

## تحلیل فرکانس وقوع حوادث آغازگر در نیروگاه‌های هسته‌ای

معینیان، فاطمه<sup>۱</sup> - غفرانی، محمد باقر<sup>۱</sup> - یوسف‌پور، فرامرز<sup>۲</sup> - کریمی، کاوه<sup>۳\*</sup>

۱ دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای

۲ شرکت سورنا

۳ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شرق

### چکیده:

هدف تحلیل فرکانس وقوع حوادث آغازگر به عنوان یکی از گام‌های تحلیل احتمالاتی ایمنی (PSA)، محاسبه پارامترهای قابلیت اطمینان (Reliability) حوادث آغازگر با استفاده از روش‌های آماری است. در این مقاله یک رویه جهت محاسبه فرکانس وقوع حوادث آغازگر و عدم قطعیت (Uncertainty) آنها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS، WINBUGS و MATLAB ارایه شده است. این روند، با استفاده از داده‌های خام حادثه قطع شبکه برق خارجی (LOOP) نیروگاه‌های آمریکا اعتبارسنجی شده است. از این روش می‌توان برای تحلیل داده‌های (Data Analysis) مربوط به سایر پارامترهای قابلیت اطمینان نیز استفاده نمود.

کلمات کلیدی: Initiating Event Analysis, Probabilistic Safety Assessment, Data Analysis

### مقدمه:

به طور کلی هدف فرآیند تحلیل داده‌ها (Data Analysis)، به عنوان یکی از بخش‌های PSA، به دست آوردن پارامترهای قابلیت اطمینان به منظور کمی‌سازی حوادث آغازگر، رویدادهای پایه (Basic Events) و رویدادهای بازیابی (Recovery Actions) در مدل PSA است. با توجه به نوپا بودن استفاده از تحلیل احتمالاتی ایمنی (Probabilistic Safety Analysis (PSA)) در ایران و نبود داده‌های خام لازم، تا کنون تقریباً در همه آنالیزهای انجام شده از داده‌های عمومی (Generic Data) استفاده شده است.

با توجه به استانداردهای PSA استفاده از داده‌های عمومی تا وقتی که مدت زمان قابل قبولی از کارکرد نیروگاه نگذشته باشد نه تنها غلط نیست بلکه الزامی است. با توجه به فضای نمونه زیاد پایگاه داده‌های عمومی، حتی پس از گذشت زمان مناسبی از کارکرد نیروگاه باز هم مبنای محاسبات داده‌های عمومی خواهند بود. در واقع در این حالت داده‌های عمومی با استفاده از داده‌های اختصاصی نیروگاه با استفاده از روش‌های بیزی (Bayesian Methods) بهبود (Update) می‌یابند.

با این وجود، این بدان معنی نیست که در صورت خرید تجهیزات نیروگاهی از کشورهای پیشرفته، پایگاه‌های داده عمومی آنها که بر مبنای داده‌های خام زیاد و استانداردهای لازم تهیه شده‌اند، برای PSA کفایت می‌کنند. در برخی از موارد (به طور مشخص مانند فرکانس حادثه LOOP (Loss Of Offsite Power))

که در این مقاله به آن پرداخته شده است) استفاده از داده‌های عمومی کشورهای دیگر جایز نیست؛ چرا که قابلیت اطمینان شبکه برق به طور مثال آمریکا، علی‌رغم اینکه با استانداردهای خوبی محاسبه شده و همچنین اطلاعات مربوط به آن با جزئیات کافی در دسترس است، با قابلیت اطمینان شبکه برق ایران و حتی اروپا متفاوت می‌باشد. به همین منظور برای بالا بردن دقت محاسبات PSA باید این مقادیر با توجه به داده‌های خاص کشور محاسبه شوند. به همین منظور در این مقاله روشی برای محاسبه فرکانس حوادث آغازگر ارایه شده و درستی این روش با محاسبه فرکانس LOOP در نیروگاه‌های آمریکا راست‌آزمایی شده است. به طور کلی روش‌های محاسبه پارامترهای قابلیت اطمینان به دو دسته روش‌های تخمین کلاسیک<sup>۱</sup> و تخمین بیزی<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند که به وسیله هر کدام می‌توان تخمین نقطه‌ای<sup>۳</sup> و یا تخمین بازه‌ای داشت. در تحلیل کلاسیک تنها اطلاعات موجود در داده‌های نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرند و درجه باور تحلیلگر در فرایند تخمین اثر گذار نیست [1].

### روش کار:

روند پیشنهادی تحلیل فرکانس وقوع حوادث آغازگر با استفاده از داده‌های خام جمع‌آوری شده دارای چهار گام اصلی است که به ترتیب به آنها پرداخته می‌شود:

گام اول: تخمین مقدار متوسط فرکانس وقوع حادثه

در این مرحله برای تعیین مقدار متوسط این پارامتر قابلیت اطمینان، توزیع بروز شده جفریز (UJNID) پیشنهاد می‌شود. این توزیع معمولاً زمانی به کار برده می‌شود که اطلاعات پیشین کمی در مورد پارامتر مورد نظر موجود باشد. با بروز کردن توزیع توسط داده‌های مشاهده شده پارامترهای توزیع پسین به صورت  $(0.5 + n, T)$  در خواهد آمد. در نتیجه مقدار متوسط پارامتر قابلیت اعتماد از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$\text{مقدار متوسط} = \frac{\alpha_{post}}{\beta_{post}} = \frac{n + 0.5}{T} \quad (\text{رابطه ۱})$$

گام دوم انتخاب روش مناسب جهت محاسبه عدم قطعیت

در گام دوم جهت تعیین روش محاسبه عدم قطعیت، ابتدا داده‌های قابلیت اعتماد برحسب علت وقوع حادثه، محل و زمان وقوع و یا سایر جنبه‌ها در گروه‌های مختلف دسته بندی می‌شوند. با استفاده از این داده‌ها و آزمون فرض میزان ارتباط یا وابستگی بین متغیرها در تمامی این گروه‌ها اندازه‌گیری می‌شود.

<sup>1</sup> Classic Estimation

<sup>2</sup> Bayesian Estimation

<sup>3</sup> Point Estimate

<sup>4</sup> Updated Jeffrey's Non-Informative Distribution

در اینجا فرض صفر عدم وابستگی داده‌ها خواهد بود و فرض مقابل وابستگی داده‌ها. معیاری که برای پذیرفتن و یا رد کردن فرض‌های آزمون فرض استفاده می‌شود، P-value است که با انجام آزمون به دست می‌آید. بدین ترتیب که اگر برای گروهی، P-value محاسبه شده کمتر از سطح معناداری از آزمون،  $\alpha$ ، باشد، می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس وقوع در این گروه ثابت نیست و این گروه خاص می‌بایست در هنگام تخمین پارامتر قابلیت اطمینان مورد توجه قرار گیرد. در اینجا سطح معنادار آزمون  $0.05$  در نظر گرفته شده است. برای انجام آزمون فرض از نرم‌افزار آماری قدرتمند SAS استفاده خواهد شد... [5]

گام سوم: تعیین توزیع مناسب برای فرکانس وقوع

در این گام، عدم قطعیت فرکانس وقوع حادثه مشخص می‌شود. برای این کار ابتدا با استفاده از چندین روش، توزیع فرکانس بدست می‌آید. روش UJNID که در گام اول برای محاسبه مقدار متوسط هر پارامتر به کار برده شد، برای تعیین توزیع پارامتر نیز قابل استفاده است. یکی دیگر از روش‌ها، استفاده از توزیع محدود<sup>۱</sup> (CNID) است. برای حوادث آغازگر، این توزیع به صورت توزیع گاما و دارای پارامتر شکل (Shape Factor)  $0.5$  می‌باشد. پارامتر دیگر توزیع،  $\beta$ ، از روی مقدار متوسطی که در گام اول محاسبه شده و با استفاده از رابطه  $0.5/\lambda$  به دست می‌آید.

مدل‌های سلسله مراتبی نیز برای تعیین عدم قطعیت پارامترها به کار گرفته می‌شوند. در آنها فرض بر ثابت بودن پارامتر قابلیت اطمینان در هر سطح گروه و متغیر بودن آن در بین سطوح گروه است. دو روش بیزی تجربی پارامتری (EB)<sup>۲</sup> و روش بیز سلسله مراتبی (HB)<sup>۳</sup>، از روش‌های متداول هستند که در دو مرحله انجام می‌شوند. در روش EB ابتدا ابرپارامترها با بیشینه کردن تابع درست نمایی به دست می‌آید و سپس این توزیع به عنوان توزیع پیشین استفاده شده و پارامترهای مجهول مختص هر سطح داده محاسبه می‌شود. برای پیاده‌سازی این روش از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

در روش HB، برای ابرپارامترها نیز توزیع جداگانه‌ای در نظر گرفته می‌شود. غالباً این توزیع یک توزیع پراکنده است زیرا اطلاعات دقیقی در مورد آن وجود ندارد. در این روش توسط روش شبیه‌سازی مونت کارلوی زنجیر مارکوفی (MCMC (Markov chain Monte Carlo simulation))، نمونه‌هایی از توزیع پسین تمامی پارامترهای مجهول، فراهم می‌شود و از روی آنها، تخمین‌های نقطه‌ای و بازه‌ای محاسبه می‌شوند. پیاده‌سازی این روش با استفاده از نرم‌افزار WinBUGS (Bayesian Inference Using Gibbs Sampling) انجام می‌شود.

<sup>1</sup> Constrained Non-Informative Prior

<sup>2</sup> The Parametric Empirical Bayes Method

<sup>3</sup> The Hierarchical Bayes Method



بعد از به دست آوردن ابرپارامترها با استفاده از این دو روش، توزیع پارامتر مجهول همانند روش CNID محاسبه می‌شود. بدین ترتیب که پارامتر شکل توزیع  $(\alpha)$  همان ابرپارامتر محاسبه شده خواهد بود. اما پارامتر  $\beta$  از رابطه  $\alpha/\lambda$  محاسبه می‌شود.

گام چهارم: انتخاب توزیع عدم قطعیت مناسب

اینکه کدام یک از این روش‌ها برای هر کدام از گروه‌های داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد، با بررسی نتایج آزمون فرض گام قبل، ابرپارامترهای محاسبه شده و میزان وابستگی رویدادها تعیین می‌شود اگر ابرپارامتر  $\alpha$  بدست آمده از دو روش EB یا HB کوچک باشد و یا وابستگی بین رویدادها زیاد باشد ( $\alpha \ll 0.05$ )، توزیع CNID انتخاب می‌شود و در غیر اینصورت از بین تمامی گروه‌ها، توزیع گروهی که دارای P-value کمتری است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### نتایج پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای محاسبه پارامترهای حادثه LOOP:

جهت راست‌آزمایی روند پیشنهادی از داده‌های حادثه قطع برق خارجی (LOOP) موجود در مدرک NUREG/CR-6890 استفاده شده است. اما برای تکمیل محاسبات و اعتبارسنجی کدهای نوشته شده در مواردی از سایر داده‌های این مدرک و یا داده‌های مدرک NUREG/CR-6823 نیز استفاده شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی گام اول برای هر چهار گروه، در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مقایسه مقادیر متوسط به دست آمده در گام اول

گروه بندی حادثه	تعداد حادثه	بازه زمانی (rcy)	فرکانس وقوع محاسبه شده	مقادیر موجود در مدرک NUREG 6890	درصد اختلاف
Plant Centered	1	724.3	2.07E-03	2.07E-03	0
Switchyard Centered	7	724.3	1.04E-02	1.04E-02	0
Grid Related	13	724.3	1.86E-02	1.86E-02	0
Weather Related	3	724.3	4.83E-03	4.83E-03	0

بعد از اعتبارسنجی کد نوشته شده در نرم‌افزار SAS، برای داده‌های وابسته به شبکه، دو گروه بندی سال و واحدهای نیروگاهی را در نظر گرفته و P-value محاسبه شده است. مقادیر حاصله در مقایسه با مقادیر گزارش شده در مدرک NUREG/CR-6890 در جدول ۲ مقایسه شده است.

جدول ۲: مقایسه P-value های به دست آمده برای گروه بندی های حوادث وابسته به شبکه

گروه بندی حوادث وابسته به شبکه	مقادیر P-Value حاصل از نرم‌افزار SAS	مقادیر P-Value گزارش شده در NUREG/CR-6890	درصد اختلاف
سال	2.27E-9	<0.00005	NA
واحد نیروگاهی	0.796	0.8537	6.7

در گام سوم می‌بایست هر چهار روش ذکر شده بروی داده‌ها اجرا شود. داده‌های اصلی مورد بحث با استفاده از سه روش CNID، UJNID و EB روش تحلیل شده و توابع توزیع به دست آمده از آنها با مقادیر



NUREG/CR-6890 مقایسه شده است. این نتایج در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به مقادیر P-value به دست آمده در گام قبلی روش EB تنها برای گروه‌بندی سال داده‌ها اجرا شده است.

جدول ۳: مقایسه توابع توزیع به دست آمده برای حوادث LOOP وابسته به شبکه

گروه بندی	روش مورد استفاده	مقدار میانگین			پارامتر $\alpha$		
		مقدار محاسبه شده	مقادیر موجود در NUREG 6890	اختلاف مقادیر (%)	مقدار محاسبه شده	مقادیر موجود در NUREG 6890	اختلاف مقادیر (%)
کل داده ها	UJNID	1.86E-02	1.86E-02	0.00	13.5	13.5	0.00
کل داده ها	CNID	1.86E-02	1.86E-02	0.00	0.5	0.5	0.00
سال	EB	1.77E-2	1.75E-2	1.14	1.59	0.11	*
سال	HB	2.35E-02	--	NA	0.13	--	NA

\* به بخش نتیجه‌گیری رجوع کنید

در گام چهارم می‌بایست توزیع مناسب از جدول ۳ انتخاب شود. با توجه به اینکه پارامتر شکل بدست آمده از روش EB کوچک است، توزیع مناسب همان توزیع CNID خواهد بود. در شکل ۱ مقایسه‌ای از توابع محاسبه شده آورده شده است.

از روش HB برای تخمین فرکانس کل حادثه LOOP استفاده شده است. اما با توجه به اینکه در مدرک NUREG/CR-6890 از جمع مقادیر به دست آمده برای گروه‌بندی‌های مختلف LOOP به عنوان فرکانس کلی حادثه استفاده کرده است، تفاوت‌هایی بین نتایج حاصل از نرم‌افزار WinBUGS و فرکانس‌های مدرک NUREG/CR-6890 وجود دارد. این نتایج در جدول ۴ مقایسه شده‌اند.

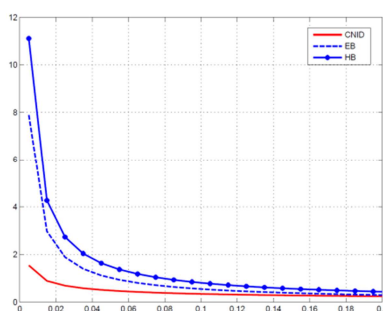
### بحث و نتیجه‌گیری:

نتایج مربوط به گام اول با دقت کافی با نتایج NRC مطابقت دارند. هر چند نتایج به دست آمده در گام دوم دارای اختلافی کمی با نتایج اصلی هستند ولی این اختلاف در حدی نیست که در نتیجه‌گیری نهایی در مورد وابستگی گروه‌ها اثر گذار باشد. به علاوه دستور FREQ در نرم افزار SAS دارای گزینه‌های متفاوتی است که می‌توان با بررسی آنها به نتایج دقیق‌تری رسید.

توابع توزیع به دست آمده در گام سوم در دو حالت CNID و UJNID مطابق با نتایج NRC است. در مورد روش EB نیز مقدار میانگین تفاوت کمی با نتیجه اصلی دارد. ولی در مورد پارامتر شکل (shape factor) اختلاف زیاد است که می‌تواند از ناقص بودن داده‌های خام در دسترس ناشی شده باشد و نیاز به بررسی بیشتری دارد. همین توزیع که با استفاده از روش HB به دست آمده، پارامتر شکلی نزدیک به مقدار NRC دارد.

جدول ۴: مقایسه توابع توزیع به دست آمده برای حادثه LOOP

پارامتر	مقادیر حاصل از نرم افزار WINBUGS	مقادیر موجود در مدرک NUREG 6890	درصد اختلاف
مقدار متوسط فرکانس وقوع	3.30E-02	3.59E-02	8.79



پارامتر شکل	2.16E+00	1.58E+00	36.71
-------------	----------	----------	-------

شکل ۱: مقایسه سه توزیع عدم قطعیت دست آمده

روش HB در مدرک NUREG/CR-6890 استفاده نشده است. در این مدرک برای تعیین فرکانس کلی حادثه از جمع فرکانس‌های گروه‌بندی‌ها استفاده شده است. با توجه به اینکه در هر کدام از این گروه‌بندی‌ها عدد ۰.۵ به تعداد حوادث اضافه شده است، با جمع آنها در واقع تعداد حوادث در نظر گرفته شده با تعداد واقعی حوادث ۲ تا اختلاف دارد. ولی در این پژوهش از روش HB برای تعیین فرکانس کلی وقوع حادثه استفاده شده است که از دقت بالاتری برخوردار است. در نهایت به طور کلی با توجه به تطابق نتایج به دست آمده با نتایج NRC می‌توان درستی روند ارایه شده را تایید کرد. به عبارت دیگر رویه پیشنهادی برای تخمین فرکانس وقوع حوادث آغازگر و عدم قطعیت آنها مناسب است. از این روش برای محاسبه دیگر پارامترهای قابلیت اطمینان مثل نرخ خرابی تجهیزات نیز می‌توان استفاده نمود.

#### مراجع:

- [1] Modarres et al, "Reliability Engineering and Risk Analysis", CRC Press, 2010
- [2] "PRA Procedures Guide", U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-2300, 1982
- [3] Atwood et al, "Handbook of Parameter Estimation for Probabilistic Risk Assessment", U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6823, 2002
- [4] Eide et al, "Reevaluation of Station Blackout Risk at Nuclear Power Plants", U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR 6890, 2005
- [5] SAS® Institute Inc., "SAS/STAT 9.22 User's Guide, The FREQ Procedure Cary", SAS Institute Inc., 2010
- [6] SAS® Institute Inc. "SAS/STAT 9.22 User's Guide, The GENMOD Procedure Cary", SAS Institute Inc., 2010
- [7] Alex Pedan, Analysis of Count Data Using the SAS® System, Vasca Inc., Tewksbury, MA