

ارزیابی مقایسه‌ای ابزارهای پشتیبان مدیریت حوادث و خیم در نیروگاه‌های هسته‌ای

مهدی ثقفی، محمد باقر غفرانی*

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

مدیریت حادثه^۱، مجموعه اقداماتی است که پس از وقوع رویداد آغازگر حادثه انجام می‌گیرد و سعی در مهار و محدودسازی آسیب شدید به سوخت را دارد. پس از حادثه TMI، برای تهیه ابزارهای پشتیبان مدیریت حوادث تلاش‌های بسیاری شده است. حادثه فوکوشیما و توجه به آموزه‌های آن، اهمیت مدیریت حوادث و خیم را بیش از پیش نشان می‌دهد. در این پژوهش روش‌های طراحی ابزارهای پشتیبان مدیریت حوادث و خیم نیروگاه‌های هسته‌ای، بررسی و طبقه‌بندی شده‌اند. ارزیابی مقایسه‌ای انجام گرفته، نقاط قوت و ضعف هر یک از این روش‌ها را نشان می‌دهد و نهایتاً استفاده از روش ترکیبی و ویژگی‌های یک ابزار پشتیبان مدیریت حوادث و خیم پیشنهاد شده است. کلید واژه‌ها: پشتیبان مدیریت حادثه، رویداد آغازگر، سیستم‌های ایمنی، حوادث و خیم.

مقدمه:

حوادث محتمل در نیروگاه‌های هسته‌ای با توجه به فرکانس وقوع و عواقب حادثه در گروه‌های، رویدادهای بهره‌برداری غیرعادی^۲ (AOO)، حوادث پایه طراحی^۳ (DBA)، حوادث ورای طراحی^۴ (BDBA) و حوادث و خیم^۵ (SA) تقسیم‌بندی می‌شوند [۱]. گروه حوادث DBA مربوط به سطح سه اصل دفاع عمقی (کنترل حادثه در محدود طراحی) و گروه‌های حوادث BDBA و SA مربوط به سطح چهار اصل دفاع عمقی (جلوگیری از گسترش حادثه و محدود سازی عواقب حوادث و خیم) هستند.

اصطلاح مدیریت حادثه به مجموعه اقداماتی گفته می‌شود که برای مهار و محدود سازی آسیب شدید به سوخت انجام می‌گیرند. اقدامات مدیریت حادثه، با توجه به شرایط آسیب به سوخت در دو گروه دستورالعمل‌های بهره‌برداری اضطراری^۶ (EOP) و راهنمای مدیریت حوادث و خیم^۷ (SAMG) تقسیم‌بندی می‌شوند. به طوری که اقدامات مدیریت حادثه قبل از آسیب جدی به سوخت در گروه EOP و سپس در گروه SAMG قرار می‌گیرند (شکل ۱). مدیریت حوادث و خیم شامل اقداماتی است در جهت اهداف زیر باشند. (۱) جلوگیری از تبدیل حوادث ورای طراحی به حوادث و خیم، (۲) مهار عواقب حوادث و خیم و (۳) رسیدن نیروگاه به شرایط ایمن پایا [۲].

^۱ Accident Management

^۲ Abnormal Operational Occurrence

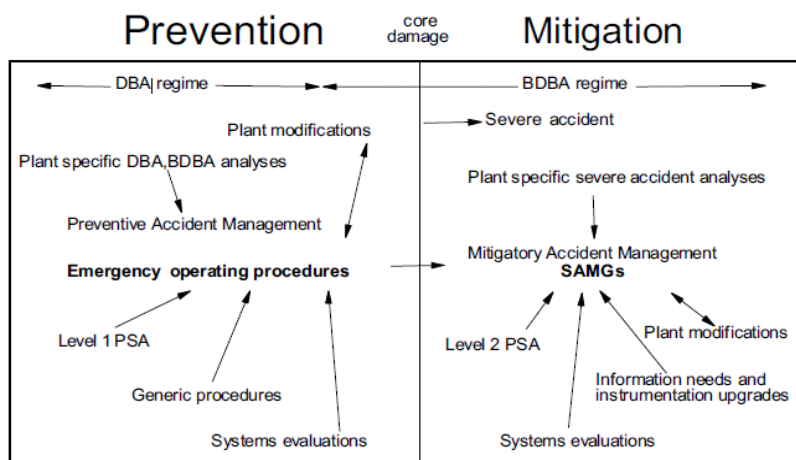
^۳ Design Bases Accident

^۴ Beyond Design Bases Accident

^۵ Severe Accident

^۶ Emergency Operation Procedure (EOP)

^۷ Severe Accident Management Guideline (SAMG)



شکل ۱- محدوده تقسیم‌بندی بین EOP و SAMG [۲]

روش‌های به کار رفته در ابزارهای پشتیبان مدیریت حوادث وخیم

روش‌های استفاده شده در تهیه ابزارهای پشتیبان مدیریت حادثه را به صورت کلی می‌توان به چهار گروه عمده تقسیم کرد. در گروه اول، ابزارهایی قرار می‌گیرند که از مدل‌سازی ترموهیدرولیکی برای پیشگویی روند پیشرفت حادثه استفاده می‌کنند. گروه دوم شامل ابزارهایی می‌شود که با استفاده از روش محاسبات نرم^۱ (مستقل از مدل ریاضی) و آموزش از طریق داده‌های از پیش محاسبه شده، در تشخیص حوادث و تصمیم‌گیری به اپراتور کمک می‌کنند. گروه سوم نیز به ابزارهایی تعلق دارد که از پایگاه‌های داده (نظیر داده‌های PRA^۲) استفاده می‌کنند و سلسله اقدامات مقابله‌ای متناسب را در مدیریت حادثه به اپراتور نشان می‌دهند. در گروه چهارم نیز ابزارهایی قرار دارند که به صورت ترکیبی از گروه‌های قبلی استفاده می‌کنند. در ادامه چندین نمونه از این روش‌ها که در مقالات علمی معتبر ارائه شده‌اند، آورده شده است تا بتوان کاربرد مناسب هر یک از این روش‌ها را با بررسی نقاط ضعف و قوت هر یک مشخص کرد.

۱. استفاده از مدل‌سازی ترموهیدرولیکی

در مقاله‌ای از J. C. Raines و همکاران [۳]، ابزار مدیریت حادثه MARS معرفی شده است و در مقاله‌ای دیگر از Y. Iguchi و همکاران [۴]، به تشریح ساختار این ابزار برای نیروگاه آب سنگین Fugen پرداخته شده است. MARS با استفاده از کد آنالیز حوادث وخیم MAAP به مدل‌سازی حادثه در نیروگاه می‌پردازد و روند حادثه را پیشگویی می‌کند. J. R. Alonso [۵]، کد MARS را در نیروگاه آب سبکی در اسپانیا استفاده کرده و نتایج

^۱ Soft Computing

^۲ Probabilistic Risk Analysis

MARS را با کد RELAP5 اعتباربخشی کرده است. از ابزارهای مشابه MARS می توان به ADAM، CAMS (گسترش یافته در پروژه OECD Haden Reactor) و KAMP (محصول KINS^{۱۰}) اشاره کرد [۶].

۲. استفاده از محاسبات نرم

T.V. Santosh و همکاران [۷]، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی سیستمی را طراحی کرده اند که می تواند وقوع حوادث را در نیروگاه هسته ای تشخیص داده و سپس اقدامات مدیریت حادثه را به اپراتور پیشنهاد دهد. توسط همین گروه ابزار تشخیص حوادث از روی نشانه های سیستم^{۱۱} نیز طراحی شده است [۸].

M.G. Na و همکاران [۹]، با استفاده از روش شبکه عصبی احتمالاتی^{۱۲} (PNN) توانسته اند تقسیم بندی رویدادهای آغازگر حوادث وخیم را در ۴ گروه LOCA, SBO, SGTR و TLOFW انجام دهند. در این ابزار با استفاده از شبکه فازی-عصبی^{۱۳} (FNN) وخامت حوادث تعیین می شود و زمان رویدادهای مهم نظیر ذوب شدن قلب، پیش بینی می شود. در همین زمینه، K.R. Doremus نرم افزار SAMSON را بر مبنای شبکه های عصبی، برای پیشگویی زمان وقوع رویدادهای مهم طی پیشرفت حوادث وخیم تهیه کرده است [۱۰]. همچنین می توان با وصل کردن اتصالات از خروجی به سمت ورودی نرون ها، حالت بازگشتی به شبکه فازی-عصبی نیز اضافه کرد [۱۱].

از شبکه های عصبی مصنوعی می توان در تخمین اندازه شکست در حوادث پایه طراحی هم استفاده کرد. در این روش با استفاده از تغییرات انتگرالی پارامترهای نیروگاه نظیر فشار و سطح آب فشارنده در یک بازه معین، اندازه سطح شکست در چند نقطه محدود از مدار اولیه تخمین زده می شود. در مقاله ای از M.G. Na و همکاران [۱۲] که مشابه کار فوق است، برای تشخیص محل شکست از PNN و برای تشخیص اندازه شکست از FNN استفاده شده است. همین گروه در مرجع [۱۳] توانسته اند برای تشخیص محل شکست از SVC^{۱۴} و برای تخمین اندازه شکست از GMDH^{۱۵} استفاده کنند.

در مقاله ای از K. Hadad و همکاران [۱۴]، تابع تحریک نرون های شبکه عصبی به تابع تبدیل موجک، تغییر یافته و بهبود در نتایج، گزارش شده است. در این مقاله از نتایج موجود در FSAR^{۱۶} برای آموزش شبکه عصبی استفاده شده است. با توجه به تعداد محدود گذرهای آموزشی و همچنین محافظه کارانه بودن نتایج تحلیل های FSAR، انتظار می رود قسمتهایی از مجموعه حوادث نیروگاه پوشش داده نشده باشد.

^{۱۰} Korean Institute of Nuclear Safety

^{۱۱} System Symptoms

^{۱۲} Probabilistic Neural Network

^{۱۳} Fuzzy Neural Network

^{۱۴} Support Vector Classification

^{۱۵} Group Method of Data Handling

^{۱۶} Final Safety Assessment Report

در مورد کاربردهای محاسبات نرم در مهندسی هسته‌ای، مقاله مروری در سال ۱۹۹۹ توسط R. E. Uhrig [۱۵] تهیه شده است. در این مقاله اشاره شده است که تشخیص گذرہا با محاسبات نرم می‌تواند با روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی، الگوریتم ژنتیک و غیره صورت گیرد.

۳. استفاده از پایگاه داده‌های PRA

H.S. Chang و همکاران، روشی مبتنی بر نتایج PRA را ارائه داده‌اند [۱۶]. در این روش در ابتدا سعی می‌شود با استفاده از درخت‌های رویداد مربوط به محفظه ساختمان راکتور و همچنین تخمین مقدار آسیب به نیروگاه، استراتژی مناسب برای مدیریت حادثه به اپراتور ارائه شود. در صورتی که شناخت رویداد آغازگر و مقدار آسیب به نیروگاه محقق نشود، با استفاده از پارامترهای نیروگاه، روند مناسب برای مدیریت حادثه از سناریو مشابه حادثه، انتخاب شده و اپراتور در گزینش اقدامات مدیریت حادثه پشتیبانی می‌شود.

۴. استفاده از روش‌های ترکیبی

در ادامه به معرفی ابزارهایی پرداخته می‌شود که با استفاده از ترکیب روش‌های گفته شده، تهیه شده‌اند. در مقاله‌های منتشر شده از S. Y. Park و K. Ahn در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۰۹، [۱۷] و [۱۸]، بسته نرم‌افزاری معرفی شده است که به عنوان پشتیبان برای تصمیمات اپراتور جهت مهار حوادث وخیم تهیه شده است. این ابزار در لحظات اولیه وقوع حادثه، داده‌های جمع آوری شده از نیروگاه را با پایگاه داده PRA (که متشکل از صدها سناریو حوادث وخیم با احتمال وقوع بالا است) مقایسه کرده و در صورت تطابق، حادثه را تشخیص می‌دهد ولی در صورت عدم تطابق، از مدل‌سازی ترموهیدرولیکی استفاده می‌کند و استراتژی‌های در دسترس برای مدیریت حادثه را تهیه می‌کند.

در مقاله‌ای از J. Ha و همکاران [۱۹]، ابزار پشتیبان برای مدیریت حوادث معرفی می‌شود که در سه فاز زیر تهیه شده است: (۱) قبل از وقوع حادثه وخیم، (۲) بعد از وقوع حادثه وخیم تا رهاسازی مواد رادیواکتیو و همچنین (۳) بعد از رهاسازی مواد رادیواکتیو در محیط. فاز اول مبتنی بر تشخیص حادثه با شروط منطقی مربوط به پارامترهای نیروگاه است و به معرفی نحوه دخالت اپراتور با استفاده از پایگاه داده PRA می‌پردازد. در فاز دوم (گسترش حادثه) نیز از مدل‌سازی ترموهیدرولیکی حادثه با کد MELCOR استفاده می‌شود.

ارزیابی مقایسه‌ای روش‌ها

بررسی و ارزیابی روش‌های بکار رفته در ابزارهای پشتیبان مدیریت حوادث وخیم نشان می‌دهد:

- اکثر ابزارهای مبتنی بر محاسبات نرم، برای تشخیص و تخمین وخامت رویداد آغازگر مناسب هستند. در عموم این روش‌ها تعداد زیادی از حوادث محتمل در نیروگاه، به سیستم تشخیص آموزش داده می‌شود تا

در حد امکان نزدیک‌ترین تخمین را به رویداد آغازگر داشته باشد. از جمله مشکلات این گونه سیستم‌ها، نیاز به داده‌های کافی برای پوشش تمام فضای رویدادها است.

- برای پیش‌گویی روند پیشرفت حادثه بهتر است از محاسبات نرم (برای مثال شبکه‌های عصبی مصنوعی) به علت عدم قطعیت زیاد استفاده نشود [۶]. پدیده‌های نظیر تعداد سیستم‌های ایمنی فعال در روند حادثه، در دسترس بودن توان الکتریکی، وقوع پدیده‌هایی نظیر پارگی محفظه راکتور و ... از جمله عواملی هستند که می‌توانند بر روند گسترش حوادث وخیم تأثیر گذاشته و پیش‌گویی با استفاده از محاسبات از پیش انجام شده را دچار عدم قطعیت بالایی کنند. از این رو برای پیش‌گویی روند گسترش حادثه، استفاده از محاسبات ترموهیدرولیکی غیرقابل اجتناب است.

- استفاده از داده‌های PRA برای پیش‌گویی روند حادثه مناسب نیست. چون از دیدگاه PRA همیشه کارکرد حداقلی سیستم‌ها مدنظر است و این عامل وضعیت نیروگاه را وخیم‌تر آنچه که هست، نشان خواهد داد. ولی استفاده از پایگاه داده‌های PRA برای معرفی سلسله اقدامات مورد نیاز برای مهار حادثه می‌تواند بسیار مفید باشد و دید خوبی در زمینه توالی رویدادها و سیستم‌های ایمنی مورد نیاز ارائه دهد. خلاصه‌ای از مزایا و کمبودهای روش‌های طراحی ابزارهای پشتیبان مدیریت حوادث در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ - مقایسه مزایا و کمبودهای روش‌های استفاده شده در ابزارهای پشتیبان مدیریت حوادث وخیم

روش	مزایا	کمبودها
استفاده از مدل‌سازی ترموهیدرولیکی	- مدل‌سازی منطبق بر شرایط جاری نیروگاه - امکان تغییر در مدل همزمان با تغییر در سیستم‌ها - تخمین زمان رویدادهای ثانویه طی گسترش حادثه - تخمین درجه وخامت رویدادهای ثانویه	- خطای اپراتور در تخمین شرایط مرزی مجهول نظیر اندازه شکست - دقت پایین در حجم بندی‌های درشت - سرعت پایین در حجم بندی‌های ریز - نیاز به کاربر آموزش دیده و مجرب
استفاده از محاسبات نرم	- توانایی تخمین داده‌های غیرقابل اندازه‌گیری - سرعت بالا به علت انجام محاسبات ساده - عدم نیاز به اطلاع از روابط ترموهیدرولیکی و معادلات حاکم	- محدودیت تعداد سناریوهای آموزشی نسبت به حالات زیاد محتمل - شبکه‌های عصبی استاتیک در گذرها کارا نیستند - آموزش سخت شبکه‌های دینامیک در بازه‌های زمانی طولانی مدت - خطا در صورت استفاده از داده‌های محافظه‌کارانه برای آموزش
استفاده از پایگاه داده PRA	- سرعت بالا به علت عدم انجام محاسبات - امکان مشاهده درخت رویداد مربوط به حادثه - کمک به اپراتور برای تشخیص توالی ورود سیستم‌های ایمنی و وقوع رویدادهای ثانویه	- استفاده از داده‌های محافظه‌کارانه و بدبینانه - صرف نظر از سناریوها با احتمال وقوع بسیار کم - طبقه‌بندی کلی رویدادهای آغازگر نظیر LBLOCA و SBLOCA - عدم توانایی در نظر گرفتن رویدادهای خارج از دامنه داده‌ها

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش‌های به کار رفته در ابزارهای پشتیبان مدیریت حوادث وخیم برای نیروگاه‌های هسته‌ای مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. یک ابزار پشتیبان مدیریت حوادث وخیم، با توجه به آموزه‌های حوادث هسته‌ای به ویژه چرنوبیل و فوکوشیما، برای کمک به اپراتور در تشخیص و تعیین مناسب‌ترین اقدامات مقابله‌ای

بایستی دارای ویژگی‌های اساسی زیر باشد: (۱) تشخیص رویداد آغازگر و تخمین وخامت آن، (۲) پیشگویی روند گسترش حادثه و (۳) ارائه سلسله اقدامات مدیریت حادثه. با توجه به بررسی‌های انجام شده، استفاده از محاسبات نرم برای ویژگی (۱)، مدل‌سازی ترموهیدرولیکی برای ویژگی (۲) و استفاده از پایگاه داده‌های PRA برای ویژگی (۳) مناسب است. از این رو با استفاده ترکیبی از روش‌های فوق، می‌توان کمبودهای روش‌های منفرد را پوشش داد و ابزاری کامل‌تر جهت پشتیبانی مدیریت حوادث و خیم ایجاد کرد.

منابع

- [۱].IAEA, Accident Analysis for nuclear Power Plants, SRS No. ۲۳, Vienna, ۲۰۰۲.
- [۲].IAEA, Implementation of Accident Management Programmes in Nuclear Power Plants, SRS No. ۳۲, Vienna, ۲۰۰۴.
- [۳].J. C. Raines, R. J. Hammersley, R. E. Hemry, J. A. Blaiadel, M. V. Bonaca and Y. F. Kalil, MARS – An Accident Management Tool, Proceeding of the Specialist Meeting On Operator Aids For Severe Accidents Management And Training, Halden, Norway, June ۱۹۹۳.
- [۴].Y. Iguchi, M. Sotsu, K. Mizuno, On-Line Support of The Fugen Plant Using MARS, ۷th International Conference On Nuclear Engineering (ICONE), Tokyo, ۱۹۹۹.
- [۵].J. R. Alonso, S. A. Enciso and A. M. Bassols, Computer Based Aids at Spanish Nuclear Safety Council (CSN) Emergency Room, , Proceeding of the Second OECD Specialist Meeting on Operator Aids for Severe Accident Management (SAMOA ۲), Lyon, France, ۱۹۹۷.
- [۶].IAEA, Application of Simulation Techniques for Accident Management Training in Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-۱۳۵۲, Vienna, ۲۰۰۳.
- [۷].T.V. Santosh, , A. Srivastava, V. Sanyasi Rao, ..., Diagnostic system for identification of accident scenarios in nuclear power plants using artificial neural networks, Reliability Engineering & System Safety, Volume ۹۴, Issue ۳, Pages ۷۵۹-۷۶۲, ۲۰۰۹.
- [۸].Santosh G. Vinod, A.K. Babar, H.S. Kushwaha, V.V. Raj, Symptom based diagnostic system for nuclear power plant operations using artificial neural network, Reliability Engineering and System Safety ۸۲, pages ۳۳-۴۰, ۲۰۰۳.
- [۹].M. G. Na, S. H. Shin, ..., Prediction of major transient scenarios for severe accident of nuclear power plants, IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume ۵۱, Issue ۲, ۲۰۰۴.
- [۱۰].K. R. Doremus, SAMSON – Severe Accident Management System Online Network, Proceeding of the Specialist Meeting On Operator Aids For Severe Accidents Management And Training, Halden, Norway, ۱۹۹۳.
- [۱۱].A. Evsukoffa, S. Gentilb, Recurrent neuro-fuzzy system for fault detection and isolation in nuclear reactors, Advanced Engineering Informatics, Vol. ۱۹, pages ۵۵-۶۶, ۲۰۰۵.
- [۱۲].M. G. Na, S. H. Shin, D. W. Jung, S. P. Kim, Ji H. Jeong, B. C. Lee, Estimation of break location and size for loss of coolant accidents using neural networks, Nuclear Engineering and Design, Volume ۲۳۲, Issue ۳, Pages ۲۸۹-۳۰۰, ۲۰۰۴.
- [۱۳].S. H. Lee, Y. G. No, M. G. Na, K. Ahn, S. Park, Diagnostic of Loss Of Coolant Accidents Using SVC And GMDH Models, IEEE Transactions on Nuclear Science, ۵۸, ۲۰۱۱.
- [۱۴].K. Hadad, M. Pourahmadib, H. M. Maraghia, Fault diagnosis and classification based on wavelet transform and neural network, Progress in Nuclear Energy, Volume ۵۳, Issue ۱, Pages ۴۱-۴۷, ۲۰۱۱.
- [۱۵].R. E. Uhrig, L. H. Tsoukalas, Soft Computing Technologies in Nuclear Engineering Applications, Progress in Nuclear Energy, Vol. ۳۴, No. ۱, PP. ۱۳-۷۵, ۱۹۹۹.
- [۱۶].H. S. Chang, K. S. Kang, S. H. Chang, Developed of severe accident management supporting systems using quantified containment event trees, Reliability Engineering & System Safety, Volume ۴۸, Issue ۲, Pages ۲۰۵-۲۱۶, ۱۹۹۵.
- [۱۷].S.Y. Park, K. Ahn, SAMEX: A severe accident management support expert, Annals of Nuclear Energy, Volume ۳۷, Issue ۸, Pages ۱۰۶۷-۱۰۷۵, ۲۰۱۰.
- [۱۸].K. Ahn, , S.Y. Park, Development of a risk-informed accident diagnosis and prognosis system to support severe accident management, Nuclear Engineering and Design, Volume ۲۳۹, Issue ۱۰, Pages ۲۱۱۹-۲۱۳۳, ۲۰۰۹.
- [۱۹].J. Ha, K. Jeong and J. Jeong, Operator Support System for Multistage Accident Management, Second OECD Specialist Meeting on Operator Aids for Severe Accident Management (SAMOA ۲), Lyon, France, ۱۹۹۷.