

# TDK DOLGOZAT

---

2013

Tóth Barnabás

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Energetikai mérnöki alapszak, IV. évfolyam

*Téma címe*

Balesetkezelés céljából tervezett átalakítás vizsgálata a  
Paksi Atomerőműben

*Konzulensek*

Vida Zoltán

elemző mérnök

MVM Paksi Atomerőmű Zrt. Fejlesztési és Elemzési Osztály

Csige András

tanszéki mérnök

BME Nukleáris Technikai Intézet Atomenergetika Tanszék

Utoljára módosítva: 2013. 10. 25.

# Balesetkezelés céljából tervezett átalakítás vizsgálata a Paksi Atomerőműben

---

**Tóth Barnabás I. évfolyam, Energetikai mérnöki mesterszak**

Konzulensek: Vida Zoltán, elemző mérnök, MVM PA ZRt. FEO  
Csige András, tanszéki mérnök, BME NTI

Dolgozatom célja, hogy a 2011-es fukushimai balesetet követően az Európai Tanács által előírt Célzott Biztonsági Felülvizsgálatban („Stress test”-ben) javasolt, a konténment lassú túlnyomódását megakadályozó berendezést vizsgáljak a Paksi Atomerőműben. A kialakítandó sprinkler rendszer súlyosbaleseti szituációban lépne működésbe, de kialakításából adódóan a tervezési üzemzavarokra is hatással lenne. A koncepcióterv szerint két zóna üzemzavari hűtőrendszer (ZÜHR) ágból nyerné a hűtőközeget, amelyek így egy csővezeték és négy armatúra erejéig összeköttetésbe kerülnének, ezáltal a három ág közül kettő függővé válhatna. Az eddig fennálló hármas redundancia megfelelő feltételek teljesülésekor nem valósulna meg, csupán két, egymástól független ZÜHR ág állna rendelkezésre ebben az esetben. Ennek lehetnek előnyös és hátrányos hatásai is a tervezési üzemzavarok kezelésére, amelyeket valószínűség alapú (PSA) és determinisztikus elemzéssel vizsgálók.

A nukleáris biztonsághoz kapcsolódó, a dolgozatomhoz feltétlenül szükséges alapfogalmak bemutatásával, majd a zóna üzemzavari hűtőrendszerek rövid leírásával folytatom a munkámat a bevezető után. A jelenleg még csak koncepcióterv szinten létező kialakítás részletes bemutatását követően a nukleáris- és repülőiparban használt valószínűség alapú biztonsági elemzés (PSA) módszertanával, felépítésével foglalkozok a használt RiskSpectrum szoftver segítségével. A PSA elemzés során feltételezett események determinisztikus bizonyítását az APROS rendszerkód segítségével végzem el. A Paksi Atomerőmű jelenlegi PSA és APROS modelljének kiegészítése, módosítása szükséges a számítások futtatásához, amely változtatásokat részletesen közlök és magyarázok.

A modellek futtatását követően a kapott eredmények értékelésével foglalkozok, különös hangsúlyt fordítva a PSA számítás által kapott, a zónakárosodáshoz jelentősen hozzájáruló hibákra és az emberi megbízhatóságra. Ezek alapján ajánlást teszek biztonságnövelő intézkedésekre és a jelenlegi, operátorok által alkalmazott kezelési utasítás megfelelő kiegészítésére.

## Irodalom:

RALPH R FULLWOOD, ROBERT E HALL, *Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Power Industry – Fundamentals and Applications*, Brookhaven National Laboratory, New York, USA

ÁKMI, *Konténment lassú túlnyomódás megakadályozása baleseti helyzetben*, Megvalósíthatósági tanulmány, 2013. április 15.

MVM PAKSI ATOMERŐMŰ ZRT., *Célzott Biztonsági Felülvizsgálati Jelentés*, Paks, 2011. október 31.

ANTHONY J. SPURGIN, *Human Reliability Assessment Theory and Practice*, CRC Press, 2010

# Assessment of a design concept for severe accident mitigation at Paks NPP

---

**Barnabás Tóth, Year I., MSc in Energy Engineering**

Consultants: Zoltán Vida, assessment engineer, MVM PA NPP, FEO  
András Csige, department engineer, BME INT

In the light of the lessons learned from the accident in Fukushima, the European Council declared the need for the „stress test” assessments to review the safety of all currently operating EU nuclear plants. On the basis of the outcome at Paks NPP, some necessary measures should be taken into account in order to decrease the chance of Severe Accidents and their consequences. To avoid long term containment overpressurization and provide containment cooling for decay heat removal, a new design concept of a spray system was introduced. This installation would connect two, formerly independent emergency core cooling system (ECCS) trains with a pipe and four valves, thus result in double redundancy instead of triple in special conditions. My task is to find the advantages and drawbacks of this system for design basis accident mitigation using Probabilistic Risk Assessment (PSA) and Deterministic Safety Assessment (DSA).

The paper is going to consist of explanations of nuclear safety related elements right after the introduction part and the ECCS is going to be explained with the new design concept, as well. Then, the fundamentals and characteristics of the PSA method and the used software, called RiskSpectrum is presented. The deterministic assessment is done by APROS system code. The PSA and APROS model of the Paks NPP have been modified and supplemented with the new system parts.

Using the new models, I am going to assess the results of the calculations, laying emphasis on the most important factors contributing to core damage and human reliability and finally propose safety improvements.

## References:

RALPH R FULLWOOD, ROBERT E HALL, *Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Power Industry – Fundamentals and Applications*, Brookhaven National Laboratory, New York, USA

ÁKMI, *Konténment lassú túlnyomódás megakadályozása baleseti helyzetben*, Megvalósíthatósági tanulmány, 2013. április 15.

MVM PAKSI ATOMERŐMŰ ZRT., *Célzott Biztonsági Felülvizsgálati Jelentés*, Paks, 2011. október 31.

ANTHONY J. SPURGIN, *Human Reliability Assessment Theory and Practice*, CRC Press, 2010

# TARTALOMJEGYZÉK

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés.....                                                        | 4  |
| 2. Alapfogalmak .....                                                    | 5  |
| 2.1. Nukleáris biztonság .....                                           | 5  |
| 2.2. A mélységi védelem elve.....                                        | 6  |
| 2.3. Az atomerőmű lehetséges állapotai .....                             | 7  |
| 3. Az elemzett súlyosbaleseti-sprinkler koncepciója .....                | 11 |
| 4. A Paksi Atomerőmű zóna üzemzavari hűtőrendszerei .....                | 13 |
| 5. A valószínűség alapú biztonsági elemzés (PSA) módszere .....          | 19 |
| 5.1. Történet.....                                                       | 19 |
| 5.2. A PSA elemzés szintjei .....                                        | 21 |
| 5.3. Az 1. szintű PSA elemzés.....                                       | 22 |
| 5.3.1. A kezdeti események kiválasztása .....                            | 23 |
| 5.3.2. Az eseményfák megalkotása .....                                   | 25 |
| 5.3.3. Hibafa-analízis.....                                              | 26 |
| 5.3.4. A PSA elemzés értékelése .....                                    | 30 |
| 6. Az APROS rendszerkód rövid ismertetése .....                          | 31 |
| 7. A Paksi Atomerőmű APROS modelljének kiegészítése .....                | 32 |
| 8. A vizsgált sprinkler-rendszer hatásai a tervezési üzemzavarokra ..... | 37 |
| 8.1. A feladat célja.....                                                | 37 |
| 8.2. A paksi PSA-modell ZÜHR rendszereinek felépítése.....               | 37 |
| 8.3. A kialakítás előnyös hatásai .....                                  | 38 |
| 8.3.1. A kialakítás előnyös hatásai a nagynyomású rendszerre.....        | 40 |
| 8.3.2. A kialakítás előnyös hatásai a kisnyomású rendszerre.....         | 42 |
| 8.4. A kialakítás hátrányos hatásai .....                                | 42 |
| 8.4.1. A kialakítás hátrányos hatásai a nagynyomású rendszerre.....      | 43 |
| 8.4.2. A kialakítás hátrányos hatásai a kisnyomású rendszerre.....       | 43 |
| 9. Számítási eredmények.....                                             | 50 |
| 10. Biztonságnövelő ajánlások.....                                       | 52 |
| 11. Összefoglalás.....                                                   | 53 |
| 12. Irodalomjegyzék.....                                                 | 54 |
| 13. Melléklet .....                                                      | 55 |

## 1. BEVEZETÉS

A 2011 tavaszán a japán fukushimai atomerőműben bekövetkező események fényében az Európai Tanács 2011. március 24 és 25-ei ülésén elfogadta, hogy az összes – az Európai Unió területén működő – atomerőmű biztonságát felül kell vizsgálni az Európai Nukleáris Biztonsági Hatóságok Csoportjának (ENSREG) együttműködésével [1]. A „Stress test” célja, hogy újraértékelje a nukleáris létesítmények biztonságát a japán események tudatában, különös hangsúlyt fordítva az extrém külső események által létrehozott súlyos balesetekre. A már meglévő európai biztonsági elemzések a nukleáris iparban bevett szokások szerint sok lehetséges forgatókönyvet tartalmaztak üzemzavarokat, baleseteket feltételezve. A fukushimai események pont ezért érték váratlanul az atomenergetikai szakembereket. A japán események a megsérült atomerőműnek a következő gyenge pontjaira világítottak rá [2]:

- a tervezési alapot meghaladó külső hatások katasztrofális következményei;
- a természeti eredetű külső események tervezési alapjának korszerűtlen állapota;
- villamos betáplálás elvesztésének tartóssága;
- súlyos balesetek során felszabaduló hidrogén robbanása;
- a zónában és pihentető medencében lévő üzemanyag tartós hűtésének kimaradása.

Mindezeket felismerve jogosan merülhet fel a kérdés, hogy mi történne egy újabb, hasonló tervezési alapon túli esemény bekövetkezésekor a jelenleg üzemelő 434 energetikai atomreaktorral. A „Stress test” (Célzott Biztonsági Felülvizsgálat) feladata, hogy az alábbi kérdésekre kielégítő választ adjon:

- Az erőmű tervezési alapja megfelel-e az adott helyen lehetséges természeti eredetű külső hatásoknak?
- Milyen hatással lenne az erőműre egy, a tervezési alapot meghaladó eseménynek?
- Milyen módon alakulhat ki az erőműben tartósan a villamos betáplálás és az üzemanyag hűtésének tartós kimaradása és mi lehet ezek következménye?
- Felkészült-e az erőmű és személyzete egy súlyos baleset megelőzésére, illetve bekövetkezésekor annak elhárítására és következményeinek csökkentésére?

Az elrendelt felülvizsgálatban a földrengés és az elárasztás, mint kezdeti események, a biztonsági funkciók sérülésének következtében pedig a villamos betáplálás kimaradása teljes telephelyi feszültségvesztéssel és a végső hőnyelő elvesztése és ezek kombinációi szerepeltek. Az ezáltal kialakult ún. súlyos balesetek kezelése közül a zónában és a pihentető medencében lévő üzemanyag hűtésének és a hermetikus védőépület (konténment) integritásának megőrzése

és ezek elmaradása esetén a kialakult szituáció kezelése kerültek a középpontba. A vizsgálatnak az erőmű 2011. június 30-i állapotára kellett vonatkoznia és a feltárt esetleges hiányosságok alapján javaslatot tettek azok felszámolására és az eredményeket a lakosság számára is elérhető formában kellett közzétenni. [2]

A magyarországi nukleáris hatóság, az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) 2011. május 2-án rendelte el a Paksi Atomerőmű Célzott Biztonsági Felülvizsgálatát, amely eredményeként a végleges jelentést 2011. október 31-ig benyújtották. Az értékelés megértéséhez szükséges néhány, a nukleáris biztonsággal kapcsolatos fogalom megismerése a következő fejezetből.

## **2. ALAPFOGALMAK**

### **2.1. Nukleáris biztonság**

Ha az atomerőműveket vizsgáljuk a biztonság szemszögéből, akkor azt mondhatjuk, hogy a fő cél, hogy normál üzemben és lehetőség szerint baleset esetén is a létesítmény környezete biztonságban legyen. A nukleáris energiatermelő egységek sajátossága, hogy nagy mennyiségű radioaktív anyag található bennük felhalmozva, amelyek az üzemeltetés során nagyon kis kibocsátást eredményeznek, de egy nagyon kis valószínűséggel bekövetkező, súlyos baleset esetén jelentős kikerülés történhet. Ilyen esetben azt kell elérni, hogy a lakosságot ne érje elfogadhatatlan többlet sugárterhelés: a radioaktív anyag kikerülését kell megakadályozni, vagy kijutás esetén tervekkel kell rendelkezni a probléma kezelésére [3]. Így háromféle célkitűzést fogalmazhatunk meg a nukleáris létesítményekre, amelyek pontos definíciója a 118/2011. (VII. 11.) Korm. Rendelet II. fejezetének 6.§-ban található [4]:

- Általános biztonsági cél: a lakosság és a környezet megóvása az ionizáló sugárzás veszélyeitől;
- Sugárvédelmi cél: a lakosság és a személyzet sugárterhelése normál üzemben és tervezett kibocsátások esetén az ésszerűen elérhető minimális határérték alatt legyen tartható (ALARA-elv);
- Műszaki biztonsági cél: célszerű erőfeszítések a balesetek megakadályozására és következményeinek enyhítésére, a feltételezett kezdeti események következményei az előírt határokon belül legyenek tarthatóak és a balesetek kialakulásának valószínűségei minimálisak legyenek.

Ahhoz, hogy ezeket teljesíthesse egy létesítmény, olyan berendezések beépítése szükséges, amelyek célja nem közvetlenül a villamosenergia-termelés, hanem valamilyen alapvető biztonsági funkció ellátása az alábbiak közül:

- A nukleáris láncreakció hatékony szabályozása és leállítása: a feladat egyszerűen teljesíthető a megfelelő neutronabszorbens anyagok (bórsav, bóracél, kadmium) felhasználásával és a hozzájuk csatlakozó irányítástechnikával;
- A felszabadított hőteljesítmény elszállítása üzem közben és leállított állapotban: az atomerőművek sajátossága a konvencionális erőművekkel szemben, hogy azokat leállított állapotban is hűteni kell az üzemanyagban felhalmozódó hasadási termékek radioaktív bomlása miatt (remanens hő), ezért a végső hőnyelőhöz vezető utat mindenkor biztosítani kell, normál üzemi hűtésen kívül biztonsági hűtővízrendszerre és az üzemzavari hűtőrendszerek villamos ellátására is szükség van;
- A radioaktív anyagok kikerülésének megakadályozása: az üzemanyag köré mérnöki gátak rendszerét építve normál üzemben a jelentős kibocsátás megakadályozható, üzemzavarkor a hermetikus térből (konténmentből) szükséges a hő elvezetése, baleset esetén a megfelelő hidrogénkezelési eljárással a hidrogénrobbanás elkerülése.

## 2.2. A mélységi védelem elve

A legutóbbi biztonsági funkciót részletesebben szükséges tárgyalni. A 118/2011. (VII. 11.) Korm. Rendelet a nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről II. fejezetének 7. §-a kimondja [4]:

*„A nukleáris létesítményben a mélységben tagolt védelem alkalmazásával meg kell akadályozni a radioaktív anyag vagy sugárzás környezetbe kerülését, és biztosítani kell, hogy a meghibásodások vagy azok kombinációja eredményeként jelentős sugárkárosodással járó balesetek csak kellően alacsony valószínűséggel következheszenek be.”*

A mélységi védelem definícióját a 118/2011. (VII. 11.) Korm. Rendelet Nukleáris Biztonsági Szabályzatának 9. kötetében találjuk [4]:

*„Többszintű védelem, ami a nukleáris biztonság érdekében alkalmazott elvek, intézkedések és műszaki megoldások olyan egymásra épülő rendszere, amely garantálja a nukleáris biztonság elvárt szintjének megvalósulását. Fizikai szinten ennek lényeges összetevője a többszörös gátak rendszere.”*

A mélységben tagolt védelem öt, egymásra épülő szintből áll, amelyek biztosítják a lehetséges emberi vagy műszaki hibák ellensúlyozását, az egymásra épülő gátak megőrzését és a környezet védelmét abban az esetben, ha a gátak megsérülnének. A mélységi védelem megvalósításának egyik eszköze az ún. mérnöki gátak rendszere, amelyek feladata a radioaktivitás és a környezet elválasztása egymástól. A keramikus kialakítású üzemanyag pasztilla kialakítása révén a legtöbb radioizotópot magában tartja, amelyen kívül helyezkedik el a zárt üzemanyag burkolat, majd a teljes zónát magában foglaló reaktortartály és a primer nyomáshatároló rendszer (primerkör), majd a hermetikus védőépület, azaz konténment.

A dolgozat szempontjából a későbbiekben rendkívül fontos szerepe lesz a 118/2011. (VII. 11.) Korm. Rendelet Nukleáris Biztonsági Szabályzatának 3. kötetében található 3.2.4.0600. pontjának, amely kimondja, hogy a nukleáris biztonság szempontjából fontos rendszerek esetén a redundancia (többszörözés), diverzitás (eltérő működési elvek) és térbeli szeparáció elvének teljesülnie kell.

### 2.3. Az atomerőmű lehetséges állapotai

A nukleáris létesítmény tervezésekor szükséges feltárni minden olyan lehetséges üzemállapotot, amelybe az erőmű kerülhet valamilyen külső vagy belső esemény eredményeként. Ezeket az elfordulások várható gyakorisága és következményük szerint sorolhatjuk csoportokba: várhatóan az erőmű villamosenergia-termelő blokként fog üzemidejének jelentős részében működni. Ezt az állapotot a létesítmény **normál üzemének** nevezzük, a 118/2011. (VII. 11.) Korm. Rendelet Nukleáris Biztonsági Szabályzatának 9. kötetében található módon definiálva [4]:

*„A nukleáris létesítménynek a nukleáris biztonsági hatóság által jóváhagyott Üzemeltetési Feltételek és Korlátok betartása melletti üzemeltetése, beleértve atomreaktor és atomerőmű esetén a terhelésváltoztatást, a leállást, az indítást, a fűtőelemcserét, karbantartást, próbákat és egyéb tervezett műveleteket.”*

Normál üzem esetén a folyamatba történő beavatkozás és biztonsági intézkedések az operátorok és szabályozó berendezések által lehetséges. Annak a feltételezhető gyakorisága, hogy a blokk normál üzemben működik  $10^0=1/\text{év}$ .

Előfordulhatnak olyan események, amelyek a létesítményt ettől eltérő állapotba juttatják. Ezek közül azokat, amelyek akár többszöri bekövetkezésére is esély van az erőmű élettartama során és nem járnak komoly következményekkel, azaz az erőmű üzemképes marad az esemény után, **üzemi tranzienseknek**, vagy várható üzemi eseményeknek nevezzük. Az NBSZ szerinti meghatározás [4]:

*„A tervezési alapon feltételezett kezdeti esemény által kiváltott és az egyszeres meghibásodás elve szerint elemzett, továbbá ezen elemzések által lefedett olyan folyamat, amely jelentős eséllyel megvalósul az atomerőmű üzemideje során.”*

A várható üzemi események becsült gyakorisága  $10^{-2}$  és  $10^0$  1/év közötti, tehát kb. 100 reaktorév alatt reális esély van bekövetkezésükre, ezért a normál üzemi biztonsági intézkedésekhez hasonlóan az operátoroknak és a szabályozó berendezéseknek kell kezelniük az eseményeket (a Pakson üzemelő blokkok eddig összesen kb. 120 reaktorévet üzemeltek). Üzemi tranzienshez vezethet többek között a hőelvonás intenzitásának növekedése (gőzfejlesztő biztonsági szelepeinek szándékolatlan nyitásával), a primerköri hűtőközeg áram csökkenése (egy vagy több főkeringtető szivattyú kiesése révén) vagy a hűtőközeg mennyiségének növekedése (hibás pótvízrendszer működés esetén).

A további kategóriák ismertetéséhez szükséges a **tervezési alap** fogalmának tisztázása. Mivel egy erőművet nem lehetséges az összes elképzelhető eseményre tervezni, ezért szükséges a teljes listát az ésszerűség és az elfogadható kockázat figyelembevételével redukálni. Az NBSZ meghatározása szerint [4]:

*„A nukleáris létesítmény tervezésekor figyelembe vett állapotok és kezdeti események összessége, amelybe beletartoznak a normálüzem, a várható üzemi események és a tervezési üzemzavarok, amelyeknek a nukleáris létesítmény – a konstrukció megfelelő kialakításával, méretezésével, valamint a biztonsági rendszerek működése révén – meghatározott kritériumok megsértése nélkül ellenáll.”*

A tervezési alap adja meg tehát azokat a feltételezett kezdeti eseményeket, amelyekkel a tervezés során számolni kell. Azokat az üzemzavarokat, amelyeket a tervezési alapon lévő kezdeti események váltanak ki, **tervezési üzemzavarnak** (DBA - Design Basic Accident) nevezzük. Az NBSZ szerinti meghatározás [4]:

*„A tervezési alapon feltételezett kezdeti esemény által kiváltott és az egyszeres meghibásodás elve szerint elemzett, valamint ezen elemzések által lefedett olyan folyamat, amelynek csekély az esélye, hogy megvalósul az atomerőmű üzemideje során.”*

A tervezési üzemzavarok ritkábban fordulnak elő (nem gondoljuk, hogy az élettartam során bekövetkezik), de a berendezéseket és a biztonsági rendszereket úgy kell kialakítani, hogy képesek legyenek kezelni a kialakult helyzetet anélkül, hogy elfogadhatatlan radioaktív kibocsátás történne. A későbbiekben részletesen tárgyalt és a dolgozat fő témáját képező zóna üzemzavari hűtőrendszer (ZÜHR) is ilyen célból kerül beépítésre. A becsült gyakoriságuk  $10^{-2}$  és  $10^{-4}$  1/év intervallumba esik külső események esetén (földrengés, elárasztás, tűz, stb.), belső eredetű eseményeknél  $10^{-2}$  és  $10^{-5}$  1/év közötti az előfordulás várható frekvenciája. Az

üzemzavarok kezelésében az operátorok, a biztonsági rendszerek és a konténment vehet részt az esetleges kikerülés lokalizálása érdekében. Tipikusan ebbe a csoportba sorolható események többek között a hűtőközeg-vesztéses balesetek (LOCA – Loss of Coolant Accident) összes tartománya (kis, közepes, nagy LOCA a törésméret szerint), a hőelvezetés intenzitásának növekedése egy főgőzvezeték törésével, a primekörüli hűtőközeg áramának csökkenése az összes főkeringtető szivattyú kiesésével, vagy a külső villamosenergia-hálózat elvesztése (LOOP – Loss of Offsite Power).

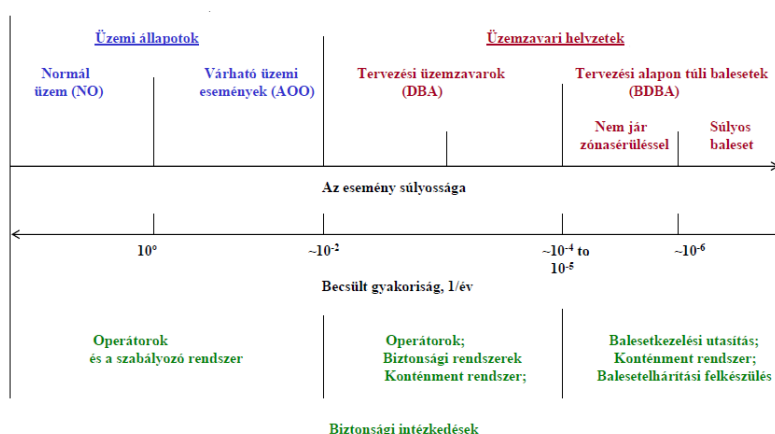
Azokat a nagyon kis gyakorisággal bekövetkező üzemzavarokat, amelyek a tervezési alapon túli vagy több kezdeti esemény együttes hatására következnek be **tervezési alapon túli üzemzavaroknak** (BDBA – Beyond Design Basic Accident) vagy **súlyos baleseteknek** (SA – Severe Accident) nevezzük. Az ilyen balesetekre a jelenleg üzemelő atomerőművek nagy része nincs tervezve, de a fukushimai események felhívták a figyelmet a fontosságukra. Az NBSZ definíciója szerint a tervezésen túli üzemzavarok [4]:

*„A várható üzemi események és a tervezési üzemzavarok körén kívül eső folyamat, amely nem zárható ki ugyan, de több egymástól független hiba következményeként állhat csak elő, és amely a tervezési alapba tartozó folyamatoknál súlyosabb következményekkel járhat.”*

A súlyos baleset fogalma [4]:

*„A reaktorzóna jelentős károsodásával együttjáró, a tervezési alapnál, valamint a tervezési alap kiterjesztésébe tartozó üzemzavaroknál súlyosabb külső hatásokkal járó baleseti állapot.”*

Láthatjuk, hogy a szabályzat a tervezési alapon túli eseményeket két részre bontja: a zónasérülés nélküli scenárióra, amelynek gyakorisága  $10^{-4}$  vagy  $10^{-5}$  1/év-től  $10^{-6}$  1/év-ig terjed, valamint a zónaolvadással járó súlyos balesetre, amelynek frekvenciája  $10^{-6}$  1/év-nél kisebb. Az első csoportba tartozik pl. egy szekunderoldali törés és az üzemzavari tápvíz hiányának együttes bekövetkezése. Ilyen esetben az operátornak lehetősége van megelőzni a súlyos baleset kialakulását „feed and bleed” módszerrel.



1. ábra - Az atomerőmű lehetséges üzemállapotai és becsült gyakoriságuk [3]

Súlyos baleset következményeként a zóna sérülése és/vagy jelentős radioaktív kibocsátás várható. Ebben a szituációban a legfontosabb feladat a lakosság és az üzemeltető személyzet védelme az ionizáló sugárzástól és a kibocsátott radioaktív anyagmennyiség minimalizálása. Ehhez a már említett mérnöki gátak közül minél több integritását szükséges fenntartani. Legfontosabb szerepe az üzemanyag-mátrixnak van, hiszen ez a határ tudja leghatékonyabban lokalizálni a radioaktivitást. Ha ez sérül, akkor a burkolat, majd a primerkör feladata a veszélyes anyagok benntartása. Az erőműnek kész tervekkel kell rendelkeznie a balesetek kezelésére, felkészülten kell szembenézni az esetleges katasztrófával. A súlyos balesetek alapvető folyamatai a következők lehetnek [3]:

- hidrogénrobbanás a fémes anyagok oxidációjából keletkező hidrogén által;
- gőzrobbanás a zónaolvadék-víz reakciójából;
- direkt konténment hevítés a tartályból kikerült olvadt üzemanyag következtében;
- magas hőmérséklet által előidézett csőtörés a gőzfejlesztőben;
- zónaolvadék – beton reakció;
- reaktortartály törése;
- konténment lassú túlnyomódása.

A legutóbbi folyamatnak fontos szerepe van a dolgozat szempontjából, ezért szükséges részletesebb tárgyalása. A konténment túlnyomódását a reaktortartály külső hűtése során keletkező gőz okozhatja. Baleseti esetben a tartály hermetikusságának megőrzése érdekében, annak átolvadása ellen célszerű a külső felszínét vízzel hűteni. A magas hőmérsékletű fal a rákerülő hűtővizet elgőzölögteti, ezáltal az aknában nagy mennyiségű gőz keletkezik. Az így növekvő nyomás a konténment szivárgását idézheti elő, ami radioaktív kibocsátást eredményezhet. Ahhoz, hogy a nem kívánt következményeket elkerüljük, szükséges valamilyen nyomáscsökkentő rendszer kiépítése. Alapvetően kétféle módszer jöhet szóba: a légtér hűtése vagy a konténment szellőzőrendszerén keresztül a közeg kifúvatása. Utóbbi eljárás a nukleáris létesítmény és környékének kitelepítését követően lehetséges csak, ha a leeresztés szüretlenül történik. Megfelelő hatásfokú szűrő alkalmazásával a kibocsátott radioaktivitás kordában tartható. A másik koncepció a konténment hosszú távú hűtésének megvalósítása, amely egyszerre kezeli a túlnyomódás problémáját és a kibocsátás veszélyét is mellőzi. A következő fejezetben a Paksi Atomerőműben elvégzett Célzott Biztonsági Felülvizsgálat ajánlása alapján elkészített, a konténment lassú túlnyomódását megakadályozó súlyosbaleseti-sprinkler koncepciótervével foglalkozom.

### 3. AZ ELEMZETT SÚLYOSBALESETI-SPRINKLER KONCEPCIÓJA

A Pakson elvégzett CBF vizsgálat súlyosbaleset-kezelésre vonatkozó ajánlásai alapján egy olyan független hőelvonó rendszer kialakítását tűzték ki célul, amely hosszú távon képes megoldani a hermetikus tér hűtését, így biztosítva a konténment épségét és egyúttal megakadályozva a tartály külső elárasztását követően keletkező gőz kártékony hatásait a hermetikus védőépületre. Erre a feladatra vonatkozó tanulmányterv elkészítésével az MVM Paksi Atomerőmű ZRt. az ÁKMI Kft-t bízta meg. A konkrét megoldásra többféle elképzelés született, az ezekkel szemben támasztott követelmények a következők voltak [5]:

- a konténment hosszú távú hűtése megoldható legyen szűrt leeresztés alkalmazása nélkül is;
- a keletkező hőt ne a légcsapdákon keresztül vonjuk el, hanem abból a térből, ahol keletkezik;
- a hermetikus téren belül ne helyezzünk el aktív elemeket (a hermetikus téren kívül az aktív elemek ellenőrizhetők, cserélhetők, javíthatók a baleseti helyzetben is);
- a beépítendő új elemek és új hermetikus átvezetések száma minimális legyen;
- a normál üzem mellett minimális legyen a rendszer felügyeletére, ellenőrzésére fordított költség.

A tervezés során két alternatív megoldás merült fel, amelyek kielégítik az említett követelményeket:

- felületi hőcserélők segítségével megvalósított hőelvonás a hermetikus térből;
- keverő-kondenzátoros hőelvonás a hermetikus térből.

A két elképzelés közös elemei a lokalizációs torony tetején elhelyezett hűtőtornyok, amelyek száraz kialakításúak.

Az első megoldás esetén nehézséget okoz a levegőtartalommal bíró térből, hőcserélővel megvalósított hőelvonás rossz hőátadási tényezője. Ezt úgy lehet a legegyszerűbben kiküszöbölni, ha nem alkalmazunk hőátadó felületet, hanem a hűtőközeget összekeverjük a lekondenzálódó gőzzel. Ekkor a lehűtött vizet nem csövekben keringtetjük, hanem megfelelő tartózkodási időt biztosítva finom eloszlásban porlasztjuk a gőztérbe. Legegyszerűbben az képzelhető el, hogy a lokalizációs torony felső tálcái előtt egy perforált csőszakasz, vagy nyitott edény segítségével esőztetünk. A koncepció szerint a befecskendezett hűtővizet az új rendszer két, kisnyomású zóna üzemzavari hűtőrendszer (ZÜHR) kollektorából nyerné. A két ág az új berendezés szívóágának csővezetékei és armatúrái révén kapcsolatba kerülne egymással. A

kialakítás tervezett megvalósítása a *(Melléklet, 1. ábra)*-n található. A javasolt rendszer a következő elemekből épül fel [5]:

- *leágázások*: két kisnyomású ZÜHR ág kollektoráról a leágázásokat a tartályt követő szakaszoló és visszacsapó szelepek után kell kialakítani;
- *szívóági armatúrák*: szigorú földrengésállósági követelményeket kell kielégíteniük, ebből a szempontból minél kisebb tömegű és zömökebb armatúrák a kedvezőek;
- *szivattyúk*: a rendszerbe két darab párhuzamosan beépített szivattyú kerülne, amely előnye, hogy az egyik tartalékként is szolgálhat (ha az egyik önmagában képes a remanens hő elvitelére) és a térfogatáramot is két lépcsőben lehet állítani;
- *próbaág*: a szivattyúk időszakos tesztelésére szolgál, amelyben helyi nyomás és térfogatáram mérést lehet végrehajtani;
- *próbaági armatúrák*: kézi armatúrák, mivel ezeket csak a szivattyú tesztelhetőségéhez használnák, normál üzemi állapotban lelakatolt állapotban vannak a téves nyitás elkerülése érdekében;
- *nyomóág*: a szivattyúk utáni közös nyomóág a lokalizációs torony oldalához rögzítve a tetőre jut és onnan beköt a hűtőtoronyba;
- *száraz légűtő*: a konténmentből elvonandó hőmennyiség környezetbe való átadását a lokalizációs torony tetején elhelyezendő száraz hőcserélő (hűtőtorony) biztosítja;
- *nyomóági armatúra*: a környezeti hatások elleni védelem érdekében nem a tetőn kerül elhelyezésre, hanem a reaktorépületben, ahonnan hermetikus átvezetésen keresztül jut a nyomóág a lokalizációs toronyba;
- *belső oldali hermetizáló armatúra*: nagy megbízhatóságú, hermetikus lezárást biztosító elemként hasadótárcsa kerülhet alkalmazásra, amely tömör marad belső oldalról 3 bar túlnyomásig, majd súlyos balesetkor a szivattyúk nyomómagasságának megfelelő választásával lehet garantálni a hasadótárcsa felszakadását.

A rendszerben a szivattyúk és a motoros armatúrák az aktív elemek, ezek üzemképességét kell időszakosan ellenőrizni. Az ellenőrzések ciklusidejére négy évet javasolnak.

A szükséges villamosenergia-ellátáshoz [6] bloktól független betáplálást kell biztosítani, ugyanis előre nem meghatározható, hogy egy baleseti esemény mely helyeket fogja érinteni. Súlyosbaleseti szituációban a villamos betáplálás meglete nem tételezhető fel a nukleáris biztonsági alapelvek szerint, valamint minden statikus, blokkon belül képzett betáplálási megoldásban megmarad annak lehetősége, hogy a rendszer funkcióját veszti az esemény során. Ez azt jelenti, hogy a betáplálási pont telepítésére és kábelezésének kialakítására csak a baleset bekövetkezése után kerülhet sor. Az új sprinkler rendszer üzembehelyezéséhez az esemény

bekövetkezése után min. 12-24 óra órára van szükség, hiszen használatának komoly baleseti előzményei vannak, használatakor már a baleset lokalizálása a fő cél, nem az egyes végrehajtó elemek védelme. Ez teszi lehetővé, hogy a villamosenergia-ellátását a szükséges helyzetben alakítsák ki.

A kialakítandó rendszer másodlagos feladata/szerepe lehet, hogy összeköttetést alakít ki két, kisnyomású ZÜHR ág (10-es és 20-as ág) között. Ezáltal a kisnyomású tartályokban lévő bórsavas víz felhasználható a másik ágon is abban az esetben, ha az ág saját tartályából valamilyen okból nem tud vizet vételezni. Ehhez arra van szükség, hogy a már említett szívóági armatúrák tervezési üzemzavarok esetén is kapjanak villamosenergia-betáplálást. Az aktív elemek, funkciók időszakos (4 éves) ellenőrzésére próba betáplálást kell kiépíteni, ami azonban nem elegendő az összes elem működtetéséhez, de az összeköttetést megvalósító motoros armatúrák működtetéséhez igen.

Mind a baleseti, mind a próbaüzemi működés során egy új, FDxx-el jelölt elosztó biztosítja az aktív elemek 0,4 kV-os energiaellátását. Az alelosztónak két betáplálási lehetősége lesz: az egyiket csak baleseti helyzetben, a másikat próbaüzem alatt lehet használni. A baleseti betáplálást a már említett módon az eseményt követően építenék ki, próbaüzemhez a CF vagy CJ jelű főelosztóhoz csatlakozna fixen az új alelosztó, ezzel biztosítva a tervezési üzemzavarok esetén az egybenyitás lehetőségét. Mivel az új rendszer a kisnyomású ZÜHR rendszert érinti, ezért szükséges a Paksi Atomerőmű üzemzavari hűtőrendszerének részletes bemutatása.

#### **4. A PAKSI ATOMERŐMŰ ZÓNA ÜZEMZAVARI HŰTŐRENDSZEREI**

Az atomerőműbe beépített biztonságvédelmi rendszerek fontos elemei a zóna üzemzavari hűtőrendszerek (röviden ZÜHR). Feladatuk, hogy hűtőközegvesztéssel járó üzemzavari esetben bóros vizet juttassanak a primerkörbe, ezzel megakadályozva az aktív zóna túlmelegedését és a bórsav által a rendszer újbóli kritikus állapotba kerülését. A rendszerek betáplálási pontjainak a hurkok ki nem szakaszolható részén kell elhelyezkedniük. [2]

A reaktor üzemzavari hűtőrendszereit funkciójuk szerint a következő három csoportba sorolhatjuk:

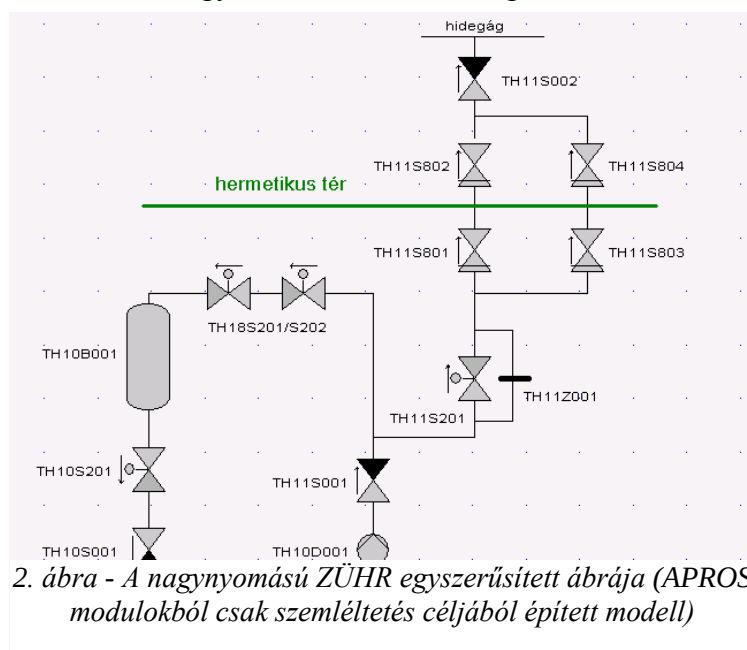
- passzív rendszer;
- nagynyomású aktív rendszer;
- kisnyomású aktív rendszer;

A nagy – és kisnyomású rendszerek redundánsak, három, egymástól függetlenül és párhuzamosan működő ágból állnak. A térbeli szeparáció elvét is szem előtt tartva, az egyes

ágakhoz tartozó berendezések különböző helyiségekben kaptak helyet. A méretezés során azt a követelményt kellett teljesíteni, hogy üzemzavar esetén akár egy rendszerág is képes legyen a feladatot ellátni.

Az egyértelmű azonosítás érdekében minden rendszerelemet egy tíz karakterből álló alfanumerikával láttak el: az első két számjegy (10, 20, 30, 40) a blokkra utal, az ezt követő két betű (TH, TJ, TQ) a rendszert azonosítja. A következő számjegy (1, 2, 3) a ZÜHR rendszerág azonosítója, az ezt követő számjegy az adott ágon belüli elhelyezkedésre utal. Az utolsó négy karakter a berendezés azonosítója: a B-vel kezdődőek a tartályok, a D-vel kezdődőek szivattyúk, az S armatúrára utal (motoros, visszacsapó szelep, biztonsági szelep), Z-vel a szűkítőt jelölik, W a hőcserélők jele.

A passzív rendszer feladata, hogy külső segédenergia nélkül is képes legyen hűtőközeget juttatni a primerkörbe. Ehhez a paksi blokkokon négy darab ún. **hidroakkumulátor** áll rendelkezésre. Ezekben a tartályokban  $40 \text{ m}^3$ ,  $12 \text{ g/kg}$  koncentrációjú bórsavoldat található, amely felett  $30 \text{ m}^3$  nitrogénpárna helyezkedik el, melynek nyomása 35 bar. Ha a primerköri nyomás lecsökken a hidroakkumulátor nyomása alá, akkor a tartályban lévő közeg beáramlik a reaktorba passzív módon, segédenergia nélkül. Betáplálásuk közvetlenül a reaktortartályba történik. A négy hidroakkumulátor ág TH50, TH60, TH70 és TH80 alfanumerikával van



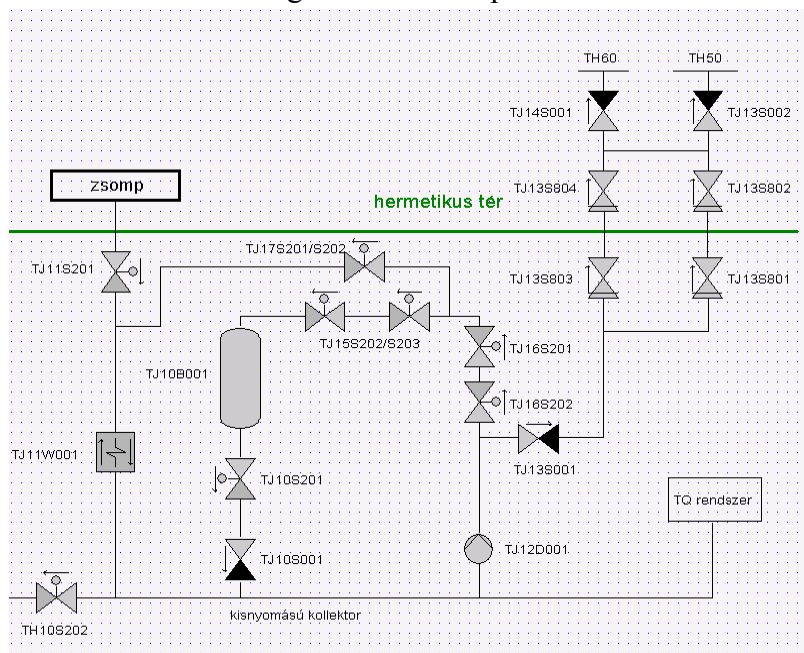
ellátva.

A **nagynyomású ZÜHR** (TH rendszer) feladata, hogy olyan primerköri folyások esetén, amikor a pótvízrendszerrel nem kompenzálható a hűtőközegvesztés, bórsavoldatot juttasson az aktív zónába. Ilyen esetekben a hűtőközeg hőmérsékletének gyors csökkenése miatt reaktivitás szabadul fel a rendszerben, amit le

kell kötni. Erre szolgál a nagynyomású tartályokban lévő magas,  $40 \text{ g/kg}$  koncentrációjú bórsavoldat. A 10-es nagynyomású ZÜHR ág (a 20-as és 30-as ág teljesen hasonló ezzel) egyszerűsített, a dolgozat szempontjából lényeges elemeket tartalmazó felépítése az ábrán látható. A kb.  $100 \text{ m}^3$  térfogatú tartály (TH10B001) egy motoros armatúrával (TH10S201) és egy visszacsapó szeleppel csatlakozik a szivattyú (TH10D001) szívóágához. A centrifugális

elven működő berendezés 12 fokozatból épül fel, maximum 135 bar-ig képes betáplálni, tehát a néveleges primerkörü 123 bar-os érték felett is tud szállítani közeget. A folyásirányban következő visszacsapó szelepet (TH11S001) követően elágazik a víz útja: két armatúrán (TH18S201 és TH18S202) keresztül lehetséges a közeg recirkuláltatása vissza a tartályba, a másik úton a primerkörbe lehetséges a betáplálás. A recirkulációs ágnak akkor van szerepe, amikor a ZÜHR szivattyú indítójelet kap, de még nem tud betáplálni a zónába annak magas nyomása miatt. A primerkör felé vezető út elágazik: abban az esetben ha a kör nyomása 93 bar-nál nagyobb, a víz a motoros armatúrán keresztül (TH11S201) áramlik. Ha a primerkörü nyomás az említett érték alá csökken, az armatúra bezár, majd a továbbiakban egy szűkítőn (TH11Z001) keresztül történik a betáplálás, ami korlátozza a mennyiséget megakadályozva a villamos motor túlterhelődését. Ezt követően a vezetékek ismét kettéágaznak, majd két-két pneumatikus gyorsműködtetésű hermetizáló armatúrán (TH11S801/S802/S803/S804) keresztül történik a belépés a hermetikus térbe (a tartály a bokszon kívül, a 0 m-es szinten található, a szivattyú -6 m-en lévő helyiségben található). A kettőzésre (redundanciára) az egyszeres meghibásodástűrési miatt van szükség: egy hermetizáló armatúra hibája esetén is lehetséges legyen a betáplálás a másikon keresztül. A bokszon belül, a fővízkörhöz történő csatlakozás előtti visszacsapó szelep (TH11S002) feladata megakadályozni a visszafolyást. Normál üzem közben a TH10S201, TH18S201/202 armatúrák nyitott, a TH10S202, TH11S801/802/803/804 armatúrák zárt állapotban vannak. A nagynyomású ZÜHR betáplálási pontjai a 2., 3., 5. hurok hidegágának ki nem szakaszolható részén (a főelzáró tolózárak és a reaktortartály között) találhatók. Amikor a tartályban lévő vízszint lecsökken 500 mm alá, egy reteszműködés által a TH10S201 jelű armatúra bezár és kinyit a TH10S202 jelű, amely eredményeként a kisnyomású ZÜHR rendszer felől lehetséges a víz utánpótlása. A nagynyomású üzemzavari hűtőrendszernek elsősorban kisméretű csőtöréses üzemzavarok (LOCA) esetén van kiemelt jelentősége, hiszen ekkor lehetséges, hogy a rendszer által betáplált víz „elfedi” a törést, azaz stabilizálni tudja a nyomást a rendszerben és hűteni tudja a zónát. [7]

A **kisnyomású ZÜHR** (TJ rendszer) feladata, hogy üzemzvari helyzetben bórsavas hűtőközeget juttasson a primerkörbe az aktív zóna hűtéséhez és szubkritikus állapotban tartásához. A 10-es ági rendszer felépítése az alábbi ábrán látható. A kisnyomású tartályban



3. ábra - A kisnyomású ZÜHR egyszerűsített ábrája

(TJ10B001) körülbelül 300 m<sup>3</sup> 12 g/kg koncentrációjú bórsavoldat áll rendelkezésre. A nagynyomású rendszerhez hasonlóan a szivattyú szívókollektora és a tartály között egy motoros működtetésű armatúra (TJ10S201) és egy visszacsapó szelep (TJ10S001) található. Az egyfokozatú centrifugál szivattyú (TJ12D001) nyomóági nyomása 7-9

bar. Ezt követően kettéágazik az útvonal: a recirkulációs ágra és a tartály felé vezető útra. Utóbbin a szivattyút követően egy visszacsapó szelepet helyeztek el (TJ13S001), majd a hermetikus térbe történő belépéshez a korábban már ismertetett ok miatt két-két pneumatikus gyorsműködtetésű hermetizáló armatúra (TJ13S801/S802/S803/S804) került beépítésre. A visszacsapó szelepeket (TJ14S001 és TJ13S002) követően a betáplálás a 10-es ág esetén a TH50 és TH60 jelű hidroakkumulátorok vezetékébe történik. A 20-as ág a 4. hurok hideg- és melegágának ki nem szakaszolható részébe táplál, míg a 30-as a TH70 és TH80 jelű hidroakkumulátor-rendszer vezetékébe. A recirkulációs ágon a szűkítőt követően (TJ15Z002) két motoros armatúra (TJ16S201 és TJ16S202), majd egy szűkítő (TJ16Z001) után elágazik a víz útja: két armatúrán keresztül (TJ15S202 és TJ15S203) lehetséges a recirkuláció a tartályba, a másik ágon szintén két armatúrával (TJ17S201 és TJ17S202) a zsompi kollektorba történhet a keringtetés. A recirkulációs ágnak akkor van szerepe, amikor a kisnyomású rendszer egyáltalán nem, vagy csak kis mennyiségű vizet tud juttatni a primerkörbe. Az összes indítójel hatására (amelyeket később ismertetek) az összes ZÜHR szivattyú működésbe lép, de az adott rendszer gyorsműködtetésű hermetizáló armatúrái csak bizonyos ZÜHR jelek esetén nyitnak. Amíg ez a jel nem érkezik meg, a rendszer a recirkulációs ágon keringteti a hűtővizet vissza a ZÜHR tartályba. Mivel egy üzemzavar során hosszú távú hűtést kell megvalósítani és a ZÜHR

tartályok kapacitása véges, ezért szükségszerű a betáplált vizet újrahasználni. Ennek megvalósítására a hermetikus térben összegyűlő vizet ún. zsompokon keresztül lehet visszajuttatni a ZÜHR rendszerbe. A zsompi kollektoron lévő motoros armatúrát (TJ11S201) követően elhelyezkedő hőcserélőn (TJ11W001) keresztül fog megvalósulni a hosszútávú hőelvonás a primerkörből. Ennek szekunder oldalán a Dunából vételezett biztonsági hűtővizet keringtetnek. A zsompból érkezett, lehűtött víz ezen az úton kerülhet a kisnyomású kollektorba. A már említett motoros armatúrán (TH10S202) a nagynyomású rendszer is ellátható hűtőközeggel a kisnyomású ZÜHR felől. Normál üzemben a TJ10S201, TJ16S201/S202, TJ15S202/S203 armatúrák nyitott, a TJ13S801/802/803/804, TJ17S201/S202, TJ11S201, TH10S202 armatúrák zárt állapotban vannak. Arról, hogy a szivattyú minden esetben tudjon hűtővizet szállítani a rendszerbe, a reteszfunkciók gondoskodnak. A kisnyomású ZÜHR *reteszműködéseknek* fontos szerepük van a dolgozat szempontjából, ezért ismeretük szükséges [8]:

- a szivattyú recirkulációs ágán lévő armatúrák lezárnak (TJ16S201 és TJ16S202), ha a fővizek felé menő mennyiség több mint 130 t/h, kinyitnak ha a mennyiség lecsökken 130 t/h alá, vagy ha a szivattyú leáll;
- a zsomp összefolyó armatúra (TJ11S201) nyit, ha a tartály szintje lecsökken 500 mm alá és lezár a tartályt a szívóággal összekötő motoros armatúra (TJ10S201), ha bekövetkezik az 500 mm-es reteszműködés, akkor a zsomp összefolyó armatúra nyitásával együtt nyitnak a tartály visszatöltődését megakadályozó recirkulációs armatúrák (TJ17S201 és TJ17S202) és lezárnak a tartály felé menő armatúrák (TJ15S202 és TJ15S203).

A ZÜHR rendszerek a következő jelekre indulnak:

- ZÜHR11 jel: térfogatkompenzátor szint 2,4 m alatti;
- ZÜHR12 jel: térfogatkompenzátor szint 2,7 m alatti és a primerköri nyomás kisebb, mint 118 bar;
- ZÜHR13 jel: primerköri nyomás kisebb, mint 93 bar;
- ZÜHR14 jel: bokszyomása nagyobb, mint 1,1 bar.

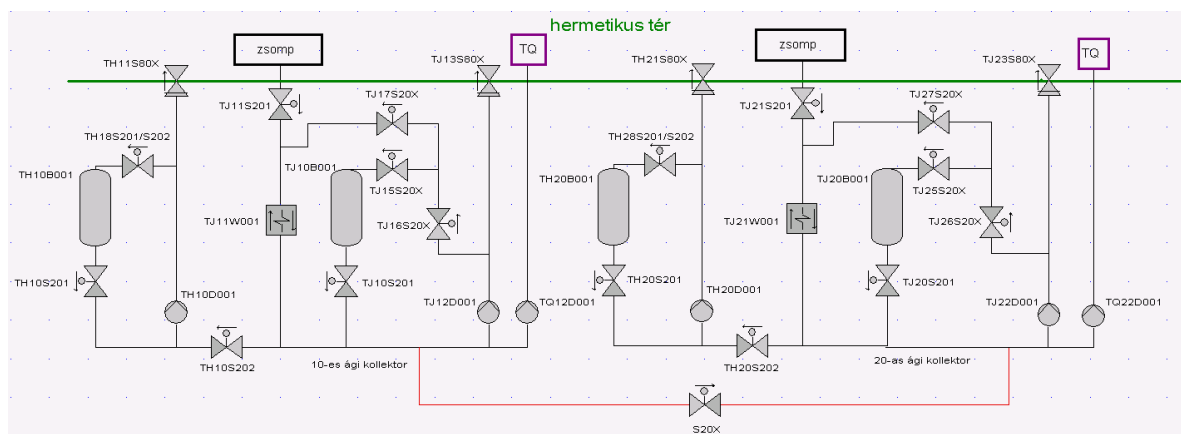
Bármely ZÜHR jel felléptekor indítóparancsot kap az összes kisnyomású és nagynyomású szivattyú. Az ismertetett értékeken kívül a jelek hőmérsékleti feltételekhez is kötöttek: a hat hurokból legalább kettő melegágában a hőmérsékletnek ZÜHR13 jel esetén 255 °C, a többi jel esetén 150 °C fölött kell lennie. A nagynyomású ágakon található hermetizáló armatúrákat a ZÜHR11, ZÜHR13, a kisnyomású gyorsáramokat a ZÜHR12, ZÜHR13, ZÜHR14 jelek nyitják. A csőtöréses üzemzavarok esetén fellépő kigőzölgés a hermetikus tér nyomását növeli. A

nyomáscsökkentés érdekében került beépítésre az aktív sprinkler rendszer és a passzív elven működő lokalizációs torony.

A **sprinkler rendszer** (TQ rendszer) a konténment nyomáscsökkentő rendszerének aktív eleme (szivattyú segítségével szállít közeget). A konténment légterébe permetezve az üzemzavar során kialakult nyomást csökkenti és a légterben felhalmozódó jódizotópokat megköti. A rendszer három, egymástól független ágból áll. A sprinkler szivattyú szivóága a kisnyomású ZÜHR rendszer kollektorához kapcsolódik (3. ábra). A rendszer akkor lép üzembe, amikor a hermetikus tér nyomása 1,1 bar érték fölé emelkedik. A jódizotópok megkötésére egy vízsugárszivattyú hidrazin-hidrátot és kálium-hidroxidot vételez egy tartályból, amely a bórsavoldattal együtt kerül befecskendezésre. A sprinkler által a hermetikus térbe juttatott közeget a zsompon keresztül cirkuláltatják a szivattyúk. A rendszernek kiemelt fontossága van a dolgozat eredményének szempontjából.

A **lokalizációs torony** a hermetikus tér nyomáscsökkentő rendszerének passzív eleme. Valamely főkeringtető vezeték törésekor a keletkező gőz a hermetikus tér levegőjével együtt az átömlő folyosón a lokalizációs toronyba jut, ahol tálcákon lévő bórsavoldaton átbuborékolatva lekondenzálódik. A nem kondenzálódó gázok a légcsapdába kerülnek. Nagy csőtörés esetén, miután a hermetikus tér nyomása lecsökkent a buborékolatató tálcák feletti tér nyomása alá, a tálcákon lévő víz a lokalizációs toronyba permeteződik, ami további nyomáscsökkenést fog eredményezni (közepes és kis töréseknél ez a visszalökődés nem történik meg).

A már bemutatott, koncepcióterv szinten létező, a konténment lassú túlnyomódását megakadályozni hivatott súlyobaleseti sprinkler rendszer két, eddig független kisnyomású ZÜHR ág (10-es és 20-as ág) kollektorát kötné össze csővezetékkel és négy motoros működtetésű armatúrával (amiket együtt veszek figyelembe) az ábrán látható módon (vörös vezeték).



4. ábra - A 10-es és 20-as ági ZÜHR rendszerek az új vezetékkel és armatúrákkal

Normál üzemben és tervezési üzemzavarok esetén a négy szelep (S20X) zárt pozícióban van, nyitásukra baleset esetén van szükség. Előfordulhat azonban olyan eset a tervezési üzemzavarok kezelésekor, amikor az egyik ZÜHR ág meghibásodásának következtében nem lehetséges a tartályban tárolt víz elérése. Ilyen esetben a beépített armatúrák kinyitásával a másik ág hűtőközege felhasználható lenne. Az új kialakításnak hátrányos hatásai is lehetnek: tévedésből nyitva felejtett armatúrák olyan következményekkel járhatnak, amikkel független ágak esetén nem kell számolni.

Mivel a ZÜHR rendszereknek rendkívül fontos szerepük van üzemzavarok kezelésében, ezért az említett folyamatok részletes kivizsgálása szükséges. Nukleáris biztonsági elemzéseket valószínűségi és determinisztikus megközelítéssel végeznek. Ezekkel az eszközökkel fogom megvizsgálni az új *súlyosbaleseti* sprinkler kialakításának (a két ZÜHR kollektort összekötő vezeték és az ezen elhelyezkedő motoros armatúrák) hatását a *tervezési üzemzavarok* kezelésére. A feladat különlegességét tehát az adja, hogy egy, már súlyos probléma kezelésére tervezett rendszert úgy kell megvalósítani, hogy annak egyáltalán ne vagy csak kis mértékű negatív hatása legyen a még kezelhető, tervezési üzemzavarokra és ezzel ne növelje a súlyos balesetek előfordulásának gyakoriságát. A hatás számszerűsítéséhez PSA (Probabilistic Safety Assessment) elemzést fogok végezni, az egyes feltételezett folyamatok igazolásához determinisztikus eszközként az APROS rendszerkódot használok. A módszereket a következő fejezetekben ismertetem.

## **5. A VALÓSZÍNŰSÉG ALAPÚ BIZTONSÁGI ELEMZÉS (PSA) MÓDSZERE**

### **5.1. Történet**

A valószínűség alapú biztonsági elemzés (Probabilistic Risk Assessment vagy Probabilistic Safety Assessment) története az atomenergia felfedezéséhez és alkalmazásához kapcsolódik. Az egyesült államokbeli 1954-es Atomtörvényt követően a nukleáris energia ipari felhasználása lehetővé vált az országban, azonban az első erőművek üzembe lépésekor a nukleáris létesítmények kockázata még nem volt ismert. Az első jelentést atomerőművi balesetekről a Brookhaven Nemzeti Kutatóintézet készítette 1957-ben WASH-740 néven. A jósolt következmények elfogadhatatlannak tűntek, habár a baleset valószínűségét kicsinek vélték. A dokumentumnak köszönhetően kezdődött a balesetek valószínűségi megközelítése a '60-as években, amik közül legfigyelemreméltóbb az 1966-as Mulvihill-jelentés volt, amely hibafa analízisből, majd ezt követően a posztulált kezdeti események következményeinek elemzéséből

állt. [9]

A PSA módszer legfontosabb előzménye a Professor Norman Rasmussen által vezetett Reaktorbiztonsági Tanulmány (RSS) volt. Az 1972 szeptemberében indult projekt eseményfákat használt a rendszerek hibáinak kezdeti eseményekhez és zónakárosodáshoz illesztéséhez, amellyel megoldották a hibafák egyedüli felhasználása során felmerülő nehézségeket. A tanulmány az alábbi pontok miatt tekinthető úttörőnek a PSA módszer terén [9]:

- mintát adott atomerőművi PSA elemzés elvégzéséhez;
- összehasonlítási alapként szolgált;
- a tranziens folyamatokat és kis LOCA eseményeket nevezte meg a legnagyobb veszélyforrásnak szemben az addig feltételezett nagy LOCA eseményekkel;
- az erőművek radiológiai kockázatát kis jelentőségűnek mondja az egyéb társadalmi kockázatokkal összehasonlítva;
- bevezette az eseményfákat a kezdeti események, rendszerek és következmények összekapcsolásához és bemutatta a nagyközönség számára a hibafákat;
- rámutatott, hogy az emberi hibának jelentős szerepe van;
- a próbák és karbantartások hatásait vizsgálta;
- felhívta a figyelmet a közös okú meghibásodásokra.

A munkát WASH-1400 néven publikálták 1974-ben és nagy visszhangot váltott ki a szakértők körében. A végső jelentés 1975 októberében jelent meg WASH-1400 (FINAL) néven. A projektre érkezett értékelések közül néhány fontosabb:

- a hibafa/eseményfa megközelítés egy megfelelő adatbázissal a legjobb módja a következmények számszerűsítésének;
- a szakértők korábbi tapasztalatok hiánya miatt nem tudják megállapítani, hogy az eredményekben közölt baleseti gyakoriságok értéke alacsonynak vagy magasnak számít;
- matematikailag lehetetlen teljes hiba- és eseményfa rendszert létrehozni, ezért olyan mélységig kell a modellt építeni, hogy biztosan kijelenthessük, hogy lényegtelen (kismértékű) hozzájáruló tagokat hanyagoltunk el.

A TMI-2 blokk 1979-ben bekövetkező zónaoladását követően nyilvánvalóvá vált a valószínűség alapú megközelítés fontossága, hiszen öt évvel a baleset előtt a PSA elemzések már rávilágítottak a kis és közepes méretű hűtőközegvesztéses üzemzavarok fontosságára.

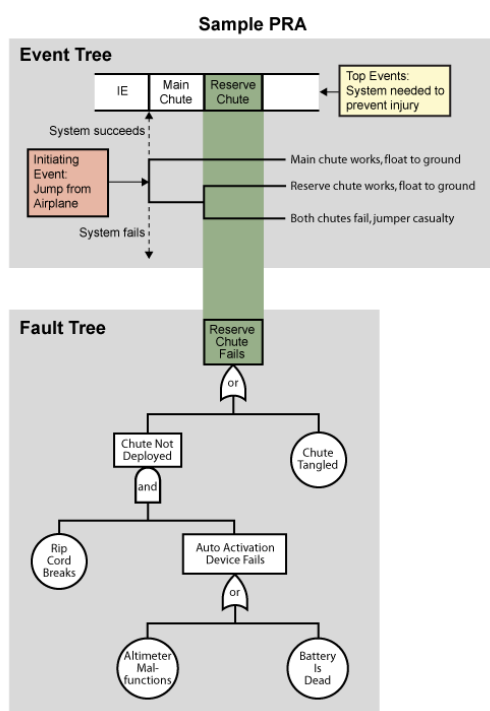
Az atomerőművekre elvégzett PSA elemzések célja, hogy azonosítsák azokat a kezdeti eseményeket, amelyek jelentősen növelik a sérülés kockázatát, valamint számszerűsítsék a

zónaolvadáshoz szükséges események valószínűségét. Ezek ismeretében meghatározhatjuk a rendszer leggyengébb pontjait, amelyeken biztonságnövelő intézkedést elvégezve csökkenthető a kockázat.

## 5.2. A PSA elemzés szintjei

A nukleáris létesítmények valószínűség alapú biztonsági elemzésének három szintjét különböztethetjük meg.

Az **1. szintű** (Level 1) elemzés az erőmű válaszát modellezi egy olyan esemény hatására, amely befolyásolja a blokk működését. A létesítmény válaszána lehetséges kimeneteleit *esemenyláncoknak* nevezzük. A működést a *kezdeti események* zavarhatják meg, amelyeket a várható előfordulási gyakorisággal jellemezhetünk (frekvencia dimenzióval). Az egyes



5. ábra - Az esemenyláncok és a hibafák kapcsolata [10]

esemenyláncok alakulását az határozza meg, hogy az erőmű adott rendszere megfelelően működik-e vagy az operátor mit avatkozik bele a folyamatba. A láncok egy része sikerre (baleset elkerülése), másik hányaduk zónasérüléshez fog vezetni. Az esemenyláncok vizuális megjelenítésére az *esemenyláncok* szolgálnak.

A fában szereplő események (*csúcsesemények*) általában egy rendszerre utalnak, amely szükséges az adott kezdeti esemény kezeléséhez. Az egyes csúcseseményekre szükséges elemzés elvégzése, amelyek grafikus reprezentációját *hibafának* nevezzük. A hibafák eredménye valószínűségi (dimenziótlan) érték, amely megmondja, hogy az adott rendszer milyen valószínűséggel nem tudja

ellátni a feladatát. A zónasérüléshez vezető esemenyláncok gyakoriságát kiszámolva (a kezdeti események frekvenciájának és a csúcsesemények valószínűségének szorzataként), majd ezeket összeadva az összes kezdeti eseményre, megkapjuk a teljes zónasérülési gyakoriságot (CDF – Core Damage Frequency) frekvencia dimenzióban. Az 1. szintű PSA elemzés eredménye tehát az adott zónára vonatkozó CDF érték.

A **2. szintű** (Level 2) elemzés az erőmű válaszát adja meg az 1. szintben kiszámolt zónasérülési gyakoriságra, amely a súlyos balesetek frekvenciáját jelenti. A zónaolvadást követően lezajló

események meghatározása a cél ezen a szinten, amelyhez a konténment rendszereinek választ kell vizsgálni, amely a kiindulási állapottól és a baleset során kialakuló körülményeknek való ellenálló képességtől függ. Amint a hermetikus védőépület reakciója ismert az eseményre, a kibocsátott radioaktív anyagok tulajdonsága és mennyisége meghatározható. Tehát a 2. szint feladata a radioaktív kibocsátás meghatározása, amely a 3. szint bemenetét szolgál.

A **3. szintű** (Level 3) elemzés feladata, hogy a kibocsátott radioaktivitás következményeit megbecsülje az egészségügyi hatásokat (azonnal jelentkező sérülések és hosszútávon manifesztálódó daganatos megbetegedések) és a talaj szennyeződését figyelembe véve. Ezen következmények sok tényezőtől függnak: széliránytól és sebességtől, csapadéktól, a telephely környezetében elhelyezkedő földterületek hasznosításától, stb. Végül soron a 3. szint lényege, hogy a következményeket összekapcsolja a baleset kialakulásához vezető elemi okokkal („Miromolhat el? - Mekkora ennek a valószínűsége? – Mik a következmények?” logikával). Például egy ilyen elemzés eredménye lehet, hogy 1:1.000.000 az esélye annak, hogy az erőmű közelében lakó személy dózisa megegyezik egy mellkasröntgen által okozott sugárterheléssel és 1:1.000.000.000 az esélye, hogy 50 év alatt daganatos megbetegedése lesz a nukleáris létesítmény miatt. [10]

Dolgozatomban a Paksi Atomerőmű 1. szintű PSA elemzésével foglalkozom, ezért az ott alkalmazott fogalmakkal és az elemzés módszertanával szükséges részletesebben megismerkedni.

### **5.3. Az 1. szintű PSA elemzés**

A valószínűség alapú biztonsági elemzés során szükséges a kezdeti események körének meghatározása, amelyek a vizsgálat kiindulópontjaként szolgálnak. Ezt követően a technológia megfelelő ismeretének birtokában az adott esemény kezeléséhez szükséges rendszerek és sikerkritériumok (csúcsesemények) meghatározása a cél, amelyekből az eseményfák építhetők. Az egyes csúcsesemények valószínűségének meghatározásához a rendszereket felépítő elemek meghibásodási lehetőségeiből és lehetséges beavatkozásokból hibafákat készítünk. Végül kiszámítható a zónaolvasásra vezető eseményláncok gyakoriságának összege, amelyből a teljes zónára adódó zónasérülési frekvenciát kapjuk eredményül.

Az Országos Atomenergia Bizottság 1991-ben meghirdette az „AGNES”-projektet (Advanced General and New Evaluation of Safety), melynek célja a paksi erőmű biztonságának kilencvenes évek színvonalán történő újraértékelése volt. A munkában magyar szervezetek vettek részt: KFKI Atomenergia Kutató Intézet, Villamosenergiaipari Kutatóintézet, Erőterv,

és a Paksi Atomerőmű szakemberei. A program legfontosabb eredményeit az erőmű biztonságáról szóló jelentés foglalja össze, amely 1994-ben készült el. A feladatok között szerepelt a tervezési balesetek vizsgálatának revíziója, súlyos baleseti elemzések végzése és a blokkok PSA modelljének elkészítése és értékelése. A program keretében végzett valószínűségi elemzések feltárták, hogy melyek azok a folyamatok, amelyek a legnagyobb valószínűséggel vezetnek súlyos balesetek kialakulásához és melyik berendezéseken és/vagy komponenseken szükséges a megbízhatóságot javítani. Az elemzéseket a program befejezését követően is folytatták leállított állapotra és a belső eredetű kezdeti eseményeken kívül a tűz, belső elárasztás és földrengések által kiváltott üzemzavarokra is kiterjesztették [11]. A nemzetközi gyakorlatnak megfelelően a magyar szabályozás is azt várja el, hogy az egyes blokkok teljes zónasérülési gyakorisága kisebb legyen, mint  $10^{-4}$ /reaktorév. A CBF jelentésben közölt eredmények azt mutatják, hogy az egyes blokkok között nem volt jelentős az eltérés, a 2-es blokkon egy kampány során (névleges üzem közben) vagy a kampányt követő üzemanyag-átrakásra/főjavításra történő leállás alatt belső eredetű kezdeti esemény, tűz vagy belső elárasztás miatt bekövetkező zónasérülés gyakorisága  $1,71 \cdot 10^{-5}$ /reaktorév, amely eleget tesz a nemzetközi és hazai elvárásoknak egyaránt. A pihentető medencére végzett vizsgálatok eredménye szerint az ott tárolt fűtőelemek sérülésének gyakorisága egy naptári évre vetítve  $8,22 \cdot 10^{-7}$ /év. [2]

A következő pontokban a PSA elemzés lépéseit és a modell felépítésének fázisait részletezem a Paksi Atomerőmű elemzésének példájával illusztrálva.

### **5.3.1. A kezdeti események kiválasztása**

Legelső lépésként szükséges meghatározni, hogy a létesítmény milyen üzemállapotára szükséges az elemzést elvégezni. A korszerű vizsgálatok kiterjednek az erőmű névleges teljesítményére, csökkentett teljesítményre és leállított állapotokra is. A továbbiakban a dolgozat szempontjából fontos teljesítményüzemmel foglalkozok.

A már közölt definíció szerint a kezdeti események a létesítmény normál üzemét megzavaró események, amelyek megfelelő kezelőrendszerek és operátori beavatkozások nélkül vagy akár önmagukban súlyos következményekhez vezethetnek. A jelenlegi tendencia az, hogy az események körének meghatározásakor a lehető legtágabb halmazt veszik figyelembe, azaz törekednek az összes elképzelhető kiindulási pontot felhasználni, amelyek bekövetkezési gyakoriságára becslés adható. Nyilvánvalóan teljes lista nem készíthető az elemzés során, de a nem vizsgált kezdeti események kockázatára szükséges becslést adni. A megállapított kezdeti

események lehetnek belső és külső eredetűek. A belső eredetűek közül legfontosabbak a berendezésekben és/vagy rendszerekben bekövetkező technológiai meghibásodások és a helytelen emberi beavatkozásból (operátor, gépész, karbantartó, stb.) eredő események. A külső eredetű veszélyek általában több rendszer és rendszerelem meghibásodását okozzák egyszerre, így összetett üzemzavari helyzethez vezetnek. Külső eredetű természeti veszélyt jelent a szélsőséges időjárás (csapadék, szél, extrém mennyiségű hó), földrengés és az árvíz (esetleg a végső hőnyelő szintjének alacsony állása is), emberi eredetűek közül említésre méltó a repülőgép-rázuhanás (nem terrorista szándékkal), a telephely környékén lévő egyéb ipari létesítmény balesete, stb. A paksi modellben szereplő kezdeti események három fő csoportba kerültek beosztásra [12]:

- csőtöréses kezdeti események (A-E alfanumerikával ellátva);
- tranziens kezdeti események (F-J, M-N);
- speciális, közös oknak tekinthető kezdeti események (K-L).

A csőtöréses kezdeti események körébe tartoznak a hűtőközegvesztést okozó, a csőhálózat különböző helyein fellépő különböző méretű törések és repedések (beleértve a primerkörből a szekunderkörbe vagy a hermetikus téren kívülre történő, interfész LOCA nevű hűtőközegvesztést), valamint olyan armatúrák szándékolatlan nyitása, illetve nyitott helyzetben történő beragadása, melyek ugyancsak hőhordozóvesztést eredményezhetnek primer oldalon. A tranziens kezdeti események primerköri hőhordozóvesztés nélkül okoznak zavart a névleges teljesítményű üzemállapotban és bekövetkezésük gyakran leállást igényel. Jellemző példák az ilyen típusú kezdeti eseményekre a tápvízellátásban, illetve gőzelvitelben bekövetkező anomáliák.

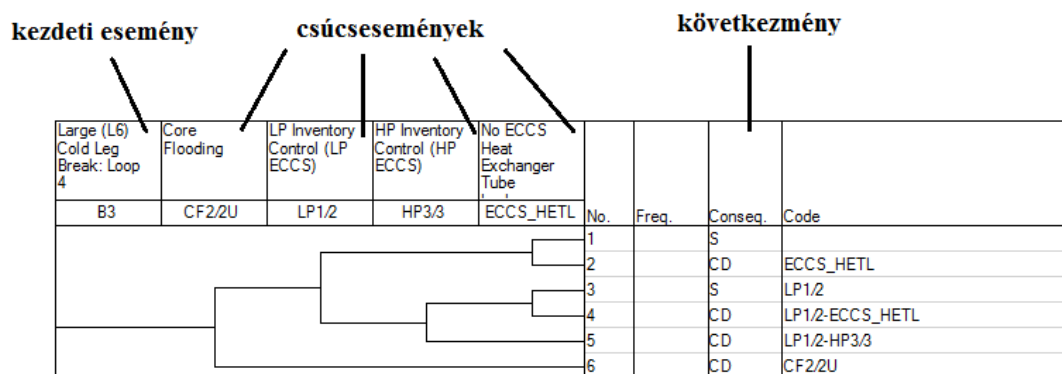
A közös okú kezdeti események fellépése több elhárító rendszer együttes meghibásodását vagy üzemképtelenségét okozza. Ezek erőmű specifikus természetük még az előző két csoportba tartozó kezdeti eseményekénél is erősebb. Az ezen kategóriába sorolandó események közül példaként a külső villamos hálózat elvesztése említhető.

A számszerűsítés érdekében szükséges az egyes feltételezett kezdeti események gyakoriságának meghatározása (1/év dimenzióban), amelyre több lehetőség áll rendelkezésre. Gyakrabban előforduló események esetén az üzemeltetési tapasztalatokból nyert adatok használhatók, amelyek közül elsőbbséget élveznek az adott erőmű típusával megegyező más létesítmények paraméterei. Ritkábban előforduló eseményeknél mérnöki megfontolások és becslések alkalmazandók. Az általános és erőmű specifikus adatok kombinálása a valószínűségelméletből ismert Bayes-tétel szerint történik. A paksi modellben alkalmazott gyakoriságok számos forrásból származnak: Greifswald, Loviisa, Kozloduy, Kola-1

atomerőművekből, bulgár, lengyel, orosz adatokból [12]. Az egyes kezdeti események gyakoriságai a (Melléklet, 2. ábra)-n láthatók.

### 5.3.2. Az eseményfák megalkotása

Az 1. szintű PSA elemzések során azt vizsgáljuk, hogy az adott kezdeti esemény hatására milyen valószínűséggel következik be zónasérülés. Ezért a kezdeti eseménnyel induló eseményláncok végén a zónasérülés, illetve ennek elkerülése szerepel. A kezdeti esemény definiálása és gyakoriságának meghatározása (előző pont) után azt a kérdést kell feltennünk, hogy milyen rendszerek vagy beavatkozások szükségesek az adott üzemzavar kezeléséhez. Általában ezeket a rendszereket vagy beavatkozásokat időbeliség szerint célszerű figyelembe venni, azaz aszerint, hogy milyen sorrendben reagálnak az eseményre. Az alábbi ábrán egy, a 4-es hurkon bekövetkező hidegági nagy LOCA eseményfája látható.



6. ábra - Eseményfa példa (forrás: RiskSpectrum)

Az eseményfa a kezdeti eseményt reprezentáló vízszintes vonallal indul (ami jelenleg a B3 jelű, 4-es hurkon bekövetkező nagy csőtörés). Ezt követően a fa elágazik: az egyes csúcsookban a kezeléshez szükséges rendszerek sikeres funkcióellátásának feltételei (csúcsesemények) találhatók. Az adott kezdeti eseményhez szükséges sikerkritériumok meghatározása termohidraulikai és reaktorfizikai modellekkel lehetséges. Az eseményfákban lévő csúcsesemények az adott rendszer vagy beavatkozás elmaradását (működésképtelenségét) jelentik. Az elágazásokban felfelé haladó ág a sikeres, azaz az adott csúcsesemény nem következik be, a rendszer el tudja látni az elvárt feladatát. A lefelé haladó ágak az adott csúcsesemény bekövetkezését, azaz a rendszer hibáját reprezentálják. Az ábrán látható példában a csőtörést követően a hidroakkumulátorok betáplálására van szükség (CF2/2U), amely akkor tekinthető sikeresnek, ha mindkét akkumulátor (amelyek a hidegágak fölé táplálnak a tartályban) be tudja juttatni a hűtőközeget a zónába. Abban az esetben ha ez nem történik meg, akkor a fában lefele kell lépni, amely egyből zónaolvadáshoz fog vezetni (CD, 6.

eseménylánc). Amennyiben a hidroakkumulátorok megfelelően működnek, a következő üzemzavar-kezelő rendszer a kisnyomású ZÜHR. Ennek sikerkritériuma, hogy vagy a 10-es, vagy a 30-as ágnak üzemelnie kell (LP1/2), azaz egy rendszer már elég a sikerkritérium megvalósulásához. Ha mindkét rendszer működésképtelen, akkor az elágazásban lefelé kell haladni, ha legalább az egyik ellátja a feladatát, akkor felfelé. A lefelé vezető ágon a három nagynyomású ZÜHR-re van szükség (HP3/3). Abban az esetben, ha valamelyik nem áll rendelkezésre, a lefelé menő ág zónasérüléshez vezet (5. eseménylánc). Amennyiben mindhárom nagynyomású ZÜHR rendeltetésszerűen működik, de a kisnyomású kollektoron lévő hőcserélőben törés keletkezik, az eredmény szintén zónaolvadás (4. eseménylánc). Ha a hőcserélő is megfelelően működik, akkor elkerültük a balesetet (3. eseménylánc). A kisnyomású ZÜHR működése esetén a hőcserélő törése határozza meg a kimenetelt: törés esetén zónaolvadás (2. eseménylánc), hiba nélküli esetben sikeres az elhárítás (1. eseménylánc). A kezdeti esemény bekövetkezése esetén tehát a 2., 4., 5., és a 6. eseménylánc vezet zónasérüléshez. Ahhoz, hogy ezek *gyakoriságát* meghatározhassuk a kezdeti esemény frekvenciájának felhasználásával, szükséges az egyes csúcsesemények *valószínűségének* ismerete. Ha ezeket ismerjük, akkor az egyes eseményláncok következményének gyakorisága számolható a kezdeti esemény frekvenciájának és az elágazások valószínűségének szorzataként. Ehhez az egyes rendszerek analízisére van szükség, amelyekhez hibafákat használunk.

### 5.3.3. Hibafa-analízis

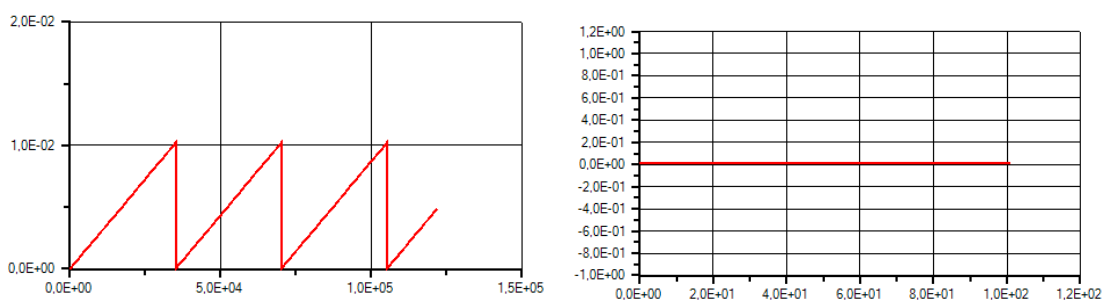
A hibafa-elemzés célja, hogy egy rendszer meghibásodását valószínűségi alapon, logikai műveletekkel írja le. A hibafa tetején helyezkedik el a csúcsesemény, a fák építőelemei a bázisesemények (lehet rendszerelem hibája vagy emberi hiba), a logikai operátorok, a grafikus elemek és az összekötő vonalak. A hibafa-analízis kiterjed az eseményfákban lévő összes rendszerre, azok segédrendszereire, irányítástechnikájukra, energiaellátásukra és működtetésükre (emberi beavatkozásokra). Rendkívül fontos szerepük van az ellátó rendszereknek (villamosenergia, hűtés, vezérlés, stb.), mivel ezek meghibásodása egyszerre több komponens hibáját is eredményezik.

Az elemzés alapvető építőelemeinek tekinthető bázisesemények meghatározásához a rendszert alkotóelemei és felépítése szerint kell komponensekre bontani és meg kell állapítani a lehetséges emberi beavatkozásokat is. Ezt követően az egyes elemek meghibásodásának módjait kell meghatározni (pl. szűrő eltömődik, szivattyú nem indul vagy üzem közben esik ki,

szelep nem nyit, stb.). Ezekből az alapvető meghibásodási scenáriókból hozunk létre báziseseményeket. Mivel a berendezések nagy része villamos működtetésű valamilyen szabályozáson vagy vezérlésen keresztül, ezért hibafájuk legtöbbször sok szintből áll, hiszen az adott irányítástechnikai rendszert is komponensekre kell bontani, majd azok meghibásodásainak megfelelő báziseseményeket definiálni. Miután meghatároztuk az egyes berendezések és ellátó rendszereik báziseseményeit, a valószínűségük számszerűsítéshez értékeket kell hozzájuk rendelni, amit megbízhatósági modellek segítségével oldunk meg. A leggyakrabban alkalmazott modellek [13]:

- folyamatosan monitorozott, javítható komponensek;
- periodikusan tesztelt komponensek;
- konstans hibavalószínűségű komponensek;
- állandó működési idejű komponensek;
- állandó meghibásodási gyakoriságú komponensek;
- nem javítható komponensek.

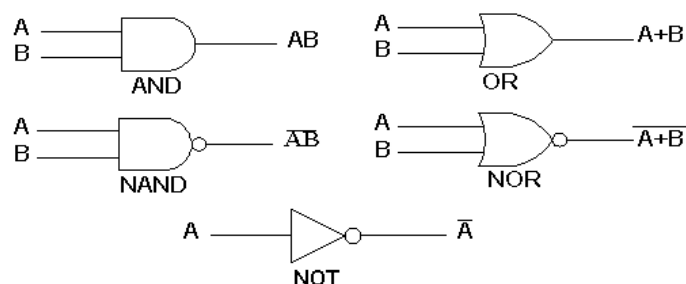
Mindegyik modell egy vagy több paraméterrel írható le (pl. meghibásodási gyakoriság, tesztelési gyakoriság, működési idő, stb.). Dolgozatom szempontjából a periodikusan tesztelt és állandó meghibásodási gyakoriságú komponenseknek van szerepe. A tesztelt berendezéseket a meghibásodási gyakorisággal és a tesztelések közötti időintervallum hosszával lehet jellemezni. A paraméterek felhasználásával a meghibásodási valószínűség az idő függvényében „fűrészfog” alakot vesz fel. A tesztelés időpontjáig a meghibásodás valószínűsége exponenciálisan nő, majd az ellenőrzést követően zérusra csökken. A konstans hibavalószínűségű eseményeket a meghibásodás valószínűségével jellemezzük, amely időben állandó, ezáltal a meghibásodás valószínűsége is konstans időben.



7. ábra – Periodikusan tesztelt és állandó meghibásodási gyakoriságú komponens  
(forrás: RiskSpectrum)

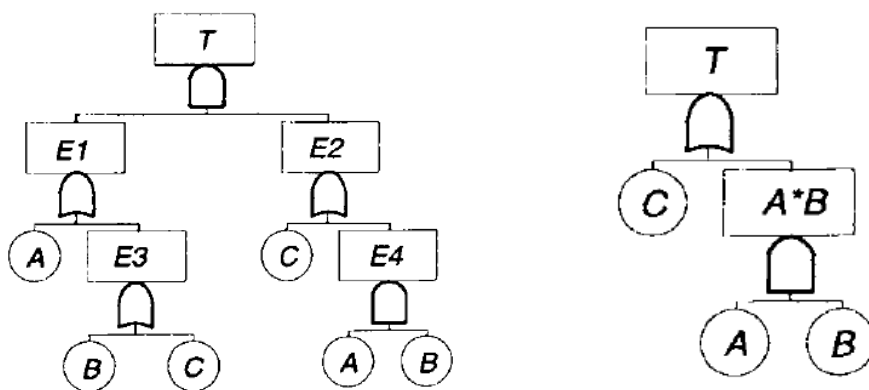
A meghibásodási modellekben felhasznált paraméterek nem diszkrét értékek, hanem eloszlással rendelkeznek. A paksi modellben szereplő paraméterek lognormális eloszlással vannak definiálva két paraméter, a medián és egy hibafaktor segítségével.

A bázisesemények definiálása és paraméterezését követően logikai műveletekkel történik ezek összekapcsolása és a rendszerek felépítése. Ehhez logikai kapuk használata szokásos, amelyek közül a leggyakrabban használt a VAGY- és az ÉS-kapu. A VAGY-kapu akkor válik igazgá, amikor valamelyik bemeneti eseménye bekövetkezik. A valószínűségelméletben is alkalmazott Boole-algebrai műveletek közül az összeadásnak feleltethető meg a kapu. Az ÉS-kapu igazgá válásához valamennyi bemeneti eseményének bekövetkezése szükséges. A kapunak megfeleltethető Boole-algebrai művelet a szorzás. Ezeken kívül a K/N-kapu is használatos, amely akkor válik igazgá, ha N bemeneti eseményből legalább K bekövetkezik (ez minden esetben megvalósítható csupán VAGY- valamint ÉS-kapuk felhasználásával is). Egy esemény komplementerének képzéséhez a negálás kapu használható.



8. ábra - Logikai kapuk (forrás: wikipedia.org)

A hibafa-számítás és egyszerűsítés szemléltetéséhez tekintsük a következő ábrákat.



9. ábra – Hibafa egyszerűsítése [9]

Az egyszerű hibafákon T a csúcsesemény, E1, E2, E3, E4 logikai kapuk és A, B, C a bázisesemények. A Boole-algebrából ismert egyenleteket felírhatjuk az első ábrára:  $T = E1 \cdot E2$ ,  $E1 = A + E3$ ,  $E2 = C + E4$ ,  $E3 = B + C$ ,  $E4 = A \cdot B$ . Helyettesítsünk E4 helyére és fejezzük ki E2-t:  $E2 = C + A \cdot B$ . E3 helyére behelyettesítve és beírva E1-be:  $E1 = A + B + C$ . E1 és E2 helyére helyettesítve, majd T-t kifejezve:

$T = (A + B + C) \cdot (C + A \cdot B) = A \cdot C + A \cdot A \cdot B + B \cdot C + B \cdot A \cdot B + C \cdot C + C \cdot A \cdot B$ . Felhasználva azt, hogy  $X \cdot X = X$  és a műveletek asszociativitását a Boole-algebra azonosságai alapján, írhatjuk:

$T=A \cdot C+A \cdot B+B \cdot C+B \cdot A+C+C \cdot A \cdot B$ . Felhasználva, hogy  $B \cdot C+A \cdot C+C \cdot A \cdot B=C$  és  $A \cdot B+A \cdot B=A \cdot B$  az egyenlőség a következő egyszerű formát ölti:  $T=A \cdot B+C$ . Ez alapján a csúcsesemény logikailag tovább nem egyszerűsíthető, a kapott bázisesemény-kombinációt *minimálmetszetnek* (minimal cutset) nevezzük. Az egyszerűsített hibafa a második ábrán látható. Azt mondhatjuk, hogy a csúcsesemény bekövetkezéséhez elégséges a C eseménynek önmagában bekövetkeznie, vagy az A és B eseményeknek együttesen. A minimálmetszet tehát megmutatja azokat a minimális eseménykombinációkat, amelyek a zóna sérüléséhez vezethetnek. Az egyes rendszerek megbízhatóságáról rendelkezésre álló adatok bizonytalansága miatt néhányan a minimálmetszetek listáját tekintik a PSA elemzés legértékesebb eredményének. A modellezéshez használt szoftverek a hiba- és eseményfa futtatásokat követően megjelenítik a listát a zónasérüléshez való hozzájárulás szerint sorba rendezve. Ebből megtudhatjuk, hogy mely komponens(ek) megbízhatóságán javítva érhetjük el a leghatékonyabb változtatást.

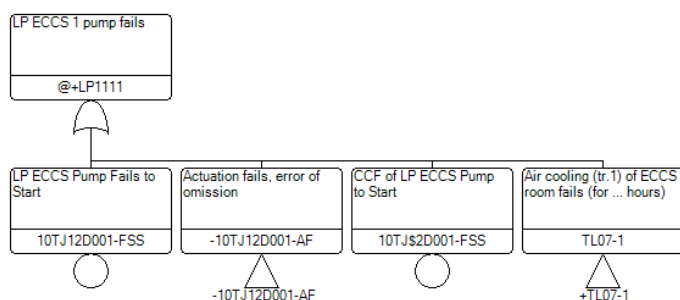
Az egyes berendezések meghibásodásai között előfordulnak olyanok, amik nem függetlenek egymástól. Ekkor együttes bekövetkezési valószínűségük nem egyenlő a független esetben fennálló, a két valószínűség szorzatából képzett értékkel. Általában függő esetekben a két esemény bekövetkezésének valószínűsége nagyobb, mint a két esemény valószínűségének szorzata, ezért a konzervativizmust szem előtt tartva nem célszerű a függőség elhanyagolása.

A paksi modell esetén a készítő az időbeli, szerkezeti függőséget, emberi beavatkozást tartalmazó eseményeket elemezték. A probléma kezelésére számos módszer létezik, ezek közül a  $\beta$ -tényezőt alkalmazó technikát használták. Ennek lényege, hogy az egyes komponensek meghibásodási gyakorisága ( $\lambda$ ) két részből tevődik össze: egy független részből ( $\lambda_i$ ) és egy, közös okból eredőből ( $\lambda_c$ ). A teljes meghibásodási gyakoriság:  $\lambda = \lambda_i + \lambda_c$ . A  $\beta$ -tényezőt a következő módon definiáljuk:  $\beta = \lambda_c / \lambda$ , ebből  $\lambda_c = (\beta \cdot \lambda_i) / (1 - \beta)$  [9]. Az érintett komponensek független meghibásodásához tartozó báziseseménnyel azonos VAGY-kapuba létrehozva egy másik, közös okú meghibásodási gyakorisággal definiált báziseseményt, a bemutatottak alapján kezelni fogja az összefüggő hibákat. A paksi modellben csoportokat állítottak fel, amelyekre meghatározták a  $\beta$  értékeket. Külföldi tapasztalatokat és szakértőket figyelembe véve az értékek általában a  $[10^{-1}, 10^{-3}]$  intervallumba estek [12].

Munkám során a RiskSpectrum PSA szoftvert használtam, amely a svéd Lloyd Register Consulting cég terméke. A program könnyen átlátható formában engedélyezi hibafák, eseményfák építését és a paraméterek definiálását. A modell futtatása után szövegfájlba menthetők ki az eredmények minimálmetszetek formájában, amelyek a zónaolvadáshoz szükséges eseménykombinációk valószínűségét és százalékos hozzájárulását is közlik.

A szoftverben lehetőség van közös okú meghibásodásokat definiálni, többek között a  $\beta$ -faktor segítségével. A dolgozatomhoz alkalmaztam az úgynevezett *House event* logikai kapcsolókat. A hibafákba lehet beépíteni őket, értékük IGAZ, vagy HAMIS lehet. Céljuk, hogy megváltoztassák a hibafák struktúráját a felhasználó által megadott input (True, False) alapján. Léteznek olyan House Event-ek, amelyek egy adott kezdeti esemény futtatásakor válnak igazzá, ezáltal a hibafát a kezdeti esemény alakítja át. Ezt a lehetőséget a későbbiekben használni fogom egy felmerülő probléma kezelésére.

Az alábbi ábrán egy egyszerű hibafa példája látható a RiskSpectrum szoftverből.



10. ábra - Hibafa minta (forrás: RiskSpectrum)

A 10-es ági kisnyomású ZÜHR hibafája az „LP ECCS Pump Fails to Start” báziseseményből, az „Actuation fails, error of omission” hibafából (a háromszög szimbólum egy megnyitható hibafát jelképez, amely a szabályozástechnikával kapcsolatos jelen esetben), a „CCF

of LP ECCS Pump Fails to Start” báziseseményből, amely a RiskSpectrum által generált közös okú meghibásodás eleme és az „Air cooling (tr.1) of ECCS room fails (for hours)” hibafából áll. Ha a felsorolt eseményekből és hibafákból bármely IGAZ logikai értékűvé válik, a csúcsesemény (a szivattyú működésképtelensége) bekövetkezik.

#### 5.3.4. A PSA elemzés értékelése

Az eredményül kapott minimálmetszetek és zónasérülési gyakoriságok tudatában megállapítható, hogy hol célszerű a rendszeren változtatást végezni. Mivel a bázisesemények megbízhatósági modelljeinél felhasznált értékek eloszlással kerültek definiálásra, ezért az eredményt is eloszlással rendelkező értéként számolja a szoftver, amihez Monte Carlo alapú mintavételezést használ. A paraméterek bizonytalansága miatt érzékenységvizsgálat is szükséges, amelynek feladata a modellezési bizonytalanságok, elemzési feltételezések, közelítések eredményekre gyakorolt hatásának jellemzése. Néhány esetben elégséges a paraméterek módosítása, majd a számítás újbóli elvégzése, de a modell átalakítása is szükséges lehet. Jó megoldás lehet az adott paraméter ugyanolyan arányban történő növelése és csökkentése, majd az eredmény összehasonlítása az eredeti értékkel. Ezután azokra a

paraméterekre kell koncentrálni, amelyek a legnagyobb relatív változást okozzák a végeredményben.

## **6. AZ APROS RENDSZERKÓD RÖVID ISMERTETÉSE**

A nukleáris létesítmények valószínűség alapú biztonsági elemzése mellett szükséges determinisztikus vizsgálatok folytatása is. Ennek célja, hogy a névlegestől eltérő üzemállapotokban kialakuló folyamatok fizikai jellemzőit vizsgálja és értékelje, s ezen keresztül bemutassa, hogy a biztonságot garantáló feltételek a tervezés körébe bevont esetekben teljesülnek. Az előző pontban már említett, a biztonsági elemzés készítésének lépései közül a kezdeti események meghatározása után szükséges determinisztikus folyamatszimulációval az eseményt követően a biztonságvédelmi rendszerek meghibásodása esetén kialakulható üzemzavari és baleseti folyamatokat (eseményláncokat) megállapítani. Ennek során be kell azonosítani a rendszerek sikeres beavatkozásának szükséges és elégséges feltételeit (sikerkritériumokat). Ezt követően lehetséges a hibafák megépítése és a további értékelés [14]. A dolgozatomban determinisztikus elemzést alkalmazok az új, súlyosbaleseti sprinkler-rendszer kialakításából adódó feltételezett események igazolására, esetleg cáfolására, amelyeket logikai formában szerkeszték bele a paksi PSA modell hibafáiba. A munkához az APROS (Advanced Process Simulator) szoftvert használtam, ami alapvetően egy egydimenziós termohidraulikai rendszerkód a finn Fortum vállalat és VTT kutatóintézet fejlesztése által. A termohidraulikai modell egy dimenzióban oldja meg gőz- vízfázisra a kontinuitási, energia- és impulzusmegmaradási egyenletet. A hőtani és áramlástan modellezés mellett képes egydimenziós reaktorkinetika, mérés- irányítás- és szabályozástechnika, elektromos hálózat, a hermetikus térben zajló folyamatok és a súlyos baleseti szituációban várható üzemanyagsérülés számítására is. Ezáltal nemcsak az alapvető fizikai folyamatok, hanem a teljes rendszer viselkedése vizsgálható, mind üzemi, mind üzemzavari és baleseti helyzetekben. A program felhasználója előre elkészített komponensekből (szivattyú, cső, szelepek) rakhatja össze a modellt, a számításhoz szükséges nódusokat, szakaszokat, hőforrásokat a szoftver generálja le. A modell építéséhez rendelkezésre áll egy interaktív, grafikus felhasználói felület (GRADES), de lehetőség van az eredeti, parancssoros terminál használatára is. A programcsomag fizikai modelljeit számos valós kísérlethez és méréshez validálták, tehát eredményei széles körben elfogadottak. [15]

A projekthez először az MVM Paksi Atomerőmű ZRt. Fejlesztési és Elemzési Osztályán rendelkezésre álló paksi modellt használtam. Ezt követően a BME NTI által fejlesztett, a

hermetikus teret és sprinkler-rendszert is tartalmazó modellt egészítettem ki a szivattyúk recirkulációs körével és ezek irányítástechnikájával, majd számításokat a végeztem a következő fejezetekben bemutatott módon.

## 7. A PAKSI ATOMERŐMŰ APROS-MODELLJÉNEK KIEGÉSZÍTÉSE

A munkámhoz a BME NTI APROS-modelljét fejlesztettem tovább a vizsgált koncepcióterv tervezési üzemzavarokra kifejtett hatásainak vizsgálatához. Az elemzés során kiderült, hogy a kisnyomású ZÜHR szivattyúk recirkulációs ágának rendkívül fontos szerepe van akkor, ha a két kollektor az új csővezetékkel és nyitott armatúrák segítségével összeköttetésben van egymással.

A recirkulációs ág megépítése a meglévő modell két felületét érinti: az „Emergency core cooling systems” és a „Containment spray modell” nevű sémaképeken módosítottam. Az újonnan beépített armatúrák irányítástechnikájához egy „Recirculation line actuation” nevű felületet hoztam létre. Az eredeti felület a *(Melléklet, 3. ábra)*-n, a módosított a *(Melléklet, 4. ábra)*-n látható.

A következőkben az általam beépített elemek paramétereit ismertetem. A csőszakaszok hosszát és az összekötő pontok modellben definiált referenciaszintjétől mért magasságát a Paksi Atomerőmű Végleges Biztonsági Jelentésének (VBJ) kisnyomású ZÜHR rendszer leírását tartalmazó alfejezetéből származó kép alapján *(Melléklet, 5. ábra)* egy ismert méret és erre épülő mérnöki megfontolások segítségével végeztem. A recirkulációs ág hangolásához az erőmű Rendszertechnika Osztályától kapott kisnyomású szivattyú jelleggörbáját használtam *(Melléklet, 6. ábra)*. Dolgozatomban a 10-es ági recirkulációs ág megalkotását részletezem, a többi két ág esetén is azonos komponenseket és paramétereket használtam (elhanyagolva, hogy a 20-as ág berendezéseit befogadó helyiségek valamelyest eltérnek a másik két ágtól). Az egyes komponensek paramétereit közül csak azokat ismertetem, amelyeket az alapértelmezett értékhez képest módosítottam.

A módosított ZÜHR felületen *(Melléklet, 4. ábra)* beépített „Pipe 1” csővezeték a kisnyomású szivattyú nyomóágát köti össze a TJ16S201/202 recirkulációs armatúrákkal. A modellezéséhez az APROS „Pipe” komponensét használtam, amelyhez a következő paramétereket adtam meg:

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Module name:          | Pipe 1 |
| Module type           | PIPE   |
| Flow length of pipe   | 11,8 m |
| Diameter of pipe      | 251 mm |
| Form loss coefficient | 1200   |

A csővezetékét folyásirányban követő pont „Point 1”. A komponens szerepe, hogy a csővezeték és a szelep közötti kapcsolatot megteremtse. A pont paraméterezése:

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| Module name:                   | Point 1 |
| Module type                    | Point   |
| Flow model                     | 6       |
| Name of fluid                  | WSB     |
| Elevation from reference level | 2,8 m   |

A recirkulációs armatúrákat (TJ16S201 és TJ16S202) egy komponenssel, az APROS kódban lévő „Basic Valve” elemmel modelleztem, amelyhez irányítástechnikát is építettem a később bemutatott módon. A paraméterezéshez (átmérő, zárási idő) a VBJ-ben szereplő adatokat használtam:

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Module name:                         | TJ16S201/S202          |
| Module type                          | Basic Valve            |
| Flow area                            | 0,00785 m <sup>2</sup> |
| Position of valve                    | 1                      |
| Driving time of valve                | 20 s                   |
| Loss coefficient of fully open valve | 25                     |

A „Point 2” elem az armatúrákat követően egy elágazási pont, ahonnan egyrészt a jelenlegi felületen helyet kapó kisnyomású tartály felé tud recirkulálni a hűtőközeg, másrészt az 500 mm-es reteszt követően a zsompi kollektorba. Ehhez a „Containment spray modell” sémaképen létrehoztam ennek a pontnak a másolatát (slave copy). A használt paraméterek:

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| Module name:                   | Point 2 |
| Module type                    | Point   |
| Flow model                     | 6       |
| Name of fluid                  | WSB     |
| Elevation from reference level | 3,5 m   |

Az ezt követő „Pipe 2” azonosítójú csővezeték a tartályoknál található armatúrákat köti össze a már tárgyalt recirkulációs armatúrákkal. A komponens paraméterei:

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Module name:          | Pipe 2 |
| Module type           | PIPE   |
| Flow length of pipe   | 4,32 m |
| Diameter of pipe      | 251 mm |
| Form loss coefficient | 1200   |

A TJ15S202, TJ15S203 armatúrákat közösen egy „Basic Valve” komponenssel modelleztem, megfelelő irányítástechnikával ellátva. A szelepeken áthaladó hűtőközeg a kisnyomású tartály aljától számított 3,78 m magasan köt be, amit a tartály paramétereinél adtam meg. Az armatúrák adatai:

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Module name:                         | TJ15S202/S202          |
| Module type                          | Basic Valve            |
| Flow area                            | 0,01767 m <sup>2</sup> |
| Position of valve                    | 1                      |
| Driving time of valve                | 20 s                   |
| Loss coefficient of fully open valve | 20                     |

A recirkulációs ág elemeinek alaki ellenállás-tényezőjét a kisnyomású szivattyú jellegörbéjének segítségével határoztam meg. A csővezetékek nagy (1200 értékű) tényezőjét a rendszerben lévő szűkítők indokolják. A rendelkezésre álló adatok alapján a szivattyú recirkulációs ági üzemben 8,46 bar nyomásemelésre képes 110 t/h tömegáram mellett. A bemutatott paraméterekkel a modellben 7,07 bar emelést sikerült létrehozni 111 t/h forgalom mellett, amely jól megközelíti a valós értékeket.

Az új kialakítás modellezéséhez két csővezeték és a négy armatúrát együttesen modellező szelepet használtam. A vezetékek méretezéséhez a Megvalósíthatósági Tanulmányban szereplő hidraulikai modell szolgált alapul [5]. A „New pipe 1” paraméterei:

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| Module name:          | New pipe 1 |
| Module type           | PIPE       |
| Flow length of pipe   | 20 m       |
| Diameter of pipe      | 200 mm     |
| Form loss coefficient | 1          |

A vezeték és az armatúrákat összekötő „New point 1” paraméterei:

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| Module name:                   | New point 1 |
| Module type                    | Point       |
| Flow model                     | 6           |
| Name of fluid                  | WSB         |
| Elevation from reference level | -5,3 m      |

A négy armatúrát modellező „New valves” nevű „Basic Valve” komponens adatai:

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Module name:                         | New valves             |
| Module type                          | Basic Valve            |
| Flow area                            | 0,00785 m <sup>2</sup> |
| Position of valve                    | 1                      |
| Driving time of valve                | 0,1 s                  |
| Loss coefficient of fully open valve | 1                      |

A „New point 2” paraméterei teljes egészében megegyeznek a „New pipe 1” komponensével:

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| Module name:                   | New point 2 |
| Module type                    | Point       |
| Flow model                     | 6           |
| Name of fluid                  | WSB         |
| Elevation from reference level | -5,3 m      |

A 20-as kisnyomású kollektorhoz csatlakozó „New pipe 2” paraméterei azonosak a „New pipe 1” elemével:

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| Module name:          | New pipe 2 |
| Module type           | PIPE       |
| Flow length of pipe   | 20 m       |
| Diameter of pipe      | 200 mm     |
| Form loss coefficient | 1          |

A „Containment spray modell” felületen (*Melléklet, 6. ábra*) és (*Melléklet, 7. ábra*) végzett módosítások a következő komponensek hozzáadását jelentették. A másolatként áthozott „Point 2” paraméterezésével már nem kell foglalkozni, hiszen mindenben azonos az előző sémaképen tárgyalt ponttal. A „Pipe 3” csővezeték feladata, hogy a recirkulációs armatúrákat folyásirányban követően hűtőközeget szállítson a zsompi kollektor felé a kisnyomású tartály leürülését követően. A komponens paraméterei:

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| Module name:          | Pipe 3  |
| Module type           | PIPE    |
| Flow length of pipe   | 23,98 m |
| Diameter of pipe      | 251 mm  |
| Form loss coefficient | 1       |

A „Point 4” komponens adatai:

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| Module name:                   | Point 4 |
| Module type                    | Point   |
| Flow model                     | 6       |
| Name of fluid                  | WSB     |
| Elevation from reference level | 0,35 m  |

A két, eredetileg párhuzamosan kapcsolt TJ17S201 és TJ17S202 armatúrák „Basic Valve” modelljének paraméterei:

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| Module name:                         | TJ17S201/S202          |
| Module type                          | Basic Valve            |
| Flow area                            | 0,01767 m <sup>2</sup> |
| Position of valve                    | 0                      |
| Driving time of valve                | 20 s                   |
| Loss coefficient of fully open valve | 1                      |

Az armatúrák vezérléséhez a „Recirculation line actuation” sémaképen hoztam létre irányítástechnikai komponenseket (*Melléklet, 8. ábra*). A recirkulációs armatúrák irányításához „Analog to Binary Converter” komponens segítségével képezek bináris jelet a TJ13Z20 azonosítójú, a TJ13S801 szelepet folyásirányban követő csővezeték forgalma alapján. Ha a fővízkör felé menő mennyiség 130 t/h-nál nagyobb, akkor IGAZ értékű, ha kisebb, akkor HAMIS értékű bináris jel jelenik meg a kimeneten. Az alkalmazott komponens alapértelmezettől eltérő paraméterei:

|                                  |                             |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Module name:                     | Analog to Binary            |
| Module type                      | AB converter                |
| Measured component and attribute | TJ13Z020 PI12_MIX_MASS_FLOW |
| Limit value                      | 36,11 kg/s                  |

A fővízkör felé menő forgalom alapján kapott bináris jeleket a szelepet vezérlő „Device Control for Continuous Devices” komponensbe csatoltam. Az eszköz feladata, hogy a reteszműködésnek megfelelően 130 t/h-nál nagyobb értéknél bezárja, kisebb értéknél kinyissa a recirkulációs TJ16S201/S202 armatúrákat. A vezérlő paraméterei:

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Module name:                   | Controler1                        |
| Module type                    | Device Control Cont               |
| Controlled component+attribute | TJ16S20X_VA1 V_POSITION_SET_VALUE |
| Output value                   | 0                                 |
| Protection Close Signal        | RECIRCUL_XB01                     |
| Protection Open Signal         | RECIRCUL_XB04                     |

A zsomphoz kapcsolódó armatúrák vezérléséhez a modellben már definiált bináris jelet használtam, amelynek értéke IGAZ, ha az adott ág kisnyomású ZÜHR tartályának vízszintje 500 mm-nél magasabb, HAMIS, ha ennél kisebb. Ebben az esetben is a „Device Control for Continuous Devices” komponenst használtam, egyet a TJ17S201/S202 armatúrák nyitásához, egyet a TJ15S202/S203 armatúrák zárásához 500 mm vízszint alatt. A TJ17S201/S202-t vezérlő komponens paraméterei:

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Module name:                   | Controler2                        |
| Module type                    | Device Control Cont               |
| Controlled component+attribute | TJ17S20X_VA1 V_POSITION_SET_VALUE |
| Output value                   | 0                                 |
| Protection Open Signal         | TJ10B001_LOW_LVL                  |

A TJ15S202/S203 vezérlője:

|                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| Module name:                   | Controler3                        |
| Module type                    | Device Control Cont               |
| Controlled component+attribute | TJ15S20X_VA1 V_POSITION_SET_VALUE |
| Output value                   | 1                                 |
| Protection Close Signal        | TJ10B001_LOW_LVL                  |

Értelemszerűen a másik két ág esetén is azonos irányítástechnikát alkalmaztam. A bemutatott komponensekkel a kisnyomású ZÜHR szivattyúk recirkulációs körét és az új vezeték hatásait (nyitott armatúrákkal) lehetséges modellezni az egyes tervezési üzemzavarok, elsősorban hűtőközegvesztéses esetekben. A továbbfejlesztett modellt a következő fejezetben bemutatott, a valószínűségi szemlélet felől megközelített események demonstrálására fogom használni.

## 8. A VIZSGÁLT SPRINKLER-RENDSZER HATÁSAI A TERVEZÉSI ÜZEMZAVAROKRA

### 8.1. A feladat célja

A már bemutatott, jelenleg koncepcióterv szinten létező súlyosbaleseti sprinkler-rendszer a 10-es és 20-as kisnyomású ZÜHR ág kollektorát köti össze csővezetékekkel és négy, motoros működtetésű armatúrával. Normál üzemben és tervezési üzemzavarok esetén az armatúrák zárt állapotban lennének, azonban elképzelhetők olyan scenáriók, amikor célszerű lehet a két ág összenyitása. Ez természetesen olyan körülmények fennállása esetén ésszerű döntés, amikor valamilyen előny származik a beavatkozásból. Előfordulhat olyan szituáció is, amikor az üzemzavar-kezelés szempontjából kártékony hatása van az összekötésnek. Ez akkor történhet meg, ha valamilyen okból kifolyólag nyitva maradnak az armatúrák és a kezelő személyzet nem zárja őket. A feladat megoldása során is az előnyös és hátrányos hatások felőli megközelítés szerinti logikát követem. Elsőként meghatározom a lehetséges pozitívumokat, kiegészítem a modellt a felhasználásukkal, számításokat futtatok és értékelek. Ezt követően a negatívumokat is beépítve végzek elemzést. A folyamatok igazolására APROS szimulációt futtatok. A RiskSpectrum szoftverben elkészített paksi PSA-modell kis- és nagynyomású ZÜHR rendszereibe hoztam létre új hibafákat. Ahhoz, hogy a későbbiekben bizonyítani tudjam a fák elhelyezésének megfelelőségét, szükséges a paksi modell ZÜHR rendszereinek PSA-modelljét átlátni. Ebben az egyes kapuk azonosítókkal vannak ellátva, amelyek megkönnyítik a hivatkozást. Mivel dolgozatomban ezekre hivatkozom, ezért a *Mellékletben* az egyes tárgyalt hibafák fontos részeit csatolom, amelyek segítségével az alfanumerika érthetővé és átláthatóvá válik.

### 8.2. A paksi PSA-modell ZÜHR rendszereinek felépítése

A fák tetején az egyes ágak (10, 20, 30) meghibásodásai szerepelnek, amelyek az eseményfákban szereplő sikerkritériumok alapján VAGY-, ÉS-, vagy K/N-kapuba vannak kötve. Mivel a három ág hibafája teljesen hasonló, ezért a következő bemutatásban csak a 10-es ág felépítését részletezem.

A *nagynyomású ZÜHR rendszer* esetén az ág meghibásodása két esetben lehetséges: a nagynyomású és kisnyomású tartályból történő betáplálás során (HPI1 kapu) VAGY a recirkulációs (zsompi) fázisban (HPR1 kapu). A két lehetséges scenáriót egy-egy ún. transzferkapu képviseli, amelyek a 10-es ági hibát kifejező VAGY-kapuba kerültek tehát

bekötésre. A transzferkapuk a modell átláthatóságát segítik azzal, hogy a hibafákat új ablakban lehetséges megnyitni használatukkal (a RiskSpectrum szoftverben a háromszög szimbólummal ellátott kapuval valósíthatók meg). Megnyitva ezeket a kapukat látjuk, hogy valójában ők is VAGY- illetve ÉS-kapuként funkcionálnak. A tartályos fázis VAGY-kapujában (HPI1) három újabb transzferkapu található. Az egyik (HP1IH kapu) a nagynyomású tartály és az ezt a szivattyúig folyásirányban követő berendezések hibáit tartalmazza (TH10B001 tartály, TH10S001 visszacsapó szelep, TH10S201 motoros armatúra). A szivattyút és azt a reaktortartályig vezető úton követő rendszerek hibáit magába foglaló kapu (HP1C-) a második. A harmadik kapu (@+HP052 jelű) a kisnyomású tartályból (HP1IL) történő betáplálás hibáját tartalmazza. Egy szinttel visszalépve, a recirkulációs fázis hibáját tartalmazó VAGY-kapu (HPR1) a szivattyút követő berendezések hibáit tartalmazó kaput (HP1C-), a zsomphoz köthető berendezések hibáit tartalmazót (@+HP1107), és egy, a főkeringtető szivattyú tömítésével kapcsolatos hibát (@+LP41) tartalmaz. *(Melléklet, 9. ábra)*

A kisnyomású ZÜHR rendszer 10-es ágának meghibásodását tartalmazó VAGY-kapuban (@+LP010) a tartályos betáplálás kapuja (LPI1) és a recirkulációs fázis (LPR1) hibáit tartalmazó kapu található. A tartályos fázis VAGY-kapujában (LPI1) a tartály és az ezt a szivattyúig követő elemek hibái (@+LP1170), a szivattyút és a folyásirányban ezt követő berendezések meghibásodásait tartalmazó kapu (LP1C-) és egy, a szivattyú üzem közbeni kiesését tartalmazó bázisesemény található. A recirkulációs fázis VAGY-kapujában (LPR1) a szivattyút követő berendezések (LP1C-), a zsompot a kisnyomású kollektorral összekötő elemek (@+HP1139) és a kisnyomású szivattyú üzem közbeni hibáit (10TJ12D001-FRO) tartalmazó kapuk találhatók *(Melléklet, 10. ábra)*.

### **8.3. A kialakítás előnyös hatásai**

A két kisnyomású kollektor összekötése lehetővé teszi, hogy olyan esetben, amikor valamelyik ZÜHR ág betáplálása nem lehetséges a tartály, vagy a tartályhoz vezető út meghibásodása miatt, akkor az armatúrákat kinyitva a másik ági tartály vizét juttassa a szivattyú a zónába. Recirkulációs fázisban a zsompi berendezések hibája (a zsompszűrő eltömődése, TJ11S201 armatúra működésképtelensége) megakadályozhatja az adott ág hosszú távú hűtési funkciójának ellátását, de az új vezetéken keresztül lehetséges a másik rendszer recirkuláltatott vizének használata. Ennek köszönhetően az adott ág betáplálása az új esetben akkor hiúsulhat meg, ha elveszti a vízvételi forrását ÉS az új összeköttetésen keresztül sem tud vételezni. Ezáltal a betáplálás elmaradásának valószínűsége csökkenthető, hiszen egyszerre kell teljesülnie

annak, hogy a saját ágán romlik el a vízhez vezető út és a másik ág felől sem tudja pótolni. Utóbbi scenáriónak több oka is lehet.

Egyrészt az operátornak ki kell nyitnia az alaphelyzetben zárva lévő armatúrákat, ami nem biztos, hogy eszébe jut. Abban az esetben, ha az összekötés lehetősége belekerül az ÁOKU-ba nagyobb valószínűséggel történhet meg ilyen esetben a két ág összekötése. Az ÁOKU (Állapot Orientált Kezelési Utasítások) célja, hogy a teljesítmény és meleg üzemállapotok során fellépő tranziensek szervezeten kerüljenek kezelésre. [16] Az üzemzavarok kezelésekor az operátorok az ÁOKU pontjait követik, amellyel növelik a sikeresség valószínűségét. Mivel szándékolt esetben az operátor valószínűleg kinyitja mind a négy armatúrát, ezért ezt közösen veszem figyelembe a létrehozott „OPHIBA1” azonosítójú báziseseményben. Annak a valószínűségét, hogy nem jön rá az egybenyitás előnyére, vagy nem teszi meg  $2,14 \times 10^{-2}$  értékűnek vettem. Az alkalmazott paraméter (HEP\_AOKU\_323) az ÁOKU ES-1.3 részében használt, „Összes TJ útvonalat tévesen rossznak minősíti: nem lehet zsompi recirkulációt létrehozni” báziseseményhez tartozó, a modellben már meglévő, korábban definiált érték. A hibafák készítésénél törekedtem arra, hogy az eredeti modellben már meglévő, definiált paramétereket használjam az új báziseseményekhez. Erre a műszaki analógia, kialakításbeli hasonlóságok adnak lehetőséget. Ezzel az elkészített bázisesemény már teljes értékű, hiszen megtörtént a felparaméterezése.

Másrészt előfordulhat, hogy az új armatúrák nem nyitnak. Ha egy közülük nem nyit, az már az egész áttáplálást megakadályozhatja, így ezeket az eseményeket VAGY logikai művelettel szükséges összekapcsolni. Az armatúra nyitása nem lehetséges, ha gépészeti okból hibásodik meg: mivel a rendszert négyévente ellenőrzik, ezért nem lehet jelen esetben használni a ZÜHR tetszőleges motoros armatúrájának gépészeti meghibásodási valószínűségét, hiszen azokat hathetente ellenőrzik. A hasonló körülmények között működő (bóros víz közegű), nyomású ( $p < 10$  bar) és méretű ( $50 \text{ mm} < d < 150 \text{ mm}$ ) armatúrák meghibásodási gyakoriságát (GS 2004AG Failure Rate néven definiált paraméter) 4 éves tesztelési időközzel (TI35040 Test Interval) használtam az armatúrák gépészeti okból adódó meghibásodásának valószínűségéhez (CC hibamód) és így hoztam létre a „TB S 201/202/203/204 GEPHIBA” báziseseményeket. Ezenfelül lehetséges, hogy közös okból nem nyitnak: itt 0,002-es béta-faktort használva definiáltam egy „TB S 20\$ CCF” paramétert, amivel a négy armatúra közös meghibásodását modellezem, majd báziseseményként „TB S 20\$ GEPHIBA” néven építettem be. A Paksi Atomerőmű 3. blokk 1. szintű PSA elemzésének Összefoglaló kötetében szereplő, egyes berendezések közös okú hibáját számszerűsítő 5-1. táblázatban a kis – és nagynyomású rendszer motoros armatúráinak CC (Closed-Closed) hibájára vonatkozó 0,001 és 0,002 érték

közül a konzervativizmus miatt a nagyobbbat választottam [12]. Az is előfordulhat, hogy az armatúrát nyitó motor hibásodik meg. Ehhez a TH10S202 armatúra adatát használtam, hasonló mérete és paraméterei miatt, majd „TB S201/202/203/204 MOTORHIBA” nevű báziseseményeket hoztam létre, aminek paramétere a modellben már korábban definiált „TMOD-02-CC”.

Az armatúrák nyitását a szükséges villamos betáplálás hiánya is megakadályozhatja. A korábban ismertetett villamos tervből kiderül, hogy kétféle betáplálásról működhetnek az új berendezések: súlyosbaleset esetén szükséges kábelfektetés, próbaüzemben, illetve az armatúrák tervezési üzemzavar közbeni nyitásokor a CF vagy CJ főelosztó felől érkezne villamos energia, ami egy FDXX alelosztón keresztül jutna el az armatúrákhoz. Mivel ennek az új elosztónak a paraméterei még nem ismertek, a konzervativizmust szem előtt tartva készítettem egy „TB LOSS OF POWER” báziseseményt, amelyhez az általam létrehozott „TB LOP”, konzulensem ajánlása alapján  $1E-03$  értékűnek definiált valószínűségi paramétert használtam. A motorhibát és a villamos betáplálás hiányát modellező báziseseményeket „S201/S202/S203/S204 motorhiba” nevű VAGY kapukba kötöttem. A motor, vagy a villamos ellátás hibájakor lehetséges gépésszel kinyitítani az armatúrát, amihez egy „S 20\$ armatura kezzel nem nyitható” báziseseményt hoztam létre, aminek paraméterre a TH10S202 armatúrájával azonos (HUMAERR-EOG). Ezek az „S201/S202/S203/S204 armatura villamosan es kezzel sem nyitható” ÉS kapukba kerültek beépítésre. Mindezek a „TB új szelepek nem nyitnak” hibafába kerültek, amelyhez a könnyebb átláthatóság érdekében egy transzferkaput hoztam létre (*Melléklet, 11. ábra*). Ezzel az armatúrák nyitásokor számításba vehető meghibásodásokat modelleztük.

Az armatúrákon kívül a másik ágon lévő, víztartályhoz vezető út is lehet hiba forrása, így egy összetett hibafa beillesztése szükséges az eredeti modellbe. Mivel a nagy- és kisnyomású rendszernél tartályos és recirkulációs fázisban eltérő folyamatok zajlanak le, ezért az új rendszer előnyös hatása is eltér az egyes esetekben, így ezeket külön tárgyaljuk.

### **8.3.1.A kialakítás előnyös hatásai a nagynyomású rendszerre**

A tartályos üzemben (HPI1) a szivattyú és az azt követő rendszerek meghibásodásával (HP1C-) nem foglalkozunk, hiszen az új rendszer csak a szivattyú előtti szakaszon okoz változást, a folyásirányban ezt követő eszközök működésére nincs hatással. A nagynyomású tartályból való betáplálás (HP1IH) meghibásodását sem módosítjuk. Az új kiépítéssel elérhetnénk ugyan, hogy a hiba bekövetkezésekor a másik ág (20-as) nagynyomású tartályából vételezünk hűtővizet,

ehhez azonban szükséges lenne a nagy és kisnyomású rendszert összekötő armatúra (TH10S202) nyitására, a kisnyomású tartályok armatúráinak zárására (TJ10S201, TJ20S201), az új vezetéken lévő armatúrák nyitására és a 20-as ági nagy – és kisnyomású rendszert elválasztó armatúra (TH20S202) nyitására. Ezt nem célszerű megvalósítani, hiszen a kisnyomású tartályok armatúráinak zárása az üzemzavar-kezelés későbbi szakaszára kártékony hatással lehet, ezért ezt a hibafát nem módosítottam.

A kisnyomású tartályból történő betáplálás (HP11L) úgy hiúsulhat meg, hogy a szivattyú működés közben leáll (10TH10D001-FRO), a szivattyú hűtése hibásodik meg (10TF21D001-FRO), valamint a TJ10-es szakaszon lévő visszacsapó szelep nem nyit (10TJ10SQ01-CCS), eltörik a tartály (10TJB001-RPO), vagy nem nyit a kisnyomású ággal összekapcsoló TH10S202 armatúra (@+HP1147). A hibafában elhelyezett House Event kapukkal nem foglalkozom, mert az általam jelenleg vizsgált tervezési üzemzavarok kezdeti eseményei nem aktiválják őket. Utóbbi három kapu a „TJ10 Line Fails” nevű VAGY-kapuban található. *(Melléklet, 12. ábra)* Az új kiépítéssel nem okozza önmagában az ág üzemképtelenségét a tartály törése, se a visszacsapó hibája, hiszen az új armatúrákat kinyitva, a 20-as ág tartályából tudunk vizet vételezni, kivéve ha ott nem nyit a visszacsapó vagy eltörik a tartály („TJ 20 line fails” VAGY-kapuban található események). A TH10S202 szelep hibája mindkét esetben ellehetetleníti az összekötést, ezért ezt szükséges az új hibafába is elhelyezni. Az eredeti hibafát („TJ 10 Line fails”) és az új vezetéken történő áttáplálás elmaradását („TB új cso fails”) ÉS logikai kapcsolattal helyeztem egy kapuba (TB új TJ10 line fails). A „TB új cso fails” kapuban a már korábban említett „TB új szelepek nem nyitnak” nevű kapuhoz VAGY kapcsolattal csatlakozik a TH10S202 armatúra hibája és a 20-as ág „TJ20 Line fails” hibafája, hiszen ezek akármelyike önmagában is elegendő a funkció elmaradásához *(Melléklet, 13. ábra)*.

A *recirkulációs fázisban* (HPR1) szintén szerepel a nagynyomású ág szivattyúját követő berendezések meghibásodása (HP1C-), hiszen ezek meghibásodása ebben az állapotban is meggátolja a betáplálást. A szivattyú tömszelencéjének meghibásodás miatti hűtőközegvesztésre (@+LP41) szintén nem lesz hatással az új elrendezés. A „Recirculation fails” (@+HP1107) hibafába szükséges a módosításokat elhelyezni, azon belül a „Sump and sucking line fail” (@+HP1139) fát szerkesztettem át *(Melléklet, 14. ábra)*. A 10-es ág zsompi és recirkulációs ágának hibája az új elrendezés esetén önmagában nem okozza a betáplálás sikertelenségét. Abban az esetben nem lehetséges a hűtőközeg zónába juttatása, ha az új vezetéken keresztül se tudunk vizet szerezni, amihez egy „TB új cso FAILS” VAGY-kaput hoztam létre. Az új vezetéken akkor nem tud hűtőközeg érkezni, ha az armatúrák nem nyitnak („TB új szelepek nem nyitnak”), VAGY a 20-as ág zsompi és recirkulációs ága sérül („TB 2-

es ag sump and sucking line fails”). Utóbbihoz a 20-as ágnál található „Sump and sucking line fail” kapu elemeit használtam fel (*Melléklet, 15. ábra*).

Az itt leírt módosításokat értelemszerűen elvégeztem a 20-as ágon is azzal a különbséggel, hogy a 10-es ágnál felhasznált 20-as ági berendezések helyett, 10-es ági hibafákat használtam fel. Mivel a 30-as ágot az új kialakítás nem érinti, ezért ott nem szükséges változtatni.

### **8.3.1. A kialakítás előnyös hatásai a kisnyomású rendszerre**

*Tartályos üzemben* (LP11) a szivattyú és az azt folyásirányban követő berendezések meghibásodására (LP1C-) nincs hatással az új kialakítás. A szivattyú üzemből történő kiesése (10TJ12D001FRO) ebben az esetben is kizárja a betáplálás lehetőségét, tehát nem kell módosítani. A @+LP1170 hibafába (*Melléklet, 16. ábra*) helyeztem el a módosítást teljesen azonos módon, ahogy azt a nagynyomású rendszernél bemutattam. Létrehoztam egy „TB új 10 line fails” ÉS-kaput, amelybe az eredeti „TJ 10 line fails” fát helyeztem, egy „TB új cso fails” VAGY-kaput, amely tartalmazza a már bemutatott „TB új szelepek nem nyitnak” kaput, a „TJ 20 line fails” fát és a 20-as ág hőcserélőjének törését („Heat Exchanger-Tank Rupture”) és karbantartásról történő visszavételenék elmaradását („HE Fails to Restore form Test or Maintenance”) , hiszen ezek is működésképtelenné teszik a 20-as ágról történő áttáplálást (*Melléklet, 17. ábra*).

*Recirkulációs üzemben* (LPR1) a szivattyú üzemből történő kiesése (10TJ12D001-FRO) és az őt követő berendezések hibája (LP1C-) nem került módosításra, a „Sump and sucking line fail” (@+HP1139) fa megegyezik a nagynyomású rendszerrel már bemutatottal, ezért kiegészítése már megtörtént.

### **8.4. A kialakítás hátrányos hatásai**

Az új rendszer beépítésével a két, eddig egymástól független kisnyomású ZÜHR-kollektor függővé válhat. Ezáltal az egyik ág hibája a másik rendszer betáplálását is megakadályozhatja, sőt előfordulhat olyan szcenárió is, amikor nem szükséges meghibásodás, csupán a kezdőesemény indukál olyan helyzetet, amely összeköttetésben lévő ZÜHR ágak esetén súlyos problémákhoz vezet. A hátrányos hatások vizsgálatakor minden esetben azt kell feltételeznünk, hogy az új armatúrák nyitott állapotban vannak. Munkám első szakaszában a Paksi Atomerőmű ZRt-ben rendelkezésre álló, hermetikus teret nem tartalmazó APROS-modellt használtam. Később, a már továbbfejlesztett, a bokszt, lokalizációs tornyot és az aktív sprinkler-rendszert is magába foglaló modellt egészítettem ki a recirkulációs ágakkal és az új, a súlyosbaleseti-

sprinklerhez kapcsolódó berendezésekkel. Az új APROS-modellt futtatva fedeztem fel, hogy a sprinkler-rendszer (TQ) működése a korábban feltételezett események lezajlását megváltoztatja, hiszen jelentős, kb. 500-600 t/h névleges forgalommal juttat hűtővizet áganként a kisnyomású kollektorról a hermetikus térbe. A hátrányos hatások bemutatásánál rávilágítok ennek fontosságára és megmutatom a különbséget a két modell eredményei között. Az elkészített és több helyre beépített hibafa a *(Melléklet, 18. ábra)*-n látható.

#### **8.4.1. A kialakítás hátrányos hatásai a nagynyomású rendszerre**

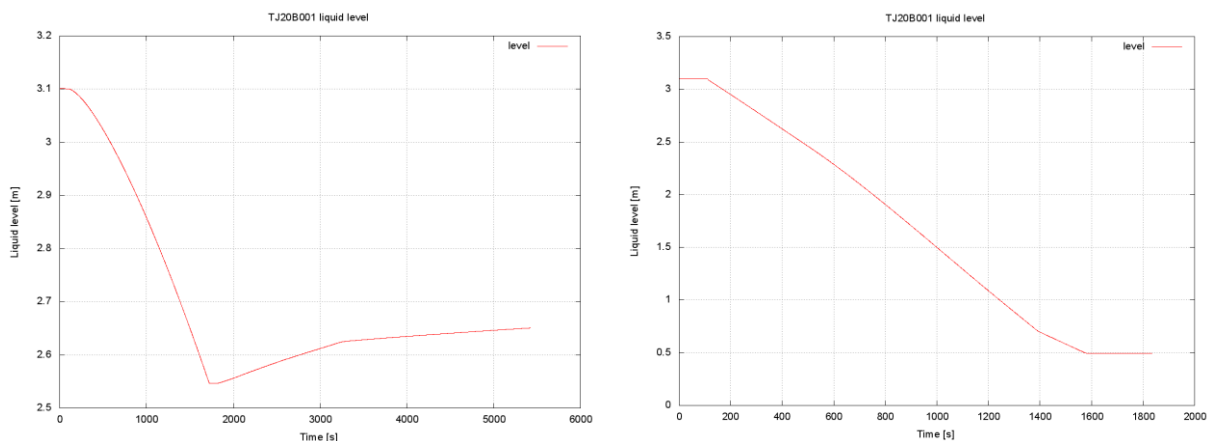
A nagynyomású ZÜHR tartályok leürülését megelőzően az összekötött két ág nagynyomású része független egymástól, hiszen a TH10S202 és TH20S202 armatúrák leválasztják őket a kisnyomású kollektorokról. Az 500 mm-es reteszt követően, azaz a rendszer recirkulációs fázisában lehetséges a két ág egymásra hatása. Ekkor már a kisnyomású rendszer tartályai ürülnek, ezért a folyamatok tárgyalását a következő pontban végzem. A nagynyomású ZÜHR hibáiba elhelyezendő kiegészítésekre is ott utalok majd vissza.

#### **8.4.2. A kialakítás hátrányos hatásai a kisnyomású rendszerre**

A vizsgálat során töréses üzemzavarokat feltételezek a 10-es hurok nagynyomású betáplálását követő pontban és a 20-as ági ZÜHR rendszerének hibáját vizsgálom. Ehhez az APROS-modellben előre beépített szelepet használom, aminek áramlási keresztmetszetét beállítva szimulálhatjuk a törés ekvivalens átmérőjét. A szelepen át távozó hűtővíz a hermetikus tér padlóján gyűlik össze a modell szerint, ami a valóságot is tükrözi. A törés helyének szerepe az, hogy az a zóna üzemzavari hűtőrendszer ág, amely a töréshez közelebb táplál be, a kisebb hidraulikai ellenállás miatt nagyobb mennyiséget juttat a körbe, tartályai gyorsabban ürülnek. Nyilvánvaló, hogy ha a törés olyan helyen történik, ami a 20-as ághoz található közelebb, akkor a 10-es ági berendezések hibája fog problémát okozni, ezért elegendő az előbbi eset bemutatása, majd az analógia miatt a 20-as ágra is kiterjeszthetők az eredmények és a PSA-modell kiegészítése is azonos lesz (10-es ágnál 20-as ági hibák beépítése szükséges, míg a 20-as ágnál 10-es ágiak). A folyamatok azonosítását követően szükséges azon törésméretek meghatározása, amelyek esetén megtörténik a nem kívánt eredmény.

Abban az esetben, ha az armatúrák nyitott állapotban vannak, a 20-as ág hőcserélőjének törése a 10-es ág hűtőközegét is a hermetikus téren kívülre juttatja, interfész LOCA üzemzavart előidézve. Ezt követően tételezzük fel, hogy a 10-es ág megfelelően működik, az új armatúrák nyitva maradtak és a 20-as ágon történik hiba: nem indul a szivattyúja vagy a szivattyút követő

ágon hibásodik meg valami („LP ECCS train 2 common part fails” hibafában szereplő események). Első esetben egyedül a 10-es ág fog betáplálni a kezdetektől, amely a 10-es és 20-as ági kisnyomású tartályból fogja a vizet vételezni. A szivattyú működésképtelensége miatt a recirkulációs armatúrák (TJ16S201 és TJ16S202) nem zárnak, hiszen a fővízkör felé menő forgalom nem haladja meg a 130 t/h értéket. Az új vezeték és armatúrák hidraulikai és alaki ellenállásának köszönhetően a 20-as ági tartály lassabban fog ürülni, mint a 10-es. Mikor a 10-es ági tartály vízszintje lecsökken 500 mm-re, az átvált zsompra és ekkor elkezd újratölteni a 20-as tartályt a zsomp geodetikus magassága miatt a recirkulációs ágon keresztül (a 20-as ág nem fog átváltani zsompi fázisra, hiszen vízszintje nem fog 500 mm-re lecsökkenni, ezáltal nem fognak zárni a TJ25S203 és TJ25S202 szelepek). A tartály újratöltődése interfész LOCA üzemzavart idéz elő, hiszen a hűtőközeg a hermetikus téren kívüli helyisége kerül, ahonnan nem juttatható a zónába. Ez az üzemzavar-kezelés szempontjából rendkívül veszélyes, hiszen a hűtéshez szükséges víz elveszhet. 50 mm ekvivalens átmérőjű törést feltételezve az APROS-modellt futtatva az alábbi idő-vízszint függvényeket kapjuk a 20-as tartályra vonatkozóan sprinkler-rendszer nélküli és azt tartalmazó esetekben.

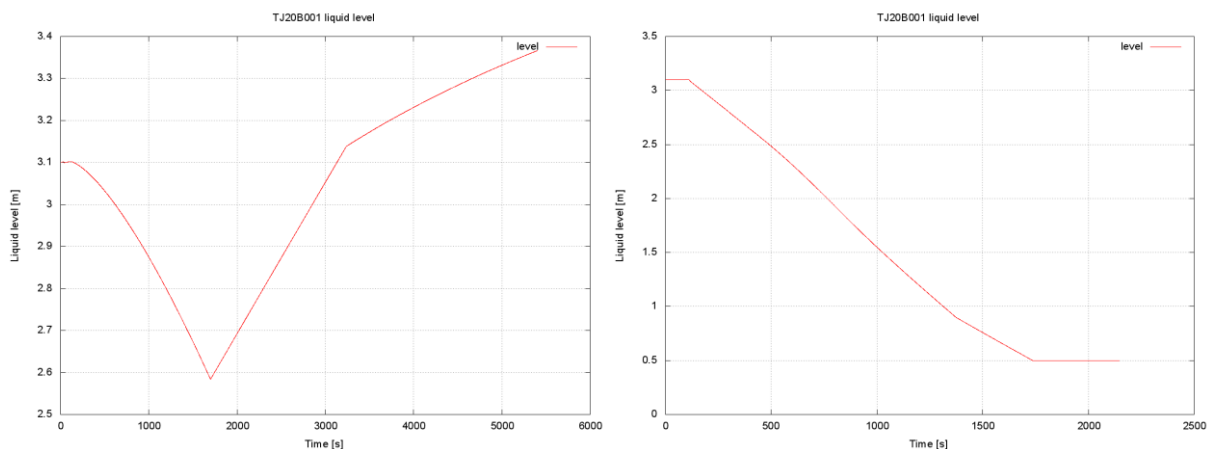


*11. ábra – A 20-as ági kisnyomású tartály vízszintje sprinkler-rendszer nélkül és figyelembevételével (a diagramok eltérő időskálán kerültek ábrázolásra)*

Látható, hogy az első esetben ugyan lassú ütemben, de elkezd a 20-as ági kisnyomású tartály újratöltődni kb. 1800 s után, amikor a 10-es ági tartály leürül és zsompra vált. A 3200 s körüli meredekség-változás oka a 20-as nagynyomású tartály leürülése, amit követően a nagynyomású ZÜHR a kisnyomású tartályból vételezi a hűtőközeget. A sprinkler-rendszert tartalmazó esetben az újratöltődés nem történik meg, hiszen kb. 160 kg/s mennyiséggel több fog távozni a kisnyomású tartályból. A leürülést követően az 500 mm-es retesz zárja a recirkulációs armatúrákat, ami a további újratöltődést megakadályozza.

Hasonló helyzet áll fenn akkor is, ha a szivattyút folyásirányban követő ágon hibásodik meg egy berendezés. A szivattyú vagy nem éri el a 130 t/h forgalmat induláskor sem, vagy lecsökken

alá, így a recirkulációs armatúrák szintén nyitva lesznek, azonos eredményt kiváltva azzal, mintha a szivattyú nem indulna. Ha mindkét ág megfelelően működik a betáplálás megkezdésekor, majd a 20-as ág szivattyúja akkor áll le, amikor a 10-es ági tartály már zsompi fázisban van, de a 20-as még nem (a 10-es valamilyen oknál fogva gyorsabban ürült), akkor ismét megtörténik a 20-as tartály újratöltése. Ezért került beépítésre a modellbe a 20-as ági szivattyú „LP ECCS Pump Fails to Continue Running” hibafa is. Abban az esetben ha mindkét ág már zsompról táplál, akkor a tartály újratöltődését megakadályozó armatúrák (TJ25S202, TJ25S203) már zárt állapotban vannak és a megkerülő ági armatúrák (TJ27S201 és TJ27S201) nyitva. Ahhoz, hogy ennek ellenére a tartály feltöltődjön szükséges mindegyik lezáró armatúra és megkerülő ági armatúra meghibásodása. Mivel ez a folyamat az utóbbi armatúrák meghibásodását leszámítva már belekerült a modellbe feltételezve azt, hogy a 10-es ág gyorsabban ürül, ezért ezt már nem szükséges beépíteni, hiszen a nagyobb valószínűségű, azonos esemény tartalmazza ezt a lehetőséget is. Az APROS-szimulációhoz a TJ23S801 azonosítójú armatúrán állítottam be olyan hibát, amely megakadályozza a szelep nyitását (ezzel szimulálva az ágon található valamely berendezés működésképtelenségét), majd 50 mm-es törést létrehozva vizsgáltam a különbséget a sprinkler-rendszerrel és nélküle üzemelő esetben.



12. ábra – A 20-as ági kisnyomású tartály vízszintje sprinkler-rendszer nélkül és figyelembevételével  
(a diagramok eltérő időskálán kerültek ábrázolásra)

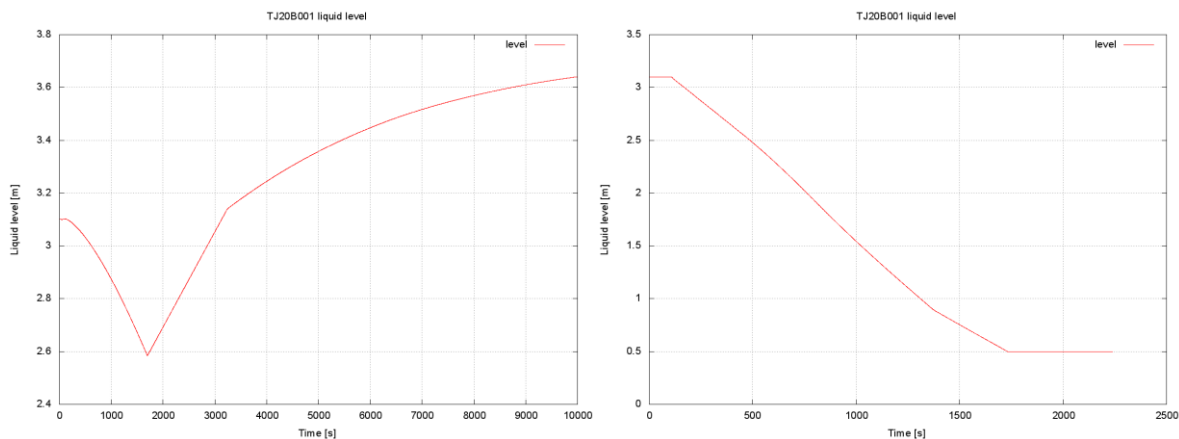
Látható, hogy a sprinkler nélküli esetben gyors ütemben történik a tartály újratöltődése kb. 1800 s után (miután leürült a 10-es ági tartály). 3200 másodpercet követően a nagynyomású szivattyú az érintett tartályból vételez, ezért az ütem lecsökken. A sprinkler-rendszert tartalmazó esetben most sincs újratöltődés a már korábban említettek miatt.

A nagynyomású tartály újratöltődése (és ezzel a kisnyomású betáplálás megakadályozása) nem történhet meg, mert a szivattyú működése esetén a recirkulációs armatúrák bezárnak, indulási

meghibásodása esetén pedig a kisnyomású kollektorral összekötő armatúra (TH10 S202) nincs még nyitott állapotban, azaz a zsompról történő áttöltés nem lehetséges.

A bemutatott folyamatok a 20-as tartály újratöltődését eredményezték a 20-as ági berendezés valamely hibája esetén. Ha a 10-es ágon történik meghibásodás, akkor a 10-es tartály fog újratöltődni. Mivel akármelyik ágon történő esemény az összes ZÜHR-víz elvesztését okozza, ezért mindhárom ágba szükséges mind a két ág hibájának elhelyezése. A „TB 10-es ági berendezések hibája” VAGY kapuba helyeztem el a 10-es ágon lévő meghibásodási lehetőségeket: a szivattyú leállítását, a hőcserélő törését és a szivattyút követő berendezések hibáját. Ezt a kaput a „TB 20-as ági berendezés hibája” kapuval kötöttem egy „TB berendezés hibája” VAGY kapuba (*Melléklet, 18. ábra*).

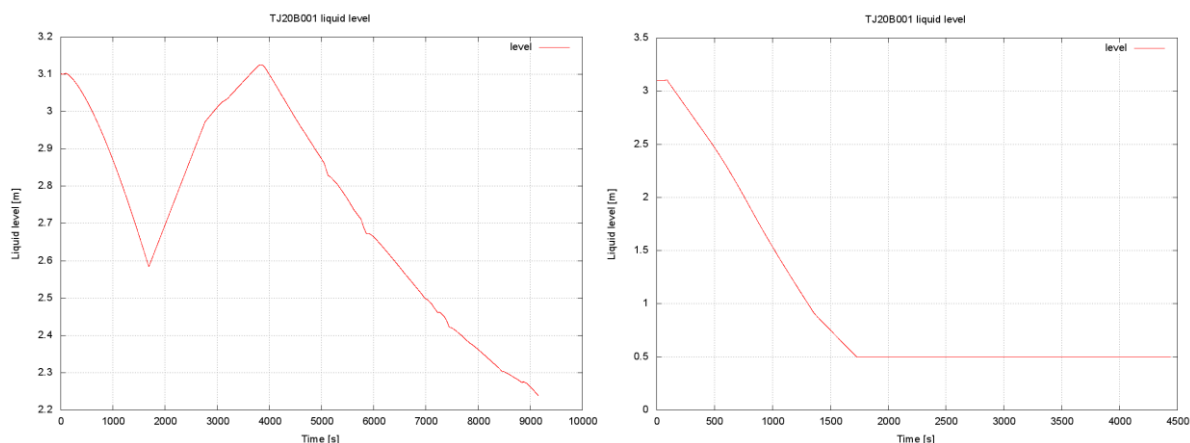
A kisnyomású tartály újratöltődése megtörténhet olyan esetben is, amikor egyik ágon sem hibásodik meg berendezés, csupán a két ZÜHR ág összekötéséből (nyitva maradnak az armatúrák) adódóan alakul ki interfész LOCA. Elsősorban olyan kis és közepes méretű csőtörések esetén következhet be ez a folyamat, amikor a kisnyomású rendszer még nem táplál be (a primerköri nyomás nem csökken 7 bar alá), hiszen nagy csőtöréskor a kisnyomású rendszer azonnal betáplál, a tartály újratöltődése a kisnyomású szivattyúk forgalma miatt nem lehetséges. Első megközelítésben egy 50 mm ekvivalens átmérőjű törést helyeztem el ismét a 10-es hurok ki nem szakaszolható részére és figyeltem a 20-as ági ZÜHR tartály újratöltődését sprinkler-rendszer működésével és anélkül.



13. ábra – A 20-as ági kisnyomású tartály vízszintje sprinkler-rendszer nélkül és figyelembevételével  
(a diagramok eltérő időskálán kerültek ábrázolásra)

A tapasztalat azonos az eddigiekhez: sprinkler-működés nélkül újratöltődik a kisnyomású tartály, interfész LOCA eseményt előidézve, míg a második ábráról láthatjuk, hogy a sprinkler-rendszer működése megakadályozza a nem kívánt következményeket. 50 mm-es csőtörés esetén a primerköri nyomás kb. 20 bar érték körül stabilizálódik (*Melléklet, 19. ábra*), ami azt

jelenti, hogy a kisnyomású szivattyú végig a recirkulációs ágon keresztül üzemel, azaz nem táplál a fővízkörbe. Kisebb csőtörések esetén még magasabb nyomáson történik a primerkörü nyomás stabilizálódása, ezért akkor sem fog kisnyomású betáplálás történni. 100 mm ekvivalens átmérőjű törést felvéve a 20-as kisnyomású tartály vízszintje a következőképpen alakul sprinkler nélkül és a rendszer figyelembevételével.



14. ábra – A 20-as ági kisnyomású tartály vízszintje sprinkler-rendszer nélkül és figyelembevételével  
(a diagramok eltérő időskálán kerültek ábrázolásra)

A sprinkler-rendszer nélküli esetben az 1800. és 3900. másodperc között megfigyelhető az újratöltődés, de ezt követően a primerkör nyomása lecsökken a kisnyomású szivattyú nyomóágának nyomása alá (Melléklet, 20. ábra), ezáltal megtörténik a fővízköri betáplálás és megszűnik a tartályszint emelkedése. A sprinkler figyelembevételével nem alakul ki interfész LOCA ebben az esetben sem.

Ezek alapján elmondhatjuk, hogy a kritikus csőtörés méret, amelynél kisebb ekvivalens átmérő esetén megtörténhet a tartály újratöltődése 50 mm és 100 mm között helyezkedik el. A paksi PSA-modellben szereplő kezdeti események közül az alábbiakat kell figyelembe venni ennek alapján [12]:

- C4 – Közepes csőtörés ZÜHR működést nem befolyásoló helyen (40-150 mm ekvivalens átmérőjű csőtörés)
- C5 – Közepes csőtörés TH működést befolyásoló helyen (40-150 mm ekvivalens átmérőjű csőtörés)
- C6 – Térfogatkompenzátor biztonsági szelepének szándékolatlan nyitása
- C7 – Közepes csőtörés ZÜHR működést nem befolyásoló helyen (20-40 mm ekvivalens átmérőjű csőtörés)
- C8 – Közepes csőtörés TH működést nem befolyásoló helyen (20-40 mm ekvivalens átmérőjű csőtörés)

- C9 – Térfogatkompenzátor lefűvató szelepének szándékolatlan nyitása
- D1 – ZÜHR működést kiváltó kis folyás (20 mm-nél kisebb ekvivalens átmérőjű törés)

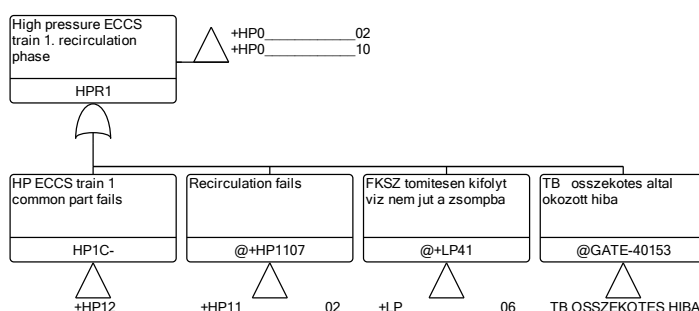
Az újratöltődéssel tehát ezeknél a kezdeti eseményeknél kell számolni: az eseményfáikban szereplő kis és nagynyomású ZÜHR rendszerek hibafáiba beépítve zónakárosodással fognak ezek az események végződni (az összekötő vezeték armatúráinak nyitott állapotban maradásakor). Ehhez House Event-eket helyeztem el a „TB osszekotes által okozott hiba” hibafába, a „TB tartaly ujratosoltes vagy hocserelo tores” kapuba, amelyhez egy „TB kis es kozepes LOCA” VAGY transzferkaput készítettem (*Melléklet, 18. ábra*). Ebben találhatók azok a House Event-ek, amelyek az adott kezdeti esemény bekövetkezésekor igazzá válnak: IE C4 TRUE; IE C5 TRUE; IE C6 TRUE; IE C7 TRUE; IE C8 TRUE; IE C9 TRUE; IE D1 TRUE. (*Melléklet, 20. ábra*). Így a hibafában ezt a fajta tartályújrátöltést akkor számolja a program, ha a kezdeti események által definiált eseményfa kerül futtatásra, csupán hibafát futtatva ezek az események figyelmen kívül maradnak. Ezzel a „TB osszekotes által okozott hiba” hibafában már szerepelnek a tartályok újratöltődései, a szivattyú és az azt követő berendezések hibái és a hőcserélő törése.

A hátrányos hatások beépítésekor minden esetben azt kell feltételeznünk, hogy az armatúrák nyitva maradtak. Annak a valószínűségét, hogy mind a négy armatúrát nyitva hagyják  $3E-04$  értékűnek vettem („HEP.3E-4” néven definiált paraméter), amely megegyezik pl. a kisnyomású ZÜHR ág próbaági armatúrájának (TJ15S201) nyitva maradásával. Az azonos érték használatát a megegyező tesztelési gyakoriság és a hasonló körülmények teszik lehetővé. A létrehozott bázisesemény: „az új armaturak nyitva maradnak”. Az operátornak lehetősége van ezt a hibát felfedezni és elzárni az ÁOKU utasításainak megfelelően, ha észleli a bekövetkező interfész LOCA eseményt. ZÜHR befecskendezés indulásakor az ÁOKU E-0 fejezetének pontjait kell követnie a személyzetnek, amelyből a 21., 22., 24. lépésben áttérhetnek az E-1 fejezethez. Az E-0 31. lépésénél szükséges ellenőrizni a hermetikus téren kívüli radiációs helyzetet: megnövekedett érték esetén az ECA-1.2 fejezethez szükséges az áttérés. Ha az operátor már áttért az E-1 fejezethez, akkor ott a 11. lépés fogja utasítani a radiációs állapot ellenőrzésére és kaphat utasítást az ECA-1.2-be való áttéréshez. [16] A folyamat során felmerülő hibák az E3 eseményfa (interfész LOCA) törést kizáró csúcseseményében találhatók meg a paksi PSA-modell eseményfái között. Az új, általam készített hibafához ezeket a báziseseményeket fogom felhasználni. Egyrészt lehetséges, hogy az E-0-ban vét hibát az operátor: „Radiáció ellenére nem tér át jobb oldalra” ÉS azt nem korrigálja a 35. pont alapján: „Utasításban meglévő

korrekciós lehetőség”. Ezt a két báziseseményt a „TB E-0 AOKU hiba” ÉS kapuba raktam. Az E-1-ben elkövethető hibák: „Radiáció ellenére nem tér át ECA-1.2-be”, vagy „Szándékolatlanul kihagyja a lépést”. Ha megtörtént az átlépés az ECA-1.2-be, akkor ott is véthet a személyzet: rossz utasítást vehet elő az ECA-1.2 helyett és ezt nem veszi észre, a 2-es pontban a radiáció ellenére bal oldalon megy tovább, vagy nem választja le a törött ágat. Ezek az „Útvonalak ECA-1.2-be kerülve (RLI)” transzferkapuban találhatók (a modell készítői által már elkészített hibafa), amit a már tárgyalt „TB E-0 AOKU hiba” és „TB E-1 AOKU hiba” kapukkal a „TB az operator nem zárja ki a folyast” VAGY-kapuba helyeztem. Ez, és „az új armaturák nyitva maradnak” bázisesemény a „TB az armaturák nyitva vannak” ÉS kapuban találhatók.

Láthattuk, hogy önmagában a LOCA események csak olyan esetben okoznak tartály újratöltődést, amikor a sprinkler-rendszer az adott ágon nem működik. Mivel a rendszer az 1. szintű PSA modellben nem szerepel, ezért egyszerűsítést alkalmazva vettem figyelembe. A rendszer működésképtelenségét a sprinkler szivattyú hibájával modelleztem. A kisnyomású szivattyúval való hasonlóság miatt annak paramétereit használtam. A 10-es ági kisnyomású ZÜHR szivattyú hibafáját (@+LP1111) futtatva kaptam, hogy a meghibásodás valószínűsége  $3,18E-02$ , míg a 20-as áginál (@+LP2111)  $2,43E-02$ . A sprinkler szivattyúknak létrehoztam egy „TB TQ12D001 FAIL” és „TB TQ22D001 FAIL” azonosítójú báziseseményt, amelyekhez a már ismert valószínűségű, újonnan definiált „TQ10 FAIL” ( $3,18E-02$ ) és „TQ20 FAIL” ( $2,43E-02$ ) paramétereket használtam. A „TB összekotes által okozott hiba” hibafába helyeztem el egy „TB sprinkler mukedeskeptelen” VAGY kaput, amelybe a két, újonnan definiált báziseseményt raktam, hiszen a 10-es ági újratöltődéshez a 10-es ági sprinkler hibája szükséges, a 20-as ági tartály visszatöltődéséhez a 20-as ági sprinkler meghibásodása kell, de akármelyik bekövetkezésekor megtörténik az esemény.

Ezzel a „TB összekotes által okozott hiba” nevű hibafa (Melléklet, 18. ábra) teljessé vált. Mivel az interfész LOCA esemény mind a nagynyomású, mind a kisnyomású ZÜHR rendszer mindhárom ágát megbénítja hosszú távon, ezért ezt a hibafát szükséges beépíteni az összes rendszer összes ágának recirkulációs hibafájába. Az alábbi ábrán példaként a 10-es nagynyomású ZÜHR ág recirkulációs fázisának hibafája látható a kiegészítéssel.



15. ábra – A „TB összekotes által okozott hiba” hibafa elhelyezésének mintája

## 9. SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEK

Mivel a hibafákhoz House event kapukat is használtam, amelyek kezdeti eseményhez kötöttek, ezért a hibafa-futtatások nem adnának reális képet. Az eseményfák futtatására a PSA-modellben kezdeti esemény csoportok formájában is lehetőség van, az egyes tipikus eseményeket egybefoglalva.

A nagy és közepes csőtöréseket (és a reaktortartály törését) magába foglaló *ALL-ABC kezdeti esemény csoport* esetén eredeti esetben (kiegészítések nélkül) a zónasérülés gyakorisága  $1,33\text{E-}06/\text{év}$  értékű. A közölt módosításokat elvégezve, a sprinkler-rendszert figyelmen kívül hagyva  $1,95\text{E-}06/\text{év}$  a kapott gyakoriság. Ha a sprinklert figyelembe vesszük, azaz a valósághoz közelebb álló modell eredményeit tekintjük, akkor a várható zónaolvadási gyakoriság a csoportra  $1,34\text{E-}06/\text{év}$ . A minimálmetszeteket tekintve eredeti esetben a reaktortartály törése 37,7%-al járul hozzá az eredményhez, ezt követi a C6 és C7 jelű kezdeti események esetén fellépő kisnyomású ZÜHR hőcserélő törése 29,4% és 4,64% hozzájárulással. 3,16%-al ezt követi a B2 kezdeti esemény bekövetkezése a hidroakkumulátorok visszacsapó szelepének hibájával. A sprinkler-rendszert figyelembe vevő esetben a minimálmetszetek alakulása hasonló az eredeti esethez, a reaktortartály törése 37,43%-al áll az élen, amit a ZÜHR hőcserélő törése és a C6 esemény együttes bekövetkezése követ  $29,17\%$ -al. Az általam beépített hibák közül  $0,77\%$ -al jelenik meg a C6 kezdeti esemény az új armatúrák nyitva maradásával, a sprinkler működésképtelenségével és egy operátori hibával (interfész LOCA kizárásához kapcsolódóan). Látható (és a hibafa logikai felépítéséből is következik), hogy a minimálmetszethez szükséges egy kezdeti esemény és három egyéb rendszer (beleértve emberi beavatkozást is) meghibásodása.

Az *ALL-DE kezdeti esemény csoportra*, amely a kis és interfész LOCA eseményeket tartalmazza, a zónasérülés gyakorisága az eredeti modell esetén  $2,75\text{E-}06/\text{év}$ , a sprinkler-rendszert mellőző esetben  $2,91\text{E-}06/\text{év}$ . A valósághoz közelebb álló, a sprinklerrel számoló modell eredménye  $2,74\text{E-}06/\text{év}$ . A minimálmetszetekben minden esetben a D2 jelű kezdeti esemény és a ZÜHR hőcserélő törése szerepel az első helyen. Az ezt követő, a zónasérüléshez minimálisan szükséges eseménykombinációk elsősorban egy interfész LOCA kezdeti esemény és operátori beavatkozások hibáinak egyidejű bekövetkezéséből állnak. Az első száz minimálmetszet között nem található az általam definiált eseményekből, ami azt jelzi, hogy az eseménycsoportra rendkívül kis hatással van az új súlyosbaleseti-sprinkler kialakítása.

Az ALL-FJLM csoport a (Melléklet, 2. ábra)-n bemutatott kezdeti eseményeket tartalmazza. A zónasérülési gyakoriság eredeti esetben  $4,03\text{E-}07/\text{év}$ , a sprinklert kizáró modell esetén is  $4,03\text{E-}07/\text{év}$ . A valósághoz közelebbi, módosított zónaolvadási frekvencia is megegyezik a közölt értékekkel, azaz  $4,03\text{E-}07/\text{év}$ . Ennek oka, hogy a ZÜHR-rendszert érintő átalakítás elsősorban a folyásos üzemzavarok kezelésére van hatással.

Az ALL-GHI és ALL-K csoportok esetén szintén nem látunk változást a zónasérülési gyakoriságot és minimálmetszeteket tekintve. A GHI csoport zónasérülési gyakorisága mindhárom esetben  $4,85\text{E-}07/\text{év}$ , a K kezdeti esemény esetén  $1,92\text{E-}07/\text{év}$ .

Az eredmények táblázatos összefoglalása:

| kezdeti események | zónakárosodási gyakoriság [1/év] |                                         |                                     |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
|                   | eredeti modell                   | módosított modell<br>(sprinkler nélkül) | módosított modell<br>(sprinklerrel) |
| ALL-ABC           | 1,33E-06                         | 1,95E-06                                | 1,34E-06                            |
| ALL-DE            | 2,75E-06                         | 2,91E-06                                | 2,74E-06                            |
| ALL-FJLM          | 4,03E-07                         | 4,03E-06                                | 4,03E-07                            |
| ALL-GHI           | 4,85E-07                         | 4,85E-06                                | 4,85E-07                            |
| ALL-K             | 1,92E-07                         | 1,92E-07                                | 1,92E-07                            |
| összesen          | <b>5,15E-06</b>                  | 5,94E-06                                | <b>5,16E-06</b>                     |
| különbség         | -                                | 7,9E-07                                 | 0,1E-07                             |

1. táblázat – számolt zónakárosodási gyakoriságok

Látható, hogy a módosított esetekben nő a zóna sérülésének várható frekvenciája. A sprinkler-rendszert nem tartalmazó modell esetén jelentős növekedés tapasztalható, míg a másik esetben, amely a valóságot jobban tükrözi, csekély mértékű a negatív hatás.

A közölt eredmények esetén  $3\text{E-}04$  annak a valószínűsége, hogy az új armatúrák nyitva maradnak. Abban az esetben, ha ez az érték  $1\text{E-}05$ , azaz a kialakítás hátrányos hatásai kevésbé érvényesülnek, akkor  $5,11\text{E-}07/\text{év}$  gyakoriságra csökkenthető a zóna sérülésre, amely kedvezőbb érték, mint eredeti esetben, tehát a súlyosbaleseti-sprinkler berendezései előnyösen is hathatnak a tervezési üzemzavarok kezelésére.

## 10. BIZTONSÁGNÖVELŐ AJÁNLÁSOK

Az új berendezések és főként a két ZÜHR ág összekötése miatt szükséges az ÁOKU megfelelő kiegészítése.

Az *előnyös hatások* megvalósulása úgy lehetséges, ha az ÁOKU vonatkozó fejezetei tartalmazzák, hogy abban az esetben, amikor az egyik ágon a hűtővíz nem hozzáférhető, akkor az új kialakítással a másik ágról vételezzon hűtőközeget. A biztonsági befecskendezés indulásakor az operátornak be kell lépnie az ÁOKU E-0 fejezetébe, a 16-odik pontban szükséges a betáplálás ellenőrzése. Abban az esetben, ha jobbra kell áttérnie, szivattyúkat kell indítania és tolózárat kell szükség szerint állítani. Ebben a pontban lehetséges az új tolózárak figyelembevétele és kiemelése. Zsompi betáplálásra való áttéréskor az ES-1.3 elővétele szükséges, amelyben az első pont a TJ útvonal megfelelő beállítására szólít fel. Ha a szivóág nem állítható át zsompra, akkor még lehetséges a másik ággal való összekötés és így zsompi víz biztosítása a meghibásodott ágra. Így ebben az esetben, ha ezt a pontot kiegészítjük az új lehetőséggel, nem szükséges az adott ág szivattyújának leállítása.

A *hátrányos hatásoknál* annak a rögzítése szükséges, hogy az armatúrák nyitott állapotban maradásakor az operátor azokat zárja el. Ezt úgy veheti észre, hogy valamely tartály elkezd töltődni és interfész LOCA eseményt okoz. Ilyen esetben az ECA-1.2 elővétele szükséges és az ebben lévő utasítások követése. A második pontban a tömörtelenség beazonosítása és kizárása a feladat, itt elhelyezve az új armatúrák zárt állapotának ellenőrzését (akár mellékletként) jelentős mértékben növelné a hűtőközegvesztés elkerülésének valószínűségét.

Az eredmények alapján láthattuk, hogy fontos szerepe van annak, hogy mekkora annak a valószínűsége, hogy az armatúrák nyitott állapotban maradnak. A zárt állapot ellenőrzésére adminisztratív eszközök bevezetése lehet a megoldás: a tesztelést követő lakatolás, illetve a bejárások során történő szemrevételezés csökkentheti a nyitott állapot valószínűségét. A 3E-04 értéknél ezekkel a módszerekkel nem lehetséges kisebb valószínűséget elérni, a 1E-05 érték túlzottan optimista ebben az esetben.

## 11. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatomban bemutatam egy, a ZÜHR rendszerek függetlenségét érintő új berendezés valószínűség alapú biztonsági elemzését, amelyhez determinisztikus kódot használtam demonstrálás céljából. A PSA módszer és a nukleáris biztonság alapjainak bemutatása a témakörrel napi szinten nem foglalkozó szakemberek számára próbál betekintést nyújtani a vizsgált területbe, ezzel elősegítve az elemzés megértését.

Az eredmények alapján elmondható, hogy annak ellenére, hogy két, eddig független zóna üzemzavari hűtőrendszer ágat egy vezeték és négy armatúra összeköt, a zóna sérülésének gyakorisága rendkívül kis mértékben növekedett. Ennek oka egyrészt az, hogy a két ág szándékolt összenyitása bizonyos szituációkban segíti az üzemzavar-elhárítást, másrészt megfelelő adminisztratív eszközökkel a lehetséges hátrányok valószínűsége nagymértékben csökkenthető. Az általam használt 1. szintű PSA-modellben nincs lehetőség a súlyosbaleseti-sprinkler előnyeinek számszerűsítésére, hiszen a konténment épségének megőrzése a súlyosbalesetet követően válik fontossá, amely már a 2. szintű PSA elemzés hatásköre. Mivel a tervezési üzemzavarokra nincs jelentős negatív hatása, ezért mindenképp ajánlott a koncepció megvalósítása.

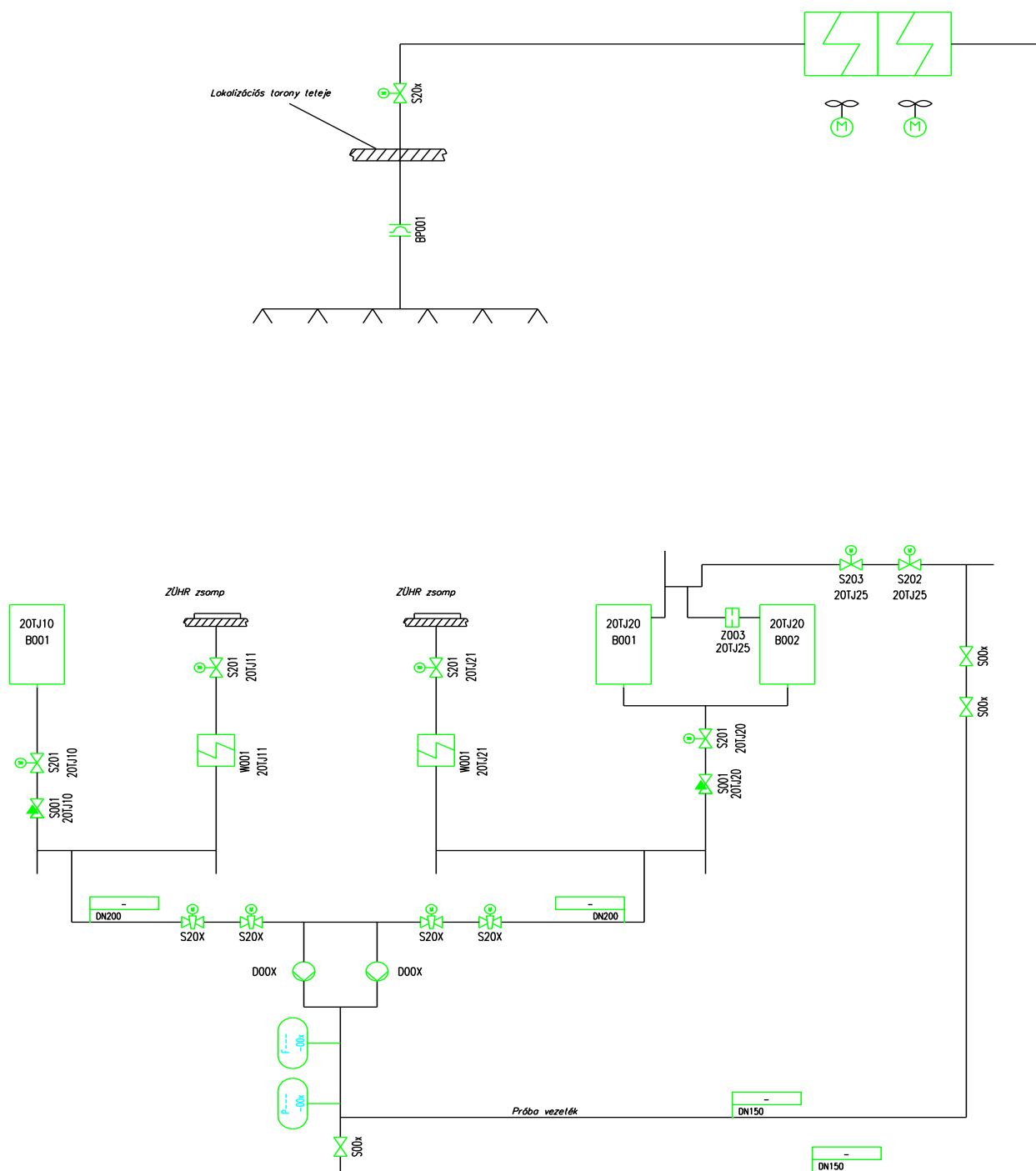
Munkám egyik fontos eredménye, hogy rávilágítottam a komplex rendszerek modellezésekor számos esetben elhanyagolt részletek fontosságára. A hermetikus teret és ezzel együtt az aktív sprinkler-rendszert nem tartalmazó modell eredményei jelentős mértékben eltérnek a részletesebb, a valóságot jobban tükrözőétől. A sprinkler-rendszer elhanyagolásával futtatott szimulációk rossz irányba vitték el az elemzést, amit a részletesebb modell segítségével és kiegészítésével korrigáltam.

Az elemzés során felmerülhet a kérdés, hogy milyen hatással lenne a tervezési üzemzavarok kezelésére, ha mindhárom ág összekötésére szükség lenne a súlyosbaleseti-sprinkler megfelelő működésének megvalósításához. A projekt folytatásaként tervezem ennek végig gondolását és valószínűség alapú elemzését, valamint az aktív sprinkler-rendszer hibafájának kidolgozását.

## 12. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] EUROPEAN NUCLEAR SAFETY REGULATION GROUP (2011): *EU „Stress Test” specifications*, Annex I.  
[http://ec.europa.eu/energy/nuclear/safety/doc/20110525\\_eu\\_stress\\_tests\\_specifications.pdf](http://ec.europa.eu/energy/nuclear/safety/doc/20110525_eu_stress_tests_specifications.pdf)
- [2] MVM PAKSI ATOMERŐMŰ ZRT. (2011): *Célzott Biztonsági Felülvizsgálati Jelentés*, Paks, 2011. október 31.
- [3] PROF. DR. ASZÓDI ATTILA (2012): *Atomerőművek termohidraulikája*, egyetemi előadás, 2012/2013 őszi félév, BME NTI
- [4] 118/2011. (VII. 11.) KORM. RENDELET (2011): *A nukleáris létesítmények nukleáris biztonsági követelményeiről és az ezzel összefüggő hatósági tevékenységről*, 2011, Budapest
- [5] ÁKMI (2013): *Konténment lassú túlnyomódás megakadályozása baleseti helyzetben*, Megvalósíthatósági Tanulmány
- [6] KONKOLY ÉS KIS MÉRNÖKI IRODA KFT. (2013): *Konténment lassú túlnyomódás megakadályozása baleseti helyzetben*, Villamos és irányítástechnikai szakterület, Megvalósíthatósági tanulmányterv
- [7] CSIGE ANDRÁS (2013): *Atomerőművek: Különböző típusú üzemzavari hűtőrendszerek*, egyetemi előadás, 2012/2013 tavaszi félév, BME NTI
- [8] MVM PAKSI ATOMERŐMŰ ZRT. (1998): *Kisnyomású ZÜHR rendszer*, Tanfolyami jegyzet reaktoroperátorok számára
- [9] RALPH R FULLWOOD, ROBERT E HALL: *Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Power Industry – Fundamentals and Applications*, Brookhaven National Laboratory, New York, USA
- [10] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, *Probabilistic Risk Assessment(PRA)*, <http://www.nrc.gov/about-nrc/regulatory/risk-informed/pr.html>
- [11] MVM PAKSI ATOMERŐMŰ ZRT. :*Az AGNES program*,  
<http://www.atomeromu.hu/download/179/Az%20AGNES-program.pdf>
- [12] VILLAMOSENERGIAIPARI KUTATÓ INTÉZET RT. ATOMERŐMŰVI DIVÍZIÓ (2007): *A Paksi Atomerőmű 1. Blokk 1. szintű PSA Elemzése*, Összefoglaló leírás
- [13] RELCON AB (1998): *RiskSpectrum Theory Manual*
- [14] HOLLÓ ELŐD (2007): *Atomerőművek kockázatának értékelése*, Magyar Tudomány, 2007/01 19. o. <http://www.matud.iif.hu/07jan/05.html>
- [15] CSIGE ANDRÁS (2012): *APROS laboratóriumi gyakorlatok I., Ismerkedés az APROS programmal*, Mérési útmutató, Budapest
- [16] MVM PAKSI ATOMERŐMŰ ZRT.(2006): *Állapot Orientált Kezelési Utasítások*

# MELLÉKLET



1. ábra – A javasolt súlyosbaleseti-sprinkler kialakítása  
(forrás: ÁKMI Megvalósíthatósági Tanulmány)

| Kezdeti esemény megnevezése                                                   | Gyakoriság<br>[1/év] | Hiba-<br>tényező |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------|
| <b>A. REAKTORTARTÁLY SÉRÜLÉS</b>                                              |                      |                  |
| A1 Nagy reaktortartály törés                                                  | $5,00 \cdot 10^{-7}$ | 3,00             |
| A2 Szabályozórúd kilökődés                                                    | $2,50 \cdot 10^{-5}$ | 3,00             |
| <b>B. NAGY LOCA</b>                                                           |                      |                  |
| B1 Nagy csőtörés; 2., 3., 5. hurok hidegág                                    | $2,43 \cdot 10^{-6}$ | 10,30            |
| B2 Nagy csőtörés; 1., 6. hurok hidegág                                        | $5,46 \cdot 10^{-6}$ | 10,30            |
| B3 Nagy csőtörés; 4. hurok hidegág                                            | $6,07 \cdot 10^{-7}$ | 10,30            |
| B4 Nagy csőtörés; 1., 2., 3., 5., 6. hurok melegág                            | $4,85 \cdot 10^{-6}$ | 10,30            |
| B5 Nagy csőtörés; 4. hurok melegág                                            | $1,21 \cdot 10^{-6}$ | 10,30            |
| <b>C. KÖZEPES LOCA</b>                                                        |                      |                  |
| C1 Közepes (L4) csőtörés ZÜHR működést nem befolyásoló helyen                 | $1,08 \cdot 10^{-5}$ | 5,34             |
| C2 Közepes (L4) csőtörés TJ működést befolyásoló helyen                       | $2,99 \cdot 10^{-6}$ | 5,34             |
| C3 Közepes (L4) csőtörés TH működést befolyásoló helyen                       | $8,57 \cdot 10^{-7}$ | 5,34             |
| C4 Közepes (L3) csőtörés ZÜHR működést nem befolyásoló helyen                 | $1,69 \cdot 10^{-4}$ | 5,34             |
| C5 Közepes (L3) csőtörés TH működést befolyásoló helyen                       | $2,41 \cdot 10^{-5}$ | 5,34             |
| C6 Térfogatkompenzátor biztonsági szelepének szándékolatlan nyitása           | $3,50 \cdot 10^{-3}$ | 5,00             |
| C7 Közepes (L2) csőtörés ZÜHR működést nem befolyásoló helyen                 | $8,93 \cdot 10^{-5}$ | 5,34             |
| C8 Közepes (L2) csőtörés TH működést befolyásoló helyen                       | $4,06 \cdot 10^{-5}$ | 5,34             |
| C9 Térfogatkompenzátor lefűvató szelepének szándékolatlan nyitása             | $1,39 \cdot 10^{-3}$ | 5,00             |
| <b>D. KIS LOCA</b>                                                            |                      |                  |
| D1 ZÜHR működést kiváltó kis folyás                                           | $3,05 \cdot 10^{-3}$ | 5,10             |
| D2 ZÜHR működést nem kiváltó, pótvízrendszerrel kompenzálható kis folyás      | $2,78 \cdot 10^{-1}$ | 1,24             |
| <b>E. HŰTŐKÖZEGVESZTÉS A HERMETIKUS TÉREN KÍVÜL</b>                           |                      |                  |
| E1 ZÜHR működést nem kiváltó primerkörüi hűtőközeg-átfolyás a szekunder körbe | $4,00 \cdot 10^{-3}$ | 3,00             |
| E2 ZÜHR működést kiváltó primerkörüi hűtőközeg-átfolyás a szekunder körbe     | $1,00 \cdot 10^{-3}$ | 3,00             |
| E3 ZÜHR működést kiváltó interfész LOCA                                       | $3,39 \cdot 10^{-4}$ | 5,10             |
| E4 ZÜHR működést nem kiváltó, pótvízrendszerrel kompenzálható interfész LOCA  | $3,09 \cdot 10^{-2}$ | 1,24             |
| <b>F. HŰTŐKÖZEGÁRAM CSÖKKENÉSE</b>                                            |                      |                  |
| F1 Három FKSz kiesése                                                         | $2,30 \cdot 10^{-1}$ | 1,87             |
| <b>G. TÁPVÍZÁRAM CSÖKKENÉSE</b>                                               |                      |                  |
| G1 Egy tápszivattyú kiesése (tartalék nem indul)                              | $1,22 \cdot 10^{-1}$ | 2,51             |
| G2 Összes tápszivattyú kiesése                                                | $3,10 \cdot 10^{-2}$ | 3,98             |
| G3 Teljes keresztmetszetű tápvízkollektor törés                               | $4,35 \cdot 10^{-3}$ | 3,00             |
| G4 Tápvízvezeték törés a hermetikus téren kívül                               | $2,28 \cdot 10^{-5}$ | 3,00             |
| G5 Tápvízvezeték törés a tápszivattyú vezetékén                               | $6,10 \cdot 10^{-3}$ | 3,00             |
| G6 Tápvízvezeték törés a hermetikus téren belül                               | $4,69 \cdot 10^{-4}$ | 3,00             |
| <b>H. GŐZÁRAM CSÖKKENÉSE</b>                                                  |                      |                  |
| H1 Gőzfejlesztő izoláló szelep szándékolatlan zárása                          | $1,68 \cdot 10^{-2}$ | 3,54             |

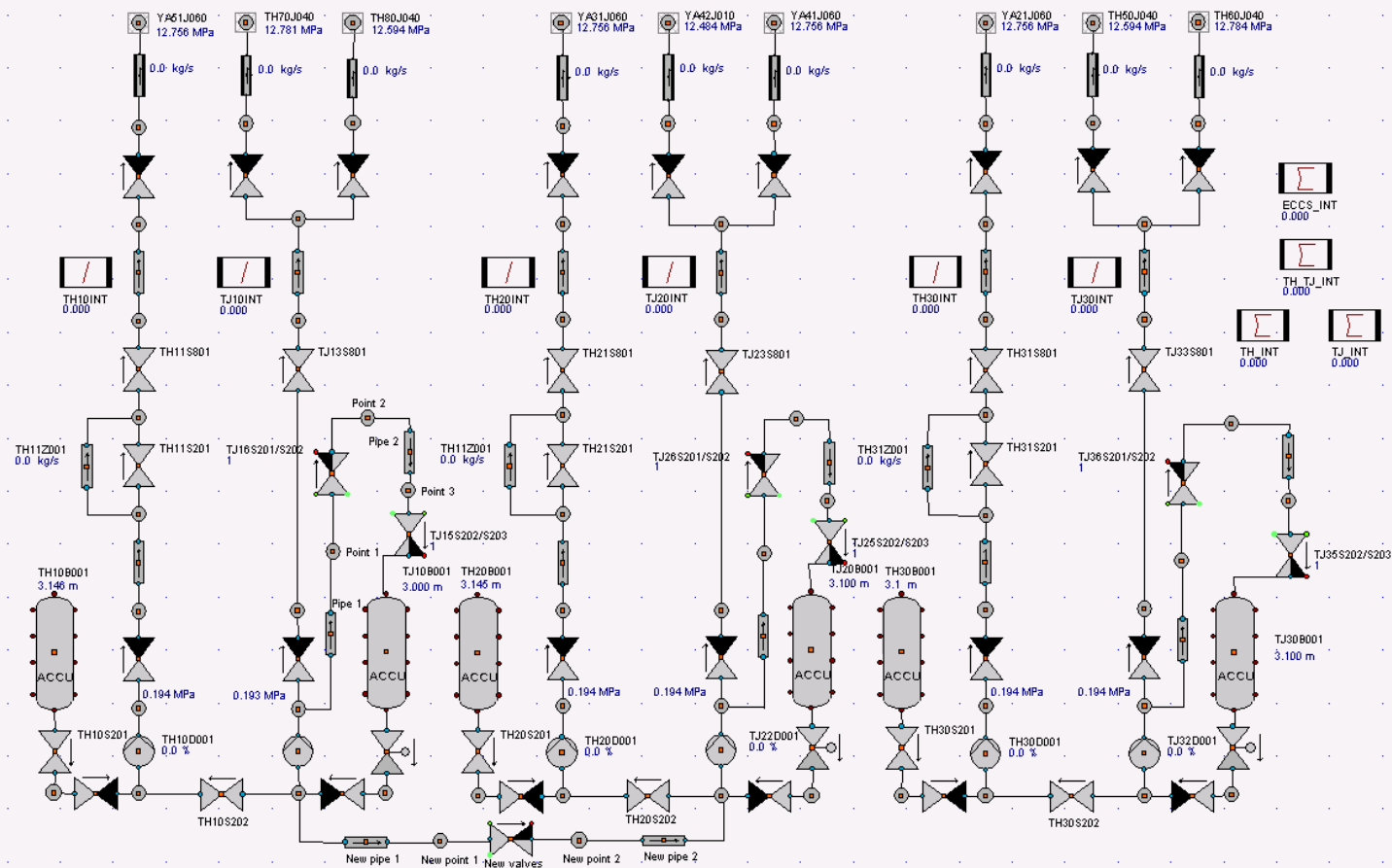
| Kezdeti esemény megnevezése                                   | Gyakoriság<br>[1/év] | Hiba-<br>tényező |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|------------------|
| I. GŐZVESZTÉS                                                 |                      |                  |
| I1 Gőzfejlesztő biztonsági szelep szándékolatlan nyitása      | $3,48 \cdot 10^{-2}$ | 4,30             |
| I2 Atmoszférába redukáló szándékolatlan nyitása               | $1,83 \cdot 10^{-2}$ | 4,76             |
| I3 Gőzvezeték törés                                           | $8,14 \cdot 10^{-5}$ | 3,06             |
| I4 Főgőzkollektor törés                                       | $1,95 \cdot 10^{-4}$ | 3,06             |
| J. TURBINAKIESÉSEL JÁRÓ TRANZIENSEK                           |                      |                  |
| J1 Egy turbina kiesése                                        | 1,68                 | 1,27             |
| J2 Két turbina kiesése                                        | $1,99 \cdot 10^{-1}$ | 2,72             |
| J3 Teherledobás                                               | $7,72 \cdot 10^{-2}$ | 2,91             |
| K. VILLAMOS BETÁPLÁLÁS ÉS IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI HIBÁK            |                      |                  |
| K1 Teljes feszültségkiesés (összes 6 kV-os gyűjtősín kiesése) |                      |                  |
| K2 Egy 6 kV-os gyűjtősín kiesése (41BA+41BB+42BA+42BB)        | $3,85 \cdot 10^{-2}$ | 2,69             |
| K3 EV gyűjtősín kiesése                                       | $3,27 \cdot 10^{-2}$ | 2,32             |
| K4 Téves ZÜHR13 jel                                           | $1,06 \cdot 10^{-2}$ | 3,90             |
|                                                               | $2,33 \cdot 10^{-5}$ | 4,70             |
| L. SEGÉDRENDSZEREK MEGHIBÁSODÁSAI                             |                      |                  |
| L1 FKSZ közbenső hűtőkör meghibásodása                        | $1,01 \cdot 10^{-4}$ | 5,08             |
| L2 SZBV közbenső hűtőkör meghibásodása                        | $1,01 \cdot 10^{-4}$ | 5,08             |
| L3 Üzemelő pótvízszivattyú kiesése (tartalék nem indul)       | $4,77 \cdot 10^{-3}$ | 3,63             |
| M. NEM TERVEZETT REAKTOR LEÁLLÁS                              |                      |                  |
| M1 Indokolatlan reaktor leállás                               | 1,66                 | 1,47             |
| N. MEGNÖVEKEDETT HŐTERMELÉS                                   |                      |                  |
| N1 Ellenőrizetlen szabályozórúd visszahúzás                   | $9,77 \cdot 10^{-3}$ | 1,33             |
| N2 Ellenőrizetlen szabályozórúd csoport visszahúzás           | $1,44 \cdot 10^{-2}$ | 3,53             |
| N3 Szándékolatlan tiszta kondenzátum beadás a primer körbe    | $1,42 \cdot 10^{-2}$ | 3,36             |

2. ábra – A paksi PSA-modell kezdeti eseményei  
(forrás: VEIKI)

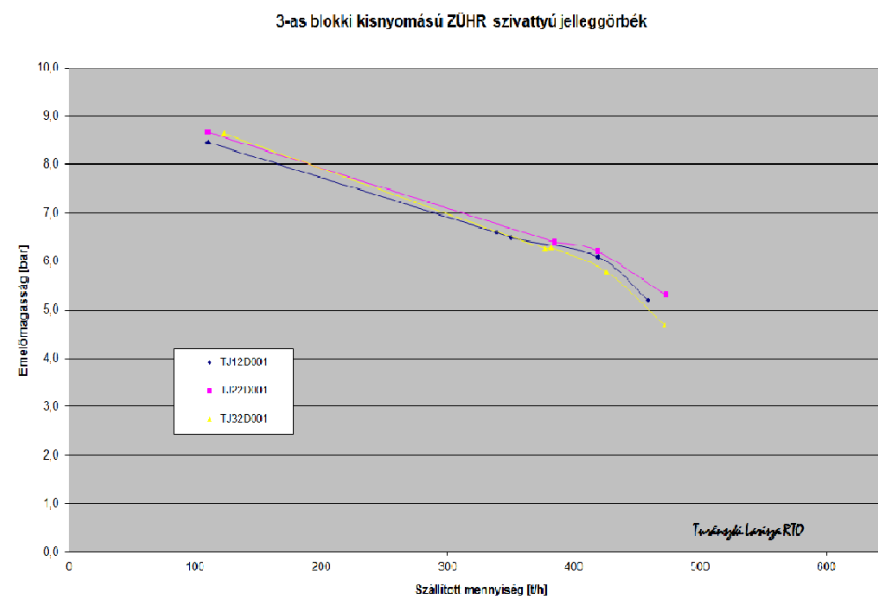
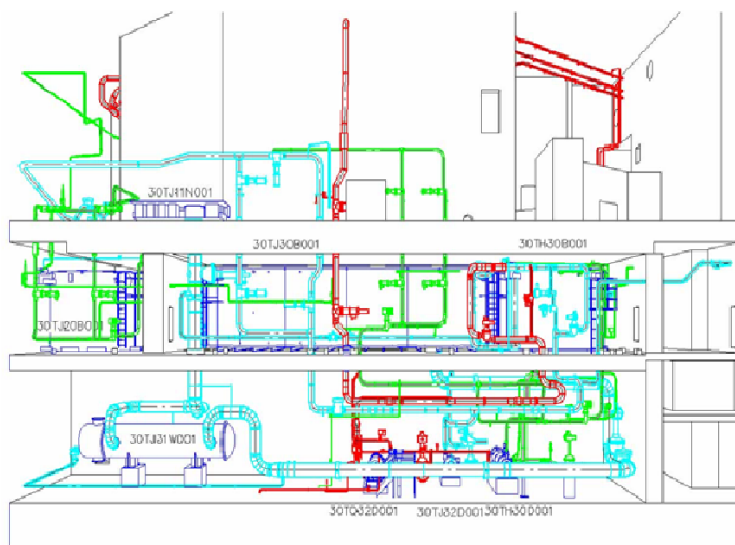
## Emergency core cooling systems

3. ábra – A ZÜHR-rendszer eredeti modellje  
(forrás: APROS)

## Emergency core cooling systems

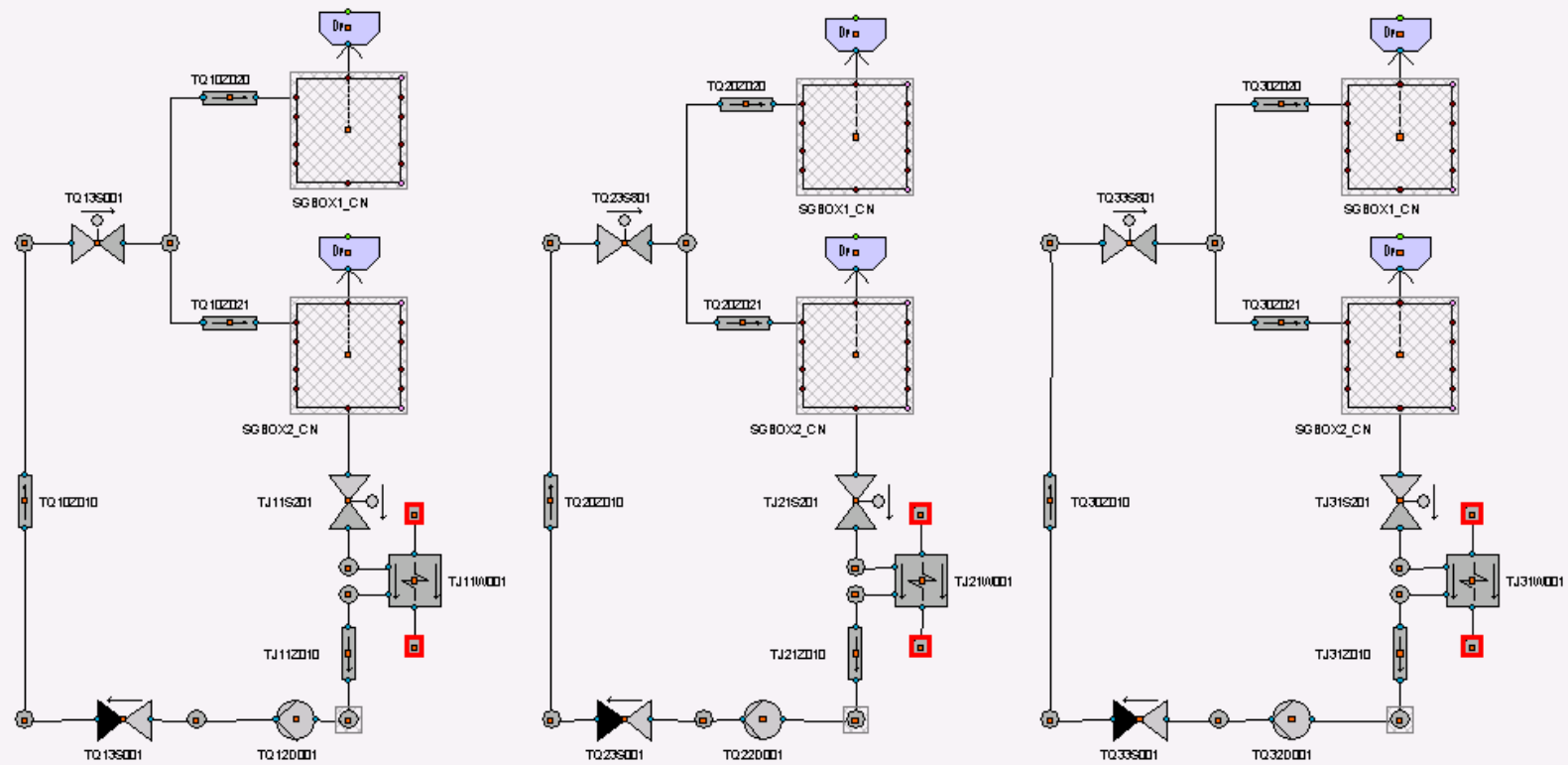


4. ábra A ZÜHR-rendszer módosított modellje  
(forrás: APROS)



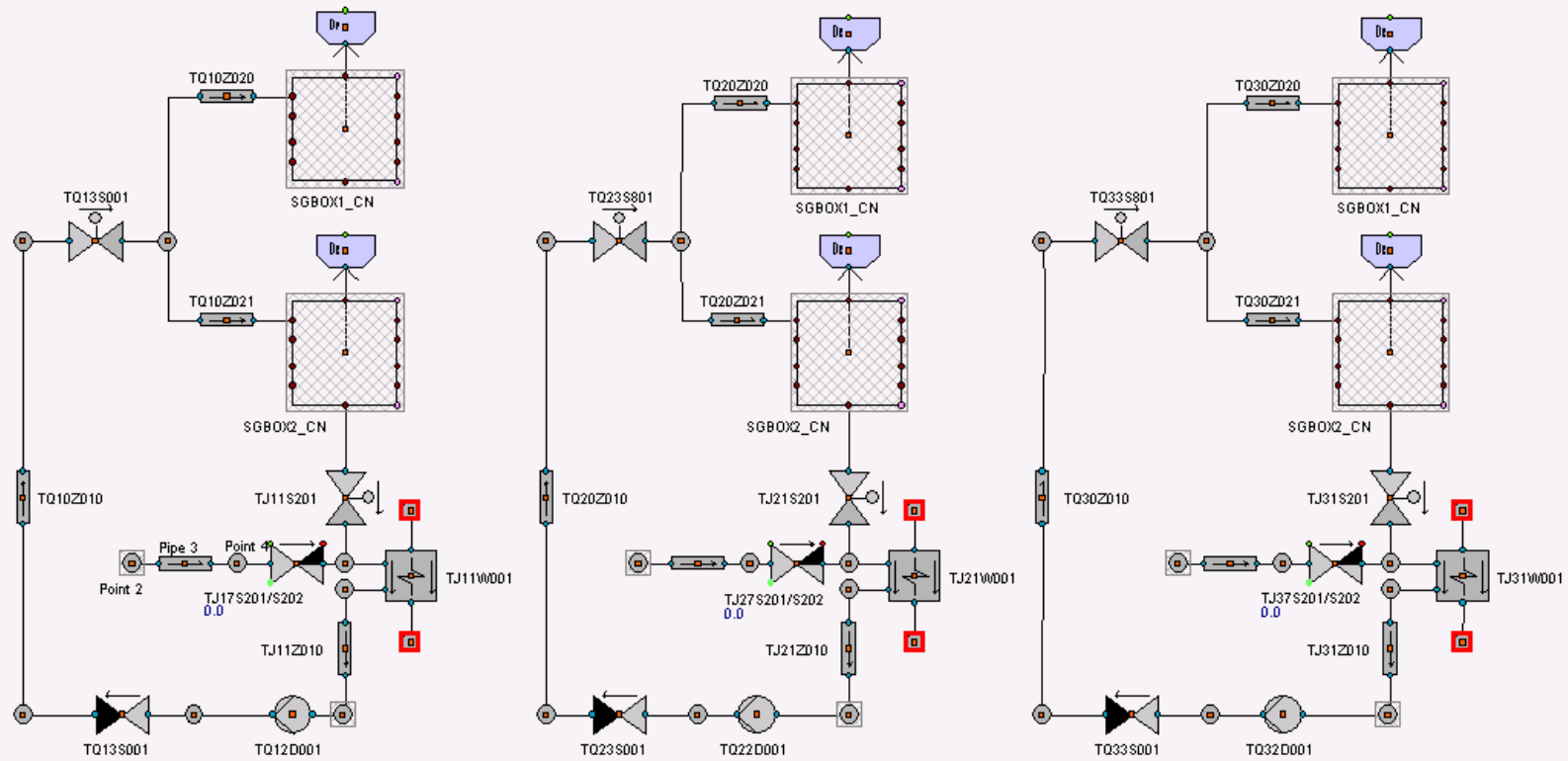
5. ábra – A ZÜHR-rendszerek elhelyezkedése és a kisnyomású szivattyú jelleggörbéje  
(forrás: MVM Paksi Atomerőmű ZRt.)

## Containment spray model



6. ábra – A hermetikus tér eredeti modellje  
(forrás: APROS)

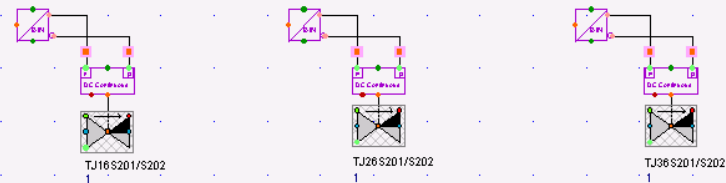
## Containment spray model



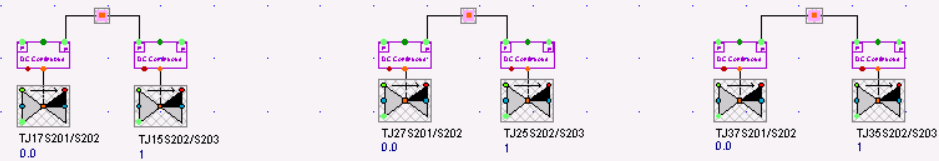
7. ábra- A hermetikus tér módosított modellje  
(forrás: APROS)

## Recirculation line actuation

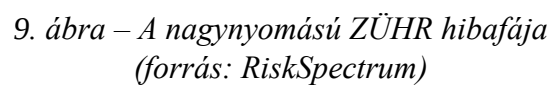
### Recirculation valves

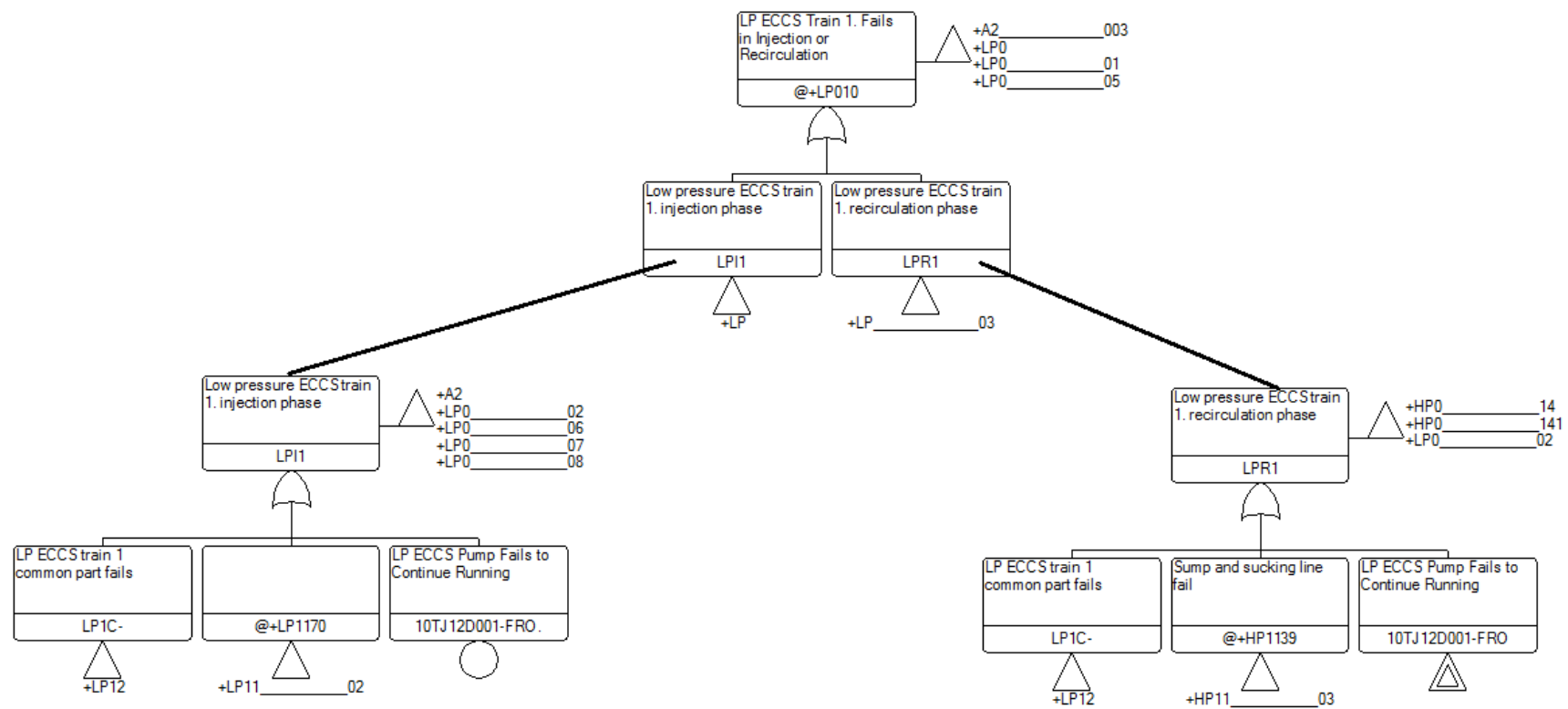


### Sump-related valves

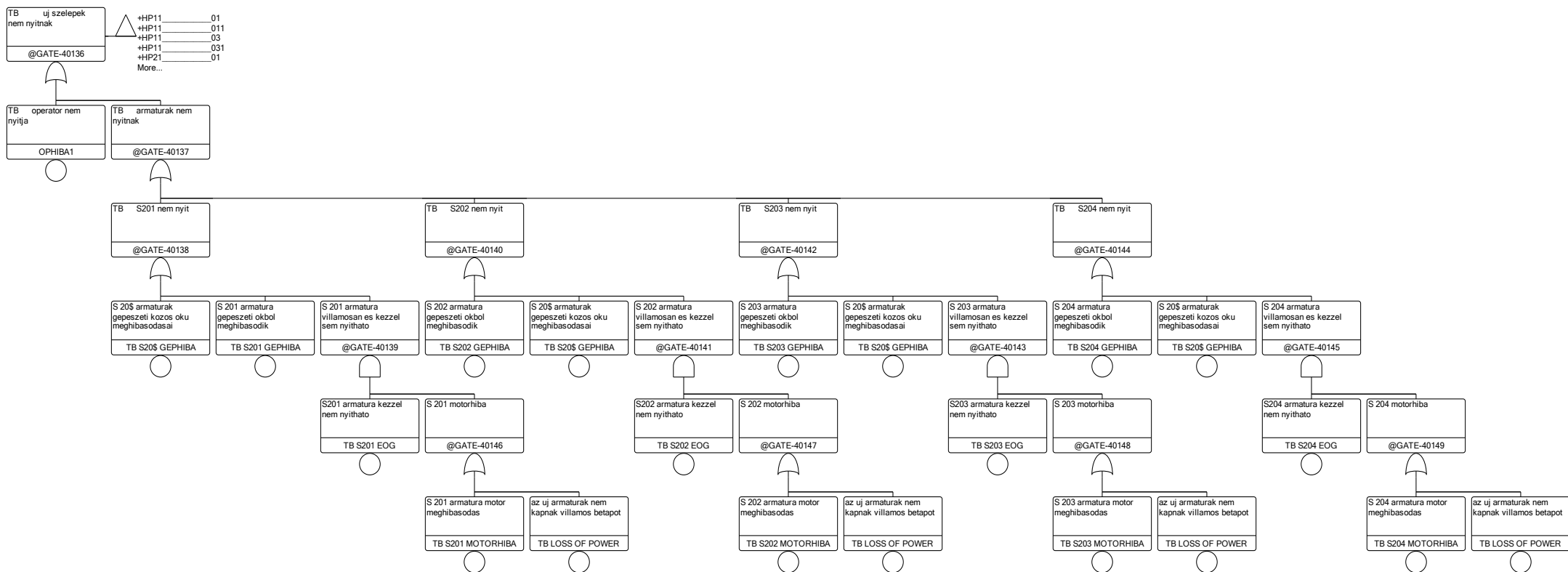


8. ábra – A beépített armatúrák irányítástechnikája  
(forrás: APROS)

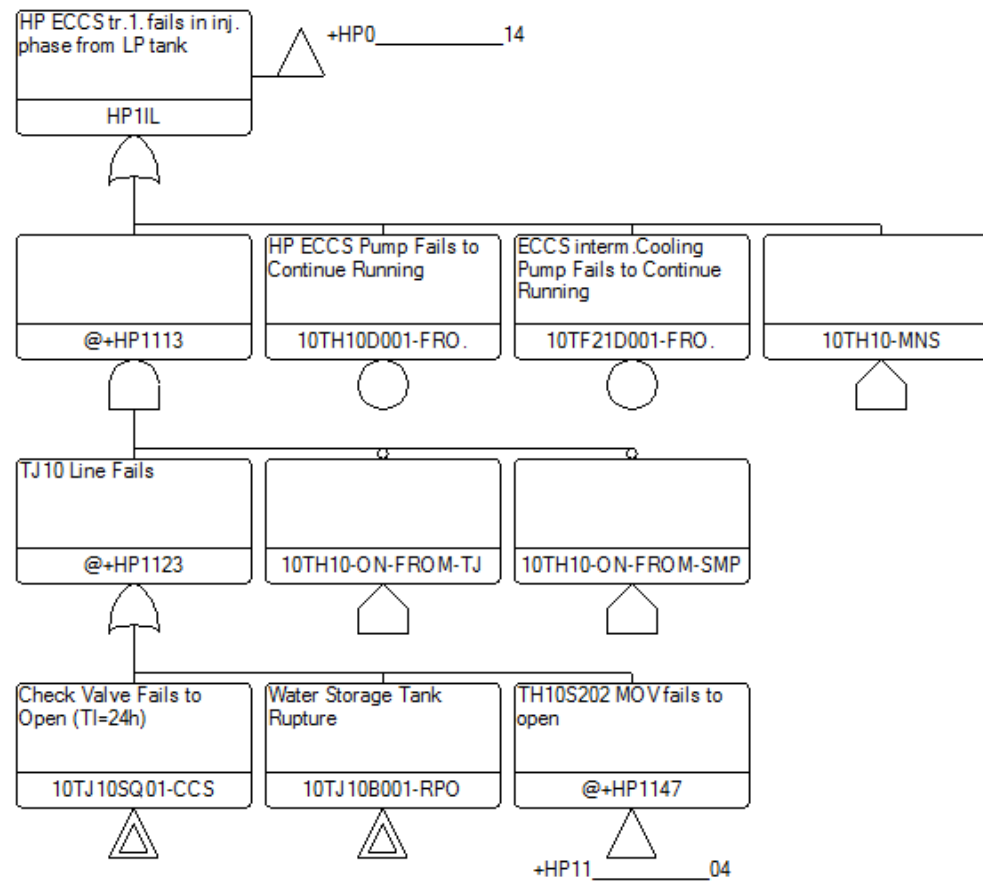




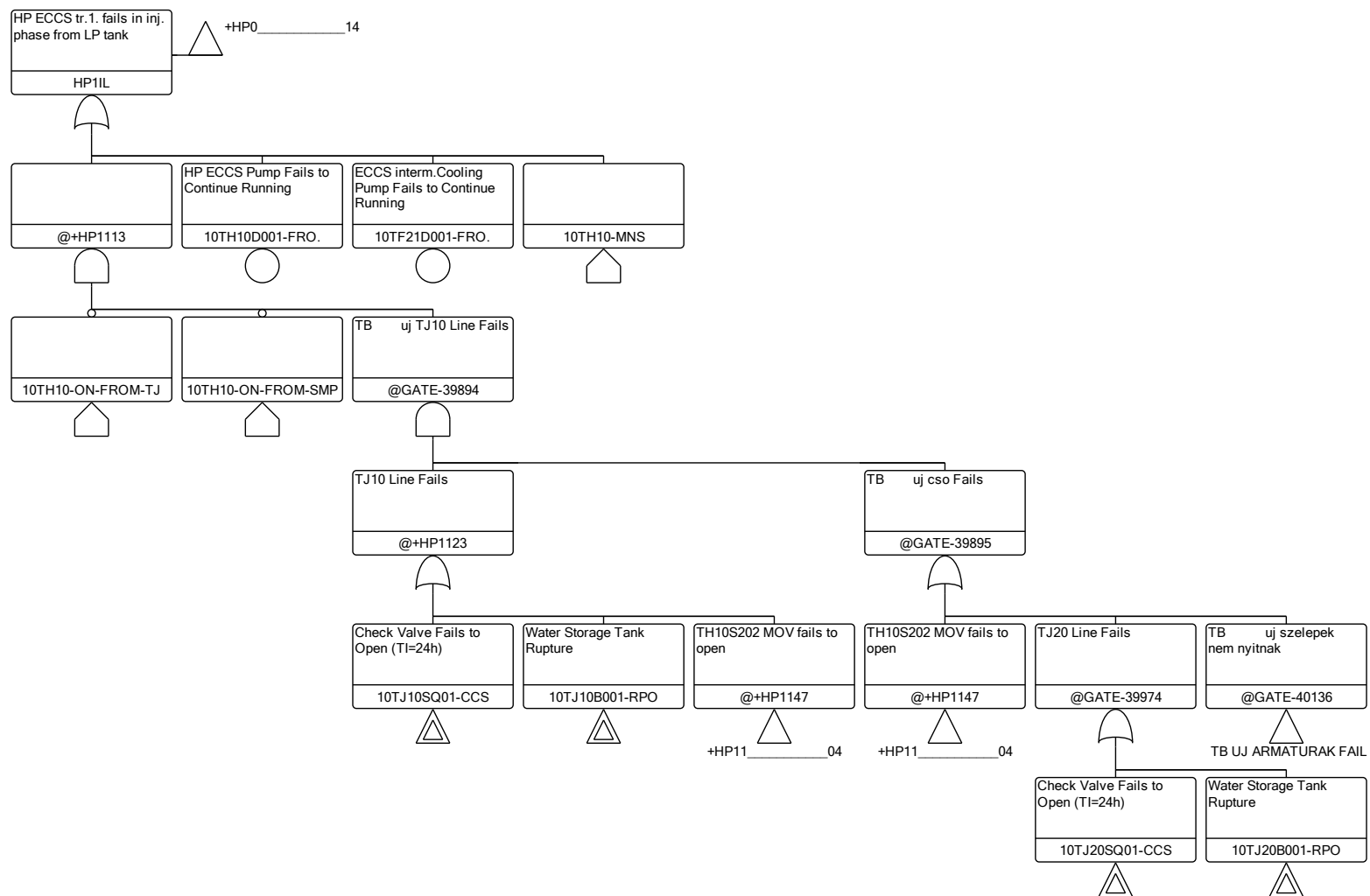
10. ábra – A kisnyomású ZÜHR hibafája  
(forrás: RiskSpectrum)



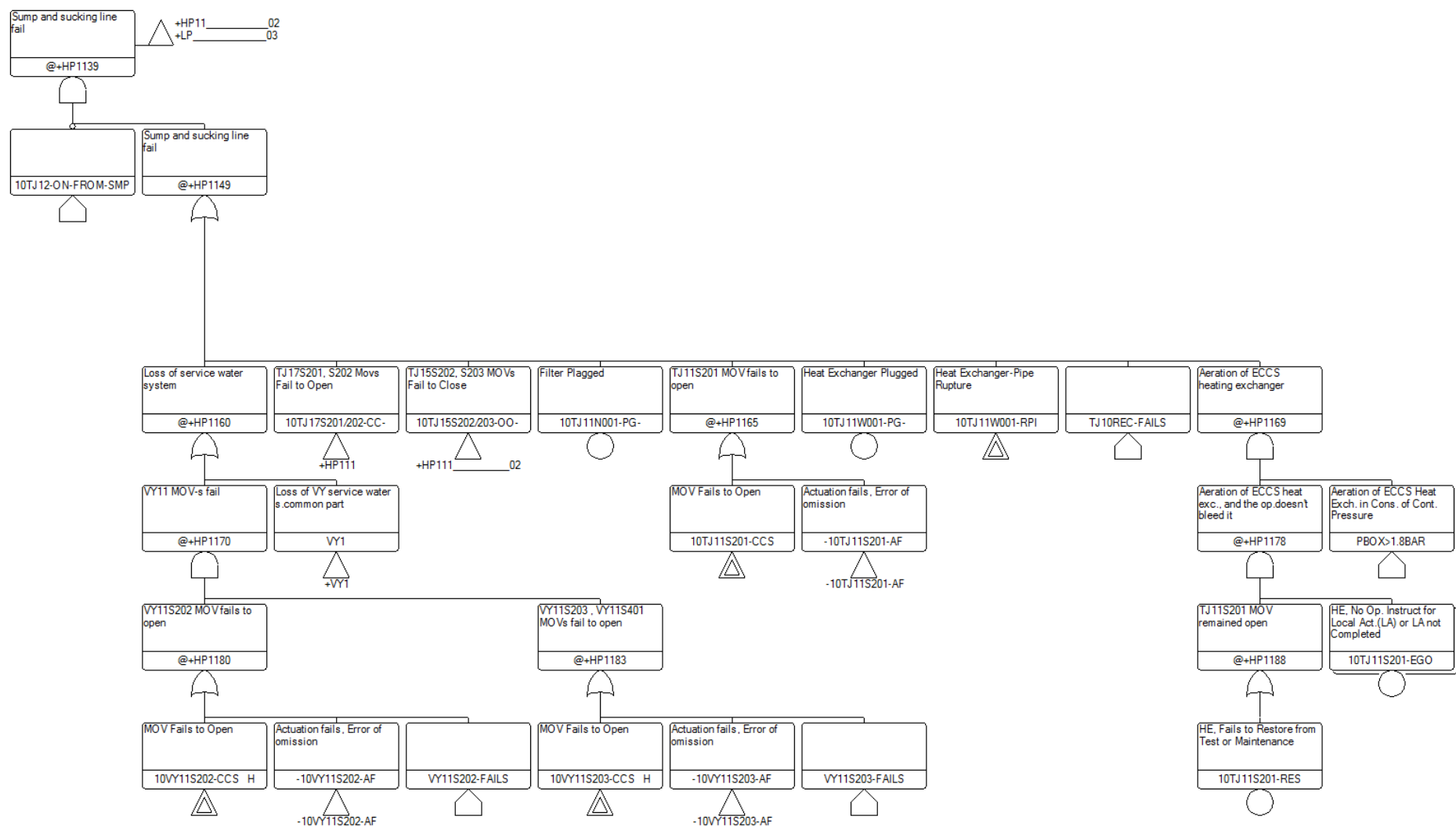
11. ábra – A beépítésre kerülő armatúrák hibafája  
(forrás: RiskSpectrum)



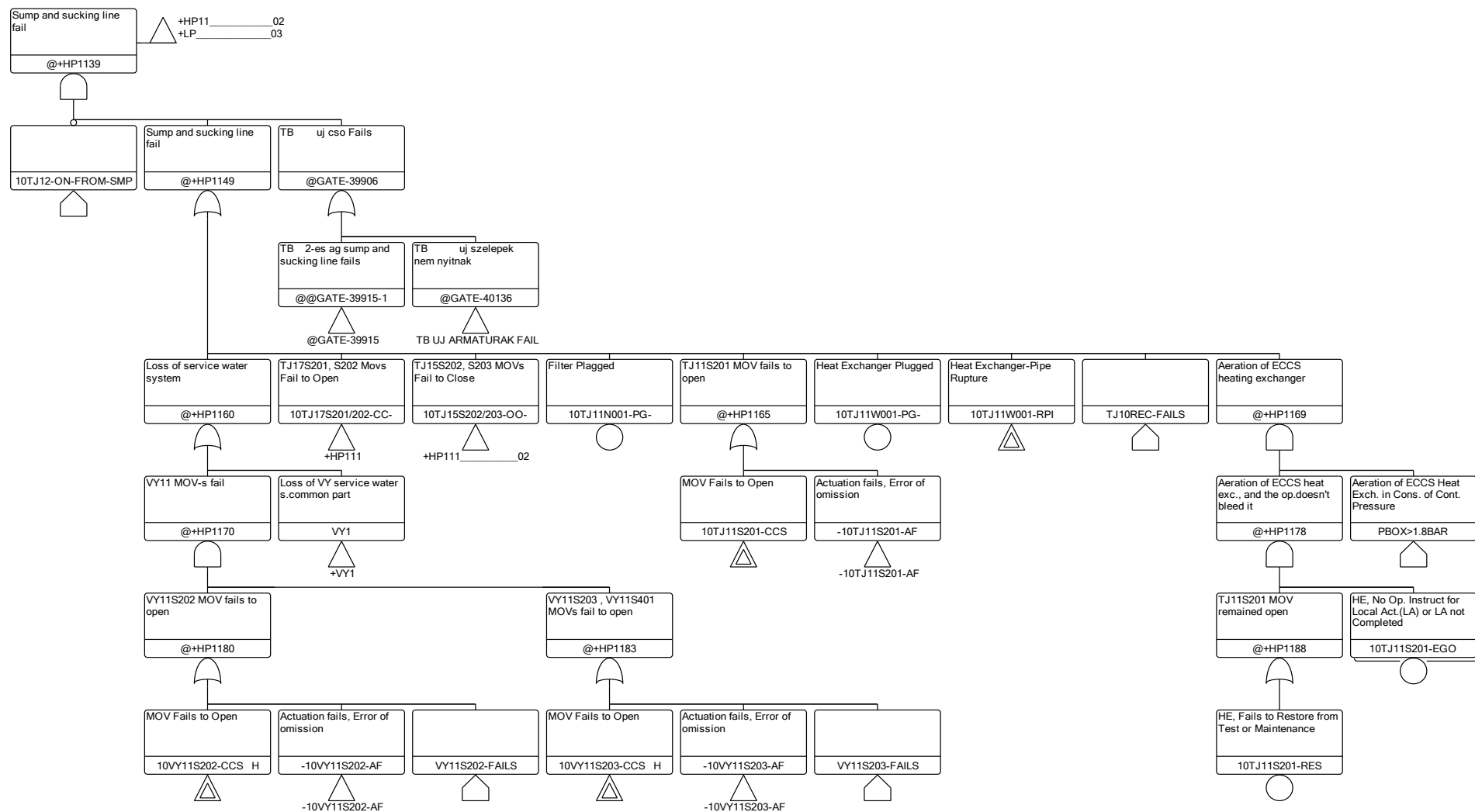
12. ábra – A 10-es nagynyomású ZÜHR ág kisnyomású tartályból történő betáplálása  
(forrás: RiskSpectrum)



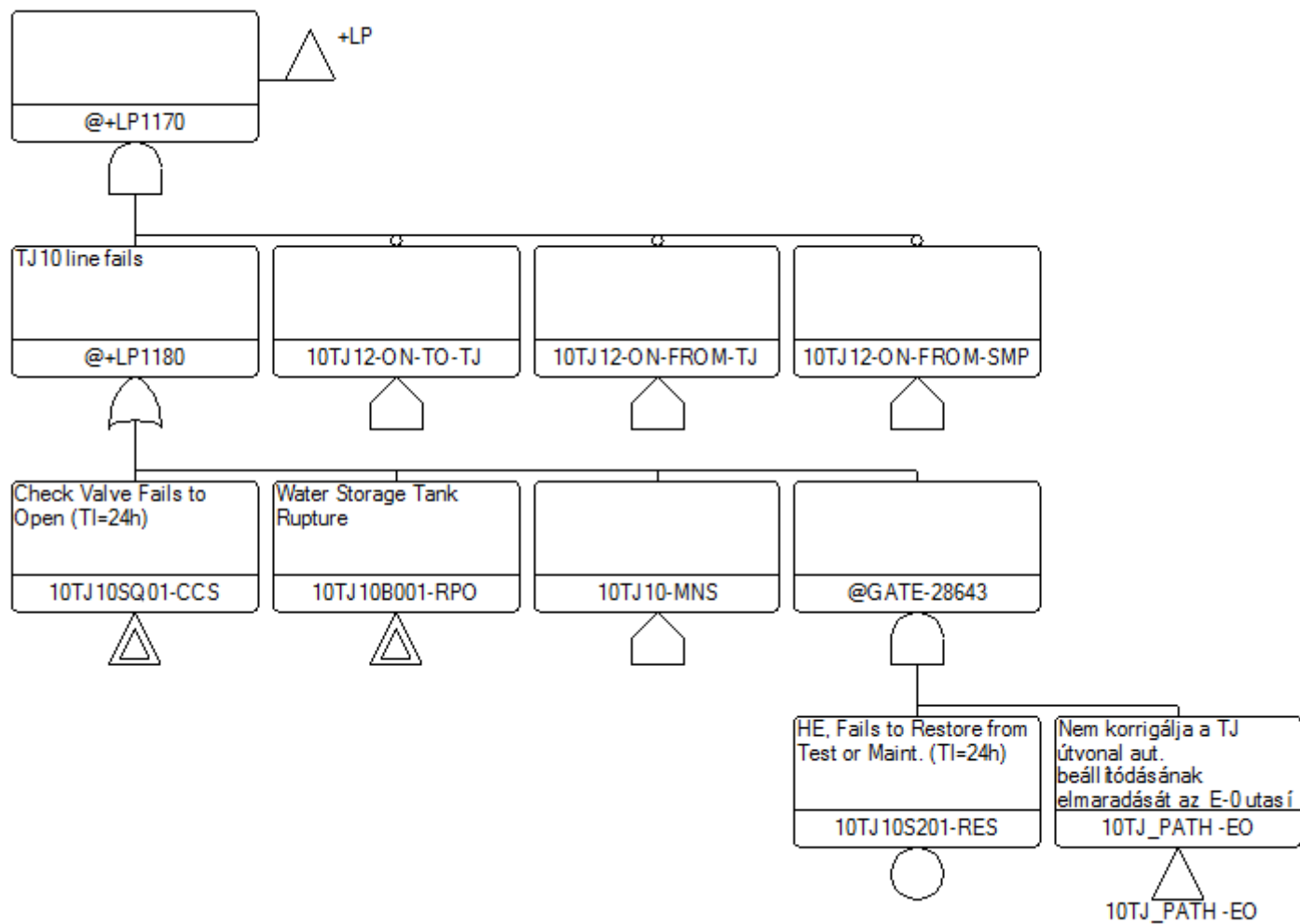
13. ábra – A nagynyomású ZÜHR ág módosított hibafája  
(forrás: RiskSpectrum)



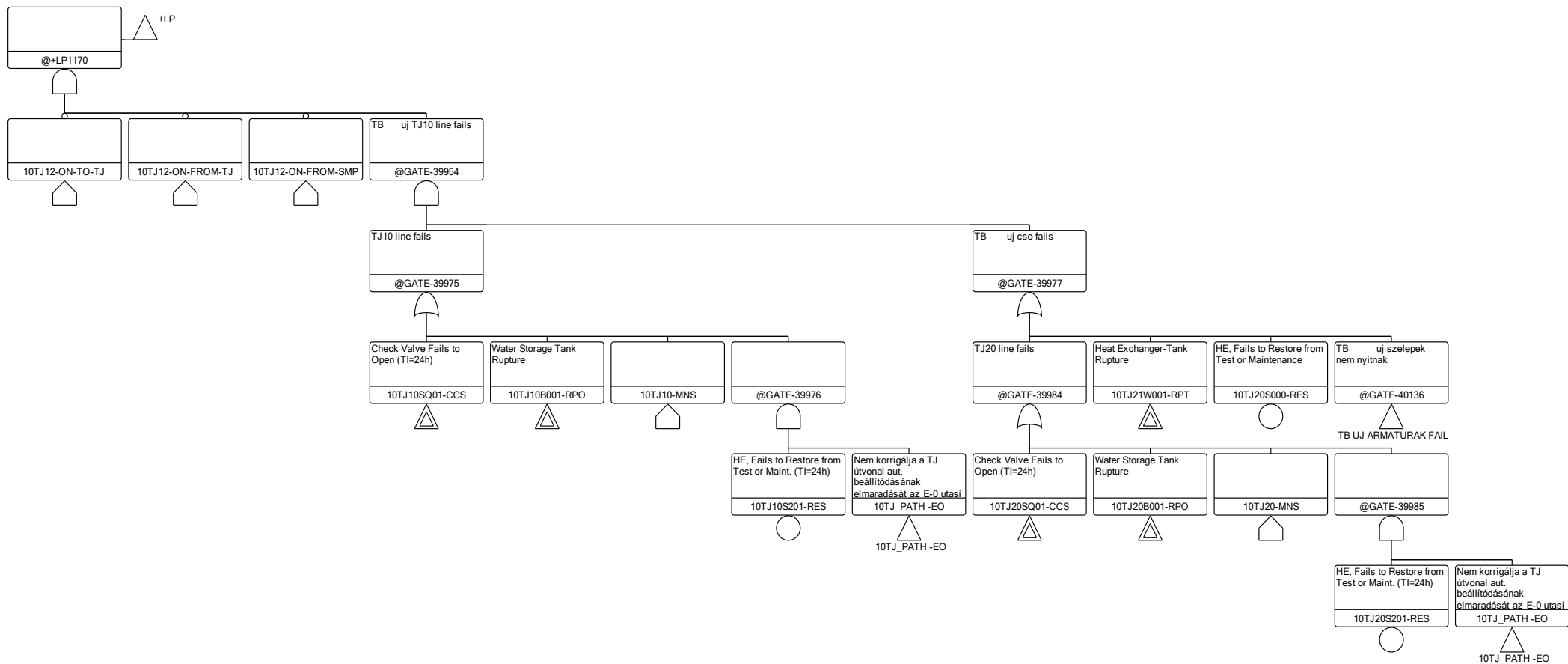
14. ábra – A zsompi ág eredeti hibafája  
(forrás: RiskSpectrum)



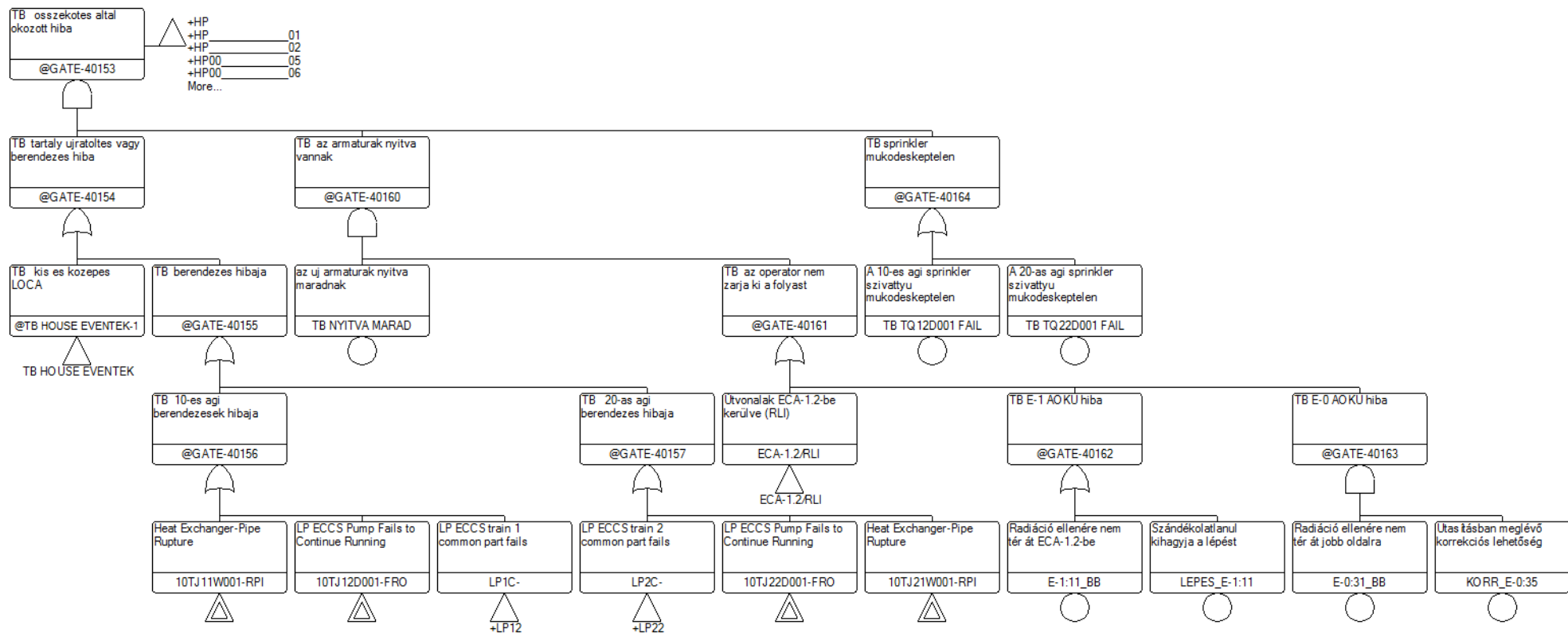
15. ábra – A zsompi ág módosított hibafája  
(forrás: RiskSpectrum)



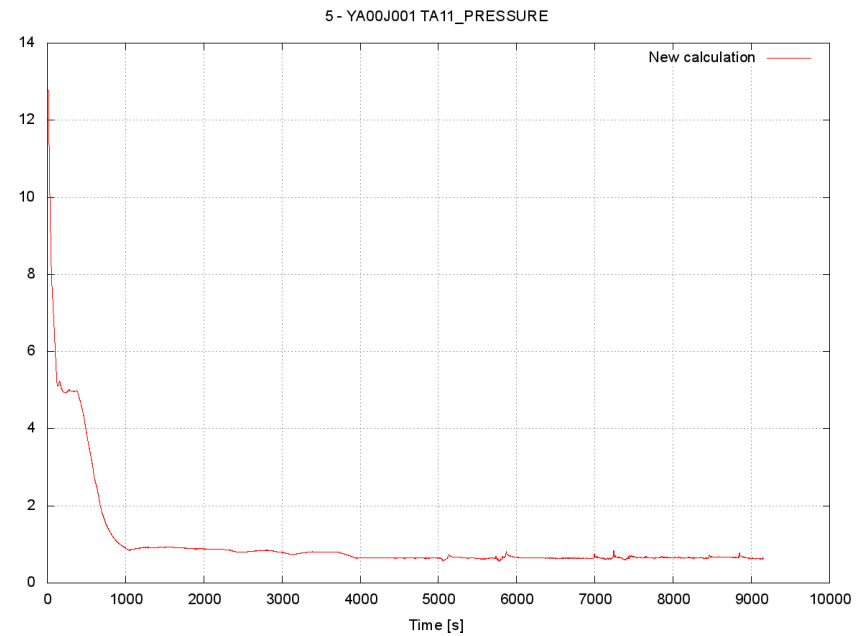
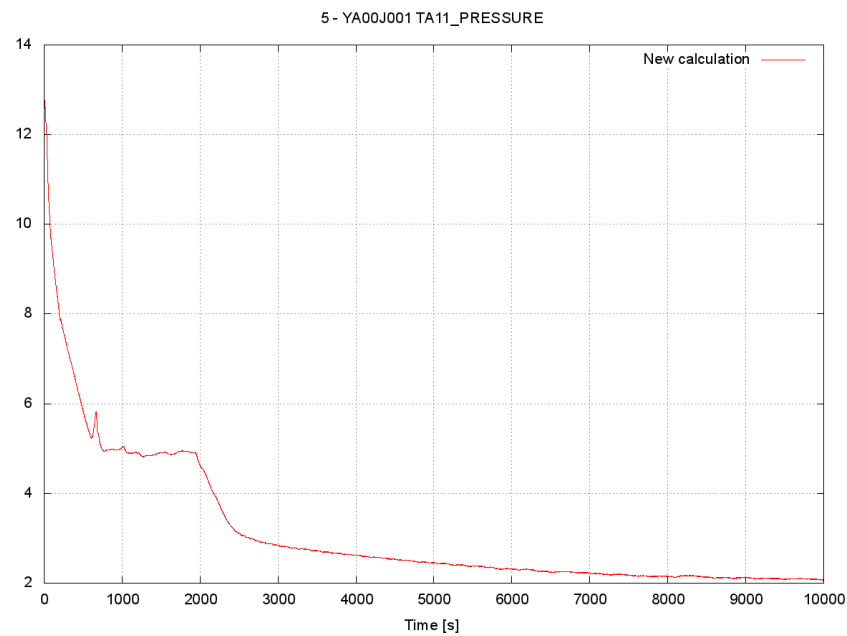
16. ábra – A kisnyomású rendszer módosítatlan hibafája  
(forrás: RiskSpectrum)



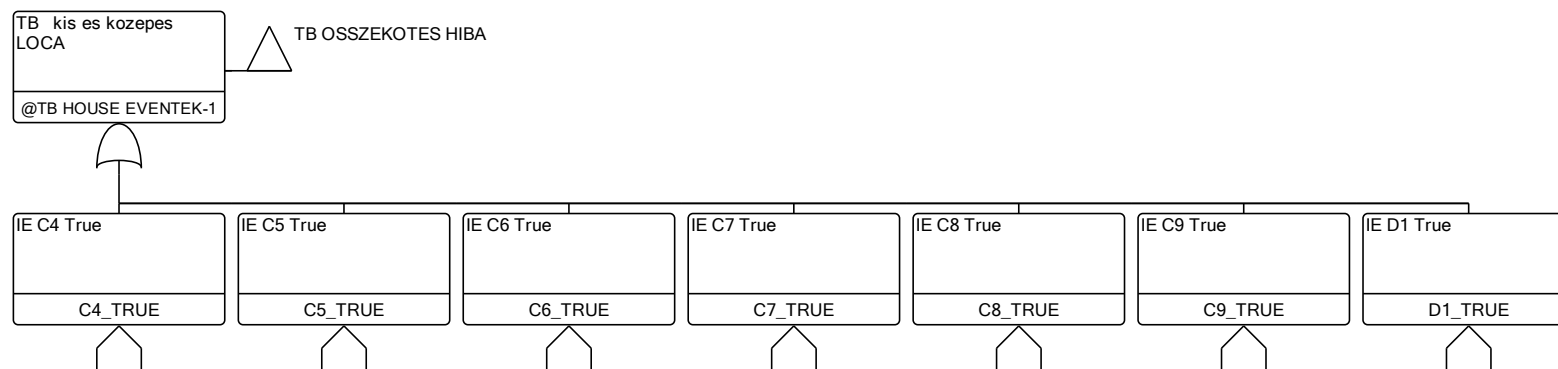
17. ábra – A kisnyomású rendszer módosított hibafája  
(forrás: RiskSpectrum)



18. ábra – A kialakítás hátrányait magába foglaló hibafa  
(forrás: RiskSpectrum)



19. ábra – A primekőri nyomás alakulása [bar]-ban 50 mm és 100 mm ekvivalens törésátmérő esetén  
(forrás: APROS)



20. ábra – A kis és közepes LOCA események House Event kapui  
(forrás: RiskSpectrum)