentation", Vol, 8, 1976.
- [6] KWU, " KWU-SIMULATOR, Detailed Plant System Specification, Reactor Controls, Limitations and other Functions", 1977.
- [7] Karlsruhe Nuclear Research enter, "Instrumentation and Control of Nuclear Power Plants, Main Reactor Control Systems and Load Follow Behaviour", IAEA Interregional Training Course, 19 April-19 May 1993.
- [۸] کرباسیان، علی، «محاسبه و بررسی ترموهیدرولیک انتقال و تنظیم قدرت بین مدارهای اول و دوم نیروگاه اتمی بوشهر در حالت گذرا»، رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۲.
- [۹] شرکت توسعه صنایع انرژی پیشگام، «فرآیندهای نوترونی در قلب راکتور»، گزارش داخلی پروژه سیمولاتور مهندسی، RPT4-104-IC-004، ۱۳۷۳.
- [۱۰] شرکت توسعه صنایع انرژی پیشگام، «کاهش تعداد گروه های نوترون های تأخیری» گزارش داخلی پروژه سیمولاتور مهندسی، RPT4-104-IC-005، ۱۳۷۳.