

دستیابی به نقطه دقیق بحرانیت راکتور صفر قدرت آب سنگین با سوخت فلزی

مجید، جلالی*؛ پروین، کاویانی؛ محمد، آداوودی؛ منوچهر، بهفرنیا؛ مهدی، محسنی

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده تحقیقات و توسعه راکتورها

چکیده

بهترین خط برون‌یابی شده با پردازش داده‌های آزمایش بحرانیت راکتور HWZPR به روش "حذف چشمه نوترون ثابت" در حالت قلب تمییز و اولین بحرانیت محاسبه شده است. محاسبه نشان از اختلاف دو معادله، ارتفاع بحرانیت و واگرایی در برون‌یابی بحرانیت راکتور در حالت‌های رسیدن به بحرانیت را نشان میدهد. با بکار بردن داده‌های اصلاح شده محاسبه نقطه بحرانیت با دقت بسیار بالائی قابل پیش‌بینی است و خط برون‌یابی شده بحرانیت ضریب همبستگی بالاتری دارد.

مقدمه

یکی از کارهای ضروری در بهره‌برداری اولیه عادی یا سوخت‌گذاری مجدد راکتورها، راه‌اندازی اولیه واقعی (Physical startup) است. آزمایش اندازه‌گیری بحرانیت راکتور از موارد مهم آزمایشات راه‌اندازی فیزیکی راکتور است. اطلاع دقیق از نقطه بحرانیت راکتور جدید صرفاً از راه تئوری و محاسبات است که آن هم خالی از خطا نمی‌باشد. در خلال اولین بحرانیت راکتور، معمولاً راکتیویته کم و مرحله به مرحله اضافه شده و با پیش‌بینی دقیق، زیر-بحرانیت راکتور برآورد میشود [۱][۲]. از معادلات نقطه‌ای دینامیکی راکتور بعنوان پایه معادله برون‌یابی بحرانیت استفاده نمود.

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{l} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S \quad (1)$$

$$dC_i(t)/dt = \frac{\beta_i}{l} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad I = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

جایی که n میانگین چگالی نوترون، t زمان، ρ راکتیویته، β_i کسری از نوترونهای تاخیری برای گروه i ، λ_i ثابت واپاشی نوترون تاخیری هستک برای گروه i ، l زمان تولد نوترون، C_i میانگین چگالی نوترون تاخیری هستکهای گروه i و S چگالی چشمه نوترون خارجی در ثانیه است. وقتی راکتور در حالت پایا باشد داریم، $dn(t)/dt = dC_i(t)/dt = 0$ در حالت پایا چگالی نوترون n_0 بصورت معادله (۳) $n_0 = S \cdot l / |\rho|$ بدست می‌آید. نرخ شمارش نوترون N_c بوسیله آشکارسازهای نوترون بوسیله رابطه $N_c = \eta \epsilon n$ بیان میشود، که در آن ϵ ضریب نشت نوترون از راکتور، η راندمان آشکارسازهای نوترون است. معادله (۳) را میتوان بصورت

(۴) $N_c = \eta \epsilon S.L/|p|$ نوشت. در برون‌یابی بحرانی، راکتیویته مرحله به مرحله متناسب با N_c افزایش می‌یابد. راههای گوناگونی برای وارد کردن راکتیویته به راکتور وجود دارد که به طراحی و ساختار راکتور نظیر بیرون کشیدن میله کنترل، رقیق شدن محلول برون، افزودن سوخت، افزایش غلظت ^{235}U و غیره بستگی دارد. در راهاندازی اولیه واقعی راکتور منحنی برون‌یابی بحرانی در حالت‌های مختلف راکتور $1/N_c$ (محور Y) بر حسب تغییر تکثیر نوترون یا تغییرات راکتیویته (محور X) رسم میشود [۳].

واگرایی برون‌یابی بحرانی

معادله ۴ نشان میدهد، که ارتباط بین $1/N_c$ و ρ خطی است. اما در واقع یک رابطه خطی نیست و گاهی حالت منحنی محدب و گاهی حالت منحنی مقعر است. برون‌یابی در راکتیویته خیلی بالا منحنی محدب ایجاد میکند و ریسک فوق-بحرانی شدن افزایش می‌یابد. برون‌یابی راکتیویته‌های پائین، منحنی مقعر ایجاد کرده و رسیدن به بحرانیته کندتر و با دقت بیشتر انجام میگردد.

سه عامل اصلی رفتار غیر خطی بشرح ذیل است.

۱- اثر چشمه نوترون. نرخ شمارش نوترونهای N_c نشت یافته از راکتور شامل دو قسمت نوترونهای شکافت (N_f) و نوترونهای چشمه ثابت (N_s) است.

۲- اثر فضائی. N_c بعلت برون-یابی بحرانیته راکتور بر اساس مدل راکتور نقطه‌ای و همچنین در خلال بحرانیته راکتور همراه با افزایش سوخت و یا ارتفاع آب سنگین است؛ عامل اعوجاج در توزیع چگالی نوترون میشود.

۳- موقعیت آشکارسازهای نوترون برای آزمایش بحرانیته

برای اطمینان از ایمنی فرآیند برون-یابی بحرانیته، اصلاح و توسعه روش برون‌یابی بحرانیته و منحنی H- $1/N$ ضروری است. به این منظور برای کاهش واگرایی برون‌یابی بحرانیته، روش "حذف چشمه نوترون ثابت" (Constant Neutron Source Elimination (CNSE)) استفاده میشود. در این تکنیک N_s در تمام مراحل رسیدن به بحرانیته ثابت است. N_c در دو مرحله افزایش راکتیویته بصورت ذیل بیان میشود.

$$N_{c0} = N_{f0} + N_s = \eta \epsilon \delta_1 S.L/|p_1| I + \eta \epsilon \delta_2 SL \quad (5)$$

$$N_{c1} = N_{f1} + N_s = \eta \epsilon \delta_1 S.L/|p_1| I + \eta \epsilon \delta_2 SL \quad (6)$$

مرحله ۰ اشاره به اولین شمارش قابل قبول نوترون در حالت زیر بحرانی و ۱ اشاره به حالت پایدار مرحله بعدی تزریق راکتیویته است و δ_1 کسری از نوترونهای جذب شده بوسیله سوخت و δ_2 کسر نوترون نشتی است از ترکیب (۵) و (۶) داریم

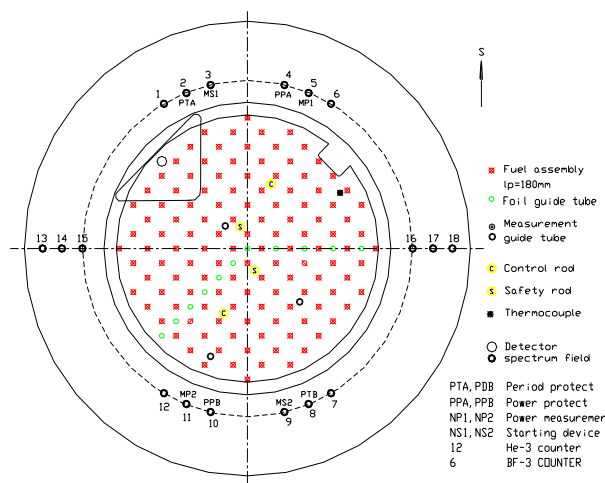
$$N_s = (N_c \cdot |p_1| - N_{c1} |p_{11}|) / (|p_1| - |p_{11}|) \quad (7)$$

$$N_c - N_s = N_f \quad (8)$$

در محاسبات برون‌یابی بحرانی با جایگزینی N_f بجای N_c نتایج برون‌یابی با دقت بالاتری بدست می‌آید ،
[۱]. [۳]

آزمایش بحرانی راکتور HWZPR

راکتور صفر قدرت آب سنگین (HWZPR) اصفهان از نوع راکتورهای تانکی با کندکننده آب سنگین و فقط با سوخت اورانیم طبیعی فلزی و سوخت ترکیبی اورانیم طبیعی فلزی میله‌ای و اکسیدی خوشه‌ای (خوشه ۱۸ تائی) با گام ۱۸ سانتیمتری برای انجام آزمایشات راکتور کاربری یافته است. تانک راکتور از جنس آلومینیوم به شعاع (cm) ۱۲۰ و ارتفاع (cm) ۳۰۲ همراه با دو صفحه مشبک آلومینیومی نگهدارنده میله‌های سوخت است. این راکتور دارای دو عدد میله ایمنی از جنس کادمیم و دو عدد میله کنترل از جنس آهن ضد زنگ و همچنین بازتابنده جانبی گرافیتی به ضخامت (cm) ۷۵ و بازتابنده تحتانی آب سنگین با ارتفاع (cm) ۳۰ می باشد. فضای بالای قلب با گاز نیتروژن پر شده و لذا این راکتور فاقد بازتابنده فوقانی است. در شکل (۱) نمای بالایی موقعیت گاید تیوب‌ها و میله‌های سوخت نسبت به یکدیگر نشان داده شده است.

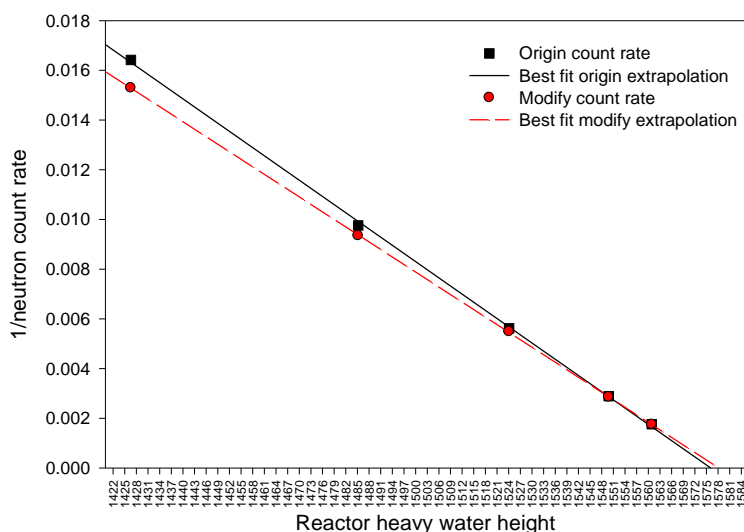


شکل (۱): نمای بالایی راکتور

دو سیستم شمارنده نوترون ثابت از نوع BF_3 در بازتابنده گرافیتی راکتور (Ns_1, Ns_2) و متقارن برای اندازه‌گیری بحرانیت تعبیه شده است. اولین آزمایش بحرانیت راکتور بعد از سوخت‌گذاری بر اساس دستورالعمل راه اندازی و رعایت ایمنی انجام میگیرد. برای پیش‌بینی نقطه بحرانیت راکتور، از برون‌یابی دو نقطه متوالی حالت‌های زیر بحرانیت راکتور استفاده میشود [۴]. در این مقاله از تمام حالت‌های زیر بحرانی راکتور به منظور رسیدن به نقطه بحرانیت راکتور استفاده میشود. در خلال برون‌یابی بحرانیت بعد از سوخت‌گذاری، راکتیویته با افزایش آب سنگین (یا افزایش سوخت) و نرخ شمارش نوترون N_c و راکتیویته ρ در هر مرحله ثبت میشود. با رسم بهترین خط گذرکننده از داده‌های اصلی آزمایش (N_c) در فضای $H-1/N$ در راکتور در شکل (۲) نشان داده شده است. نرخ نوترون غیر شکافت N_s با استفاده از رابطه (۷) برای قلب یکپارچه فلزی عدد $4/5$ - بدست می‌آید. پس از اصلاح داده‌ها با رابطه (۸) مجدداً بهترین خط گذرکننده از داده‌های (N_f) در فضای $H-1/N$ در راکتور در شکل (۲) آورده شده است. در جدول (۱) خلاصه تمام نتایج بحرانیت برون‌یابی شده راکتور $HWZPR$ با سوخت فلزی آورده شده است. تحلیل داده‌ها نشان میدهد، نرخ شمارش مورد نیاز در حالت زیر بحرانی بایستی از حداقلی عبور کند. نقطه بحرانیت برون‌یابی شده با داده‌های اصلی از مقدار واقعی کمتر است و این مسئله از لحاظ بهره‌برداری ایمن از راکتور بایستی اینچنین باشد و همچنین نشان درستی از موقعیت آشکارسازهای نوترون مورد استفاده در آزمایش دارد.

جدول (۱): نتایج بحرانیت برون‌یابی شده راکتور $HWZPR$

نوع قلب	نوع داده ها	معادله برون‌یابی شده بحرانیت	ضریب همبستگی	ارتفاع بحرانیت محاسباتی (mm)	ارتفاع بحرانیت اندازه گیری شده (mm)
سوخت فلزی	اصلی آزمایش	$\gamma = 1/N_c = 0.17197 - 1.09114e-4 * H$	۰,۹۹۹۶۴	۱۵۷۵,۵	۱۵۷۸
سوخت فلزی	اصلاح شده	$\gamma = 1/N_c = 0.15910 - 1.00815e-4 * H$	۰,۹۹۹۹۸	۱۵۷۷,۸	۱۵۷۸





شکل (۲): محاسبه برون‌یابی بحرانیت قلب تمییز راکتور HWZPR با سوخت فلزی با تمام نوترون‌ها و نوترون‌های شکافت

بحث و بررسی

برای راکتوری که تازه برپا شده و یا مجدداً سوخت‌گذاری شده اولین کار برای بهره‌برداری، راه‌اندازی واقعی راکتور است. آزمایش دستیابی به بحرانیت راکتور مرحله به مرحله با تزریق آب سنگین از آزمایشات راه‌اندازی واقعی راکتور است. دستیابی به نقطه بحرانیت دقیق با رسم عکس شمارش نوترون بر حسب افزایش راکتیویته راکتور (ارتفاع آب سنگین) و برون‌یابی نقاط امکان پذیر است. با بکارگیری روش "حذف چشمه نوترون ثابت"، نقطه بحرانیت راکتور را با دقت بسیار بالاتر پیش‌بینی میکند. همچنین بهترین خط برون‌یابی بحرانیت با افزایش ضریب همبستگی روبرو است. از سه عامل موثر در واگرایی خط بحرانیت در راکتور HWZPR، بعلت عدم چشمه نوترون خارجی و حضور یکنواخت چشمه نوترون بعلت شکافت خود-بخودی اورانیوم سوخت و ثابت بودن موقعیت شمارنده‌های نوترون (BF_3) فقط عامل فضائی در واگرایی موثر میباشد. راکتور با سوخت فلزی عدد N_s منفی است و فاکتور چشمه نوترون و این بعلت اثر فضائی ناشی از غیر خطی بودن رابطه ارتفاع و راکتیویته ناشی میشود.

مراجع

- [۱]. Chen, X.Y., Divergence phenomena of critical extrapolation curve of control rods-rising during physical start-up of PWR: the cause and mechanism. Nuclear Power Engineering ۱۸ (۶), ۴۹۶-۴۹۹, ۱۹۹۷.
- [۲]. Chen, W.Z., Kuang, B., Guo, L.F., et al., New analysis of prompt supercritical process with temperature feedback. Nuclear Engineering and Design ۲۳۶, ۱۳۲۶-۱۳۲۹, ۲۰۰۶.
- [۳]. Xueli Shang, Wenzhen Chen, Fan Zhang, A new method for improving critical extrapolation. Progress in Nuclear Energy ۵۹, ۴۴-۴۸, ۲۰۱۲.
- [۴]. Atomic Energy Organization of Iran (AEOI), Heavy Water Zero Power Reactor safety analysis report (SAR). Internal Report. ۲۰۱۳.