

## مدل نیمه تجربی انرژی آزاد شده از حوادث بحرانیته قبلی در تأسیسات چرخه سوخت

مجید جلالی<sup>۱\*</sup>، مجتبی مستجاب الدعواتی<sup>۲</sup>

۱- بخش مهندسی هسته‌ای - مرکز تحقیقات و تولید سوخت هسته‌ای اصفهان - سازمان انرژی اتمی ایران

۲- گروه فیزیک دانشگاه اصفهان

### چکیده

در حادثه بحرانیته هسته‌ای، زنجیر واکنش شکافت هسته‌ای به صورت تصادفی و غیر قابل کنترل بوقوع می‌پیوندد و تشعشعات مرگ آور پرتو نوترون و گاما ساطع میشود. تاکنون ۴ مدل ساده و مناسب بر اساس آزمایشات بحرانیته برای محاسبه و پیش بینی تعداد کل (معادل انرژی آزاد شده) و اولین بیشینه شکافت ها تدوین شده است. در این مقاله مدل نیمه تجربی جدیدی بر اساس داده های ۲۲ حادثه بحرانیته تأسیسات چرخه سوخت بوقوع پیوسته، ارائه شده است. در این مدل تعداد شکافت ها در اولین بیشینه و ناحیه پلاتو (تخت) به ترتیب بشکل  $Fb = (5.24)(1015)V0.53$  و  $Fp = (2.84)(10^{18})(1-t^{0.29})$  بدست می‌آید، که در آن  $V$  حجم مواد شکافت پذیر و  $t$  طول زمان بحرانیته است. در نتیجه، تعداد کل شکافتها در خلال حادثه بحرانیته از طریق  $F_T = F_b + F_p$  بدست می‌آید.

### مقدمه

پارامتر بحرانیته هسته‌ای از عوامل اصلی ایمنی هسته‌ای در کلیه تأسیسات شامل نیروگاه هسته‌ای، راکتورهای تحقیقاتی و تأسیسات چرخه سوخت است. جلوگیری از بحرانیته تصادفی با کنترل یا ترکیبی از عوامل جرم مواد شکافت پذیر، هندسه (شکل و ابعاد) مواد شکافت پذیر، غلظت و دانسیته مواد شکافت پذیر، حضور یا عدم حضور جاذب ها و بازتابنده ها نوترون امکان پذیر است. برای تأسیسات چرخه سوخت جلوگیری از بحرانیته یک فاکتور اصلی ایمنی است. در صورت وقوع بحرانیته مواد پرتوزا به طور گسترده در تأسیسات چرخه سوخت پخش می‌شوند و باعث پرتوگیری حاد کارکنان و کلیه افرادی که در مجاورت سایت هستند می‌گردد. ۶۰ حادثه بحرانیته با شدت های مختلفی در نقاط مختلف جهان از سال ۱۹۴۵ اتفاق افتاده، که ۲۲ حادثه آن در تأسیسات چرخه سوخت بوده است [1]. کلیه کمیت های دز گاما و نوترون، انرژی آزاد شده در حادثه بحرانیته تابعی از تعداد کل شکافت ها میباشد. تاکنون ۴ مدل ساده، مناسب و ارزشیابی شده بنام Tuck, Olsen, Barbry, Nomura برای ارزیابی تعداد شکافت در حوادث بحرانیته فرآیند چرخه سوخت ارائه شده است. مدل پیشنهادی این مقاله بر دو قسمت اولین ماکزیمم و ناحیه پلاتو توان (شار) بحرانیته و بر اساس پردازش داده های ۲۲ حادثه تدوین شده است [2],[3].

### حوادث بحرانیته

مواد شکافت پذیر به شکل های مختلف (قرص، پودر، میله، مجموعه و غیره) و در فازهای گوناگون (محلول، آبیکی گازی، پودری و غیره) وجود دارند. عدم دقت در طراحی و ساخت و نصب تجهیزات فرآیندی باعث می‌شود مواد شکافت پذیر به آسانی در قسمت های مختلف تجهیزات تجمع یابند، یا از حفاظ اولیه نشت کرده و در مکان هایی به طور غیره منتظره تجمع یابند. برای جلوگیری از بحرانیته هسته‌ای در توزیع و انتقال مواد هسته‌ای با قابلیت بحرانیته تصادفی، لازم است کارگردان تأسیسات همواره مقدار و میزان مواد در سرتاسر فرآیند و همچنین اطمینان کافی از

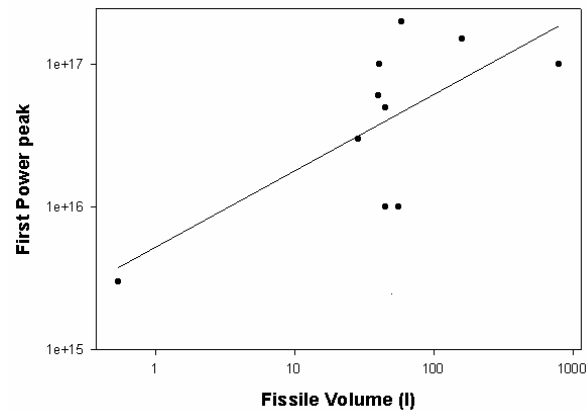
ایمنی بحرانیته هسته‌ای تجهیزات را در نظر داشته باشند. ۶۰ حادثه بحرانیته با شدت‌های مختلفی در نقاط مختلف جهان (آمریکا، روسیه، انگلستان و ژاپن) از سال ۱۹۴۵ اتفاق افتاده است. تقریباً یک سوم حوادث بحرانیته در تأسیسات چرخه سوخت اتفاق افتاده است. در اثر این حوادث (۲۱ حادثه) ۷ نفر کشته، ۴۰ نفر دز قابل ملاحظه‌ای دریافت نمودند. اگر چه اغلب حوادث قبل از سال‌های ۱۹۸۰ اتفاق افتاده اند، اخیراً دو حادثه بحرانیته در روسیه (۱۹۹۷) و ژاپن (۱۹۹۹) به وقوع پیوسته است. جدول ذیل مشخصات اصلی تمام این حوادث را نشان می‌دهد یکی از این حوادث در حین جابجائی فلز پلوتونیوم رخ داده است، ۲۱ حادثه دیگر در محلول‌ها یا محلول‌های آبیکی اتفاق افتاده است. تعداد کل شکافتها بین  $10^{15}$  و  $10^{19}$  بوده است. اغلب حوادث (۱۷ مورد) تعداد کل شکافتها از  $1 \times 10^{16}$  تا  $3 \times 10^{18}$  می‌باشد. در این مقاله با داده‌های ۲۲ حادثه مدل نیمه تجربی ساده و قابل کاربرد بدست می‌آید..

| No | Date       | Location    | Fissile Type | fissile | Fissile Volume (lit) | Vessel Volum (lit) | Fissions in Initial Burst ( $10^{17}$ fi) | Specific Fissions in Initial Burst | Total Fission ( $10^{17}$ ) | Secific Total Fissions | Duration (min) |
|----|------------|-------------|--------------|---------|----------------------|--------------------|---|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------|
| 1  | 1953/3/15  | Mayak       | Solution     | Pu      | 31                   | 40                 | Unknown                                   | Unknown                            | 2.0                         | $6.5 \times 10^{15}$   | 1              |
| 2  | 1957/4/21  | Mayak       | Slurry       | U(90)   | 30                   | 100                | Unknown                                   | Unknown                            | 1.0                         | $3.3 \times 10^{15}$   | 10             |
| 3  | 1958/1/2   | Mayak       | Solution     | U(90)   | 58.4                 | 442                | 2.0                                       | $3.4 \times 10^{15}$               | 2.0                         | $3.4 \times 10^{15}$   | 1              |
| 4  | 1958/6/16  | Y-12        | Solution     | U(93)   | 56                   | 208                | 0.1                                       | $2.0 \times 10^{14}$               | 13                          | $2.3 \times 10^{16}$   | 20             |
| 5  | 1958/12/30 | LASL        | Solution     | Pu      | 160                  | 982                | 1.5                                       | $9.4 \times 10^{14}$               | 1.5                         | $9.4 \times 10^{14}$   | 1              |
| 6  | 1959/10/16 | ICPP        | Solution     | U(91)   | 800                  | 18900              | 1.0                                       | $1.0 \times 10^{14}$               | 400.                        | $5.0 \times 10^{16}$   | 20             |
| 7  | 1960/12/5  | Mayak       | Solution     | Pu      | 19                   | 40                 | Unknown                                   | Unknown                            | 2.5                         | $1.3 \times 10^{16}$   | 110            |
| 8  | 1961/1/25  | ICPP        | Solution     | U(90)   | 40                   | 461                | 0.6                                       | $1.5 \times 10^{15}$               | 6.0                         | $1.5 \times 10^{16}$   | 3              |
| 9  | 1961/7/14  | Tomsk       | Solution     | U(22.6) | 42.9                 | 65                 | None                                      | None                               | 0.12                        | $2.8 \times 10^{13}$   | 1              |
| 10 | 1962/4/7   | Hanford     | Solution     | Pu      | 45                   | 69                 | 0.1                                       | $2.0 \times 10^{14}$               | 8.2                         | $1.8 \times 10^{16}$   | 2250           |
| 11 | 1962/9/7   | Mayak       | Solution     | Pu      | 80                   | 100                | None                                      | None                               | 2.0                         | $2.5 \times 10^{15}$   | 100            |
| 12 | 1963/1/30  | Tomsk       | Solution     | U(90)   | 35.5                 | 49.9               | Unknown                                   | Unknown                            | 7.9                         | $2.2 \times 10^{16}$   | 620            |
| 13 | 1963/12/2  | Tomsk       | Solution     | U(90)   | 64.8                 | 100                | None                                      | None                               | 0.16                        | $2.5 \times 10^{14}$   | 960            |
| 14 | 1964/7/24  | Wood River  | Solution     | U(93)   | 51                   | 103.7              | 1.0                                       | $2.4 \times 10^{15}$               | 1.3                         | $2.5 \times 10^{15}$   | 90             |
| 15 | 1965/11/3  | Electrostal | Slurry       | U(6.5)  | 100                  | 300                | None                                      | None                               | 0.08                        | $1.0 \times 10^{14}$   | 1              |
| 16 | 1965/12/16 | Mayak       | Solution     | U(90)   | 28.6                 | 100                | None                                      | None                               | 5.5                         | $1.9 \times 10^{16}$   | 420            |
| 17 | 1968/12/10 | Mayak       | Solution     | Pu      | 28.8                 | 62.1               | 0.3                                       | $1.0 \times 10^{15}$               | 1.3                         | $3.5 \times 10^{15}$   | 15             |
| 18 | 1970/8/24  | Windscale   | Solution     | Pu      | 40                   | 156                | None                                      | None                               | .01                         | $2.5 \times 10^{13}$   | .16            |
| 19 | 1978/10/17 | ICPP        | Solution     | U(82)   | 315.5                | 315.5              | Unknown                                   | Unknown                            | 27                          | $8.6 \times 10^{15}$   | 90             |
| 20 | 1978/12/13 | Tomsk       | Metal        | Pu      | .54                  | 3.2                | 0.03                                      | $5.6 \times 10^{15}$               | 0.03                        | $5.6 \times 10^{15}$   | 1              |
| 21 | 1997/5/15  | Novosibirsk | Slurry       | U(70)   | *                    | 700                | None                                      | None                               | 0.055                       | *                      | 1625           |
| 22 | 1999/9/30  | Tokai-mura  | Solution     | U(18.8) | 45                   | 100                | 0.5                                       | $1.1 \times 10^{15}$               | 25                          | $5.6 \times 10^{16}$   | 1180           |

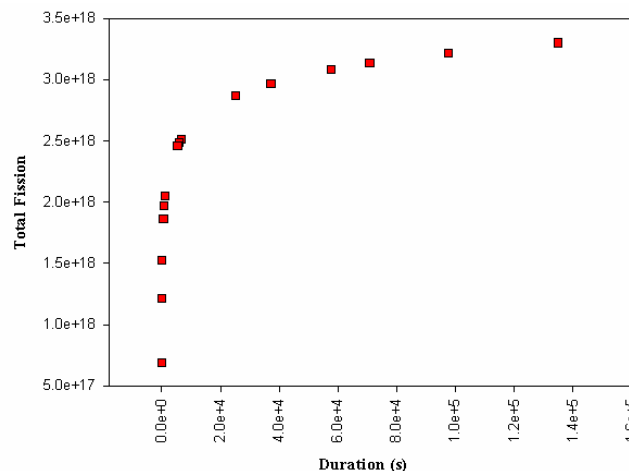
## مدل

چهار مدل ساده و آزمون شده Tuck, Olsen, Barbry, Nomura برای محاسبات تعداد شکافت‌ها در اولین قله توان و درکل مدت زمان بحرانیته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مدل‌ها تعداد شکافت‌ها در اولین قله توان و در طول فرآیند برحسب حجم (ابعاد هندسی) محلول ترکیب شکافت پذیر و مدت زمان بحرانیته بدست می‌دهد [3]. این مدل‌ها بر اساس داده‌های آزمایشات CRAC, SILENA, KEWB و تعدادی از حوادث پایه گذاری شده و هر کدام در شرایطی نظیر محلول خاص اورانیوم یا پلوتونیوم، غنای اورانیوم، بحرانیته همراه با جوشش یا عدم جوشش محلول، ... کارائی دارد. مدل ریاضی این مقاله بر دو قسمت استوار است. قسمت اول تعداد شکافتها در اولین قله توان بر پایه حجم بحرانیته و در قسمت دوم تعداد کل شکافت در ناحیه پلاتو (توان ثابت) بر اساس طول زمان بحرانیته و نه حجم بحرانیته پی ریزی شده است و این مشابه تئوری مدل Olsen می‌باشد. توابع ریاضی مطلوب با داده‌های ۲۲ حادثه بحرانیته بهینه شده در اولین

بیشینه و ناحیه پلاتو (تخت) به ترتیب بشکل  $F_b = (5.24)(10^{15})V^{0.53}$  و  $F_p = (2.84)(10^{18})(1-t)^{-0.29}$  بدست می‌آید، که در آن  $V$  حجم مواد شکافت پذیر و  $t$  طول زمان بحرانیت است. رفتار هر دو تابع در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. در نتیجه، تعداد کل شکافتها در خلال حادثه بحرانیت از طریق  $F_T = F_b + F_p$  بدست می‌آید. این مدل ساده شده برای پیش بینی اولین قله توان از شکافتها بر حسب ثانیه و پتانسیل انرژی آزاد شده بوسیله اولین قله در خلال بحرانیت گذرا را ارائه می‌دهد. با مقایسه بین مدل جدید و مدل OLSSEN، نشان داده می‌شود که مدل جدید حاشیه کافی برای پیش بینی قدرت بحرانیت و بویژه در طراحی و نصب سیستم آلامر بحرانیت CAS قابل استفاده است.



شکل ۱: رفتار تعداد شکافتها در اولین قله توان باحجم ترکیب مواد شکافت پذیر (تابع بهینه)



شکل ۲: رفتار تعداد کل شکافتها بر حسب مدت زمان بحرانیت حوادث

## Reference

- [1] T.P. McLaughlin et al., A Review of Criticality Accident, 2000 Revision , LA-13638, 2000
- [2] A.R. Olsen et al. ,Empirical Model to Estimate Energy Release from Accidental Criticality, Trans. Am. Nucl. Soc., 19, 189, 1974
- [3] Y. Nomura, Theoretical Derivation of Simplified Evaluation Models for The First Peak of a Criticality Accident in Nuclear Fuel Solution' Nucl. Technol.131, 12, 2000