

Baleset Utáni Támogató Alkalmazás (BUTA)

Nemes András¹, Lajtha Gábor¹, Tóthné Laki Éva²

¹NUBIKI Nukleáris Biztonsági Kutatóintézet Kft.,
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.

²MVM Paksi Atomerőmű Zrt.,
7030 Paks, hrsz.: 8803/17

A Paksi Atomerőmű balesetkezelési stratégiájának és berendezéseinek továbbfejlesztését követően tartott balesetelhárítási gyakorlatok tanulságai alapján felmerült az igény a balesetkezelési tevékenységet támogató segédletek készítésére. Olyan segédletek kidolgozását tűzték ki célul, amelyek felhasználásával az elemző mérnök a balesetkezelés során felmerülő kérdések megválaszolását és a döntéshozatalt segítő információk birtokába juthat. Megalkottunk ezért egy számítógépes programot, amely a Súlyosbaleset-kezelési Mérőrendszer adataira támaszkodva segít meghatározni a múltban lezajlott eseményeket, és szimulációs adatok alapján információval szolgál az adott folyamat további várható lezajlásával kapcsolatban.

Bevezetés

A Paksi Atomerőműben az elmúlt évtizedben kidolgozásra került egy komplex balesetkezelési stratégia, amely többek között a hidrogénkezelésen keresztül a primerköri nyomáscsökkentésen és a reaktortartály külső hűtésének megvalósításán át a konténment hosszú idejű hűtésével biztosítja egy nagyon kis valószínűségű súlyos baleseti folyamat esetén is az erőmű biztonságos leállított állapotba jutását. A különböző balesetkezelési eszközök megfelelő időben történő működtetése, a megfelelő beavatkozások elvégzése a Baleset-elhárítási Szervezet (BESZ) Műszaki Támogató Központja (MTK) tagjainak döntése alapján történik. Ezeket a döntéseket az erőmű Súlyosbaleset-kezelési Útmutatója (SBKU) alapján hozzák meg. Ez az útmutató megadja a Súlyos Baleseti Mérőrendszer (SBM) jeleinek értékei alapján a szükséges balesetkezelési beavatkozásokat és bemutatja a beavatkozások várható következményeit. Az MTK az SBKU-t követve, a beavatkozások előnyeinek és hátrányainak mérlegelése alapján hozza meg a döntését, alakítja ki a beavatkozási stratégiát.

Az SBKU [1] bevezetése után a Paksi Atomerőműben elkezdődött az útmutató használatának oktatása, amelynek keretében azóta is rendszeresen gyakorlatokat tartottak/tartanak a Védett Vezetési Ponton (VVP). A súlyosbaleset-kezelési gyakorlatok során kiderült, hogy a Műszaki Támogató Központ elemző mérnöke a felmerülő kérdésekre nem tud minden esetben időben válaszolni.

A kérdések megválaszolásánál az elemző mérnöknek tisztában kell lennie a baleseti folyamattal. Ehhez a kezdeti eseménytől kezdve a folyamat előrehaladásának főbb jellemzőit, és a változások időpontjait is ismernie kell. A baleseti folyamat ismerete nagymértékben megkönnyíti a várható események előrejelzését, és az SBKU alkalmazása során felmerülő kérdések (pl. a reaktortartály, vagy a hermetikus tér várható sérülésének ideje, ami után nagy kibocsátás várható) megválaszolását.

Azonban ez az adott szituációban nem egyszerű feladat, mert:

- vagy az vezet súlyos balesethez, hogy az erőmű az adott terhelésre nem méretezett, és rendszerei nem működnek megfelelően az adott szituációban,
- vagy az, hogy nem megfelelően értelmezik az eseményeket, ami nem megfelelő beavatkozásokat eredményez.

Mindkét esetben egy korábban nem tapasztalt, nem gyakorolt helyzettel kerül szembe a blokki személyzet, majd az MTK személyzete, köztük az elemző mérnök. Számára ezért fontos a kezdeti események pontos meghatározása, valamint az aktuális helyzet ismerete, ami segítséget ad számára a várható történések időpontjának, a folyamatok jellegének meghatározásához.

Már a Three Mile Island (TMI) baleset (1979) után elkezdődött a súlyosbaleset-kezelést támogató eszközök (SBTE - Accident Management Support Tools - AMST [2]) fejlesztése és telepítése atomerőművekben, ami azon a felismerésen alapult, hogy stresszes helyzetekben, például az atomerőművek súlyos balesete során, a kezelőknek olyan támogató eszközökre van szükségük, amelyek megkönnyítik a döntéshozatalt a balesetkezelési intézkedések kiválasztásában.

A Fukushima Daiicsi atomerőműben történt baleset tanulságai alapján készült vizsgálatok kiemelték a balesetek kezelésének fontosságát a súlyos balesetek következményeinek mérséklésében, és javaslatot tettek a balesetkezelési programok újragondolására (pl. mobil eszközök alkalmazása), amelyhez viszont az SBTE-k alkalmazása, modernizálása szükséges.

Segédletek

A segédletek célja a múltbeli események meghatározása, ami szükséges a jövőben várható események feltérképezéséhez. Ekképpen a folyamatok előre becsülhetőek, ami segíti a helyzetnek megfelelő beavatkozások kijelölését.

A súlyos baleseti folyamat során a következő főbb kérdések merülnek fel:

- a zónasérülés különböző szakaszainak várható ideje (réskibocsátás, lokalizált és kiterjedt olvadás);
- a primerköri vízvesztés mértéke, a zóna elárasztásához és az egyfázisú természetes cirkuláció helyreállításához szükséges vízmennyiség;
- egy adott jövőbeli időpontban:
 - a zónasérülés mértéke,
 - a zóna (törmelék) elhelyezkedése,
 - a Zr burkolat oxidációjának mértéke,
 - a primerkörből és a konténmentből kikerülő aktivitás mértéke,
 - a keletkező hidrogén mennyisége;
- egy fizikai állapot elérésének a várható időpontja, az állapot fő jellemzői; a konténment biztonságos állapotának tartalékai:
 - mikor várható, hogy a konténment nyomása

meghaladja a 2,5 bar-t (5%-os valószínűségű sérülési nyomás), és mennyi gőz okozná a 2,5 bar vagy 3 bar elérését,

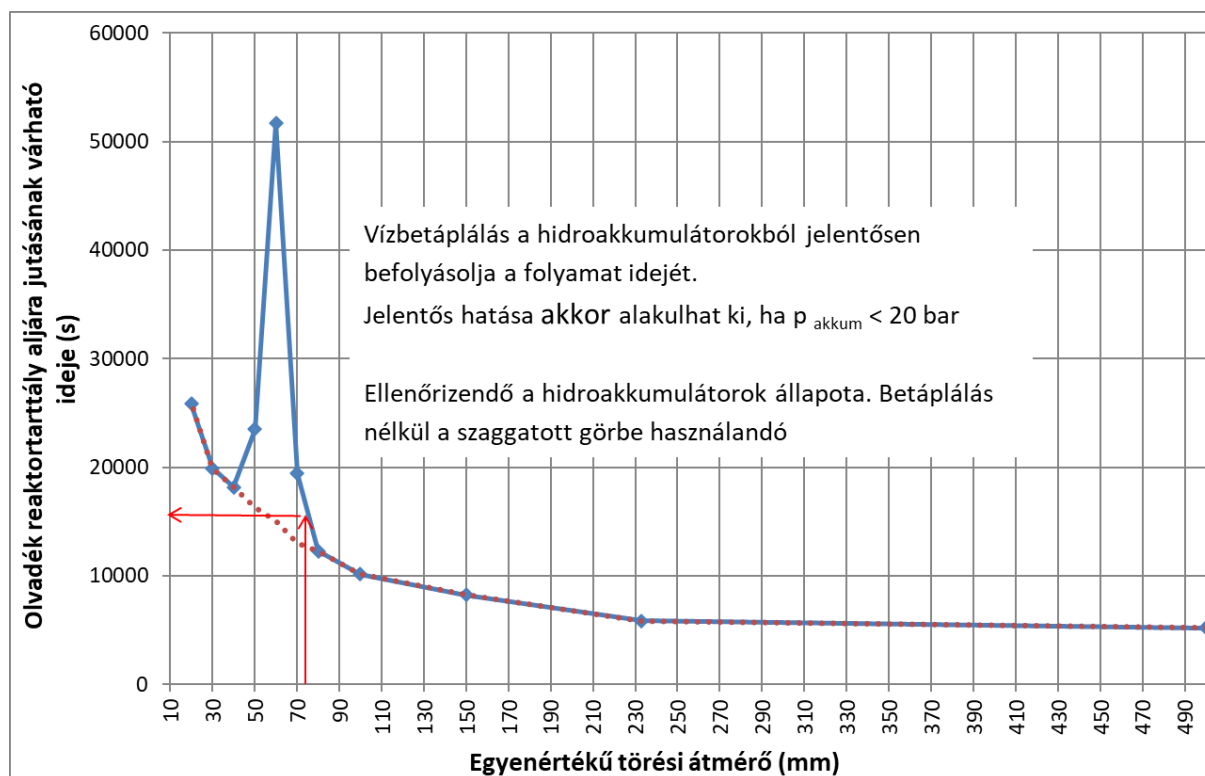
- mikor várható, hogy hidrogénégés alakul ki a konténmentben, a hidrogén gyújtásához mennyi hidrogénbejutás vagy milyen mértékű gőzkondenzáció vezethet.

A fenti kérdések megválaszolásának támogatására többféle segédlet készíthető. A legegyszerűbb, minden helyzetben használható a papíron előre elkészített diagram. Ilyeneket alkalmaz az SBKU jelenleg.

A papíralapú segédletek előnye, hogy mindig elérhetők, könnyen használhatók, elővehetők. Ezekhez nem tartozik olyan rendszer, berendezés, ami elromolhatna, vagy esetleg hibásan működne. A papíralapú segédleteknél csak emberi hibával kell számolni, ami lehetséges a segédletek készítése és felhasználása során is.

Minta papíralapú segédletre

A segédlet súlyos baleseti kód/kódok számításai és előre kiszámolt folyamatok jellemző értékei alapján készül. Az 1. ábra olyan papíralapú segédletre mutat példát, amelynek felhasználásával teljes feszültségvesztés esetén, beavatkozások nélküli esetben a primerköri nyomás alapján megbecsülhető a zónatörmelék reaktortartály aljára jutásának időpontja.



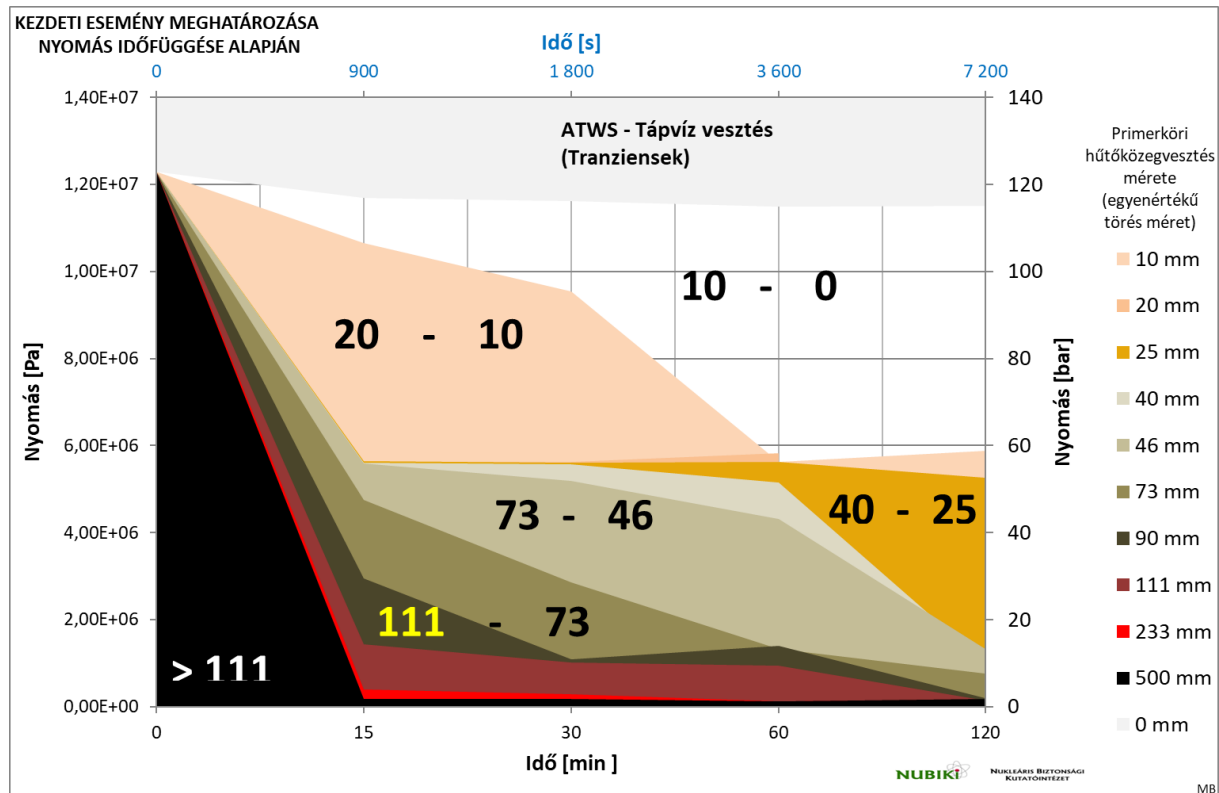
1. ábra: Zónatörmelék reaktortartály aljára jutásának várható időpontja a törésméret függvényében

Egy másik példán (2. ábra) a primerköri nyomáscsökkenés sebessége alapján lehet következtetni a törés méretére primerköri hűtőközegvesztés esetén.

A papíralapú segédletek hátránya, hogy a bonyolult, több körülményt figyelembe vevő diagramok megértése időigényes, használata nehézkes. A bonyolultság abból fakad, hogy a folyamatok összetettsége és egymással való összefüggése miatt nagyon sok segédletből/görbéből kell

kiválasztani a megfelelőt, és leolvasni a szükséges értékeket. Ez stresszes helyzetben növeli az emberi hiba esélyét, főleg, ha időkényszer is fennáll.

Ezeket mérlegelve úgy határoztunk, hogy egy számítógépes programot dolgozunk ki a súlyos baleseti folyamat lehetséges előrehaladásának előrejelzésére, amely támogatja a kezdeti esemény felismerését és a balesetkezelést.



2. ábra: A kezdeti esemény a primerköri nyomás függvényében

Baleset Utáni Támogató Alkalmazás (BUTA)

A program folyamatosan olvassa az SBM jeleit (gyakorlatok során akár a szimulátorból érkezőket), és ellenőrzi, hogy azok a normálüzemi tartományban tartózkodnak-e. Amennyiben bármely paraméterérték kilép a biztonságos üzemi sávból, a program kezdetiesemény-felismerő algoritmusával következtet a lehetséges kezdeti esemény(ek)re. Ehhez egy előre létrehozott adatbázist használ, amelyben jelenleg az első szintű valószínűségi biztonsági elemzés (PSA-1) alapján kiválasztott kezdeti eseményekre a MAAP5-VVER súlyosbaleseti kóddal elvégzett számítások eredményei találhatók. Az adatbázis más kódok, és megtörtént események mérési eredményeivel is tetszőlegesen bővíthető.

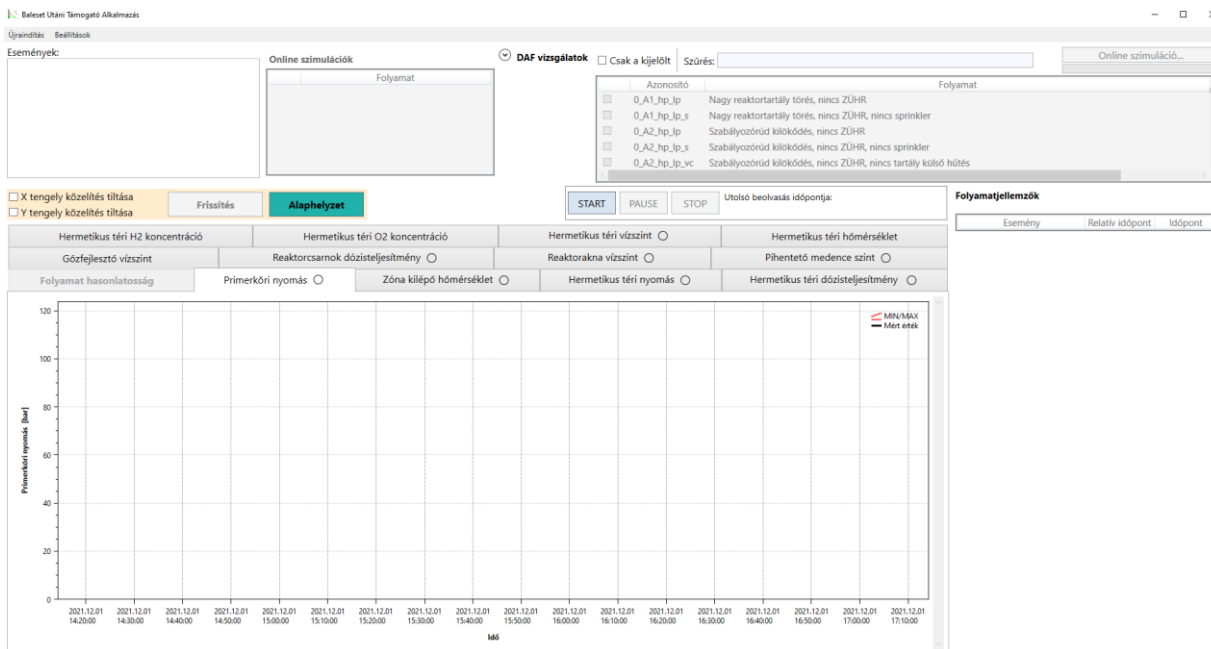
A minőségi elemzés során a program logikai fákon keresztül következtet a bekövetkezett eseményekre, a mennyiségi elemzés során pedig a beolvasott értékek változását hasonlítja össze a háttér-információi között lévő adatsorokkal. Meghatározza a tárolt események hasonlóságát a mért értékekkel, és ez alapján sorrendet állapít meg. A minőségi és mennyiségi összehasonlítás alapján a számítógépes program javaslatot ad a kezdeti

esemény jellegére. Az elemző mérnök az ennek segítségével kiválasztott folyamatra információkat kap a programtól a várható események idejéről, és lekérheti az SBM paraméterértékeinek előrebecslését időfüggvények alakjában.

A 3. ábra a program kezelőfelületét mutatja. A főablak bal alsó részén elérhető az SBM-paraméterek grafikus megjelenítése, az üzemi sáv elhagyása után pedig a leghasonlóbb szimulációkra vonatkozó értékek és az egyes szimulációkra vonatkozó relatív hasonlóság alakulásának görbéje is.

A kezelőfelület bal felső részén található üzenetablakban a program üzenetei, a paraméterértékek üzemi sávból való kilépésének, illetve az észlelt mérőmeghibásodások időpontja jelenik meg. (Ez azért kiemelten fontos, mert a program önállóan fut folyamatosan, és a VVP-re érkező felhasználót már kész eredményekkel fogadja.)

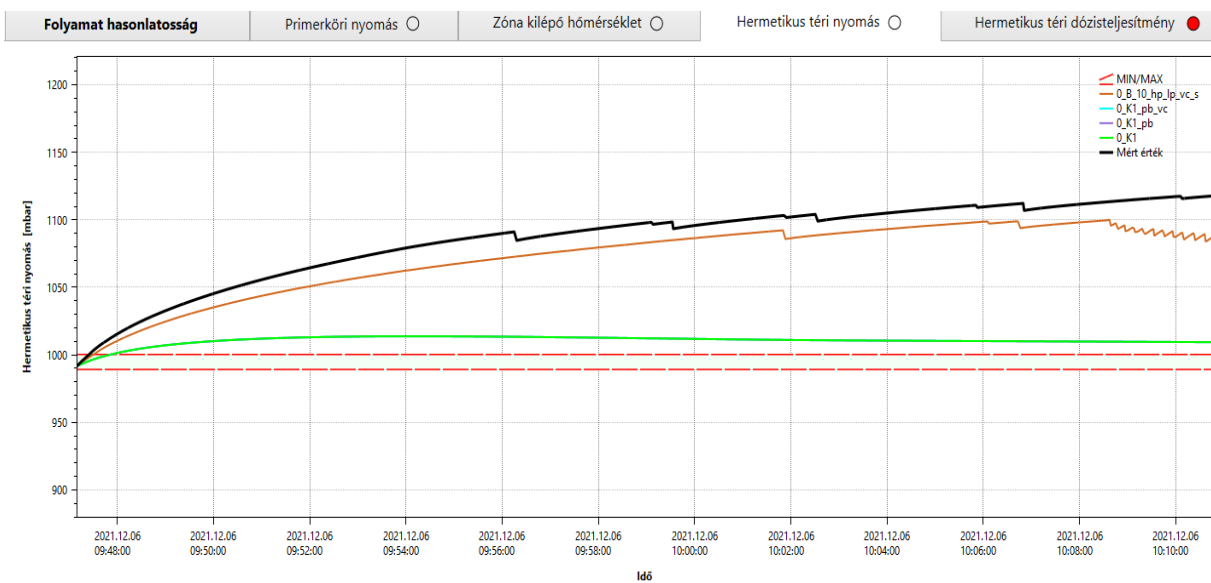
Az automatikus kezdetiesemény-felismerés eredménye a jobb felső részen egy ablakban jelenik meg, ahol az adatbázisban lévő szimulációk listája található (4. ábra), a normál üzemi sávból való kilépést követően, hasonlatosság szerinti sorrendben. Az adatbázisban lévő bármely folyamat kijelölhető, és a mérési adatokkal együtt megjeleníthető a kiválasztott folyamat paramétereinek alakulása (5. ábra).



3. ábra: A BUTA kezelőfelülete

	Azonosító	Folyamat	Relatív Hi	Trend
<input checked="" type="checkbox"/>	0_B_40_rc_vc	LOCA 40 mm, nincs recirkulációra váltás, nincs tartály külső hűtés	1	-
<input checked="" type="checkbox"/>	0_B_50_rc_vc	LOCA 50 mm, nincs recirkulációra váltás, nincs tartály külső hűtés	0.97	-
<input checked="" type="checkbox"/>	0_B_60_hp_lp_vc	LOCA 60 mm, nincs ZÜHR, nincs tartály külső hűtés	0.95	↑
<input type="checkbox"/>	0_B_50_hp_lp_vc	LOCA 50 mm, nincs ZÜHR, nincs tartály külső hűtés	0.95	-
<input type="checkbox"/>	0_B_30_rc_vc	LOCA 30 mm, nincs recirkulációra váltás, nincs tartály külső hűtés	0.95	-
<input type="checkbox"/>	0_B_40_hp_lp_vc	LOCA 40 mm, nincs ZÜHR, nincs tartály külső hűtés	0.95	↓

4. ábra: Az adatbázisban található szimulációk listája



5. ábra: Szimulációk adatainak megjelenítése a mérési eredményekkel párhuzamosan

A kezelőfelület jobb alsó részén a kijelölt szimuláció során kapott fontosabb jellemzőket is kijelzi a BUTA, így a leghasonlóbb folyamat esetében következtetni lehet – a mérési eredmények alapján – a valóságban lejátszódó folyamat során várható fontosabb események bekövetkezési időpontjaira (6. ábra).

A program megfelelőségét megvizsgáltuk más súlyos baleseti kóddal számolt folyamatok eredményeinek mért értéként történő beadásával, többek között a teljes feszültségvesztés tranziensének mért értékeivel. Az eredmények azt mutatták, hogy a bevitt adatok által reprezentált folyamatok jellegét megfelelően ismeri fel a BUTA.

A főablak jobb felső sarkában található „Online szimuláció” gombra kattintva egy egyszerűsített kezelőfelületen keresztül lehetőség van a MAAP5-VVER kóddal történő élő szimuláció indítására is. Ehhez a program a paksi blokkok specifikációja szerint elkészített paraméterfájl használja, az inputfájl pedig a BUTA hozza létre a kezelő által megadott paraméterek alapján. A 7. ábra a beállítási lehetőségek egy részét mutatja példaként.

Az online szimuláció elvégzése után az eredmények kirajzolhatók a BUTA főablakában csakúgy, mint az adatbázisban található szimulációk eredményei. A paraméterek lefutása így szemrevételezéssel összehasonlítható a mérési eredményekkel, illetve az adatbázisban szereplő szimulációk adataival. Az online szimuláció folyamatjellemzői az adatbázisban szereplő folyamatokhoz hasonlóan megjeleníthetők a program által.

A program 2020 decemberében átadásra került az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. Fejlesztési és Elemzési Osztályának, az SBM átalakítás miatt azonban még nem történt meg a telepítése a végleges felhasználási helyén (VVP). A szoftvert ezért kiegészítettük egy SBM-től független futtatási (gyakorló/tesztelő) móddal, melynek révén az egyébként a mérőrendszerből érkező bejövő adatokat tetszőleges adatsorokkal lehet helyettesíteni, például bármely súlyos baleseti kódból származó szimulációs adatokkal, vagy tetszőleges üzemi esemény méréseinek eredményével.

Folyamatjellemzők

LOCA 40 mm, nincs recirkulációra váltás, nincs tartály külső hűtés

Esemény	Relatív időpont	Időpont
Zóna kilépő hőmérséklet > 370 °C	11297 s	2021-12-01 17:22:26
Zóna kilépő hőmérséklet > 550 °C	11642 s	2021-12-01 17:28:11
Zóna kilépő hőmérséklet > 900 °C	12249 s	2021-12-01 17:38:18
Zóna kilépő hőmérséklet > 1100 °C	12415 s	2021-12-01 17:41:04
Maximális zónahőmérséklet > 2500 K	20989 s	2021-12-01 20:03:58
Réskibocsátás kezdete	11861 s	2021-12-01 17:31:50
Olvadék a tartály aljába kezd folyni	28724 s	2021-12-01 22:12:53
Tartálýsérülés időpontja	47070 s	2021-12-02 03:18:39
Hermetikus tér nyomása 2,5 bar felett	Egy napon belül nem várható	
H2 koncentráció meghaladja a 4%-t a hermetikus térben	21313 s	2021-12-01 20:09:22
H2 koncentráció meghaladja a 8%-t a hermetikus térben	Egy napon belül nem várható	

6. ábra: Folyamatjellemzők

Esemény	Kezdete [s]:	Vége [s]:	Tömegáram [kg/s]	Törés átmérője [mm]:	Törött csövek száma [db]:
Egyenáram elvesztése	<input type="text"/>				
Váltóáram elvesztése	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>		
Primer oldali betáplálás (pótvíz)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>		
Primerköri törés hermetikus téren belül	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Primerköri törés hermetikus téren kívül	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Primer szekunder átfolyás	<input type="text"/>				<input type="text"/>
Gőzvezeték törés hermetikus téren belül	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Gőzvezeték törés hermetikus téren kívül	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Főgőzgyűjtő törés	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Tápvízvezeték törés hermetikus téren belül	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Tápvízvezeték törés hermetikus téren kívül	<input type="text"/>	<input type="text"/>		<input type="text"/>	

7. ábra: Online szimuláció kezelőfelülete

A BUTA egyéb alkalmazási lehetőségei

A program az eredeti elképzelés szerint a VVP-n, az MTK helyiségben elhelyezett munkaállomáson fut folyamatosan, és szükség esetén ott nyújt információkat az elemző mérnök számára. Természetesen az elemző mérnököknek oktatás keretében meg kell ismerniük ezt az új rendszerelemet, és be kell gyakorolniuk a használatát az SBKU és a BESZ gyakorlatok során. Az alapok elsajátítása után azonban maga a program tud segítséget nyújtani az SBKU oktatás és a BESZ gyakorlatok során.

A BUTA a gyakorlati oktatásban való felhasználás mellett az SBKU elméleti oktatása során is hasznos lehet. Ebben az

esetben a célfelhasználók mellett az oktatás többi résztvevője számára is támogatást nyújthat az SBKU alkalmazásában, a folyamatok és beavatkozások mélyebb megértésében, átlátásában, még akkor is, ha a hallgatók a termohidraulikai folyamatok ismeretében csak kevésse jártasak.

A BUTA segítséget ad a MAAP5-VVER számítógépi kód futtatásában, az eredmények kirajzolásában. A kód inputstruktúrájának ismerete nélkül megadhatók a kezdeti események és a beavatkozások, amelyekkel a BUTA futtatja a kódot, kiírja a legfontosabb események idejét, és kirajzolja az SBM jeleinek megfelelő paramétereket.

Irodalomjegyzék

- [1] Bognár Barnabás: *SBKU 2PR300 Súlyosbaleset-kezelési Útmutató (Operatív üzemeltetési kezelési utasítás)*. 0. verzió, 2019. 06. 20.
- [2] Mahdi Saghafi, Mohammad B. Ghofrani (2014): *Accident management support tools in nuclear power plants: A post-Fukushima review*, Progress in Nuclear Energy Volume 92, September 16, Pages 1-14