

# Metodologija za ocjenu ugroženosti bazena za istrošeno gorivo u nuklearnoj elektrani s tlakovodnim reaktorom

---

**Bašić, Ivica**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:343807>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-01**



*Repository / Repozitorij:*

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)





Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Ivica Bašić

**METODOLOGIJA ZA OCJENU  
UGROŽENOSTI BAZENA ZA  
ISTROŠENO GORIVO U NUKLEARNOJ  
ELEKTRANI S TLAKOVODNIM  
REAKTOROM**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Ivica Bašić

**METODOLOGIJA ZA OCJENU  
UGROŽENOSTI BAZENA ZA  
ISTROŠENO GORIVO U NUKLEARNOJ  
ELEKTRANI S TLAKOVODNIM  
REAKTOROM**

DOKTORSKI RAD

Mentor:  
Prof. dr. sc. Davor Grgić

Zagreb, 2023.



University of Zagreb  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMPUTING

Ivica Bašić

**METHODOLOGY FOR ASSESSING THE  
VULNERABILITY OF  
A SPENT FUEL POOL IN NUCLEAR  
POWER PLANT WITH PRESSURIZED  
WATER REACTOR**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:  
Professor Davor Grgić, PhD

Zagreb, 2023.

Doktorski rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu, na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, na Zavodu za visoki napon i energetiku.

Mentor: Prof. dr. sc. Davor Grgić

Doktorski rad ima: 134 stranice

Doktorski rad br: \_\_\_\_\_

## **O mentoru:**

**Davor Grgić** rođen je 17.05.1959. u Splitu. Diplomirao je (1981.), magistrirao (1989.) i doktorirao (2001.) na ETF Zagreb.

Od 1981. do 1990 godine zaposlen je u ETI Rade Končar. Područje rada mu je: modeliranje i automatizaciju procesa u energetici, funkcionalna ispitivanja u sklopu kvalifikacije opreme za klasu 1E, praćenje pogonskog stanja elektroopreme u NE i planiranje remonta, proračun i projektiranje magnetskih sustava za nuklearna istraživanja. Od 1990. godine zaposlen je na Elektrotehničkom fakultetu, na Zavodu za visoki napon i energetiku, kao zavodski suradnik, a od 2002 godine kao docent. U znanstveno-nastavno zvanje izvanredni profesor izabran je 2008 godine a u zvanje redovitog profesora 2018 godine. Uže područje rada su mu termohidraulički i neutronske proračuni u sklopu determinističkih sigurnosnih analiza NE, te inženjerski proračuni elektromagnetskih, toplinskih i polja strujanja fluida. Učestvuje u izvođenju nastave na predmetima: Nuklearno inženjerstvo, Sigurnost nuklearnih elektrana, Energijske tehnologije; Energijske pretvorbe, Laboratorij elektroenergetike 1 i 2, Okoliš i održivi razvoj, Obnovljivi izvori i napredne tehnologije, Elektroenergetika, Proizvodnja električne energije, Dinamika fluida i prijenos topline.

Sudjelovao je u znanstvenim i primijenjenim istraživanjima iz područja nuklearne energetike u okviru projekta SIZ-a za znanost SRH (1978-1985) i kasnije fonda za znanost RH (1986-2013). Sudjelovao je u obuci kadrova iz Irana, Kine, Pakistana, J. Koreje u okviru IAEA trening programa za područje nuklearne sigurnosti. Član je znanstvenog odbora i predavao je na međunarodnim tečajevima SUNCOP 3D u Zagrebu, Barceloni, Petten-u (IET) i na A&M University u Texas-u. Suraduje na području nuklearne energetike s Sveučilištem u Pisi, Milanu i Atlanti (GeorgiaTech). Sudjelovao je na koordinaciji aktivnosti na sigurnosnim analizama za projekt IRIS vođen od strane firme Westinghouse i trenutno na US DOE NEUP I2S-LWR projektu, te na projektu vezanom za Fluoride High-Temperature Reactor (FHRs) s Georgia Tech sveučilištem. Autor je i koautor više od 100 znanstvenih i stručnih radova iz područja nuklearne energetike objavljenih u stručnim časopisima, te na međunarodnim i domaćim skupovima. Učestvovao je u izradi i vođenju projekata za HEP, NE Krško, DZNS/DZRNS i URSJV.

Prof. Grgić član je HND, ENS, ANS, IEEE i Cigre stručnih udruga. Pridruženi je član HATZ i član je Znanstvenog vijeća za naftno-plinsko gospodarstvo i energetiku HAZU. Član

je odbora za sigurnost NE Krško (KSC). Sudjelovao je u 10 međunarodnih programskih odbora znanstvenih konferencija, član je dvaju uredničkih odbora znanstvenih časopisa, te sudjeluje kao recenzent u većem broju inozemnih časopisa. Tijekom studija dobio je 3 plakete “Josip Lončar” i nagradu rektora sveučilišta, a za magistarski rad srebrnu plaketu “Josip Lončar”. Dobio je nagradu hrvatske sekcije IEEE PES, PES Chapter Outstanding Engineer Award, 2010 godine i plaketu za doprinos radu HND-a 2017 godine.

## About the Supervisor:

**Davor Grgić** was born 17.05.1959 in Split. He graduated (1981.), obtained his MS (1989.) and Phd degree (2001.) at Faculty of electrical engineering in Zagreb.

From 1981. to 1990 he was employed in ETI Rade Končar. His fields of interest were: modeling and process automation in power engineering, functional testing as part of electrical equipment 1E qualification, surveillance of electrical equipment operating conditions in NPP and overview of maintenance activities, calculation and design of magnets for nuclear research. He works at the Faculty of electrical engineering, Department of energy and power systems, first as research assistant and since 2002 as docent. He was elected in scientific and teaching status of associate professor in 2008 and full professor in 2018. His fields of work are thermal hydraulic and neutronic calculations as a part of NPP deterministic safety analyses and engineering calculations of electromagnetic, thermal and fluid flow processes in power equipment. He participates in teaching of following subjects: Nuclear engineering, Safety of nuclear power plants, Energy technology, Energy conversion, Power plants, Laboratory of electric power engineering 1 and 2, Sustainable environment and development, Renewable resources and advanced technology, Electric power engineering, Production of electric energy, Fluid dynamics and heat transfer.

He was participating in scientific and applied research in field of nuclear power as part of projects financed by Croatian government from 1978 to 1985 and from 1986 to 2013. He was participating as an IAEA expert in nuclear safety training of people from Iran, China, Pakistan, and South Korea. He was member of scientific board of SUNCOP 3D and he was participating as the lecturer at SUNCOP 3D meetings in Zagreb, Barcelona, Petten (IET) and at A&M University of Texas. He has cooperation with University of Pisa, Milano and Georgia Tech. He was coordinating safety analyses of IRIS project led by Westinghouse and he is currently part of US DOE projects I2S-LWR and Fluoride High-Temperature Reactor Project (FHR) led by Georgia institute of Technology. He is author and coauthor of more than 100 scientific and applied papers, related to nuclear safety, published in international publications and international conference proceedings. He was participating in different commercial projects for HEP, NPP Krsko, and regulatory bodies of Croatia and Slovenia.

He is member of HND, ENS, ANS, IEEE and Cigre societies. He is associated member of HATZ and member of HAZU Scientific council for oil, gas and energy. He is member of Krsko safety committee. He was participating in more than 10 international



conferences program committees, he is associate editor of one scientific publication and he is reviewer in international publications and conferences. During his study, he obtained three Josip Loncar awards, one rector's award and silver Josip Loncar medal. He obtained IEEE PES Chapter Outstanding Engineer Award in 2010 and recognition from Croatian nuclear society in 2017.

## **POSEBNA ZAHVALA**

Posebno se zahvaljujem:

Nuklearnoj Elektrani Krško na odobrenju korištenja podataka tijekom izrade doktorata ali i na svim prijateljstvima, dodatnim znanjima i vještinama koje sam stekao radeći tamo 15 godina,

Mentoru prof. dr. Davoru Grgiću na suradnji, kolegijalnosti, prijateljstvu i mnogim korisnim savjetima tijekom studija i izrade ovog doktorata,

Dr. sc. Ivi Vrbaniću, prijatelju, kolegi i supatniku u već punoljetnom APOSSu kojeg smo zajedno stvorili i razvijamo i dalje,

Supruzi Jasni i mojoj obitelji na bezrezervnoj potpori i ljubavi koju mi pružaju.

## SAŽETAK

### **„Metodologija za ocjenu ugroženosti bazena za istrošeno gorivo u nuklearnoj elektrani s tlakovodnim reaktorom“**

U disertaciji je razrađena metodologija za kvalitativnu i kvantitativnu procjenu rizika od oštećenja nuklearnog goriva u bazenu za istrošeno gorivo na temelju modela obrane po dubini (modeliranjem razina obrane za pojedinačne skupove ugroza) u skladu s načelima vjerojatnosnih sigurnosnih analiza. Definirana su moguća stanja elektrane za slučaj gubitka hladioca bazena te fizičkog oštećenja obloge gorivnih šipki u bazenu. U sklopu metodologije modelirana su stabla događaja i kvarova. Izvršena je demonstracijska procjena rizika za utjecaj unutarnjih početnih događaja na bazen s osnovnim modelom te su rezultati zatim uspoređeni s modelom u koji su dodani alternativni sustavi za hlađenje bazena odnosno raspršivanje vode po njemu.

Posebno je analiziran potencijalni utjecaj oštećenja goriva u reaktoru na stanje bazena smještenog u zgradi za istrošeno gorivo. Izabrani scenariji proistekli iz vjerojatnosne analize su dodatno deterministički analizirani oruđima MAAP odnosno MELCOR.

Analizirani scenariji su pokazali da u slučaju niskovjerojatnih događaja, poput akcidentalnog snižavanja razine vode u bazenu, postoje operatorske akcije i oprema za povratak situacije pod kontrolu. Također, pokazano je da je malena vjerojatnost utjecaja akcidentalnih uvjeta u reaktorskoj zgradi, uzrokovanih oštećenjem jezgre, na stanje bazena s istrošenim gorivom. Rezultati analiza predstavljaju podloge za izradu aplikacije za pomoć pri odlučivanju o tehničkim mjerama ili korištenju pojedinih operatorskih akcija u primjeru teških nesreća u elektrani sa tlakovodnim reaktorom.

*Ključne riječi: istrošeno gorivo, rizik, bazen za istrošeno gorivo, determinističke analize, vjerojatnosne analize, RiskSpectrum, MAAP, MELCOR, Fukushima, stress test, oštećenje jezgre, zapaljivi plinovi, unaprjeđenje operatorskih akcija*

## **SUMMARY:**

### **„Methodology for Assessing the Vulnerability of Spent Fuel Pool in a Nuclear Power Plant with Pressurized Water Reactor“**

Well-known accident at the Fukushima NPP, caused by devastating earthquake, was followed, in the whole world, by evaluations and analyses, either from nuclear industry or/and national nuclear regulators point of view. Among other international organisations, ENSREG (European Nuclear Safety Regulators Group) initiated so called “stress test”, asking the EU countries to re-evaluate nuclear safety of existing NPPs towards rare and extreme external events such as seismic events of intensity above plant’s design bases. Such evaluations resulted with numerous changes and revisions related to nuclear power plants design requirements (e.g. IAEA SSR-2/1 “Safety of Nuclear Power Plants: Design”, WENRA RHWG Report “Safety of new NPP designs”, EUR Revision E, etc.) for either existing nuclear power plants or new ones. One of the biggest news in nuclear power plant design requirement terminology is the concept of so called „Practical Elimination“. The accident sequences with a large or early release can be considered to have been practically eliminated:

- if it is physically impossible for the accident sequence to occur or
- if the accident sequence can be considered with a high degree of confidence to be extremely unlikely to arise.

In each of the mentioned cases the demonstration should show sufficient knowledge of the accident condition analysed and of the phenomena involved, substantiated by relevant evidence. However, industry and regulators did not clearly prescribe a methodology for demonstrating the practical elimination principle using deterministic or / and probabilistic safety analyses.

The main goal of research covered by this dissertation is focused on development of methodology for safety demonstration of practical elimination of significant fuel damage in a spent fuel pool (SFP) as extremely unlikely event with a high degree of confidence. Practical elimination of an accident sequence cannot be claimed solely based on compliance with a general cut-off probabilistic value. Even if the probability of an accident sequence is very low, any additional reasonably practicable design features, operational measures or accident management procedures to lower the risk further should be implemented as it was demonstrated in the provided thesis.

The thesis consists of seven chapters. Chapter 1 serves as an introduction and general overview of the problem as described above.

Chapter 2 describes general methodology for qualitative and quantitative assessment of the risk of damage to nuclear fuel in SFP and the assessment of the possible conditions of the power plant in the case of a complete loss of coolant and physical damage to the fuel cladding in the SFP. It provides categorization of the initial events of all possible internal and external scenarios for an individual structure (considering two main locations with nuclear fuel, reactor and SFP) as well as combined scenarios (influence of hazards and scenario propagation from one structure to another).

Chapter 3 provides more detailed elaboration of methodology including the following items:

- definition of the operating conditions of the spent fuel pool cooling system;
- definition of potential initiating events (IE – initiating events, e.g., loss of cooling system, loss of water inventory or loss of power supply) that can lead to loss of coolant or damage to fuel rod claddings of spent fuel;
- estimation of the time windows for each initiating event in which there would be boiling of the coolant in the spent fuel pool and complete loss of the coolant;
- examples of created event trees (ET) and fault trees (FT) in the probabilistic safety analysis (PSA) model for defined initiating events, based on the analyses of operable systems and their safety functions including determination of applicable SFP PSA model parameters;
- examples of reliability analysis of operator actions in the case of an accident (Human Reliability Analysis);
- qualitative and quantitative (probabilistic) risk assessment of nuclear fuel damage in the SFP located in the fuel handling building (FHB) due to internal events and/or fuel damage in the reactor core in the containment;

The probabilistic quantification was done for two general main events: SFP boiling frequency (SFPB) and spent fuel uncovering (SFU). For the purpose of risk analysis and quantification, the SFP conditions are represented by a set of SFP systems / components / structures configurations and thermal loads. The quantification analysis of the frequency of SFU on individual initiators shows that the biggest contribution comes from the loss of SFP inventory, large and small leakages. The importance of loss of coolant events (compared to loss of cooling events) should come as no surprise, given that the loss of cooling events are characterized by long time windows (which are governed just by boiling and evaporative losses), which can be significantly reduced by loss of coolant (where leakages exceed loss of water by evaporation). Results of demonstration SFP PSA model are comparable with similar

Electric Power Research Institute (EPRI) study results (between 1E-7/year and 1E-10/year for different PWR plants)

Chapter 4, taking into account the PSA results provided in Chapter 3, discusses the performed analysis of the effectiveness of SFP spray cooling during SFP loss of coolant accidents (as the last barrier in the case of assumed loss of power, fire, loss of cooling, loss of coolant, seismic event or airplane crash). The MELCOR 2.1 model of NPP Krsko SFP was developed and tested for cases of loss of cooling accidents. The simple spray system with spray nozzles distributed at specified location at the top of the pool was added to the model. According to analysis results, spray nozzles that are installed are able to limit or delay long-term heat-up of the spent fuel, but in the case of late actuation it is possible to have temporary high oxidation rates and corresponding production of hydrogen, requiring additional operator actions such as actuation of emergency ventilation in the FHB. The performed calculations are conservative and use the ring-based approach to SFP modelling. Analysis shows that efficiency of spray system is eventually capable of limiting fuel temperature increase in SFP, but depending on time of actuation and droplets size can cause certain hydrogen generation.

Main focus of the dissertation is on the assessment of potential impact of combustible gases from reactor core damage on risk from damage to spent fuel pool located outside containment, as discussed in Chapter 5. An important element of the SFP risk analysis is the assessment of a possible impact of a severe accident in the reactor, which is in the containment, to SFP outside the containment. Chapter 5 analyses deal with one particular aspect of this problem and evaluate possible direct or indirect impact of the combustible gases generated in the course of reactor accident and released out of the containment. The methodology for assessment of possible hydrogen presence in the containment annulus, its flammability, and leakages through the penetrations toward the FHB in the case of a long-term station blackout (SBO) without successful restoration of the core cooling is described. Generally, the dependency between the reactor response and the SFP response to postulated initiators may primarily arise due to the following:

1. Simultaneous failures related to initiating event (e.g., loss of offsite power, seismic events, presence of Design Extension Conditions (DECs), etc.);
2. Reactor severe accident conditions which propagate to adverse conditions affecting the FHB/SFP structure or the SFP cooling / make-up equipment (“make-up” equipment here generally referring to the plant systems provided for adding water into the SFP in order to preserve adequate water inventory in SFP in the case of its

loss due to ruptures (loss of inventory events) or evaporation (total loss of cooling events)).

The major adverse conditions from the PSA Level 1 and Level 2 studies that affect the SFP event tree structure include the following:

- Hydrogen release that could result in deflagration events and structures or electrical / mechanical equipment failures;
- Containment failures that cause similar effects;
- Fission product releases that inhibit or preclude access to the areas needed for local alignments;
- Failure of all the installed equipment may force the Technical Support Centre (TSC) staff to decide how to prioritize the use of any remaining portable equipment. Decision for use in one application (e.g. reactor accident mitigation) may preclude its subsequent realignment to SFP due to local environmental conditions.

This thesis deals with one particular aspect of this problem and evaluates the possible propagation of the combustible gases generated in the course of reactor accidents out of the containment. The focus is on the evaluation of potential combustible gas leaking into the annulus and FHB (where, unlike the containment, it is not recombined as PARs (Passive Autocatalytic Recombiners) are not installed there) and its potential subsequent deflagration and impact on SFP. The leakage path can be from the containment to the annulus (and then to surrounding buildings or the environment), directly to the environment or directly to one of the neighbouring buildings. The Krško NPP's MAAP5.03 state-of-the-art model was used for analyses in the scope of the work presented (and original Krško NPP PSA Level 2 Studies), including all relevant plant-specific engineered safety systems such as emergency core cooling, power-operated relief valves, containment sprays, and fan coolers.

Taking into account the results of the previous Krško PSA Level 2 studies, the basic scenario of SBO (Station Black Out) sequence was chosen for the assessment of conditions in the annulus. Analysis takes into account 5 different sensitivity analyses related to hydrogen production and distribution, including flammability conditions in the containment annulus. Sensitivity analyses take into account various changes in initial and boundary conditions relating to the operability of Passive Containment Filtered Vent (PCFV) systems and assumed leakages from the containment to the annulus, from the containment to the atmosphere and from the annulus to the atmosphere. It is pointed out that sensitivity analyses did not assume any operator actions. When interpreting the results, calculation uncertainties need to be taken

into account: for example, no results were available from any full-scale test of combustible gases leakage into the annulus and the assessment of the deflagration conditions. Also, it needs to be considered that conservative assumptions were taken, e.g. large containment breach ( $0.1 \text{ m}^2$ ) assumed at the containment design pressure (0.41 MPa) rather than at the ultimate stress pressure (0.735 MPa). Nevertheless, the results of analyses from postulated scenarios show that in the case of a DEC event (e.g. assuming a seismic initiator above the design value), when leakages can be assumed conservatively much higher than design leakages (or when leakages are increasing before reaching the ultimate stress pressure), there is very small possibility for combustible gasses deflagration and it is reasonable to recommend to assure containment annulus venting as soon as possible.

Although the MAAP5.03 analyses demonstrate that deflagration risks for assumed scenarios are very low (combustible gasses volume fraction for all cases was below deflagration limit ( $<4\%$ ) before containment failure or PCFV actuation), it is reasonable to consider potential energetic containment or annulus failure, with impact on FHB (and SFP PSA Event Tree logic). It may be reasonably considered that the probability of the impact on FHB would decrease by an impact area factor of 0.07 (ratio of the relevant wall surface over the total wall surface) for evaluation of consequences of such event in FHB and regarding the systems, structures and components located there, for the protection of safety functions related to the SFP integrity (maintaining the SFP inventory and decay heat removal).

Logical and probabilistic model for quantification of impact of reactor core damage sequences on SFP was developed and discussed in details. In a detailed PSA model, an SFP event tree would be developed specifically for each of defined end-states from major logical model, reflecting specific damages to the SFP structures and / or mitigation systems imposed by the considered end-state. Thesis did not attempt to characterize the probabilities of particular sequences.

The presented assessment in Chapter 5 demonstrates how important it can be to adequately address the candidates for a high-level mitigative action (CHLA) related to ventilation of the auxiliary buildings in the plant-specific SAMGs, because it is impossible to eliminate the potential for a breach in the containment at the onset of the accident (or postulated DEC) or as a consequence of harsh conditions that develop inside the containment. This is also important because the presence of flammable volume fractions in the annulus or FHB is not monitored from the main control room. Such conditions show that during periods with relatively high combustible gases in the annulus combustion is prevented by an inert environment (due to steam (and  $\text{CO}_2$  from molten core – concrete interaction (MCCI))



volume fraction above 55 %) and low volume fraction of oxygen (less than 20 % is needed for deflagration or detonation).

Particularly, the Chapter 5 recommends that the best estimate sensitivity deterministic analyses (by MAAP or MELCOR) would be needed to evaluate more realistically containment leakage distribution, including a more detailed presentation of connections between FHB/SFP and the containment, as well as a more detailed model of adjacent buildings to decrease all postulated conservatisms

Chapter 6 discusses the bases for creating an application for severe accident management tools to help plant staff (technical support centre and main control room) on various available technical measures (or the use of individual operator actions to mitigate consequence of severe accident). Chapter 6 summarizes the previous work on EU NARSIS project and development of SEVERA tool which was focused just on implementation of Severe Accident Management Guidelines (e.g. depressurizing reactor coolant system (RCS), inject water in the RCS and controlled conditions in the containment) during severe accident progression events in the containment. SEVERA tool was developed based on DEX multi-variants decision making tool (developed by Institute Josef Stefan in Ljubljana). Usage of SEVERA was successfully demonstrated. However, work performed during preparation of thesis defines the major improvements in the logic model of SEVERA and additional attributes needed in hierarchical model to be able for decision making process to relate the interaction of core damage states in the containment with hazards related to fuel in SFP.

Conclusions in Chapter 7 summarize the compliance of dissertation with major goals and underline the scientific contributions resulting from this research:

1. Methodology for systematic qualitative and quantitative risk assessment of hazards impact on SFP was developed and usability demonstrated;
2. Probabilistic (very low frequency) and deterministic criteria (no fuel uncovering in the first 72 hours) for demonstration of physical elimination of event consequences were defined and successfully compared with results of chosen probabilistic and deterministic analyses;
3. All the necessary bases and attributes have been created for upgrading the decision-making process during the prioritization of actions in the case of unlikely events that would threaten both the primary circuit of the power plant and the pool for spent nuclear fuel (like a SEVERA application developed under the EU NARSIS project).

*Keywords: spent fuel, risk, spent fuel pool, deterministic analyses, probabilistic analyses, Fukushima, stress tests, core damage, combustible gases, guidelines for operator actions, MAAP, MELCOR, RiskSpectrum*

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1 Opis problema.....	1
<b>2. Metodologija za procjenu i rangiranje rizika od oštećenja nuklearnog goriva u bazenu za istrošeno gorivo</b> .....	<b>4</b>
2.1 Identifikacija stanja i rangiranje poboljšanja sigurnosti SFP nakon provedenih <i>stress</i> testova [16].....	4
2.2 Kvalitativni/kvantitativni model za kategorizaciju potencijalnih nesreća na SFP pogonskim NE.....	5
2.3 Definicija kategorija scenarija.....	7
2.3.1 Prva linija kategorizacije.....	8
2.3.2 Druga linija kategorizacije.....	8
2.3.3 Treća linija kategorizacije.....	9
2.4 Rezultirajuće kategorije scenarija.....	10
2.5 Prikaz scenarija.....	12
<b>3. Procjena početnih unutarnjih događaja u SFP neovisnih o radu reaktora (kategorija BI)</b> .....	<b>18</b>
3.1 Definicija SFP stanja za SFP PSA.....	18
3.2 Karakterizacija SFP stanja u smislu trajanja i SFP toplinskog opterećenja.....	25
3.3 Definicija internih početnih događaja za SFP PSA.....	26
3.3.1 Identifikacija internih početnih događaja za SFP.....	26
3.3.2 Procjena frekvencija inicijatora.....	27
3.4 Procjena vremenskih perioda za operaterske akcije.....	28
3.4.1 Vremena do ključanja (ključanja vode u SFP).....	29
3.4.2 Vremena isparavanja vode u SFP.....	30
3.5 Razvoj stabala događaja.....	33
3.5.1 Gubitak SFP hlađenja zbog slučajnih uzroka.....	33
3.5.2 Gubitak SFP hlađenja zbog gubitka vanjskog napajanja.....	35
3.5.3 Gubitak SFP hlađenja zbog potpunog gubitka CCW ili ESW.....	37
3.5.4 Mali gubitak SFP inventara hladioca.....	38
3.5.5 Veliki gubitak SFP inventara hladioca.....	39
3.6 Analiza funkcija i sustava te modeliranje stabla kvarova.....	40
3.6.1 Identifikacija funkcija, sustava i opreme koja će biti prikazana u stabilima kvarova.....	40
3.6.2 Primjer evaluacije pretpostavki koje se odnose na početni status sustava i opreme koja se modelira u SFP PSA modelu.....	41
3.6.3 Primjeri definiranja općih kriterija uspjeha.....	43
3.6.4 Primjer identifikacije operaterskih akcija i odziva na zahtjev.....	45
3.6.5 Druge pretpostavke primijenjene na modeliranje stabla kvarova.....	46
3.6.6 Analiza pouzdanosti operaterskog osoblja.....	47
3.7 SFP PSA Model Parameters.....	47
3.7.1 Primjer parametara za analizu greške sa zajedničkim uzrokom ( <i>Comon Cause Failure</i> ).....	48
3.8 Primjer kvantifikacija rizika od ključanja (SFPB) i otkrivanja gorivnih elemenata (SFU).....	49
3.8.1 Model kvantifikacije.....	49
3.8.2 Primjer rezultata kvantifikacije.....	51
3.9 Zaključci primjera za PSA procjenu internih događaja.....	57

<b>4. Deterministička procjena efikasnosti alternativnog ublažavanja scenarija otkrivanja gorivnih elemenata (kategorije događaja „SI“ i „BE“)</b> .....	<b>59</b>
4.1 Opis problema.....	59
4.2 MELCOR model SFP-a[3] .....	60
4.3 Rezultati analize MELCOR modelom [3] .....	62
4.3.1 Zaključak deterministične procjene efikasnosti alternativnog korištenja spreja u FHB .....	67
<b>5. Deterministička procjena potencijalnog utjecaja oštećenja jezgre reaktora na ocjenu rizika za bazen istrošenog goriva izvan kontejnmenta (kategorija „RL2“ i/ili „RT2“)</b> .....	<b>68</b>
5.1 Opis problema utjecaja nezgodnih stanja reaktora na procjenu rizika SFP .....	68
5.2 Pretpostavka veličine istjecanja iz kontejnmenta tijekom sekvenci teških nesreća ..	72
5.3 MAAP5.03 model.....	74
5.4 Proizvodnja vodika tijekom pretpostavljenih teških nesreća i akumulacija u kontejnmentu.....	77
5.4.1 Pojednostavljena procjena volumnog udjela vodika u annulusu zatvorenog prostora i/ili zgradi za rukovanje gorivom (FHB).....	81
5.4.2 MAAP5.03 Analiza istjecanja u anulus .....	83
5.4.3 Usporedba rezultata procjene pojednostavljenom metodom sa MAAP5.03 analizom istjecanja u anulus.....	91
5.4.4 Potencijalni dinamički utjecaj od zapaljenja vodika u kontejnmentu ili anulusu na FHB .....	91
5.4.5 Logički i probabilistički model za kvantifikaciju utjecaja sekvenci oštećenja jezgre reaktora na SFP.....	93
5.4.6 Zaključak procjene potencijalnog utjecaja oštećenja jezgre reaktora na ocjenu rizika za bazen istrošenog goriva izvan kontejnmenta (kategorija „RL2“ ili „RT2“) .....	98
5.5 Procjena izvedivosti alternativnih metoda uspostave hlađenja SFP.....	99
<b>6. Podloge za izradu aplikacije za pomoć pri odlučivanju o tehničkim mjerama ili korištenju pojedinih operaterskih akcija</b> .....	<b>104</b>
6.1 Dosadašnji rad na istraživanju odlučivanja o tehničkim mjerama ili korištenju pojedinih operaterskih akcija u nuklearnim elektranama s tlakovodnim reaktorom .....	104
6.2 Podloge za izradu aplikacije za pomoć pri odlučivanju o tehničkim mjerama ili korištenju pojedinih operaterskih akcija na osnovi ovoga doktorskog rada .....	112
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>122</b>
<b>POPIS LITERATURE</b> .....	<b>124</b>
<b>Prilog 1: Primjer osnovnih događaja povezanih s kvarovima opreme za model stabla događaja PIEV--LOC</b> .....	<b>129</b>
<b>Prilog 2: Primjer osnovnih događaja koji predstavljaju operatersku pogrešku u modelu stabla događaja PIEV--LOC</b> .....	<b>130</b>
<b>Prilog 3: Primjer pojednostavljene sheme operaterske akcije po EOP-3.6 REF3</b> .....	<b>131</b>
<b>Prilog 4: Primjer kombinacija događaja (djelomičan popis) koje dovode do otkrivanja goriva u bazenu nakon gubitka hlađenja i njegovog neuspješnog popravka</b> .....	<b>132</b>
<b>Prilog 5: Primjeri nadomjesnog ubrizgavanja vode u SFP</b> .....	<b>134</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>135</b>
<b>POPIS TABLICA</b> .....	<b>137</b>
<b>KAZALO POJMOVA</b> .....	<b>138</b>
<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	<b>140</b>
Popis objavljenih radova .....	141
<b>BIOGRAPHY</b> .....	<b>144</b>

## 1. UVOD

Veliki potres iz ožujka 2011. u blizini nuklearne elektrane Fukushima Dai-ichi u Japanu te analize nuklearne sigurnosti (vjerojatnosne i determinističke), provedene nakon njega, pojačale su svijest o potrebi detaljnijeg razumijevanja rizika povezanog s potencijalnim oslobađanjem radioaktivnosti iz bazena za istrošeno gorivo (SFP) uslijed gubitka njegova integriteta, gubitka hladioca ili gubitka potpornih sistema za njegovo hlađenje. Tema disertacije je razvoj i demonstracija cjelovite metodologije ocjene rizika vezanog uz pogon bazena za istrošeno gorivo (SFP), s naglaskom na interakciju s nezgodnim stanjima samog reaktora tijekom nesreće sa zajedničkim uzrokom (npr. rijetki i ekstremni seizmički događaj ili potpuni gubitak električnog napajanja). Razvijena metodologija može biti iskorištena za identifikaciju ugroženosti sistema (unutrašnji i vanjski događaji) i definiranje najučinkovitijih inženjerskih mjera za povećanje sigurnosti bazena, odnosno operaterskih akcija za snižavanje rizika oštećenja goriva i u primjeru pretpostavljenih neželjenih početnih događaja na prihvatljivu razinu. Takva metodologija je potencijalno korisna za redefiniranje projektnih osnova za nove nuklearne elektrane te ocjenu utjecaja postojećih na okoliš.

### 1.1 Opis problema

Nuklearne elektrane uobičajeno pohranjuju istrošeno nuklearno gorivo nakon tri goriva ciklusa u velikim vodenim bazenima (SFP- *spent fuel pool*) u blizini reaktorske zgrade (kontejnmenta). Bazeni za istrošeno gorivo služe za hlađenje istrošenih gorivnih elemenata (jer se u njima još godinama generira ostatna toplina raspadom preostalih fisijских produkata) do trenutka kada se oni mogu transportirati na ponovnu obradu za odvajanje preostalog fisijskog materijala te izradu novog goriva ili trajno pohraniti u za to pripremljena dugotrajna suha odlagališta. Bazeni za istrošeno gorivo projektirani su za pohranu i hlađenje istrošenog goriva na rok između 25-40 godina (zahvaljujući novom načinu pohranjivanja u gušće složene matrice). Zbog količine radioaktivnosti koju sadržavaju u istrošenom gorivu i potrebe za odvođenjem topline, bazeni za istrošeno gorivo predstavljaju potencijalni rizik za okoliš te ljude koji žive u blizini postrojenja. Jedna od prvih studija rizika za komercijalne nuklearne elektrane uopće (čuveni WASH-1400[9]) zaključila je u poglavlju 3.5 da je vjerojatnost gubitka hlađenja bazena za istrošeno gorivo malena na osnovu pretpostavljenih unutarnjih početnih događaja (*Internal Initiating Events*). I druge su prethodne analize rizika iz 90-tih godina prošlog stoljeća općenito pokazivale da su ozbiljni incidenti povezani s bazenima rijetki, s glavnim doprinosima riziku od strane većih seizmičkih događaja ([7],[8]) koji utječu direktno na integritet bazena ili druge događaje koji bi mogli oštetiti strukture bazena

prouzročivši gubitak vode kao hladioca i moderatora. U novije vrijeme, osim seizmičkog događaja, razmatra se i pad aviona ili ugroza radi terorističkih djelovanja. Ukupna procijenjena, za unutarnje i vanjske početne događaje, učestalost oštećenja goriva (CDF – *Core Damage Frequency*) u bazenu za generičke tlakovodne reaktore (PWR) je u redu veličine od 10E-6/reaktorsku godinu što je za red veličine manje od CDF za same reaktore. Međutim, učestalost (frekvencija) takozvanog velikog i ranog ispusta sa odgovarajućim posljedicama (LERF - *Large and Early Release Frequency*), obzirom na razlike u izvedbi reaktorske zgrade i zgrade za istrošeno gorivo usporediva je s LERF-om za reaktore (1E-6/reaktorsku godinu) [7].

Veliki potres (9 stupnjeva po Richteru) iz ožujka 2011. s posljedičnim plimnim valom od 13.8 m u blizini nuklearne elektrane Fukushima Dai-chi u Japanu te ocjene nuklearne sigurnosti (djelomičnim vjerojatnosnim i determinističkim analizama), provedene nakon njega, pojačale su svijest o potrebi detaljnijeg razumijevanja rizika povezanog s potencijalnim oslobađanjem radioaktivnosti iz bazena za istrošeno gorivo (uslijed gubitka njegova integriteta, gubitka hladioca ili gubitka potpornih sistema za njegovo hlađenje). Nakon analiza stanja teške nesreće u Fukushima Dai-chi elektrani, zahtjevane su od udruge europskih regulatornih organa za nuklearnu sigurnost (ENSREG) te provedene sa strane nuklearne industrije svake europske zemlje (elektrana, elektroprivreda te instituta) takozvane *stress* analize. Konačni izvještaj nakon provedenih *stress* analiza [16] zaključuje da se posebna briga mora posvetiti unapređenju sigurnosti bazena za istrošeno gorivo. Još tijekom provedbe ENSREG *stress* testova međunarodna agencija za nuklearnu energiju (IAEA) i zajednica zapadnoeuropskih regulatornih agencija za nuklearnu sigurnost (WENRA) pokrenule su reviziju čitavog niza dokumenata glede unaprijeđivanja projektnih zahtjeva za nove nuklearne elektrane [12][14] ali i poboljšanje sigurnosti (smanjenje potencijalnog rizika) za postojeće [13][15].

Problem s novom regulativom je što propisuje potpunu eliminaciju (*practically eliminated*) posljedica potencijalne teške nesreće (zaključno s degradacijom, odnosno taljenjem gorivnih elemenata (*significant core degradation*) te ispuštanjem značajne količine radioaktivnosti u okoliš u kratkom vremenu nakon početnog događaja (*large and early releases*) bilo iz reaktora ili bazena s istrošenim gorivom. IAEA taj zahtjev definira pod zahtjevom 20 [14], a WENRA pod O3.5 [12]. Pod praktičnom eliminacijom podrazumijevaju:

- okaz fizičke onemogućnosti (*physical impossibility*) scenarija, odnosno da su sve strukture i sistemi projektirani i izvedeni na način da nema ekstremnog scenarija koji

bi uzrokovao ispuštanje veće količine radioaktivnosti iz bazena. To predstavlja težak problem s inženjerskog stajališta definiranja svih projektnih zahtjeva glede na mogući skup ekstremnih scenarija (*design extension conditions*),

ili

- demonstraciju da je propagacija nekog početnog nezgodnog događaja (scenarija) do velikih radiololoških ispusta ekstremno malo vjerojatna (LERF) s velikim stupnjem pouzdanosti, odnosno da u primjeru ekstremnog događaja, niske vjerojatnosti a potencijalno velikih posljedica, osiguramo dodatne inženjerske mjere (npr. dodatnu fleksibilnu opremu, procedure u primjeru teških nesreća, itd.) i na taj način praktično eliminiramo potencijalni ispuštanje u okoliš odnosno svedemo rizik na prihvatljiv nivo.

U opisu mogućih prihvatljivih metodologija prema O3.4[12] kojim bi se demonstrirala praktična eliminacija nažalost se ne preciziraju svi elementi spomenutih analiza, bilo vjerojatnosnih (*probabilistic safety assessment*) ili determinističkih (*deterministic safety assessment*) niti kvantitativni (mjerljivi) kriteriji kojima bi se zadovoljili zahtjevi. Također, zakonodavci nisu propisali do koje mjere se treba povećati broj nivoa obrane po dubini (DiD - *Defence In Depth*) niti koliki stupanj nezavisnosti od projektnih DiD treba biti postignut.

U prošlosti je proveden čitav niz analiza nuklearne sigurnosti uz korištenje vjerojatnosnih postupaka potpomognutih determinističkim analizama pojedinih scenarija. Uglavnom su se analize odnosile na reaktor, a znatno u manjoj mjeri i na bazen za istrošeno gorivo. Postoji opis generičke evaluacije interakcije [12] nezgodnih stanja u bazenu s istrošenim gorivom s nezgodnim stanjima samog reaktora tijekom nesreće sa zajedničkim uzrokom (npr. rijetki i ekstremni seizmički događaj ili potpuni gubitak električnog napajanja), ali bez sustavne specifične analize kritičnih operaterskih akcija [1]. Korišteni vjerojatnosni i deterministički postupci uglavnom su poznati, a specifične analize se u pravilu ne publiciraju zbog osjetljive prirode takvih informacija [4], [5]. EU NARSIS projekt (započet 2017. i završen 2022. godine, doktorand je bio aktivni sudionik i koautor nekoliko izvještaja <http://www.narsis.eu/>, npr. [59]) bavi se, među ostalim, i razvojem metode odlučivanja u primjeru teških nuklearnih nesreća. Sustavna metodologija po kojoj bi se provela jedna takva analiza, posebno vezana za interakciju s reaktorskim sustavom te donošenjem kritičnih operaterskih akcija, nije prezentirana.

## **2. Metodologija za procjenu i rangiranje rizika od oštećenja nuklearnog goriva u bazenu za istrošeno gorivo**

U svrhu istraživanja definirani su pojedini koraci za izradu metodologije.

### **2.1 Identifikacija stanja i rangiranje poboljšanja sigurnosti SFP nakon provedenih stress testova[16]**

Potrebno je bilo identificirati i karakterizirati generički dizajn i sigurnosne značajke bazena istrošenog goriva (SFP) za operativne nuklearne elektrane (NPP) s reaktorom s tlačnom vodom (PWR) i uspostaviti referentni SFP dizajn u operativnim postrojenjima za proučavanje potencijalnih poboljšanja sigurnosti.

Za karakterizirani generički dizajn SFP-a razvija se, na temelju načela sigurnosti i procjene rizika, kvalitativni i/ili kvantitativni model za kategorizaciju potencijalnih nesreća na SFP-ovima tijekom svih relevantnih načina rada nuklearne elektrane Krško (NEK). Model se temelji na tradicionalnim načelima: determinističkih procjena sigurnosnih margina i dubinske obrane i vjerojatnosnih procjena rizika.

Uzimaju se u obzir sve relevantne unutarnje i vanjske kategorije opasnosti. Koristi se model na utvrđenom generičkom dizajnu SFP-a za definiranje svih relevantnih tipova/kategorija scenarija nesreće na SFP-u. Posebno se obratila pažnja na svaku od definiranih kategorija scenarija i okarakterizirana na jedan od dva načina:

Navedeni su argumenti da se scenarij može razmotriti vjerojatnosno kako bi se pokazao nizak rizik (koristeći načela reda veličine).

Ako se nizak rizik se ne može dokazati, potrebno ga je bilo je daljnje deterministički razmotriti/analizirati. Za takve slučajeve definirane su važne kategorije scenarija teških nesreća na SFP-u koji zahtijevaju daljnju determinističku analizu kako bi se razumjelo napredovanje nesreće.

Za definirane važne kategorije scenarija: 1) definiraju se odgovarajući početni i rubni uvjeti; 2) izvršava se deterministička analiza nesreće pomoću MAAP-a ili MELCOR-a.

Koriste se rezultati za prepoznavanje i predlaganje mogućih sigurnosnih poboljšanja koja se odnose na te scenarije. Utvrđuju se potrebe za daljnjim determinističkim analizama sigurnosti ili probabilističkim analizama rizika.

Analiza na kraju treba razložiti:

- trenutno stanje sigurnosti SFP-a;
- identificirana moguća poboljšanja sigurnosti; te

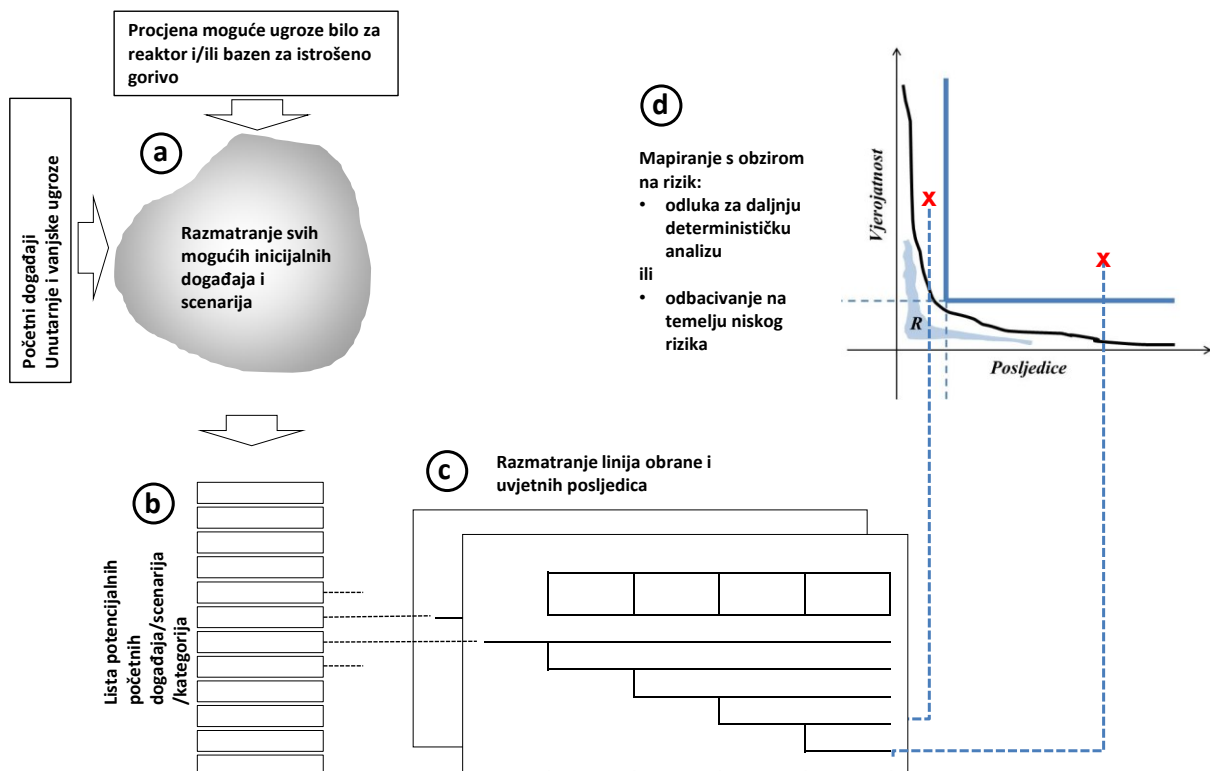


- utvrđene potrebe za daljnjim analizama za dokazivanje sigurnosti SFP-a u operativnoj nuklearnoj elektrani.

## 2.2 Kvalitativni/kvantitativni model za kategorizaciju potencijalnih nesreća na SFP pogonskim NE

Slika 1 prikazuje konceptualno kvalitativni/kvantitativni model. Sastoji se od četiri glavna elementa:

- Prostor (ili skup) svih mogućih početnih događaja i scenarija podijeljen je u ograničeni broj međusobno isključivih kategorija.
- Iz particioniranja se definira popis kategorija inicijatora/scenarija, koji je što je moguće potpuniji.
- Za svaku kategoriju scenarija identificirane su linije obrane od oštećenja goriva u SFP-u. Logičko stablo (stablo događaja) razvijeno je za identifikaciju sekvenci glavnih događaja koje proizvodi razmatrani inicijator/scenarij.
- Svaki niz događaja preslikava se u prostor rizika i ili izdvaja na temelju niskog rizika ili se zadržava za daljnju determinističku (ozbiljnija nesreća) analizu.



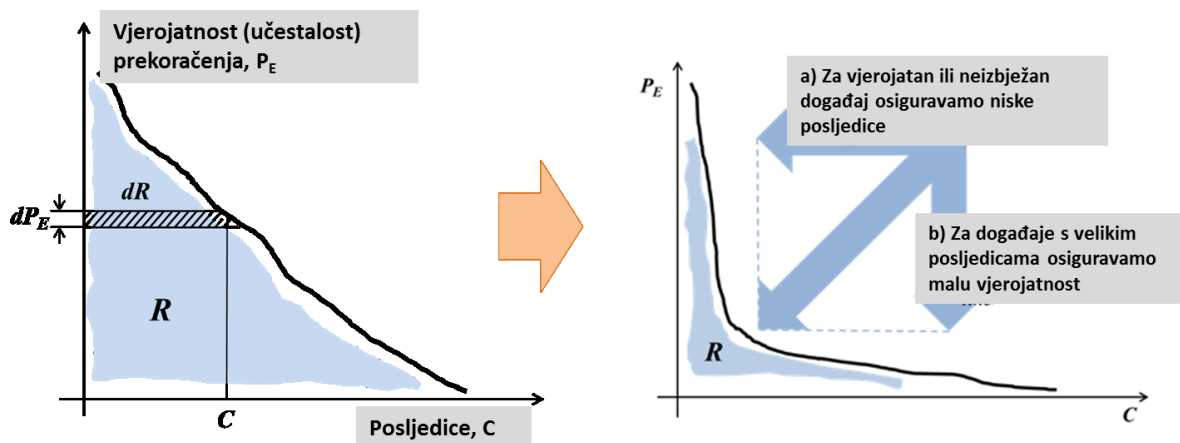
Slika 1: Kvalitativni/kvantitativni model (pristup) za kategorizaciju potencijalnih nesreća na SFP pogonskim NE

U elementu d iznad, dva glavna principa koriste se za smanjenje rizika povezanog s radom bilo kojeg postrojenja (Slika 2):

- za vjerojatne ili očekivane događaje (uključujući normalan rad) osiguravaju se niske posljedice, i
- za događaje s velikim (neprihvatljivim) posljedicama osiguravaju se niske vjerojatnosti.

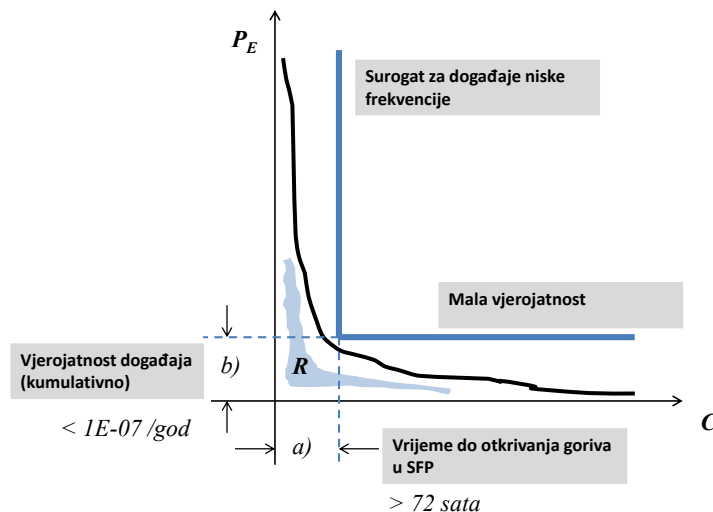
Za male posljedice i malu vjerojatnost poduzete su zamjenske mjere kako slijedi:

- Kriterij za niske posljedice je vrijeme do otkrivanja goriva (u SFP) veće od 72 sata. Svaki slijed, za koji se to može dokazati, izdvaja se iz daljnjeg razmatranja na temelju niskih posljedica.
- Kriterij za malu vjerojatnost je kumulativna učestalost od  $1E-07$  /god. Kumulativna učestalost (zbroy učestalosti) svih nizova događaja koji su izdvojeni na temelju male vjerojatnosti mora biti niža od gornjeg praga.



**Slika 2: Ilustracija dva glavna načela za smanjenje rizika povezanog s radom bilo kojeg postrojenja**

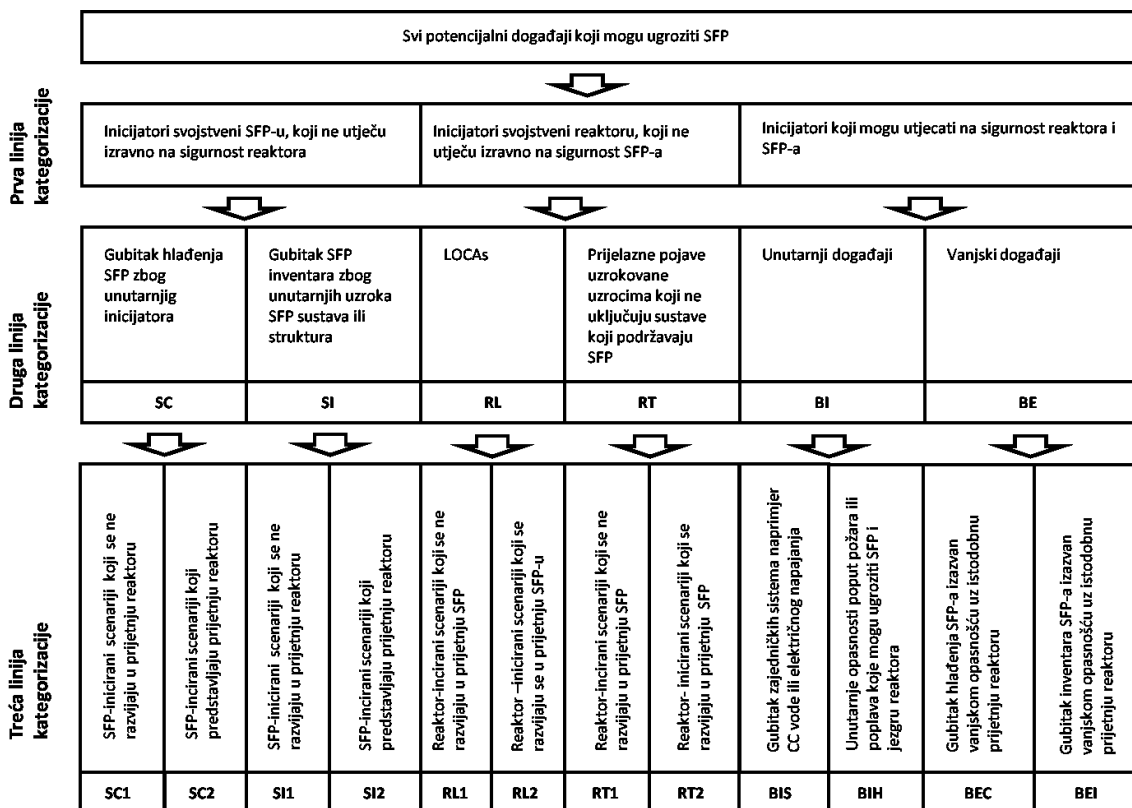
Slika 3 ilustrira surogate. Rizik ili utjecaj na sigurnost svih sekvenci koje bi bile odabrane na temelju gore navedenih načela smatra se marginalnim. Svaki drugi slijed treba dalje tretirati deterministički.



Slika 3: Ilustracija surogata za niske posljedice i malu vjerojatnost

### 2.3 Definicija kategorija scenarija

Slika 4 predstavlja podjelu kategorija svih mogućih scenarija unutarnjih i vanjskih za pojedinačnu strukturu (ili reaktor ili SFP) te kombinirano (utjecaj opasnosti i razvoja scenarija sa jedne strukture na drugu).



Slika 4: Podjela kategorija scenarija

### **2.3.1 Prva linija kategorizacije**

U prvoj liniji, svi mogući inicijatori podijeljeni su u tri međusobno isključive glavne kategorije:

- inicijatori svojstveni SFP-u, koji ne utječu izravno na sigurnost reaktora (tj. u početku je jezgra reaktora u stabilnom stanju);
- inicijatori svojstveni reaktoru, koji ne utječu izravno na sigurnost SFP-a (tj. u početku je gorivo u SFP-u u stabilnom stanju); i
- inicijatori koji mogu utjecati na sigurnost reaktora i SFP-a.

### **2.3.2 Druga linija kategorizacije**

Zatim, u drugoj liniji ove tri glavne kategorije inicijatora dalje su podijeljene u šest međusobno isključivih glavnih kategorija inicijatora: SC, SI, RL, RT, BI i BE.

#### **2.3.2.1 Glavna kategorija inicijatora SC**

Ova glavna kategorija inicijatora predstavlja gubitke SFP hlađenja zbog kvarova SFP rashladnog sustava koji su unutar sustava (npr. gubitak SFP rashladne crpke koja radi nakon čega slijedi neuspjeh rezervne crpke da se pokrene, blokada ili gubitak iz nekog drugog razloga izmjenjivači topline, itd.) Inventar SFP vode je inicijalno netaknut. Također, jezgra reaktora je u početku u stabilnom stanju. Ako se inicijator pojavi dok je reaktor na snazi, nema isključenja reaktora (u početku). Potencijalni razvoj događaja koji može dovesti do prijetnje jezgri reaktora razmatra se kasnije, kada se razdijele kategorije mogućih scenarija.

#### **2.3.2.2 Kategorija glavnog inicijatora SI**

Ova kategorija predstavlja gubitke inventara SFP vode iz razloga koji mogu uključivati:

- sifoniranje kroz spojne cijevi;
- gubitak integriteta SFP obloge (npr. pukotine);
- kvarove brtvenih vrata;
- nenamjerno ispuštanje vode;
- itd.

Kategorija glavnog inicijatora SI kasnije će se dalje podijeliti na male i velike gubitke SFP inventara.

Kao i u slučaju SC, jezgra reaktora je u početku u stabilnom stanju. Ako se inicijator pojavi dok je reaktor na snazi, nema isključenja reaktora (u početku). Potencijalni razvoj

dogadaja koji može dovesti do prijetnje jezgri reaktora razmatra se kasnije, kada se razdijele kategorije mogućih scenarija.

### **2.3.2.3 Kategorija glavnog inicijatora RL**

Ova glavna kategorija inicijatora predstavlja raspon reaktorskih/RCS LOCA inicijatora. SFP je u početku u stabilnom stanju. Potencijalni razvoj događaja koji može dovesti do prijetnje SFP-u razrađuje se kasnije, kada se kategorije mogućih scenarija razdijele. Kategorija RL1 je detaljno analizirana u PSA analizama razine 1 i 2 u [29][30]. Deterministička procjena jednog scenarija koji potencijalno ulazi za kategoriju RL2 radila se u svrhu ove disertacije u poglavlju 5 niže.

### **2.3.2.4 Kategorija glavnog inicijatora RT**

Ova glavna kategorija inicijatora predstavlja prijelazne pojave iz uzroka koji ne uključuju sustave koji podržavaju SFP tako da SFP u početku nije ugrožen i u stabilnom je stanju. (Na primjer, ova kategorija inicijatora ne uključuje prijelazne pojave iz potpunog gubitka potpornih sustava kao što je voda za hlađenje komponente ili električna energija što bi u isto vrijeme predstavljalo gubitak ili prekid hlađenja SFP-a.) Unutarnje opasnosti kao što su poplave ili požari. Ovdje su također uključeni HELB događaji koji ne ugrožavaju izravno SFP. Kategorija RT1 je detaljno analizirana u PSA analizama razine 1 i 2 u [29][30]. Deterministička procjena jednog scenarija koji potencijalno ulazi za kategoriju RT2 se radila u svrhu ove disertacije u poglavlju 5 niže.

### **2.3.2.5 Kategorija glavnog inicijatora BI**

Ova glavna kategorija inicijatora predstavlja sve inicijatore generirane interno u postrojenju koji imaju potencijal ugroziti i SFP i jezgru reaktora od samog početka. Uključuje gubitke potpornih sustava zajedničkih i reaktoru i SFP-u i svaku unutarnju opasnost (npr. požar ili poplava) koja može ugroziti oba izvora radioaktivnosti.

### **2.3.2.6 Glavna kategorija inicijatora BE**

Ova glavna kategorija inicijatora predstavlja sve inicijatore generirane izvan postrojenja koji imaju potencijal ugroziti i SFP i jezgru reaktora od samog početka. To su vanjske kategorije opasnosti kao što su seizmički događaji, ekstremni vremenski uvjeti i drugo.

## **2.3.3 Treća linija kategorizacije**

U trećoj liniji, šest kategorija inicijatora podijeljeno je u kategorije scenarija, uzimajući u obzir izazov za SFP i jezgru reaktora.

Svaka od prve četiri kategorije inicijatora, SC, SI, RL i RT dalje je podijeljena u dvije kategorije scenarija (s obzirom na to je li "drugo gorivo" ugroženo ili ne):

- Slučaj 1: Inicijator se ne razvija u prijetnju "drugom gorivu".
- Slučaj 2: Inicijator se razvija u prijetnju "drugom gorivu".

Dodatno, kategorija inicijatora BI (potencijal za trenutni izazov oba inventara goriva od inicijatora unutar postrojenja) dalje se dijeli na gubitke zajedničkih (za reaktor i SFP) sustava podrške i interne opasnosti.

Također, kategorija inicijatora BE (potencijal za trenutni izazov za oba inventara goriva od vanjskih opasnosti za postrojenje) dalje se dijeli na gubitke hlađenja SFP-a i gubitke inventara SFP-a (uz istovremenu prijetnju reaktoru).

## **2.4 Rezultirajuće kategorije scenarija**

Konačno, glavne kategorije scenarija (Slika 4) dodatno su podijeljene s obzirom na sljedeće točke:

- SFP inicijator, izravni ili inducirani, preslikava se u jedan od dva opća tipa:
  - Gubitak SFP hlađenja (gdje je SFP inventar inicijalno netaknut); ili
  - Gubitak SFP inventara.
- Glavna kategorija pokretača "gubitak SFP inventara", npr. SI na slici 4 može se podijeliti u dvije kategorije:
  - Mali gubitak inventara SFP-a, tj. gubitak (stopa curenja) koji se može pokriti uobičajenim metodama nadoknade;
  - Veliki gubitak inventara SFP-a, tj. gubitak (stopa curenja) koji premašuje kapacitet uobičajenih metoda nadoknade.
- Može se smatrati da bi glavne kategorije inicijatora RL i RT (inicijatori koji potječu iz reaktora) ako bi se širile do SFP-a rezultirale gubitkom hlađenja SFP-a (a ne gubitkom inventara SFP-a).
- Slično tome, kategorija glavnog inicijatora BI (unutarnji događaji koji potencijalno utječu na reaktor i SFP od početka) rezultirat će (ako utječu na SFP) gubitkom hlađenja SFP-a (umjesto gubitkom zaliha SFP-a).

Tablica 1 prikazuje završne kategorije scenarija.

**Tablica 1: Sažetak kategorizacije potencijalnih scenarija**

Kategorija		Glavni inicijator	Karakterizacija
SC1		Gubitak hlađenja SFP	Gubitak SFP hlađenja od unutarnjih uzroka SFP sustava. Ne razvija se u prijetnju reaktoru.
SC2		Gubitak hlađenja SFP	Gubitak SFP hlađenja od unutarnjih uzroka SFP sustava koji se razvijaju u prijetnju reaktoru. Stoga se oporavak SFP hlađenja ili ublažavanja komplicira.
SI1	SI1-S	Gubitak SFP hladioca (inventara)	Small loss of SFP inventory from causes internal to SFP systems or structures. Does not develop into a threat to the reactor.
	SI1-L	Gubitak SFP hladioca (inventara)	Veliki gubitak SFP inventara zbog unutarnjih uzroka SFP sustava ili struktura. Ne razvija se u prijetnju reaktoru.
SI2	SI2-S	Gubitak SFP hladioca (inventara)	Mali gubitak inventara SFP-a zbog unutarnjih uzroka SFP sustava ili struktura koji se razvijaju u prijetnju reaktoru. Stoga se oporavka SFP inventara ili ublažavanje (uspostavljanje sastava) komplicira.
	SI2-L	Gubitak SFP hladioca (inventara)	Veliki gubitak inventara SFP-a zbog unutarnjih uzroka SFP sustava ili struktura koji se razvijaju u prijetnju reaktoru. Stoga se oporavak SFP inventara (uspostavljanje sastava) ili ublažavanje komplicira.
RL1		NA	LOCA u RCS. Ne razvija se u prijetnju SFP-u. Stoga, nije relevantno.
RL2		Gubitak hlađenja SFP	LOCA u RCS-u koji se razvija u prijetnju hlađenju SFP-a. Oporavak SFP hlađenja ili ublažavanja je kompliciran.
RT1		NA	Prijelazni proces reaktora iz razloga koji ne uključuju sustave koji podržavaju SFP. Ne razvija se u prijetnju SFP-u. Stoga, nije relevantno.
RT2		Gubitak hlađenja SFP	Prijelazni proces reaktora zbog uzroka koji ne uključuju sustave koji podržavaju SFP koji se razvija u prijetnju hlađenju SFP-a. Oporavak SFP hlađenja ili ublažavanja je kompliciran.
BIS		Gubitak hlađenja SFP	Gubitak potpornog sustava zajedničkog za reaktor i SFP (npr. električna energija ili CCW). Oporavak SFP hlađenja ili ublažavanja potencijalno je kompliciran.
BIH		Gubitak hlađenja SFP	Unutarnje opasnosti poput požara ili poplava koje mogu ugroziti SFP i jezgru reaktora. Oporavak SFP hlađenja ili ublažavanja potencijalno je kompliciran.
BEC		Gubitak hlađenja SFP	Gubitak hlađenja SFP-a izazvan vanjskom opasnošću uz istodobnu prijetnju reaktoru. Oporavak SFP hlađenja ili ublažavanja potencijalno je kompliciran.

Kategorija		Glavni inicijator	Karakterizacija
BEI	BEI-S	Gubitak SFP hladioca (inventara)	Mali gubitak SFP inventara izazvan vanjskom opasnošću uz istodobnu prijetnju reaktoru. Oporavak inventara SFP-a ili ublažavanje (uspostavljanje sastava) potencijalno je komplicirano.
	BEI-L	Gubitak SFP hladioca (inventara)	Veliki gubitak inventara SFP-a izazvan vanjskom opasnošću uz istodobnu prijetnju reaktoru. Oporavak inventara SFP-a ili ublažavanje (uspostavljanje sastava) potencijalno je komplicirano.

## 2.5 Prikaz scenarija

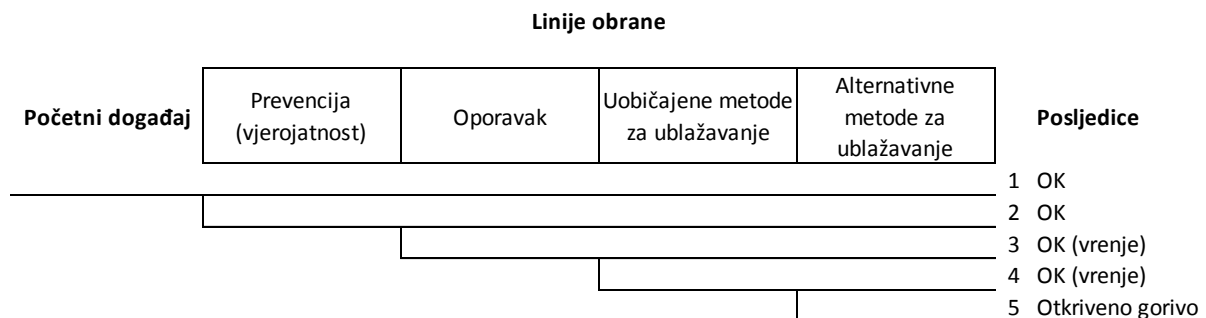
Kako bi se identificirani scenariji (Tablica 1) mogli prikazivati s obzirom na njihov značaj rizika, potrebno je prvo identificirati linije obrane. Za dvije općenite vrste, gubitak SFP hlađenja i gubitak SFP inventara, razmotrit će se sljedeće linije obrane:

- Prevenirica (inicijatora). Mjere ili značajke za sprječavanje inicijatora odražavaju se u njegovoj vjerojatnosti. Ove mjere mogu uključivati:
  - pouzdanost opreme, praksa testiranja i održavanja, redundantnost nizova (npr. SFP rashladni sustavi) itd. Ove mjere mogu odražavati, npr., veću ili manju vjerojatnost gubitka SFP hlađenja.
  - Programi pregleda tijekom rada za strukture i komponente. Na primjer, to se može odraziti na vjerojatnost pojave curenja i posljedičnih gubitaka zaliha.
  - Strukturni kapacitet SSC-ova. Na primjer, u slučaju seizmičkog događaja uvjetna vjerojatnost inicijatora kao što je inducirani gubitak inventara izravno ovisi o seizmičkoj krhkosti konstrukcija.
  - itd.
- Oporavak (od inicijatora).
  - U slučaju gubitka SFP hlađenja, vrijeme do ključanja može biti znatno i može omogućiti oporavak SFP rashladnog sustava. Vjerojatnost uspješnog oporavka prije ključanja ovisila bi o uzroku kvara SFP hlađenja, npr. bilo da je unutar SFP sustava hlađenja ili u sustavu za podršku gubitka (npr. CCW ili električna energija).
  - U nekim slučajevima gubitka SFP zaliha može biti moguće prekinuti gubitak (npr. zatvaranjem odvodnog puta).
- Ublažavanje (inicijatora) normalnim metodama



- Nenadoknađeni gubitak SFP hlađenja doveo bi do ključanja i gubitka zaliha vode zbog isparavanja.
  - Gubitak SFP inventara izravno dovodi do gubitka.
  - Operativne nuklearne elektrane obično imaju niz različitih metoda za inventarizaciju "normalnim" sredstvima. U ovom kontekstu "normalno" se odnosi na metode koje su opisane u normalnim radnim postupcima sustava (SOP). Primjeri mogu uključivati injektiranje iz spremnika kao što su RWST, RMWST ili spremnici za demineraliziranu vodu. Prijenos vode obavljaju crpke iz uobičajenih sustava postrojenja, kao što su SFP ili RWST crpke za pročišćavanje, RMW crpke sustava ili crpke za prijenos demineralizirane vode.
- Ublažavanje (inicijatora) alternativnim metodama
  - Uz uobičajene metode, nuklearne elektrane koje trenutno rade obično imaju alternativne metode koje se mogu oslanjati na druge spremnike (npr. Protupožarni spremnici) ili izvore vode (npr. rijeka). Voda se može prenositi fiksnim crpkama (npr. protupožarne MDP crpkaili DDP) ili mobilnom opremom.

Slika 5 prikazuje opće logičko stablo (stablo događaja) koje se može primijeniti na sve inicijatore / scenarije. Naslovi predstavljaju linije obrane o kojima se govori.



**Slika 5: Ilustracija općeg logičkog stabla (stabla događaja)**

Tablice 2 do 4 u nastavku dalje govore o određenim linijama obrane (LOD) za tri opće vrste inicijatora, tj. gubitak SFP hlađenja, mali gubitak SFP inventara i veliki gubitak SFP inventara.

Kvalitativna i kvantitativna razmatranja svih scenarija iz Tablice 1 (slijed otkrivanja goriva iz stabla događaja) tek slijede. Svaki od scenarija može biti odabran na temelju niskog rizika ili će biti zadržan za daljnju MELCOR/MAAP analizu. Normalno, proces bi trebao

konvergirati prema identifikaciji samo nekoliko scenarija, od kojih je najvažniji (za tretman MELCOR/MAAP) veliki gubitak SFP inventara.

**Tablica 2: Linije obrane (LOD) za početni događaj gubitka hlađenja SFP**

	<b>SC1. Utjecaj ograničen na SFP.</b>	<b>SC2, RL2, RT2. Utjecaj se širi na "drugog" gorivo.</b>	<b>BIS, BIH. Interni događaji. Utjecaj i na SFP i na reaktor.</b>	<b>BEC. Vanjski događaji. Utjecaj na SFP i na reaktor.</b>
<b>Prevenција (vjerojatnost)</b>	Tipično: Gubitak prve (radne) rashladne crpke / HX nakon čega slijedi / u kombinaciji s kvarom ili nedostupnošću rezervnih crpki / HX.	SC2: Isto kao SC1. RL2, RT2: Ne očekuje se gubitak hlađenja SFP-a bez nekih (kombinacija) grešaka i kvarova u tijeku odgovora na inicijator reaktora.	BIS: Npr. potpuni gubitak CCW. (Gubitak radne CCW crpke praćen kvarom priprave CCW crpke.) Ista prevencija (vjerojatnost) može se primijeniti i na SFP i na reaktor. BIH: Ne očekuju se unutarnje opasnosti koje istovremeno utječu na SFP i reaktor, zbog odvajanja.	Vjerojatnost se sastoji od (produkta) dva faktora. Prvi faktor je jednostavno vjerojatnost pojave opasnosti (npr. učestalost seizmičke opasnosti) i nije povezan s prevencijom. Međutim, može se računati kao virtualni LOD. Drugi faktor je mjera krhkosti SSC-a na opasnost (npr. seizmička krhkost).
<b>Oporavak</b>	Popravlak SFC rashladnog sustava prije SFP ključanja. Ponekad to može biti jednostavno ponovno usklađivanje.	Niža vjerodostojnost nego za SC1 zbog komplikacija koje proizlaze iz širenja na inventar "drugog goriva".	BIS: u kombinaciji s povratom potpornog sustava (npr. CCW ili snage) u reaktor. BIH: Možda nije vjerodostojno.	Uglavnom, nije vjerodostojno
<b>Normalne metode</b>	Obično višestruki izvori vode i putovi toka normalnim sustavima u SOP-ovima. Neke metode mogu dijeliti određene elemente.	Niža vjerodostojnost nego za SC1 zbog komplikacija koje proizlaze iz širenja na inventar "drugog goriva". Također, dostupnost nekih metoda ili izvora može biti smanjena ako su uključeni u ublažavanje inicijatora reaktora (npr. RWST).	Isto kao za SC2, RL2, RT2.	Ista napomena kao za SC2, RL2, RT2. Osim toga, vjerodostojnost/dostupnost ovisi o krhkosti. Uobičajene metode obično uključuju sustave koji nisu sigurnosne klase ili njihove dijelove.
<b>Alternativne metode</b>	Obično više metoda koje uključuju fiksne (npr. protupožarni sustav) ili mobilne izvore i opremu.	Slična primjedba kao i za normalne izvore o vjerodostojnosti. Dostupnost također može biti smanjena, ali u manjoj mjeri.	Ista napomena kao gore.	Ista napomena kao gore.

**Tablica 3: Linije obrane (LOD) za početni događaj malog gubitka inventara SFP**

	SI1-S. Utjecaj ograničen na SFP.	SI2-S. Utjecaj se širi na reaktor.	BEI-S. Vanjski događaji. Utjecaj na SFP i na reaktor.
<b>Prevenција (vjerojatnost)</b>	Prevenција/vjerojatnost ovisi o uzroku događaja. Npr., kako bi se spriječio gubitak sifoniranjem, obično je predviđena neka vrsta uređaja protiv sifoniranja. Fizičke značajke također mogu igrati ulogu, npr. visina spojne cijevi. U slučaju odvodnje, ljudska pogreška može biti faktor.	Ista napomena kao za SI1-S.	Ista vrsta napomena vrijedi kao i za BEC (Tablica 2).
<b>Oporavak</b>	Primjenjivo samo na neke specifične uzroke, npr. prekidanje nenamjerno induciranog odvoda zatvaranjem ventila.	Vjerodostojnost može biti niža nego za SI1-S zbog komplikacija koje proizlaze iz širenja na inventar "drugog goriva".	Uglavnom, nije vjerodostojno. npr. seizmički uzrokovane pukotine konstrukcijskih kvarova.
<b>Normalne metode</b>	Obično višestruki izvori vode i putovi toka normalnim sustavima u SOP-ovima. Neke metode mogu dijeliti određene elemente. Neki izvori možda neće biti zaslužni za surogat niske posljedice (72 sata)	Niža vjerodostojnost nego za SI1-S zbog komplikacija koje proizlaze iz širenja na inventar "drugog goriva".  Također, dostupnost nekih metoda ili izvora može biti smanjena ako su uključeni u ublažavanje inicijatora reaktora (npr. RWST).	Ista napomena kao za SI2-S. Osim toga, vjerodostojnost/dostupnost ovisi o krhkosti. Uobičajene metode obično uključuju sustave koji nisu sigurnosne klase ili njihove dijelove.
<b>Alternativne metode</b>	Obično više metoda koje uključuju fiksne (npr. protupožarni sustav) ili mobilne izvore i opremu. Ista primjedba kao gore	Slična primjedba kao i za normalne izvore o vjerodostojnosti. Dostupnost također može biti smanjena, ali u manjoj mjeri.	Ista napomena kao za SI2-S. Osim toga, vjerodostojnost/dostupnost ovisi o krhkosti.

**Tablica 4: Linije obrane (LOD) za početni događaj velikog gubitka inventara SFP**

	<b>SI1-L. Utjecaj ograničen na SFP.</b>	<b>SI2-L. Utjecaj se širi na reaktor.</b>	<b>BEI-L. Vanjski događaji. Utjecaj na SFP i na reaktor..</b>
<b>Prevenција (vjerojatnost)</b>	<p>revencija/vjerojatnost ovisi o uzroku događaja. Što se tiče gubitka zbog sifoniranja ili pražnjenja, vrijedi ista vrsta napomene kao za SI1-S.</p> <p>Veliki gubici zbog slučajnih strukturnih kvarova SFP obloge ili struktura obično se smatraju događajima niske vjerodostojnosti.</p>	Ista napomena kao za SI1-L.	Ista vrsta napomena vrijedi kao i za BEI-S (Tablica 3). Krhkost strukture SFP-a može biti jedan od glavnih čimbenika vjerojatnosti velikog gubitka inventara SFP-a.
<b>Oporavak</b>	Ograničena vjerodostojnost. Razlozi mogu uključivati kratke vremenske okvire	Može se smatrati nevjerodostojnim.	Nije vjerodostojno. npr. seizmički uzrokovani veliki strukturalni kvarovi.
<b>Normalne metode</b>	Nije primjenjivo prema definiciji kategorije inicijatora.	Nije primjenjivo prema definiciji kategorije inicijatora.	Nije primjenjivo prema definiciji kategorije inicijatora.
<b>Alternativne metode</b>	Obično više metoda koje uključuju fiksne (npr. protupožarni sustav) ili mobilne izvore i opremu. Neki izvori možda neće biti zaslužni za surogat niske posljedice (72 sata).	<p>Niža vjerodostojnost nego za SI1-L zbog komplikacija koje proizlaze iz širenja na inventar "drugog goriva".</p> <p>Također, dostupnost nekih metoda ili izvora može biti smanjena ako su uključeni u ublažavanje inicijatora reaktora (npr. RWST).</p>	Ista napomena kao za SI2-L. Osim toga, vjerodostojnost/dostupnost ovisi o krhkosti.

### **3. Procjena početnih unutarnjih događaja u SFP neovisnih o radu reaktora (kategorija BI)**

Primjer reevaluacije opisane u disertaciji daje procjenu rizika od oštećenja goriva u NEK-ovom bazenu istrošenog goriva (SFP) zbog unutarnjih početnih događaja i mogućih povezanih ispuštanja radioaktivnosti. Studija rizika SFP-a provedena je tehnikama vjerojatnosne sigurnosne analize (PSA) na način koji odgovara NEK PSA za oštećenje jezgre reaktora.

Detaljna vjerojatnosna sigurnosna analiza ([4] i [5]) provedena je za bazen istrošenog goriva i povezane sustave koji pokrivaju unutarnje početne događaje. Rezultirajući SFP PSA model sadrži sve tehničke elemente tipičnog PSA-a za nuklearne elektrane i razvijen je do razine detalja usporedive s referentnim NEK PSA modelom.

Kvantifikacija učestalosti je napravljena za dva opća glavna događaja: frekvenciju ključanja SFP-a (SFPB) i otkrivanje istrošenog goriva (SFU). U svrhu analize i kvantifikacije rizika, SFP ciklus goriva podijeljen je i predstavljen skupom SFP stanja definiranih u smislu SFP konfiguracija i toplinskih opterećenja.

#### **3.1 Definicija SFP stanja za SFP PSA**

U svrhu modeliranja SFP PSA, status SFP-a tijekom cijelog gorivnog ciklusa potrebno je podijeliti na diskretna stanja. Ovo je neophodno kako bi se na odgovarajući način razmotrio odgovor SFP sustava i osoblja postrojenja na potencijalne inicijatore budući da bi se odvijao pod različitim uvjetima ovisno o statusu SFP-a (npr. vremenski prozori za radnje oporavka u slučaju gubitka hlađenja ili curenja). Atributi koje treba uzeti u obzir u definiciji SFP stanja uključuju SFP inventar vode i SFP razinu raspadajuće topline. Osnova za razmatranje ova dva atributa za navedenu svrhu bila je procjena NEK-ovog SFP zagrijavanja i stope isparavanja, dane u posebnoj studiji postrojenja opisanoj u [51].

SFP stanja su uspostavljena razmatranjem sljedećeg skupa atributa:

- FTT (cijev za transferiranje goriva iz FHB u SFP) status slijepe prirubnice (između kontejnera i SFP),
- status FTT ventila,
- status TC / SFP vrata,
- status CLA / SFP vrata,
- status inventara TC vode,
- status inventara SFP vode,

- CLA status inventara vode,
  - status šupljine reaktora,
  - SFP toplinsko opterećenje,
- gdje su:
- CLA – *Cask Loading Area*/prostor za manipulaciju gorivom u FHB
  - TT – Transfer kanal u FHB-u do SFP

Studija u [51] ispitala je četiri različite konfiguracije inventara SFP vode:

- Konfiguracija 1 (C1): Svi dijelovi sustava istrošenog goriva (tj. SFP, TC i CLA) napunjeni su vodom s otvorenim vratima SFP/TC i SFP/CLA.
- Konfiguracija 2 (C2): Samo SFP je napunjen vodom, ostali dijelovi se ispuštaju na suho. Vrata SFP/TC i SFP/CLA su zatvorena.
- Konfiguracija 3 (C3): Kao C2, ali s pokvarenim vratima SFP/TC i SFP/CLA. (Voda iz SFP-a izljuje se u TC i CLA što dovodi do nove, niže razine vode.)
- Konfiguracija 4 (C4): Kao C3, ali s prekidom u prijenosnoj cijevi koja povezuje TC s RB, što rezultira djelomičnom drenažom vode (iz TC, SFP i CLA) u RB. U ovom slučaju novi vodostaji su:
  - SFP: dno prolaza SFP/TC (107.78);
  - TC: ocijeđen do dna.

Treba napomenuti da bi drenaža uzrokovana puknućem u ulaznom ili izlaznom cjevovodu SFPCCS (SFP sistema za hlađenje) rezultirala razinom vode SFP koja je viša nego u slučaju C4:

- visina izlazne cijevi SFPCCS je na 113,87; i
- nadmorska visina ulaza SFPCCS je na 109.00.

Studija u [51] daje izračune snage raspadanja topline u SFP-u za ciklus 25. Korištene su sljedeće pretpostavke, relevantne za razmatranje SFP stanja:

- Cijela jezgra od 121 FA (fuel elements – gorivni elementi) premješta se u bazen brzinom nešto manjom od četiri FA po satu (u prosjeku). (To znači da se cijela jezgra prebaci u bazen za nekih 30 sati.) Prijenos u bazen počinje 131 sat nakon gašenja reaktora.

- 65 iskorištenih FA-ova iz SFP-a premješta učitava se natrag u jezgru počevši od 453. sata nakon gašenja. Premještanje goriva vrši se za 43 sata.

Na temelju informacija danih u studiji specifičnoj za postrojenje [51], vremenski profil statusa SFP-a (u smislu razine raspadajuće topline i konfiguracije inventara vode) tijekom gorivnog ciklusa može se uspostaviti kao što je prikazano (u tablici 3.2 1.

**Tablica 5: Vremenski profil statusa SFP-a tijekom ciklusa goriva**

Vrijeme (dani)	Opis promjene	SFP ostatna toplina	SFP inventar vode
0	Kraj prethodnog ciklusa – gašenje reaktora	0.72	C2
5.5 <sup>(1)</sup>	Početak pražnjenja jezgre – prijenos goriva u SFP	0.72	C1
6.8 <sup>(2)</sup>	Kraj pražnjenja jezgre – pretpostavlja se da je cijela jezgra prenesena u SFP	6.40	C1
18.9 <sup>(3)</sup>	Početak punjenja jezgre – prijenos djelomično izgorjelih FA natrag u jezgru	4.39	C1
20.7 <sup>(4)</sup>	Kraj punjenja jezgre – 65 djelomično izgorjelih FA prebačeno natrag u jezgru	2.37	C1
91.9 <sup>(5)</sup>	Toplina raspadanja u SFP-u pada na 1,5 MW	1.50	C2 <sup>(6)</sup>
547.9 <sup>(7)</sup>	Kraj ciklusa	0.77	C2 <sup>(8)</sup>

Bilješke uz tablicu:

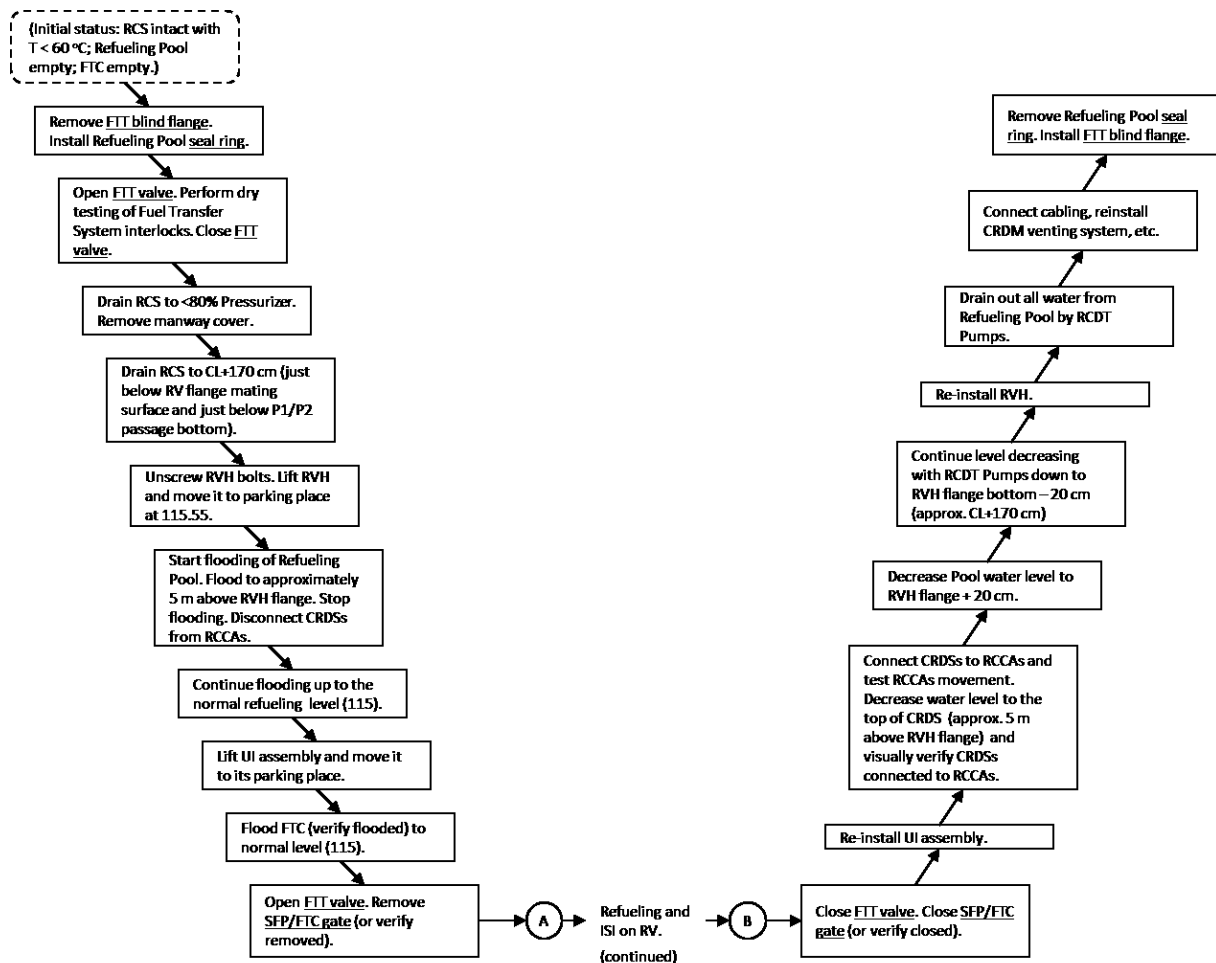
- (1.) 131 sat nakon gašenja reaktora, prema pretpostavci u [51].
- (2.) Uz pretpostavku brzine prijenosa goriva od nešto manje od četiri FAs/h ([51]), cijela jezgra bi bila prebačena u SFP za nekih 30 sati. To daje 131 sat + 30 sati = 161 sat ili 6,71 dana.
- (3.) 453 sata nakon gašenja reaktora, prema pretpostavci u [51].
- (4.) 453 sata + 43 sata = 496 sati
- (5.) Tablica 4 u [51].
- (6.) Studija u [51] predlaže, kao dodatnu sigurnosnu mjeru, da se barem jedna od konstrukcija CLA ili TC napuni vodom, tijekom prvih 70 – 90 dana nakon opterećenja jezgre.
- (7.) 18 mjeseci
- (8.) Studija u [51] sugerira, kao dodatnu sigurnosnu mjeru, da vrijeme kada su obje strukture TC i CLA prazne treba svesti na najmanju moguću mjeru i koristiti samo za izvođenje preventivnih ili korektivnih aktivnosti održavanja.

Što se tiče četiri spomenute konfiguracije inventara SFP vode, potrebno je napomenuti da se tijekom normalnog rada susreću samo konfiguracije C1 i C2. Druga dva, C3 i C4, rezultat su neispravnih uvjeta. Oni se dalje razmatraju kasnije, u evaluacijama pojedinih kategorija inicijatora.

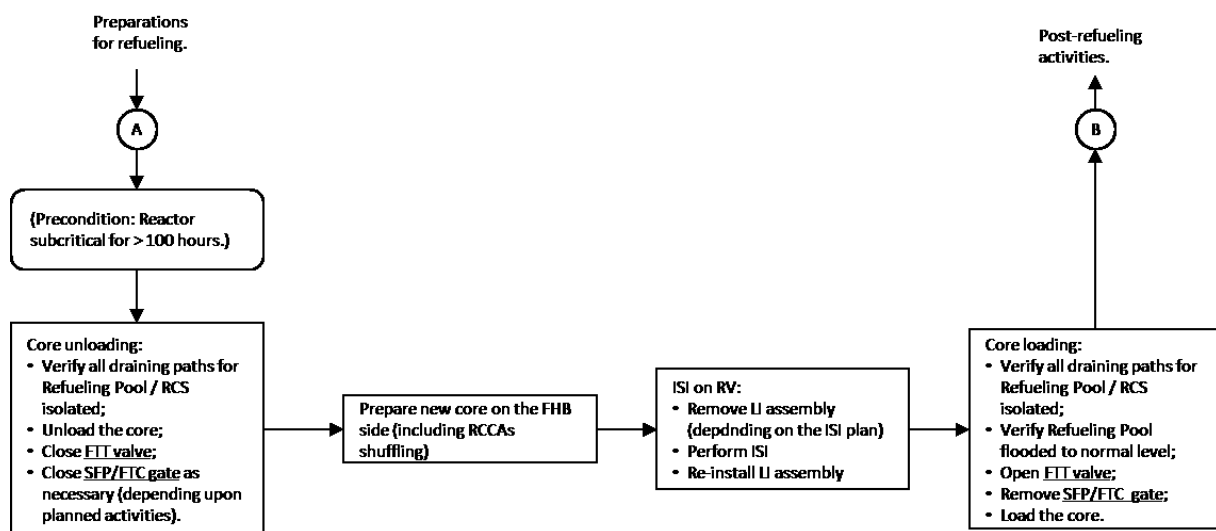
U svrhu identifikacije kompletnog skupa stanja SFP-a za NEK SFP PSA, pregledane su procedure postrojenja za operacije punjenja goriva. Slika 6 i Slika 7 prikazuju pojednostavljeni dijagram procesa za operacije punjenja gorivom u NEK-u koji sažima



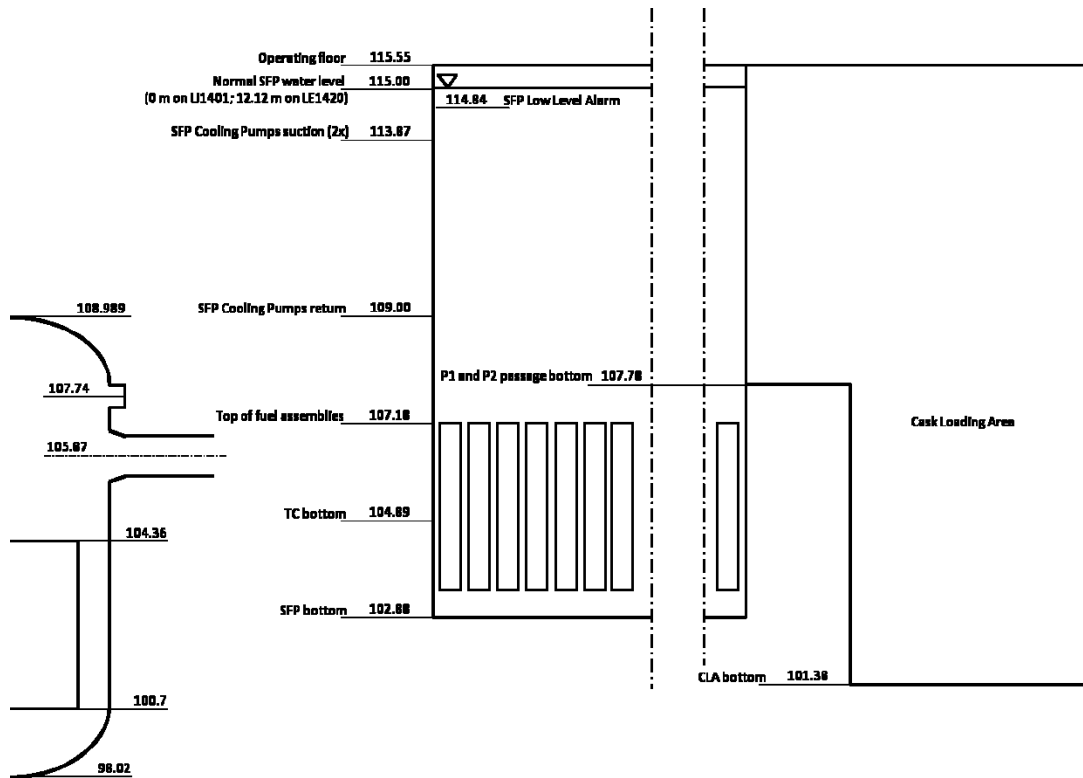
postupke punjenja postrojenja gorivom. Slika 8 prikazuje karakteristične kote na objektima SFP-a.



Slika 6: Pojednostavljeni dijagram procesa za manipulaciju gorivom 1



Slika 7: Pojednostavljeni dijagram procesa za manipulaciju gorivom



Slika 8: Karakteristične kote na objektima SFP-a

**Tablica 6: Definirana SFP stanja za SFP PSA**

SF State	FTT slijepa prirubnica	FTT ventil	TC/SFP vrata	CLA/SFP vrata	TC	SFP	CLA	Šupljina reaktora	Opis	Izvor topline
A1	Z	Z	Z	Z	P	P	P	I	Normalan rad pri napajanju ili isključenju 12 tjedana <sup>(1)</sup> ili dulje od zadnjeg punjenja goriva	Djelomična jezgra 12 tjedana nakon ponovnog punjenja + prethodno ispražnjeni FA <sup>(2), (3)</sup>
B	U	O	Z	Z	I	P	P	I	Suho ispitivanje FTS blokada	Prethodno otpušteni FA <sup>(3)</sup>
C1	U	Z	Z	Z	I	P	P	I	Poplavlivanje šupljine za punjenje prije punjenja gorivom	Prethodno otpušteni FA <sup>(3)</sup>
D1	U	O	O	O	P	P	P	P	Istovar jezgre reaktora	Puna jezgra 131 sat nakon isključivanja <sup>(6)</sup> + prethodno ispražnjeni FA <sup>(3)</sup>
E	U	Z	O	O	P	P	P	P	Između istovara i ponovnog punjenja jezgre reaktora	Puna jezgra na (131 sat nakon isključivanja + trajanje pražnjenja jezgre) <sup>(6)</sup> + prethodno ispražnjeni FA <sup>(3)</sup>
D2	U	O	O	O	P	P	P	P	Ponovno punjenje jezgre reaktora	Isto kao što je gore <sup>(6)</sup>
C2	U	Z	Z	Z	Isuš en	P	P	I	Ispuštanje šupljine za punjenje goriva nakon punjenja gorivom	Isto kao gore, minus ponovno učitani dio jezgre
A2	Z	Z	Z	Z	P	P	P	I	Normalan rad pri napajanju ili isključenju (Način 5 ili viši, NEK TS,) do 12 tjedana nakon punjenja gorivom <sup>(1)</sup>	Isto kao gore

Legenda:

Z- zatvoren/a  
P –poplavljen  
O – otvoreno  
I – Isušena  
U - uklonjeno

Bilješka:

- (1) 12 tjedana uzeto kao vrijeme u kojem bi se raspadna toplina iz djelomične jezgre u SFP-u smanjila za otprilike polovicu.
- (2) Imajte na umu da se takvo toplinsko opterećenje utvrđuje konzervativno: toplinsko opterećenje u vremenu = 12 tjedana uzima se reprezentativno za cijelo preostalo vrijeme ciklusa.
- (3) Izraz "prethodno otpušteni" znači FA iz ranijih ciklusa.
- (4) Po pretpostavci.
- (5) Konzervativna pretpostavka, jer se fizički ne može ispuštati cijelo vrijeme u stanju C1/C2.
- (6) Konzervativno utvrđeno

### 3.2 Karakterizacija SFP stanja u smislu trajanja i SFP toplinskog opterećenja

Definirana SFP stanja potrebno je dalje karakterizirati u smislu trajanja i SFP toplinskog opterećenja (MW, na temelju identifikiranog izvora topline, Tablica 6).

#### Trajanja SFP stanja i toplinska opterećenja

Reprezentativna toplinska opterećenja izabrana su na osnovi prijašnjih iskustava. Treba napomenuti da to ovisi o veličini SFP, ispunjenosti gorivnim elementima i gorivnim ciklusima u prošlosti. Tablica 7 sažima pretpostavljeno trajanje za sva SFP stanja. Ista tablica daje trajanja za sva stanja koja su korištena za određivanje odgovarajućih vremenskih udjela za kvantifikaciju SFP PSA. Bilješke ispod tablice daju obrazloženja za procijenjena trajanja.

**Tablica 7: Trajanje pojedinog stanja i toplinska opterećenja**

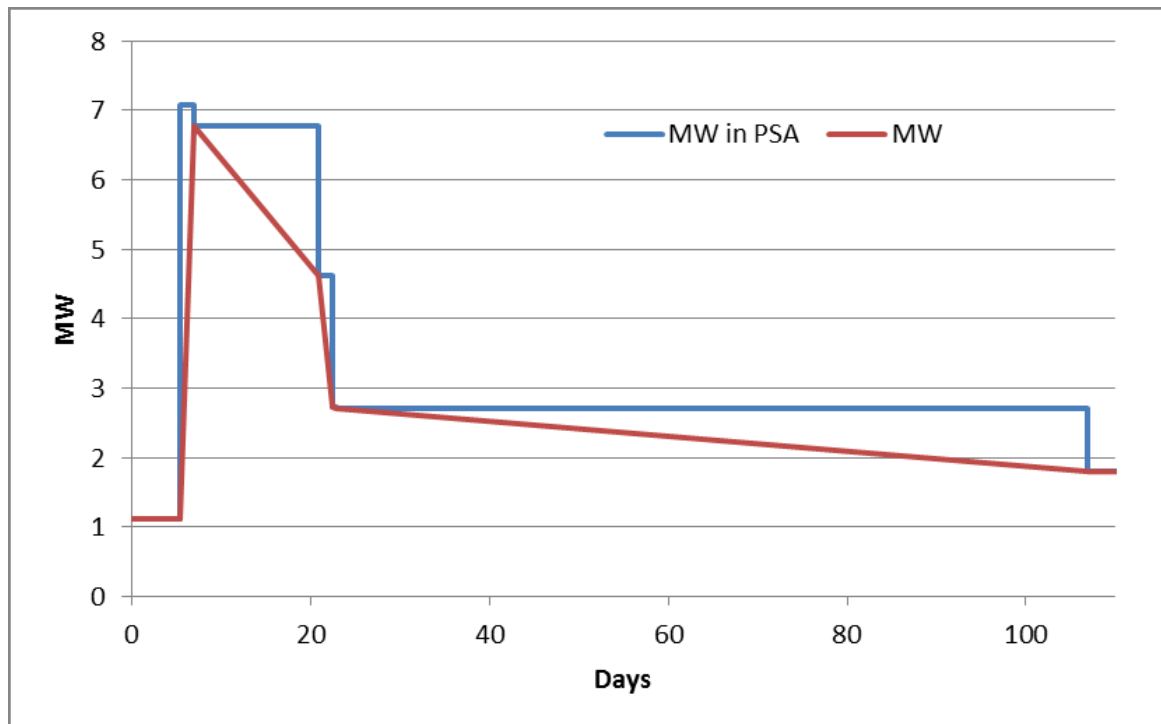
	Trajanje (sati)	Vremenski udio	Pretpostavljeno vrijeme početka i vrijeme završetka u svrhu procjene toplinskog opterećenja <sup>(1)</sup>		Toplinsko opterećenje, MW
			Početak, $t_s$ , hr	Kraj, $t_e$ , hr	
(A1) <sup>(2)</sup>				(110)	
B <sup>(3)</sup>	8	6.08E-04	110	118	1.12
C1 <sup>(3)</sup>	12	9.13E-04	118	130	1.12
D1 <sup>(4)</sup>	36	2.74E-03	130 <sup>(5)</sup>	166	7.08
E <sup>(6)</sup>	336	2.56E-02	166	502	6.77
D2 <sup>(7)</sup>	36	2.74E-03	502	538	4.62
C2 <sup>(3)</sup>	12	9.13E-04	538	550	2.73
A2 <sup>(8)</sup>	2016	1.53E-01	550	2566	2.71
A1 <sup>(9)</sup>	10693	8.13E-01	2566	13259	1.80
Total <sup>(10)</sup>	13149	1.00			

Bilješke uz tablicu:

- (1.) Računajući od vremena gašenja reaktora.
- (2.) Prethodni ciklus.
- (3.) Pretpostavljeno trajanje, ali je razumna pretpostavka potvrđena razgovorom s osobljem postrojenja.
- (4.) U [51]: Trajanje = 6,8 - 5,5 = 1,3 dana = 31,2 h (3,9 FAs/sat < 4 FAs/sat). Upotrijebite ukupno vrijeme za D1 i D2 iz [51] i podijelite s 2. Uzmite 36 sati, dajući 1,5 dan, kao aproksimaciju.
- (5.) Pretpostavka je da bi istovar započeo otprilike 130 sati u zastoju.
- (6.) U [51]: Trajanje: 18,9 - 6,8 = 12,1 dana. Uzimati 14 dana, kao 2 tjedna.
- (7.) U [51]: Trajanje = 20,7 - 18,9 = 1,8 dana = 43,2 sata (2,8 FAs/sat). Upotrijebite ukupno vrijeme za D1 i D2 iz [51] i podijelite s 2. Uzmite 36 sati, dajući 1,5 dan, kao aproksimaciju.
- (8.) 12 tjedana, prema tablici 3.2 2.

- (9.) Dopuna u odnosu na 1,5 godinu.  
 (10.) 1,5 godina.

Slika 9 ilustrira reprezentativna SFP toplinska opterećenja kroz ciklus. Također, pokazuje kako su reprezentativna toplinska opterećenja odabrana na konzervativan način. (Napominje se da je "stvarna" MW linija samo indikacija.)



**Slika 9: Ilustracija konzervativno pretpostavljenih toplinska opterećenja kroz ciklus u PSA modela prema stvarnim**

### 3.3 Definicija internih početnih događaja za SFP PSA

#### 3.3.1 Identifikacija internih početnih događaja za SFP

Na temelju prošlih studija i izvješća o riziku SFP-a, detaljno razrađenih u [4] [5], inicijatori koji se smatraju internim inicirajućim događajima za SFP dolaze iz dvije kategorije:

- gubitak SFP hlađenja, i
- gubitak zaliha SFP rashladnog sredstva.

Inicijatori iz prve kategorije mogu se podijeliti na one uzrokovane kvarovima u SFP rashladnom sustavu i one uzrokovane gubitkom njegovih potpornih sustava. Inicijatori iz druge kategorije obično se dijele na male gubitke SFP inventara i velike gubitke SFP inventara. Slijedom ovih razmatranja, definirane su sljedeće interne kategorije inicijatora za SFP PSA:

- Gubitak SFP hlađenja zbog slučajnih uzroka u SFP rashladnom sustavu.
- Gubitak SFP hlađenja zbog gubitka vanjskog napajanja, uključujući sekvence potpunog gubitka (SBO).
- Gubitak SFP hlađenja zbog potpunog gubitka CCW ili ESW (i posljedičnog gubitka SFP rashladnih izmjenjivača topline).
- Mali gubitak inventara SFP-a, tj. gubitak (istjecanje) koji se može pokriti uobičajenim metodama nadoknade.
- Veliki gubitak inventara SFP-a, tj. gubitak (istjecanje) koji premašuje kapacitet uobičajenih metoda nadoknade.

U sljedećem poglavlju prikazana je procjena učestalosti ovih kategorija inicijatora koje će se uzeti za kvantifikaciju PSA modela. Poglavlje 3.4 daje procjenu vremenskih okvira koji su dostupni za oporavak hlađenja SFP-a ili uspostavu nadoknade SFP-a pod različitim kategorijama inicijatora. Za svaku kategoriju inicijatora razvija se stablo događaja kako je opisano u poglavlju 3.5.

### **3.3.2 Procjena frekvencija inicijatora**

Kao što se može potvrditi kroz razgovore s osobljem elektrane, specifično iskustvo u elektrani ne uključuje gubitak hlađenja SFP ili gubitak inventara SFP ili događaj koji bi se mogao smatrati relevantnim prethodnikom. Frekvencije inicijatora za SFP PSA utvrđene su iz izvora koji uključuju:

- dostupne generičke studije i studije iz drugih postrojenja koje se odnose na SFP rizik;
- stope i vjerojatnosti kvarova specifične i generičke opreme za postrojenje; i
- inicijatorsko stablo kvarova iz referentnog NEK PSA modela.

Procjena učestalosti inicijatora za gore navedene kategorije prikazana je u pododjeljcima koji slijede.

Tablica 8 prikazuje primjer određivanja frekvencije za gubitak hlađenja SFP na osnovi dostupnih podataka iz ostalih sličnih elektrana.

**Tablica 8: Primjer određivanja frekvencije na osnovu dostupne literature**

Izvor	Kategorija	Frekvencija
NUREG-1738	Gubitak hlađenja SFP	3E-03 /yr (na osnovu NUREG-1275)
NUREG-1275	Gubitak SFP hlađenja s porastom temperature većim od 20 °F	3E-03 /yr
INEL-96/0334	Gubitak hlađenja SFP	5.17E-02 /yr
Risk Analysis for Spent Fuel Pool Cooling at Susquehanna Electric Power Station	Doprinos kvarova na sustavu za SFP hlađenje	1.57E-04 /yr
	Doprinos kvarova cijevi	Nije primjenjivo za NEK jer je cijev za sustav na višoj elevaciji
NUREG-1353	Gubitak hlađenja SFP	5E-03 /yr
NUREG/CR-4982	Gubitak sposobnosti cirkulacije vode	Praktično isto kao u NUREG-1353
EPRI Report 3002002691	Gubitak hlađenja SFP	1.7E-03 /yr

U slučaju NEK SFP PSA frekvencija gubitka hlađenja SFP-a procijenjena je na otprilike 1,7E-03 /god (računajući sva SFP stanja), za koju se smatra da se uklapa u raspon vrijednosti navedenih (Tablica 8). Na identičan način su određene frekvencije i za ostale početne događaje navedene u poglavlju 3.3.1 koji se koriste u kvantifikaciji stabala događaja i kvarova.

### 3.4 Procjena vremenskih perioda za operaterske akcije

Jedno od ključnih pitanja u procjeni rizika za SFP je koliko se zasluga može dati operativnom osoblju da odgovori na incident koji utječe na SFP koji bi, ako akcija operativnog osoblja izostane, doveo do gubitka SFP hlađenja ili gubitka Inventar SFP-a i na kraju do otkrivanja istrošenog goriva. Jedan od najvažnijih faktora oblikovanja ovog kredita je dostupnost vremena. Na primjer, prema tehnici SPAR-H HRA [53], vjerojatnost ljudskog kvara kreće se kroz tri desetljeća, ovisno o raspoloživosti vremena (odgovarajući faktor oblikovanja učinka mijenja se od 10 do 0,01). Raspon može postati još veći s obzirom na to da u slučaju neadekvatnog vremena vjerojatnost postaje 1,0.

Stoga, kao prvi korak u razmatranju potencijalnih sekvenci nesreća izazvanih razmatranim kategorijama inicijatora, procijenjeni su karakteristični vremenski periodi specifični za postrojenje. Osnova za to osigurana je ranije spomenutom studijom zagrijavanja i isparavanja vode za SFP koja je dokumentirana u [51].

Sljedeći vremenski periodi procijenjeni su za gore definirana SFP stanja:



- vremena do ključanja;
- vremena isparavanja za razmatrane visine SFP-a;
- vremena dostupnog za oporavak potpornih sustava (u osnovi, zbroj vremena do ključanja i vremena isparavanja); te
- vremena odvodnje za razmatrana povišenja SFP-a ispod navedenih stopa curenja.

Dodatno, procijenjena su, kao indikacija, vremena savladavanja za određene spremnike vode koji će se koristiti kao izvori dopunske vode za SFP. O svakoj od ovih kategorija vremenskog prozora dalje se govori u nastavku.

### 3.4.1 Vremena do ključanja (ključanja vode u SFP)

Tablica 9 prikazuje vremena do ključanja SFP-a i odgovarajuće brzine zagrijavanja za sva stanja SFP-a. Dobiveni su linearnom interpolacijom (s obzirom na toplinska opterećenja raspadanja SFP-a procijenjena iz tablice 7 u [51]).

**Tablica 9: Pretpostavljena vremena do SFP ključanja i brzine zagrijavanja za različita SFP stanja**

SFP Stanje	Dodijeljena konfiguracija SFP inventara od [51]	Vrijeme do ključanja (hr)	Stopa zagrijavanja (°C/hr)
B	C2	76.16	0.80
C1	C2	76.16	0.80
D1	C1	9.2	3.61
E	C1	10.02	3.45
D2	C1	18.64	2.35
C2	C2	26.94	1.95
A2	C2	27.19	1.93
A1	C2	44.59	1.29

Konfiguracije inventara vode iz [51] (C1 ili C2) dodijeljene su određenim SFP stanjima (Tablica 9) na sljedećim osnovama:

- SFP stanja A1, A2 (konfiguracija C2): Referenca [51] kaže (stranica 10) da su tijekom normalnog rada postrojenja vrata TC/SFP i CLA/SFP zatvorena. Isto izvješće preporučuje (poglavlje 4. Zaključci): Vrijeme s praznim ili djelomično praznim strukturama inventara (TA i CLA) treba svesti na najmanju moguću mjeru i koristiti samo za izvođenje preventivnih ili korektivnih aktivnosti održavanja. Stoga se uzimanje C2 konfiguracije smatra konzervativnom pretpostavkom. (S druge strane, upitno je u kojoj bi mjeri kreditiranje punog TC/CLA zapravo produžilo vrijeme do ključanja, s obzirom na to da bi toplina morala biti provedena kroz vrata/prolaze SFP-TC i SFP-CLA.)
- SFP stanja B, C1, C2 (konfiguracija C2): Manje konzervativna pretpostavka nego u slučaju A1, iako još uvijek konzervativna.
- SFP stanja D1, D2 (konfiguracija C1): Smatra se konzervativnim što se tiče vremena do ključanja, budući da bi šupljina za punjenje goriva na RB strani bila ispunjena.
- SFP stanje E (konfiguracija C1): Konfiguracija C1 se smatra primjenjivom zbog miješanja i drugih aktivnosti povezanih s pripremom nove jezgre.

### **3.4.2 Vremena isparavanja vode u SFP**

Vremena isparavanja izračunata su za svako SFP stanje za četiri karakteristična SFP povišenja. Tablica 10 prikazuje određena vremena. Osnova je, opet, bila specifična studija [51]. (Treba napomenuti da se dodjela konfiguracija inventara vode C1/C2 SFP stanjima kao što je napravljeno (Tablica 9) primjenjuje ovdje, kao i u svim ostalim izračunima.) Naravno, određena vremena specifična su za elektranu, veličinu bazena, ispunjenost te tolinsku opterećenost.

**Tablica 10: Vremena isparavanja za različita SFP stanja**

SFP Stanja	Stopa smanjenja razine SFP stanja	SFPCS crpke usis	TFA+3.05m	TFA+1m	TFA
		113.87	110.23	108.18	107.18
Vrijeme isparavanja, hr					
B	1.41	70.15	328.09	473.36	558.17
C1	1.41	70.15	328.09	473.36	558.17
D1	6.62	14.95	69.90	100.85	113.38
E	6.33	15.63	73.10	105.47	118.65
D2	4.32	22.90	107.11	154.53	174.03
C2	3.45	28.70	134.21	193.63	224.07
A2	3.42	28.91	135.20	195.06	225.69
A1	2.27	43.65	204.14	294.53	343.84

**3.4.3. Raspoloživo vrijeme za oporavak sustava podrške**

Tablica 11 prikazuje dostupna vremena prije nego razina SFP-a dosegne TFA+3,05 m i TFA+1m nakon gubitka SFP hlađenja bez poduzimanja mjera ublažavanja. Svako od ovih vremena dobiva se kao zbroj vremena do ključanja i vremena isparavanja, koji su izračunati i prikazani u gornjim odjeljcima. Vremena (Tablica 11) mogu se smatrati maksimalnim raspoloživim vremenima za oporavak sustava podrške kao što je napajanje SFP crpki ili CCW SFP izmjenjivača topline, koji su izgubljeni kao dio uvjeta inicijatora.

**Tablica 11: Raspoloživo vrijeme za oporavak sustava podrške u različitim SFP stanjima**

SFP Stanje	Vrijeme potrebno za TFA+3.05m	Vrijeme potrebno za TFA+1m
B	328.09	473.36
C1	328.09	473.36
D1	69.90	100.85
E	73.10	105.47
D2	107.11	154.53
C2	134.21	193.63
A2	135.20	195.06
A1	204.14	294.53

#### 3.4.4. Vremena pražnjenja u slučaju istjecanja iz SFP-a

Vremena ispuštanja izračunata su za dvije stope curenja, 29,53 m<sup>3</sup>/h (130 gpm smatra se gornjom granicom za mali gubitak SFP inventara) i 90,85 m<sup>3</sup>/h (400 gpm je reprezentativna stopa istjecanja za veliki gubitak SFP inventara).

Uzimajući u obzir površine (m<sup>2</sup>) i volumene (m<sup>3</sup>) navedene u tablici 2 u [51]:

- Za konfiguraciju inventara vode C1 gubitak od 1 m<sup>3</sup>/h prevodi se u smanjenje razine SFP-a od 5,65E-03 m/h.
- Za konfiguraciju inventara vode C2 gubitak od 1 m<sup>3</sup>/h prevodi se u smanjenje razine SFP-a od 7,62E-03 m/h.

Uz to poznato i uz poznatu visinsku razliku, odgovarajuće vrijeme odvodnje može se izravno izračunati.

### 3.5 Razvoj stabala događaja

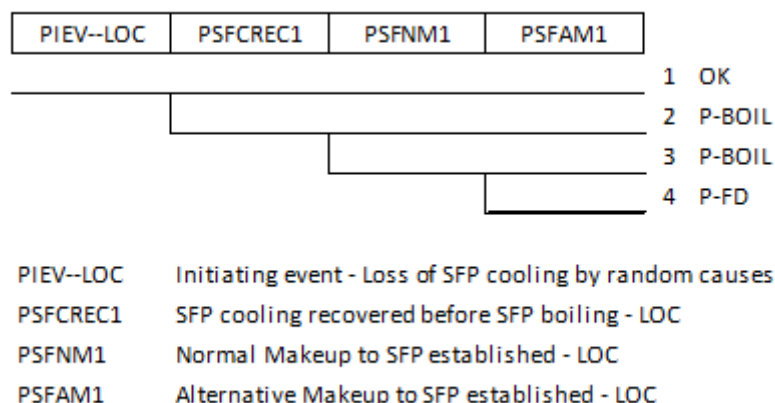
Stablo događaja razvijeno je za svaku kategoriju inicijatora definiranu u poglavlju 3.3.1. Za sekvence stabla događaja definirana su tri krajnja stanja:

- OK: uspjeh. SFP ključanje je izbjegnuto najmanje 72 sata nakon početnog događaja. Vremenski okvir od 72 sata postavljen je kao potrebno vrijeme suočavanja za kriterije uspjeha.
- P-BOIL: sekvenca uključuje ublaženo SFP ključanje. Izbjegnuto je otkrivanje istrošenog goriva najmanje 72 sata nakon inicijatora. Tipičan primjer je sekvenca s gubitkom SFP hlađenja praćenog neuspjehom oporavka SFP hlađenja prije nego što SFP počne ključati nakon čega slijedi uspješna normalna ili alternativna SFP nadoknada. Ovo nije stanje oštećenja i njegovo modeliranje i kvantifikacija se radi samo kao indikacija.
- P-FD: slijed s otkrivanjem istrošenog goriva i mogućnošću oštećenja goriva. Kao opće pravilo, ako je razina SFP-a, tijekom niza događaja, dosegla TFA+1m, otkrivanje goriva smatrano se neizbježnim, što bi se trebalo smatrati konzervativnom pretpostavkom. Tipičan slijed je gubitak SFP hlađenja nakon čega slijedi neuspjeh u obnavljanju hlađenja prije početka ključanja nakon čega slijedi neuspjeh u uspostavljanju bilo kakve SFP nadoknade.

Stabla događaja prikazana su i opisana u odjeljcima koji slijede. Slike su originalno preuzete iz RiskSpectrum modela pa su na engleskom jeziku.

#### 3.5.1 Gubitak SFP hlađenja zbog slučajnih uzroka

Slika 10 prikazuje stablo događaja za gubitak SFP hlađenja. Inicijator predstavlja gubitak SFP hlađenja zbog slučajnih kvarova u SFP rashladnom sustavu. Posljedični gubici SFP hlađenja zbog gubitka potpornih sustava modelirani su zasebnim stablima događaja.



### Slika 10: Stablo događaja za gubitak SFP hlađenja zbog slučajnih uzroka (PIEV--LOC)

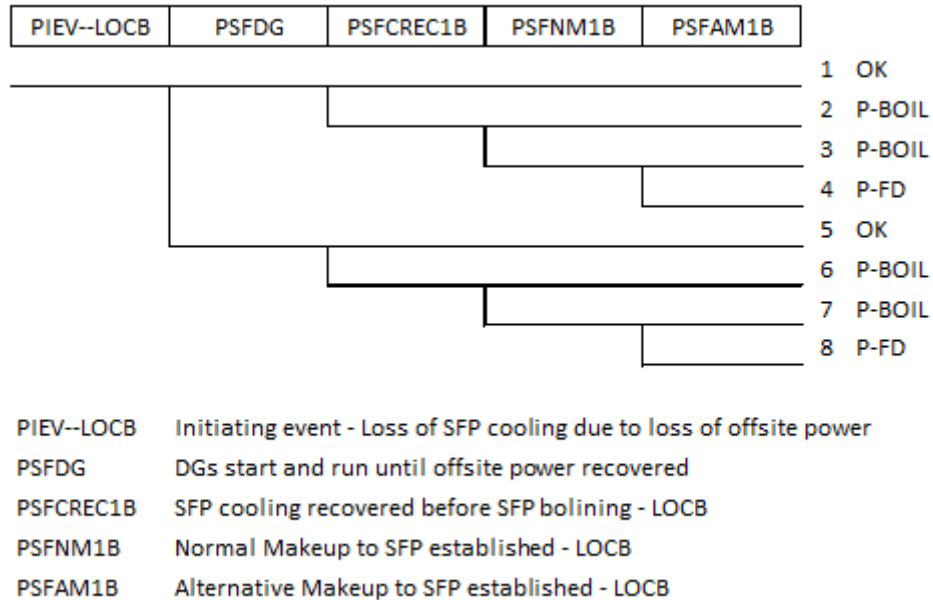
Inicijator bi započeo kao neuspjeh rada SFP crpke ili radnog izmjenjivača topline i uključivao bi neuspjeh uspostavljanja rezervne crpke i/ili izmjenjivača topline. Operateri bi dobili upute da pokrenu rezervnu crpku ili uspostave rezervni izmjenjivač topline pomoću alarma povezanih s visokom temperaturom SFP-a ili problemima s hlađenjem SFP-a.

Prvo pitanje koje slijedi nakon inicijatora u logici stabla događaja je hoće li se SFP hlađenje oporaviti prije početka SFP ključanja (funkcija PSFCREC1). Uspjeh ovisi o raspoloživom vremenu prije početka ključanja koje ovisi o SFP stanju. Uspješan oporavak bi rezultirao potpunim uspjehom kao krajnje stanje, tj. izbjegnulo bi se ključanje SFP-a.

U slučaju da se SFP hlađenje ne oporavi na vrijeme, SFP ključanje se ne može izbjeći. Razina SFP-a polako bi se smanjivala zbog gubitaka isparavanjem i bila bi potrebna nadopuna SFP-a. Operateri bi dobili upute, kao odgovor na alarm povezan s niskom razinom SFP-a, da uspostave normalnu dopunu SFP-a. Ovo je modelirano funkcijskim događajem PSFNM1. Uspješno uspostavljanje normalnog sastava rezultiralo bi ublaženim krajnjim stanjem ključanja. U slučaju kvara uobičajenih metoda dopune, SFP dopuna se i dalje može uspostaviti alternativnim metodama, što je modelirano funkcijom PSFAM1. Uspjeh ove funkcije rezultirao bi ublaženim krajnjim stanjem ključanja i njegovim neuspjehom s otkrivanjem istrošenog goriva s mogućim oštećenjem goriva.

### 3.5.2 Gubitak SFP hlađenja zbog gubitka vanjskog napajanja

Slika 11 prikazuje stablo događaja za gubitak SFP hlađenja uzrokovano gubitkom vanjskog napajanja električnom energijom i posljedičnim gubitkom radne crpke.



**Slika 11: Stablo događaja za gubitak SFP hlađenja zbog gubitka vanjskog napajanja (PIEV--LOCB)**

Po nestanku električnog napajanja izvan elektrane, dizel generatori bi se automatski pokrenuli kako bi povratili napajanje na sigurnosnim 6,3 kV sabirnicama MD1 i MD2. U slučaju da DG na obje sabirnice ne uspije, treći DG bi bio usklađen s jednom od sabirnica. Ovo je predstavljeno funkcijom PSFDG. Uspjeh ove funkcije znači da DG obnavlja napajanje na barem jednoj od sabirnica MD1 i MD2 i ostaje dostupno sve dok se ne povrati napajanje izvan lokacije sabirnica. Modeliranje gubitka vanjskog napajanja električnom energijom i kvarova DG-ova preuzeto je ili se temelji na referentnom NEK PSA modelu razine 1.

U slučaju uspješne PSFDG funkcije odgovor je u osnovi isti kao u slučaju PIEV-LOC, opisanom u prethodnom odjeljku. Operateri bi morali ponovno pokrenuti jednu od SFP crpki što je predstavljeno funkcijom PSFCREC1B. (Napominje se da model za funkciju PSFCREC1B nije isti u slučaju uspješnog PSFDG-a kao u slučaju njegovog kvara.) Ako se SFP crpka uspješno ponovno pokrene prije početka SFP ključanja, postignut je potpuni uspjeh. Neuspjeh da se to učini dovelo bi do ključanja SFP-a i bila bi potrebna dopuna za pokrivanje gubitaka isparavanjem. Uspostavljanje normalnog sastava predstavljeno je

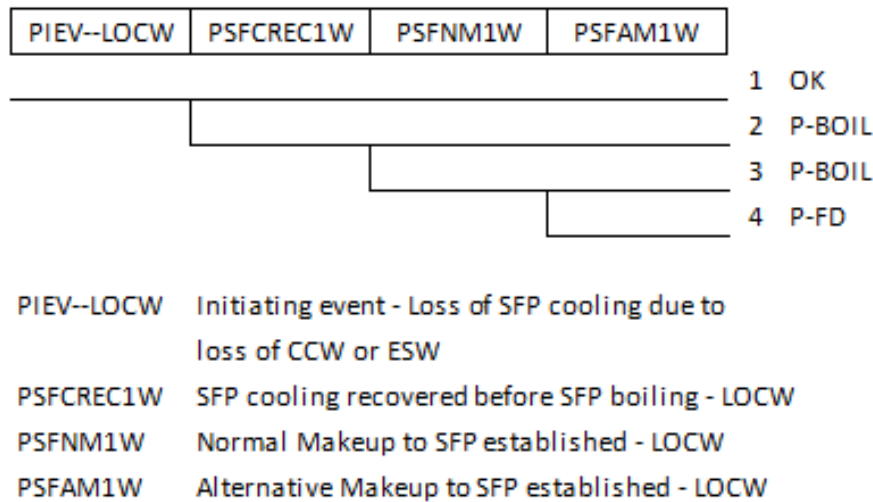
funkcijom PSFNM1B. Uspjeh ove funkcije rezultirao bi ublaženim krajnjim stanjem ključanja. Njegov neuspjeh zahtijevao bi alternativne metode koje su predstavljene funkcijom PSFAM1B. Uspjeh ove funkcije dovodi do ublaženog krajnjeg stanja ključanja i njegovog otkrivanja istrošenog goriva i mogućeg oštećenja.

Kvar funkcije PSFDG predstavlja sekvencu potpunog gubitka napajanja (SBO). Iako je gornja logika u stablu događaja ista kao za uspjeh PSFDG-a, temeljni logički modeli su drugačiji. Funkcija PSFCREC1B sada predstavlja vraćanje napajanja bilo koje MD sabirnice iz bilo kojeg izvora na vrijeme kako bi se spriječilo ključanje SFP-a. Napajanje se može povratiti iz DG-ova ili izvan lokacije. Opskrba SFP crpke sa sabirnice LD11 koju napaja mali SAME DG se, konzervativno, ne priznaje. Uspjeh funkcije PSFCREC1B znači da je napajanje vraćeno, iz DG-a ili izvan mjesta, na bilo koji od MD1 / MD2 sabirnica i da je SFP crpka uspješno ponovno pokrenuta prije SFP ključanja. Ova sekvencu postiže krajnje stanje potpunog uspjeha. U slučaju njegovog kvara SFP ključanje se ne može izbjeći i potrebna je nadopuna SFP-a. Ako se napajanje sabirnice MD1/MD2 nije vratilo, mogu se koristiti samo alternativne metode kompenzacije, što je predstavljeno funkcijom PSFAM1B. U slučaju da se struja izvan elektrane povratiti nakon što počne ključanje SFP-a, ali još uvijek na vrijeme da se spriječi otkrivanje istrošenog goriva, također se mogu koristiti normalne metode nadoknade. Ovo je predstavljeno funkcijom PSFNM1B. Uspješna implementacija bilo koje od ovih funkcija rezultirala bi ublaženim krajnjim stanjem ključanja. Kvar obje funkcije doveo bi do otkrivanja istrošenog goriva i moguće štete.



### 3.5.3 Gubitak SFP hlađenja zbog potpunog gubitka CCW ili ESW

Slika 12 prikazuje stablo događaja za gubitak SFP hlađenja uzrokovano potpunim gubitkom CCW ili ESW.



**Slika 12: Stablo događaja za gubitak SFP hlađenja uzrokovano potpunim gubitkom CCW ili ESW (PIEV--LOCW)**

Inicijator predstavlja posljedični gubitak SFP izmjenjivača topline zbog potpunog gubitka CCW (što može biti uzrokovano kvarovima unutar CCW sustava ili kvarovima ESW sustava). Modeliranje ukupnog gubitka CCW / ESW temelji se na odgovarajućim modelima u referentnom NEK PSA modelu.

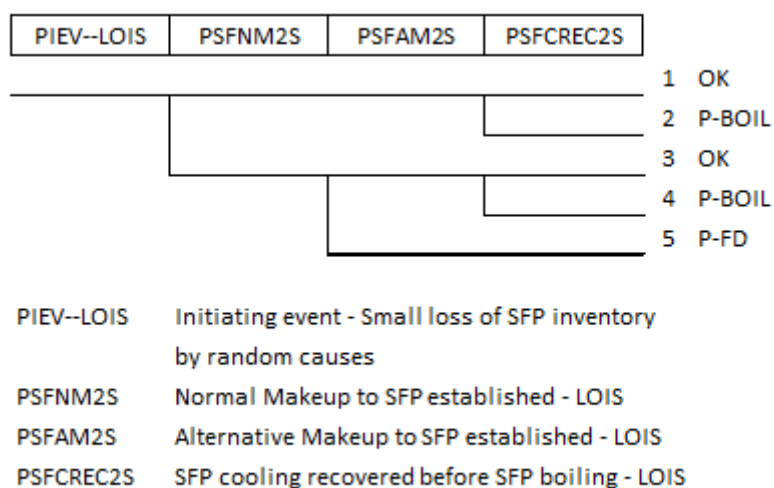
Prvo pitanje, koje slijedi iza inicijatora u logici stabla događaja, jest hoće li se CCW / ESW oporaviti na vrijeme tako da se SFP hlađenje može ponovno uspostaviti prije početka SFP ključanja (funkcija PSFCREC1W). (Operateri bi dobili upute da ponovno uspostave izmjenjivač topline pomoću alarma povezanih s visokom temperaturom SFP-a ili problemima s hlađenjem SFP-a.) Uspjeh ovisi o raspoloživom vremenu prije početka ključanja koje ovisi o stanju SFP-a. Uspješan oporavak hlađenja rezultirao bi potpunim uspjehom kao krajnje stanje, tj. izbjegnuto bi SFP ključanje.

U slučaju da se SFP hlađenje ne uspostavi na vrijeme, SFP ključanje se ne može izbjeći. Odgovor je u osnovi isti kao u gore opisanom slučaju PIVE--LOC. Razina SFP-a polako bi se smanjivala zbog gubitaka isparavanjem i bila bi potrebna nadopuna SFP-a. Operateri bi dobili upute, kao odgovor na alarm povezan s niskom razinom SFP-a, da uspostave normalnu nadopunu SFP-a. Ovo je modelirano funkcijskim događajem PSFNM1W. Uspješno uspostavljanje normalnog sastava rezultiralo bi ublaženim krajnjim stanjem ključanja.

Napominje se da normalne metode nadopune inventara SFP ne ovise o statusu CCW sustava. U slučaju neuspjeha uobičajenih metoda kompenzacije, SFP kompenzacija se i dalje može uspostaviti alternativnim metodama, što je modelirano funkcijom PSFAM1W. Uspjeh ove funkcije rezultirao bi ublaženim krajnjim stanjem ključanja i njegovim kvarom s otkrivanjem istrošenog goriva s mogućnošću oštećenja goriva.

### 3.5.4 Mali gubitak SFP inventara hladioca

Slika 13 prikazuje stablo događaja za mali gubitak SFP inventara hladioca. Mali gubitak SFP inventara definiran je kao gubitak koji se još uvijek može nadoknaditi uobičajenim metodama nadoknade.



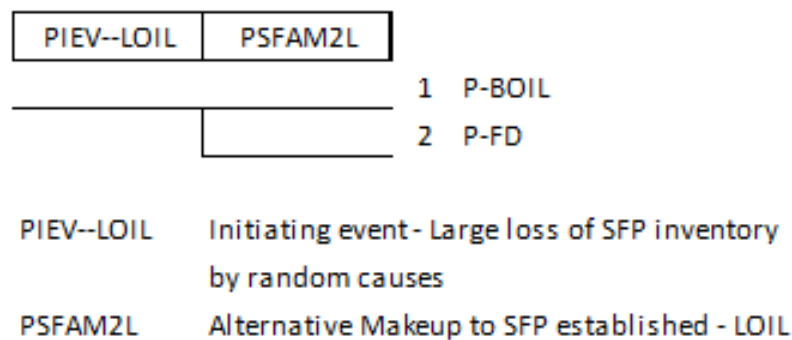
**Slika 13: Stablo događaja za mali gubitak SFP inventara (PIEV--LOIS)**

Nakon inicijatora, prvo pitanje u logici stabla događaja jest je li normalna kompenzacija uspostavljena na vrijeme kako bi se spriječilo otkrivanje istrošenog goriva (i zadržava li se onoliko dugo koliko je potrebno da se zadovolji zahtjev za vremenom suočavanja). Ovo je predstavljeno funkcijom PSFNM2S. Ako se normalno punjenje uspješno uspostavi, SFP hlađenje se može ponovno pokrenuti kako bi se spriječilo ključanje, što je predstavljeno funkcijom PSFCREC2S. (Ovo se može učiniti samo nakon što se razina SFP-a vrati iznad usisne vrijednosti SFP crpki ili ako je normalna nadoknada pokrenuta prije nego što je razina smanjena ispod usisne vrijednosti SFP-a.) Uspjeh PSFCREC2S dovodi do potpunog uspješnog krajnjeg stanja i njegovog neuspjeha do ublaženo krajnje stanje ključanja. U slučaju neuspjeha uobičajenih metoda kompenzacije bile bi potrebne alternativne metode

kompenzacije, što je prikazano funkcijom PSFAM2S. Uspješan PSFAM2S može (slično PSFNM2S) završiti s potpunim uspjehom ili s ublaženim završnim stanjem ključanja, ovisno o statusu funkcije PSFCREC2S, kao što je gore razmotreno. Neuspjeh ove funkcije rezultirao bi otkrivanjem istrošenog goriva i mogućim oštećenjem goriva.

### 3.5.5 Veliki gubitak SFP inventara hladioca

Slika 14 prikazuje stablo događaja za mali gubitak SFP inventara hladioca. Veliki gubitak SFP inventara definiran je kao gubitak koji premašuje kapacitet uobičajenih metoda nadoknade.



**Slika 14: Stablo događaja za veliki gubitak SFP inventara (PIEV--LOIL)**

Prema definiciji inicijatora, normalne metode dopunjavanja nisu učinkovite za održavanje razine SFP-a i stoga alternativne metode dopunjavanja predstavljaju jedino sredstvo za sprječavanje otkrivanja istrošenog goriva. Ovo je predstavljeno funkcijom PSFAM2L.

Uspješan PSFAM2L rezultirao bi ublaženim krajnjim stanjem ključanja. Izbjegavanje SFP ključanja se, konzervativno, ne smatra uspješnim. Neuspjeh ove funkcije rezultirao bi otkrivanjem istrošenog goriva i mogućim oštećenjem goriva.

Primjer osnovnih događaja povezanih s kvarovima opreme za model stabla događaja PIEV—LOC je prikazan u Prilogu 1. Prilog 2 prikazuje primjer osnovnih događaja koji predstavljaju operatersku pogrešku u modelu stabla događaja PIEV—LOC.

### **3.6 Analiza funkcija i sustava te modeliranje stabla kvarova**

#### **3.6.1 Identifikacija funkcija, sustava i opreme koja će biti prikazana u stablima kvarova**

Na temelju logike stabla događaja (poglavlje 3.5) potrebno je razmotriti sljedeće sustave i funkcije:

- SFP sustav hlađenja;
- SFP sustav konekcije sa RWST (Refueling Water Storage Tank);
- liniju za pročišćavanje SFP;
- WS liniju za pročišćavanje;
- SFP sustav konekcije sa RMWST (Reactor Makeup Water Storage Tank);
- SFP sustav konekcije iz WT (Water Treatment) spremnika; i
- SFP nadopunu inventara vode i hlađenje alternativnim metodama.

Primjeri pojednostavljenih dijagrama predmetnih sustava prikazani su u Prilogu 5. Sve slike prikazuju početni status ventila, odnosno status u trenutku nastanka inicijalnog događaja. Pretpostavke o početnom statusu sustava i opreme opisane su u odjeljku 3.6.2 [4]. Evaluacije na razini komponente navedene su u Dodatku 6.3[4]. Tablice u Dodatku 6.3 odražavaju pretpostavke o početnom statusu opreme.

Kapaciteti crpki i potencijalnih izvora vode, kao i alarmi i instrumentacija koji se odnose na status SFP-a i provedbu normalnog i alternativnog dopunjavanja i hlađenja, sažeti su u Dodatku 6.4[4].

Zahtjevi ispitivanja i nadzora za SFP rashladne crpke definirani su postupkom postrojenja koji navodi da se crpke moraju testirati na kvartalnoj osnovi. Oprema koja se razmatra u SFP PSA modelu podliježe zahtjevima redovitog testiranja i nadzora. Opći kriteriji uspjeha za razmatrane metode dopune SFP vodom opisani su u odjeljku 3.6.3[4]. Zatim se izvode specifični kriteriji uspjeha na razini funkcije i opisuju pod odgovarajućim funkcijama u odjeljku 3.6.6. [4].

Važan element analize funkcija i sustava u PSA je identifikacija ljudskog sučelja. Ljudsko sučelje identificirano je i karakterizirano u odjeljku 3.6.4[4], koji pruža osnovu za analizu pouzdanosti operaterskog osoblja opisanu u 3.7[4].

Modeliranje stabala kvarova napravljeno je alatom RiskSpectrum PSA. Cjelokupno SFP PSA stablo događaja i model stabla kvarova razvijeni su istom verzijom RiskSpectrum PSA [47] koja se koristi kao platforma za referentni NEK PSA model [30]. Konvencije imenovanja osnovnih događaja koji su korišteni u modelima stabla kvarova opisane su u Dodatku 6.5 [4].

### **3.6.2 Primjer evaluacije pretpostavki koje se odnose na početni status sustava i opreme koja se modelira u SFP PSA modelu**

#### **3.6.2.1 Primjer za SFP sustav hlađenja**

Rad sustava opisan je i raspravljen u USAR [32] poglavlju 9.1.3.2 i odgovarajućim postupcima za operatere. Na temelju ovih referenci i opisa popratnih analiza koje oni pružaju, početni status sustava (tj. konfiguracija sustava u trenutku pojavljivanja početnog događaja) može se utvrditi kako slijedi:

- SFP crpke rashladnog sustava. Rad bilo koje crpke može se uskladiti tako da prisili protok kroz SFP izmjenjivač(e) topline i krug prenosnice za pročišćavanje. Dodatno je specificirano da je jedna crpka normalno u upotrebi, a druga crpka služi kao instalirana rezervna. Navodi se da jedna crpka SF mora raditi kad god ima goriva u bazenu istrošenog goriva kako bi se temperatura u SFP-u održala nižom od 49°C. Stoga je početni status SFP crpki rashladnog sustava, u svrhu SFP PSA modeliranja, definiran kako slijedi:
  - Jedna od dvije SFP crpke rashladnog sustava normalno radi usisujući iz SFP izlaza, tjerajući protok kroz SFP izmjenjivač(e) topline i prenosni krug pročišćavanja i vraćajući ga kroz SFP ulaz. Druga crpka je u stanju pripravnosti. Kako bi se pojednostavilo modeliranje stabla kvarova, pretpostavlja se da u trenutku pokretanja crpka 2 (SFAPSF02) radi, dok je crpka 1 (SFAPSF01) u stanju pripravnosti. (U stvarnosti, bilo koja od dvije crpke može raditi dok je druga u stanju pripravnosti.)
- SFP izmjenjivači topline sustava hlađenja. Referenca [32] daje rezultate izračuna temperatura vode SFP-a uzimajući u obzir različite kombinacije triju izmjenjivača topline SFP-a, izmjenjivača topline 1 (SFAHSF01), izmjenjivača topline 2 (SFAHSF02) i izmjenjivača topline 3 (SFAHSF03). Konkretno, kombinacije koje se razmatraju su:
  - izmjenjivač topline 1 ili 2 radi samostalno;

- izmjenjivač topline 1 ili 2 koji radi zajedno s izmjenjivačem topline 3 (1 i 3 ili 2 i 3); ili
- izmjenjivači topline 1 i 2 rade zajedno.

Operaterski postupak kaže u uputama da samostalni rad izmjenjivača topline 3 nije dopušten. Pojašnjeno je da ovaj izmjenjivač topline može raditi samo paralelno s izmjenjivačem topline 1 ili izmjenjivačem topline 2. U uputama je dodatno je specificirano da nije dopušten istovremeni rad sva tri izmjenjivača topline zbog nedovoljnog CCW protoka.

Na temelju gore navedenog može se očekivati sljedeći početni status SFPCS izmjenjivača topline:

- SFP stanja s potpunom jezgrom iz prethodnog ciklusa u SFP-u: Pogonski postupak pokazuje da su moguće različite kombinacije izmjenjivača topline, podrazumijeva se da su preferirane konfiguracije izmjenjivač topline 2 koji radi samostalno (s izmjenjivačima topline 1 i 3 izoliranima) ili izmjenjivač topline 1 koji radi zajedno s izmjenjivačem topline 3 (izmjenjivač topline 2 izoliran). Radi jednostavnosti modeliranja stabla kvarova pretpostavlja se da u vrijeme početnog događaja izmjenjivač topline 2 radi, a izmjenjivači topline 1 i 3 su izolirani. (Treba napomenuti da nema preferencija u pogledu kombinacija koje uključuju određenu crpku i određeni izmjenjivač topline: bilo koja crpka može biti uparena s bilo kojom dopuštenom kombinacijom izmjenjivača topline).
- SFP stanja s ponovno bez trenutne jezgre reaktora u SFP: U osnovi, može se primijeniti bilo koja od gornjih kombinacija. Međutim, podrazumijeva se da su poželjne konfiguracije izmjenjivač topline 2 koji radi samostalno (s izmjenjivačem topline 1 i 3 izoliranima) ili izmjenjivač topline 1 koji radi zajedno s izmjenjivačem topline 3 (izmjenjivač topline 2 izoliran). Radi jednostavnosti modeliranja stabla kvarova pretpostavlja se, kao i za druga SFP stanja, da u vrijeme početnog događaja izmjenjivač topline 2 radi, s izmjenjivačem topline 1 i izmjenjivačem topline 3 izoliranima. (Ista napomena o preferencijama u vezi s kombinacijama koje uključuju određenu crpku i određeni izmjenjivač topline vrijedi kao gore).

Ukratko, u modelu stabla kvarova pretpostavlja se da u vrijeme bilo kojeg početnog događaja, tijekom bilo kojeg SFP stanja:

- izmjenjivač topline 2 radi, s izoliranim izmjenjivačima topline 1 i 3,

i

- crpka 1 SFP rashladnog sustava radi (i prva se kviri u sekvenci koja dovodi do potpunog gubitka SFP hlađenja),

Budući da postoji zajednički kolektor, nema preferencija vezanih uz kombinacije crpki i izmjenjivača topline.

### **3.6.3 Primjeri definiranja općih kriterija uspjeha**

#### **3.6.3.1 Raspoložljivo vrijeme za uspjeh**

U svrhu ove evaluacije postavljen je opći kriterij da bi postrojenje trebalo biti u stanju izbjeći oštećenje goriva u SFP-u najmanje 72 sata bez vanjske pomoći, tj. oslanjajući se isključivo na resurse (raspoloživu opremu, sisteme, rezerve hladioca/vode, operatersko osoblje, itd. na licu mjesta).

#### **3.6.3.2 Primjer kriterija uspjeha za SFP sustav hlađenja - crpka u pripravnosti i izmjenjivač(i) topline**

Prema pretpostavci, rezervna crpka je crpka 2 (SFAPSF02), a rezervni (izolirani) izmjenjivači topline su 1 i 3. Ovi kriteriji uspjeha relevantni su za redosljed u kojima radi crpka (npr. crpka 1, prema pretpostavci) ili izmjenjivač topline (npr. izmjenjivač topline 2) ne radi zbog lokalnih uzroka. Kriteriji uspjeha su:

- U slučaju gubitka radne crpke za hlađenje (izmjenjivača topline), crpka u pripravnosti se pokreće (izmjenjivači topline su poredani) na vrijeme kako bi se spriječilo ključanje SFP-a. Nadalje, rezervna crpka i/ili izmjenjivač(i) topline nastavljaju raditi sve dok je potrebno za popravak/oporavak pokvarenih komponenti i vraćanje SFP sustava hlađenja u normalan status. Što se tiče rezervnih izmjenjivača topline, konzervativno se pretpostavlja da su za uspjeh potrebni i izmjenjivač topline 1 i izmjenjivač topline 3. Stvarno vrijeme misije za potrebe modeliranja stabla kvarova može se utvrditi u odnosu na opći kriterij raspoložljivog vremena za uspješno ispunjavanje sigurnosne funkcije.

### 3.6.3.3 Primjer kriterija uspjeha za nadopunjavanje inventara SFP alternativnim metodama – raspršivanjem vode mlaznicama po gorivnim elementima

SFP raspršivanje se koristi samo u slučaju nemogućnosti uspostave sustava nadopunjavanja inventara SFP drugim alternativnim metodama ili u slučaju vrlo velikog istjecanja i brzog pada razine vode SFP-a.

Sredstva za prskanje SFP-om, kako je definirano u pogonskim postupcima su:

- SFP raspršivanje izravno iz FP distribucijskog hidranta:
  - Vatrogasna cijev je uspješno produžena i spojena između vatrogasnog hidranta.
  - Protok do vodenih topova se uspostavlja prije nego što se SFP razina spusti ispod TAF+3,05m.
  - Prskanje se održava onoliko dugo koliko je potrebno da se oporavi bilo kakvo sredstvo za nadoknadu SFP-a (ne zahtijeva lokalne radnje na El. 115), da se oporavi razina SFP-a do usisne crpke za hlađenje SFP-a i da se oporavi hlađenje SFP-a.
    - Najmanje se jedna od dvije protupožarne crpke u ESW crpnoj stanici pokreće i održava tlak u FP sustavu.
- SFP prskanje pomoću prijenosnih SAME (*Severe Accident Management Equipment*) crpki iz PW spremnika:
  - Vatrogasno crijevo je uspješno produženo i spojeno između PW spremnika i usisne FP crpke te između FP crpke i vodenih topova na el. 115.
  - Barem jedna od dvije prijenosne FP crpke je uspješno pokrenuta.
  - Protok do vodenih topova se uspostavlja prije nego što se SFP razina spusti ispod TAF+3,05m.
  - Prskanje se održava onoliko dugo koliko je potrebno da se oporavi bilo kakvo sredstvo za nadoknadu SFP-a (ne zahtijeva lokalne radnje na El. 115), da se oporavi razina SFP-a do usisne crpke za hlađenje SFP-a i da se oporavi hlađenje SFP-a.
- SFP prskanje prijenosnim SAME crpkama iz bazena karbonatnog mulja:
  - Potopna crpka se spušta u CW povratni kanal i njeno tlačno crijevo se produžava do bazena karbonatnog mulja.
  - Potopna crpka je uspješno pokrenuta i transportira vodu u bazen karbonatnog mulja.



- Vatrogasna cijev je uspješno produžena i spojena između bazena karbonatnog mulja i usisne crpke FP te između crpke FP i vodenih topova na el. 115.
  - Barem jedna od dvije prijenosne SAME crpke je uspješno pokrenuta.
  - Protok do vodenih topova se uspostavlja prije nego se razina SFP-a spusti ispod TFA+3,05m.
  - Prskanje se održava onoliko dugo koliko je potrebno da se oporavi bilo kakvo sredstvo za nadoknadu SFP-a (ne zahtijeva lokalne radnje na El. 115), da se oporavi razina SFP-a do usisne crpke za hlađenje SFP-a i da se oporavi hlađenje SFP-a.
- SFP prskanje pomoću plutajuće hidrauličke crpke:
- Plutajuća crpka AE900PMP-008 se spušta u CW usisni bazen i njeno tlačno crijevo se produžava do vodenih topova na FHB El. 115.
  - Plutajuća crpka je uspješno pokrenuta.
  - Protok do vodenih topova se uspostavlja prije nego se razina SFP-a spusti ispod TFA+3,05m.
  - Prskanje se održava onoliko dugo koliko je potrebno da se oporavi bilo kakvo sredstvo za nadoknadu SFP-a (ne zahtijeva lokalne radnje na El. 115), da se oporavi razina SFP-a do usisne crpke za hlađenje SFP-a i da se oporavi hlađenje SFP-a.

### **3.6.4 Primjer identifikacije operatorskih akcija i odziva na zahtjev**

Ovaj odjeljak identificira i općenito opisuje ljudska sučelja povezana s funkcijama koje se razmatraju u sekvencama stabla događaja opisanim u poglavlju 3.5.

#### **3.6.4.1 Primjer za pokretanje rezervne SFP rashladne crpke**

Radnja operatera bi se izvršila u skladu sa pogonskom procedurom: isključivanje radne crpke. Prema pretpostavkama, radna crpka je SFAPSF02. Stoga je pretpostavljeni slijed:

- a) zamijena radne crpke, s crpke 2 na crpku 1.

#### **3.6.4.2 Primjer za usklađivanje pripravnih izmjenjivača topline**

Prema pretpostavci, radni izmjenjivač topline je SFAHSF02. Pretpostavljeni slijed prema pogonskoj proceduri je:

- a.) uspostava da HX 1 radi paralelno s HX 2;

- b.) izolacija HX 2 od paralelnog rada s HX 1;
- c.) uspostava da HX 3 da radi paralelno s HX 1.

### 3.6.5 Druge pretpostavke primijenjene na modeliranje stabla kvarova

Sljedeće pretpostavke općenito su primijenjene u stablima kvarova:

1. Začepljenje otvorenih ručnih ventila u normalnim radnim uvjetima (npr. kroz ručni ventil prolazi sniženi protok) nije modelirano u stablima kvarova. Ovo se smatra sporo razvijajućim događajem koji bi ostavio dovoljno vremena za korektivne radnje, zamjenu ili bilo kakav drugi popravak.
2. Začepljenje normalno otvorenih ručnih ventila u sustavima u pripravnosti smatra se događajem male vjerojatnosti u usporedbi s relevantnim načinima kvara drugih komponenti. To se lako može pokazati. Za sustave povezane sa SFP-om može se smatrati da će se putevi protoka mijenjati (npr. izmjena operativnog cjevovoda) ili testirati na temelju perioda ne dužeg od nekoliko mjeseci. Vrijeme izlaganja ( $T_{exp}$ ) od 92 dana (četvrtina godine) može se uzeti kao osnova za ovu demonstraciju. Stopa kvarova začepljenja ručnih ventila u referentnom NEK PSA modelu ( $\lambda_{pl}$ ) je  $6,36E-09/h$  (RS parametar R-61). Za usporedbu, odgovarajuća stopa kvarova iz NUREG/CR-6928, [52], je  $6,0E-09/h$  (zaokružena verzija). Dakle, vjerojatnost kvara ručnog ventila zbog začepljenja u trenutku zahtjeva:

$$Q_{pl} \approx \frac{\lambda_{pl} T_{exp}}{2} = 1.4E-05$$

Za usporedbu, vjerojatnosti neuspjeha crpki da se pokrenu ili rade tijekom misije očekuju se reda veličine  $1E-03$  ili  $1E-02$ .

3. Pretpostavlja se da se svaki ručni ventil koji je uspješno otvoren (zatvoren) može uspješno ponovno zatvoriti (ponovno otvoriti) unutar relevantnog vremena misije. (Drugim riječima: vjerojatnost neuspjeha ručnog ventila da se ponovno zatvori (ponovno otvori) s obzirom na uspješno otvaranje (zatvaranje) smatra se vrlo niskom u usporedbi s drugim vjerojatnostima neuspjeha). Ovo se, međutim, odnosi samo na lokalne kvarove ventila i ne uključuje ljudske pogreške.
4. Začepljenje nepovratnih ventila u normalno radnim cjevovodima (tj. nepovratni ventil prolazi protok) nije prikazano/modelirano u stablima kvarova na temelju istih argumenata kao što je gore opisano za ručne ventile. Ostali načini kvarova nepovratnih

ventila, kao što je neuspjeh otvaranja, neuspjeh zatvaranja, itd. razmatraju se u logici stabla kvarova.

5. Začepljenje ili istjecanje iz izmjenjivača topline u normalno radnim cjevovodima (tj. izmjenjivač topline prolazi kroz protok i prenosi toplinu) nije prikazano/modelirano u stablima kvarova na temelju istih argumenata kao što je gore opisano za ručne ventile. Ovi načini kvara se, međutim, smatraju relevantnim za rezervne izmjenjivače topline (tj. rezervni izmjenjivač topline kvari nakon što je usklađen za rad zbog stanja greške).

Osim ovih, postoji niz specifičnih pretpostavki koje su primijenjene tijekom modeliranja pojedinih funkcija i sve su opisane u modelu.

### **3.6.6 Analiza pouzdanosti operatorskog osoblja**

Analiza ljudske pouzdanosti – operatorskog osoblja (HRA) za NEK SFP PSA započela je identifikacijom i karakterizacijom odziva operatorskog osoblja u razmatranim sekvencama nesreća, što je rađeno u sklopu analize stabla događaja/stabla kvarova. Iz opisanih operatorskih odziva može se vidjeti da bi dijagnostički dio i implementacijski dio odziva operatera bili regulirani sljedećim postupcima i smjernicama postrojenja:

- ARP (*Alarm Response Procedure*);
- SOP (*System Operating Procedure*);
- EOP (*Emergency Operating Procedure*)
- SAMG (*Severe Accident Management Guidelines*).

Primjer pojednostavljenog dijagrama odziva operatera na stanje sustava prikazan je u Prilogu 3.

### **3.7 SFP PSA Model Parameters**

Uobičajeno PSA model (u RiskSpectrumu) mora sadržavati inventar (bazu podataka) parametara korištenih za kvantificiranje NEK SFP PSA modela. Poglavlje je podijeljeno prema vrstama PSA parametara kako je definirano u RS. Predviđeni su posebni potpoglavlja za:

- vjerojatnosti,
- procjene neuspjeha,

- frekvencije/učestalosti,
- vrijeme uspješnosti,
- parametre za analizu kvarova sa zajedničkim uzrokom (CCF – *Comon Cause Failure*).

### 3.7.1 Primjer parametara za analizu greške sa zajedničkim uzrokom (*Comon Cause Failure*)

Posebna pažnja je dana modeliranju kvarova opreme zbog potencijalnih pogrešaka sa zajedničkim uzrokom. Na primjer:

BT-AE-PD-PS (Beta faktor da se prijenosne (SAME) FP crpke ne mogu pokrenuti)

Procjenjena vrijednost je 0,2. Ovaj relativno visoki beta faktor dodijeljen je za razmatranje zbog različitih uzroka koji mogu spriječiti pokretanje obiju crpki ili uzrokovati njihovu nedostupnost (npr. crpke se moraju transportirati iz ISTE zgrade do ispred FHB-a).

BT-AE-PD-PS (Beta faktor da se prijenosne (SAME) FP crpke ne rade)

Procjenjena vrijednost 0,1. To je 50% vrijednosti dodijeljene za neuspjeh pokretanja. Beta faktori za neuspjela pokretanja obično su za faktor manji od onih za neuspjehe pokretanja.

**Tablica 12: CCF parametri u NEK SFP PSA modelu**

Identifikator	Opis	Vrijednost	Opis		Baza
			Tip	Parametar	
P2PDAE---PS	Beta faktor za prijenosne (SAME) FP crpke ne može se pokrenuti	2E-01	Nema	N/A	BT-AE-PD-PS
P2PDAE---PR	Beta faktor za prijenosne (SAME) FP crpke ne rade	1E-01	Nema	N/A	BT-AE-PD-PR
<i>Parametri preuzeti iz NEK PSA modela</i>					
BT-AF-CV-FO	Beta faktor za neuspjeh otvaranja AF CV	2.86E-01	Nema	N/A	(NEK PSA)
BT--GEN--DF	Beta faktor za generički parametar neuspjeha potražnje	8.98E-02	Nema	N/A	(NEK PSA)
BT--GEN--OF	Beta faktor za generički parametar kvara u radu	4.59E-02	Nema	N/A	(NEK PSA)

### 3.8 Primjer kvantifikacija rizika od ključanja (SFPB) i otkrivanja gorivnih elemenata (SFU)

#### 3.8.1 Model kvantifikacije

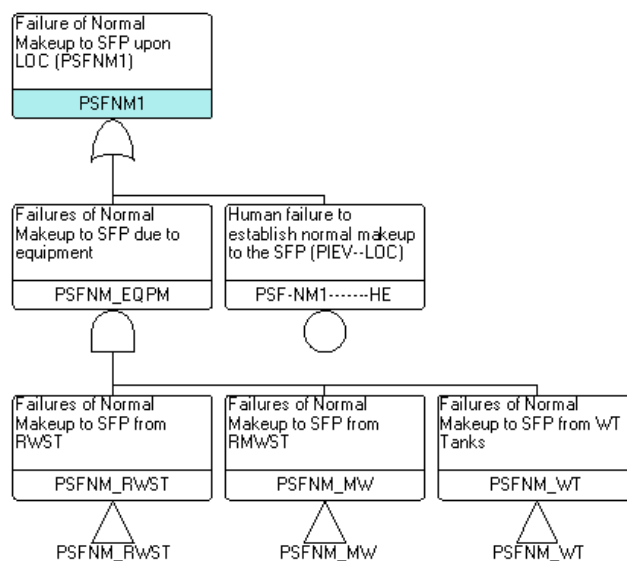
Cjelokupno SFP PSA stablo događaja i model stabla kvarova razvijeni su istom verzijom RiskSpectrum (RS) PSA koja se koristi kao platforma za referentni NEK PSA model [47].

Slika 15 prikazuje primjer stabla događaja za gubitak hlađenja bazena istrošenog goriva zbog slučajnih kvarova modeliranog u NEK RS modelu.

Slika 16 prikazuje primjer stabla kvara za uspostavu dobave vode bazenu s istrošenim gorivom nakon gubitka hlađenja i neuspješnog popravka (prikaz vršne logike stabla) modeliranog u NEK RS modelu.

Loss of SFP Cooling by random causes	SFP Cooling Recovered - LOC	Normal Makeup to SFP Established - (0)	Alternative Makeup to SFP Established - (0)	No.	Freq.	Conseq.	Code
PIEV--LOC	PSFCREC1	PSFNM1	PSFAM1				
1				1		OK	
				2		P-BOIL	PSFCREC1
				3		P-BOIL	PSFCREC1-PSFNM1
				4		P-FD	PSFCREC1-PSFNM1-PSFAM1

**Slika 15: Primjer stabla događaja za gubitak hlađenja bazena istrošenog goriva zbog slučajnih kvarova**



**Slika 16: Primjer stabla kvara za uspostavu dobave vode bazenu s istrošenim gorivom nakon gubitka hlađenja i neuspješnog popravka (prikaz vršne logike stabla)**

Kvantifikacija učestalosti napravljena je za dva opća vrhunska događaja koji odgovaraju dvama krajnjim stanjima sekvenci stabla događaja o kojima se govori u poglavlju 3.5:

- SFP ključanje, krajnje stanje P-BOIL, i
- otkrivanje istrošenog goriva (SFU), krajnje stanje P-FD.

Karakterizacija krajnjih stanja P-KIPE i P-FD je objašnjena u u poglavlju 3.5.

Za svaki od dva opća vrhunska događaja, SFPB i SFU, definiran je skup RS slučajeva analize posljedica tj. jedan posljedični slučaj za svako SFP stanje. Stoga postoji 8 analiza posljedica za ublaženo SFP ključanje i 8 za SFU.

Slučaj posebne posljedice izvodi se na istoj ET/FT strukturi, ali pod rubnim uvjetima reprezentativnim za SFP stanje za koje se izračunava smanjeno SFP ključanje ili SFU frekvencija. Aktiviranje reprezentativnog rubnog uvjeta ima dva glavna učinka:

- Uvjetne frekvencije inicijatora množe se s odgovarajućim vremenskim udjelom SFP stanja.
- Uzimaju se vjerojatnosti (putem osnovnih razmjena događaja) koje odgovaraju SFP stanju koje se kvantificira.

Prilog 4 predstavlja primjer ispisa RS kombinacije događaja (djelomičan popis) koje dovode do otkrivanja goriva u bazenu nakon gubitka hlađenja i neuspješnog oporavka. Za ilustraciju prva kombinacija predstavlja sljedeći scenarij:

- elektrana je u normalnom pogonu (bazen je u potpunosti izoliran od reaktorske zgrade),
- prestanak rada odnosno kvar rashladne crpke bazena koja je u pogonu,
- druga crpka je neraspoloživa zbog preventivnog održavanja,
- bazen se počinje zagrijavati i u tijeku su nastojanja da se popravi prva crpka ili uspostavi druga crpka,
- nastojanja oporavka ne uspijevaju - dolazi do ključanja vode u bazenu i pada razine vode zbog isparavanja,
- pogonsko osoblje nastoji uspostaviti dobavu hladne vode u bazen iz normalnih, za to predviđenih izvora i održavati normalnu razinu, međutim, ne uspijeva u tome zbog greške operatera,
- ne uspijeva, zbog ljudskog faktora, niti pokušaj dobave vode iz predviđenih alternativnih izvora,
- što sve skupa, nakon određenog vremena, dovodi do otkrivanja goriva.

Vjerojatnost scenarija je vrlo niska, velikim dijelom upravo zbog toga što je vremenski period između gubitka hlađenja i otkrivanja goriva vrlo dugačak te je malo vjerojatno da niti jedan od navedenih načina ne bi uspio.

Kod logičkog (i vjerojatnosnog) modeliranja seizmičnog događaja stabla događaja i stabla kvara su slična ovima gore, s time da se u njih dodaju kvarovi (funkcionalni ili strukturalni) direktno prouzročeni potresom. Ovisno o intenzitetu potresa, vjerojatnosti spomenutih kvarova mogu biti niže ali i bitno više od vjerojatnosti slučajnih kvarova. U slučaju seizmičkog događaja vjerojatnost gore opisanog scenarija može biti značajno viša jer potres može prouzročiti nepopravljivu štetu na opremi, zgradama i/ili infrastrukturi, odnosno mogućnosti pristupa opremi i oruđima.

### 3.8.2 Primjer rezultata kvantifikacije

Tablica 13 prikazuje rezultate kvantifikacije učestalosti ključanja SFP (SFPB). Ukupna učestalost SFPB procijenjena je na  $7,20E-04$  /god. Treba napomenuti (kao što je već ranije istaknuto) da "P-BOIL" nije stanje oštećenja. Između "P-BOIL" i bilo kakvog potencijala za oštećenje goriva (od unutarnjih pokretača) postoji velika razlika u smislu dostupnih funkcija ublažavanja koje bi trebale otkazati, kao što je prikazano u nastavku kvantificiranjem učestalosti otkrivanja. Učestalost ublaženog SFP ključanja navedena je samo u svrhu indikacije. Primijećeno je da najnovije dostupne studije sa strane industrije uopće nisu dale učestalost ključanja (SFPB).

Kao što se može vidjeti, najveći doprinos (nekoliko postotaka manje od 90%) ovoj frekvenciji dolazi od stanja bez goriva iz reaktora tijekom obustave A1 i A2 (Slika 17) odnosno iz činjenice da su to dva stanja u kojima je SFP većinu vremena u jednoj godini.

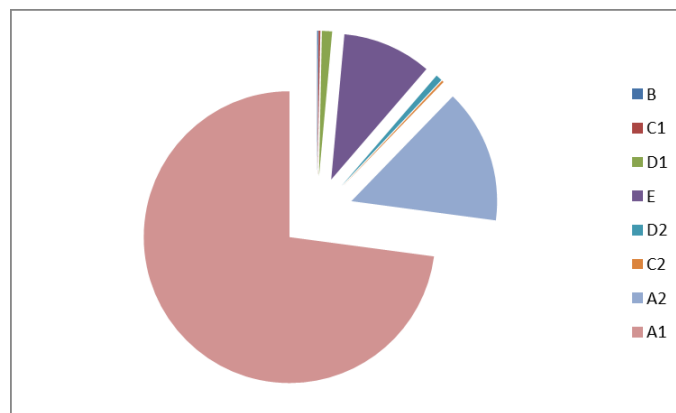
**Tablica 13: Primjer sumarnih rezultata kvantifikacije SFPB za pojedina SFP stanja za unutarnje događaje**

SFP Stanje	Nekondicionalna frekvencija	Kondicionalna frekvencija
	%	/god <sup>(1)</sup>
B	0.1%	1.52E-03
C1	0.2%	1.49E-03
D1	1.1%	2.97E-03
E	9.9%	2.78E-03
D2	0.7%	1.87E-03

SFP Stanje	Nekondicionalna frekvencija	Kondicionalna frekvencija
	%	/god <sup>(1)</sup>
C2	0.2%	1.64E-03
A2	14.9%	6.99E-04
A1	72.9%	6.46E-04
<b>Ukupno</b>	<b>100.0%</b>	

Bilješke:

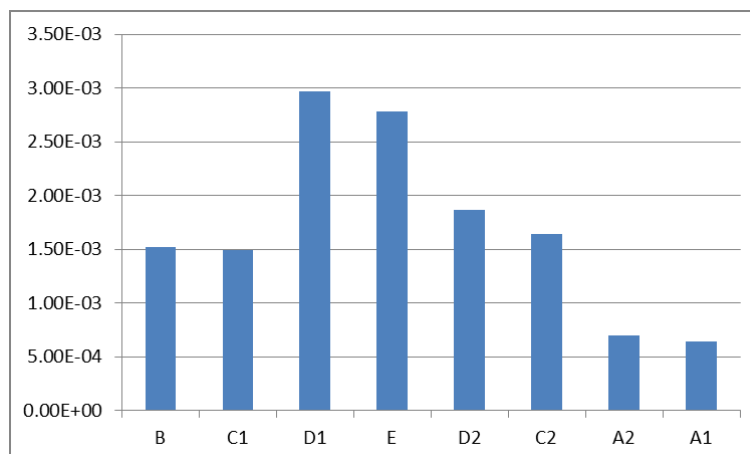
(1) Po godini provedenoj u razmatranom SFP stanju. Dobiva se dijeljenjem bezuvjetne frekvencije s odgovarajućim vremenskim udjelom.



**Slika 17: Raščlamba bezuvjetne SFPB frekvencije za SFP stanja**

Ako se pogledaju uvjetno učestalosti SFPB (izražene po godini provedenoj u SFP stanju), može se vidjeti da je najveći intenzitet rizika u stanjima punjenja goriva D1, E i D2. To proizlazi iz činjenice da je SFP toplinsko opterećenje najveće u tim stanjima, a vremena do ključanja su sukladno tome najkraća. Slika 18 prikazuje raščlambu bezuvjetne smanjene SFPB frekvencije za različita SFP stanja. Doprinos rizika od ovih stanja je, međutim, potisnut njihovim ograničenim trajanjem.





Slika 18: Uvjetne frekvencije SFPB za pojedina SFP stanja

Tablica 14: Primjer sumarnih rezultata kvantifikacije SFB prema početnim događajima za unutarnje događaje

SFP Stanje	PIEV--LOC	PIEV--LOCB	PIEV--LOCW	PIEV--LOIS	PIEV--LOIL	Ukupno / god
Ukupno, /god	1.45E-04	1.71E-05	4.63E-05	5.00E-04	1.06E-05	<b>7.20E-04</b>
Ukupno, %	20.2%	2.4%	6.4%	69.5%	1.5%	100.0%

Tablica 15 prikazuje rezultati kvantifikacije rizika otkrivanja istrošenog goriva. Ukupna učestalost otkrivanja istrošenog goriva procijenjena je na  $8,90E-08$  /god. Kao što je već navedeno, to je za nekoliko redova veličine niže od frekvencije ključanja SFP-a, a razlog je dostupnost višestrukih funkcija ublažavanja koje bi trebale otkazati kako bi se ključanje razvilo u otkrivanje.

Kao što se može vidjeti, najveći doprinos (približno 70%) učestalosti ponovno dolazi od stanja A1 i A2 bez punjenja goriva (Slika 20). Kao i prije, ovo dolazi iz činjenice da su ovo dva stanja u kojima SFP provodi većinu vremena. No, primjetan je i povećani udio (u odnosu na učestalost ključanja) stanja punjenja goriva, posebice D1 i D2 (iznad 11% svaki).

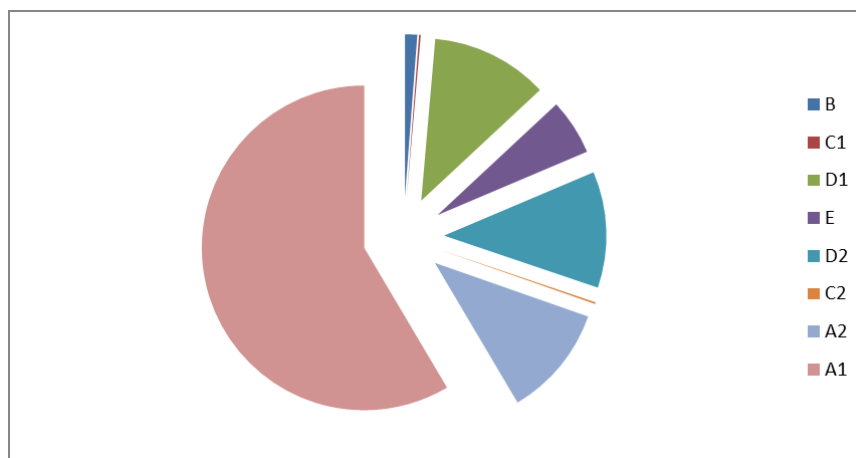
Ovo je još uočljivije ako se pogledaju uvjetne frekvencije, tj. one izražene po godini provedenoj u razmatranom SFP stanju. Vidi se, kao što je, također, naglašeno na slici 3.9 4, da je intenzitet rizika daleko najveći za ova dva stanja (D1 i D2). Razlog tome može se vidjeti kada se SFU frekvencija raščlani na određene inicijatore, što je učinjeno u nastavku. No prije toga se raspravlja o smanjenoj učestalosti ključanja SFP-a na određenim inicijatorima

**Tablica 15: Primjer sumarnih rezultata kvantifikacije SFU za pojedina SFP stanja za unutarnje događaje**

SFP Stanje	Nekondicionalna frekvencija	Kondicionalna frekvencija
	%	/god <sup>(1)</sup>
B	1.2%	1.78E-06
C1	0.2%	1.65E-07
D1	11.7%	3.80E-06
E	5.6%	1.93E-07
D2	11.6%	3.76E-06
C2	0.2%	1.68E-07
A2	11.1%	6.48E-08
A1	58.5%	6.41E-08
<b>Ukupno</b>	<b>100.0%</b>	

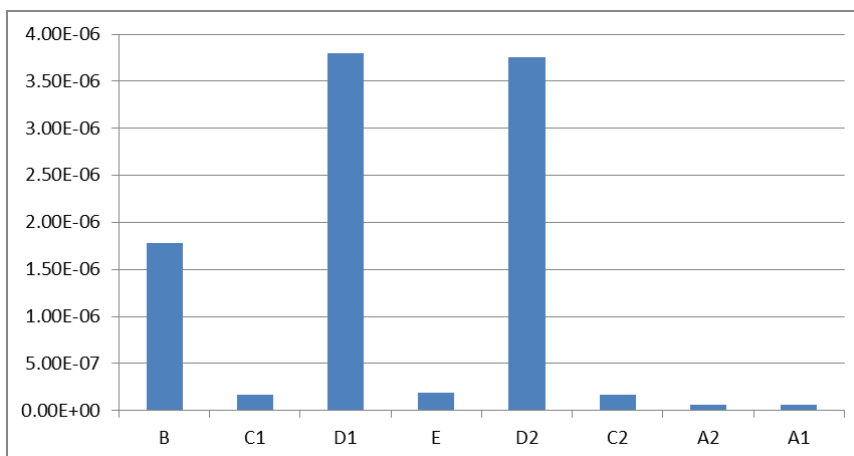
Bilješke:

(1) Po godini provedenoj u razmatranom SFP stanju. Dobiva se dijeljenjem bezuvjetne frekvencije s odgovarajućim vremenskim udjelom.



**Slika 19: Raščlamba bezuvjetne SFU frekvencije za SFP stanja**

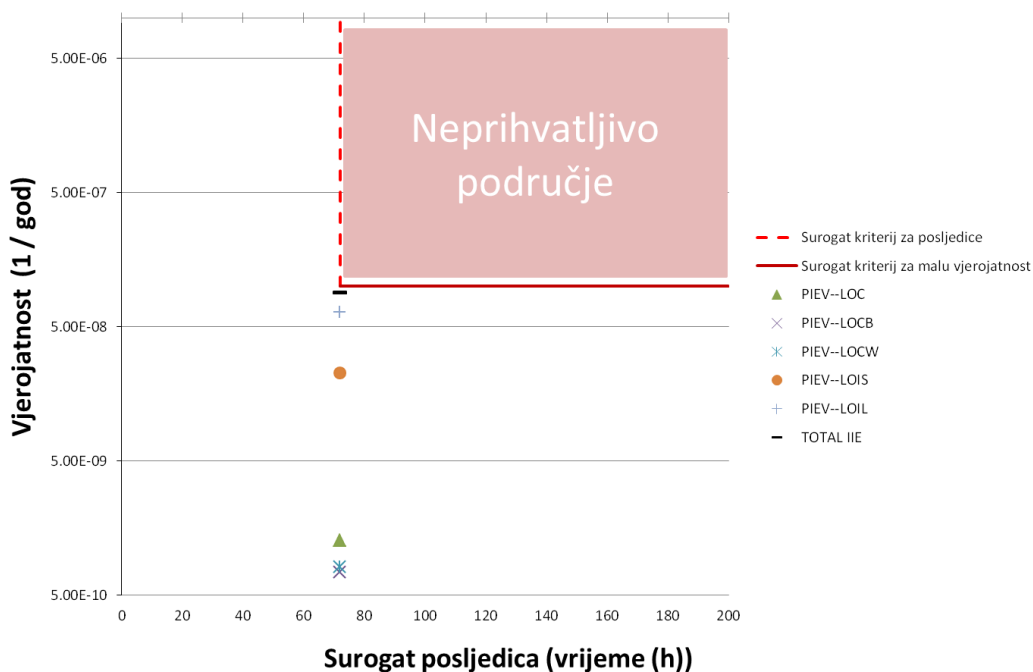
Slika 21 prikazuje usporedbu rezultata kvantifikacije SFU za različite unutarnje događaje (početne događaje) prema postavljenim kriterijima (nema otkrivanja istrošenog goriva unutar 72 sata sa vjerojatnošću većom od  $1E-7$  / god).



Slika 20: Uvjetne frekvencije SFU za pojedina SFP stanja

Tablica 16: Primjer sumarnih rezultata kvantifikacije SFU prema početnim događajima za unutarnje događaje

SFP stanje	PIEV--LOC	PIEV--LOCB	PIEV--LOCW	PIEV--LOIS	PIEV--LOIL	Ukupno /god
Ukupno /god	1.27E-09	7.34E-10	8.05E-10	2.26E-08	6.37E-08	8.90E-08
Ukupno, %	1.4%	0.8%	0.9%	25.3%	71.5%	100.0%



Slika 21: Prikaz rezultata kvantifikacije SFU za različite unutarnje inicijatore prema postavljenim kriterijima

### 3.8.2.1 Primjer dodatne analize u vezi s alternativnim SFP sustavima hlađenja

Elektrane razmatraju opcije za alternativno SFP hlađenje. Kao dodatna mogućnost postojećim metodama, SFP bi se hladio (dodatnim) mobilnim ili trajno instaliranim izmjenjivačem topline. Uz dodatnu crpku, novi bi sustav omogućio nadopunu hladioca/vode u SFP, a da svi postojeći sustavi postrojenja nisu u funkciji. Također, kao opcija razmatra se ugradnja trajnog sustava za raspršivanje vode u slučaju nužde SFP-a, kao jedinog praktičnog rješenja koje se može primijeniti za dovoljno hlađenje gorivnih elemenata u slučaju nekontroliranog pada razine vode SFP-a (veliki seizmički događaj).

Istražen je potencijal (mogućnost) smanjenja rizika za SFP nakon instalacije novog alternativnog SFP rashladnog sustava/sustava raspršivanja. U tu svrhu, kvarovi trenutnih alternativnih metoda su u SFP PSA modelu logički dodani s novim osnovnim događajem koji predstavlja kvarove hipotetskog novog(ih) sustava. (Operaterske akcije, osnovni događaj i pridruženi HEP ostavljeni su kakvi jesu jer se smatra da bi svaka "nova" ljudska pogreška povezana s pokretanjem novih sustava ovisila o trenutno modeliranim pogreškama povezanim s implementacijom postojećih funkcija.)

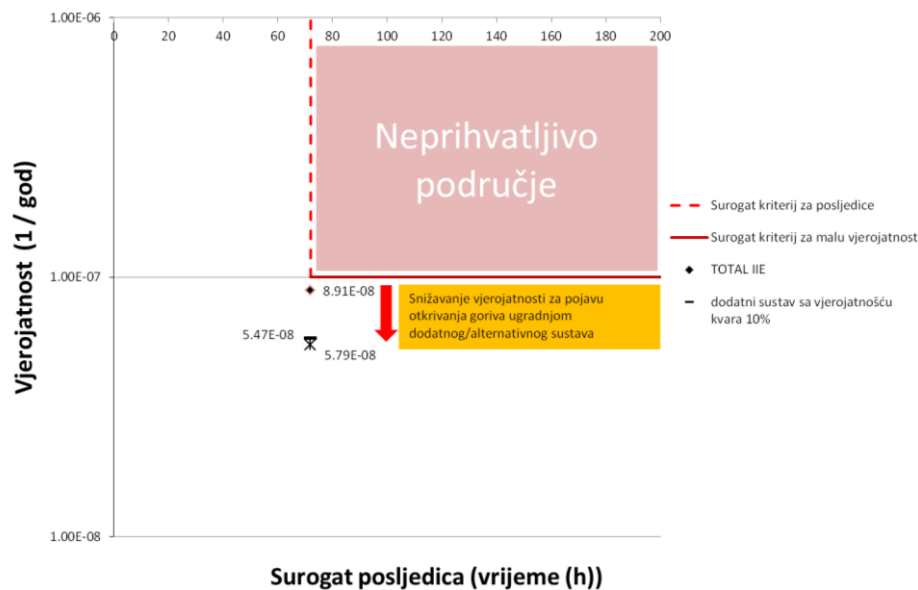
Tablica 17 prikazuje rezultate provedene analize potencijala (mogućnosti) smanjenja rizika za SFP nakon instalacije novog alternativnog SFP rashladnog sustava/sustava raspršivanja. Analizirana su dva slučaja, jedan s vjerojatnošću kvara (Q) novih sustava postavljenom na 10%, a drugi s istom vjerojatnošću postavljenom na 1%.

**Tablica 17: Potencijal za smanjenje učestalosti SFU alternativnim sustavima hlađenja i prskanja**

SFP Stanje	Osnovni SFU frekvencija /god	Novi SFU frekvencija /god	
		Q = 10%	Q = 1%
B	1.08E-09	9.77E-10	9.66E-10
C1	1.51E-10	7.53E-11	6.78E-11
D1	1.04E-08	9.41E-09	9.30E-09
E	4.95E-09	2.82E-09	2.60E-09
D2	1.03E-08	9.34E-09	9.24E-09
C2	1.53E-10	7.73E-11	6.97E-11
A2	9.91E-09	5.66E-09	5.23E-09
A1	5.21E-08	2.95E-08	2.72E-08
<b>Ukupno</b>	<b>8.90E-08</b>	<b>5.79E-08</b>	<b>5.47E-08</b>
<b>% of Base Case</b>	<b>100.0%</b>	<b>65.0%</b>	<b>61.4%</b>

Iz prikazanih rezultata vidljivo je da razmatrani novi sustavi imaju potencijal smanjiti rizik od oštećenja istrošenog goriva gotovo za faktor dva. Kada pojedinih o predloženim modifikacijama postrojenja postanu dostupne, moguće je provesti detaljniju analizu.

Slika 22 prikazuje usporedbu rezultata kvantifikacije SFU za različite unutarnje događaje (početne događaje) bez i sa instalacijom/upotrebom dodatnog alternativnog sustava nadopune hladioca prema postavljenim kriterijima (nema otkrivanja istrošenog goriva unutar 72 sata s vjerojatnošću većom od  $1E-7$ /god).



**Slika 22: Ilustracija snižavanja vjerojatnosti pojave SFU za unutarnje događaje dodatnim alternativnim sustavima**

### 3.9 Zaključci primjera za PSA procjenu internih događaja

Provedena je detaljna vjerojatnosna sigurnosna analiza za bazen istrošenog goriva i povezane sustave koji pokrivaju interne početne događaje. Rezultirajući SFP PSA model sadrži sve tehničke elemente tipičnog PSA za nuklearne elektrane i razvijen je do razine detalja usporedive s referentnim NEK PSA modelom.

Kvantifikacija učestalosti napravljena je za dva opća glavna događaja: učestalost ključanja SFP-a (SFPB) i otkrivanje istrošenog goriva (SFU). U svrhu analize i kvantifikacije rizika, SFP ciklus goriva podijeljen je i predstavljen skupom SFP stanja definiranih u smislu SFP konfiguracija i toplinskih opterećenja.

Za svaki od dva opća glavna događaja, ključanje SFP-a i otkrivanje goriva, definiran je skup slučajeva analize RiskSpectrum PSA, tj. jedan slučaj analize za svako stanje SFP-a.

Određeni slučaj analize proveden je na istom stablu događaja/strukturi stabla kvara, ali pod graničnim uvjetom reprezentativnim za stanje SFP-a za koje se izračunavala učestalost ključanja ili otkrivanja SFP-a.

Analiza učestalosti otkrivanja istrošenog goriva na pojedinim inicijatorima pokazuje da najveći doprinos dolazi od gubitka inventara (hladioca) SFP, velikih i malih. Ove dvije kategorije inicijatora pridonose više od 93% ukupnoj učestalosti otkrivanja. Važnost događaja gubitka hladioca (u usporedbi s događajem gubitka hlađenja) ne bi trebala biti iznenađenje, s obzirom na to da događaje gubitka hlađenja karakteriziraju dugi vremenski prozori (koji su regulirani gubicima ključanja i isparavanja), koji mogu biti znatno smanjeni gubitkom hladioca (u kojem slučaju se vremenskim okvirom može upravljati istjecanjem). Zapravo, uzimajući u obzir vremenske prozore za ključanje i isparavanje koji su procijenjeni u ranijoj studiji NEK-a zajedno s dostupnim uobičajenim/alternativnim metodama nadoknade, treba očekivati vrlo nisku učestalost (vjerojatnost) za bilo koji vjerodostojan scenarij koji dovodi do otkrivanja istrošenog goriva uzrokovanog gubitkom hlađenja uz očuvanu cjelovitost same konstrukcije SFP odnosno sprječavanje istjecanja veće količine inventara hladioca (vode).

#### **4. Deterministička procjena efikasnosti alternativnog ublažavanja scenarija otkrivanja gorivnih elemenata (kategorije događaja „SI“ i „BE“)**

Za nesreće velikog gubitka rashladnog sredstva (inventara vode) u bazenu istrošenog goriva (SFP) sustav mlaznica odgovarajuće veličine i kapaciteta brizganja može usporiti ili eventualno spriječiti brzo zagrijavanje istrošenog goriva. Model MELCOR 2.1 bazena NEK razvijen je i ispitan za slučajeve nesreća s gubitkom hlađenja [2]. Modelu je dodan jednostavan sustav raspršivanja s mlaznicama za raspršivanje raspoređenim na određenom mjestu na vrhu bazena. Proučavane su različite stope gubitka rashladne tekućine za različita toplinska opterećenja goriva i različite otvore i brzine protoka mlaznica za raspršivanje. Tradicionalno, mlaznice za raspršivanje koje mogu proizvesti kapljice većeg promjera koriste se blizu mjesta goriva s većim toplinskim opterećenjem.

##### **4.1 Opis problema**

Kao što je vjerojatnosna analiza pokazala u poglavlju 3.8.2, analiza učestalosti otkrivanja istrošenog goriva na pojedinim inicijatorima pokazuje da najveći doprinos dolazi od gubitka inventara (hladioca) SFP, velikih i malih istjecanja. Ove dvije kategorije inicijatora pridonose više od 93% ukupnoj učestalosti otkrivanja. Važnost događaja gubitka hladioca (u usporedbi s događajem gubitka hlađenja) ne bi trebala biti iznenađenje, s obzirom na to da događaje gubitka hlađenja karakteriziraju dugi vremenski prozori (koji su regulirani gubicima ključanja i isparavanja), koji mogu biti znatno smanjeni gubitkom hladioca (u kojem slučaju se vremenskim okvirom može upravljati ispuštanjem). U skladu s poglavljem 3.2.18 [22] generičke studije predlažu osiguravanje dovoljnog ubrizgavanja u SFP za nadoknadu inventara hladioca, preplavljujući istrošeno gorivo odozdo. Dodatna metoda za hlađenje goriva u SPF-u jest upotreba raspršivača iznad goriva, ubrizgavanjem vode direktno po gorivu od gore. To osigurava hlađenje gorivnih elemenata odozgo prema dolje, što rezultira problemom prvog hlađenja najtoplije površine. Pri dovoljno visokim brzinama protoka (to jest, većim od onog potrebnog za odvođenje ostatne topline istrošenog goriva toplina samo isparavanjem), SFP će se ponovno preplaviti ako u bazenu nema istjecanja koje je veće od količine raspršene vode sustavom mlaznica. Ako postoji istjecanje u bazenu, ponovno poplavlivanje do razine istjecanja ovisit će o količini vode u bazenu koji nije isparen. Brzina kojom se bazen ponovno preplavljuje određena je razlikom između brzine vode ubrizgavanje koje nije ispareno i brzina pražnjenja iz pukotine u strukturi bazena.

## 4.2 MELCOR model SFP-a[3]

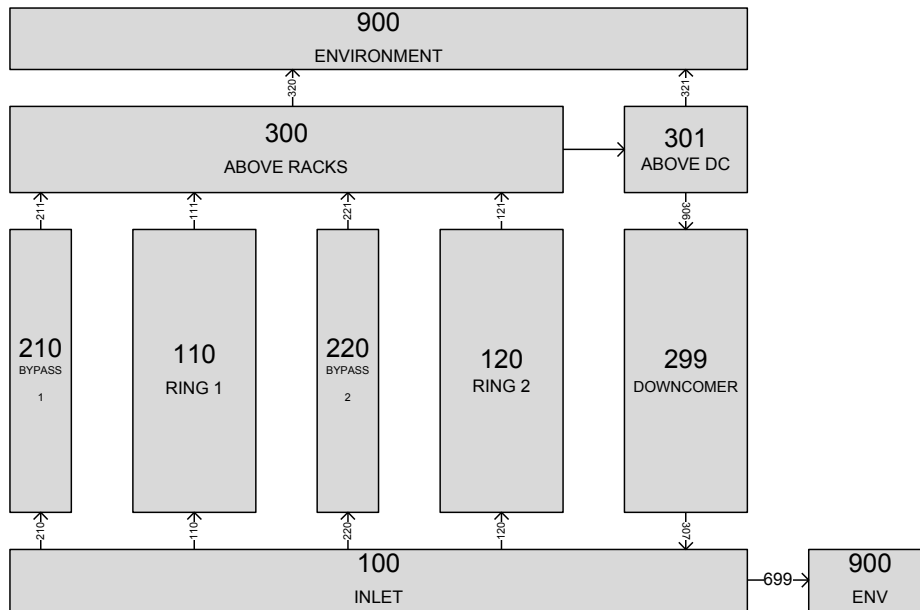
Računalni program MELCOR razvijen je u Sandia National Laboratories i sponzoriran od strane američkog regulatornog organa za nuklearnu sigurnost (USA NRC). To je potpuno integriran računalni program na inženjerskoj razini za BWR i PWR fenomene teških nesreća. MELCOR je dizajniran da olakša analize osjetljivosti i nesigurnosti korištenjem koeficijenata osjetljivosti. Mnogi parametri u korelacijama, koji su u većini kodova konstantni, implementirani su kao koeficijenti osjetljivosti u MELCOR-u. MELCOR se izvodi u dva dijela. Prvi se zove MELGEN i u njemu se specificira, obrađuje i provjerava većina ulaza. Kada su provjere unosa zadovoljene, piše se datoteka za ponovno pokretanje koja sadrži početne uvjete za sljedeći izračun. Drugi dio je sam MELCOR program koji izvršava problem na temelju MELGEN i MELCOR ulaza. Za grubu procjenu efikasnosti u [3] korištena je verzija MELCOR 2.1.

NEK SFP je izvorno dizajniran za pohranu ograničenog broja gorivnih elemenata (FA). Ti FA su morali biti povučeni, nakon određenog intervala hlađenja, zbog trajnog skladištenja. Prema izvornom projektu, SFP je morao biti popunjen do 2003. To je značilo da se NEK mora zaustaviti jer regulatorni propisi zahtijevaju da SFP mora imati slobodan prostor za ukupni inventar jezgre u slučaju nužde (ECU – *Emergency Core Unloading*/hitno pražnjenje jezgre). NEK je morao biti podvrgnut pregradnji SFP-a koja je morala postići mogućnost skladištenja svog istrošenog goriva tijekom cijelog životnog vijeka NE (40+20 godina).

Prijenos goriva iz jezgre reaktora u SFP odvija se kroz transfer kanal (TC) koji je potopljen radi održavanja radioaktivne zaštite. Dio SFP-a je prostor za utovar spremnika gdje se gorivo utovara za suho skladištenje. Kontrolni volumen (CV) 110 predstavlja volumen u kojem se nalazi gorivo veće snage (svježe gorivo), a CV 210 je pridružena premosnica za to područje. CV 120 predstavlja volumen u kojem se nalazi staro gorivo, a CV 220 je pridružena premosnica za to područje. CV 299 je volumen rashladne tekućine između stalka i SFP stijenki (dovodnik). Dio tog volumena se izdvaja za modeliranje silazne cijevi iznad polica (CV 301). CV 300 modelira volumen rashladnog sredstva iznad regala, a CV 100 je volumen rashladnog sredstva ispod osnovne ploče stalaka.

Istrošeno gorivo je modelirano na sličan način kao aktivna jezgra u COR paketu. Gorivo je podijeljeno u 3 prstena i 14 aksijalnih odjeljaka. Prve 3 aksijalne podjele modeliraju dio ispod osnovne ploče, a sljedećih 10 modeliraju aktivno gorivo. Posljednja 2 modeliraju gornji plenum.

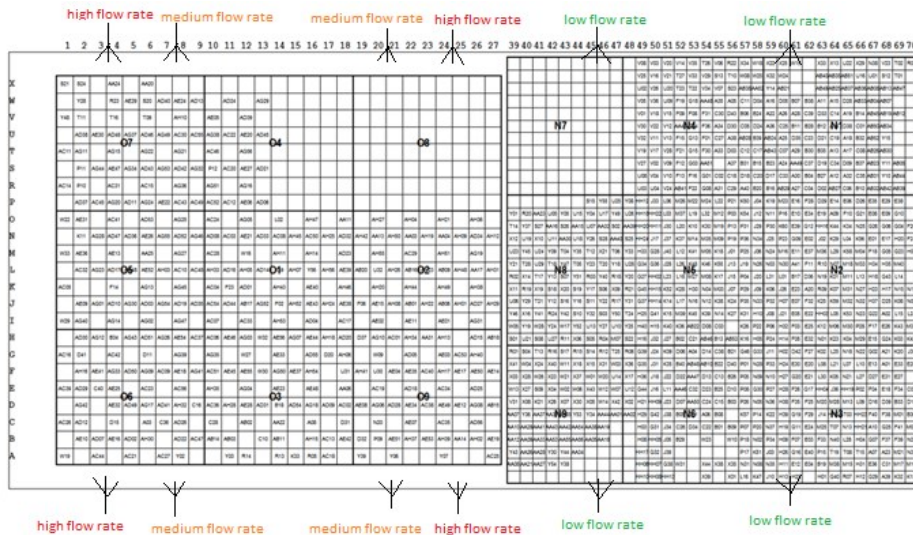




**Slika 23: Primjer nodalizacije SFP**

Hlađenje SFP-a na bazi raspršivača uvedeno je u sklopu programa nadogradnje sigurnosti NEK-a. Sustav za prskanje se smješta uz sjeverni i južni zid SFP-a na koti 115,55 m. Oba voda za raspršivanje imat će ventile za kontrolu tlaka raspršivanja koji će ispuštati vodu u SFP kada se postigne zadana vrijednost tlaka. Ako se sve mlaznice za prskanje pokvare, voda će se ispustiti u SFP kroz sigurnosne ventile. Izvor vode za raspršivače je protupožarna voda ili voda iz rijeke Save. Sustav za raspršivanje je podijeljen na mlaznice s različitim protocima: malim ( $3 \text{ m}^3/\text{h}$ ), srednjim ( $25,4 \text{ m}^3/\text{h}$ ) i visokim ( $59,2 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Slika 24 prikazuje smještaj mlaznica. Mlaznice niskog protoka povezane su s dijelom SFP gdje se nalaze elementi starog ohlađenog goriva. Srednji i visoki protok povezani su sa stalcima u kojima se nalazi svježe gorivo.

Sustav raspršivanja u MELCOR-u modeliran je s dva odvojena raspršivača, jednim iznad starog dijela SFP-a i drugim iznad novog SFP-a. Mlaznica za stari dio SFP-a nalazi se u CV 300 na koti 11,7 m, a njen protok je  $84,6 \text{ m}^3/\text{h}$  (to je zbroj mlaznica srednjih i velikih protoka). Mlaznica za novi dio SFP -a je također na koti 11,7 m, a njen protok je  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ . Za oba spreja, frakcije kapljica spreja koje dosegnu određeni volumen definiraju se putem ulaznih kartica. CV 100 je kontrolni volumen koji sadrži korito u koje teče sva voda koja nije isparila. Raspršivanje se kontrolira kontrolnom funkcijom koja započinje raspršivanje u određeno vrijeme nakon početka nesreće.



**Slika 24: Položaj mlaznica za raspršivanje vode po SFP**

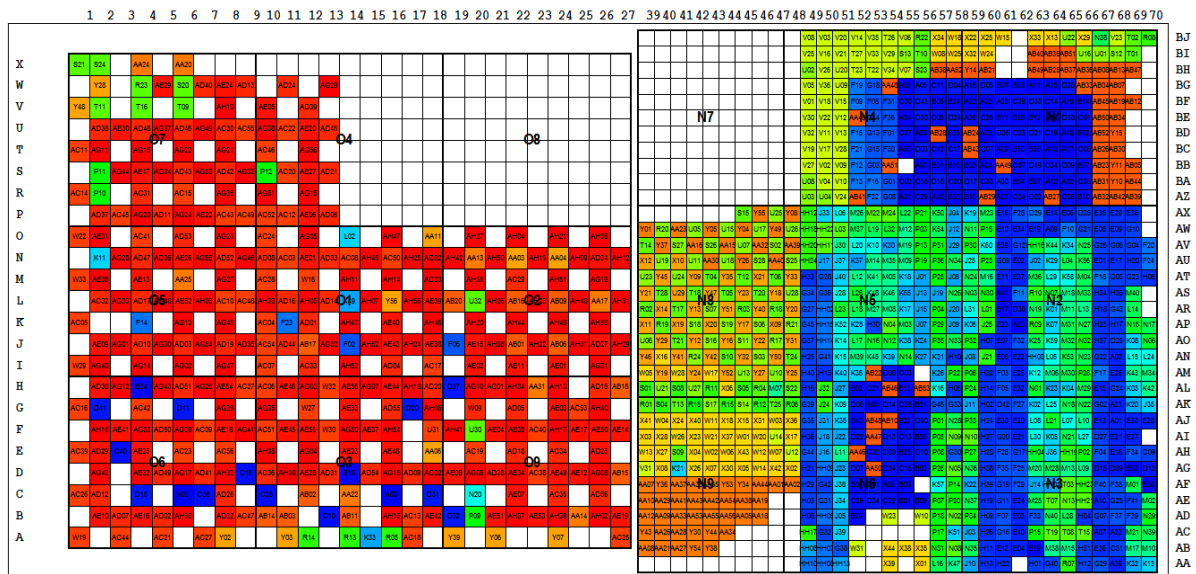
Kontrolna funkcija također se koristi za modeliranje otvaranja ploča za ispuhivanje u FHB. Zbog rada raspršivanja SFP-a očekuje se proizvodnja vodika. Stoga je dio modifikacije SFP-a bila ugradnja ploče za ispuhivanje u FHB koja bi mogla smanjiti porast tlaka u SFP-u zbog proizvodnje vodika. Otvaraju se na otprilike 1800 s i ostaju otvoreni tijekom cijele nesreće. Idealna konfiguracija ventilacije je usisavanje hladnog zraka s dna FHB-a i ispuštanje vrućeg zraka s gornje strane FHB-a. U NEK-u to je simulirano s velikim FHB vratima koja se koriste za prijenos goriva i pločama za ispuhivanje na vrhu.

Prema analizi [3], oksidacija odvajanja modelirana je kontrolnim funkcijama koje su uspoređivale akumulirana oštećenja za obloženu komponentu u svakoj COR ćeliji s 1,0. Vrijeme kolapsa goriva definirano je kao funkcija temperature obloge i primjenjuje se samo kada je debljina neoksidiranog cirkaloja manja od 0,1 mm. Kada je to zadovoljeno, model izračunava udio oštećenog goriva za svaki vremenski interval i dodaje ga prethodno izračunatoj šteti. Kada kumulativno oštećenje goriva dosegne 100%, gorivo u modelu SFP MELCOR kolabira.

### 4.3 Rezultati analize MELCOR modelom [3]

Odabrano vrijeme za proračun je u trenutku kada je gorivo, tijekom remonta punjenja goriva, prebačeno iz reaktora u SFP. Tada je najveći toplinski doprinos toga goriva. Program SFPFA korišten je za dobivanje podataka za trenutni inventar SFP-a, njegovu raspadnu toplinu i vrijeme do ključanja. Program je vrlo jednostavan za korištenje i koristi jednostavne konzervativne modele za procjenu osnovnih podataka za SFP sigurnost. Slika 25, gornja

strana pokazuje koliko je dana istrošeno gorivo bilo u SFP-u (raspon je od 9 do 12150 dana), dok donja strana slike prikazuje raspadnu toplinu istrošenog goriva. Toplina raspadanja za stare stalke za gorivom je između 98 W i 52,82 kW (ukupno 5,71 MW), a za nove stalke je između 89 W i 2,03 kW (ukupno 0,573 MW).



Slika 25: Izračuni SFPFA (vrijeme i snaga)

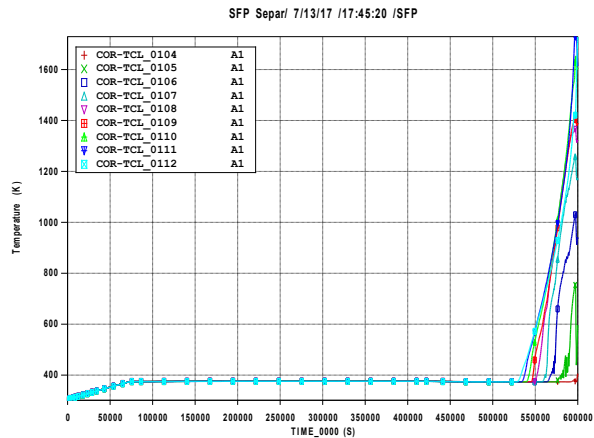
Prva analizirana prijelazna pojava je gubitak rashladne tekućine zbog pukotine površine od 1 cm<sup>2</sup> na dnu SFP-a (konzervativno jer sa te lokacije se doseže najveći protok). Ta se veličina prekida koristi u standardnim analizama SFP gubitka rashladnog sredstva. Prijelazni proces je simuliran u trajanju od 600 000 s. Slika 26 prikazuje početak zagrijavanja goriva za slučaj bez korištenja mlaznice spreja. Raspodjela temperature goriva data je za svaku

aksijalnu podjelu aktivnog goriva. Kao što je i očekivano, najviša podjela goriva počinje se zagrijavati prva kako razina rashladne tekućine pada tijekom nesreće. Slika 27 prikazuje usporedbu razine vode SFP bez i sa prskalicom. Ova slika pokazuje učinkovitost sustava raspršivanja u SFP-u tijekom nezgode s gubitkom rashladnog sredstva. Za slučaj B (s raspršivačem), razina se vode počinje smanjivati kasnije nego za slučaj bez raspršivača, stoga se integritet SFP-a duže održava.

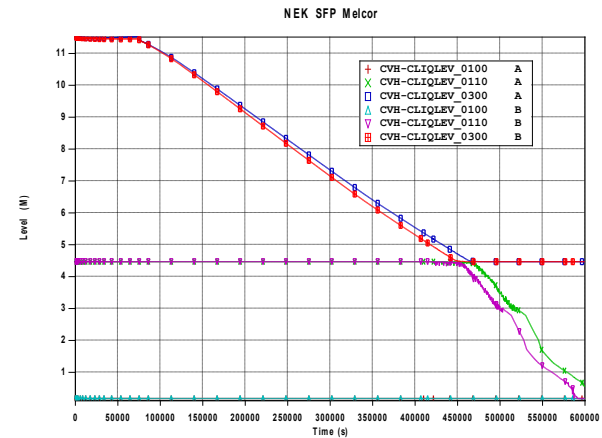
Druga analizirana prijelazna pojava je gubitak rashladne tekućine zbog pukotine od 10 cm<sup>2</sup> na dnu SFP-a. Prijelazni proces je simuliran 140 000 s. Brzina protoka loma je naravno puno veća nego u prvom slučaju zbog veće površine loma. Slika 28 prikazuje usporedbu razine vode SFP za slučaj bez i sa raspršivačem. Kao i za pukotinu površine od 1 cm<sup>2</sup>, razina vode se kasnije počinje smanjivati za slučaj sa raspršivačem. Razina vode u SFP-u se zbog raspršivanja stabilizira iznad nule, dok u slučaju bez raspršivača voda potpuno istječe iz SFP-a. Slika 29 prikazuje zagrijavanje goriva za slučaj bez spreja. Prikazuje se temperatura goriva za sve aksijalne podjele i opet se najviši elementi počnu prvi zagrijavati. Prvi maksimum temperature postiže se na otprilike 30000 s. U tom trenutku primjetan je učinak oksidacije košuljice goriva koja dovodi do pada temperature goriva. Nakon toga, temperatura goriva počinje rasti sve dok se gorivo ne otopi i talina počne premještati prema dnu SFP.

Za istu veličinu istjecanja kroz pukotinu dokazana je učinkovitost sustava prskanja mlaznica. Pokreće se kontrolnom funkcijom na 3900 s kada se gorivo počne otkrivati. Slika 30 prikazuje zagrijavanje goriva kada je sustav raspršivanja instaliran s kapljicom raspršivača promjera 0,5 mm. Kao što se i očekivalo, prvi vrhunac se postiže kasnije nego u slučaju bez prskanja spreja (približno 40000 s). Ovo pokazuje da instalirani sustav raspršivanja može produžiti početak pregrijavanja goriva i stoga dati vremena operaterima da isplaniraju akcije kako bi spriječili nastavak oštećenja goriva u SFP.

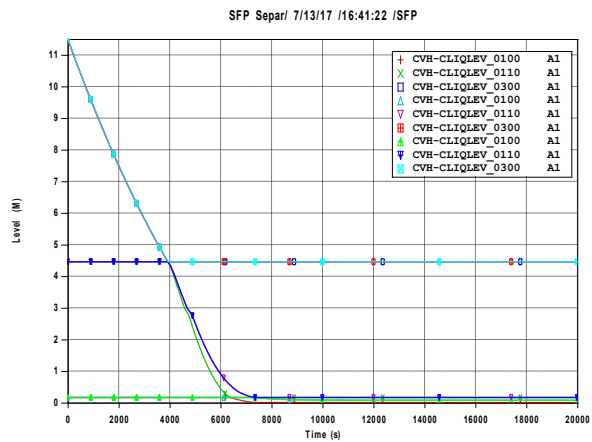
Za ovaj scenarij promatran je slučaj s kapljicom prskanja promjera 0,2 i 0,5 mm kako bi se procijenila učinkovitost hlađenja s obzirom na veličinu kapljice. Slika 31 prikazuje zagrijavanje goriva s kapljicom spreja od 0,2 mm za istu veličinu istjecanja kroz pukotinu. Zagrijavanje goriva počinje nakon otprilike 60 000 s, što je mnogo kasnije nego za kapljice promjera 0,5 mm, što pokazuje da manja kapljica može učinkovitije hladiti gorivo u SFP-u. Kao posljedica korištenja raspršivača dolazi do stvaranja vodika uslijed egzotermne oksidacije parom. Slika 32 prikazuje usporedbu distribucije vodika tijekom nesreće bez prskanja i s kapljicama prskanja promjera 0,2 i 0,5 mm. U slučaju bez spreja, stvara se najmanja količina vodika, dok veća veličina kapljica stvara više vodika. Slika 33 prikazuje raspodjelu snage za svaku vrstu prijenosa topline za slučaj bez raspršivača



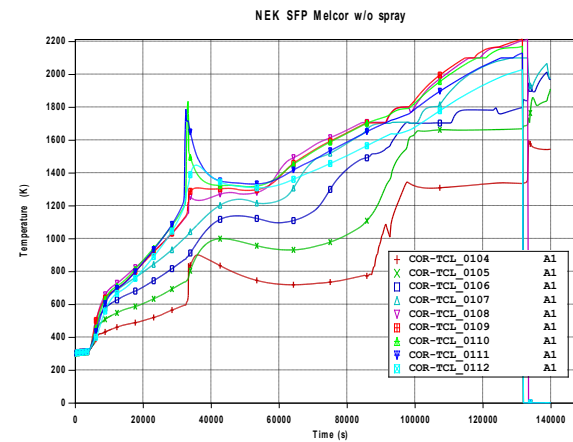
Slika 26: Zagrijavanje goriva (bez spreja, 1 cm<sup>2</sup> otvor)



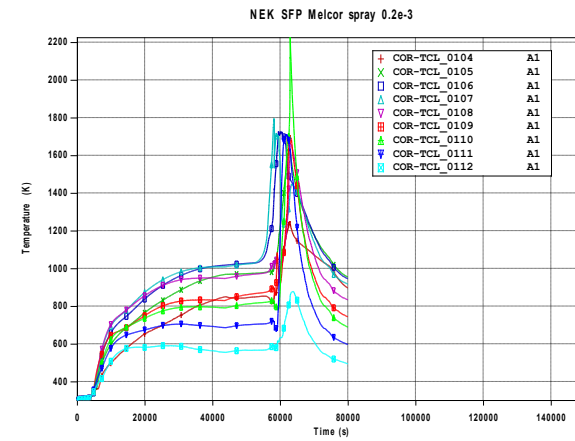
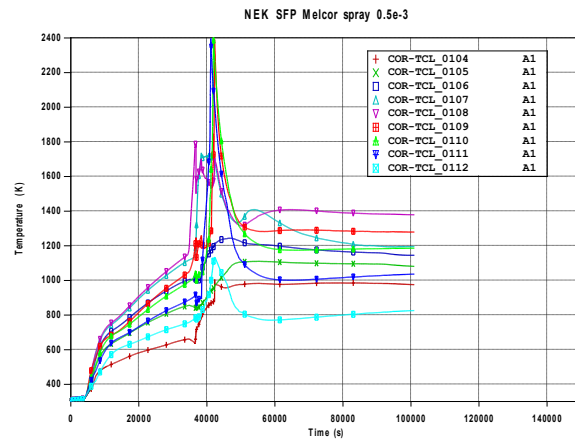
Slika 27: Usporedba SFP nivoa sa i bez spreja (1 cm<sup>2</sup> otvor)



Slika 28: Usporedba SFP nivoa sa i bez spreja (10 cm<sup>2</sup> otvor)

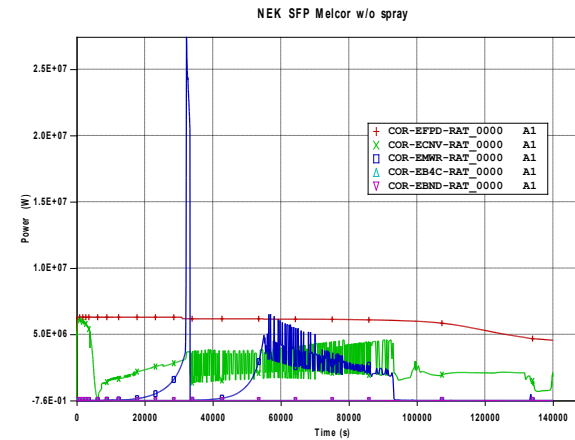
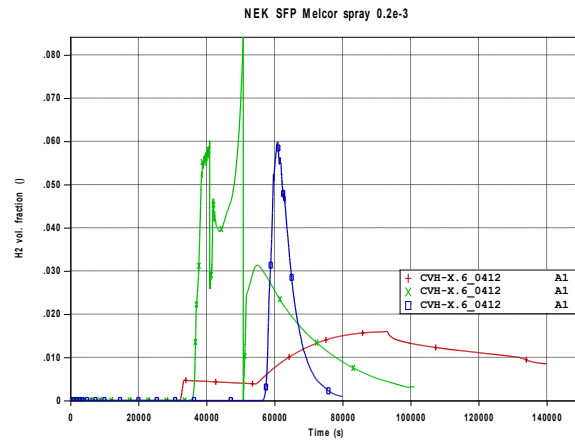


Slika 29: Zagrijavanje goriva (bez spreja, 10 cm<sup>2</sup> otvor)



Slika 30: Zagrijavanje goriva (sprej 0,5 mm kapljica, 10 cm<sup>2</sup> otvor)

Slika 31: Zagrijavanje goriva (sprej 0,2 mm kapljica, 10 cm<sup>2</sup> otvor)



Slika 32: Usporedba vodikova vol. udjela (sprej 0,2 vs 0,5 mm (10 cm<sup>2</sup> otvor))

Slika 33: Distribucija snage (bez spreja, 10 cm<sup>2</sup> otvor)

#### **4.3.1 Zaključak deterministične procjene efikasnosti alternativnog korištenja spreja u FHB**

Kao što je to zapaženo kroz PSA evaluaciju, najrizičnije nesreće za SFP su gubitak hlađenja i rashladnog sredstva. Jedna od mogućih aktivnosti koja može produljiti vrijeme bez značajnog oštećenja goriva u SFP-u u primjeru većeg istjecanja rashladnog sredstva i gubitka inventara je sustav raspršivanja. Cilj ove procjene je bio utvrditi je li učinkovitost ugrađenog sustava raspršivanja u SFP doprinosi smanjenju ukupnog rizika od nesreće u SFP. Učinkovitost sustava raspršivanja u SFP-u ovisi o nekoliko parametara, posebice o promjeru kapljica raspršivača. Izračuni su konzervativni i koriste stari pristup SFP modeliranju MELCOR-om 2.1 temeljen na prstenu.

Ovi preliminarni izračuni zadovoljavaju potrebe disertacije da pokaže da je sustav raspršivanja sposoban ograničiti povećanje temperature goriva u SFP-u, ali ovisno o vremenu aktiviranja i veličini kapljica može uzrokovati stvaranje vodika u FHB zbog čega je potrebno generiranu paru i vodik ispustiti u okoliš.

## **5. Deterministička procjena potencijalnog utjecaja oštećenja jezgre reaktora na ocjenu rizika za bazen istrošenog goriva izvan kontejnmenta (kategorija „RL2“ i/ili „RT2“)**

### **5.1 Opis problema utjecaja nezgodnih stanja reaktora na procjenu rizika SFP**

Iako su vrlo male vjerojatnosti, teške nesreće u bazenima istrošenog goriva (SFP) u nuklearnim elektranama bile su predmetom mnogih analiza rizika tijekom posljednjeg desetljeća, posebice nakon događaja u nuklearnoj elektrani Fukushima. Jedna značajka vrijedna pažnje tipičnih tlakovodnih reaktora (PWR) projektiranih sa strane Westinghousea (poput nuklearne elektrane Krško) koji su trenutno u funkciji je da se bazen za istrošeno gorivo nalazi u neposrednoj blizini zaštitne zgrade reaktora (kontejnmenta) u zgradi za rukovanje gorivom (FHB). Važan element analize rizika SFP-a je procjena mogućeg utjecaja teške nesreće na reaktoru koji se nalazi u kontejnmentu na SFP izvan kontejnmenta. Referenca [21] predstavlja vrlo dobro poznat i često korišten okvir za integraciju procjene rizika za reaktor i SFP. Prema [21], istraživanje teških nesreća na PWR SFP-u u svrhu analize rizika SFP-a treba uključiti procjenu mogućih pretpostavljenih početnih događaja (PIE) koji predstavljaju izazov hlađenju goriva SFP-a. Svi zamislivi PIE mogu se podijeliti u tri kategorije:

1. PIE svojstveni samo SFP-u, koji ne utječu izravno na sigurnost reaktora;
2. PIE svojstveni reaktoru, koji ne utječu izravno na sigurnost SFP-a; i
3. PIE s potencijalom da utječu na sigurnost reaktora i SFP-a.

Grupiranje i kategorizacija inicijatora (pretpostavljenih početnih događaja) opisane su u poglavlju 2.4 (Slika 4)

Važno je napomenuti da PIE iz navedene kategorije 1) mogu, u načelu, pokrenuti scenarij (sekvencu nezgode) koji bi utjecao na sigurnost reaktora (npr. radioaktivni ispušni iz jezgre SFP usljed oštećenja gorivnih elemenata zbog gubitka rashladnog sredstva (vod) zbog kojeg bi bila potrebna evakuacija operativnog osoblja elektrane). Rad se ne bavi ovim mogućim utjecajem SFP-a na reaktor. Također, iz vjerojatnosnih sigurnosnih procjena (PSA) za SFP koje su provedene do danas može se vidjeti da se ovaj utjecaj ne smatra značajnim doprinosom riziku, prvenstveno zbog prilično dugih vremenskih prozora povezanih s odgovorom isključivo na SFP inicijator, u nedostatku bilo kakve početne prijetnje reaktoru.

Kao što je objašnjeno u [21], općenito, ovisnost između odziva reaktora (i njegovih sigurnosnih sistema) i odziva SFP na pretpostavljene početne događaje (inicijatore nezgodnih stanja) može prvenstveno nastati zbog sljedećih situacija:



1. Istovremenih kvarova povezanih s početnim događajem (npr. gubitak napajanja električnom energijom, seizmički događaji sa inicijacijom gubitka hladioca u reaktoru i SFP-u, uvjetima koji nisu originalno pretpostavljeni projektom (*Design Extended Condition* - DEC), kako je definirano u [41]), itd.);
2. Posljedica teških nesreća reaktora (s oštećenjem/taljenjem goriva, lomom reaktorske posude, itd.) koji uzrokuju potencijalno nepovoljne uvjete na FHB/SFP strukture ili sigurnosnu opremu (ESF) opremu za hlađenje ili održavanje inventara hladioca u SFP-u.

Referenca [21] raspravlja o generičkom pristupu za PSA reaktora za unutarnje događaje i opasnosti, kao i seizmičke događaje, zajedno s procjenom SFP-a. Slika 34 prikazuje osnovni pristup kombinirane metodologije ocjene rizika. Metodologija se u osnovi sastoji od grupiranja sekvenci stabla događaja reaktora i zaštitne posude reaktora (RB) prema SFP stanjima koja bi ona proizvela, a zatim širenja sekvenci nezgode s istim "SFP stanjem" kroz reprezentativno stablo događaja za SFP. Svako SFP stablo događaja predstavlja odgovor relevantnih SFP sustava na inducirani slijed („relevantni SFP sigurnosni sustavi“ primarno se odnose na održavanje hlađenja i nadopunjavanja hladioca u bazenu). Proširene sekvence (reaktor / kontejnment (RB) + SFP) imaju krajnja stanja (posljedice) koja predstavljaju kombinirana stanja za reaktor, kontejnment (RB) i SFP. Mjerila rizika SFP-a kao što su „otkrivanje istrošenog goriva“, „oštećenje istrošenog goriva“ ili „otpuštanje radioaktivnosti iz SFP-a“ mogu se zatim izračunati kvantificiranjem ovog integriranog modela obzirom na krajnja stanja SFP-a.

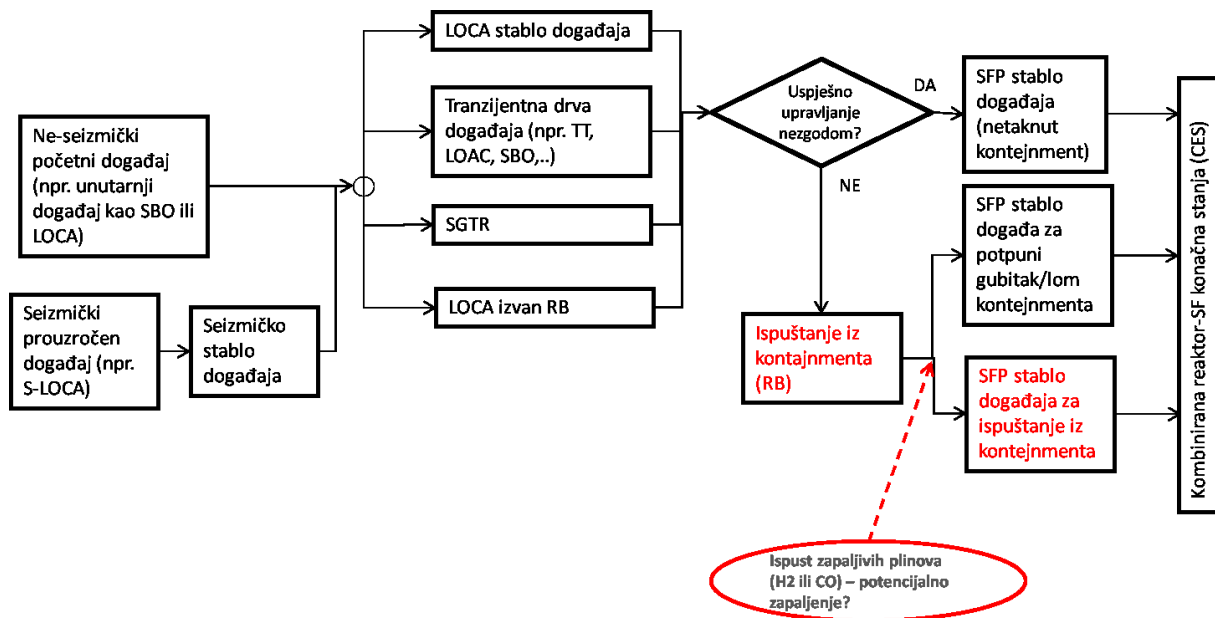
Pretpostavljeni početni događaji (PIE) ili početni događaji seizmičke opasnosti	PSA razine 1 logični model	Konačno stanje postrojenja (PDS)	PSA razina 2 logični model	Kategorije istjecanja (RC) iz RB	SFP PSA	Kombinirana konačna stanja (CES)
TT LOCA SBO MSLB ... S-LOAC S-SBO S-LOCA ...		PDS1 PDS2 ... PDSN		RC1 RC2 ... RCN		OK SFP-ES1 SFP-ES2

**Slika 34: Kombinirana vjerojatnosna ocjena sigurnosti za reaktor i SFP na početne događaje**

Slika 34 prikazuje pojednostavljenu shemu kombinirane vjerojatnosne ocjene sigurnosti za reaktor/kontejnment i SFP za određene pretpostavljene početne događaje kao što su:

- TT – Turbine Trip (zaustava turbine)

- LOCA                    Loss of Coolant Accident (izlivna nezgoda)
- SBO                     Station Black-Out (potpuni gubitak električnog napanja)
- MSLB                   Main Steam Line Break (lom glavnog parovoda)
- S-LOAC                seizmički prouzročen gubitak vanjskog AC napajanja
- S-SBO                  seizmički prouzročen SBO
- S-LOCA                seizmički prouzročena izlivna nezgoda

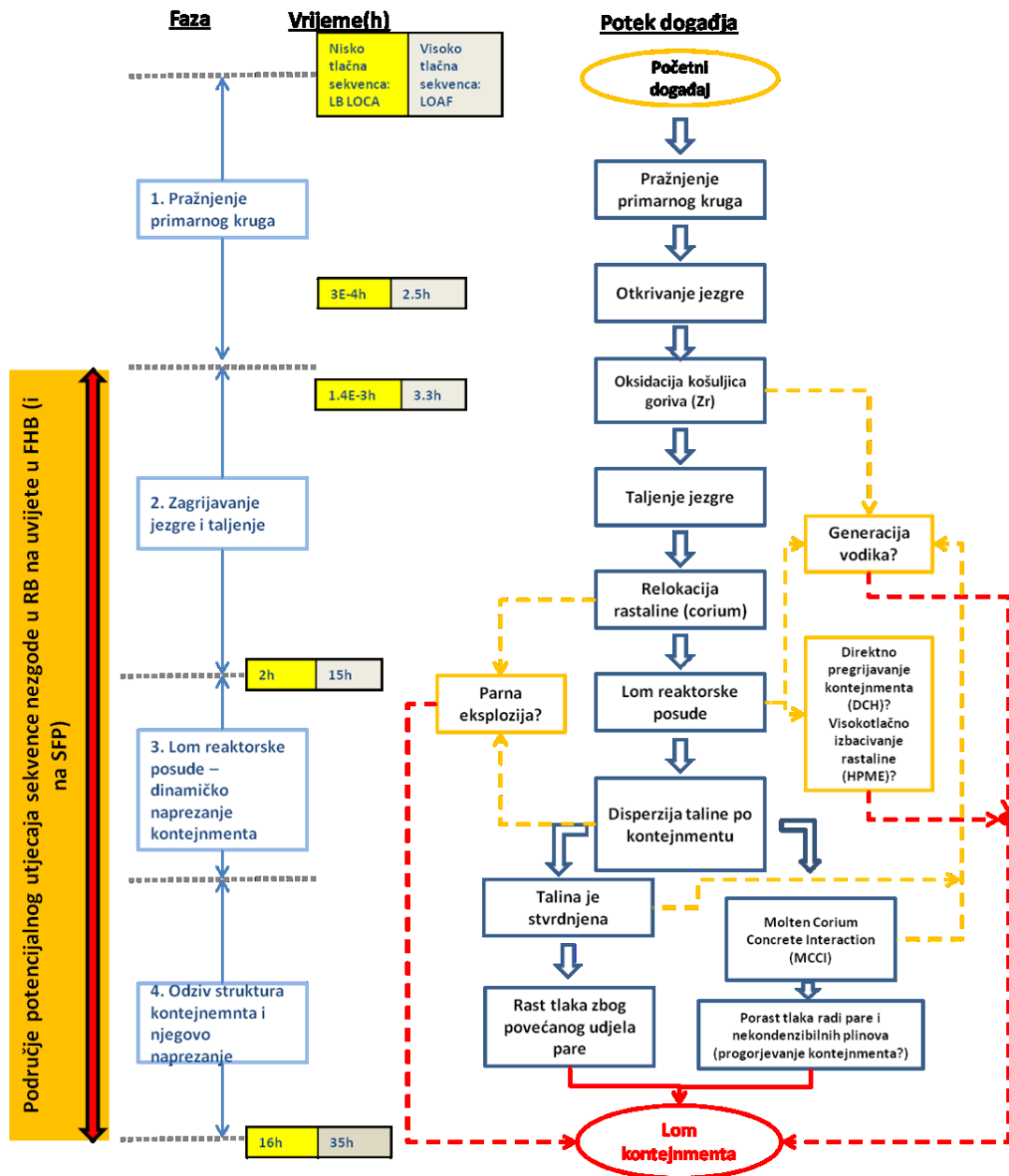


**Slika 35: Shema logičkog modela za kombinirano stablo događaja (Event Tree (ET)) (pojednostavljeno [21])**

Slika 35 prikazuje shemu logičkog modela za kombinirano stablo događaja (*Event Tree* (ET)). Na njoj se lako može prepoznati da, ako kontejnment ostane netaknut, nema potencijalnog utjecaja na SFP stabla događaja, dok za sekvence nesreća s potencijalnim energetskim kvarom/lomom kontejnmenta, nekontroliranim istjecanjem (bilo radioaktivnih ispusta ili zapaljivih plinova – kao produkta oksidacije košuljica nuklearnog goriva sa parom ili nusprodukata interakcije rastaljene jezgre s betonom kontejnmenta (MCCI) iz kontejnmenta ili potencijalnom izlivnom nezgodom izvan kontejnmenta, stabla događaja SFP treba modificirati i potrebna su dodatne analize/procjene.

Slika 36 prikazuje pojednostavljene fenomenološke pojave tijekom eskalacije pretpostavljene teške nesreće (sa otkazom hlađenja jezgre reaktora, oštećenjem goriva, lomom reaktorske posude, itd.) u određenim vremenskim okvirima. Prikazane su fenomenološke pojave koje mogu prouzročiti konačni kvar zadnje projektirane zaštitne barijere (kontejnmenta) prema okolišu (npr. parna eksplozija, rizik zapaljenja/eksplozije vodika ili

drugih zapaljivih materijala, progorjevanje betonske zaštite na dnu kontejnmenta uslijed MCCI, itd.).



**Slika 36: Shematski prikaz fenomenoloških pojava (sa vremenskim okvirom) tijekom teške nesreće, prijevod iz [46]**

Većina fenomena koji ne dovode do djelomičnog otkaza zaštite funkcije kontejnmenta ne mogu imati negativan učinak na logiku stabala događaja SFP PSA. Glavni nepovoljni uvjeti iz studija PSA razine 1 i razine 2, koji utječu na strukturu stabala SFP događaja uključuju sljedeće:

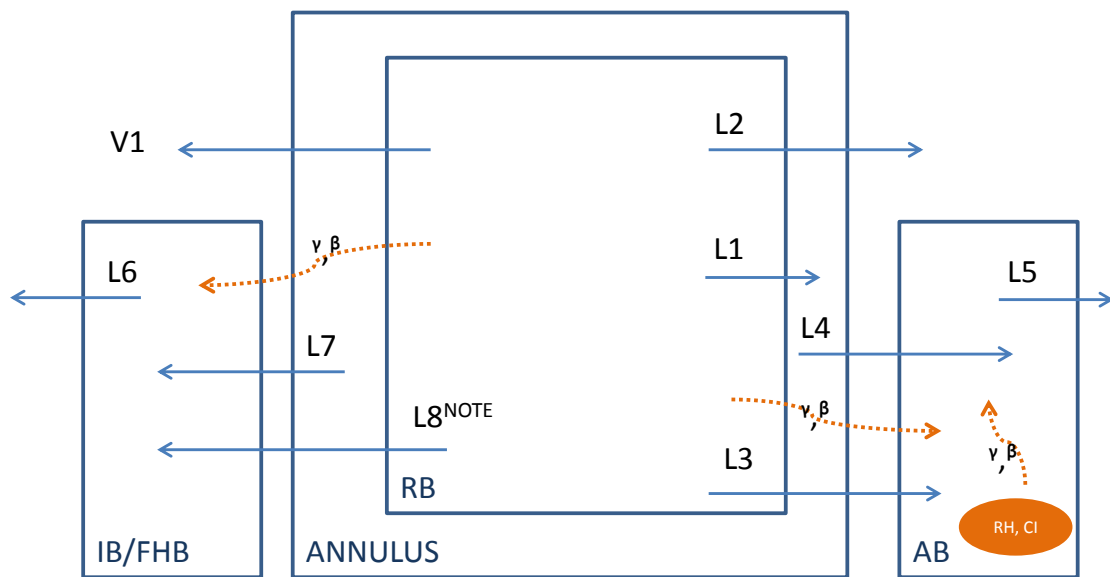
- Oslobođanje vodika koje bi moglo rezultirati deflagracijom (zapaljenjem) koja bi oštetila sigurnosne strukture ili električnu/mehaničku opremu.
- Oštećenja kontejnmenta koji uzrokuju slične učinke oštećenja opreme kao gore.
- Ispuštanje produkata fisije (radioaktivne plinove ili aerosole) koje bi onemogućilo pristup područjima potrebnim za lokalna akcije operatera.
- Kvar uništene ili onemogućene instalirane sigurnosne opreme (ESF) u određenim zahvaćenim područjima elektrane može natjerati osoblje potpornog tehničkog centra (*Technical Support Centre* - TSC) da odlučuje gdje će dati prioritet korištenju bilo koje preostale prijenosne opreme. Potreba korištenja u jednoj primjeni (npr. ublažavanju posljedica nesreće na reaktoru) može spriječiti njegovo efikasno naknadno preusmjeravanje na recimo SFP zbog lokalnih uvjeta okoliša (npr. visoka koncentracija radioaktivnih materijala ili zapaljivih produkata zbog oksidacije košuljica nuklearnog goriva odnosno MCCI).

Ova doktorska disertacija nema namjeru raspravljati o svim naznačenim sučeljima ili potpunoj integraciji reaktorskog PSA s SFP PSA. Bavi se prikazom metodologije i procjenom samo jednog aspekta opisanog problema odnosno mogućeg širenje zapaljivih plinova koji nastaju tijekom reaktorske nesreće (vodika ( $H_2$ ), odnosno zapaljivog ugljičnog dioksida (CO) kao produkta MCCI) iz kontejnmenta. Fokus je na procjeni mogućeg istjecanja spomenutih zapaljivih plinova u prstenasti prostor (*annulus*) između čelične ovojnice kontejnmenta i zaštitne betonske zgrade, odnosno FHB-a (gdje pasivni autkatalitički rekombinatori (PARs) nisu ugrađeni za razliku od kontejnmenta) i njihovu moguću naknadnu deflagraciju (zapaljenje) i utjecaj na SFP (Slika 35 označava „crvenim“ područje istraživanja ovog rada).

## 5.2 Pretpostavka veličine istjecanja iz kontejnmenta tijekom sekvenci teških nesreća

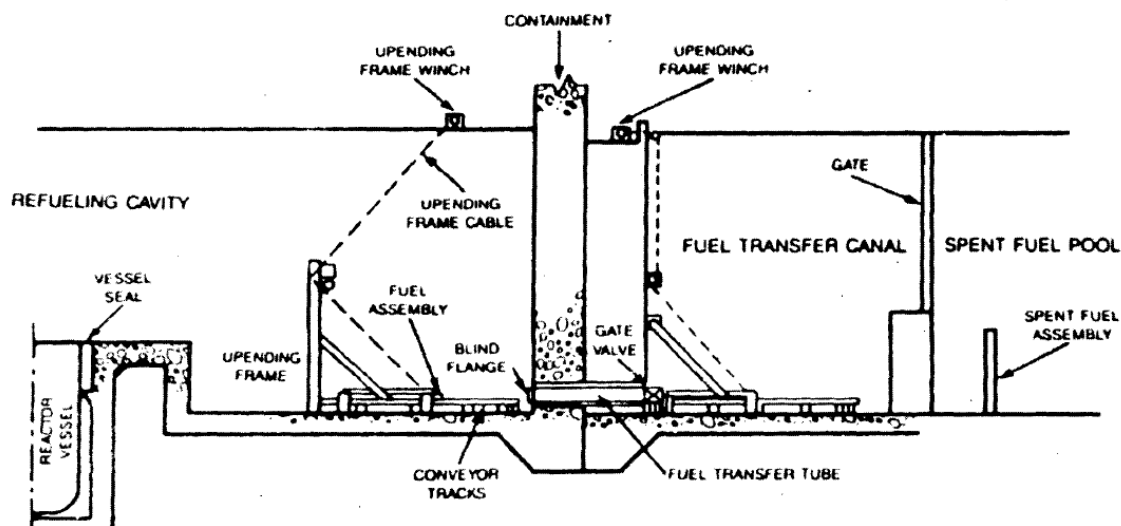
Slika 37 predstavlja tipičnu analitičku shemu za različite puteve istjecanja (označenih sa LN) iz kontejnmenta (gdje je kratice predstavljaju: RB čelični kontejner u kojem je smješten reaktor sa pripadajućim komponentama; AB pomoćnu zgradu (gdje se nalazi glavina sigurnosnih sustava); IB je međuzgrada; FHB je zgrada za rukovanje gorivom a cilindrični prostor između RB-a i armirano betonske zaštitne ovojnice je *annulus*). Potencijalno istjecanje V1 odnosi se na kontrolirani isput kroz pasivni sustav za filtrirano rasterećenje kontejnmenta u primjeru oštećenja reaktora (PCFV). Analize radioloških posljedica koje se rade za postrojenje (sadržanih u izvješću o sigurnosnoj analizi (USAR)) obično uzimaju u

obzir projektom ograničeno ukupno istjecanje iz kontejnmenta koje odgovara npr. 0,2% volumena zraka kontejnmenta tijekom perioda od 24 sata, na projektom tlaku kontejnmenta ( $P_a = 0,415 \text{ MPa}$ , kao što je npr u NEKu u LCO 3.6.1.1 [25], slično generičkim zahtjevima iz NUREG-0452 [26]). Iz te slike može se razumno zaključiti da definicija distribucije istjecanja u različite susjedne zgrade, sobe i prostore može unijeti prilično velike nesigurnosti u procjene/analiza utjecaja. Iz tog razloga, radi pojednostavljenja procjene i njene praktične uporabe, pretpostavit će se da se ukupno projektirano propuštanje uvijek primjenjuje samo na jedan mogući put. S druge strane, takav je pristup konzervativan te stvara probleme jer pretpostavka da se vodik (ili CO) ili radioaktivni materijali ispuštaju samo na određeno područje daje njihove nerealne količine u razmatranom području. Druga metoda je da se pretpostavi istjecanje iz kontejnmenta relativno raspoređeno ovisno o omjeru između ukupne i izravne kontaktne površine pojedinog posmatranog prostora, što može dovesti do podcijenjenih vrijednosti pojedinih ispusta te nije korišteno u ovoj procjeni.



**Slika 37: Shema istjecanja za tipični čelični Westinghouseov Large Dry Containment, [33]**

Istjecajni put L8 na prikazanoj shemi može predstavljati cijev za prijenos goriva (*Fuel Transfer Tube* - FTT), koja se koristi tijekom remonta elektrane za izravnu vezu između FHB (kanala za prijenos goriva - TC) i reaktora prostora za zamjenu goriva u rektoru. Slika 38 prikazuje FTT izoliran tijekom normalnog rada slijepom prirubnicom i ventilom.



Slika 38: Ilustracija cijevi za prijenos goriva (Fuel Transfer Tube (FTT)) [28]

### 5.3 MAAP5.03 model

Model NE Krško MAAP 5.03 [34] sa specifičnim primarnim i sekundarnim sustavima kao i geometrijom kontejnmenta razvijen je korištenjem prethodno razvijenog modela MAAP 4.03 [43] koji je korišten kao osnova za razvoj Krško punog simulatora (KFSS). Priprema za MAAP datoteku parametara NE Krško inicijalno je obavljena tijekom originalnog ispitivanja pojedinačnog postrojenja Krško – PSA razine 2 [35].

Nova datoteka parametara i pripadajući izvještaj NE Krško MAAP 5.03 [34] razvijena je prema [36] uzimajući u obzir MAAP5 *Application Guidance* [37], kao i iskustvo NE Krško iz postojećih datoteka parametara MAAP 3.0B/4.05/4.07. Dodatna uputstva za analize MAAP oruđem, [38] i [39] su korišteni u pripremi specifičnog modela za NE Krško. Izvršena je preliminarna provjera performansi modela na temelju usporedbe s rezultatima ranijih proračuna MAAP4 i računalnog oruđa MELCOR [44] za odabrane sekvence.

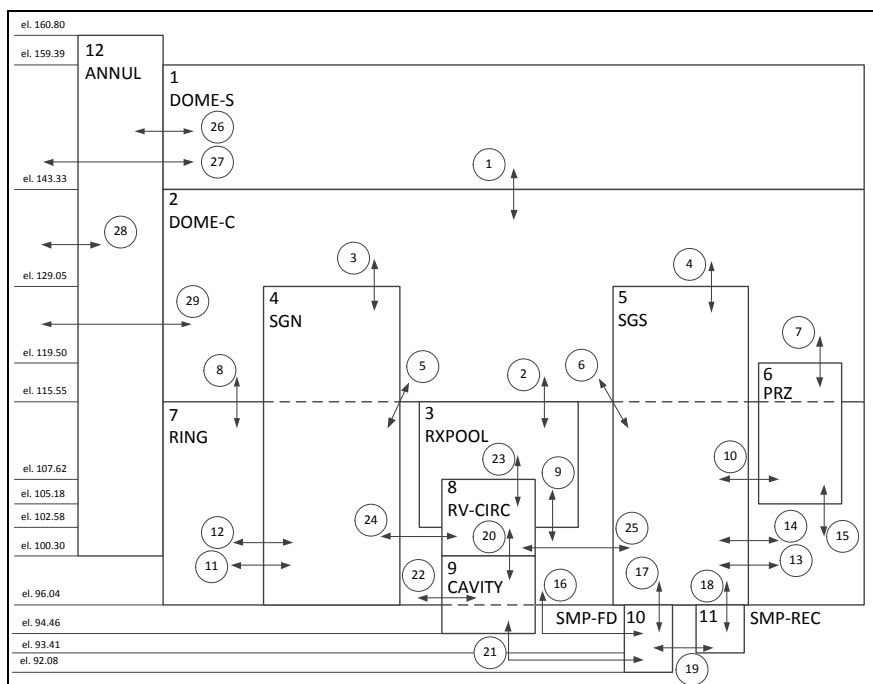
Najsuvremeniji model NE Krško za MAAP5.03, koji se koristi za analize u okviru ovdje predstavljene studije, uključuje sve relevantne sigurnosne sustave specifične za elektranu, kao što su hlađenje jezgre u slučaju nužde, sigurnosni rasteretni ventili, sprejevi ograničavanje tlaka u kontejnmentu (CS) i rashladne jedinice za odvođenje topline iz atmosfere kontejnmenta (RCFC). Dodatno, model ima mogućnost procijeniti izvedbu DEC sustava eksplicitno modeliranih (npr. PARs (pasivni autokatalitički uređaji koji omogućavaju rekombinaciju zapaljivog vodika (CO) s kisikom iz okoline) i PCFVs (pasivni sistem za filtrirano rasterećenje kontejnmenta u primjeru oštećenja reaktora)) ili implicitno modeliranih (radnjama korisnika oruđa) DEC sustava (npr. alternativna pomoćna pojna voda (AAF),

alternativni sistem sigurnosnog ubrizgavanja u jezgru u nuždi (ASI) i alternativno odvođenje zaostale topline (ARH)) nakon 1. i 2. faze Programa nadogradnje sigurnosti (SUP) NE Krško poslije Fukushima. Vrijednosti prorade svakog sustava i radni parametri za te sustave i njihove komponente prilagođavaju se u skladu s projektnim zahtjevima i sve je dokumentirano u NE Krško MAAP5.03 tehničkom izvještaju [34].

Slika 39 prikazuje shemu NE Krško MAAP5.03 nodalizacije. Primarni krug nije predmet ove ocjene, mada je bitan za fenomenološke pojave u jezgri i samom kontejnmentu. Nodalizacija reaktorske zgrade (RB) i anulusa predstavljena je sljedećim glavnim kontrolnim volumenima (označenim brojevima te konekcijama (*junctions*) između volumena koje su označene brojkom u krugu, npr.: 27 predstavlja ispušt iz DOME-S direktno u okoliš):

1. DOME-S           sferni dio kupole kontejnmenta
2. DOME-C           cilindrični dio kontejnmenta
3. RXPOOL           prostor namjenjen rukovanjem goriva pri punjenju i pražnjenju reaktora
4. SGN               sjeverni prostor generatora pare (SG)
5. SGS               južni prostor generatora pare (SG)
6. PRZ               prostor tlačnika
7. RING              prostor oko odjeljaka reaktorske posude (RV), generatora pare (SG) i tlačnika (PRZ) od el.96.4 do el.115.55
8. RV-CIRC           prostor oko posude reaktora – dio šupljine
9. CAVITY           prostor (šupljina) pod reaktorom
10. SMP-FD           podni odvodni otvor
11. SMP-REC          recirkulacijski kolektor vode (sump)
12. ANNUL           cilindrični prostor između čelične stijenke kontejnmenta i armirano betonske zaštitne zgrade

Dodatni kontrolni volumen s velikim volumenom i fiksnom temperaturom (30°C) koristi se za predstavljanje okoline van zaštitne zgrade reaktora. Ovaj je volumen neophodan MAAP-u za točan izračun gubitaka topline iz zatvorene zgrade. Koeficijent prijenosa topline s vanjske stijenke zatvorenog prostora na okoliš izračunava se unutar MAAP5.03 računalnog programa.



**Slika 39: Krško NPP MAAP 5.03 Model**

Unutarnji betonski zidovi i podovi, polarna dizalica, rashladni ventilatorski sustav kontejnmenta (RCFC), platforme, kanal za opskrbu gorivom, ugradnje i druge razne strukture od nehrđajućeg i ugljičnog čelika modelirane su kao toplinske strukture. Djeluju kao odvodi topline i izmjenjuju toplinu s vodom, parom i plinovima unutar kontejnmenta konvektivnim prijenosom topline gdje se koeficijenti prijenosa topline interno izračunavaju MAAP5.03.

Kondenzacija pare na stijenrama i prijenos topline zračenjem između stijenki i plinova također se razmatraju. Vanjski betonski zid kontejnmenta i čelična košuljica također su modelirani i, kao što je već spomenuto, važni su za proračun gubitaka topline iz kontejnmenta u okoliš ali i za skupljanje potencijalnog istjecanja iz kontejnmenta. Čelična ovojnica je struktura smještena između donjeg odjeljka i kupolastog odjeljka za zadržavanje s jedne strane i prstenastog odjeljka s druge strane. Armirano betonska konstrukcija predstavlja granicu između anulusa kontejnmenta i vanjske atmosfere.

Pasivni autokatalitički rekombinatori vodika (CO) s kisikom (PAR) u RB modelirani su korištenjem zadanih korelacija u svakom kodu. Dvadeset i dvije PAR jedinice postavljene su u kontejnmentu. Postoji 14 PAR jedinica u gornjem plenumu kontejnmenta, šest PAR jedinica u donjem volumenu kontejnmenta, jedna PAR jedinica u odjeljku NSG i jedna jedinica u odjeljku SSG volumenu. Jedinice PAR-a nisu bile instalirane niti u *annulusu* kontejnmenta niti u FHB-u.



PCFV sustav je modeliran kao jednostavna cijev između gornjeg plenuma kontejnmenta i okoline. Spoj koji povezuje kontejnment i cijev sadrži disk za pucanje koji se lomi kada tlak uzvodno, na strani kontejnmenta, dosegne 0,6 MPa. Drugi spoj, koji povezuje cijev s okolinom, sadrži ventil za smanjenje tlaka koji je modeliran uzimajući u obzir njegovu karakteristiku „histereze“; odnosno regulacije protoka između potpunog otvaranja i potpunog zatvaranja pri zadanim nastavljenim vrijednostima otvaranja i zatvaranja od 0,49 MPa odnosno 0,41 MPa. Dakle, PCFV sustav nije eksplicitno modeliran i rad aerosolnih i jodnih filtara koji se nalaze u tom sustavu se ne razmatra, što je ionako irelevantno za ovu specifičnu procjenu. U obzir je uzeta samo funkcija sustava u kontroli tlaka i temperature u kontejnmentu oslobađanjem prekomjernog inventara (smjese plinova zraka (koji inicijalno sipunjava cijeli volumen) te pare, vodika, CO i CO<sub>2</sub> kao produkata fizikalno-kemijskih procesa tijekom nesreće) iz kontejnmenta.

Ulazna datoteka parametara NE Krško MAAP 5.03 pregledana je, verificirana i validirana od strane ovlaštene institucije i dokumentirana u [44]. Model je verificiran simulacijom stabilnog stanja, loma hladnog kraka primarnog cjevovoda (veličine promjera 3 in odnosno 0,0762 m) (LOCA) u petlji 1 usporedbom s analizom BE programskog oruđa RELAP5/mod 3.3 Također je simulirana nesreća za SBO sekvencu bez ublažavanja posljedica (nema prorade sigurnosnih sustava niti operatorskih akcija) te uspoređena sa rezultatima iste sekvence s oruđima MELCOR 1.8.6 i ASTEC. Treba napomenuti da za SBO analizu, dolje u tekstu, radnje operatera i aktiviranje drugih tehničkih sigurnosnih sustava (ESF), npr. sustav hlađenja jezgre u nuždi (ECCS) nije pretpostavljen. Razmotrena je samo uporaba PAR-ova i PCFV-ova.

#### **5.4 Proizvodnja vodika tijekom pretpostavljenih teških nesreća i akumulacija u kontejnmentu**

U originalnim PSA studijama razine 2 NE Krško (NEK) (1995.), proizvodnja vodika oksidacijom cirkonija košuljice goriva i njegova distribucija u kontejnmentu razmatrani su i ocijenjeni u [29]. Za odabrane vjerojatnosne scenarije nesreća (npr. potpunog gubitka napajanja (SBO), velike izlivne nezgode (L-LOCA) i male izlivne nezgode (S-LOCA) izvršene su determinističke analize s integralnim termo-hidrauličnim računarskim programom za teške nesreće MAAP 3.0B. Neke od navedenih analiza su detaljno razrađene u [45] gdje je opisano računarsko oruđe MAAP te osnovne konstitutivne jednadžbe u poglavljima 3.1 odnosno 3.2. Te su analize kasnije ponovljene nadograđenim modelom NEK-a za noviju verziju MAAP 4.0.5, a u svjetlu preporuka međunarodne misije. Rezultati su razmatrani u

[24]. Raspodjela vodika u kontejnmentu za promatrane scenarije dodatno je procijenjena pomoću GOTHIC 3D programa i dokumentirana u [14]. Zaključak je bio da je vodik ravnomjerno raspoređen oko kontejnmenta i da nema volumnog udjela koji bi dosegao granicu zapaljivosti unutar 24 sata.

NE Krško je izvornu studiju [29] ažurirala novom [30]. Nova studija potkrijepljena je novijim istraživačkim informacijama (tzv. *full scale* testovima) o proizvodnji/ponašanju vodika u kontejnmentu, nadograđenim modelom postrojenja i poboljšanom verzijom koda (MAAP5.0.3). Tablica 18 prikazuje rezultate u nastavku. Iz uspoređenih rezultata može se zaključiti da je analiza novom verzijom programa MAAP rezultirala povećanom količinom vodika ispuštenog iz jezgre/primarnog kruga u kontejnment. Dodatne analize NE Krško (bilo MELCOR 1.8.6 ili/i MAAP 4.0.7 ) koje su analizirale efikasnost pretpostavljene ugradnje i korištenja pasivnih autokatalitičkih rekombinatora (PAR) i pasivnog filtarskog sustava za odzračivanje kontejnmenta (PCFV) pokazuju da PAR rekombiniraju vodik sve dok se ne potroši sav kisik u kontejnmentu (tzv. *starvation strategy* koja je generičko provjerena i analizirana u brojnim radovima). Najveća dopuštena ekvivalentna masa vodika (uzimajući u obzir vodik proizveden u reaktorskoj posudi i izvan nje (nakon loma i izljevanja rastaljene jezgre u kontejnment), kao i ugljični monoksid (CO) proizveden interakcijom rastaljene jezgre sa betonom (MCCI), koja može izgorjeti deflagracijom bez prekoračenja 0.6 MPa (5% vjerojatnost strukturalnog otkaza kontejnmenta, kako se koristi u SAMG-ovima) je ~408 kg ekvivalentne mase vodika u skladu sa sekcijom 20 [32].

Deflagracija je proces izgaranja u kojem se fronta izgaranja (plamen) kreće podzvučnom brzinom u odnosu na neizgoreni plin. U tom slučaju tlak može naglo porasti s vremenom, ali je jednolično raspoređen kroz volumen.

Detonacija je proces izgaranja u kojem se fronta plamena širi zvučnom ili nadzvučnom brzinom. U tom će slučaju dodatno doći do jake prostorne varijacije tlaka zbog proizvodnje udarnih valova. Opterećenja na konstrukcije smatraju se impulsnim opterećenjima budući da je tlačno opterećenje u razdoblju od mikrosekundi.

Stoga je definiran kriterij za odabir broja neophodnih PAR jedinica kako bi se osiguralo da PAR-ovi smanjuju sadržaj kisika odnosno da je svako izgaranje gorivnih plinova jednostavno ograničeno kisikom, bez obzira na masu proizvedenog vodika ili CO. Jednom kada se potroši sav kisik u kontejnmentu, količina vodika (i eksplozivnog ugljičnog monoksida (CO) u kontejnmentu potencijalno se može nastaviti povećavati zbog MCCI-ja u nedostatku učinkovite rekombinacije ako osoblje TSC-a ne poduzme ublažavajuće mjere s poplavlivanjem donjeg plenuma kontejnmenta (ispod reaktorske posude – kontrolni volumen

9, Slika 39). Ovdje je važno napomenuti da, ako je deflagracija zapaljivih plinova u kontejnmentu onemogućena prisutnošću pare (ili drugih inertnih plinova – inertna atmosfera) ili radom PAR-ova, oni mogu migrirati prihvaćenim projektiranim istjecanjem (kao što je objašnjeno u poglavlju 5.2) u međuprostor (*annulus* – kontrolni volumen 12) ili izravno u FHB putem degradiranog FTT (L8, Slika 37) i proizvesti zapaljivu smjesu.

Na temelju analiza proizvodnje i distribucije vodika [30], sljedeći se zaključci mogu smatrati razumnim:

1. Za slučaj velike izlivne nezgode (LB-LOCA):
  - a. Uspješno odvođenje ostatne topline iz kontejnmenta (pomoću RCFC-a) osigurava kondenzaciju i prisutnost vode u prostoru ispod reaktorate time sprječava MCCI. Ovisno o dostupnosti niskotlačnog (LP) akumulatorskog ubrizgavanja, količina vodika proizvedenog u jezgri može varirati između 190 i 130 kg.
  - b. Bez odvođenja ostatne topline iz kontejnmenta (sustav RCFC neoperabilan), tlak kontejnmenta bi se povećao do točke otvaranja PCFV sustava. Kako tijekom nezgode napreduje, PCFV se opetovano otvara i zatvara, ovisno o tlaku kontejnmenta. To dovodi do ispuštanja svih plinova, tako da jednostavno nema uvjeta za izgaranje vodika/CO. Nakon što je voda isparila iz reaktorske šupljine međudjelovanje rastaljene jezgre (*corium*) s betonom (MCCI) počinje ponovno proizvoditi vodik i zapaljivi CO. (U slučaju jedne od PSA sekvenci (HLLOCA3\_A), više od 330 kg vodika proizvede se u kontejnmentu prije završetka izračuna). Međutim, u kontejnmentu nema kisika koji bi poticao gorenje (deflagraciju), a također je i volumenski udio pare vrlo visok odnosno atmosfera inertna.
2. U slučaju scenarija potpunog nestanka napajanja električnom energijom (SBO) (pretpostavljajući da odvođenje ostatne topline iz kontejnmenta nije dostupno):
  - a. Proizvodnja vodika u jezgri varira ovisno o pretpostavljenom istjecanju brtve crpke reaktorske rashladne tekućine (RCP) (21, 182 ili 480 gpm/RCP + 120 gpm istjecanje iz rasterećenog ventila sustava kontrole volumena kemikalija (CVCS) između 285 i 260 kg.
  - b. Bez odvođenja topline iz kontejnmenta (od strane RCFC-a), tlak u kontejnmentu povećava se do setpointa otvaranja PCFV-a. Kako tijekom nezgode napreduje, PCFV se opetovano otvara i zatvara, ovisno o tlaku kontejnmenta. Nakon što voda ispari iz šupljine reaktora, MCCI je počeo kao u slučaju L-LOCA gore. Proizvodnja vodika iz MCCI varira između 650 i 680 kg.

- c. Postoje potencijalni uvjeti deflagracije uzimajući u obzir samo vodik i zapaljivi volumni udio CO (vremenski prozor varira, zbog različitih istjecanja i drugih pretpostavki, između 4,7 h i 21 h), ALI volumni udio inertnih plinova (para + CO<sub>2</sub>) vrlo je visok i prekoračuje 55%. Također, volumni udio kisika je nizak (djelomično zbog PCFV rada, a djelomično zbog PAR rekombinacije vodika i kisika) i kriterij deflagracije nije zadovoljen.
3. U slučaju scenarija male izlivne nezgode (SB-LOCA):
- a. Količine proizvodnje vodika u pregrijanoj jezgri slične su SBO scenariju (manje od 245 kg). Ovo je bilo očekivano uzimajući u obzir da se HSBO scenarij u biti razvija u male ili srednje LOCA scenarije (ovisno o pretpostavljenom istjecanju iz RCS tijekom tranzijenta (RCP brtve i/ili CVCS ispuštanje preko rasteretnog ventila).
- b. Bez uspostavljenog odvođenja ostatne topline iz kontejnmenta (od strane RCFC-a u scenariju PSA sekvence HSLOCA2\_A) kontejnmentski tlak bi se povećao do točke otvaranja PCFV-a. Kako tijekom nezgode napreduje, PCFV se opetovano otvara i zatvara, ovisno o tlaku kontejnmenta. Nakon što je voda isparila iz šupljine reaktora, MCCI započinje. Proizvodnja vodika iz MCCI procijenjena je na oko 650 kg.
- c. Postoje potencijalni zapaljivi uvjeti uzimajući u obzir samo volumni udio vodika i zapaljivog CO (vremenski prozor varira, zbog različitih istjecanja i drugih pretpostavki, između 41 h i 10,3 h), ALI volumni udio inertnih plinova (para + CO<sub>2</sub>) vrlo je visok i prekoračuje 55%. Također, volumni udio kisika je nizak (djelomično zbog PCFV rada, a djelomično zbog PAR rekombinacije vodika i kisika) i kriterij deflagracije nije zadovoljen.

**Tablica 18: Usporedba proizvedenog vodika oksidacijom košuljica goriva samo u reaktoru za SBO, LB-LOCA i SB-LOCA**

<i>Transient ID</i>	<i>Rezultati analize – proizvedeni vodik u reaktorskoj posudi (kg)</i>	
	<i>MAAP5.03</i>	<i>MAAP3.0B</i>
HLLOCA1	130-190	220
HSBO1	260-285	200-250
HSLOCA1	245	240-320

U nastavku ovog poglavlja procjenjuju se uvjeti u *annulusu* za različite SBO scenarije pojednostavljenom metodom (poglavlje 5.4.1) i proračunom MAAP5.03 (5.4.2) za procjenu potencijalnih učinaka u prstenu ili na FHB u kojem se nalazi SFP. Uvjeti FHB procijenjeni su samo pojednostavljenom metodom, kako je opisano u poglavlju 5.4.1 jer je volumen FHB 2,3 puta veći od *annulusa* te bi ta razlika zahtijevala mnogo više ispusta zapaljivih plinova iz kontejnmenta da bi se dosegle granice deflagracije.

#### **5.4.1 Pojednostavljena procjena volumnog udjela vodika u annulusu zatvorenog prostora i/ili zgradi za rukovanje gorivom (FHB)**

Kako bi se pojednostavila rasprava o utjecaju pretpostavljenog scenarija i vremenskom rasporedu ispuštanja vodika iz reaktorske posude u kontejnment, za ilustraciju metodologije opisane u nastavku, pretpostavit će se da je 100% cirkonija (Zr) iz košuljice goriva (11860 kg) oksidirano proizvodeći 525 kg vodika u vremenskom okviru od 24 sata i dodatnu masu od približno 1000 kg ekvivalentnog vodika proizvodi MCCI (uzimajući u obzir proizvodnju ugljičnog monoksida). Vodik i ugljični monoksid (CO) kao smjesa imaju slične granice zapaljivosti kao plinovi koji se razmatraju zasebno, kada se izraze kao volumni udio. Osim toga, vodik i CO imaju slične molarne topline izgaranja. Dakle, na molarnoj osnovi, CO i vodik se mogu smatrati „ekvivalentima“).

##### Osnovne pretpostavke:

- Konzervativno je pretpostavljeno da je masa vodika u unutarnjim prostorima kontejnmenta maksimalna. Rad pasivnih katalitičkih rekombinatora vodika (PARs) nije razmatran u ovoj pojednostavljenoj metodi.
- Procjena se primjenjuje u rasponu tlakova u zatvorenom prostoru ispod zadane vrijednosti sustava pasivnog filtera (PCFV). (Pasivno aktiviranje sustava dogodit će se nakon što tlak zadržavanja prijeđe tlak pucanja diska od 5 bara razlike).
- Zbog nemogućnosti predviđanja točnih mjesta istjecanja iz kontejnmenta, za izračun se pretpostavlja potpuni slobodni volumen *annulusa* kontejnmenta (prostoru između unutarnjeg čeličnog kontejnmenta i vanjske betonske ovojnice) ili FHB. Istodobno se pretpostavlja da su volumne frakcije pojedinih plinova u prostoru *annulusu* savršeno izmiješane. Isto vrijedi i za prostor FHB.
- Konzervativno se pretpostavlja da iz atmosfere kontejnmenta u *annulus* ili FHB istječe samo vodik (ili CO ekvivalentna masa vodika kao produkt MCCI). U stvarnosti bi

mješavina pare, zraka, vodika i radioaktivnih tvari (plinova i aerosola) istjecala iz kontejnmenta u susjedne zgrade i područja kao što je prikazano (Slika 37).

- Pretpostavlja se maksimalno projektirano istjecanje iz kontejnmenta (0,2% volumena po danu).
- Istjecanja iz prstenastog prostora (*annulusa*) u susjedne zgrade i okolnu atmosferu nisu uzeta u obzir. Uvijek se pretpostavlja da ukupna količina istjecanja dolazi u samo jedno područje/volumen.

Ulazni podaci u procjenu:

- Slobodni volumen *annulusa* kontejnmenta je 11220 m<sup>3</sup>.
- Zgrada za rukovanje gorivom (FHB) slobodni volumen je 26220 m<sup>3</sup>.
- Projektirano istjecanje iz kontejnmenta iznosi 0,2% težine zraka u kontejnmentu po 24 sata, pri Pa = 0.4 MPa ([25], LCO 3.6.1.2).
- Inicijalni tlak u *annulusu* i FHB je atmosferski = 101325Pa.
- Početna temperatura u *annulusu* i FHB = 313K.
- Masa vodika u kontejnmentu može se temeljiti na izračunu MAAP-a ili konzervativno pretpostaviti kao što je objašnjeno u uvodu u ovo poglavlje gore.

Izračun:

Potrebno je odrediti volumni udio vodika u anulusu (Slika 37, kontrolni volumen #12 ANNUL), x<sub>H<sub>2</sub></sub>.

a) Volumna frakcija vodika određuje se preko jednadžbe (1):

$$x_{H_2} = 1 - \frac{p_0}{p} \tag{1}$$

gdje su:

p<sub>0</sub>            početni parcijalni tlak zrak u anulusu;  
p                tlak smjese plinova (zrak / vodik) u anulusus.

b) Tlak od smjese plinova u anulusu određuje se na osnovi jednadžbe (2):

$$P = \frac{R \cdot T}{V} \left( \frac{M_{air}}{\mu_{air}} + \frac{M_{H_2}}{\mu_{H_2}} \right) \tag{2}$$

gdje su:

M<sub>air</sub>            početna masa zraka u anulusu;  
μ<sub>air</sub>            molarna masa zraka (29);  
M<sub>H<sub>2</sub></sub>          masa vodika ispuštena iz kontejnmenta u anulus;  
μ<sub>H<sub>2</sub></sub>          molarna masa vodika (2);  
V                slobodni volume anulusa (ili FHBu drugom slučaju);  
R                predstavlja plinsku konstantu (8314 kJ/mol-K).

c) Početna masa zraka u anulusu određuje se prema jednadžbi (3):

$$M_{air} = \frac{P_0 \cdot V}{R \cdot T} \cdot \mu_{air} \tag{3}$$

### Rezultati pojednostavljene procjene:

Rezultati pojednostavljenih procjena uzimajući u obzir maksimalni volumni udio vodika bez MCCI (525 kg) i s MCCI (1500 kg) (Tablica 19). Utvrđeni maksimalni volumni udjeli vodika u *annulusu* i FHB za različite početne uvjete ne dosežu granicu deflagracije (zapaljivosti) od 4% u promatranom volumenu.

Ista se metoda koristi za određivanje pri kojim istjecanjima volumni udio vodika može doseći granicu zapaljivosti (4% za promatrani volumen) u *annulusu* i/ili FHB. Tablica 20 prikazuje rezultate. Pojednostavljena procjena pokazuje da bi istjecanje od 7% volumena/dan u *annulus* odnosno istjecanje od 16,5% volumena/dan u FHB povećalo volumni udio vodika do granice zapaljivosti bez MCCI-ja, ali je za to potrebno mnogo manje istjecanje u slučajevima s MCCI.

**Tablica 19: Maksimalni volumni udio vodika u promatranom području**

Opis scenarija	Izračunani volumni udio vodika	
	<i>Annulus</i>	FHB
Projektno istjecanje (0.2%volumena/dan) nema MCCI	0.12%	0.05%
Projektno istjecanje (0.2%volumena/dan) sa MCCI	0.35%	0.15%
DEC istjecanje (2 x projektno), bez MCCI	0.24%	0.10%
DEC istjecanje (2 x projektno), s MCCI	0.69%	0.30%

**Tablica 20: Minimalni protoci istjecanja iz kontejmenta potrebni za postizanje granice deflagracije (4% volumena)**

Prostor	bez MCCI	sa MCCI	
<b>Annulus</b>	7%	2.39%	istjecanje na dan
<b>FHB</b>	16.50%	5.60%	istjecanje na dan

Ova pojednostavljena procjena je vrlo konzervativna i odlučeno je napraviti dodatnu procjenu uvjeta za SBO sekvencu s oruđem MAAP 5.03.

#### 5.4.2 MAAP5.03 Analiza istjecanja u anulus

Uzimajući u obzir prethodne studije Krško PSA razine 2, osnovni scenarij za SBO (PSA sekvencu HSBO1, Tablica 18) odabran je za procjenu uvjeta u *annulusu*. Tablica 21 predstavlja pet različitih analiza osjetljivosti povezanih s proizvodnjom i distribucijom

vodika, uključujući uvjete zapaljivosti u *annulusu* kontejnmenta. Analize osjetljivosti uzimaju u obzir različite promjene u početnim i graničnim uvjetima koji se odnose na operativnost PCFV sustava i pretpostavljena istjecanja iz kontejnmenta u *annulus* (JUNCTION#26), kontejnmenta u atmosferu (JUNCTION#27) i *annulusa* u atmosferu (JUNCTION#28) – Slika 39. Potrebno je napomenuti da analize osjetljivosti nisu pretpostavile nikakve radnje operatera (bilo po hitnim operativnim postupcima (EOPs) ili smjericama za upravljanje teškim nesrećama (SAMG-ovi) ili aktiviranje tehničkih sigurnosnih sustava (ESF) (npr. PCFV, ECCS, kontejnment sprej, itd.).

Scenariji SBO1-01 i SBO1-002 izračunati su u vremenskom okviru od 24 sata (86400 s) jer je primijećeno da je istjecanje u *annulus* relativno nisko i stabilizirano u ovom razdoblju nakon što čelična ovojnica kontejnmenta popusti povećanom tlaku (otvoren SPOJ #27 u okoliš). Svi ostali scenariji izračunati su u vremenskom razdoblju od 72 h (259200 s).

Slika 40 prikazuje usporedbu uvjeta u kontejnmentu u različitim SBO scenarijima. Slično tome, Slika 41 prikazuje usporedbu uvjeta *annulusa* pri istim SBO scenarijima.



**Tablica 21: Lista analiziranih scenarija sa MAAP5.03**

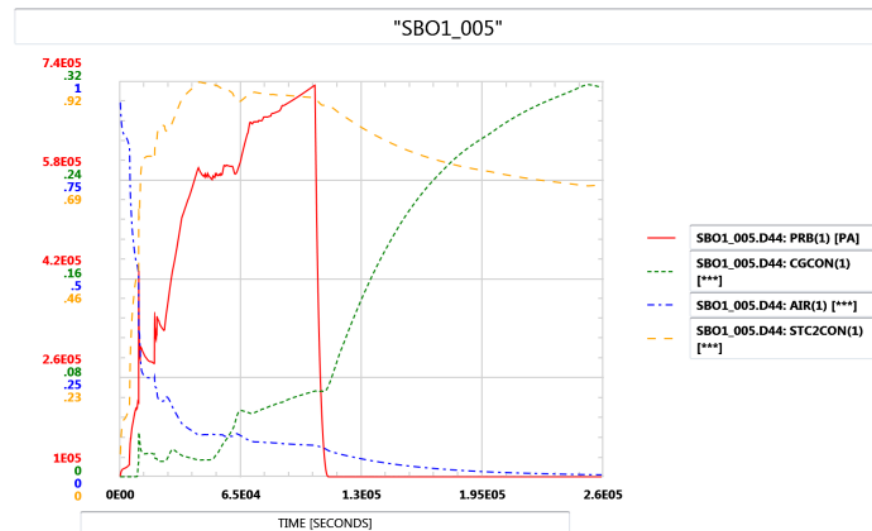
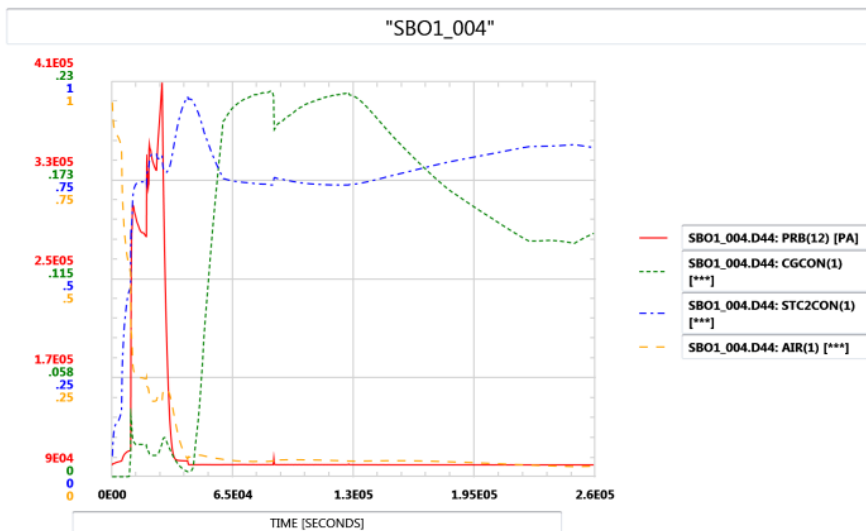
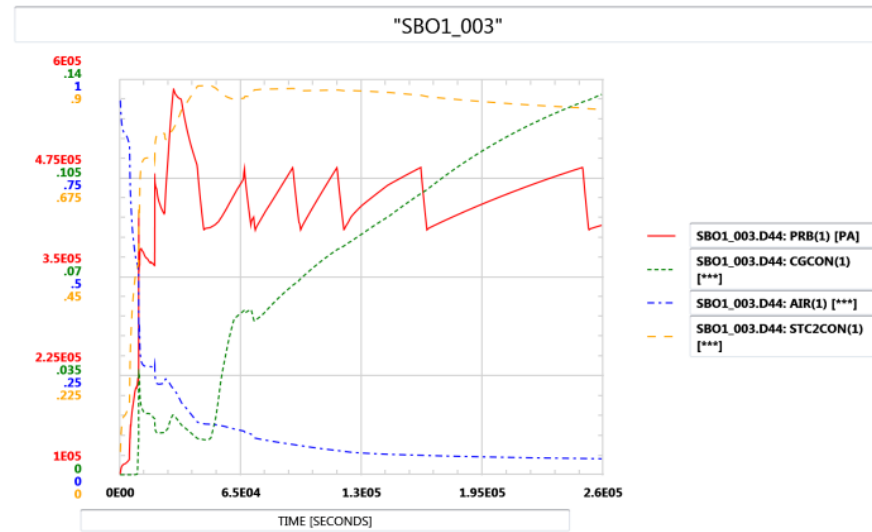
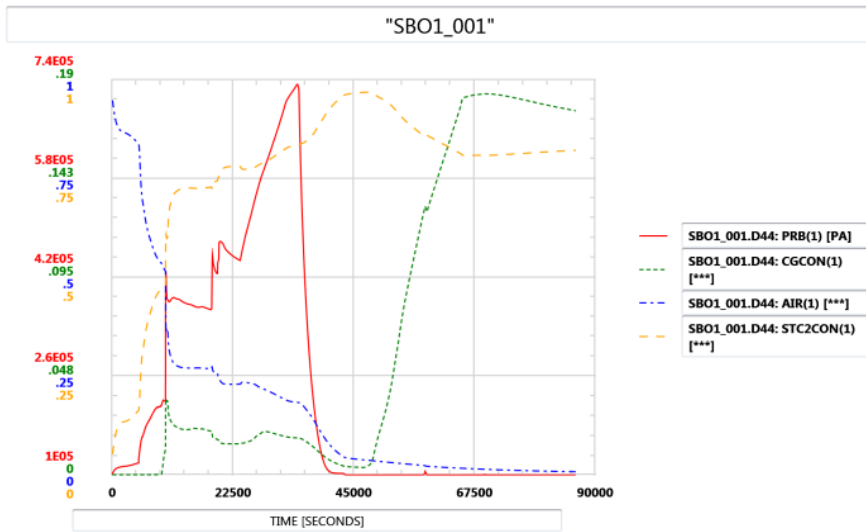
Run ID	PCFV	Istjecanje iz kontejnmenta	Tlak
SBO1_001	Ne	1. projektno istjecanje u anulus; 2. 0,1m <sup>2</sup> otvor u okoliš nakon loma kontejnmenta;	2. ultimativni tlak loma kontejnmenta (0,737 MPa)
SBO1_002	Ne	1. 10 x projektno istjecanje u anulus; 2. 0,1m <sup>2</sup> otvor u okoliš nakon loma kontejnmenta;	2. ultimativni tlak loma kontejnmenta (0,737 MPa)
SBO1_003	Da	10 x projektno istjecanje u anulus	Nema loma kontejnmenta, PCFV se otvara na tlaku 0,59MPa, nakon toga održava tlak između 0,41 i 0.49MPa.
SBO1_004	Da	1. projektno istjecanje u anulus; 2. 0,1m <sup>2</sup> otvor prema anulusu na projektni tlak kontejnmenta, prije prorade PCFV; 3. 0.1m <sup>2</sup> istjecanje u okoliš;	2. projektni tlak (0,41MPa)
SBO1_005	Ne	1. projektno istjecanje u anulus; 2. 0,1m <sup>2</sup> otvor prema anulusu na projektni tlak kontejnmenta; 3. 0,1m <sup>2</sup> istjecanje iz anulusa u okoliš;	2. projektni tlak (0,41MPa) 3. ultimativni tlak loma kontejnmenta (0,737 MPa)

Slika 40 prikazuje usporedbu uvjeta u kontejnment (volumen 1) u različitim SBO scenarijima (osim SBO1\_002 jer je sličan sa SBO1\_001), gdje su:

- PRB(1) – tlak;
- CGON(1) – zapaljivi plinovi (H<sub>2</sub> + CO) - volumni udio;
- STC2CON (1) – inertni plinovi (para + CO<sub>2</sub>)- volumni udio;
- AIR(1) – smjesa zraka (O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>) – volumni udio.

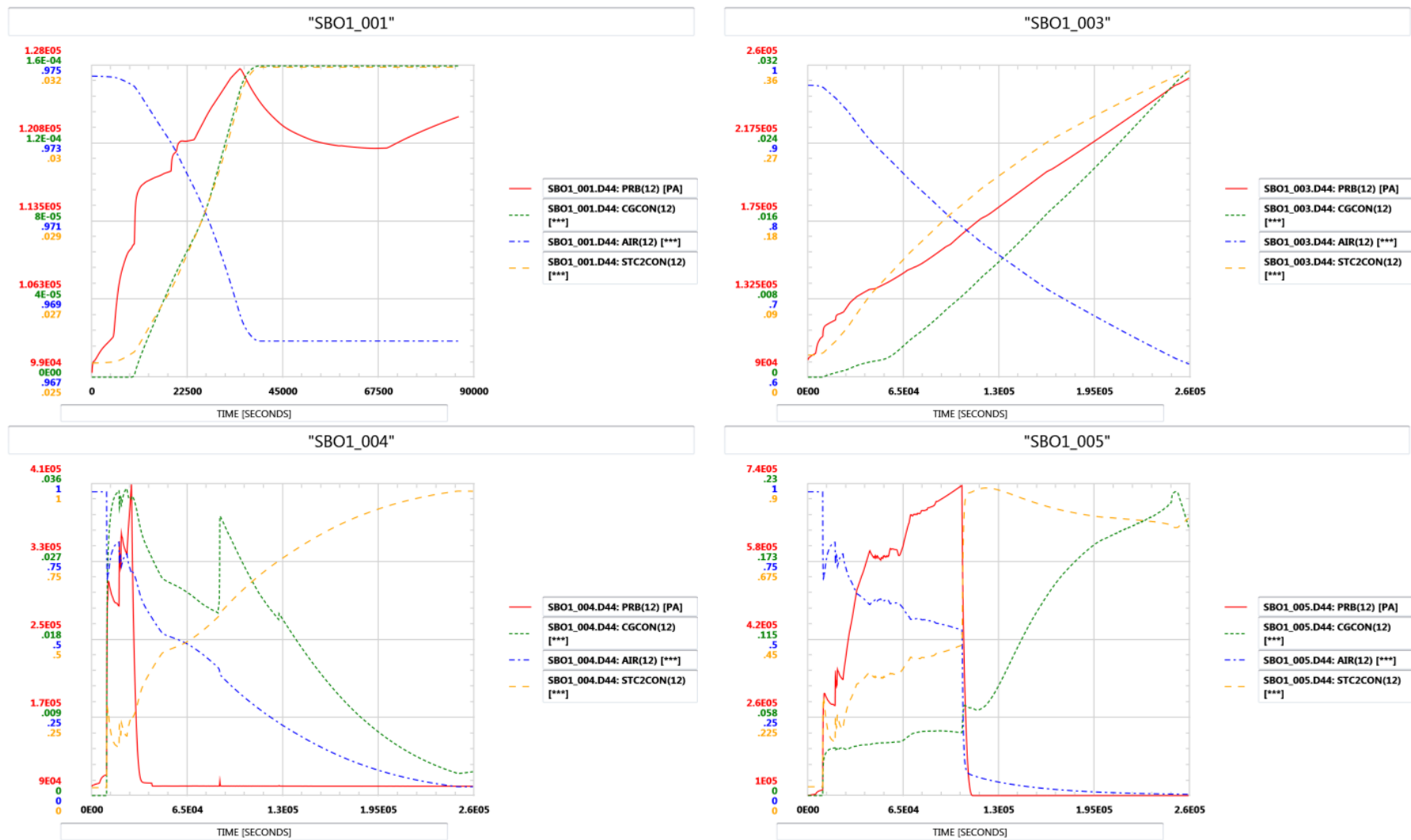
Slično tome, Slika 41 prikazuje usporedbu uvjeta u anulusu kontejnmenta (volumen 12) u istim SBO scenarijima, gdje su:

- PRB(12) – tlak;
- CGON(12) – zapaljivi plinovi (H<sub>2</sub> + CO) - volumni udio;
- STC2CON (12) – inertni plinovi (para + CO<sub>2</sub>)- volumni udio;
- AIR(12) – smjesa zraka (O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>) – volumni udio.



Slika 40: Usporedba uvjeta u kontejnmentu (volumen #1) za različite SBO scenarije

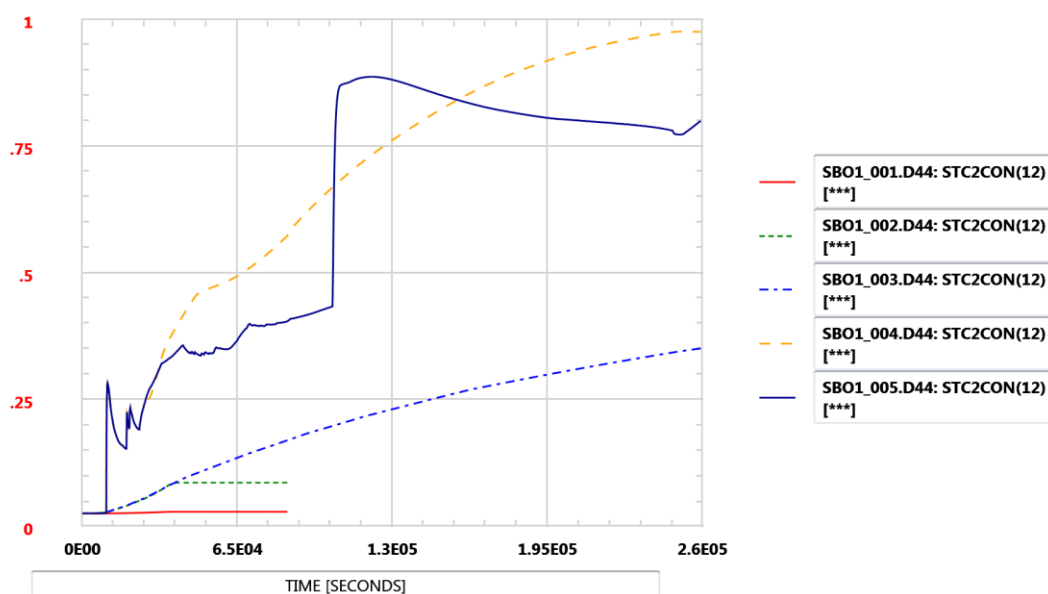
Iz rezultata (Slika 40) može se primijetiti da je za slučajeve SBO1-001 i SBO2-002, s pretpostavkom da PCFV nije operativan, atmosfera kontejnmenta inertna zbog pare i rad PAR-ova troši kisik. Volumni udio vodika zbog oksidacije cirkonija je ispod 4%, a volumni udio pare je iznad 55%. Jednom kada kontejnment otkáže zbog nedostupnosti hlađenja kontejnmenta (odvođenja ostatne topline sa sprejevima ili RCFC sustavom) pri pretpostavljenom pritisku naprezanja kontejnmenta (0,737 MPa), MCCI postaje progresivniji (nakon nekih 45000 s), a volumni udio zapaljivih plinova u kontejnmentu se povećava (na nekih 18%). Međutim, volumni udio pare još uvijek je visok, a volumni udio kisika vrlo mali. Slična je situacija sa scenarijem s dostupnim PCFV (SBO1-003), njegovom zaštitom kontejnmenta od prekomjernog tlaka, volumni udio zapaljivih plinova se povećava nakon početka MCCI (dosežući gotovo 14%), ali volumni udio pare i dalje ostaje visok, a volumni udio kisika vrlo mali. Nerealni scenariji (SBO1-004 i 005), koji pretpostavljaju veće otvore na kontejnmentu (0,1 m<sup>2</sup>) pri projektiranom tlaku (0,41 MPa), još uvijek pokazuju da su zapaljivi plinovi inertni i s niskim sadržajem kisika koji je potreban za stvaranje zapaljivih uvjeta.



Slika 41: Usporedba uvjeta u anulusu (volumen #12) za različite SBO scenarije



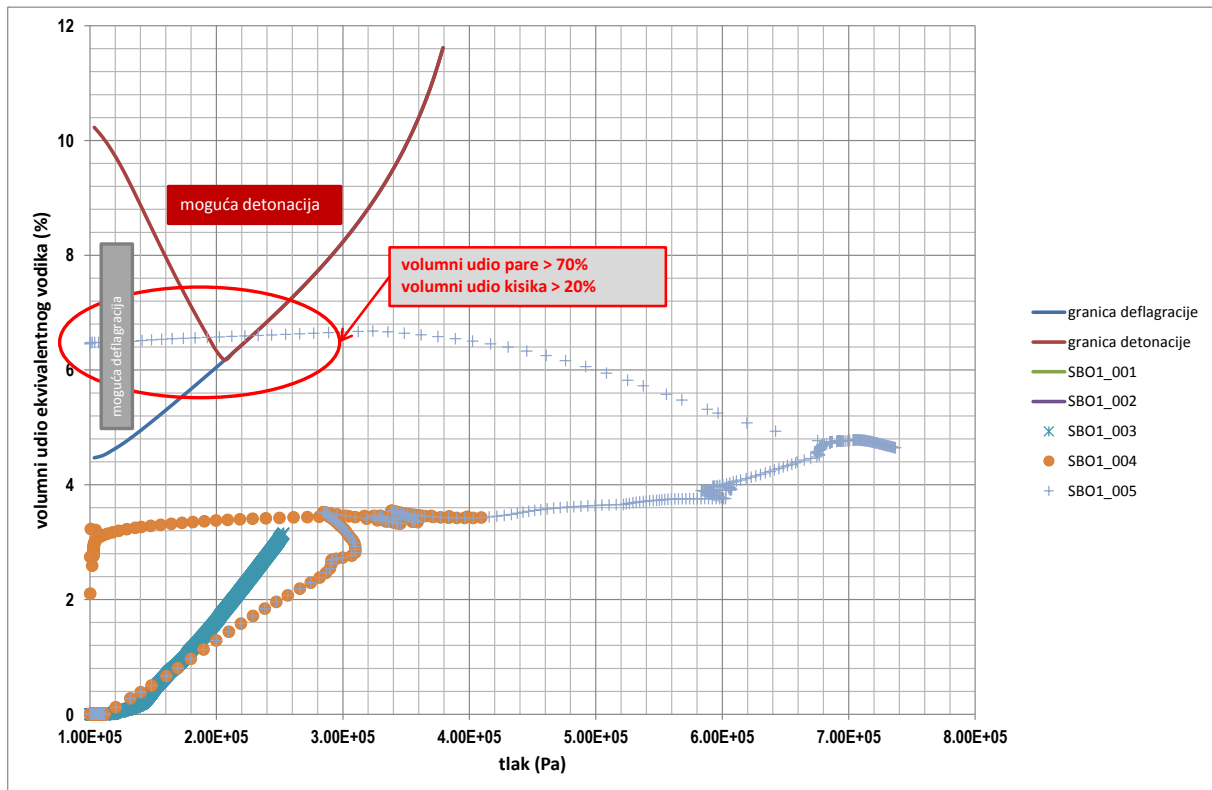
**Slika 42: Usporedba volumnih udjela zapaljivih plinova u anulusu za različite SBO scenarije**



**Slika 43: Usporedba volumnih udjela pare (i inertnog CO2) u anulusu za različite SBO scenarije**

Analize uvjeta u *annulusu*, slično situaciji u kontejnmentu, pokazuju da je za SBO1-001 i SBO1-002, volumni udio zapaljivih plinova znatno ispod 4% volumena (0,016% odnosno 0,16%), uz pretpostavku normalnog projektiranog istjecanja (ili ako je 10 puta veći) kako bi predstavljao opasnost od deflagracije. U slučajevima SBO1-003 i SBO1-004, zapaljivi plinovi dosežu volumni udio od 3,2% i 3,6% u *annulusu* s relativno niskim volumnim udjelom pare (i

CO<sub>2</sub> kao produkta MCCI). Slično, rezultati proračuna SBO1-005 pokazuju da zapaljivi plinovi dosežu volumni udio od 3,4% u *annulusu* kada su inertni plinovi (para + CO<sub>2</sub>) između 22,5% i 45%. Nakon otkazivanja *annulusa* (pretpostavljeno na 0,737 MPa) za ispuštanje u okoliš (s površinom poprečnog presjeka od 0,1 m<sup>2</sup>) volumni udio zapaljivih plinova povećava se u *annulusu*, ali ponovno postaje inertan ponovno sa parom (i CO<sub>2</sub>) čiji se volumni udjel održava oko 70%.



**Slika 44: Usporedba volumnih udjela zapaljivih plinova u anulusu za različite SBO scenarije**

Iz te slike se vidi da bi u primjeru malo vjerojatnog (za presjeka loma metalne obloge kontejnera prema *annulusu* (iznad 0,1 m<sup>2</sup>)) ali nerealnog scenarija (SBO1\_005) (jer bi to značio ionako praktičan gubitak zadnje barijere prema okolišu za fizijske produkte), trebalo paziti da ne dođe do kondenzacije pare ili rasterećenja tlaka ispod 0,25 MP-a u *annulusu* te prekorači granica deflagracije.

### 5.4.3 Usporedba rezultata procjene pojednostavljenom metodom sa MAAP5.03 analizom istjecanja u anuluz

Tablica 22 predstavlja usporedbu između konzervativnog, ali pojednostavljenog pristupa kako je opisano u poglavlju 5.4.1 (Tablica 19) i MAAP analiza opisanih u poglavlju 5.4.2. Može se vidjeti da, unutar promatranog vremenskog okvira od 24 sata, pojednostavljena metoda daje volumni udio vodika oko 20 puta veći za projektirani slučaj istjecanja i oko 4,5 puta veći za DEC istjecanje, iako je metoda s MAAP-om, u slučaju SBO1-002, pretpostavila pet puta veće istjecanje od projektnog. Međutim, u svim su slučajevima volumni udjeli zapaljivih plinova ispod granice deflagracije, tako da zaključci mogu biti isti. (Granica deflagracije od 4% volumnog udjela u biti je granica/prag za paljenje i moguće lokalno gorenje, a ne za globalno izgaranje ili detonaciju). Stoga pojednostavljeni pristup još uvijek može biti koristan kako bi se dobila brza granična procjena.

**Tablica 22: Usporedba između pojednostavljene metode i analize sa oruđem MAAP5.03**

Opis scenarija	Izračunati volumni udio ekvivalenta vodika	
	Pojednostavljena metoda	MAAP5.03 izračun
Projektno istjecanje (0.2%volumena/dan) sa MCCI	0.35%	0.016%
DEC istjecanje, sa MCCI	0.69% (2 x projektno istjecanje)	0.152% (10 x projektno istjecanje)

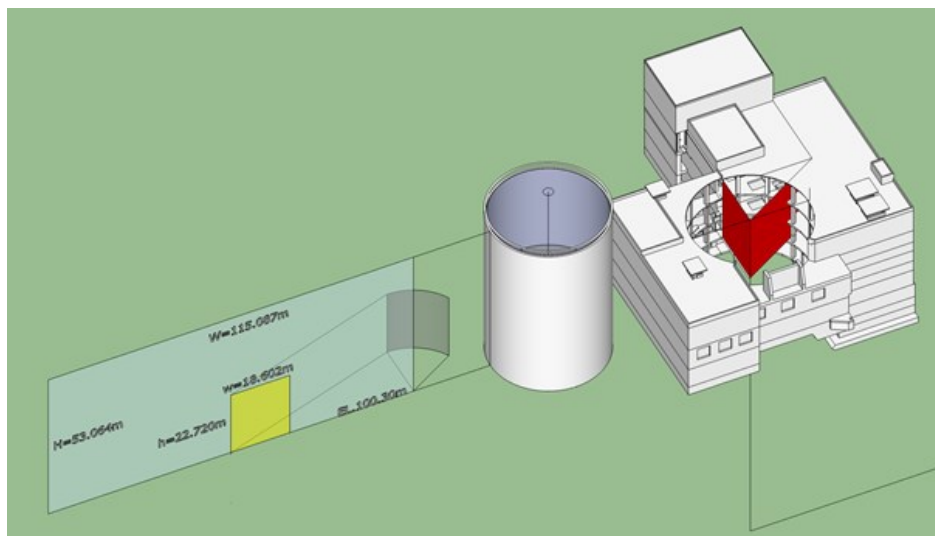
### 5.4.4 Potencijalni dinamički utjecaj od zapaljenja vodika u kontejnmentu ili anulusu na FHB

Čak i da analize MAAP5.03, predstavljene u poglavlju 5.4.2, pokazuju da su rizici deflagracije za pretpostavljene scenarije vrlo niski, razumno je razmotriti potencijalno energetska naprezanje ili lom *annulusa* te utjecaj na FHB (i naravno SFP PSA logiku stabla događaja) kako je prikazano u logičkom dijagramu u Slika 35 iznad.

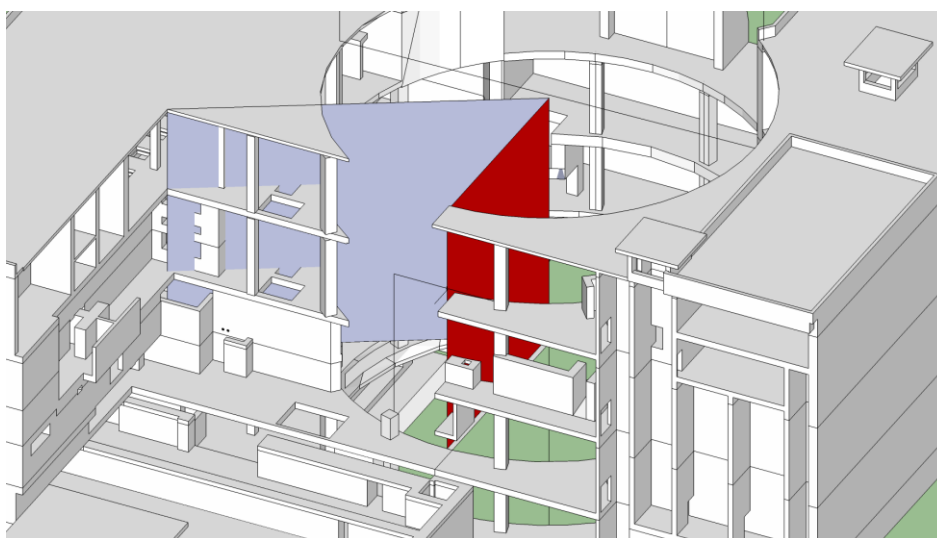
Treba napomenuti da su u izračunima MAAP5.03 sva pretpostavljena istjecanja iz kontejnmenta u *annulus* bila konzervativno predviđena jer bi istjecanje bez strukturnog sloma trebalo biti raspoređeno po površini zida, uzimajući u obzir veličinu prodora i susjedno područje s drugim sustavima i zgradama. Slično, vjerojatnost i posljedice potencijalne deflagracije vodika (ili detonacije) u *annulusu* s obzirom na FHB (i potencijalno na SFP PSA stabla događaja), trebalo bi faktorizirati kontaktnom površinom između *annulusa* i FHB. To je zato što bi se hipotetski strukturni slom (otvor u stijenci FHB zgrade) mogao dogoditi na površini stijenke koja dijeli *annulus* od FHB-a, kao i na komplementarnoj površini. U drugom slučaju utjecaj bi se proširio na zgrade ili područja, osim FHB. Deflagracija/detonacija još

uvijek može utjecati na opremu relevantnu za SFP hlađenje, ako se odgovarajuća oprema nalazi u pogođenim područjima koja nisu FHB. To bi trebalo uzeti u obzir u SFP PSA stablu događaja/logici stabla kvarova.

Samo za ilustraciju, grubo se procjenjuje vjerojatnost dinamičkog utjecaja na FHB (bilo istjecanjem ili detonacijom/deflagracijom) pod pretpostavkom da je ravnomjerno raspoređen na površini zida. Područje na unutarnjoj strani oklopne zgrade (betonska anulusa) okrenuto prema FHB je 422,6 m<sup>2</sup> (Slika 45 i Slika 46). Ukupna unutarnja površina cilindričnog dijela zgrade je 6107 m<sup>2</sup>. Površina gornje betonske kupole je 1162 m<sup>2</sup>, a površina betonskog poda anulusa je 85,4 m<sup>2</sup>.



**Slika 45: Ilustracija položaja i dimenzija dodirnih površina anulusa prema FHB zgradi**



**Slika 46: Modelirani presjek potencijalne dodirne površine, pogled od gore**



Može se smatrati razumnim da se vjerojatnost utjecaja na FHB smanji faktorom područja utjecaja od 0,07 ( $\approx 422,6 \text{ m}^2/6107 \text{ m}^2$ ) za procjenu posljedica takvog događaja u FHB i u vezi sa sustavima, strukturama i komponentama koje se tamo nalaze radi zaštite sigurnosnih funkcija povezanih s integritetom SFP-a (održavanje inventara SFP-a i uklanjanje topline raspadanja).

#### 5.4.5 Logički i probabilistički model za kvantifikaciju utjecaja sekvenci oštećenja jezgre reaktora na SFP

Iz gore prikazanih determinističkih analiza može se razumno zaključiti sljedeće:

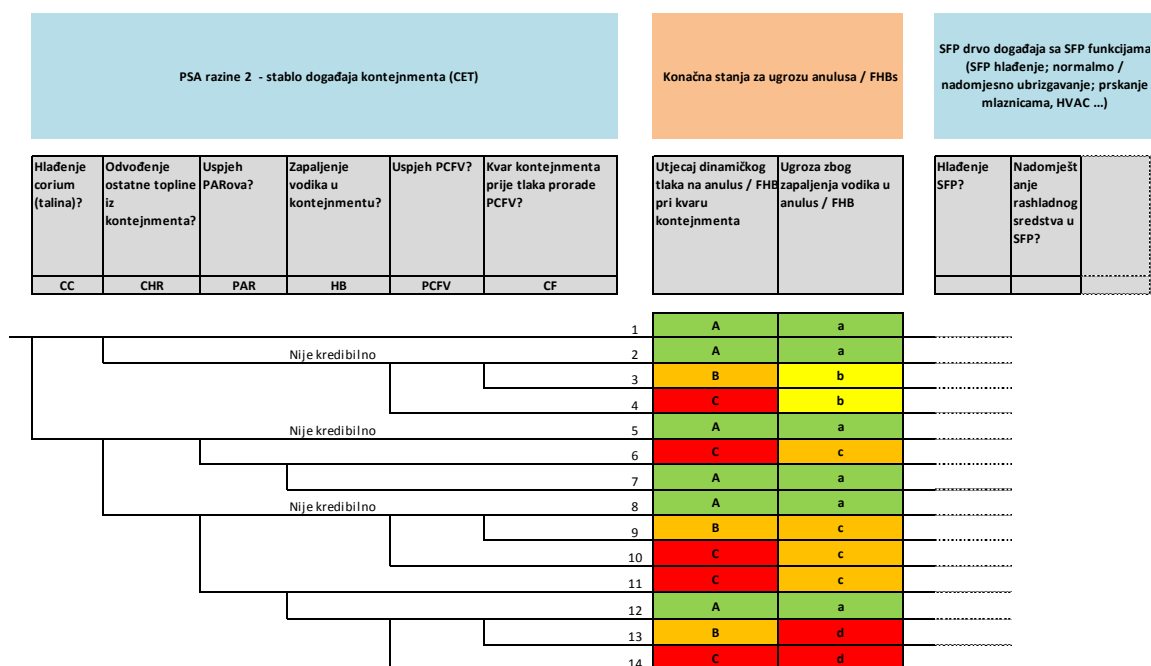
- Ne oksidira sav Zr iz košuljica goriva u reaktorskoj posudi. MAAP5.03 predviđa oksidaciju tijekom SBO sekvence između 49 % i 55 % i takva oksidacija bez MCCI ne predstavlja potencijalni problem. Čini se da samo sekvence nesreća s oštećenjem jezgre gdje se nije moglo osigurati hladnije taline nakon kvara tlačne posude reaktora (RPV) predstavljaju potencijalni izazov sagorijevanja vodika u kontejnmentu.
- Normalno istjecanje iz kontejnmenta (0,2 % volumena na dan) u *annulus* ili FHB ne predstavlja problem u vremenskom okviru od 24 sata. Veća istjecanja ili potencijalno povećanje pukotina na kontejnmentu moglo bi prenijeti mješavinu veće količine zapaljivih plinova i utjecati na prostore oko kontejnmenta.
- Čak i da PAR-ovi uspješno rekombiniraju zapaljive plinove (vodik i CO), radili bi samo dok se ne potroši sav kisik. Kada se potroši sav kisik, ako se *corium* (talina jezgre) ne može ohladiti, MCCI se nastavlja i volumni udio zapaljivih plinova u kontejnmentu povećava i potencijalno istječe kroz moguće putove (Slika 37) u okoliš ili susjedne prostorije oko kontejnmenta.
- Ako tlak u kontejnmentu nakon loma RPV ne uzrokuje povećanje površine poprečnog presjeka istjecanja u *annulus*, može se smatrati da je potencijalna ugroza vodika (zapaljivih plinova) u *annulusu* minimalan.
- Potencijalni rast istjecanja iz kontejnmenta prije aktiviranja PCFV-a ili loma kontejnmenta (ako PCFV zakaže i tlak dosegne krajnji tlak naprezanja) neizvjestan je i teško ga je predvidjeti.
- Slično gore navedenom, mješavina istjecanja plinova, pare i preostalog kisika iz zatvorenog prostora je nepredvidiva.

Na temelju gornjeg zaključka i rasprava u prethodnim poglavljima rada, može se razviti logički i vjerojatnosni model za kvantifikaciju utjecaja sekvenci oštećenja jezgre reaktora na SFP.

Kao ilustracija, Slika 47 prikazuje konceptualni nacrt za takav model. Sastoji se od tri opća dijela:

1. Level 2 PSA stablo događaja kontejnmenta (CET) koje bi identificiralo i logički definiralo moguće sekvence nesreća u kontejnmentu.
2. Identifikacija krajnjih stanja CET sekvenci, o ugrozama za *annulus* i FHB. U ovom konceptu razmatraju se dvije glavne vrste ugroza: ugroza zbog dinamičkog utjecaja tlaka i ugroza od vodika (zapaljivih plinova) koji se oslobađa iz kontejnera. Ove dvije vrste ugroza su logički i vjerojatnosno ovisne i treba ih, u načelu, rješavati zajedno.
3. Treći dio, koji je samo naznačen na slici, predstavlja širenje CET sekvenci kroz „SFP stablo događaja“. Ovo stablo događaja predstavlja logički model odgovora SFP sustava i struktura na određenu CET sekvencu. „SFP stablo događaja“ je specifično za krajnje stanje određene CET sekvence, kao što je utvrđeno pod 2) gore.

Slika 47 prikazuje pojednostavljeni i sažeti dio CET-a koji odražava sekvence loma reaktorske posude (RPV) pri niskim tlakovima. Ovdje se ne govori o sekvencama loma RPV pri visokom tlaku kako bi se pojednostavio primjer i, također, s obzirom na njihovu prilično malu vjerojatnost odnosno raspršenje taline pri čemu je vrlo malo vjerojatna pojava MCCI.



**Slika 47 Konceptualni prikaz logičkog modela za kvantifikaciju utjecaja sekvenci oštećenja jezgre reaktora na SFP**

Nadalje, sljedeće pretpostavke i ovisnosti među događajima odnose se na sliku:

1. Smatra se da uspjeh PAR-a (gornja grana iz „PAR“ čvora) uklanja prijetnju od sagorijevanja  $H_2$  u kontejnmentu. Stoga, u ovim sekvencama, kontejnment može otkazati samo zbog ugroze visokog tlaka. Funkcija „HB“ nije relevantna.
2. Pitanje pod događajem „CF“ bavi se strukturalnim kvarovima kontejnmenta na razinama tlaka ispod aktivacije PCFV, kao i mogućim istjecanjima većim od projektiranog istjecanja iz kontejnmenta (iako bez stvarnih strukturalnih kvarova).
3. Pretpostavlja se da uspješno odvođenje topline iz kontejnmenta (CHR) (gornja grana od „CHR“) uklanja ugrozu integriteta kontejnmenta zbog nadtlaka. Stoga funkcije „PCFV“ i „CF“ nisu relevantne (ne traže se) za ove sekvence. Pretpostavka o „CF“ može se ponovno razmotriti u slučaju detaljne realne studije.
4. Ako se *corium* (talina jezgre) može hladiti (gornja grana od „CC“) i CHR radi (gornja grana od „CHR“), jedini izvor  $H_2$  je iz proizvodnje u RPV. Smatra se da ova količina  $H_2$  čak i ako izgori ne bi ugrozila cjelovitost kontejnmenta. (Vidi također gornju raspravu.) Stoga nijedna od funkcija „PAR“, „HB“, „PCFV“ i „CF“ nije potrebna u razmatranju ove ugroze.
5. S druge strane, ako se *corium* može hladiti (gornja grana od „CC“), a CHR nije dostupan (donja grana od „CHR“), smatra se da je prijetnja od zapaljenja  $H_2$  u

kontejnmentu mala (bez stvaranja H<sub>2</sub> i CO iz MCCI plus prilično inertna atmosfera) bez obzira na PAR-ove. Stoga funkcija „PAR“ nije potrebna u ovoj sekvenci.

6. Pretpostavlja se da „H<sub>2</sub> zapaljenje u kontejnmentu“ (donja grana od „HB“) također predstavlja kvar kontejnmenta od H<sub>2</sub> sagorevanja. (PCFV se ne pripisuje eliminaciji ili smanjenju skoka tlaka uzrokovanog izgaranjem H<sub>2</sub>. Stoga se neuspjeh zadržavanja smatra logičnim). Zbog navedenog funkcije „PCFV“ i „CF“ nisu relevantne (ne traže se) u ovim sekvencama. Ovo je prilično konzervativna pretpostavka, ali napravljena je da pojednostavi logiku stabla događaja za ovaj primjer. U svakom slučaju, logičko stablo se lako može proširiti umetanjem događaja za neuspjeh zadržavanja od zapaljenja H<sub>2</sub> u donju granu od „HB“.
7. Na sličan način, radi pojednostavljenja, pretpostavlja se da nedostupnost CHR-a sa sigurnošću dovodi do nadtlaka iznad setpointa za aktivaciju PCFV-a. U takvom slučaju, kvar PCFV-a također se smatra kvarom kontejnmenta. U slučaju uspjeha PCFV-a, kontejnment možda još uvijek ima istjecanje iznad projektirane svrijednosti ili jednostavno zbog strukturalnog kvara na višim tlakovima ali ispod setpointa za otvaranje PCFV-a.

Tablica 23 definira temeljne pretpostavke za krajnja stanja CET sekvenci u vezi s dvije vrste ugroze na *annulus*/FHB.

**Tablica 23: Temeljne pretpostavke za CET stanja**

Utjecaj dinamičkog tlaka na <i>annulus</i> /FHB kod kvara kontejnmenta		Ugroza zbog zapaljenja H <sub>2</sub> (CO iz MCCI)	
A	Nema utjecaja. Nema izgaranja H <sub>2</sub> . Nadtlak je ili spriječen (CHR uspjeh) ili uspješno eliminiran (PCFV i nema kvara cjelovitosti ispod zadane vrijednosti tlaka za proradu PCFC).	a	Nema H <sub>2</sub> ugroze. Nema istjecanja u <i>annulus</i> /FHB.
B	Da, dinamički utjecaj prekomjernog tlaka u kontejnmentu iako je ispod tlaka otvaranja PCFV. (Možda samo povećano istjecanje.)	b	Da, ali količina je ograničena na H <sub>2</sub> koji se stvara u posudi (RPV). (Prethodno zapaljenje u kontejnmentu nije vjerodostojno).
C	Da, moguć dinamički udar od prekomjernog tlaka u kontejnmentu iznad tlaka otvaranja PCFV ili od zapaljenja H <sub>2</sub> (CO iz MCCI) u kontejnmentu.	c	Da. Istjecanje H <sub>2</sub> (i/ili produkata MCCI) u <i>annulus</i> /FHB prethodilo je ili uspješnom djelovanju PAR-ova do potrošnje kisika ili zapaljenja H <sub>2</sub> u kontejnmentu. U oba slučaja, MCCI bi nastavio generirati novi H <sub>2</sub> i CO.
		d	Da. Cjelokupna količina H <sub>2</sub> + CO stvorena od početka MCCI.

Općenito, SFP stablo događaja bi se razvilo posebno za svako od ovih krajnjih stanja, odražavajući specifične kvarove ili oštećenja na SFP strukturama i/ili sustavima ublažavanja koje nameće razmatrano krajnje stanje.

Ovdje se ne pokušava karakterizirati vjerojatnost pojedinih sekvenci. Svrha ove konceptualne ilustracije je samo ocrtavanje načela. Na primjer, o redoslijedu #7: s de-inertiranim zaštitnim sustavom i PAR-ovima koji ne rade H<sub>2</sub> će se izgorjeti prije ili kasnije. To bi se najvjerojatnije odrazilo na nisku vjerojatnost ove sekvence. Ili, ako uspoređujemo sekvence #11 i #6: one imaju slična krajnja stanja u vezi s ugrozama na *annulus*/FHB, a obje uključuju neuspjeh PAR-ova; međutim, vjerojatnost zapaljenja H<sub>2</sub> u slučaju uspješnog CHR (inertiranog ambijenta kontejnmenta) trebala bi biti znatno veća nego u slučaju njegovog kvara. Vjerojatnosti bi se dobile standardiziranim pristupima koji se koriste u PSA, kao što su analize pouzdanosti (kvarovi sustava) ili konvolucija opterećenja prema predviđenom kapacitetu (fenomeni).

#### 5.4.6 Zaključak procjene potencijalnog utjecaja oštećenja jezgre reaktora na ocjenu rizika za bazen istrošenog goriva izvan kontejnmenta (kategorija „RL2“ ili „RT2“)

Za orijentaciju, može se smatrati da je učestalost oštećenja jezgre (CDF) od unutarnjih događaja za reaktore koji su radili prije 2000. godine reda veličine  $1E-06$  /god. ili  $1E-05$  /god. Odgovarajuća učestalost oštećenja goriva (FDF) u SFP-u (unutarnji događaji specifični za SFP, s uključenim reaktorom) može se smatrati reda veličine od  $1E-10$  /god. do  $1E-07$  /god. Na primjer, referenca [21] ukazuje, za analizirani slučaj, CDF reaktora na snazi iz internih događaja na približno  $7E-06$  /god i odgovarajući SFP FDF na približno  $4E-10$  /god. Razmatranje seizmičkog hazarda može imati značajan utjecaj na navedene brojke, posebno za SFP. Ovisno o seizmičkom hazardu specifičnom za lokaciju (i povezanoj krivulji učestalosti ugroze), SFP FDF može se povećati za jedan ili više redova veličine (u usporedbi s doprinosom samo internih događaja), što njegovu vrijednost može značajno približiti odgovarajućem reaktoru CDF. Na primjer, spomenuta referenca [21] ukazuje na seizmički inducirani reaktorski CDF na približno  $9E-06$  /god (što je slično naznačenom CDF-u iz internih događaja) i seizmički inducirani SFP FDF na približno  $8E-07$  /god. Dodavanje ovoj slici sekvenci u kojima oštećenje jezgre reaktora može uzrokovati oštećenje goriva u SFP-u može dodatno povećati ukupni SFP FDF. Važan doprinos ovom dijelu SFP FDF-a mogu biti sekvence koje uključuju izgaranje plinova kao što su vodik ili ugljikov monoksid nakon oštećenja jezgre reaktora, što je glavna tema ovog poglavlja.

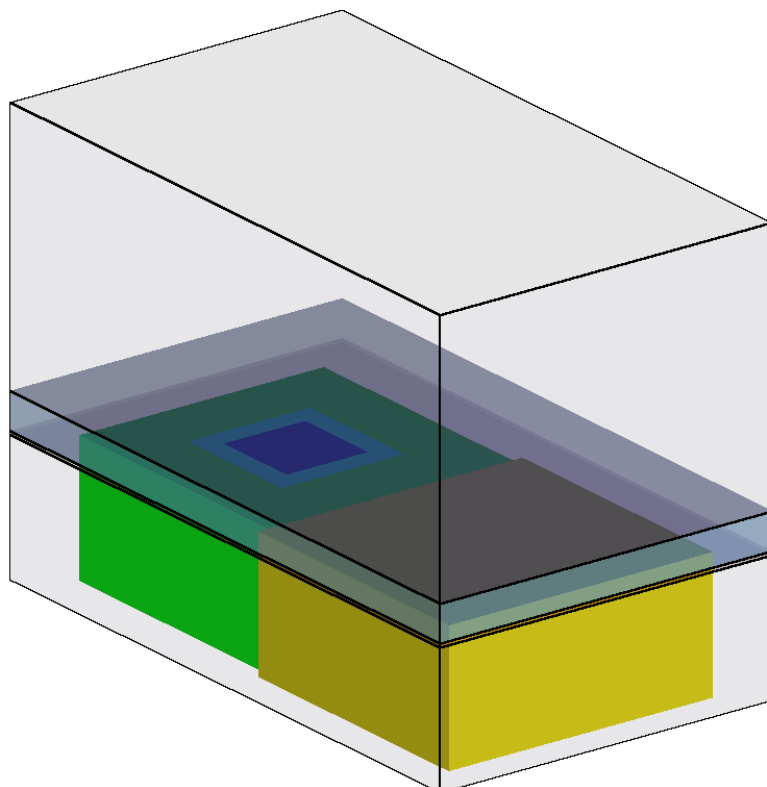
Na osnovu rezultata detaljne analize pretpostavljenih scenarija teških nesreća sa velikom količinom proizvedenog ekvivalentnog vodika (bilo oksidacijom košuljica goriva ili u kasnijoj fazi vodika i ugljičnog monoksida iz MCCI) može se zaključiti da se samo sa vrlo konzervativnim pretpostavkama može uočiti potencijalni utjecaj na FHB. Koliko je vidljivo iz analize, znatno je veća vjerojatnost da se vodik zadrži u kontejnmentu odnosno da u primjeru oštećenja čelične ovojnice migrira u okoliš bez posljedica na SFP PSA. Tu treba navesti da osim toga EOP i SAMG procedure imaju predviđene operaterske akcije za ublažavanje teških nesreća koje zahtjevaju uspostavu sustava za ventiliranje anulusa odnosno FHB čim prije to bude moguće. MAAP analize pokazuju da je vjerojatnost da se u analiziranim vremenskim okvirima (24 odnosno 72h) dosegne deflagracioni limit u FHB ili *annulusu* vrlo malen.

## 5.5 Procjena izvedivosti alternativnih metoda uspostave hlađenja SFP

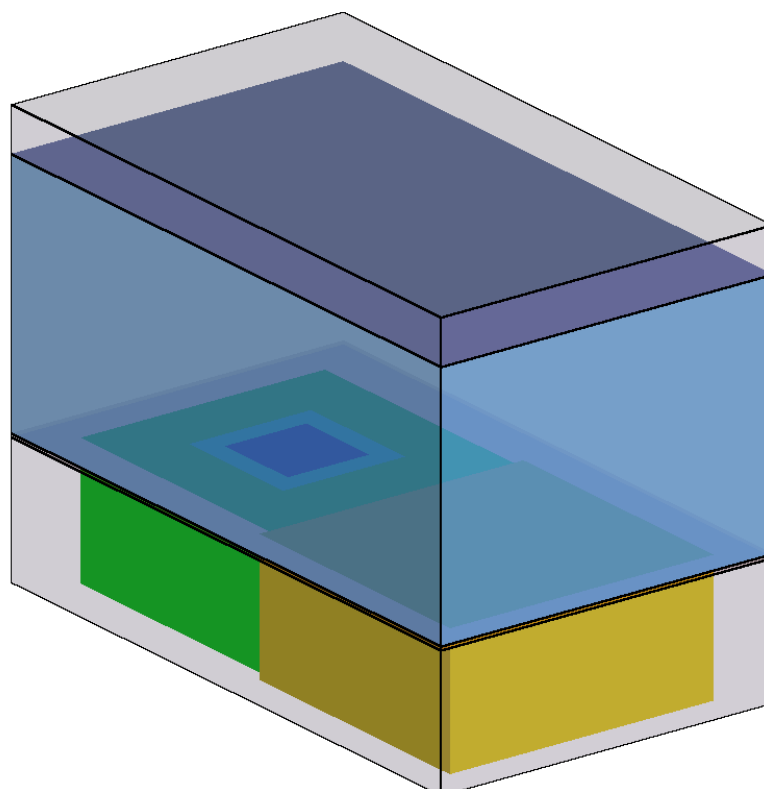
Vjerojatnosna evaluacija upotrebe alternativnih metoda hlađenja SFP opisana je u poglavlju 3.8.2.1. Iz prikazanih rezultata vidljivo je da razmatrane alternativne metode hlađenja SFP imaju potencijal smanjiti rizik od oštećenja istrošenog goriva gotovo za faktor dva.

Također je u poglavlju 4 opisana deterministička procjena efikasnosti alternativnog ublažavanja scenarija otkrivanja gorivnih elemenata (kategorije događaja „SI“ i „BE“) korištenjem raspršivanja vode mlaznicama po otkrivenim gorivnim elementima u SFP. Za sve operaterske akcije u FHB je, osim raspoloživog vremena za uspjeh predviđene operaterske akcije po AOP/EOP/SAMG postupcima, potrebno procijeniti i izvedivost s obzirom na radiološke uvijete u FHB.

Referenca [54] predstavlja analizu usporedbe izračuna doza SFP elektrane Krško koristeći različite računске metodologije izračuna. Analiza je provedena kako bi se procijenile granične brzine gama doze na instrumentima montiranim na zidnoj razini FHB u slučaju značajnog gubitka vode za hlađenje. SFP je predstavljen jednostavnim homogeniziranim cilindrima (točkasta jezgra i Monte Carlo (MC)) ili kockama (MC) upotrebom urana, željeza, vode i suhog zraka kao materijala za rasutu regiju. SFP je podijeljen na stari i novi dio, gdje stari ima tri sekcije koji predstavljaju gorivne elemente (FA) s različitim vremenom izgaranja u reaktoru/hlađenja (60 dana, 1 godina i 5 godina). Nova sekcija predstavlja FA-ove s vremenom hlađenja od 10 godina. Izotopski sastav gorivnog sklopa ovisan o vremenu izračunat je korištenjem ORIGEN2 koda primijenjenog na pražnjenje jednog od gorivnih elemenata koji se nalazi u bazenu. Izvor korišten u izračunu Microshielda temelji se na uvezenim izotopskim aktivnostima. Vremenski ovisni fotonski spektri s ukupnim intenzitetom izvora iz Microshield višegrupnih točaka kernela su zatim pripremljeni za dvije hibridne determinističko-stohastičke sekvence. Slika 48 i Slika 49 prikazuju analizirane konfiguracije sa visinom vode iznad rešetki u koje su smješteni FA od 1 m (znači degradirana razina vode) i od 7 m (visina u normalnom pogonu SFP). Slika 50 prikazuje tlocrt starog i novog dijela bazena u razini goriva za ilustraciju položaja više odnosno manje radiaktivnih FA-ova. Slika 51 prikazuje gama flux x-y raspodjelu na visini 1 m iznad ruba goriva kada nema vode koja pokriva gorive elemente. Slika 52 prikazuje gama flux x-y raspodjelu na visini ruba goriva.

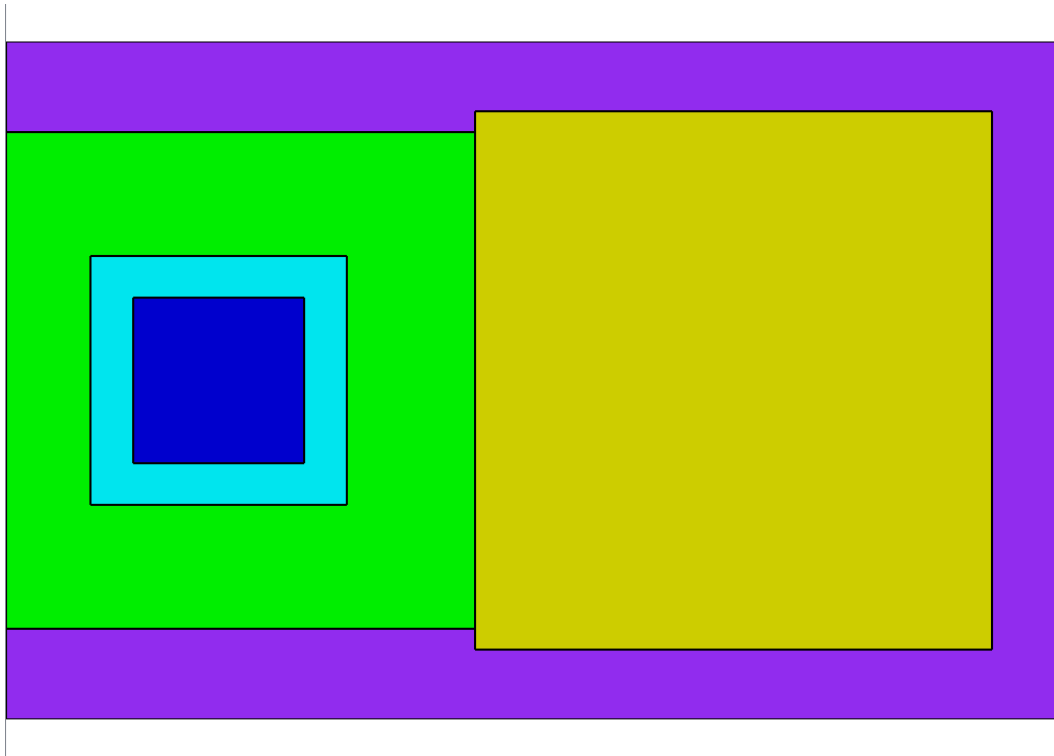


**Slika 48: Visina vode 1m iznad gornjeg ruba rešetke**

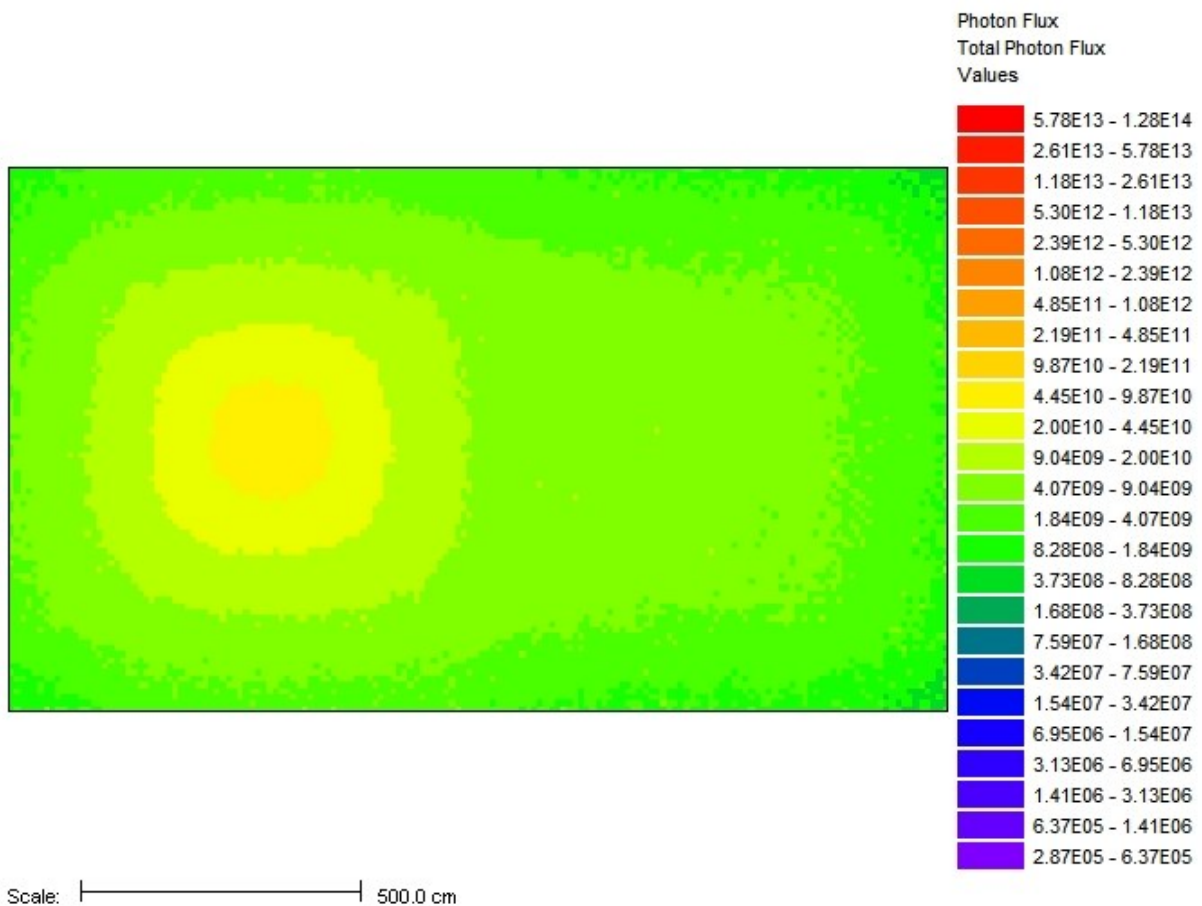


**Slika 49: Normalna visina vode (7m iznad gornjeg ruba rešetke)**

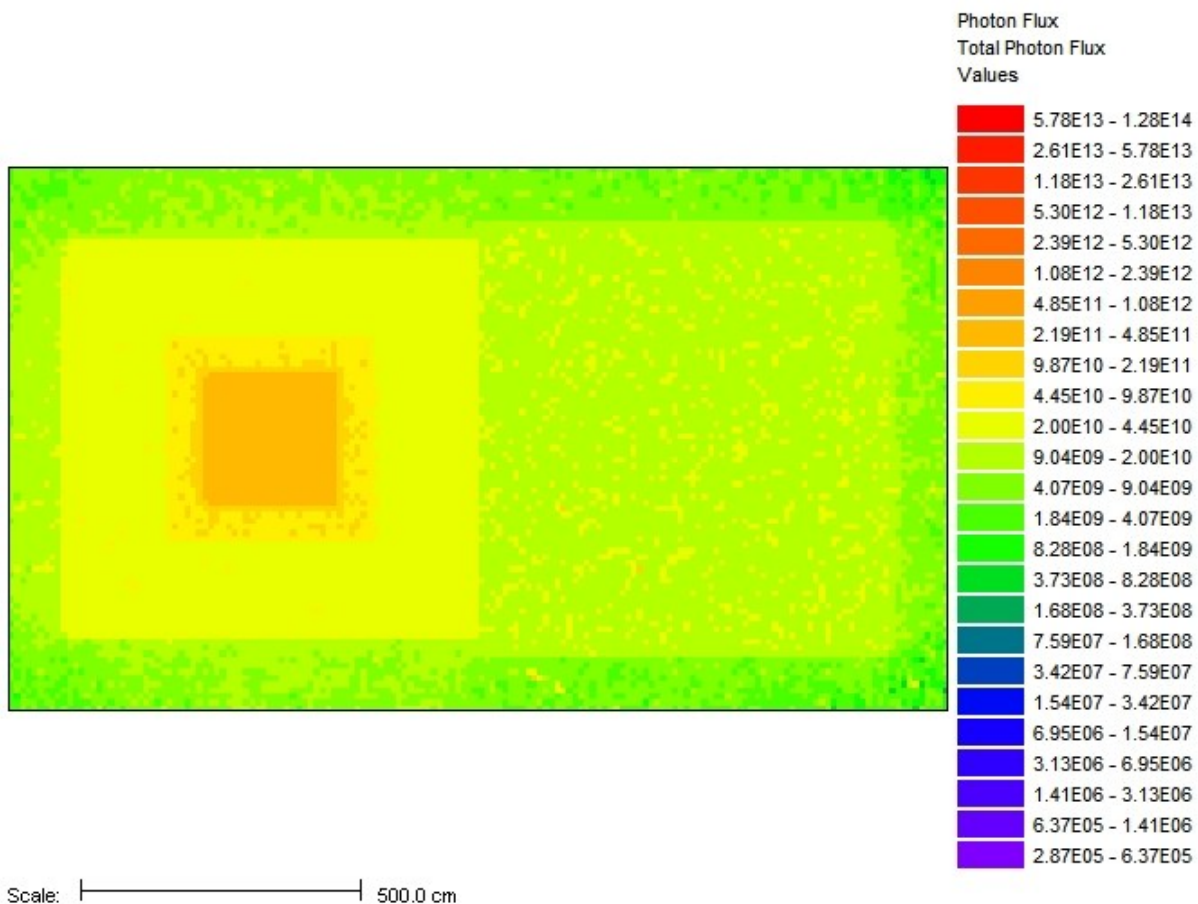




**Slika 50: Tlocrt starog i novog dijela bazena u razini goriva**



**Slika 51: Gama flux x-y raspodjela, visina 1m iznad ruba goriva, bez vode**



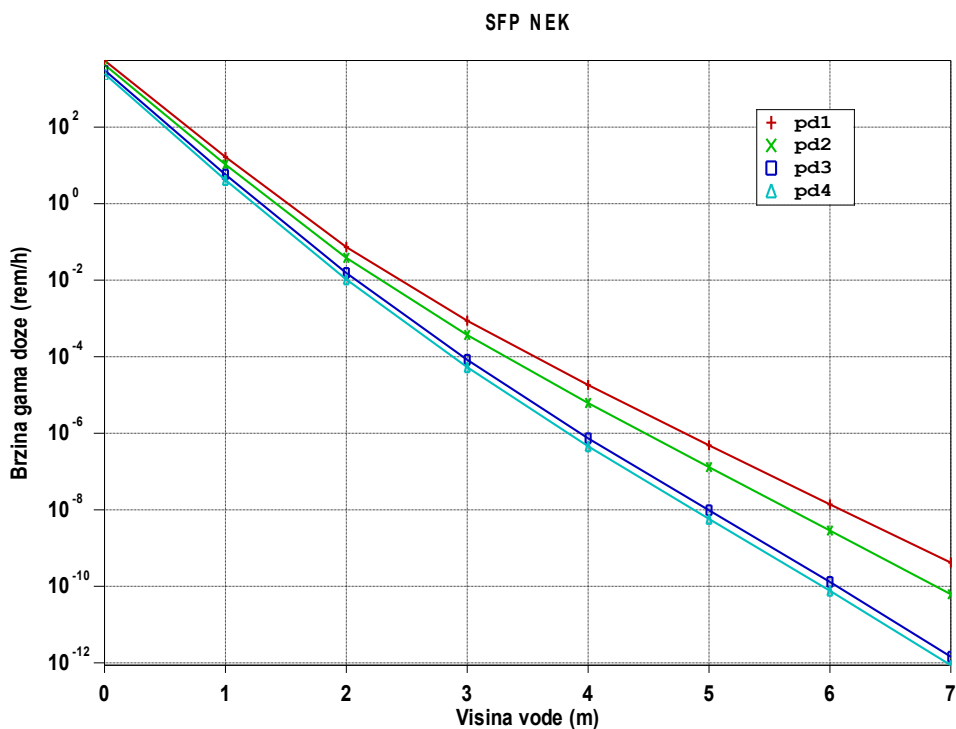
**Slika 52: Gama flux x-y raspodjela, visina ruba goriva**

Evaluacija izvedivosti potencijalnih operaterskih akcija na području oko SFP unutar FHB zgrade glede brzina doza napravljena je za dvije početne visine vode u SFP (1 m, u slučaju već degradirane razine vode u SFP i 7 m, što je normalna razina vode tijekom normalnog pogona). Brzina doze izračunata je za 4 lokacije:

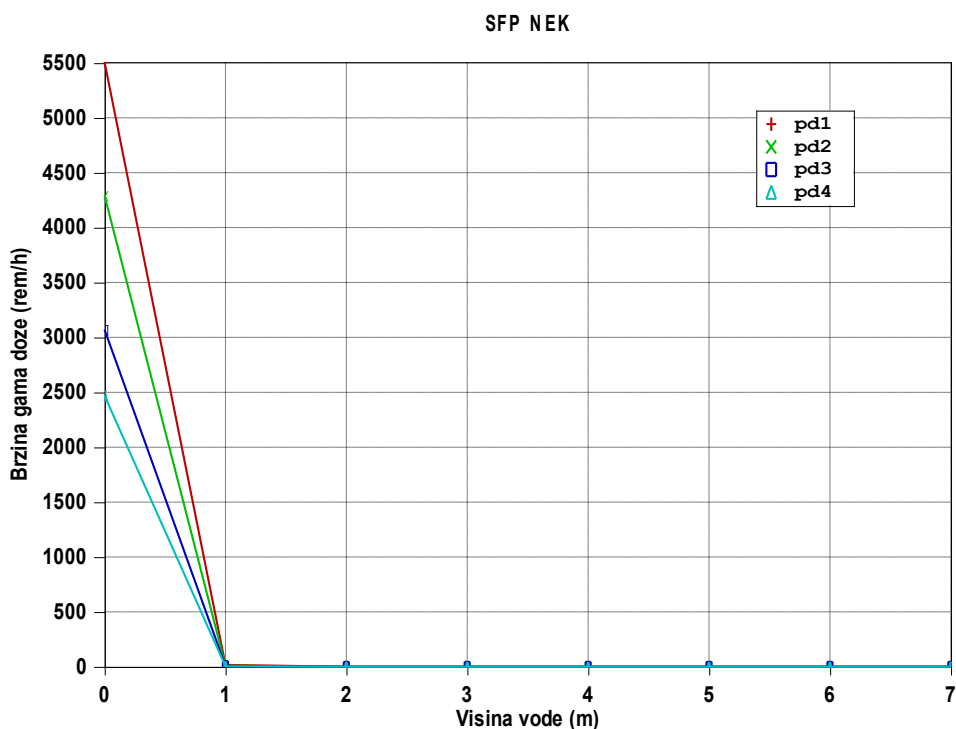
- centar starog dijela bazena, u visini ruba bazena, pd1,
- bok starog dijela bazena, u visini ruba bazena, pd2,
- centar novog dijela bazena, u visini ruba bazena, pd3, i
- bok novog dijela bazena, u visini ruba bazena, pd4.

Brzina doze za navedene lokacije u ovisnosti o brzini gubitka hladioca s početnih vrijednosti (1 odnosno 7 m) prikazane su na slikama 51 i 52. Ovi izračuni pokazuju da se operaterske akcije na tim lokacijama moraju izvesti što je brže moguće i u periodu kada razina vode nije pala ispod jednog metra nad gorivom. Naravno, sve se operaterske akcije moraju izvesti uz prisustvo osoblja iz radiološke zaštite, kao što je i predviđeno pogonski postupcima u primjeru teške nesreće (SAMG).

–



Slika 53: Brzina doze na različitim lokacijama u FHB u ovisnosti o visini vode nad gorivnim elementima u SFP (početna visina 7 m)



Slika 54: Brzina doze na različitim lokacijama u FHB u ovisnosti o visini vode nad gorivnim elementima u SFP (početna visina 1 m)

## **6. Podloge za izradu aplikacije za pomoć pri odlučivanju o tehničkim mjerama ili korištenju pojedinih operaterskih akcija**

### **6.1 Dosadašnji rad na istraživanju odlučivanja o tehničkim mjerama ili korištenju pojedinih operaterskih akcija u nuklearnim elektranama s tlakovodnim reaktorom**

EU NARSIS (*New Approach to Reactor Safety Improvements*) projekt (<http://www.narsis.eu/>) iz serije HORIZON 2020, proveden od 2017. do 2020. godine, uključivao je 18 partnera (zajedno s APOSS d.o.o., društvom iz Hrvatske, čiji je doktorand suvlasnik i direktor, s dr. Ivanom Vrbanićem, <https://aposs.hr/>) iz devet europskih zemalja. Projekt je bio motiviran preporukama formuliranim nakon nesreće u nuklearnoj elektrani Fukushima Daiichi, te je prepoznao potrebu za „traženjem novih pristupa i djelovanja na temelju njih“ o opasnostima, uključujući kombinirane prirodne događaje, i za poboljšanje sustava nuklearnih postrojenja, korištenje sustava/resursa i obuku kako bi se omogućio učinkovit odgovor na teške nesreće. Cilj projekta bilo je poboljšanje postojećih postupaka procjene sigurnosti iz niza aspekata, uključujući razmatranje različitih hazardnih događaja i njihovih kombinacija, modeliranje odziva elektrane i posljedične scenarije oštećenja, te modeliranje prosudbe timova za savladavanje nezgodnih stanja i neodređenosti takvih prosudbi. Osim pružanja znanstvenog okvira, projekt je imao za cilj osigurati metode demonstracije i softverski alat za upravljanje teškim nezgodama (*Severe Accidents*). NARSIS se sastojao od pet razvojnih paketa: (1) Karakterizacije vanjskih opasnosti za nuklearne elektrane (WP1), (2) Analize ranjivosti glavnih komponenti nuklearnih elektrana (WP2), (3) Integracije vjerojatnosnih i determinističnih sigurnosnih analiza (WP3), (4) Razvoja i validacije modela (primjena i usporedba različitih pristupa procjeni sigurnosti na virtualnom reaktoru) (WP4), te (5) Razvoja pomoćnog računalnog alata za upravljanje teškim nesrećama (WP5).

Tijekom projekta NARSIS, kao istraživač ispred APOSS d.o.o., doktorand je sudjelovao u razvojnim paketima WP3, WP4 i WP5 i izradi dokumentacije u obliku tehničkih izvještaja čiji su sažetci uglavnom objavljeni u znanstvenim člancima [55], [56], [57] i [58].

Tijekom rada na projektu NARSIS u razvojnom paketu WP5, između ostalog, razvijeno je oruđe SEVERA kao pomoćno oruđe članovima potpornog centra (TSC) za savladavanje teških nesreća. Razvijeno oruđe SEVERA je prototip softverskog alata za podršku odlučivanju TSC u upravljanju teškim nesrećama [56]. SEVERA sadržava module za:

- predstavljanje, pohranjivanje i praćenje odabranih fizičkih mjerenja u nuklearnoj elektrani,

- procjenu trenutnog stanja vitalnih barijera: jezgre (goriva), primarnog kruga (RCS) odnosno reaktorskoj posudi i kontejnmentu,
- predviđanje budućeg razvoja nesreće u slučaju da se ništa ne poduzme od strane članova tima TSC-a,
- identificiranje mogućih strategija oporavka upravljanja i smjerova djelovanja,
- procjenu primjenjivosti i izvedivosti strategija u danoj situaciji,
- predviđanja posljedica u smislu vjerojatnosti kvara posljednje barijere (kontejnment) i procijenjeni vremenski okvir za taj kvar, i
- evaluaciju i rangiranje izvedivih radnji, odnosno davanje preporuka za članove tima TSC.

Navedene funkcije koriste se u ponovljenim ciklusima donošenja odluka u primjeru korištenja SAMG-ova. Svaki ciklus otprilike traje oko 10 do 20 minuta i sastoji se od sljedećih glavnih koraka:

1. praćenje ključnih parametara rada elektrane te raspoloživosti/učinkovitosti sustava postrojenja,
2. procjena stanja oštećenja barijera. Identifikacija tehničkih izazova za barijere koje su već izazvane ili bi se mogli pojaviti tijekom evaluacije,
3. predviđanje mogućih budućih napredovanja nesreće i moguće posljedice u slučaju da se ne poduzmu nikakve operaterske akcije,
4. identificiranje mogućih alternativnih sustava/djelovanja uključujući radnje koje zahtijevaju SAMG-ovi (uključujući prioritetne akcije iz SAMGova) uzimajući u obzir dostupnost sustava/funkcija postrojenja i vremenske okvire potrebne za provedbu svake radnje,
5. procjena izvedivosti za svaku identificiranu alternativu u danoj situaciji,
6. predviđanje moguće posljedice povezane sa svakom radnjom u smislu očekivanih radioaktivnih ispuštanja u okoliš,
7. usporedba alternativne mjere i djelovanja na temelju rezultata prvobitne upotrebe SEVERA-e alata i preporuka alternative za nastavak strategija, i
8. provedba odabrane alternativne radnje i promatranje odziva kritičnih parametara elektrane.

Modul za praćenje kritičnih parametara ima za cilj pružanje informacija o trenutnom stanju zaštitnih barijera elektrane i moguće progresije događaja koji bi se dogodili bez

operaterskih akcija ili interвенncija članova tima TSC. Modul uzima stvarne podatke iz informatičkog sistema elektrane u vremenskim razmacima za osam kritičnih parametara:

- CET: izlazna temperatura jezgre [°C]
- SGL: razina vode u generatoru pare [m]
- RPVL: razina vode tlačne posude reaktora [%]
- Prcs: tlak primarnog sustava rashladne tekućine reaktora [MPa]
- Pcont: tlak kontejnmenta [MPa]
- Tcont: temperatura kontejnmenta [°C]
- Lcont: razina vode u kontejnmentu [m]
- H2: koncentracija vodika u kontejnmentu [%]

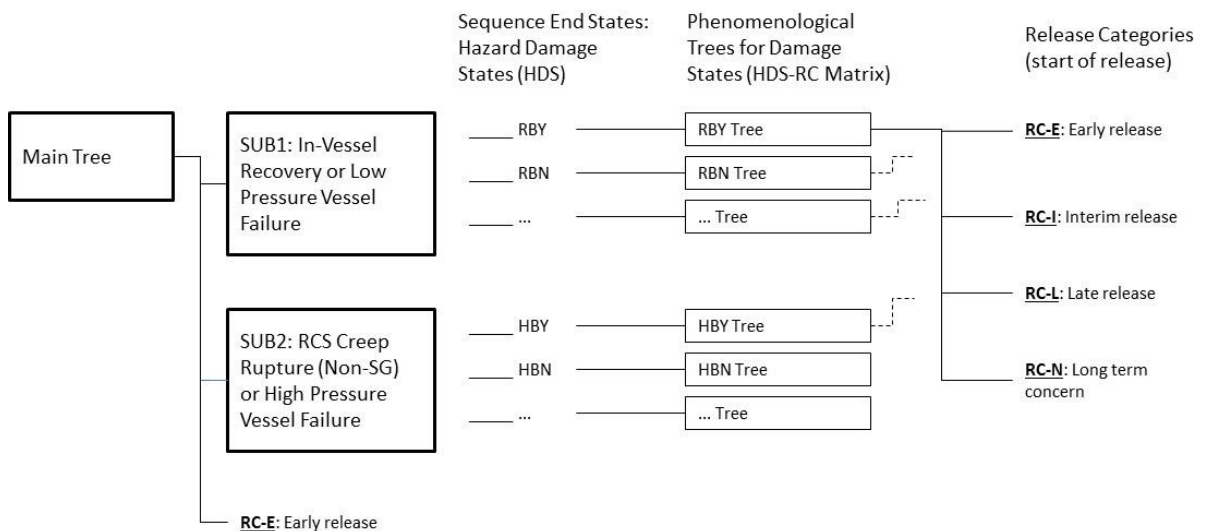
Kao istraživač APOSS d.o.o., doktorand je, u suradnji s dr. Ivanom Vrbanićem, pripremio sljedeće podloge [59] za logički model i izradu aplikacije SEVERA:

1. Logički model za ocjenu razvoja teške nesreće;
  - a. Pojednostavljena stabla događaja za PSA razina 1 i razine 2 te generalizirani model fenomenološkog stabla događaja, Slika 56);
2. Definicije hazardnih stanja za logički model;
  - a. Definicije tipova početnih događaja;
  - b. Ocjenu vremena oštećenja jezgri (TW - *time window*) na osnovi definiranih scenarija i determinističkih analiza provedenih MAAP oruđem [57].;
  - c. Definicije stanja sustava za sigurnosno ubrizgavanje u reaktor (ECCS);
  - d. Definicije stanja za odvođenje topline iz kontejnmenta (CHR);
3. Karakterizaciju hazardnih stanja (tlak RCS sustava prilikom loma reaktorske posude, status ECCS, status CHR, itd.);
4. Karakterizaciju sigurnosnih funkcija i zaštitnih sustava (reaktora I kontejnmenta)
5. Strukturu logičkog modela progresije teške nesreće;
  - a. Stablo događaja progressa nesreće (APET – *Accident Progression Event Tree*), Slika 55;
  - b. Vjerojatnosni model za oporavak pojedine zaštitne funkcije (Slika 64).
6. Definicije mogućih operaterskih akcija tijekom progresije teške nesreće (AOP/EOP/SAMG)

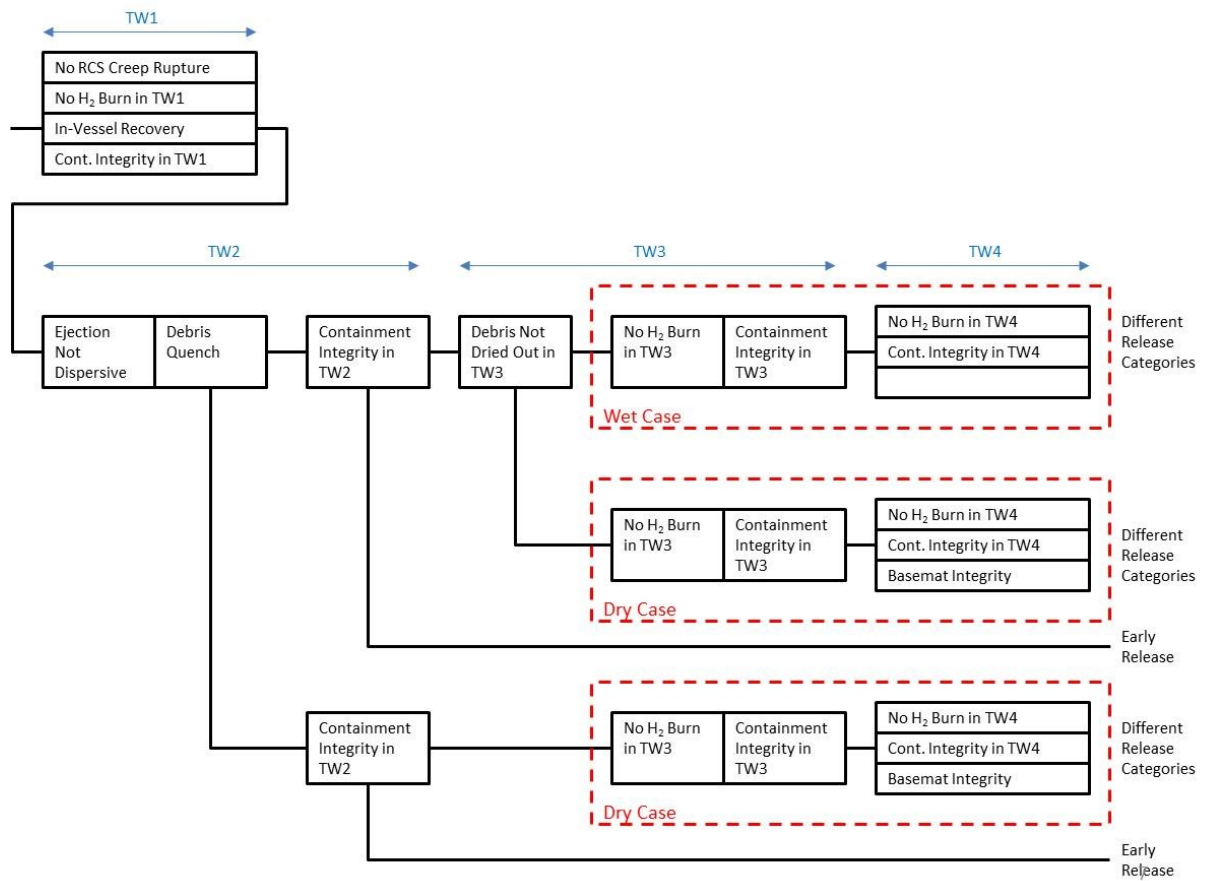
- a. Procjenu stanja elektrane na osnovi predefiniраниh kritičnih parametara (Slika 1 prikazuje pojednostavljen model procjene stanja primarnog kruga reaktora. Slika 2 prikazuje pojednostavljen model procjene stanja u kontejnmentu.)
  - b. Definicije parametara za ulaz u pojedine SAMG-ove te kriterija za rangiranje pojedinog stanja prema izmjerenoj veličini promatranog kritičnog parametra;
7. Definicije atributa za odlučivanje na osnovi četiri kategorije ispuštanja radioaktivnosti RC-E, RC-I, RC-L odnosno RC-N.

Atributi za odlučivanje na osnovi četiri kategorije ispuštanja radioaktivnosti:

- RC-E: Očekuje se kvar kontejnmenta sa značajnim ispuštanjem radioaktivnosti nekoliko sati.
- RC-I: Kvar kontejnmenta sa značajnim oslobađanjem radioaktivnosti unutar nekoliko dana.
- RC-L: Ne očekuje se značajno ispuštanje radioaktivnosti u roku od nekoliko dana.
- RC-N: Nema opasnosti od ispuštanja u dužem periodu (oporavak u posudi i/ili intaktno zadržavanje).



**Slika 55: Generalizirana APET struktura**



**Slika 56: Koncept fenomenološkog stabla događaja**



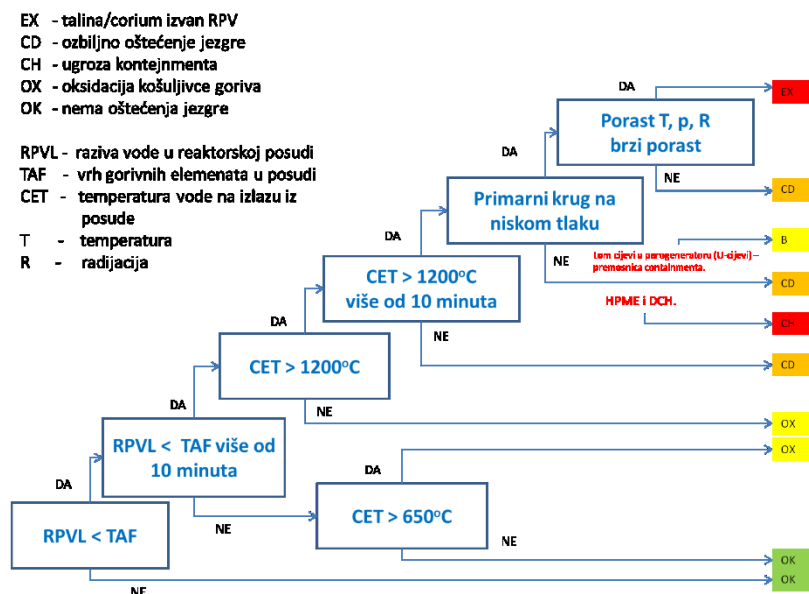
Na osnovi navedenih parametara te podloga i logičkih modela koje je razvio APOSS d.o.o [59], oruđe SEVERA ocjenjuje stanje elektrane.

SEVERA procjenom stanja pokušava odrediti odgovore na sljedeća pitanja:

- Koja je vrsta nezgode s obzirom na RCS tlak: visoka ili niska?
- Kakvo je očekivano stanje barijera u kratkom periodu bez operatreskih akcija?
- Koja su moguća napredovanja nesreće bez poduzimanja bilo kakve radnje operatera?

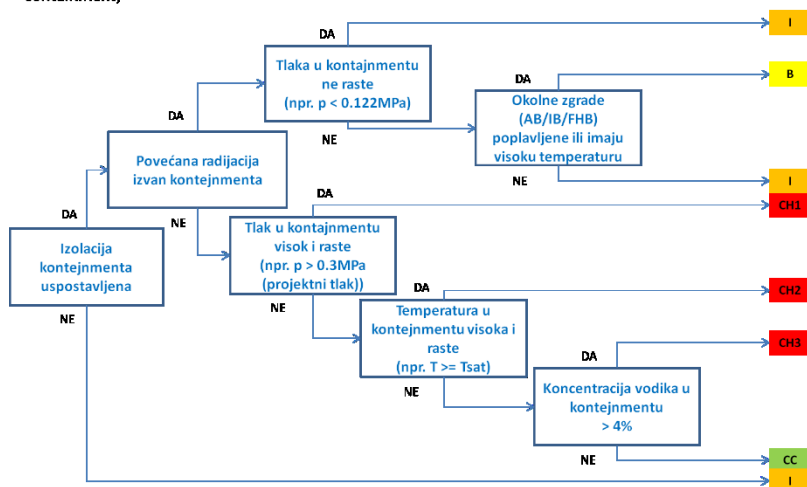
Kako SEVERA proizvodi takve ocjene? Jezgru modula čini kvalitativni hijerarhijski višekriterijski model razvijen prema metodi DEX. DEX (*Decision Expert*) [60] je zapravo metoda kvalitativne višekriterijske analize odluka (MCDA) za donošenje odluka i implementirana je u DEX softver. Ovu metodu razvio je istraživački tim pod vodstvom dr. Bohanca, dr. Bratka i dr. Rajkoviča na Institutu Jozef Štefan u Ljubljani. Dr. Bohanec bio je suradnik APOSS d.o.o. na WP5 upravo na razvoju softverskog rješenja SEVERA-e. U biti, DEX model se sastoji od prioritizacije diskretnih atributa, koji svaki predstavlja određeni aspekt modeliranog procesa (Slika 59). Veze predstavljaju ovisnosti, tako da atributi više razine (prikazani s lijeve strane) ovise o onima niže razine (desno). Slika 59, ako se gleda u smjeru lijevo-desno, predstavlja raščlanjivanje problema na podprobleme. Suprotno, smjer desno-lijevo, predstavlja združivanje ulaznih podataka u ukupne ocjene.

Detaljno objašnjenje modela SEVERA je izvan okvira ovog rada a primjena u NARSIS-detaljnije je opisano u [55] i [58]. Slika 59 pokazuje pojednostavljeno razvijena 4 modula koji pripadaju četirima različitim slojevima.

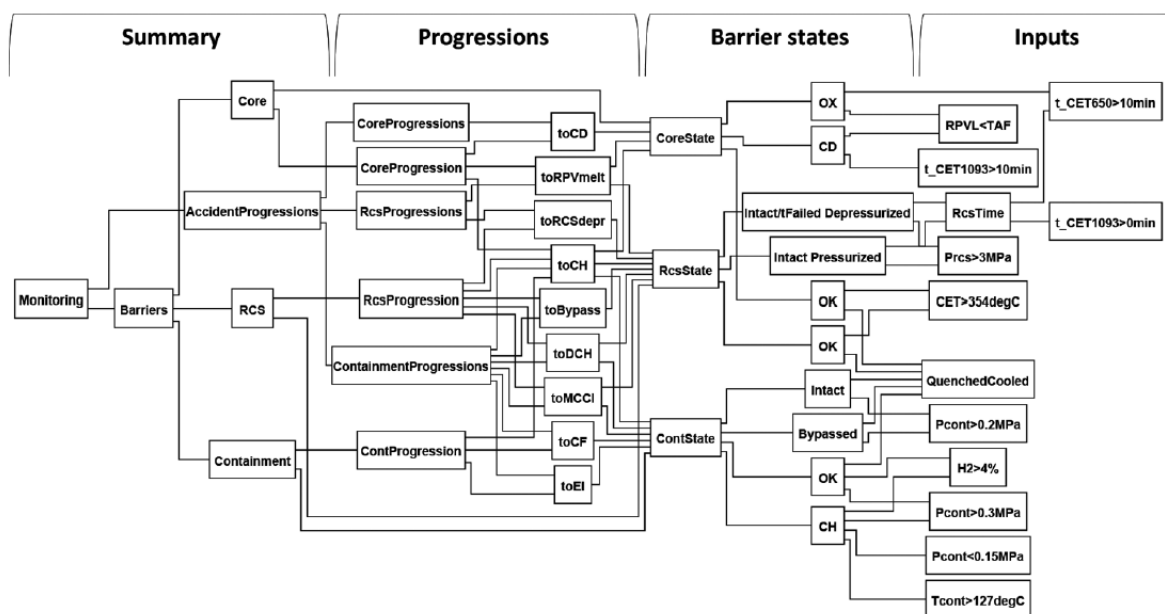


Slika 57: Model pojednostavljene procjene stanja primarnog kruga

- I – oštećenje nepropusnosti kontejnment (impaired)
- B – istjecanje mimo kontajnmnt barijera (bypass)
- CH – ugroza kontejnmenta (containment challenge)
- CC – stabilan i hladan kontejnment (cooled and stable containment)



Slika 58: Model pojednostavljene procjena stanja u kontejnmentu

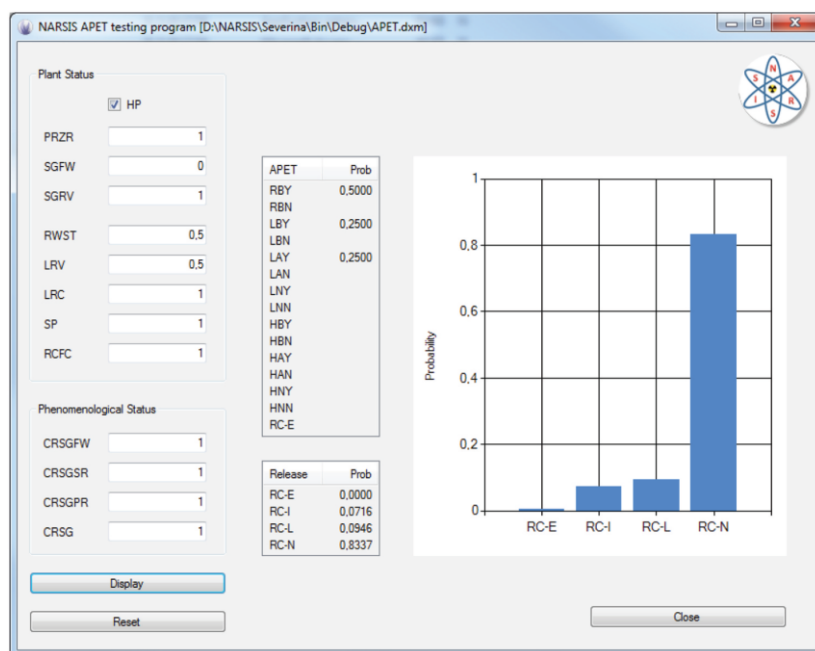


Slika 59: Hijerarhijska struktura SEVERA DEX modela

Druga implementirana komponenta SEVERA-e pripada evaluaciji primjenjenih operatorskih akcija, odnosno preporuka članova tima TSC u skladu sa SAMG-ovima za što je doktorand pripremio podlogu te konceptualni logički model opisan gore. Nakon što je moguće radnje upravljanja nesrećom identificirati i provesti u koraku 4, cilj je procijeniti očekivana radioaktivna ispuštanja povezana s provedbom neke osnovne ili alternativne operatorske akcije. Naime, različite alternative koriste različitu opremu i slijede različite strategije upravljanja nesrećama, mogu imati različite stope uspjeha i stoga različite posljedice.

Posljedice su predstavljene distribucijom vjerojatnosti četiri kategorije ispuštanja radioaktivnosti RC-E, RC-I, RC-L odnosno RC-N, koje su definirane gore.

Slika 60 prikazuje primjer procjene radioaktivnih ispuštanja za određenu akciju operatera. Kako se dobivaju takve ocjene? Postoji temeljni DEX model koji se sastoji od hijerarhije (stupnjevanja) atributa i pravila odlučivanja. Razlozi korištenja DEX-a u ovome slučaju su dvojaki: (1) zaključak se može odrediti pravilima odlučivanja koja djeluju na diskretne multivarijatne varijable, i (2) zaključivanje pomoću vjerojatnosti distribucije varijabli. Nadalje, pravila su razumljiva i zaključak se može relativno lako formulirati iz analize modeliranih stabala događaja (napredovanja nezgode),[55] i [57], što je uobičajeni prikaz sekvenci događaja u vjerojatnostnim sigurnosnim analizama. Sam model je donekle specifičan i zahtijeva dobro razumijevanje tehnologije i pogona nuklearne elektrane, stoga je detaljan opis samog modela izvan dosega ovog rada.



**Slika 60: Primjer procjene radioaktivnih ispuštanja za određenu akciju operatera ili TSC.**

## **6.2 Podloge za izradu aplikacije za pomoć pri odlučivanju o tehničkim mjerama ili korištenju pojedinih operaterskih akcija na osnovi ovoga doktorskog rada**

Kao što je vidljivo iz gore navedenoga, NARSIS SEVERA modelira samo stanja primarnih zaštitnih barijera (jezgra, primarni krug te kontejnment), a ne razmatra u obzir mogući ispušt radioaktivnosti zbog nezgodnih stanja u SFP. Ova doktorska disertacija bavi se nezgodnim stanjima SFP i djelomično verifikacijom potencijalnog utjecaja stanja oštećenja jezgre reaktora (poglavlje 5) na zaštitne sustave SFP, odnosno potencijalne operaterske akcije u FHB gdje se SFP nalazi.

Kao što je prikazano u prethodnim poglavljima ovog rada, vjerojatnost teške nesreće u SFP je manja od vjerojatnosti za oštećenje jezgre u reaktoru, međutim, obzirom se SFP nalazi izvan kontejnmenta (u FHB), radioaktivni ispusti zbog potencijalne teške nesreće mogu biti istoga reda veličine (ne uzimajući u obzir da NE Krško npr. ima pasivni filtrirani sistem ventilacije kontejnmenta pa bi ispusti u slučaju oštećenja jezgre bili drastično umanjeni).

Posebnu pažnju treba posvetiti nesrećama zajedničkog uzroka (npr. potpuni gubitak električnog napajanja, seizmička aktivnost nad projektnim vrijednostima, veći požar unutar elektrane, pad aviona, i slično) koji mogu uzrokovati gubitke sustava, komponenti i struktura koje su zajedničke zaštitnim sustavima reaktora, kontejnmenta odnosno SFP.

Današnje procedure za ovladavanje teških nesreća (SAMG) u svom dokumentu za dijagnostiku (DPG – *Diagnostic Process Guideline*) među kritične parametre elektrane uključuju i razinu vode u SFP te na osnovu te razine usmjeravaju operatere odnosno članove tima TSC na pojedine akcije bilo projektiranim zaštitnim sustavima ili alternativnim, na sličan način kao što je opisano u podpoglavlju gore za SEVERA-u.

Jednako kao za evaluaciju stanja jezgre (goriva u reaktorskoj posudi) odnosno kontejnmentu, za implementaciju analize SFP koja je provedena u ovoj doktorskoj disertaciji potrebno je definirati sljedeće korake:

1. praćenje ključnih parametara rada elektrane (temperature i razine vode u SFP) te raspoloživosti/učinkovitosti sustava za hlađenje SFP,
2. procjenu stanja oštećenja SFP: prvenstveno se odnosi na određivanje vremena do ključanja vode u SFP odnosno vremena do otkrivanja istrošenog goriva smještenog u SFP. Identifikacija tehničkih izazova za zaštitne sustave SFP koji su već izazvani ili bi se mogli pojaviti tijekom evaluacije,

3. predviđanje napredovanja nezgode od trenutka ključanja vode u SFP do otkrivanja istrošenog goriva smještenog u SFP i moguće posljedice u slučaju da se ne poduzmu nikakve operaterske akcije.
4. identifikaciju mogućih alternativnih sustava/djelovanja uključujući radnje koje zahtijevaju SAMG-ovi (uključujući prioritetne akcije iz SAMG-ova koje se odnose na zaštitne funkcije SFP) uzimajući u obzir dostupnost sustava/funkcija postrojenja i vremenske okvire potrebne za provedbu svake radnje,
5. procjenu izvedivosti svake identificirane alternative u danoj situaciji.
6. predviđanje moguće posljedice povezane sa svakom radnjom u smislu očekivanih radioaktivnih ispuštanja u okoliš,
7. usporedbu alternativnih mjera i djelovanja na temelju rezultata vjerojatnosne analize koja je opisana u poglavlju 3.6,
8. provedba odabrane alternativne radnje i promatranje odziva kritičnih parametara vezanih uz SFP.

Na osnovi istraživačkog rada doktoranda na projektu NARSIS, opisanom u poglavlju iznad (6.1), ova disertacija sa svojim evaluacijama i rezultatima vjerojatnosnih i determinističkih analiza definira sljedeće podloge za dopunu logičkog modela i aplikacije SEVERA:

1. Logički model za ocjenu razvoja teške nesreće u SFP. Razvijena stabla događaja za vjerojatnosne analize SFP (Slika 61 predstavlja ilustraciju općeg logičkog stabla događaja za SFP.):
  - Slika 10: Stablo događaja za gubitak SFP hlađenja zbog slučajnih uzroka (PIEV--LOC),
  - Slika 11: Stablo događaja za gubitak SFP hlađenja zbog gubitka vanjskog napajanja (PIEV--LOCB),
  - Slika 12: Stablo događaja za gubitak SFP hlađenja uzrokovan potpunim gubitkom CCW ili ESW (PIEV--LOCW),
  - Slika 13: Stablo događaja za mali gubitak SFP inventara (PIEV--LOIS),
  - Slika 14: Stablo događaja za veliki gubitak SFP inventara (PIEV--LOIL),
2. Definicije hazardnih stanja za logički model SFP:
  - a. Definicije tipova početnih događaja za SFP (poglavlje 3.3):
    - Gubitak SFP hlađenja, i
    - Gubitak zaliha SFP rashladnog sredstva;

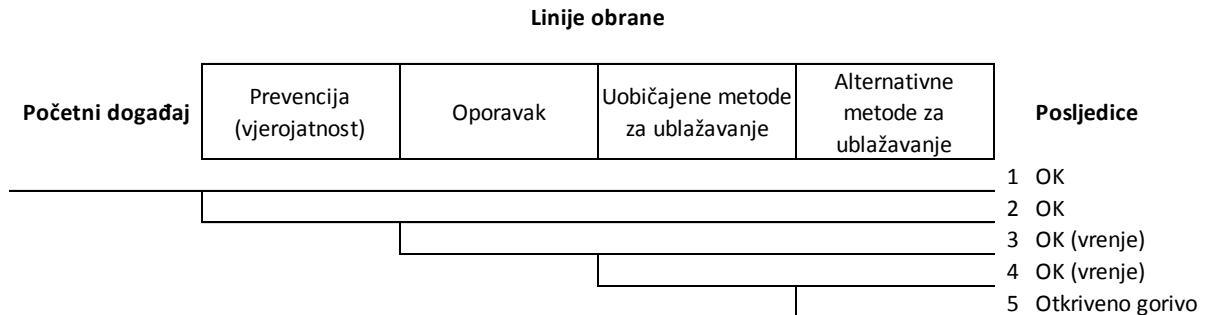
- b. Ocjenu vremenskih okvira:
  - do točke ključanja u SFP (poglavlje 3.4.1 ove disertacije);
  - do točke otkrivanja istrošenih gorivnih elemenata smještenih u SFP (poglavlje 3.4.2);
  - do oštećenja gorivnih elemenata s pretpostavljenim gubitkom vode iz SFP (10 cm<sup>2</sup> otvor, bez korištenja i s korištenjem spreja/mlaznica za raspršivanje vode u SFP). Analiza je provedena MELCOR računalnim programom u poglavlju 4 (Slika 65 i Slika 66 ispod ilustriraju provedene analize);
  - do potencijalnog upliva ispuštenog zapaljivog vodika radi taljenja jezgre u kontejntu (ili CO kao posljedice MCCI) na uvijete u anulusu/FHB. Analiza je provedena MAAP5.03 računalnim programom u poglavlju 5. Koncentracije zapaljivih plinova bi mogle dovesti do zapaljenja i do strukturnog oštećenja FHB (Slika 67 ilustrira analizu granica deflagracije i detonacije za različite SBO scenarije analizirane u poglavlju 5.);
  - za dozvoljen dostup operaterskog osoblja FHBu (SFP) u primjeru povećanja doza zbog gubitka razine vode u SFP. Doza na rubu SFP raste sa snižavanjem razine vode te može biti veća od 1000 µSv/h (0.1 rem/h) (limit za ulazak u prostore, V zona po NEK USAR-u, poglavlje 12.1.1) kada razina vode padne ispod 1.5 m nad vrhom istrošenih gorivnih elemenata smještenih u SFP. Analiza doza je predstavljena u poglavlju 5.5 iznad. Slika 68 ilustrira brzinu doze na rubu bazena SFP za različite lokacije, ovisno o razini vode nad gorivnim elementima smještenima u SFP;
- c. Definicije stanja sustava za osiguravanje sigurnosnih zaštitnih funkcija SFP, poglavlje 3.6.1:
  - odvođenje ostatne topline iz SFP, i
  - nadopuna inventara vode (hladioca u SFP);
- 3. Karakterizaciju sigurnosnih funkcija zaštitnih sustava SFP i izradu modela stabala kvarova za navedene sustave (poglavlje 3.6.1):
  - SFP sustav hlađenja,
  - SFP sustav konekcije sa RWST (Refueling Water Storage Tanka),
  - Linija za pročišćavanje SFP,
  - WS linija za pročišćavanje,
  - SFP sustav konekcije sa RMWST (Reactor Makeup Water Storage Tank),

- SFP sustav konekcije iz WT (Water Treatment) spremnika,
  - SFP nadopuna inventara vode i hlađenje alternativnim metodama.
4. Strukturu logičkog modela progresije teške nesreće u SFP;
    - a. Integracija razvijenih stabala događaja za vjerojatnosne analize SFP pod 1. gore.
    - b. Procjena utjecaja dodatnih/alternativnih sistema za sprečavanje ili ublažavanje teških nezgoda u SFP. Tablica 24 prikazuje kvantificiran potencijal za smanjenje učestalosti SFU (otkrivanje gorivnih elemenata u SFP) alternativnim sustavima hlađenja i prskanja.
    - c. Vjerojatnosni model za oporavak pojedine zaštitne funkcije (Slika 64).
  5. Definicije mogućih operaterskih akcija za sprečavanje ili ublažavanja posljedica otkrivanja istrošenih elemenata u SFP (AOP/EOP/SAMG) uključno s:
    - a. Procjenom stanja SFP na osnovu predefiniраниh kritičnih parametara:
      - temperatura vode u SFP = 98°C ukazuje na mogućnost ključanja vode u SFP,
      - razina vode u SFP ispod 0.36 m iznad vrha gorivnih elemenata smještenih u SFP ukazuje na mogućnost otkrivanja istih.
    - b. Definicijom parametara za ulaz u pojedine SAMGove, te kriterija za rangiranje pojedinog stanja prema izmjerenoj veličini promatranog kritičnog parametra (Slika 62 prikazuje smjernice za procjenu važnosti trenutnog stanja u SFP);
    - c. Modelom potencijalnih operaterskih akcija (projektnih ili alternativnih (npr. vanjskih mlaznica za raspršenje vode po gorivnim elementima). Slika 63 prikazuje pojednostavljeni model operaterskih akcija za ublažavanje nezgode sa gubitkom hladioca (vode) u SFP koji se odnosi na upotrebu SAMG-ova SAG-10.1 odnosno 10.2.
  6. Definicije atributa za odlučivanje na osnovu četiri kategorije ispuštanja radioaktivnosti RC-E, RC-I, RC-L odnosno RC-N, slično za SEVERA modul opisan u poglavlju 6.1.

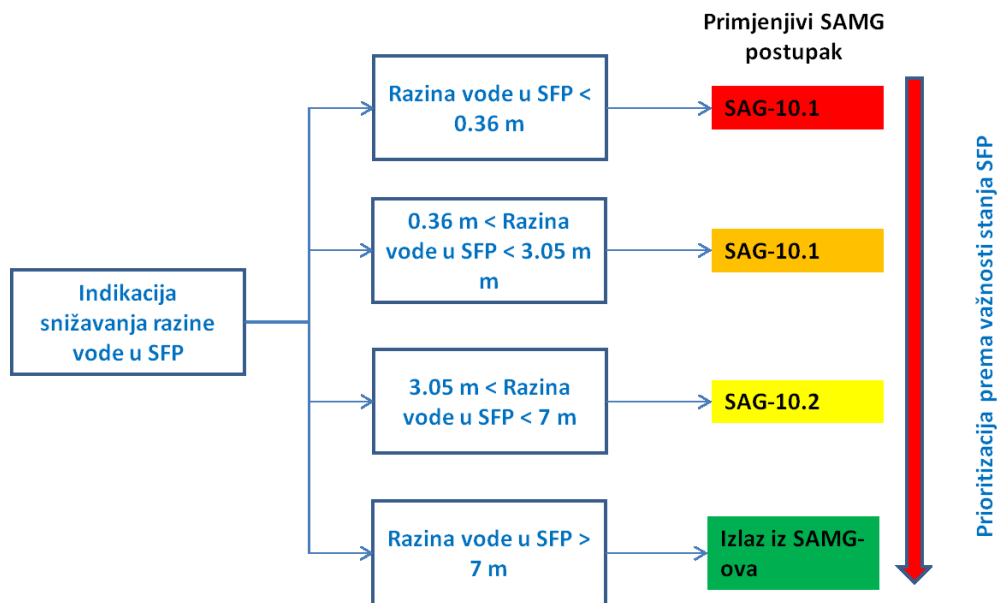
Atributi za odlučivanje na osnovi četiri kategorije ispuštanja radioaktivnosti od doprinosa evaluacije integriranog SFP modela su:

- RC-E: Očekuje se otkrivanje istrošenih gorivnih elemenata u SFP sa značajnim ispuštanjem radioaktivnosti u nekoliko sati.

- RC-I: Očekuje se otkrivanje istrošenih gorivnih elemenata u SFP sa značajnim oslobađanjem radioaktivnosti unutar nekoliko dana.
- RC-L: Ne očekuje se značajno ispuštanje radioaktivnosti iz SFP u roku od nekoliko dana.
- RC-N: Nema opasnosti od ispuštanja u dužem periodu (oporavak u inventara vode (hladioca) u SFP osudi).



**Slika 61: Ilustracija općeg logičkog stabla (stabla događaja)**

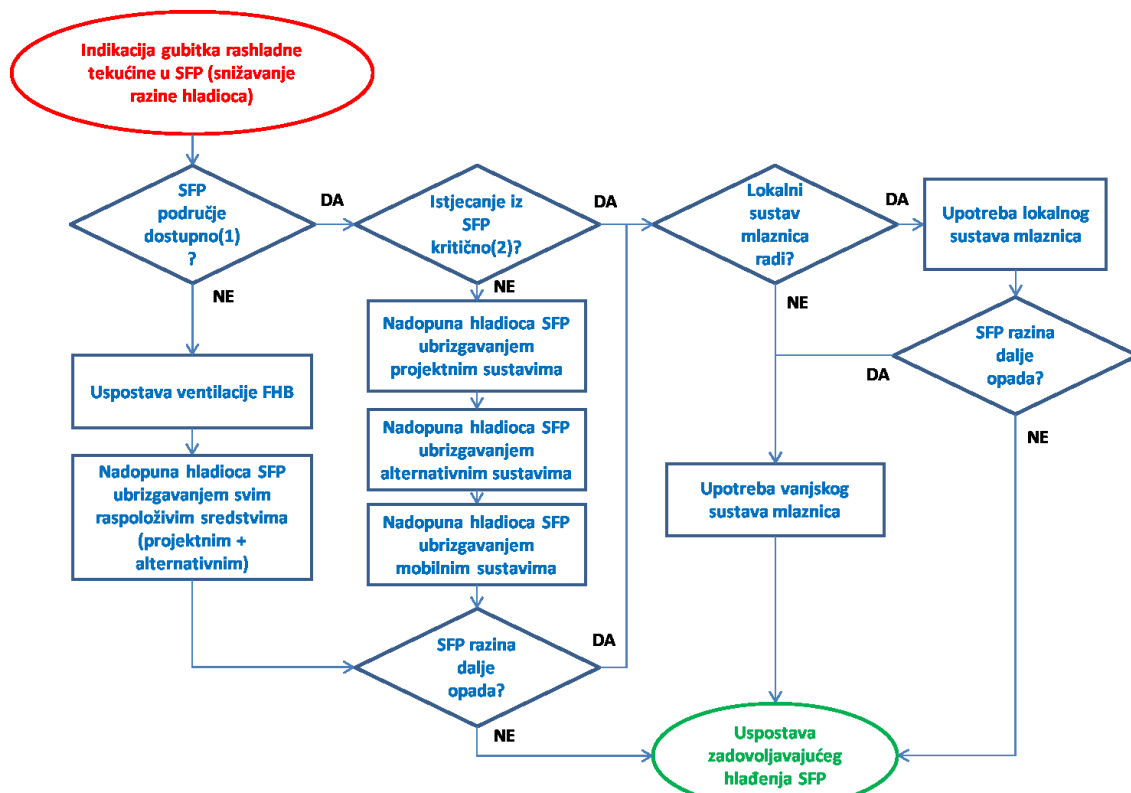


**Slika 62: SAMG smjernice za dijagnostički proces (DPG)**

Slika 63 pokazuje pojednostavljeni model potencijalnih operatorskih akcija u primjeru gubitka inventara vode u SFP.



Treba napomenuti da su sve akcije modelirane u demonstracijskom PSA modelu SFP, opisanom u prethodnim poglavljima (3.5 do 3.8), te vjerojatnostno ocijenjen njihov učinak u poglavlju 3.9.



**Slika 63: Pojednostavljeni model operaterskih akcija za ublažavanje nezgode sa gubitkom hladioca (vode) u SFP**

#### Bilješke:

- (1) Dostupnost radnog prostora SFP (nalazi se u FHB) ovisi o brzini doze (bilo radi ispusta iz kontejnmenta nakon oštećenja jezgre u reaktoru ili snižavanje razine vode u SFP). Vidi poglavlje 5.5. Dostupnost je ključna za strategije alternativnog nadopunjavanja bazena ili alternativnog raspršivanja vode po gorivnim elementima izvana ako zakažu projektni sustavi SFP.
- (2) Veliki gubitak vode (hladioca) znači da se radi o istjecanju vode, a ne gubitku samo zbog isparavanja, te ga normalni sustavi za nadopunu vode ne mogu odmah nadoknaditi. Nekontrolirani gubitak vode (hladioca) znači da ga normalni sustavi za nadopunu vode ne mogu nadoknaditi, pa je potrebna primjena alternativnih unutarnjih (unutar FHB) ili vanjskih (izvan FHB) strategija sa znatno višim kapacitetima. Pod alternativnim sustavima misli se na dostupnu opremu na elektrani za unos unutar FHB ili primjenu izvan FHB (npr. vatrogasna oprema, kao što su potopne crpke za rijeku Savu, te cijevi do FHB, itd.).

Kao što je opisano u poglavlju 3.8, istražen je potencijal (mogućnost) smanjenja rizika za SFP nakon instalacije novog alternativnog SFP rashladnog sustava/sustava raspršivanja (deterministička analiza je provedena u poglavlju 4). U tu svrhu kvarovi trenutnih alternativnih metoda su, u SFP PSA modelu, logički dodani s novim osnovnim događajem koji predstavlja kvarove hipotetskog novog(ih) sustava. Operaterske akcije, osnovni događaj i pridruženi HEP ostavljeni su kakvi jesu jer se smatra da bi svaka „nova“ ljudska pogreška

povezana s pokretanjem novih sustava ovisila o trenutno modeliranim pogreškama povezanim s implementacijom postojećih funkcija (ovo ostaje kao potencijalni konzervativizam).

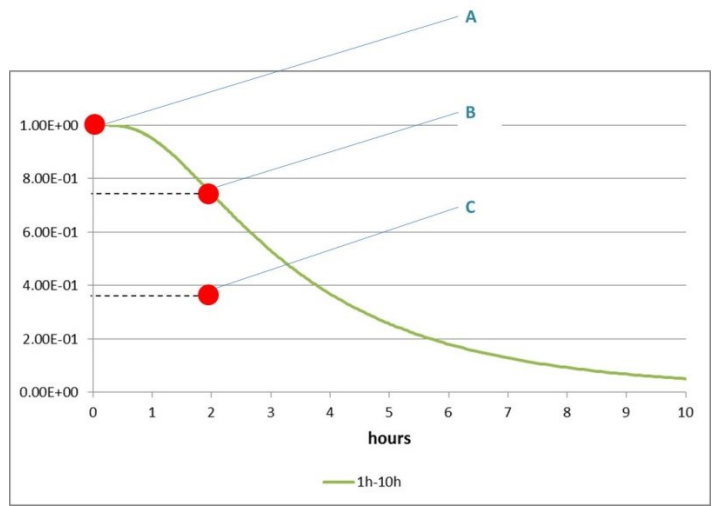
Tablica 24 prikazuje rezultate provedene analize potencijala (mogućnosti) smanjenja rizika za SFP nakon instalacije novog alternativnog SFP rashladnog sustava/sustava raspršivanja. Analizirana su dva slučaja, jedan s vjerojatnošću kvara (Q) novih sustava postavljenom na 10%, a drugi s istom vjerojatnošću postavljenom na 1%.

**Tablica 24: Potencijal za smanjenje učestalosti SFU alternativnim sustavima hlađenja i prskanja**

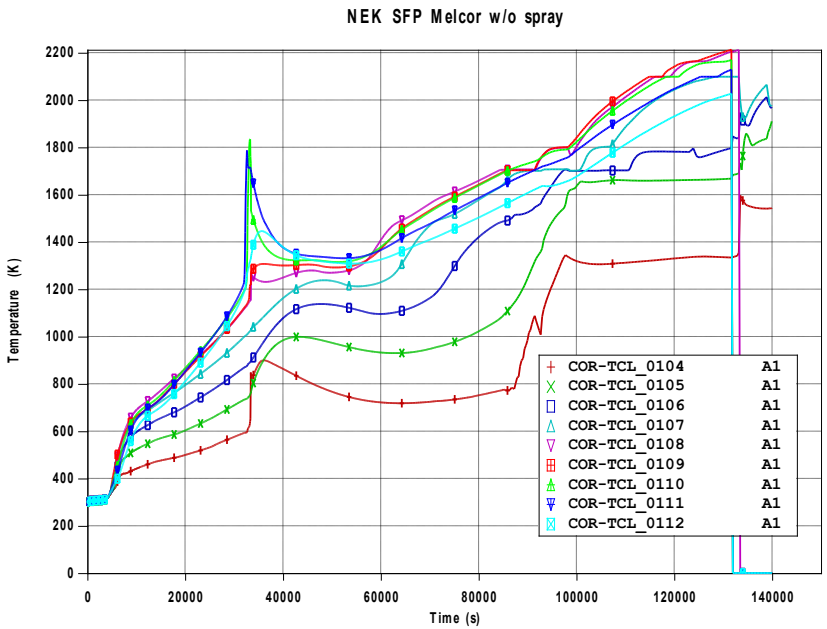
SFP Stanje	Osnovni SFU frekvencija /god	Novi SFU frekvencija /god	
		Q = 10%	Q = 1%
B	1.08E-09	9.77E-10	9.66E-10
C1	1.51E-10	7.53E-11	6.78E-11
D1	1.04E-08	9.41E-09	9.30E-09
E	4.95E-09	2.82E-09	2.60E-09
D2	1.03E-08	9.34E-09	9.24E-09
C2	1.53E-10	7.73E-11	6.97E-11
A2	9.91E-09	5.66E-09	5.23E-09
A1	5.21E-08	2.95E-08	2.72E-08
<b>Ukupno</b>	<b>8.90E-08</b>	<b>5.79E-08</b>	<b>5.47E-08</b>
<b>% of Base Case</b>	<b>100.0%</b>	<b>65.0%</b>	<b>61.4%</b>

Razmatrani vjerojatnostni model može se koristiti za prilagodbu vjerojatnosti uspješne uspostave ili oporavka funkcije (sustava ili opreme). Slika 64 prikazuje tri različite vjerojatnosti koje je uspostavio model za tri različita stanja ili situacije:

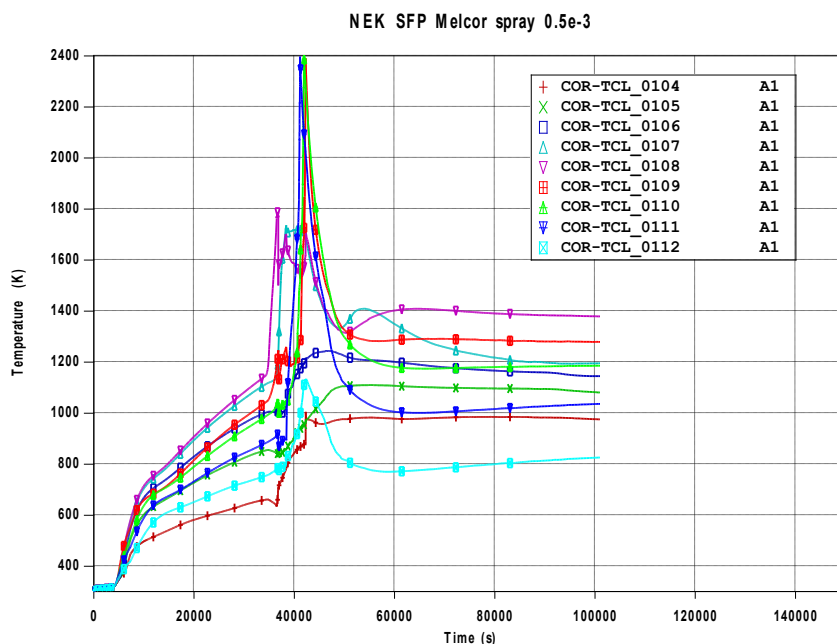
- A. Oprema za provedbu funkcije smatra se odgovarajućom i sada je dostupna.
- B. Oprema za provedbu funkcije smatra se odgovarajućom ali trenutno nije dostupna. Analitičar (član TSC tima) je uvjeren da će oprema biti dostupna za manje od 2 sata.
- C. Oprema mora biti dostupna za manje od 2 sata, ali može ili ne mora biti stvarno odgovarajuća (npr. 50% pouzdanosti).



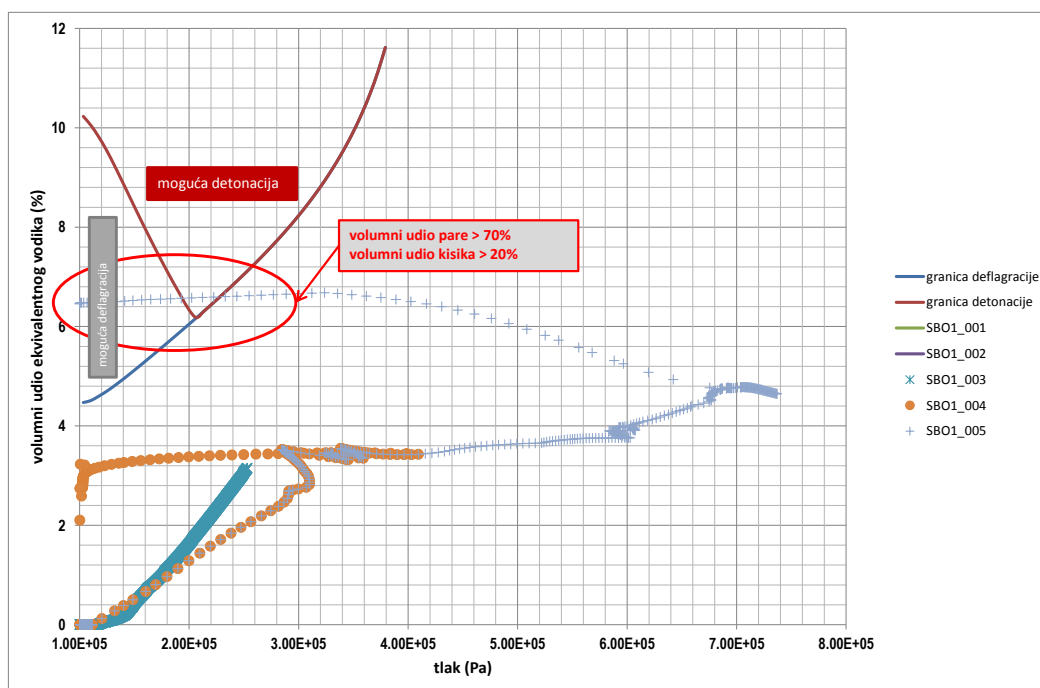
Slika 64: Primjeri prilagođenih vjerojatnosti za uspostavljanje ili obnavljanje funkcije



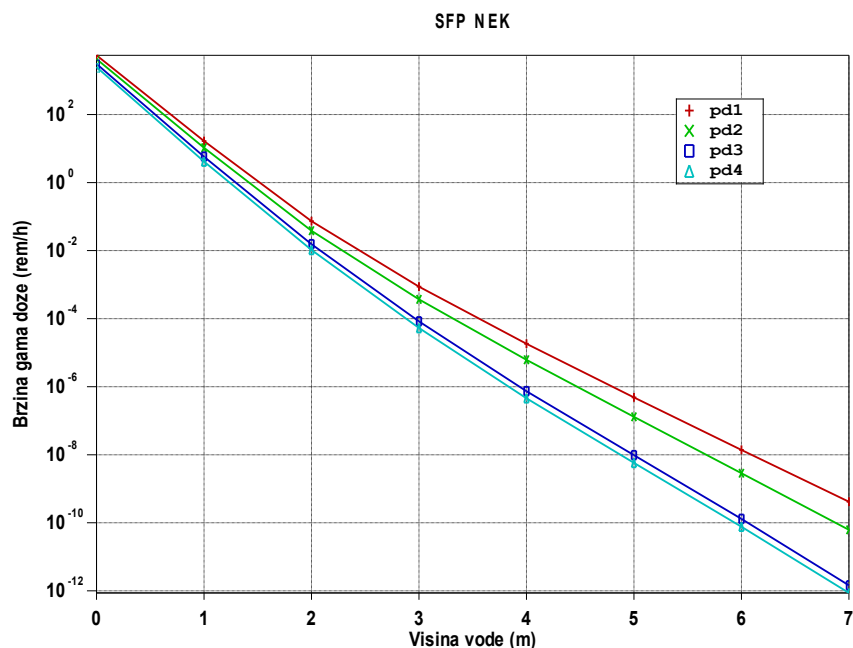
Slika 65: Zagrijavanje goriva (bez korištenja mlaznic/spreja, 10 cm<sup>2</sup> otvor)



Slika 66: Zagrijavanje goriva (korištenje spreja/mlaznica 0,5 mm kapljica, 10 cm<sup>2</sup> otvor)



Slika 67: Usporedba volumnih udjela zapaljivih plinova u anulusu za različite SBO scenarije



**Slika 68: Brzina doze na različitim lokacijama u FHB u ovisnosti o visini vode nad gorivnim elementima u SFP (početna visina 7 m)**

Vjerojatnosni model (opisan u poglavljima 2 i poduprt determinističkim analizama iz poglavlja 4, 5) razvijen u ovom radu može biti primjenjen za nadopunu postojećeg modela SEVERA dogradnjom modela za SFP.

SEVERA DEX model bi dogradnjom modela za SFP omogućavao operaterima odnosno članovima tima TSC **istovremenu** evaluaciju stanja SFP ravnopravno sa drugim zaštitnim barijerama elektrane (gorivni elementi u reaktoru, primarni krug i kontejnment) koje su trenutno dio modela SEVERA-e.

Nadogradnja SEVERA-e u sljedećoj razvojnoj fazi NARSIS projekta zahtjevala bi dodatni napor u modeliranju nezgodnih stanja i opreme zasnovanih na teorijskim osnovama te rezultatima ove disertacije u sljedećim modulima:

- modulu za praćenje parametara dodavanjem analize parametara temperature i razine vode u SFP,
- u postojećem DEX modelu odlučivanja (vidi hijerarhijsku strukturu SEVERA DEX modela, Slika 60 iznad) dodavanjem modela operaterskih akcija, zaštitnih sustava, komponenti i struktura,
- u postojećem DEX evaluacijskom modelu radioaktivnih ispusta dodavanjem kvantifikacijskog modela i rezultata potencijalnog oštećenja goriva u SFP.

## 7. ZAKLJUČAK

Nedovoljno razrađena kategorizacija i razvrstavanje svih potencijalnih opasnosti (unutarnjih i vanjskih) na sigurnost nekog nuklearnog objekta predstavlja težak problem s inženjerskog stajališta definiranja projektnih zahtjeva prema sigurnosnim sistemima, strukturama i komponentama obzirom na mogući skup nepredvidljivih ekstremnih scenarija (*design extension conditions*). Hipoteza istraživanja je pretpostavka da će nam sustavna metodologija ocjene rizika pomoći pri identificiranju i rangiranju potencijalnih ugroza nezgodnih stanja reaktora prema bazenu za istrošeno gorivo i obratno i ukazati na moguća tehnička ili proceduralna poboljšanja.

U ovoj disertaciji razvijena je metodologija (poglavlje 2) za sustavnu kvalitativnu i kvantitativnu procjenu i rangiranje rizika od oštećenja nuklearnog goriva u bazenu za istrošeno gorivo na principu razrade obrane po dubini (postavljanjem razina obrane za svaki pojedinačni skup ugroza). U sklopu metodologije modelirana su stabla događaja i kvarova i izvršena je demonstracijska procjena rizika za utjecaj unutarnjih događaja na bazen za istrošeno gorivo (poglavlje 3). Potom su izabrani scenariji (sekvence nezgode) proistekli iz vjerojatnosne studije za unutarnje događaje koji su dodatno deterministički evaluirani oruđima MAAP odnosno MELCOR. Analizirani scenariji su pokazali da u primjeru niskovjerojatnih događaja, poput akcidentalnog otkrivanja gorivnih elemenata postoje operaterske akcije i oprema za povratak situacije pod kontrolu alternativnim hlađenjem (poglavlje 4) odnosno da akcidentalni uvjeti u kontejnmentu, radi oštećenja jezgre, neće jednostavno propagirati i utjecati na stanje SFP (poglavlje 5). Time su stvorene sve potrebne podloge za izradu aplikacije koja može pomoći u sustavu odlučivanja tijekom prioritizacije akcija za slučaj malovjerojatnih događaja koji bi značili ugrozu i za primarni krug elektrane i za bazen za istrošeno nuklearno gorivo.

Poglavlje 6, na osnovi dosadašnjeg istraživačkog rada, tijekom EU NARSIS projekta na modeliranju kriznom odlučivanja (bilo članova operaterskog tima ili TSC-a) tijekom teških nesreća, definira attribute/podloge proizašle iz ove doktorske disertacije za nadogradnju računarskog oruđa SEVERA.

Disertacija jednoznačno pokazuje da bi detaljno razvijen PSA model elektrane, koji bi objedinjavao stanje reaktora sa stanjima SFP, omogućavao lakšu i cjelovitiju demonstraciju da je propagacija nekog početnog nezgodnog događaja (scenarija) do velikih radiololoških

ispusta ekstremno malo vjerojatna (LERF) s velikim stupnjem pouzdanosti. Odnosno, da se u primjeru ekstremnog događaja, niske vjerojatnosti a potencijalno velikih posljedica, lakše definiraju dodatne inženjerske mjere (npr. dodatnu fleksibilnu opremu, procedure u primjeru teških nesreća, itd.) i na taj način praktično eliminiraju potencijalni ispust u okoliš odnosno svede se rizik na prihvatljiv nivo. Na razvoju, implementaciji i korištenju takvog modela potrebno je dodatno raditi.

Samo istraživanje podrazumjevalo je specijalističko poznavanje metoda upotrebljivanih za vjerojatnosne sigurnosne analize, determinističke sigurnosne analize i njihov sinergijski učinak.

## POPIS LITERATURE

- [1] Bašić, Ivica; Vrbanić, Ivan.; Grgić, Davor; „Potential Impact of Reactor Core Damage on Severe Accident Management Actions in Vicinity of Spent Fuel Pool“, Proceedings of the 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society, Zadar, Croatia, 3-6 June 2018;
- [2] Vlahović, Štefica.; Grgić, Davor.; Ječmenica, Radomir; Bašić, Ivica.; „Calculation of Radioactive Inventory for Severe Accident and Consequence Codes“, Proceedings of the 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society, Zadar, Croatia, 3-6 June 2018;
- [3] Grgić, Davor.; Djaković, Josip.; Šadek, Siniša; Vlahović, Štefica; Bašić, Ivica; „Effectiveness of SFP Spray Cooling during Loss of Coolant Accidents“, Proceedings of the 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society, Zadar, Croatia, 3-6 June 2018;
- [4] Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; „Spent Fuel Pool PSA for Internal Initiating Events“, NEK-ESD-TR02/15 (APOSS-TR-15-01), Prepared for Krsko NPP, 2015;
- [5] Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; „Spent Fuel Pool PSA for Internal Fire, Internal Flooding and Seismic Events“, NEK-ESD-TR03/15 (APOSS-TR-15-02), Prepared for Krsko NPP, 2016;
- [6] NUREG-1275, Volume 12 Operating Experience Feedback Report, Assessment of Spent Fuel Cooling, U.S. NRC, 1997.
- [7] NUREG-1353, Regulatory Analysis for the Resolution of Generic Issue 82, "Beyond Design Basis Accidents in Spent Fuel Pools", U.S. NRC, 1989.
- [8] NUREG/CR-4982, „Severe Accidents in Spent Fuel Pools in Support of Generic Safety Issue 82“, U.S. NRC, 1987.
- [9] NUREG-75/014 (WASH-1400), „Reactor Safety Study“, U.S. NRC, 1975.
- [10] Risk Analysis for Spent Fuel Pool Cooling at Susquehanna Electric Power Station, Draft Report, Pacific Northwest Laboratories, Prepared for U.S. NRC, 1994.
- [11] Sursock, J; et.al; EPRI-3002002691; „PWR Spent Fuel Pool Risk Assessment Integration Framework and Pilot Plant Application“, lipanj 2014.
- [12] „Safety of new NPP designs“, WENRA RHWG Report, 03-2013.
- [13] „Updating WENRA Reference Levels for existing reactors in the light of TEPCO Fukushima Dai-ichi accident lessons learned“, WENRA RHWG Report, 09-2014.
- [14] „Safety of Nuclear Power Plants Design“, IAEA SSR-2/1, Rev1., Vienna, 2016.



- [15] „Safety Assessment for Facilities and Activities“, IAEA GSR Part 4, Rev.1, Vienna, 2016., ISBN 978–92 –0–109115–4.
- [16] „Stress test performed on European nuclear power plants“, ENSREG report, Luxemburg, 04-2014,
- [17] „Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plants“, IAEA-TECDOC-1791, 2016, ISBN 978–92–0–104116–6,
- [18] J.Buongiorno et al, MIT-NSP-TR-025, Technical Lessons Learned from the Fukushima-Daichii Accident and Possible Corrective Actions for the Nuclear Industry, 2011
- [19] INPO 11-005, Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, 2011
- [20] ENSREG, Peer Review report – Stress tests performed on European Nuclear Power Plants, v12h, 2012
- [21] EPRI- 3002002691, PWR Spent Fuel Pool Risk Assessment Integration Framework and Pilot Plant Application, June 2014.
- [22] EPRI-1025295-V1, Severe Accident Management Guidance Technical Basis Report, Volume 1: Candidate High-Level Actions and Their Effects, October 2012.
- [23] EPRI-1025295-V2, Severe Accident Management Guidance Technical Basis Report, Volume 2: Volume 2: The Physics of Accident Progression, October 2012.
- [24] Bašić, Ivica, Bilić-Zabrc, Tea, Špiler, Jože., Hydrogen Behavior in PWR Containment Evaluated By MAAP4.0.5, 5th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Dubrovnik, Croatia, May 16-20, 2004.
- [25] Krško NPP Technical Specification, Rev. 166, 2016.
- [26] NUREG-0452, Standard Technical Specifications for Westinghouse Pressurized Water Reactors, Rev.4,
- [27] Bašić, Ivica, Dudaš, Mladen, „NPP Krško On-Line Low Pressure Containment Tightness Monitoring Implementation“, 5th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids, Dubrovnik, Croatia, May 16-20, 2004.
- [28] US NRC Information Notice No. 88-92: Potential For Spent Fuel Pool Drindown, March 2011.
- [29] WENX/95/24, IPE of Krško NPP, Level 2 Report, Volume 1, Containment Event Tree Notebook, Part 2, August 1995;

- [30] Bašić, Ivica; Vrbanić, Ivan; NEK-ESD-TR17-04/17, „Krško NPP Level 2 PSA Containment Event Tree Notebook Part 3: Severe Accident Analyses“, 2021, pripremljeno za NEK
- [31] Grgić, Davor, Fancev, Tomislav, „Hydrogen Distribution in NPP Krško Containment“, NEK-ESD-TR13/10, June 2010;
- [32] NEK Updated Safety Analysis Report (USAR), revision 24, 2018;
- [33] Bašić, Ivica; Vrbanić, Ivan; Grgić, Davor; „Potential Impact of Reactor Core Damage on Severe Accident Management Actions in Vicinity of Spent Fuel Pool“, Proceedings of the 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society, Zadar, Croatia, 3-6 June 2018
- [34] NEK ESD-TR-02/16, MAAP 5.03 Parameter File Notebook, Rev.0, 2019
- [35] Prior, Robert; Longton, Marie; Schene, Roger; . Bašić, Ivica&all, „Methodology and Results of the Krško Level 2 PSA“, International Conference on Nuclear Containment; Robinson College University of Cambridge, England, 1996;
- [36] MAAP5 Modular Accident Analysis Program, User’s Manual, EPRI/FAI, 2008
- [37] EPRI TR-3002005285, Modular Accident Analysis Program 5 (MAAP5)- Application Guidance, Desktop Reference for Using MAAP5 Software –Phase 2 Report, May 2015
- [38] EPRI TR-100741, MAAP Thermal-hydraulic Qualification Studies, EPRI, June 1992
- [39] EPRI TR-3002008110, Severe Accident Uncertainty Analysis in Real Time Using MAAP5, April 2016
- [40] Bašić, Ivica; Vrbanić, Ivan; Bohanec, Marko; „Principles Of Severe Accident Risk Analysis“, NARSIS Workshop Training on Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Facilities International Training Course, Warsaw, Poland, September 2-5, 2019
- [41] SSR-2/1, Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA, Vienna, 2016
- [42] IAEA-TECDOC-1791, Considerations on the Application of the IAEA Safety Requirements for the Design of Nuclear Power Plants, IAEA, Vienna, 2016
- [43] Bilić-Zabrc, Tea; Bašić, Ivica; Špiler, Jože; „Hydrogen Behavior in PWR Containment Evaluated by MAAP4.0.5“, 5<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids Dubrovnik, Croatia, May 16-20, 2004.
- [44] Grgić, Davor; Bašić, Ivica; Šadek Siniša;, et al, FER-ZVNE/SA/SO-FR01/20-0, „Independent Evaluation Review of NEK MAAP 5.03 Model“, Zagreb 2020.
- [45] Bašić, Ivica; „Analiza pouzdanosti i sigurnosti sustava zaštitne posude reaktora Nuklearne Elektrane Krško“, Magistarski rad na Fakultetu Elektrotehnike i Računarstva Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1996.

- [46] Bašić, Ivica; Predavanja u sklopu IAEA TC Project PRC4032 „Workshop on Severe Accident Management Guidelines (SAMGs)“, Nuclear and Radiation Safety Centre Beijing, P. R. of China, 2011.
- [47] RiskSpectrum Analysis Tools Theory Manual By Lloyd's Register Consulting – Energy AB (Risk Spectrum PSA Version 1.2.1.1)
- [48] Wagner, K. C. i Gauntt, R. O. Mitigation of Spent Fuel Pool Loss-of-Coolant Inventory Accidents And Extension of Reference Plant Analyses to Other Spent Fuel Pools. Albuquerque, New Mexico 87185 and Livermore, California 94550 : Sandia National Laboratories, 2008.
- [49] Barto, et all Consequence Study of a Beyond-Design-Basis Earthquake Affecting the Spent Fuel Pool for a U.S. Mark I Boiling Water Reactor. s.l. : US Nuclear Regulatory Commission, 2013.
- [50] Humphries, L.L., B.A. Beeny, F. Gelbard i D.L. Louie, J. Phillips. MELCOR Computer Code Manuals; Vol. 1: Primer and Users' Guide; Version 2.2.9541 2017. Albuquerque, NM 87185-0748 : Sandia National Laboratories, 2017.
- [51] Bizjak, Rok; Kladvnik, Dejvi; SFP Water Heatup and Evaporation, NEK ESD-TR-07/11, Rev. 1, NEK, 2011
- [52] NUREG/CR-6928 Industry-Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants, U.S. NRC, 2007
- [53] The SPAR-H Human Reliability Analysis Method, NUREG/CR-6883, Idaho National Laboratory, Prepared for US NRC, August 2005
- [54] Matijević, Mario; Grgić, Davor; Ječmenica, Radomir; „Spent Fuel Pool Dose Rate Calculations Using Point Kernel and Hybrid Deterministic-Stochastic Shielding Methods“, Proceedings of the 11th International Conference of the Croatian Nuclear Society, Zadar, Croatia, 3-6 June 2018;
- [55] Bašić, I.; Vrbanić, I.; Bohanec, M. Principles of Severe Accident Risk Analysis. NARSIS Workshop Training on Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Facilities International Training Course, Warsaw, Poland, September 2-5, 2019.
- [56] Bohanec, Marko; Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; Štrubelj, Luka; Debelak, Klemen; “A decision-support approach to severe accident management in nuclear power plants”, Journal of Decision System, December 2020, <https://doi.org/10.1080/12460125.2020.1854426>
- [57] Darnowski, Piotr; Mazgaj, Piotr; Bašić, Ivica; Vrbanić, Ivan; et.; “Severe Accident Simulations Dedicated to the SAMG Decision-Making Tool Demonstration” // 29th

- International Conference of the Slovenian Nuclear Society Conference Proceedings / Snoj, Luka; Čufar, Aljaž; Žagar, Tomaž; (ur.), Ljubljana, Slovenia: Slovenian Nuclear Society, 2020. str. S6-1813-1 (predavanje, mednarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
- [58] Bohanec, Marko; Kikaj, Adem; Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; Štrubelj, Luka; Debelak, Klemen; "Supporting Severe Accident Management in Nuclear Power Plants" // 6th International Conference on Decision Support System Technology - ICDSST Conference Proceedings / editors: Linden, Isabelle; Turón, Alberto; Dargam, Fatima; Jayawickrama, Uchitha / University of Zaragoza, 2020 (poster, me?unardna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni), ISBN: 978-84-18321-00-9
- [59] Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; NARSIS: WP5: Supporting Tool for Severe Accident Management, D5.3 - Definition of Hazard-Induced Damage States and Development of State-Specific APETs for Demonstration Purposes, 2019; [http://www.narsis.eu/sites/default/files/upload/documents/narsis\\_d5.3.pdf](http://www.narsis.eu/sites/default/files/upload/documents/narsis_d5.3.pdf)
- [60] DEX Software, Qualitative Multi-Criteria Decision Modeling Software, <https://dex.ijs.si/>

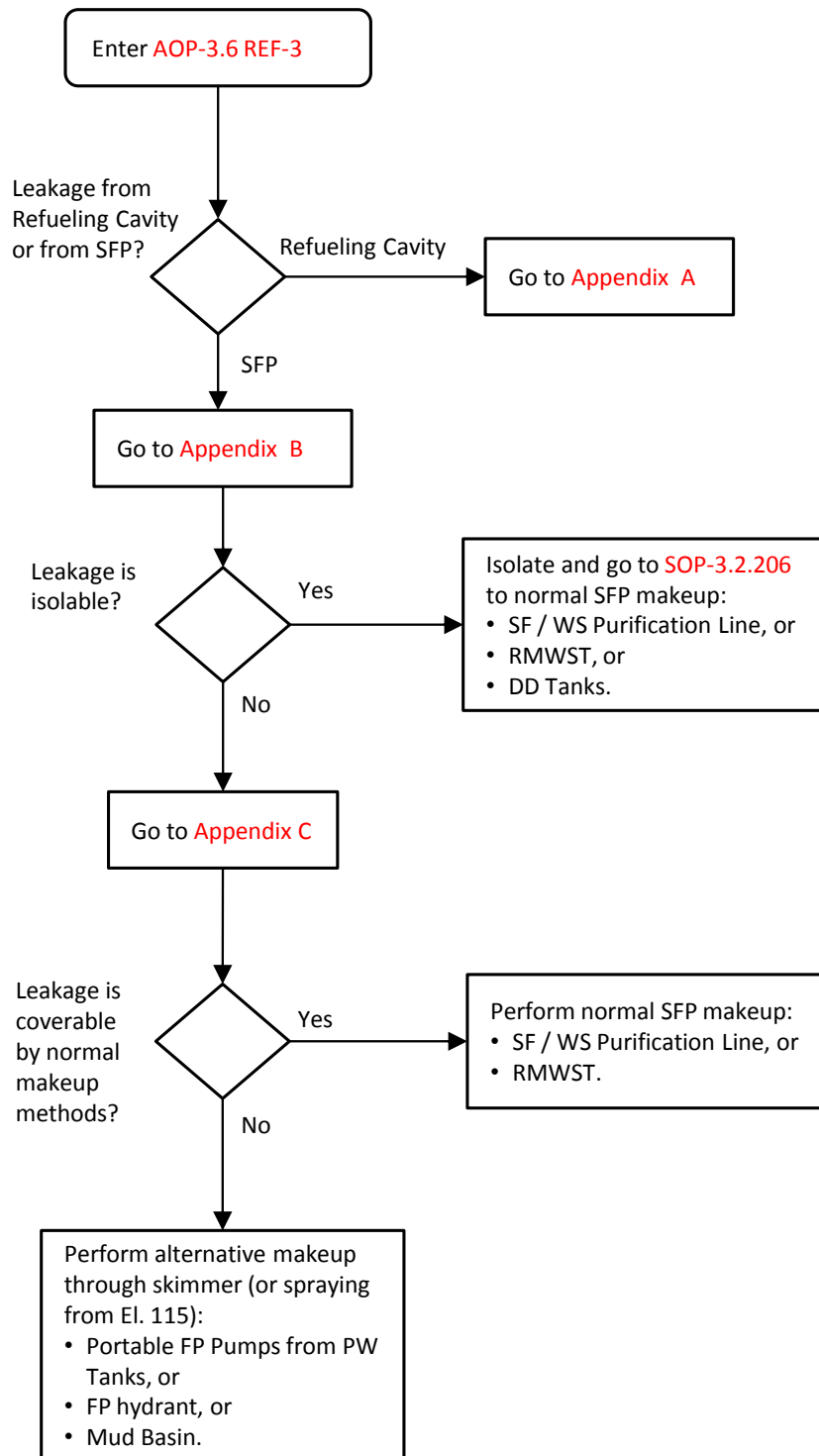
**Prilog 1: Primjer osnovnih događaja povezanih s kvarovima opreme za model stabla događaja PIEV--LOC**

Komponenta	BE Kod	Opis	Tip <sup>(1)</sup>	Parametar 1	Parametar 2	CCF Grupa
SFAPSF01	PSFPM-AP1-IEV-PR	Neuspjeh rada SFP rashladne crpke (PIEV--LOC)	4	PSFPM-AP1-IEV-PR	N/A	N/A
EE104SWGLD11 DCPNLK101	P--BS-OP--IEV-FA	Lokalni kvarovi električne AC ili DC sabirnice koja podržava rad SFP rashladne crpke - početni događaj (PIEV--LOC), osim SFPS "E"	4	P--BS-----IEV-FA	N/A	N/A
	P--BS-OP--IEV-FA_E	Lokalni kvarovi električne AC ili DC sabirnice koja podržava rad SFP rashladne crpke - početni događaj (PIEV--LOC), osim SFPS "E"	4	P--BS-----IEV-FA_E	N/A	N/A
SFAPSF02	PSFPM-AP2-----PS	Neuspjeh pokretanja pripravne SFP rashladne crpke	1	PPMPS-ALTRN	N/A	N/A
	PSFPM-AP2-----PR	Neuspjeh pripravne SFP rashladne crpke za vrijeme trajanja misije	2	PPMPR-ALTRN	PTM-SF-STD	N/A
EE104SWGLD21 DCPNLK301	P--BS-STDB----FA	Lokalni kvarovi električne AC ili DC sabirnice koja podržava pripravnu SFP rashladnu crpku tijekom vremena misije, SFP stanja osim "E"	2	PBSFA---STD	PTM-SF-STD	N/A
	P--BS-STDB----FA_E	Lokalni kvarovi električne AC ili DC sabirnice koja podržava pripravnu SFP rashladnu crpku, SFP navodi "E"	2	PBSFA---STD_E	PTM-SF-STD	N/A
8789	PSFCV-8789----FO	Ispusni nepovratni ventil rezervne SFPC crpke se ne otvara	1	Q-64	N/A	N/A
8788	PSFCV-8788----FC	Ispusni nepovratni ventil radne SFPC crpke se ne zatvara	1	Q-65	N/A	N/A
SFAHSF02	PSFHX-AH2-IEV-FA	Greške u radu SFP izmjenjivača topline (PIEV--LOC)	4	PSFHX-AH2-IEV-FA	N/A	N/A
SFAHSF01	PSFHX-AH1----FA	Kvarovi pripravnog SFP HX 1 tijekom misije	2	PHXFA---STD	PTM-SF-STD	N/A

**Prilog 2: Primjer osnovnih događaja koji predstavljaju operatersku pogrešku u modelu stabla događaja PIEV--LOC**

<b>BE Kod</b>	<b>Opis</b>	<b>Parametar</b>
PSF-STDB-PM-- -HE	Ljudski neuspjeh da uspostavi SFP hlađenje rezervnom SF crpkom - osim D1 i E	PHESF-ST-PM
PSF-STDB-PM-- -HE_DE	Ljudski neuspjeh da uspostavi SFP hlađenje rezervnom SF crpkom - D1 i E	PHESF-ST- PM_DE
PSF-STDB-HX-- -HE	Ljudski neuspjeh da uspostavi SFP hlađenje pomoću SF HX u stanju pripravnosti - osim D1 i E	PHESF-ST-HX
PSF-STDB-HX-- -HE_DE	Ljudski neuspjeh u uspostavljanju SFP hlađenja pomoću SF HX u stanju pripravnosti - D1 i E	PHESF-ST- HX_DE

**Prilog 3: Primjer pojednostavljene sheme operaterske akcije po EOP-3.6 REF3**



**Prilog 4: Primjer kombinacija događaja (djelomičan popis) koje dovode do otkrivanja goriva u bazenu nakon gubitka hlađenja i njegovog neuspješnog popravka**

No	Probability	%	Event						
1	2.60E-10	3.16E+01	PSFPM-AP1-IEV-PR	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFPM-AP2-----TM
2	2.25E-10	2.74E+01	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFHX-AH1-3---TM
3	9.15E-11	1.11E+01	PSFPM-AP1-IEV-PR	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFPM-AP2-----PS
4	2.46E-11	2.99E+00	P--BS-OP--IEV-FA	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFPM-AP2-----TM
5	1.82E-11	2.22E+00	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFXV-8762----CC
6	1.82E-11	2.22E+00	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFXV-8754----OO
7	1.82E-11	2.22E+00	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFXV-8785----CC
8	1.82E-11	2.22E+00	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PCCXV-10277---CC	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1
9	1.82E-11	2.22E+00	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFXV-8750----OO
10	1.82E-11	2.22E+00	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFXV-8751----OO
11	1.82E-11	2.22E+00	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PCCXV-10662A--OO	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1
12	1.82E-11	2.22E+00	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PCCXV-10663A--OO	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1
13	1.82E-11	2.22E+00	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PCCXV-10276---CC	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1
14	1.10E-11	1.34E+00	PSFPM-AP1-IEV-PR	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFPM-AP2-----PR
15	8.67E-12	1.06E+00	P--BS-OP--IEV-FA	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFPM-AP2-----PS
16	8.29E-12	1.01E+00	PSFHX-AH2-IEV-	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFHX-AH1-----FA



No	Probability	%	Event						
			FA			CHE			
17	7.19E-12	8.75E-01	PSFPM-AP1-IEV-PR	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1	PSFCV-8788----FC
18	5.96E-12	7.25E-01	PSFHX-AH2-IEV-FA	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSF-STDB-HX---HE	PSFCREC1_A1
19	2.93E-12	3.57E-01	PSFPM-AP1-IEV-PR	P!A1	P--BS-STDB----TM	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSFCREC1_A1
20	2.75E-12	3.34E-01	PSFPM-AP1-IEV-PR	P!A1	PIEV--LOC	PSF-AM1-----CHE	PSF-NM1-----HE	PSF-STDB-PM---HE	PSFCREC1_A1

## Prilog 5: Primjeri nadomjesnog ubrizgavanja vode u SFP

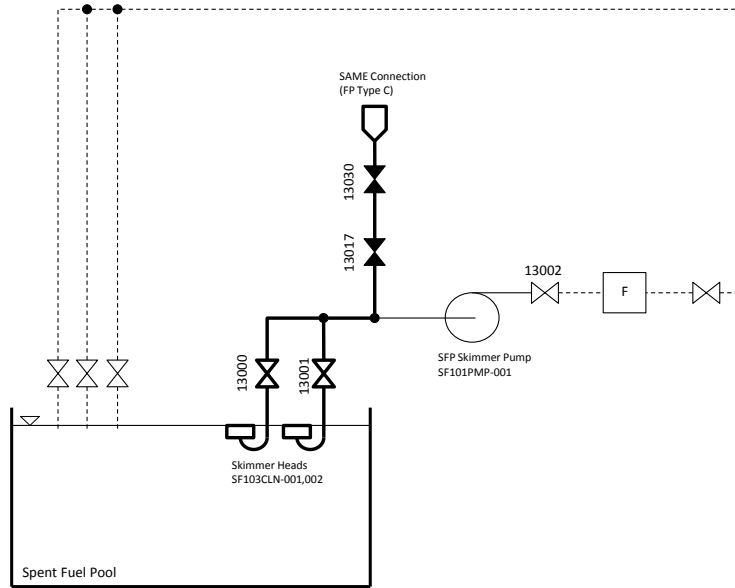


Diagram SF-02:  
SFP Makeup Path  
through Skimmer

## Slika 69: Alternativno nadopunjavanje SFP preko „skimera“

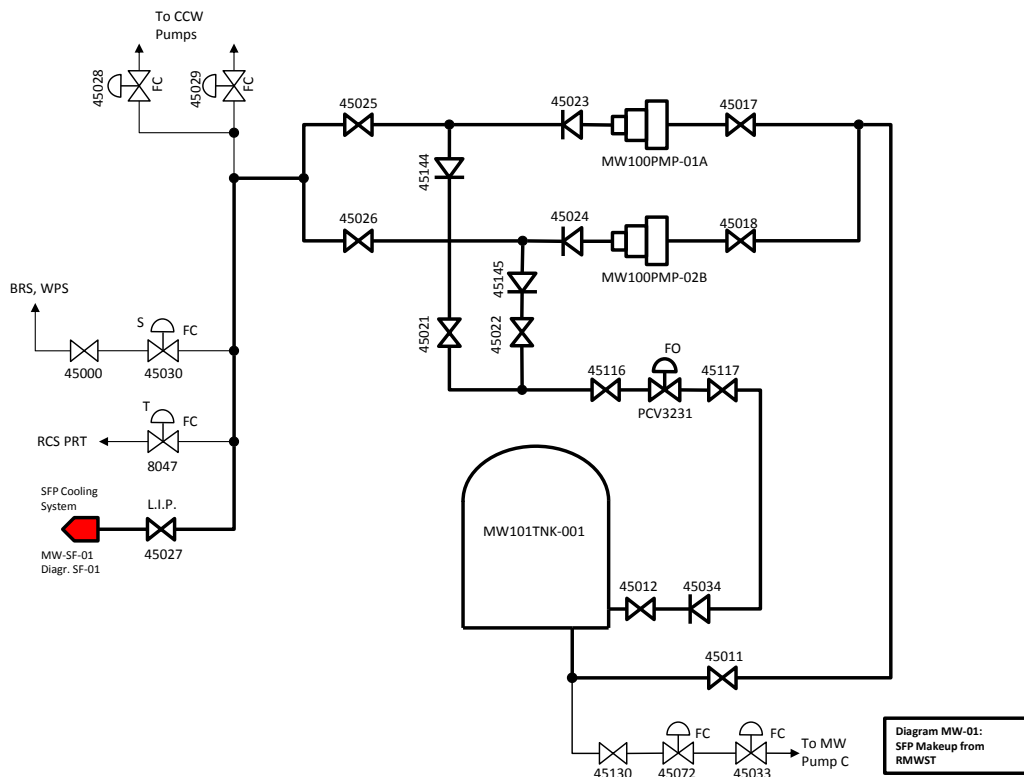


Diagram MW-01:  
SFP Makeup from  
RMWST

## Slika 70: Nadopunjavanje SFP iz RMWST (Reactor Makeup Water Storage Tank)

## POPIS SLIKA

Slika 1: Kvalitativni/kvantitativni model (pristup) za kategorizaciju potencijalnih nesreća na SFP pogonskim NE .....	5
Slika 2: Ilustracija dva glavna načela za smanjenje rizika povezanog s radom bilo kojeg postrojenja .....	6
Slika 3: Ilustracija surogata za niske posljedice i malu vjerojatnost .....	7
Slika 4: Podjela kategorija scenarija .....	7
Slika 5: Ilustracija općeg logičkog stabla (stabla događaja) .....	13
Slika 6: Pojednostavljeni dijagram procesa za manipulaciju gorivom 1 .....	21
Slika 7: Pojednostavljeni dijagram procesa za manipulaciju gorivom .....	21
Slika 8: Karakteristične kote na objektima SFP-a .....	22
Slika 9: Ilustracija konzervativno pretpostavljenih toplinska opterećenja kroz ciklus u PSA modela prema stvarnim .....	26
Slika 10: Stablo događaja za gubitak SFP hlađenja zbog slučajnih uzroka (PIEV--LOC) .....	34
Slika 11: Stablo događaja za gubitak SFP hlađenja zbog gubitka vanjskog napajanja (PIEV--LOCB) .....	35
Slika 12: Stablo događaja za gubitak SFP hlađenja uzrokovan potpunim gubitkom CCW ili ESW (PIEV--LOCW) .....	37
Slika 13: Stablo događaja za mali gubitak SFP inventara (PIEV--LOIS) .....	38
Slika 14: Stablo događaja za veliki gubitak SFP inventara (PIEV--LOIL) .....	39
Slika 15: Primjer stabla događaja za gubitak hlađenja bazena istrošenog goriva zbog slučajnih kvarova .....	49
Slika 16: Primjer stabla kvara za uspostavu dobave vode bazenu s istrošenim gorivom nakon gubitka hlađenja i neuspješnog popravka (prikaz vršne logike stabla) .....	49
Slika 17: Raščlamba bezuvjetne SFPB frekvencije za SFP stanja .....	52
Slika 18: Uvjetne frekvencije SFPB za pojedina SFP stanja .....	53
Slika 19: Raščlamba bezuvjetne SFU frekvencije za SFP stanja .....	54
Slika 20: Uvjetne frekvencije SFU za pojedina SFP stanja .....	55
Slika 21: Prikaz rezultata kvantifikacije SFU za različite unutarnje inicijatore prema postavljenim kriterijima .....	55
Slika 22: Ilustracija snižavanja vjerojatnosti pojave SFU za unutarnje događaje dodatnim alternativnim sustavima .....	57
Slika 23: Primjer nodalizacije SFP .....	61
Slika 24: Položaj mlaznica za raspršivanje vode po SFP .....	62
Slika 25: Izračuni SFPFA (vrijeme i snaga) .....	63
Slika 26: Zagrijavanje goriva (bez spreja, 1 cm <sup>2</sup> otvor) .....	65
Slika 27: Usporedba SFP nivoa sa i bez spreja (1 cm <sup>2</sup> otvor) .....	65
Slika 28: Usporedba SFP nivoa sa i bez spreja (10 cm <sup>2</sup> otvor) .....	65
Slika 29: Zagrijavanje goriva (bez spreja, 10 cm <sup>2</sup> otvor) .....	65
Slika 30: Zagrijavanje goriva (sprej 0,5 mm kapljica, 10 cm <sup>2</sup> otvor) .....	66
Slika 31: Zagrijavanje goriva (sprej 0,2 mm kapljica, 10 cm <sup>2</sup> otvor) .....	66
Slika 32: Usporedba vodikova vol. udjela (sprej 0,2 vs 0,5 mm (10 cm <sup>2</sup> otvor) .....	66
Slika 33: Distribucija snage (bez spreja, 10 cm <sup>2</sup> otvor) .....	66
Slika 34: Kombinirana vjerojatnosna ocjena sigurnosti za reaktor i SFP na početne događaje .....	69
Slika 35: Shema logičkog modela za kombinirano stablo događaja (Event Tree (ET)) (pojednostavljeno [21]) .....	70
Slika 36: Shematski prikaz fenomenoloških pojava (sa vremenskim okvirom) tijekom teške nesreće, prijevod iz [46] .....	71
Slika 37: Shema istjecanja za tipični čelični Westinghouseov <i>Large Dry Containment</i> , [33] 73	

Slika 38: Ilustracija cijevi za prijenos goriva (Fuel Transfer Tube (FTT)) [28] .....	74
Slika 39: Krško NPP MAAP 5.03 Model .....	76
Slika 40: Usporedba uvjeta u kontejnmentu (volumen #1) za različite SBO scenarije .....	86
Slika 41: Usporedba uvjeta u anulusu (volumen #12) za različite SBO scenarije .....	88
Slika 42: Usporedba volumnih udjela zapaljivih plinova u anulusu za različite SBO scenarije .....	89
Slika 43: Usporedba volumnih udjela pare (i inertnog CO <sub>2</sub> ) u anulusu za različite SBO scenarije .....	89
Slika 44: Usporedba volumnih udjela zapaljivih plinova u anulusu za različite SBO scenarije .....	90
Slika 45: Ilustracija položaja i dimenzija dodirnih površina anulusa prema FHB zgradi .....	92
Slika 46: Modelirani presjek potencijalne dodirne površine, pogled od gore .....	92
Slika 47: Konceptualni prikaz logičkog modela za kvantifikaciju utjecaja sekvenci oštećenja jezgre reaktora na SFP .....	95
Slika 48: Visina vode 1m iznad gornjeg ruba resetke .....	100
Slika 49: Normalna visina vode (7m iznad gornjeg ruba resetke) .....	100
Slika 50: Tlocrt starog i novog dijela bazena u razini goriva .....	101
Slika 51: Gama flux x-y raspodjela, visina 1m iznad ruba goriva, bez vode .....	101
Slika 52: Gama flux x-y raspodjela, visina ruba goriva .....	102
Slika 53: Brzina doze na različitim lokacijama u FHB u ovisnosti o visini vode nad gorivnim elementima u SFP (početna visina 7 m) .....	103
Slika 54: Brzina doze na različitim lokacijama u FHB u ovisnosti o visini vode nad gorivnim elementima u SFP (početna visina 1 m) .....	103
Slika 55: Generalizirana APET struktura .....	107
Slika 56: Koncept fenomenološkog stabla događaja .....	108
Slika 57: Model pojednostavljene procjene stanja primarnog kruga .....	109
Slika 58: Model pojednostavljene procjena stanja u kontejnmentu .....	110
Slika 59: Hijerarhijska struktura SEVERA DEX modela .....	110
Slika 60: Primjer procjene radioaktivnih ispuštanja za određenu akciju operatera ili TSC... ..	111
Slika 61: Ilustracija općeg logičkog stabla (stabla događaja) .....	116
Slika 62: SAMG smjernice za dijagnostički proces (DPG) .....	116
Slika 63: Pojednostavljeni model operaterskih akcija za ublažavanje nezgode sa gubitkom hladioca (vode) u SFP .....	117
Slika 64: Primjeri prilagođenih vjerojatnosti za uspostavljanje ili obnavljanje funkcije .....	119
Slika 65: Zagrijavanje goriva (bez korištenja mlaznic/spreja, 10 cm <sup>2</sup> otvor) .....	119
Slika 66: Zagrijavanje goriva (korištenje spreja/mlaznica 0,5 mm kapljica, 10 cm <sup>2</sup> otvor) ..	120
Slika 67: Usporedba volumnih udjela zapaljivih plinova u anulusu za različite SBO scenarije .....	120
Slika 68: Brzina doze na različitim lokacijama u FHB u ovisnosti o visini vode nad gorivnim elementima u SFP (početna visina 7 m) .....	121
Slika 69: Alternativno nadopunjavanje SFPpreko „skimmera“ .....	134
Slika 70: Nadopunjavanje SFP iz RMWST (Reactor Makeup Water Storage Tank) .....	134

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Sažetak kategorizacije potencijalnih scenarija .....	11
Tablica 2: Linije obrane (LOD) za početni događaj gubitka hlađenja SFP .....	15
Tablica 3: Linije obrane (LOD) za početni događaj malog gubitka inventara SFP .....	16
Tablica 4: Linije obrane (LOD) za početni događaj velikog gubitka inventara SFP .....	17
Tablica 5: Vremenski profil statusa SFP-a tijekom ciklusa goriva .....	20
Tablica 6: Definirana SFP stanja za SFP PSA .....	23
Tablica 7: Trajanje pojedinog stanja i toplinska opterećenja .....	25
Tablica 8: Primjer određivanja frekvencije na osnovu dostupne literature .....	28
Tablica 9: Pretpostavljena vremena do SFP ključanja i brzine zagrijavanja za različita SFP stanja .....	29
Tablica 10: Vremena isparavanja za različita SFP stanja .....	31
Tablica 11: Raspoloživo vrijeme za oporavak sustava podrške u različitim SFP stanjima .....	32
Tablica 12: CCF parametri u NEK SFP PSA modelu .....	48
Tablica 13: Primjer sumarnih rezultata kvantifikacije SFPB za pojedina SFP stanja za unutarnje događaje .....	51
Tablica 14: Primjer sumarnih rezultata kvantifikacije SFB prema početnim događajima za unutarnje događaje .....	53
Tablica 15: Primjer sumarnih rezultata kvantifikacije SFU za pojedina SFP stanja za unutarnje događaje .....	54
Tablica 16: Primjer sumarnih rezultata kvantifikacije SFU prema početnim događajima za unutarnje događaje .....	55
Tablica 17: Potencijal za smanjenje učestalosti SFU alternativnim sustavima hlađenja i prskanja .....	56
Tablica 18: Usporedba proizvedenog vodika oksidacijom košuljica goriva samo u reaktoru za SBO, LB-LOCA i SB-LOCA .....	80
Tablica 19: Maksimalni volmni udio vodika u promatranom području .....	83
Tablica 20: Minimalni protoci istjecanja iz kontejnenta potrebni za postizanje granice deflagracije (4% volumena) .....	83
Tablica 21: Lista analiziranih scenarija sa MAAP5.03 .....	85
Tablica 22: Usporedba između pojednostavljene metode i analize sa oruđem MAAP5.03 .....	91
Tablica 23: Temeljne pretpostavke za CET stanja .....	97
Tablica 24: Potencijal za smanjenje učestalosti SFU alternativnim sustavima hlađenja i prskanja .....	118

## KAZALO POJMOVA

AAF	<i>Alternative Auxiliary Water</i> /alternativna pomoćna pojna voda
ASI	<i>Alternative Safety System</i> /alternativni sustav sigurnog ubrizgavanja u jezgru u nuždi
ARH	<i>Alternative Residual Heat Removal System</i> /sustav za alternativno odvođenje zaostale topline
CCW	<i>Component Cooling Water</i> /voda za hlađenje komponenti
CES	<i>Combined End States</i> /kombinirana konačna stanja elektrane
DCH	<i>Direct Containment Heating</i> /izravno pregrijavanje kontejnmenta
DEC	<i>Design Extension Condition</i> uvjeti nad projektnim
DSA	<i>Deterministic Safety Assessment</i> /determinističke sigurnosne procjene
ECCS	<i>Emergency Core Cooling System</i> /sustav za hlađenje jezgre u nuždi (sastoji se od SI i RHR sustava)
ECU	<i>Emergency Core Unloading</i> /hitno pražnjenje jezgre
ESF	<i>Engineered Safety Features</i> /projektne sigurnosne značajke
ESW	<i>Essential Service Water</i> /neophodna servisna voda
ET	<i>Event Tree</i> /stablo događaja
FHB	<i>Fuel Handling Building</i> /zgrada za rukovanje gorivom
FT	<i>Fault Tree</i> /stablo kvarova
HELB	<i>High Energy Line Break</i> /lom cjevovoda više energetske razine
HPME	<i>High Pressure Melt Ejection</i> /visoko tlačno izbacivanje taline
LOD	<i>Line of defense</i> /linija obrane
LOCA	<i>Loss of Coolant Accident</i> /izlivna nezgoda
MCCI	<i>Molten Corium Concrete Interaction</i> /interakcija rastaljene jezgre sa betonom ispod reaktorske posude
MSLB	<i>Main Steam Line Break</i> /lom glavnog parovoda
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i> /nuklearni regulatorni organ Sjedinjenih Američkih Država
PAR	<i>Passive Autocatalytical Recombiners</i> /pasivni autokatalitični rekombinatori vodika (CO) sa kisikom
PCFV	<i>Passive Containment Filter Vent</i> /pasivni sistem za filtrirano rasterećenje kontejnmenta u primjeru oštećenja reaktora
PDS	<i>Plant Damage State</i> /stanje oštećenja elektrane
PIE	<i>Postulated Initiating Event</i> /pretpostavljeni početni događaj
PSA	<i>Probabilistic Safety Assessment</i> /vjerojatnosne sigurnosne procjene
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i> /tlakovodni reaktor
RB	<i>Rector Building</i> /reaktorska zgrada ili zaštitna zgrada reaktora (kontejnment)
RC	<i>Release Category</i> /kategorije istjecanja iz RB
RCFC	<i>Reactor Containment Fan Cooler</i> /rashladni ventilatorski sustav kontejnmenta
RH	<i>Residual Heat Remova System</i> /sustav za alternativno odvođenje zaostale topline
SA	<i>Severe Accident</i> /teška nesreća
SAME	<i>Severe Accident Management Equipment</i> /oprema za korištenje tijekom teških nesreća
SAMG	<i>Severe Accident Management Guidelines</i> /uputstva za upravljanje teškim nesrećama
SBO	<i>Station Black-Out</i> /potpuni gubitak električnog napanja
SGTR	<i>Steam Generator Tube Rupture</i> /lom cjevovoda u parogeneratoru

SI	<i>Safety Injection System</i> /sustav za ubrizgavanje u jezgru
S-LOAC	seizmički prouzročen gubitak vanjskog AC napajanja
S-SBO	seizmički prouzročen SBO
S-LOCA	seizmički prouzročena izlivna nezgoda
SFP	<i>Spent Fuel Pool</i> /bazen za istrošeno gorivo
TFA	<i>Top of Fuel Element</i> /vrh gorivnog elementa
TT	<i>Turbine Trip</i> /zaustava turbine

## ŽIVOTOPIS

Ivica Bašić rođen je 28. svibnja 1965. godine u Zagrebu, Republika Hrvatska. U Zaboku je završio osnovnu školu te prva dva razreda srednje škole, a maturirao je u Obrazovnom Centru Nikola Tesla u Zagrebu. Diplomirao je elektrotehniku, smjer nuklearna energetika, na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu (ETF), (današnji Fakultet elektrotehnike i računarstva (FER)), pod mentorstvom prof. dr. Danila Feretića 1990. godine. Stekao je titulu magistra znanosti iz područja tehničkih znanosti, smjer energetika, na istom fakultetu, 1996. godine, radom na temu „Modeliranje stabala kvara i stabala događaja za sustave zaštitne posude Nuklearne elektrane Krško“. Stekao je višegodišnje (32 godine) iskustvo rada u nuklearnoj industriji, od toga 15 godina u Nuklearnoj elektrani Krško (NEK) na području determinističkih i vjerojatnosnih sigurnosnih analiza. Sedam godina je radio u NEK kao glavni inženjer odjela za determinističke analize u projektima zamjene parogeneratora i povećanja snage reaktora, izradi vjerojatnosnih analiza (PSA razine 1 i 2), razvoju procedura za upravljanje u primjeru teških nesreća (*Severe Accident Management Guideline*), te nezavisnom pregledu cijelog niza projektnih promjena na sustavima elektrane. Tijekom rada u NE Krško završio je tečaj za operatera te čitav niz osposobljavanja za upotrebu različitih računarskih oruđa i vještina (npr. RELAP, ETAP, MAAP, RiskSpectrum, itd.). Bio je član potpornog centra za ublažavanje nesreća (TSC). Zajedno s poslovnim partnerom i dugogodišnjim kolegom u NE Krško, dr. Ivanom Vrbanićem, 2005. godine osnovao je APOSS d.o.o. privatnu konzultantsko-inženjersku tvrtku sa sjedištem u Zaboku (<https://aposs.hr>). APOSS je tvrtka ovlaštena od strane Uprave Republike Slovenije za nuklearnu sigurnost (URSJV) i Ravnateljstva civilne zaštite MUPa Republike Hrvatske, koja radi u cijelom svijetu. Do sada je, kao ekspert i predavač međunarodne atomske agencije (IAEA), sudjelovao u 73 međunarodne misije. Član je IAEA tima za *Generic Reactor Safety Review* (GRSR). Autor je i koautor jedne knjige te preko 70 znanstvenih članaka objavljenih na međunarodnim konferencijama i časopisima. U dva mandata obnašao je funkciju predsjednika Hrvatskog nuklearnog društva (HND), a trenutno je član Euroatomovog F4E *Technical Advisory Panela* kao savjetnik za nuklearnu sigurnost.



## Popis objavljenih radova

### Knjiga:

1. Vrbanić, Ivan; Samanta, Pranab; Bašić, Ivica; “Risk Importance Measures in the Design and Operation of Nuclear Power Plants”, New York: American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2017 (monografija), LCCN 2017027159/ISBN 9780791861394, <https://doi.org/10.1115/1.861394>

### Izvorni znanstveni i pregledni radovi u CC časopisima:

1. Bašić, Ivica; Vrbanić, Ivan; Grgić, Davor; “Assessment of potential impact of combustible gases from reactor core damage on risk of outside containment spent fuel pool damage”, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112268>

### Izvorni znanstveni i pregledni radovi u drugim časopisima

1. Conger, Dorian; Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; “A Framework for Modern Risk-Informed Root Cause Analysis Process”, paper 211; Journal of Energy and Power Engineering, Volume 14, Number 7, July 2020 (Serial Number 152); <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2020.07.001>
2. Bohanec, Marko; Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; Štrubelj, Luka; Debelak, Klemen; “A decision-support approach to severe accident management in nuclear power plants”, Journal of Decision System, December 2020, <https://doi.org/10.1080/12460125.2020.1854426>
3. Grgić, Davor; Benčik, Vesna; Šadek, Siniša; Bašić, Ivica; “Independent Review of NPP Modifications and Safety Upgrades” // International journal of contemporary energy, 1 (2015), stranice 41-51 doi:10.14621/ce.20150106 (podatak o recenziji nije dostupan, članak, stručni)

### Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom:

1. Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; “Importance Ranking of Diverse Safety Issues for Operating NPPs” // 13th International Conference of the Croatian Nuclear Society Conference Proceedings / Vrbanić, Ivan ; Šadek, Siniša ; Trontl, Krešimir (ur.). Zagreb: Croatian Nuclear Society, 2022. str. S7-158-1 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
2. Štrubelj, Luka; Debelak, Klemen; Bohanec, Marko; Kikaj, Adem; Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; “Decision Support Tool for Severe Accident Management” // 13th International Conference of the Croatian Nuclear Society Conference Proceedings / Vrbanić, Ivan ; Šadek, Siniša ; Trontl, Krešimir (ur.). Zagreb: Croatian Nuclear Society, 2022. str. S7-107-1 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
3. Darnowski, Piotr; Mazgaj, Piotr; Bašić, Ivica; Vrbanić, Ivan; et.; “Severe Accident Simulations Dedicated to the SAMG Decision-Making Tool Demonstration” // 29th International Conference of the Slovenian Nuclear Society Conference Proceedings /

- Snoj, Luka; Čufar, Aljaž; Žagar, Tomaž; (ur.), Ljubljana, Slovenia: Slovenian Nuclear Society, 2020. str. S6-1813-1 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
4. Bohanec, Marko; Kikaj, Adem; Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; Štrubelj, Luka; Debelak, Klemen; "Supporting Severe Accident Management in Nuclear Power Plants" // 6th International Conference on Decision Support System Technology – ICDSST Conference Proceedings / editors: Linden, Isabelle; Turón, Alberto; Dargam, Fatima; Jayawickrama, Uchitha / University of Zaragoza, 2020 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni), ISBN: 978-84-18321-00-9
  5. Bašić, Ivica; Vrbanić, Ivan; Grgić, Davor; Mihalina, Mario; "Potential Impact of Reactor Core Damage on Severe Accident Management Actions in Vicinity of Spent Fuel Pool" // 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society Conference Proceedings / Vrbanić, Ivan ; Šadek, Siniša ; Bašić, Ivica (ur.). Zagreb: Croatian Nuclear Society, 2018. str. S7-176-1 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
  6. Vlahović, Štefica; Grgić, Davor; Đaković, Josip; Šadek, Siniša; Bašić, Ivica; "Effectiveness of SFP Spray Cooling during Loss of Coolant Accidents" // 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society Conference Proceedings / Vrbanić, Ivan ; Šadek, Siniša ; Bašić, Ivica (ur.). Zagreb: Croatian Nuclear Society, 2018. str. S7-175-1 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
  7. Grgić, Davor; Vlahović, Štefica; Ječmenica, Radomir; Bašić, Ivica; "Calculation of Radioactive Inventory for Severe Accident and Consequence Codes" // 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society Conference Proceedings / Vrbanić, Ivan ; Šadek, Siniša ; Bašić, Ivica (ur.). Zagreb: Croatian Nuclear Society, 2018. str. S7-167-1 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
  8. Grgić, Davor; Ječmenica, Radomir; Vlahović, Štefica; Šadek, Siniša; Bašić, Ivica; "Comparison Between ORIGEN2.2 and ORIGEN-S Calculated Source Term" // Book of Abstracts of the 27th International Conference Nuclear Energy for New Europe NENE2018, Portorož, Slovenija, 2018. str. 66-66 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)
  9. Vrbanić, Ivan; Bašić, Ivica; "On Use of PSA for Characterization of Risk Significance of Operational Events and Issues in NPPs." // Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids / Čavlina, Nikola ; Grgić, Davor ; Pevec, Dubravko (ur.). Zagreb: Croatian Nuclear Society, 2014. str. 142-1 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
  10. Vayssier, George; Bašić, Ivica; "Systematic Review of Accident Management Programs – Principles, Experiences" // Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids / Čavlina, Nikola ; Grgić, Davor ; Pevec, Dubravko (ur.), Zagreb: Croatian Nuclear

Society, 2014. str. 117-1 (predavanje, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

11. Slovinc, Dejan; Bašić, Ivica; Štrubelj, Luka; “Simulation and Validation of a Full Flow and Mini Flow Verification Test in NEK with Best Estimate HPIS Model in APROS” // Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids / Čavlina, Nikola ; Grgić, Davor ; Pevec, Dubravko (ur.). Zagreb: Croatian Nuclear Society, 2014. str. 163-1 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)
12. Bašić, Ivica; Manwoong, Kim; Peter, Hughes; B-K Lim; D'Auria Francesco; “IAEA Review for Gap Analysis of Safety Analysis Capability” // Proceedings of the 10th International Conference on Nuclear Option in Countries with Small and Medium Electricity Grids / Čavlina, Nikola ; Grgić, Davor ; Pevec, Dubravko (ur.)., Zagreb: Croatian Nuclear Society, 2014. str. 164-1 (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni)

## BIOGRAPHY

Ivica Bašić was born on May 28, 1965 in Zagreb, Republic of Croatia. He finished elementary school and the first two grades of high school in Zabok and eventually graduated from the Educational Centre Nikola Tesla in Zagreb. He earned Bachelor of Science degree in electrical engineering in 1990, majoring in nuclear energy, at the Faculty of Electrical Engineering in Zagreb (ETF) (today Faculty of Electrical Engineering and Computing (FER)) under the mentorship of prof. dr. Danilo Feretić. He earned Master of Science degree in 1996, in the field of technical sciences, majoring in energy at the same faculty with the thesis named “*Modelling of fault trees and event trees for protective vessel systems of the Krško Nuclear Power Plant*”. He has gained 32 years of experience in the nuclear industry, including 15 years at the Krško Nuclear Power Plant (NEK) in the field of deterministic and probabilistic safety analyses. Last seven years in NEK, he worked as the head engineer of the department for deterministic analysis in the projects of steam generator replacement and reactor power increase, creation of probabilistic analyses (PSA levels 1 and 2), development of management procedures in the case of severe accidents (*Severe Accident Management Guideline*), and independent review of the entire series project changes on the power plant systems. During his time at NE Krško, he completed the operators course and series of professional trainings for use of various computer tools and skills (e.g. RELAP, ETAP, MAAP, RiskSpectrum, etc.). He was a member of the Technical Support Centre (TSC). In 2005, he incorporated a consultancy-engineering company APOSS Ltd. Jointly with colleague Ivan Vrbanić, PhD, seated in Zabok, Croatia (<https://aposs.hr>). APOSS is a company licensed by Slovenian Nuclear Safety Administration (SNSA) and the Directorate of Civil Protection at Ministry of the Interior (MUP) of the Republic of Croatia, which operates worldwide. As an expert and lecturer of the International Atomic Energy Agency (IAEA), he has participated in 73 international missions and he is the member of the IAEA Generic Reactor Safety Review (GRSR) team. Additionally, he is author and co-author of a book and over 70 scientific articles published at international conferences and journals. He has been appointed as the President of the Croatian Nuclear Society (HND) in two mandates. He is currently acting in a role of nuclear safety advisor in Euro-atom's F4E Technical Advisory Panel.