

طراحی و تولید یک سیستم نرم‌افزار شبیه‌ساز آزمایشگاه راکتور هسته‌ای

سیدعلی میرعشقی* و ژیلا جمشیدی**

بخش مهندسی هسته‌ای، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۷۷/۱۰/۲۳ - دریافت نسخه‌نهایی: ۷۸/۱۰/۲۲)

چکیده - در مقاله حاضر، ساختار اساسی یک سیستم نرم‌افزاری برای شبیه‌سازی محیط آزمایشگاه راکتور، با استفاده از یکی از متدلوژیهای مهندسی نرم‌افزار تحت عنوان OMT، با استفاده از معادله‌های نقطه‌ای حاکم بر راکتور، ارائه شده است. همچنین توانمندیهای مختلف شبیه‌ساز در آموزش مفاهیم پایه فیزیک راکتور مورد بحث قرار گرفته است. در این آزمایشگاه مجازی، قابلیت انجام هفت آزمایش راکتور تحت عنوانهای: راه‌اندازی و کنترل راکتور، اندازه‌گیری جرم بحرانی راکتور، اندازه‌گیری قدرت گرمایی راکتور، اندازه‌گیری ارزش راکتیویته میله‌های کنترل، اثر سموم در قلب راکتور، اثر خلاء در قلب راکتور و سقوط میله کنترل ظریف وجود دارد. امکانات کاربری آسان و راهنماییهایی موجود در سیستم، محیطی کاملاً مناسب را برای انجام آزمایشها برای کاربر فراهم می‌سازند. همچنین ارائه نتایج و اطلاعات گرافیکی و متنی مربوط به هر آزمایش در طول انجام آزمایش و پس از آن، به منظور دستیابی به جزئیات بیشتر در مورد آزمایشها، از دیگر امکاناتی است که نرم‌افزار در اختیار کاربر قرار می‌دهد و مجموعه نرم‌افزار را به صورت یک شبیه‌ساز آموزشی توانمند و با کاربری آسان مطرح می‌کند.

Design and Implementation of a Reactor Physics Laboratory Simulation Software

A. Miresghhi and J. Jamshidi

Department of Nuclear Engineering, Sharif University of Technology

ABSTRACT- *The basic structure of a reactor physics laboratory environment simulation software, developed using object modeling technique (OMT), and based on the reactor point kinetic equation, is presented. Also, various capabilities of the simulator in teaching the fundamental concepts of reactor physics are discussed.*

In this virtual laboratory, student can perform seven different experiments, namely, reactor start up and control, critical mass measurement, critical thermal power measurement, control rod reactivity worth measurement, fuel poisons effects, reactor core void effects, and fine control rod drop. The user-friendly software and the technical instructions embedded provide a convenient environment for performing the experiments. The result presentation, in text and graphical format, both during and after the experiments, is another facility making the software powerful and an easy-to use educational software.

* - استاد

** - دانشجوی کارشناسی ارشد

نرم افزار را بیان می کنیم. در آخر نیز با مرور نتایج حاصل از آزمایشها صحت و اعتبار مدلها و کدهای به کار گرفته شده در نرم افزار را بررسی می کنیم.

۲- مبانی نظری

آنچه به عنوان مبانی نظری در نرم افزار مورد استفاده قرار گرفته در حقیقت مفاهیم پایه و فرمولبندیهای مربوط به مدل سینتیک نقطه ای راکتور و اثرات پس خوراندنهای درجه گرما و سموم راکتور است که در بسیاری از کتب و مراجع [۳-۵] به تفصیل مورد بحث قرار گرفته است. در این مقاله تنها به نگاهی گذرا به فرمولهای مورد نظر بسنده شده است.

معادله های نقطه ای راکتور با فرض ناوابسته بودن ضرایب به مکان و متوسط گیری آنها بر روی توزیع سرعت نوترون و با حذف وابستگی مکانی توزیع نوترونها به صورت زیر بیان می شوند،

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) + q(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

که در آن $n(t)$ و $C_i(t)$ به ترتیب چگالی نوترونها و غلظت نیا هسته ها هستند. ρ راکتیویته قلب و β_i و λ_i به ترتیب درصد تولید نوترونهای تأخیری و ثابت واپاشی نیا هسته مربوط به گروه i ام، I زمان تولید نوترون و q شدت تابش چشمه اند.

برای کامل کردن مدل، به در نظر گرفتن اثرات مربوط به پس خوراندن در قلب راکتور ضروری است. دو اثر پس خوراندن غالب در قلب راکتور عبارتند از دما و تولید سموم در قلب که لازم است آنها را نیز مدلسازی کنیم.

۲-۱- پس خوراندن دما

اگر ضریب پس خوراندن راکتیویته متوسط قلب، α_T باشد، مقدار راکتیویته حاصل از تغییرات دما عبارت خواهد بود از

$$\delta_p = -\alpha_T (T - T_0) \quad (3)$$

که در آن T_0 دمایی است که در آن دما پس خوراندن ناشی از دمای صفر است [۳].

یکی از انواع راکتورهای هسته ای، راکتورهای تحقیقاتی می باشند که انواع آنها امروزه در کشورهای مختلف جهان برای انجام پژوهشهای بنیادی و یا کاربردی و نیز به عنوان یک وسیله آموزش فیزیک راکتور و فیزیک نوترون مورد استفاده قرار می گیرند. محصول عمده این راکتورها، پرتوهای نوترون سریع و گرمایی اند. این نوترونها یا برای پرتودهی مواد مختلف در قلب راکتور مورد استفاده قرار می گیرند، و یا از طریق مجرای پرتودهی به خارج از راکتور جریان می یابند. راکتورهای تحقیقاتی اغلب علاوه بر انجام مأموریت پژوهشی، به منظور آموزش نیز مورد استفاده قرار می گیرند [۱]. از آنجا که ساخت و بهره برداری از چنین راکتورهایی مستلزم صرف امکانات و هزینه های بالایی است، امکان دسترسی دانشجویان همه دانشگاهها به این گونه راکتورها و انجام آزمایشها در محیط واقعی راکتور وجود ندارد، و بنابراین استفاده از یک شبیه ساز رایانه ای به صورت یک نرم افزار آموزشی، نه تنها منطقی، بلکه کاملاً ضروری است. چنین نرم افزاری با ایجاد یک محیط آزمایشگاهی شبیه سازی شده راکتور، امکانات لازم برای انجام آزمایشهای مختلف بر روی راکتور توسط کاربر را فراهم می سازد. به صورتی که با دخالت موثر کاربر در محیط برای تغییر پارامترهای مختلف قلب راکتور و اعمال کنترلهای لازم بر روی آن و همچنین استفاده از راهنماییهای موجود در محیط و سپس انعکاس نتایج و اطلاعات به صورت گرافیکی و متنی، به منظور دستیابی به جزئیات بیشتر در مورد هر آزمایش، زمینه مناسب برای انجام آزمایشها فراهم می شود. شبیه سازیهایی که پیشتر در این زمینه انجام شده اند، جنبه های آموزشی کمتری داشته اند و از داشتن قابلیت های کاربردی آسان بی نصیب بوده اند. البته شبیه سازیهایی به منظور آموزش اپراتوری با در نظر گرفتن نکات مربوط به مسائل نوترونیک و ترموهیدرولیک راکتور با استفاده از کدهای محاسباتی قلب راکتور نیز انجام گرفته اند که آنها نیز از داشتن امکانات کاربردی آسان برای دانشجویان و مبتدیان محروم اند. [۲]

در این مقاله در مورد چگونگی تحلیل، طراحی و پیاده سازی یک نرم افزار آموزشی که با استفاده از معادله های حاکم بر مدل نقطه ای راکتور و یکی از مدل های توسعه نرم افزار تحت عنوان OMT انجام گرفته است، به بحث می پردازیم و امکانات موجود در

تغییرات دما در راکتور با قدرت $p(t)$ ، با نوشتن تعادل ترمودینامیکی در راکتور به صورت زیر بیان می‌شود

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{mc} p(t) - \frac{2W}{m} T(t) \quad (4)$$

که W و C و m به ترتیب دبی گرمایی، ظرفیت گرمایی ویژه و جرم خنک کننده موجود در قلب‌اند [۱].

۲-۲- پس‌خوراند تولید سموم

زینان یکی از سموم تولید شده در قلب است که عمده اثرات پس‌خوراند نیز ناشی از آن است. زینان (X_e^{135}) به طور مستقیم از شکافت U^{235} و یا از واپاشی I^{135} تولید می‌شود و کاهش آن نیز با جذب نوترون و یا واپاشی بتا صورت می‌گیرد. بنابراین معادله‌های حاکم بر غلظت یدوزینان را به صورت زیر می‌توان نوشت [۳] و [۶]:

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \sum_f \phi - \lambda_I I \quad (5)$$

$$\frac{dX}{dt} = \gamma_X \sum_f \phi + \lambda_I I - \sigma_a^X X \phi - \lambda_X X \quad (6)$$

$I =$ چگالی اتمی ید

$X =$ چگالی اتمی زینان

$\gamma_X =$ درصد تولید زینان

$\gamma_I =$ درصد تولید ید

$\sigma_a^X =$ سطح مقطع جذب نوترون زینان

$\phi =$ شار نوترون

$\sum_f =$ سطح مقطع ماکروسکوپی شکافت

به طور عمده، اثر زینان بر تغییر راکتیویته از جهت کاهش فاکتور f (بهره‌گیری گرمایی) است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\delta\rho = - \frac{\sigma_a^X X}{\sum_a^{core}} \quad (7)$$

که در آن \sum_a^{core} سطح مقطع ماکروسکوپی جذب نوترون در قلب است.

۳- شبیه‌سازی و متدلوژی تهیه نرم‌افزار

شبیه‌سازی، تقلیدی از عملکرد یک فرایند یا سیستم واقعی در طی زمان است. در شبیه‌سازی با ایجاد مدل‌هایی، سرگذشتی

مصنوعی از رفتار سیستم در طول زمان ایجاد می‌شود و سپس با مشاهده این سرگذشت، صحت و اعتبار مدل‌ها بررسی می‌شوند. این مدل‌ها معمولاً شکل مجموعه‌ای از فرضیه‌های مربوط به عملکرد سیستم را به خود می‌گیرند که این فرضیه‌ها در قالب روابط ریاضی، منطقی و نمادین بین نهادها یا اهداف موردنظر سیستم تبیین می‌شوند [۷]. به منظور پیاده‌سازی مدل‌های ارائه شده بر روی رایانه، ایجاد، تکمیل و توسعه نرم‌افزار باید براساس یک متدلوژی تهیه نرم‌افزار پایه‌گذاری شود.

متدلوژی مهندسی نرم‌افزار، تولید نرم‌افزار به شکل ساختار یافته، با استفاده از مجموعه‌ای از روشها و علائم خاص است. فرایند تولید نرم‌افزار معمولاً به صورت یک چرخه عمر که شامل چند مرحله است، سازماندهی می‌شود. [۸ و ۹].

یک چرخه عمر کامل، شامل فرموله کردن اولیه مسئله، تحلیل، طراحی و، پیاده‌سازی و آزمون نرم‌افزار و همچنین فازهای عملکرد مانند نگهداری و توسعه است [۹]. یکی از متدلوژی‌های مطرح در مهندسی نرم‌افزار OMT^۱ است که یک متدلوژی شیء‌گراست و تمام مراحل چرخه عمر را شامل می‌شود [۱۰].

متدلوژی‌های شیء‌گرا فرض خاصی را در مورد ساختمان نرم‌افزار قبول دارند که تحت عنوان "مدل شیء" خوانده می‌شود و همان طور که از نام آن پیداست، این مدل، بهترین راه برای فهمیدن یک برنامه اجرایی را، متصور شدن آن به صورت تجمعی از اشیاء پیشنهاد می‌کند. هر شیء فقط قسمت کوچکی از کار سیستم را اجرا می‌کند و رفتار کلی سیستم با تعامل بین اشیاء مختلف، تأمین می‌شود. [۱۱-۱۴].

هر شیء دارای تعدادی صفت است که ساختمان داده سیستم را تشکیل می‌دهد و نیز دارای تعدادی تابع یا عملگر است که برای دسترسی و تجدید صفات شیء و ایجاد ارتباط شیء با دنیای خارج از آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. ارتباط بین اشیاء که توسط راهکار پیغام‌دهی انجام می‌شود، عملکرد کلی سیستم را امکانپذیر می‌سازد [۱۵ و ۱۶].

متدلوژی OMT شامل سه مرحله اساسی است که عبارت‌اند از تحلیل، طراحی و پیاده‌سازی سیستم که برای ساختمان هر سیستم باید به دقت انجام شوند [۱۰]. به دنبال به توضیح مختصری در مورد چگونگی دنبال کردن این مراحل در مورد سیستم شبیه‌سازی

به عنوان نمونه برای سناریو اندازه گیری قدرت گرمایی راکتور و کنترل دستی راکتور، سلسله رویدادها به صورت شکل‌های (۲) و (۳) هستند. نمودار حالت تهیه شده برای کلاس صفحه کنترل در شکل (۴) نشان داده شده است. این نمودار نشان‌دهنده همه رویدادهایی است که به صفحه کنترل فرستاده شده‌اند و یا از صفحه کنترل برای دیگر اشیا ارسال شده‌اند. در واقع هر سناریو یا سلسله رویدادهای مربوط به آن یک مسیر را در نمودار حالت طی می‌کند. در مدل وظیفه‌مندی توابعی که چگونگی محاسبه مقادیر خروجی از ورودی را نشان می‌دهند، بدون در نظر گرفتن ساختمان اشیا و ترتیب رویدادها، معرفی می‌شوند [۱۰]. این توابع در پیوست (۱) ارائه شده‌اند.

۳-۲- مرحله طراحی

پس از ارائه سیستم دنیای واقعی توسط مدل‌های مرحله تحلیل، نوبت به طراحی می‌رسد. طراحی شامل دو قسمت یکی طراحی سیستم و دیگری طراحی شیء است. در طراحی سیستم، ساختار سطح بالای سیستم مشخص می‌شود [۱۹ و ۲۰]. سیستم آزمایشگاه راکتور دارای زیر سیستمی نیست و تنها توسط یک پردازنده قابل اجرا خواهد بود. بنابراین توجه خود را بر روی طراحی شیء معطوف می‌کنیم. در این مرحله، هدف تبدیل حالت‌های^{۱۱} موجود در مدل پویا و توابع موجود در مدل وظیفه‌مندی به عملگرهای کلاسهاست [۱۸]. این عملگرها برای کلاسهای سیستم به صورت زیر تشخیص داده شد. کار اصلی عملگرها تجدید صفات اشیا و ایجاد ارتباط بین اشیاست. برای هر عملگر، با توجه به مدل‌های پویا و وظیفه‌مندی، یک الگوریتم پیاده‌سازی مقرر خواهد شد. پس از تهیه الگوریتمها باید ساختمان داده به شکلی مناسب برای ذخیره داده‌های سیستم در نظر گرفته شود و این کار با اضافه کردن کلاسهای داخلی به کلاسهای اصلی شکل می‌گیرد [۱۸]. فهرست عملگرهای کلاسهای مختلف سیستم راکتور در جدول پیوست (۲) ارائه شده است.

۳-۳- مرحله پیاده‌سازی

در این مرحله ابتدا نمودارهای حالت تهیه شده در مدل پویا را با استفاده از الگوریتمهای مرحله طراحی برای پیاده‌سازی

۳-۱- مرحله تحلیل

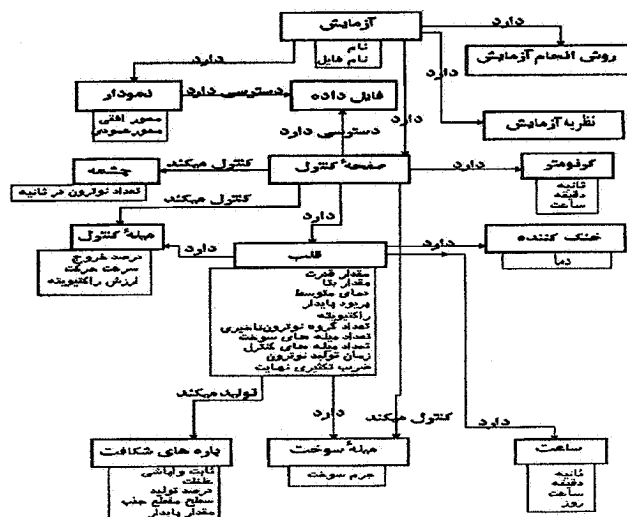
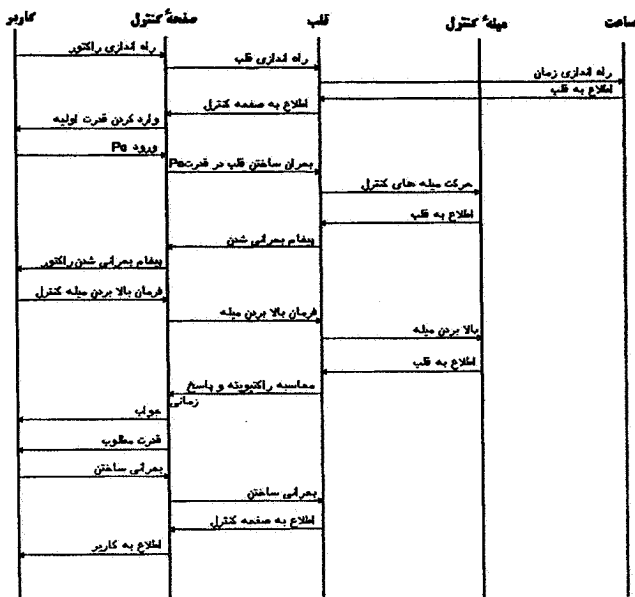
تحلیل که شامل فهمیدن و مدل کردن مسئله و مشخص کردن دامنه فعالیت آن است، از فازهای بسیار مهم تهیه نرم‌افزار است. ورودی اولیه به فاز تحلیل، "بیان مسئله" است و خروجی آن مدل فرموله شده بیان مسئله است که شامل سه قسمت اساسی است. مدل شیء^۲، مدل پویا^۳ و مدل وظیفه‌مندی^۴ [۶ و ۱۷]. مدل شیء، اشیا و روابط آنها را با یکدیگر نشان می‌دهد. از آنجا که مدل شیء نشان‌دهنده ساختمان استاتیک داده‌های موجود در سیستم است، بنابراین باید اشیا را در قالب کلاسها^۵ و وابستگی^۶ آنها در دنیای واقعی تشخیص داده و سپس صفات^۷ و ارتباطها^۸ به آنها اضافه شوند [۱۰ و ۱۸].

با بررسی سیستم آزمایشگاه دنیای واقعی، وملاحظات آن در سیستم شبیه سازی، کلاسهای زیر برای نرم‌افزار مشخص شوند:

- قلب راکتور
- میله‌های سوخت
- آزمایشهای شبیه‌سازی
- میله‌های کنترل
- عناصر موجود در قلب
- نمودارهای مورد نیاز
- خنک کننده
- صفحه کنترل
- زمان سنج
- ساعت شبیه سازی

ارتباط بین کلاسها بر اساس وابستگی اشیا در دنیای واقعی تعیین می‌شود. وجود ارتباطهای منطقی و تصمیم‌گیری درمورد نحوه ارتباط کلاسها برای ایجاد یک مدل تحلیلی خوب که در مرحله طراحی به راحتی به کار گرفته شود، بسیار مهم است [۱۰]. کلاسها به همراه ارتباطات آنها، در نهایت به صورت نمودار شیء^۹ تهیه شدند [۱۹]، شکل (۱).

مدل پویا نشان‌دهنده رفتارهای وابسته به زمان یک سیستم و اشیا آن است. این مدل با توجه به رویدادهای بین اشیا تهیه می‌شود [۱۰]. برای ساختن این مدل، ابتدا برای گفتگوهای نوعی کاربر با سیستم، سناریوهایی تهیه می‌شوند. سپس رویدادها در سناریوها تشخیص داده می‌شوند و هر سناریو به صورت سلسله‌ای از رویدادها نشان داده می‌شود. در آخر رویدادها و حالت‌های مربوط به هر شیء در نمودار حالت^{۱۰} جای داده می‌شوند. مجموعه‌ای از نمودارهای حالت، مدل پویا را تشکیل می‌دهند [۱۸].



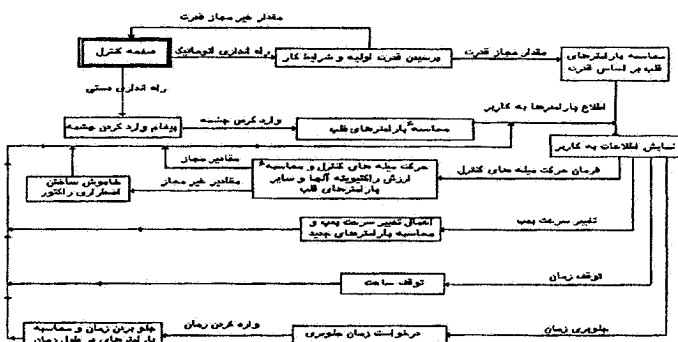
شکل ۱- نمودار مدل شیء به همراه صفات مربوطه

دنبال کردن مسیر رویدادها برای آزمایش Reactor Startup

دنبال کردن مسیر رویدادها برای آزمایش کالیبراسیون حرارتی

شکل ۳- دنبال کردن مسیر رویدادها برای آزمایش

راه اندازی راکتور



شکل ۴- نمودار حالت برای کلاس صفحه کنترل

شکل ۲- دنبال کردن مسیر رویدادها برای آزمایش

کالیبراسیون گرمایی

آماده می‌کنیم. همچنین در این مرحله لازم است ایجاد ارتباط بین کلاسها نیز در نظر گرفته شود. به این ترتیب که اشیایی که احتیاج دارند، به داده‌های هم دسترسی داشته باشند، از توانایی رجوع به یکدیگر برخوردار باشند [۱۸ و ۱۰].

اکنون همه چیز برای تبدیل مدل‌های ارائه شده به برنامه رایانه‌ای آماده است. کامپایلر انتخاب شده برای سیستم آزمایشگاه راکتور، ویژوال C++ و سیستم عامل ویندوز ۹۵ است که مفاهیم شی‌گرای را به خوبی پشتیبانی می‌کنند و ابزارهای قوی و نسبتاً پیچیده برای ساختن کاربریهای ۳۲ بیتی با امکانات کاربری آسان در اختیار قرار می‌دهند [۲۱ و ۲۲].

۴- امکانات کلی برنامه

پس از ورود به سیستم، با انتخاب دکمه آزمایشها، فهرستی از آزمایشها در برابر کاربر قرار می‌گیرد. با انتخاب هر آزمایش، کاربر وارد محیط آزمایشگاه می‌شود و همزمان امکان دسترسی به مبانی نظری و راهنمایهای مربوط به انجام هر آزمایش در اختیار وی قرار می‌گیرد. محیط آزمایشگاه دارای ۴ صفحه مجزا است که عبارت‌اند از صفحه کنترل راکتور، صفحه نتایج آزمایشها، صفحه مبانی نظری آزمایشها و صفحه روش انجام آزمایشها، که هر کدام با انتخاب دکمه کنترلی مربوطه فعال می‌شوند.

شکل (۵) این صفحه را نمایش می‌دهد. در این قسمت، کاربر می‌تواند به انجام آزمایشهای مورد نظر بپردازد و از قابلیت‌های سیستم برای دیدن و کنترل پارامترهای راکتور استفاده کند.

امکان‌ات موجود در این صفحه طوری تعبیه شده است که کاربر بتواند تمام آزمایشهای حالت بحرانی را در این صفحه انجام دهد. صفحه دیگری نیز برای آزمایشهای زیر بحرانی در نظر گرفته شده است که در جای خود بحث خواهد شد.

در این صفحه کاربر قادر به دیدن مقادیر لحظه‌ای پارامترهای مهم قلب مانند راکتیویته (پس‌خور و ناشی از میله‌های کنترل، کلی قلب) قدرت، شارنوترونها، چگالی نوترونها، غلظت زینان وید، پریود پایدار و دمای قلب راکتور است. همچنین درصد خروج میله‌های کنترل از قلب به همراه نمایی از حرکت آنها در قلب در این صفحه قابل رویت خواهد بود.

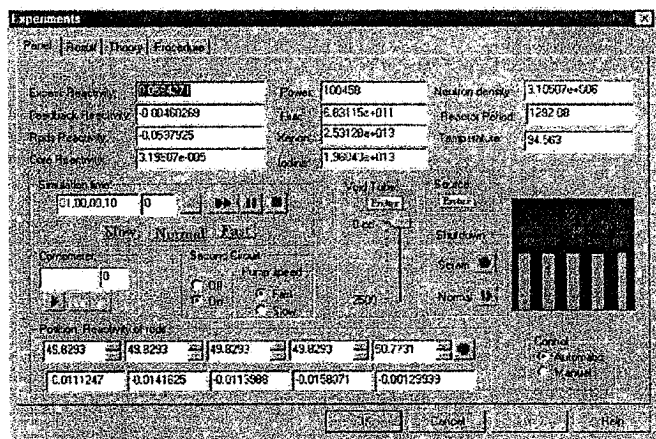
دکمه‌های کنترلی موجود در این صفحه، امکان انتخاب نحوه کنترل به صورت دستی یا اتوماتیک، تغییر وضعیت مدار ثانویه سیکل ترمودینامیکی و تنظیم دبی خنک کننده و همچنین کنترل میله‌های کنترل و ورود و خروج چشمه نوترونی و همچنین ورود و خروج لوله گاز به قلب را برای کاربر فراهم می‌سازد.

نمایش زمان شبیه سازی و کنترل آن (راه‌اندازی، جلوبری، توقف، تند کردن و کند کردن) نیز در این صفحه وجود دارد. پارامترهای مختلف قلب در تمام طول عمر راکتور با پریود دلخواهی که کاربر به سیستم می‌دهد در فایل داده‌ها ثبت و همچنین در صفحه کنترل نمایش داده می‌شوند.

برای آزمایش جرم بحرانی صفحه کنترل جداگانه‌ای در نظر گرفته شده است. در این صفحه برای کاربر امکان وارد کردن و خارج کردن سوخت از قلب تعبیه شده است و پارامترهای مختلف زیر بحرانی در این صفحه نمایش داده می‌شوند.

۴-۲- صفحه نتایج آزمایش

در این صفحه امکان نمایش پارامترهای ثبت شده در فایل داده آزمایش و منحنیهای مربوطه وجود دارد. کاربر پس از ورود به این صفحه قادر خواهد بود در فهرستی که از داده‌های آزمایش در برابر او قرار می‌گیرد جستجو کند و یا با انتخاب منحنیهای موجود، داده‌ها را



شکل ۵- صفحه انجام آزمایشها

به صورت نموداری مشاهده کند. در این صفحه همچنین امکاناتی برای رسم نمودارهای دلخواه توسط کاربر وجود دارد. منحنیهای توان، راکتیویته، غلظت نیا هسته‌ها، غلظت سموم، موقعیت میله‌های کنترل و ارزش راکتیویته مربوطه، پریود پایدار از جمله منحنیهایی اند که کاربر می‌تواند ملاحظه کند، شکل (۶).

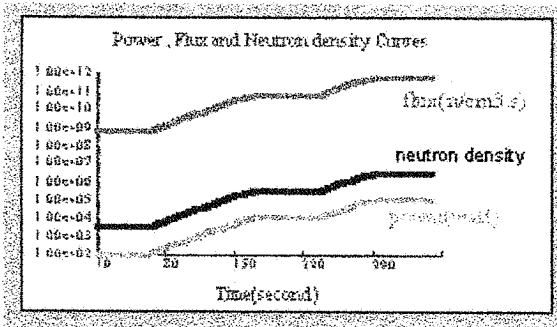
۴-۳- صفحه مبانی نظری و روش انجام آزمایش

در این صفحات بسته به آزمایش انتخاب شده، مبانی نظری و یا روش انجام آزمایش مربوطه در اختیار کاربر قرار گیرد و کاربر می‌تواند در طول آزمایش به منظور آگاهی بیشتر از زمینه علمی آزمایش و یا استفاده از دستورالعملهای یاری دهنده آزمایشگر به این صفحات رجوع کند، شکل (۷).

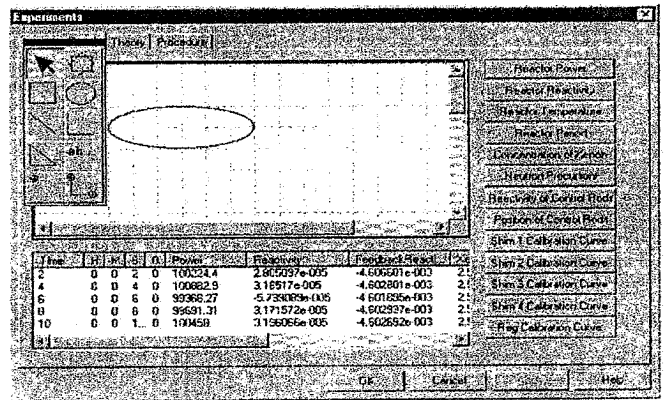
۵- بحث و بررسی نتایج چند آزمایش نمونه

به منظور بررسی کارایی سیستم و دیدن نتایج و اطلاعات نموداری، با انجام چند آزمایش نمونه به بحث و بررسی پیرامون نتایج آنها می‌پردازیم.

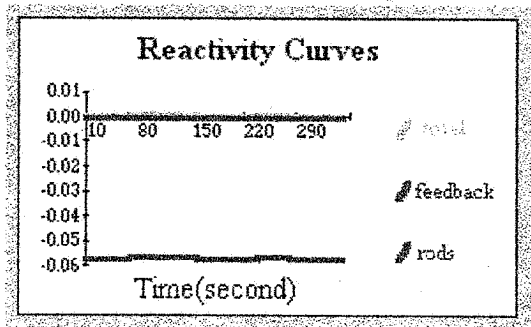
شکل‌های (۸) و (۹) منحنیهای قدرت و راکتیویته در یک آزمایش راه‌اندازی راکتور در قدرت 100 W و افزایش قدرت به 10 kW و 100 kW را نشان می‌دهند. پس از رسیدن به قدرت مطلوب، با برگرداندن میله‌های کنترل به محل قبلی، راکتور در قدرت جدید بحرانی می‌شود. با افزایش قدرت، دما نیز بالا می‌رود و به این ترتیب اثرات مربوط به پس‌خور نیز ظاهر می‌شود. لذا همراه با



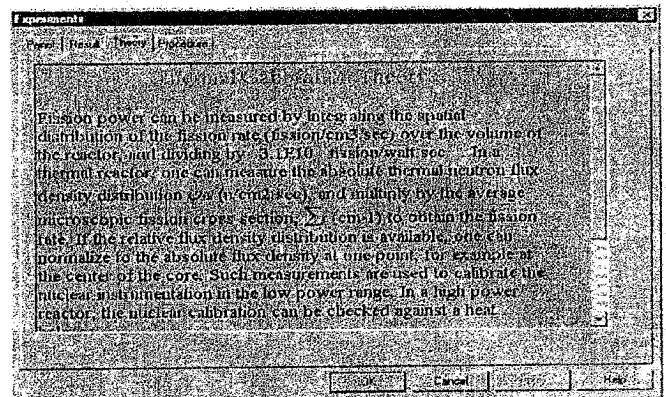
شکل ۸- منحنیهای تغییرات توان، شار و چگالی نوترون بر حسب زمان در آزمایش به قدرت رساندن راکتور



شکل ۶- صفحه نتایج آزمایشها



شکل ۹- منحنی تغییرات راکتیویته بر حسب زمان در آزمایش به قدرت رساندن راکتور



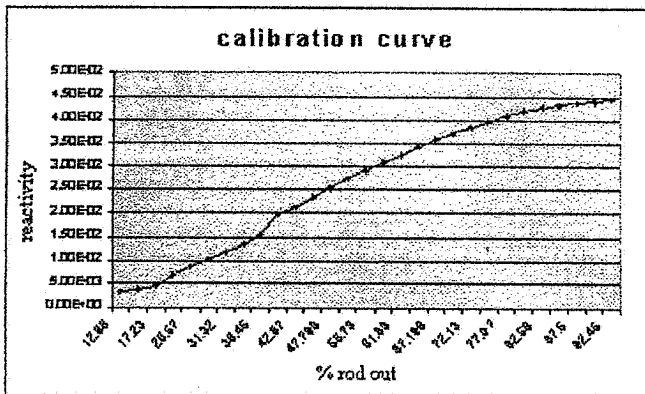
شکل ۷- صفحه نظری آزمایشها

زمان تحت شرایط خاموش کردن پمپ مدار ثانویه نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در صورت عدم برداشت گرمایی از قلب راکتور، دمای متوسط قلب زیاد می‌شود. با به دست آوردن شیب این منحنی می‌توان قدرت گرمایی راکتور را با استفاده از فرمول $P = mc \frac{dT}{dt}$ محاسبه کرد.

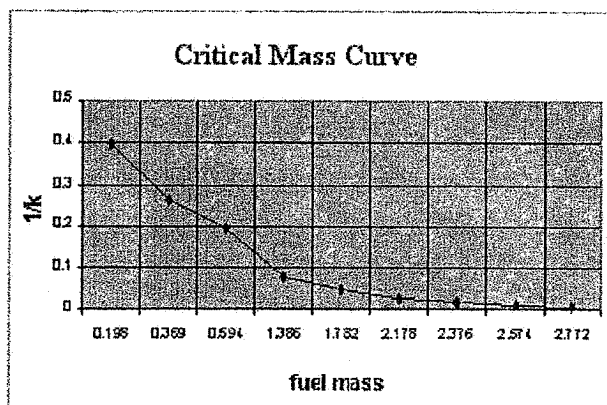
شکل (۱۳) منحنی مربوط به یک نمونه آزمایش کالیبراسیون میله کنترل یک را نمایش می‌دهد. در این آزمایش، راکتور در قدرت 100 W توسط میله‌های دو، سه و چهار بحرانی شده است و میله کنترل شماره یک، مرحله به مرحله از موقعیت ده درصد خارج از قلب به موقعیت نود درصد خارج از قلب رسیده است، در هر مرحله با اندازه‌گیری زمان دو برابر شدن قدرت (t)، پریود پایدار راکتور (T) با استفاده از فرمول $P = P_0 e^{-t/T}$ محاسبه شده و سپس با استفاده از معادله In-hour راکتیویته متناظر با درصد خروج میله از قلب محاسبه شده است.

شکل (۱۴) نتیجه آزمایش جرم بحرانی را نشان می‌دهد. همان

ظهور پس‌خور، میله‌های کنترل نیز بالاتر می‌روند. شکلهای (۱۰) و (۱۱) منحنیهای غلظت یدوزینان و راکتیویته را در یک آزمایش در طی ۵ روز کار راکتور را نشان می‌دهند. در طول این مدت، راکتور در قدرت 100 W راه اندازی شده و سپس قدرت به ۲ مگاوات افزایش یافته و پس از دو روز که زینان به مقدار اشباع خود رسیده است، راکتور خاموش شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود، به علت افزایش زینان در طی زمان کار راکتور، راکتیویته منفی مربوط به زینان نیز افزایش می‌یابد و پس از آنکه زینان به مقدار پایدار خود رسید، راکتیویته پس‌خور ثابت می‌ماند. پس از خاموشی راکتور، غلظت زینان مجدداً شروع به افزایش می‌کند و پس از حدود 10 hr به مقدار بیشینه خود می‌رسد و از آن به بعد شروع به کاهش می‌کند. در دوره خاموشی نیز راکتیویته منفی مربوط به زینان همراه با افزایش زینان، افزایش می‌یابد و همراه با کاهش زینان، کاهش می‌یابد. منحنی (۱۲) تغییرات دمای متوسط قلب راکتور را برحسب



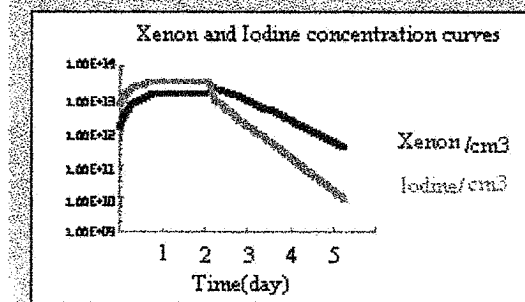
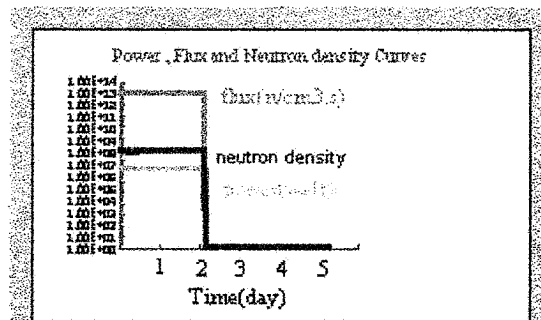
شکل ۱۳- منحنی ارزش راکتیویته میله کنترل در آزمایش کالیبراسیون میله کنترل



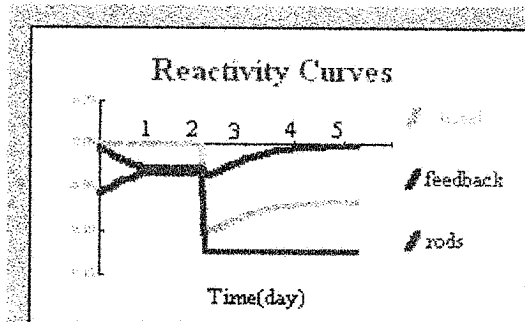
شکل ۱۴- منحنی تغییرات ضریب تکثیر بینهایت بر حسب جرم سوخت در آزمایش جرم بحرانی

طور که ملاحظه می شود با افزودن سوخت به قلب، حجم قلب بزرگتر شده و بنابراین احتمال عدم فرار نوترون از قلب، افزایش یافته و در مجموع با توجه به فرمول $k_{eff} = k_{\infty} P_{nonleakage}$ اندازه K_{eff} بزرگتر شده است (با توجه به اینکه ترکیب سوخت و کند کننده فرقی نکرده، بنابراین K_{∞} ثابت می ماند) و در نتیجه راکتور به حالت بحرانی نزدیکتر شده است. با نزدیک شدن مقدار K_{eff} به یک، عکس شمارش نوترونها به صفر نزدیک می شود. هنگامی که این مقدار صفر شود، جرم سوخت موجود در قلب، جرم بحرانی خواهد بود.

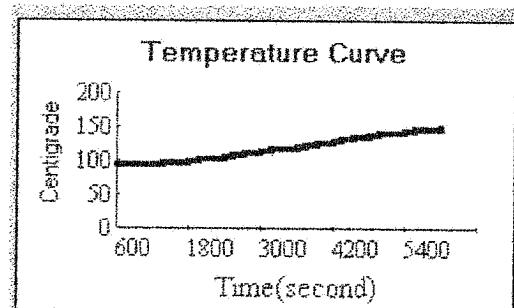
شکلهای (۱۵) و (۱۶) راکتیویته و موقعیت میله های کنترل در آزمایش راکتیویته ناشی از خلاء را نشان می دهند. در این آزمایش پس از اینکه راکتور به حالت پایدار خود رسید، ابتدا Void Tube



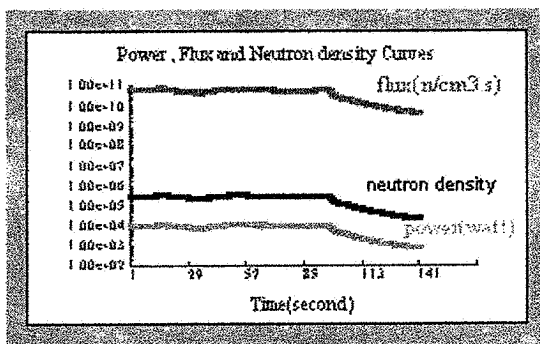
شکل ۱۰- منحنی تغییرات توان، شار و چگالی نوترون و چگالی ید و زینان بر حسب زمان در آزمایش اثر زینان



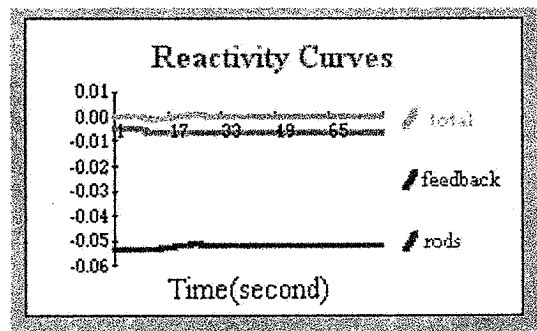
شکل ۱۱- منحنی تغییرات راکتیویته بر حسب زمان در آزمایش اثر زینان



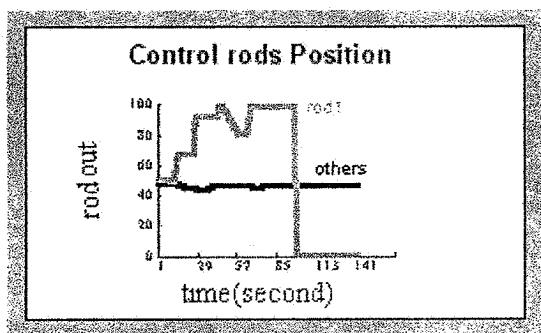
شکل ۱۲- منحنی تغییرات دما بر حسب زمان در آزمایش کالیبراسیون گرمایی



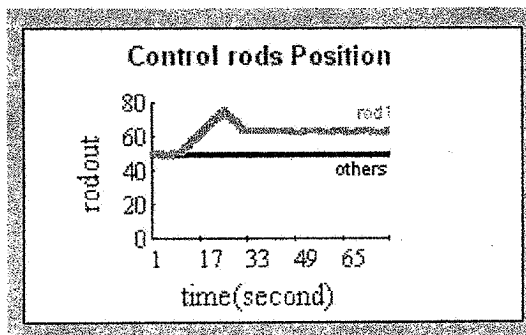
شکل ۱۷- منحنی تغییرات توان، شار و چگالی نوترون بر حسب زمان در آزمایش سقوط میله کنترل ظریف



شکل ۱۵- منحنی تغییرات راکتیویته بر حسب زمان در آزمایش اثر خلأ



شکل ۱۸- منحنی تغییر موقعیت میله کنترل بر حسب زمان در آزمایش سقوط میله کنترل ظریف



شکل ۱۶- منحنی تغییر موقعیت میله کنترل بر حسب زمان در آزمایش اثر خلأ

راکتیویته منفی به قلب، قدرت با یک جهش آبی، کم شده است.

وارد قلب کرده و سپس داخل آن را از گاز پر می‌کنیم. ملاحظه می‌شود که برای جبران راکتیویته ناشی از خلأ، میله‌های کنترل کمی بالا آمده‌اند.

قدردانی

بدین وسیله از زحمات مسئولین و گروه کارگردانی راکتور سازمان انرژی اتمی ایران که امکان بازدید از راکتور و سیستمهای جنبی آن را فراهم کردند تشکر و قدردانی می‌شود.

شکلهای (۱۷) و (۱۸) قدرت و موقعیت میله‌های کنترل را در آزمایش سقوط میله ظریف نشان می‌دهند. در این آزمایش ابتدا میله ظریف در صد از قلب خارج شده و راکتور توسط بقیه میله‌ها بحرانی شده است سپس میله ظریف را سقوط داده‌ایم. در اثر تزریق

واژه نامه

- | | | |
|------------------------------|----------------|-------------------|
| 1. object modeling technique | 5. class | 9. object diagram |
| 2. object model | 6. association | 10. state diagram |
| 3. dynamic model | 7. attributes | 11. states |
| 4. functional model | 8. links | |

مراجع

- Profio, A. Edward, *Experimental Reactor Physics*, Wiley, New York, London, 1976.
- Khadem, M., and Ipackchi, A. "A Compact, High-Fidelity Simulator for Power Plants," *Mechanical Engineering*, pp. 58-61, Aug. 1988.
- Hetrick, *Dynamics of Nuclear Reactors*, University of

- Chicago Press, Chicago, 1971.
4. Lewins, J., *Nuclear Reactor Kinetics and Control*, Pergamon Press, Oxford, New York, 1978.
 5. Glasstone, Sesonske, *Nuclear Reactor Engineering*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1981.
 6. Hill, D., *Object Oriented Analysis and Simulation*, Addison Wesley, New York, 1996.
 7. Banks, J., *Discrete Event System Simulation*, Prentice Hall, New Jersey.
 8. Radding, A., "To Methodology or Not to Methodology," *Computer World*, Vol. 27, No. 24, pp. 114, Jun. 14, 1993.
 9. Mayer, B., *Reusable Software*, Hemel Hempstead, Prentice Hall, 1994.
 10. Rumbogh, *Object Oriented Modeling and Design*.
 11. Ambler, S., "Booch-Rumbaugh Tryst Could Accelerate OO," *Computing-Canada*, Vol. 20, No. 24, p. 33, Nov. 23, 1994.
 12. Hayes, F., "Object? Simplicity," *Computer world*, Vol. 29, No. 41, p. 97, Oct. 9, 1995.
 13. Decker, R., and Hirshfield, S., *The Object Concept*, Boston, PWS publication Company, 1995.
 14. Elins, A., *Principles of Object Oriented Software Development*, 1995.
 15. Livari J., "Object Orientation as Structural, Functional and Behavioral Model," *Information and Software Technology*, Vol. 37, No. 3, pp. 155-160, Mar. 1995.
 16. Waiden, K., and Nerson, J. M., *Seamless Object Oriented Software Architecture*, Prentice-Hall, New York, 1995.
 17. Brown, D., *An Introduction to Object Oriented Analysis*, Wiley, New York, 1997.
 18. Mark, P., *Practical Object Oriented Design*, McGraw Hill, London, 1996.
 19. Bourdeau, R. H., and Cheng, B. H. C., "A Formal Semantics for Object Model Diagrams," *IEEE Transactions on software engineering*, Oct. 1995.
 20. Holland Ian, M., and Lieberherr, K. J., "Object Oriented Design," *ACM Computing-Surveys*, Vol. 28, No. 1, pp. 273-275, Mar. 1996.
 21. Gregory Kate, "Using Visual C++," *Que, Indianapolis*, 1996.
 22. Nabajyoti, B., *Visual C++ Developers Guide*, Sams Publication Indianapolis, 1995.

پیوست ۱- توابع مشخص‌کننده خروجیها برحسب ورودیها در مدل وظیفه‌مندی

$$\rho_f = \alpha_T T + \alpha_v V + \frac{\delta_a^x X}{\sum_a^{core}} \quad \text{- محاسبه راکتیویته پس‌خور}$$

$$\rho_{rods} = \rho_{max} \left(x - \frac{1}{2\pi} \sin 2\pi x \right) \quad \text{- محاسبه راکتیویته میله‌های کنترل}$$

$$\rho_{core} = \rho_{excess} + \rho_{rods} + \rho_f \quad \text{- محاسبه راکتیویته قلب}$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P + \sum_i \lambda_i C_i \quad \text{- محاسبه قدرت راکتور}$$

$$\frac{dI_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P - \lambda_i C_i$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc} P - \frac{2w}{m} T \quad \text{- محاسبه دمای قلب}$$

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_I \sum_f \phi - \lambda_I I \quad \text{- محاسبه غلظت زینان وید}$$

$$\frac{dx}{dt} = \gamma_x \sum_f \phi + \lambda_I I - \delta_a^x X \phi - \lambda_x X$$

$$\phi = \frac{P}{P_{max}} \phi_{max} \quad \text{- محاسبه شار نوترون}$$

$$\omega = \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \quad \text{- محاسبه پریود پایدار}$$

$$M_{total} = nm_{assembly} \quad \text{- محاسبه جرم سوخت}$$

پیوست ۲- فهرست عملگرهای کلاسهای مختلف سیستم راکتور

- عملگرهای کلاس میله کنترل

- محاسبه ارزش راکتیویته میله کنترل

- حرکت میله کنترل

- محاسبه درصد خروج میله کنترل

- عملگرهای کلاس میله سوخت

- وارد شدن به قلب

- خارج شدن از قلب

- عملگرهای کلاس قلب

- محاسبه راکتیویته قلب

- محاسبه توان

- محاسبه شار

- محاسبه چگالی نوترون

- محاسبه دمای متوسط قلب

- محاسبه غلظت ید

- محاسبه غلظت زینان

- محاسبه غلظت پاره‌های شکافت

- راه‌اندازی مدار ثانویه

- محاسبه راکتیویته پس‌خوراند

- محاسبه پریود پایدار

- محاسبه ضریب تکثیر

- حل معادله‌های نقطه‌ای

- محاسبه راکتیویته پس‌خوراند زینان

- محاسبه راکتیویته پس‌خوراند دما

- محاسبه راکتیویته میله‌های کنترل

- محاسبه پارامترهای حالت پایدار

قلب

- محاسبه پارامترهای حالت گذری

قلب

- عملگرهای کلاس محصولات شکافت

- محاسبه غلظت

- عملگرهای کلاس خنک‌کننده

- عوض کردن حالت مدار ثانویه

- عملگرهای کلاس ساعت

- نشان دادن زمان

- تنظیم ساعت

- جلو بردن ساعت

- محاسبه ثانیه‌ها

- عملگرهای کلاس کرنومتر

- محاسبه زمان

- راه‌اندازی کرنومتر

- عملگرهای کلاس صفحه کنترل

- تنظیم مقادیر اولیه صفحه کنترل

- راه‌اندازی راکتور

- توقف کار راکتور

- نگهداری زمان کار راکتور

- جلوگیری زمان کار راکتور

- خاموش‌سازی راکتور

- خاموش‌سازی آنی راکتور

- راه‌اندازی زمان کار راکتور

- نوشتن پارامترهای راکتور در پرونده داده

- کنترل حرکت میله‌های کنترل

- حرکت میله کنترل

- کنترل دستی راکتور

- کنترل اتوماتیک راکتور

- نمایش پارامترهای قلب در صفحه کنترل

- تنظیم راکتیویته قلب

- راه‌اندازی دستی راکتور

- وارد کردن چشمه به قلب

- جلوگیری زمان سنج

- توقف زمان سنج

- راه‌اندازی مدار ثانویه

- توقف مدار ثانویه