

Modellek és számítások a paksi atomerőmű környezetébe kerülő esetleges üzemzavari radionuklid kibocsátás meghatározására

Doktori (Ph.D.) értekezés

Nagy Attila

tanácsos

matematika-fizika-számítástechnika tanár



Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar
Környezettudományi Doktori Iskola

Iskolavezető:

Galács András egyetemi tanár

Környezetfizika program

Programvezető:

Ungár Tamás

készült a **Magyar Tudományos Akadémia
Energiatudományi Kutatóközpontban**



Témavezető:

Hózer Zoltán

tudományos főmunkatárs

Sugárvédelmi konzulens:

Deme Sándor

tudományos főmunkatárs

Budapest, 2013

Tartalom

| | |
|---|----|
| <i>Modellek és számítások a paksi atomerőmű környezetébe kerülő esetleges üzemzavari radionuklid kibocsátás meghatározására</i> | 1 |
| 1. <i>Bevezetés</i> | 3 |
| 2. <i>Irodalmi áttekintés</i> | 6 |
| 2.1. <i>A sugárzással kapcsolatos alapfogalmak</i> | 6 |
| 2.2. <i>Az ionizáló sugárzások a természetben</i> | 7 |
| 2.3. <i>A sugárzás hatása az élőlényekre</i> | 9 |
| 2.4. <i>A nukleáris energia szerepe a természetben</i> | 10 |
| 2.5. <i>Az atomerőművek általános bemutatása</i> | 11 |
| 2.6. <i>A konténmentek felépítése, működése, szerepe a nukleáris biztonságban</i> | 13 |
| 2.7. <i>Atomerőmű balesetek és tanulságaik a konténment szerepének szemszögéből</i> | 19 |
| 2.8. <i>A paksi hermetikus tér felépítése, működése, modellezése</i> | 22 |
| 2.9. <i>Atomerőmű - szimulátorok</i> | 27 |
| 2.10. <i>A VVER 440/213 típusú hermetikus tér számítógépes modellezése</i> | 29 |
| 2.11. <i>A VVER 440/213 típusú hermetikus tér kísérleti vizsgálatai</i> | 32 |
| 3. <i>A HERMET program fejlesztése</i> | 34 |
| 4. <i>A hermetikus tér fizikai modellje a HERMET kódban</i> | 37 |
| 4.1. <i>A modellnél alkalmazott feltételezések</i> | 38 |
| 4.2. <i>Alapegyenletek</i> | 39 |
| 4.3. <i>Nodalizáció</i> | 40 |
| 5. <i>A modellel végzett számítások</i> | 42 |
| 6. <i>A nódusok termohidraulikai állapotának számítása</i> | 48 |
| 6.1. <i>A HSTATE függvény vizsgálata</i> | 48 |
| 6.2. <i>A nódusparaméterek számítása új algoritmussal</i> | 57 |
| 7. <i>Kétfázisú falhővezetés modell</i> | 64 |
| 8. <i>A reaktorcsarnok modell, a környezeti kibocsátás becslése</i> | 72 |
| 8.1. <i>A hermetikus tér szivárgása</i> | 72 |
| 8.2. <i>A reaktorcsarnok fizikai modellje</i> | 74 |
| 8.3. <i>A 492 mm-es törés számítása</i> | 77 |
| 8.4. <i>A 111 mm-es törés számítása</i> | 78 |
| 8.5. <i>A 73 mm-es törés számítása</i> | 81 |
| 9. <i>Az üzemanyag sérülés kezdő időpontjának hatása a kibocsátásra</i> | 83 |
| 10. <i>Összefoglalás, tézispontok</i> | 88 |
| 11. <i>A témakörben publikált közlemények, előadások</i> | 89 |
| 12. <i>Irodalomjegyzék</i> | 90 |
| 12. <i>Köszönetnyilvánítás</i> | 94 |
| 13. <i>Kivonat</i> | 95 |
| 14. <i>Abstract</i> | 96 |

1. BEVEZETÉS

Az atomerőművekben működésük során szükségszerűen radioaktív anyagok keletkeznek, amelyek potenciális veszélyt jelenthetnek a környezetre. Az erőmű több védelmi gáttal is rendelkezik a környezeti kibocsátás megakadályozására, illetve csökkentésére. Üzemzavari állapotokban a belső védelmi gátak megsérülhetnek, ilyenkor a hermetikus tér jelenti az utolsó gátat a környezet felé. Az erőműből kikerülő radioaktív anyagok mennyiségének és összetételének meghatározásához számítógépes kódok segítségével részletesen modellezni kell a reaktort körülvevő hermetikus térben lejátszódó folyamatokat.

A jelen dolgozat elkészítéséhez végzett munkám alapvető célja az volt, hogy – az MTA EK-ban korábban létrehozott számítógépes programok továbbfejlesztésével – olyan fizikailag korrekt modelleket hozzak létre, amelyek segítségével a paksi atomerőmű bizonyos üzemzavarai esetén a lehető legpontosabb prognózis adható a környezeti terhelésre.

A téma ilyen módon való megvalósításának a fontosságát több szempont adja:

- Az atomenergia biztonságosabbá tételéhez fontos tudnunk azt, hogy milyen eseményekre, fizikai körülményekre kell az erőmű tervezésénél, üzemeltetésénél felkészülni, és ezeknek milyen következményi lehetnek a környezetre.
- Az hogy saját magunk készített alkalmazást használunk azzal az előnnyel jár, hogy a program fejlesztése közben sokkal mélyebb tudásra tehetünk szert. A szimuláció összes folyamatát részletesen ismernünk kell. Pontosabban ismerjük a modellek korlátait, esetleges új igény felmerülése esetén bele tudunk avatkozni a programba.
- A személyes motivációt az jelentette, hogy érdekelnek a fizikai folyamatok számítógépes szimulációi. Akkor lehet ilyen programokat jól írni, ha a folyamat fizikáját jól értjük, és a programozás alapjait is elsajátítottuk. A számítástechnikai szakon készített diplomamunkám is fizikai szimuláció volt, igaz, az teljesen más jellegű, geometriai optikával foglalkozott.

Kiindulásnak az intézetünkben írt HERMET programot használtam. Ez egy hermetikus teret modellező eszköz. Ennek a programnak a főbb fizikai modelljeit vizsgáltam meg, és ahol a fizikai modellek részletesebb leírása, vagy a jelenlegi számítástechnikai lehetőségek indokolták, az eredeti modelleket továbbfejlesztettem, vagy új modellt hoztam létre.. A HERMET program a hermetikus tér faláig modellez, így ki kellett egészítenem további modellel a környezet irányába.

Az általam létrehozott, vagy javított fizikai modellek a dolgozat írásának idején a meglehetősen különböző állapotban vannak.

A reaktorcsarnok-modellt nemzetközi folyóiratban publikáltam, az új gőz-víz-levegő állapotot számoló algoritmust nemzetközileg jegyzett programmal verifikáltam, de van olyan modell – pl. a

falak hővezetését számoló – amely működésnek alapötlete megvan, a modell működik, de ebben a pillanatban még a validációja idő hiányában nem történt meg.

Léteznek külön számoló terjedési modellek (ilyen pl. a környezeti terjedést szimuláló COSYMA), de szerintem az óriási előny lenne, ha egy integrált sokszínű paraméterezzhető program valósulna meg, ami képes a radioaktív anyagok útját végig követni a fűtőelemből a primerköri vízbe történő kiszivárgásuk után a hermetikus térbe, onnan a reaktorcsarnokba, majd a kéményen keresztül a környezetbe. Egy ilyen alkalmazás használata esetén jobban lehetne vizsgálni a különböző eseteket anélkül, hogy a különböző programok input/output fájlainak rejtjelmei vinnék el a programot használó kutató idejét, illetve jól alkalmazható lenne egy baleseti szimulátorban. A dolgozat elején irodalmi áttekintést is nyújtok az alábbi témakörökről:

- A sugárzás és a nukleáris energia alapfogalmairól, ezeknek a környezettel és a civilizációval való kapcsolatáról.
- Az atomerőművek működésének alapjairól, és a technológia környezetvédelmi jelentőségéről.
- Az atomerőművek esetleges üzemzavarának esetén működésbe lépő berendezésekről, ezek működéséről.
- A jelentős atomerőműi balesetokről
- Ismertetem a paksi atomerőmű védelmi berendezéseinek működését, az ezekkel kapcsolatos modellező, és kísérleti munkákat.

Az irodalmi áttekintés után a HERMET program létrejöttét, tulajdonságait, képességeit és fejlődését tárgyalom. A HERMET program korábbi alkalmazásai nem mindig voltak összhangban az amerikai fejlesztésű, a paksi VVER-440 típusú erőmű konténmentjét modellező validált CONTAIN számításokkal. Ennek a problémának a kezelésére történtek erőfeszítések az intézetben, de akkor ezt szerintem inkább számítástechnikai problémaként kezelték.

A doktori munkámban azt a megközelítést használtam, hogy a HERMET program egyes fizikai modelljeit vizsgálom és ezeknek a működését hasonlítom egy elfogadott programhoz (vagy más módon ismert eredményhez, pl. gőztáblázatokhoz), lehetőleg úgy hogy az éppen aktuálisan vizsgált modell magában működjön.

A saját eredményeket a modellel végzett számításokkal foglalkozó fejezet nyitja. Erre a munkára feltétlen szükség volt két okból is:

- A program tanulmányozásán keresztül jobban megismertem a hermetikus tér felépítését, funkcióit, az ott levő biztonsági berendezéseket, és azok működését. Az is világossá vált, hogy többnyire termodinamikai modellekkel kell dolgoznom, így ez irányú ismereteimet mélyítenem kellett [4][5][6].
- A program futtatás során információkat kaptam a program működéséről, arról, hogy mennyire képes részleteiben modellezni a fellépő fizikai jelenségeket. Igyekeztem a program olyan

területeit is vizsgálni, ami a biztonsági elemzéseknél nincsen a fókuszban, pl. a tálca vízszintje, falhővezetés, vízfilm-képződés.

Ezután a gőz-víz-levegő állapotot számoló függvényt vizsgáltam részletesen, a gőztáblázatokhoz hasonlítva. A felmerült problémák miatt új algoritmust dolgoztam ki, melyet egy nódusos rendszeren CONTAIN eredményekhez hasonlítok.

Ezen vizsgálatok közben derült ki, hogy a HERMET nem számolja a térfogati munkát, ennek számítására is eljárást készítettem, amit ugyancsak a CONTAIN futásokhoz hasonlítottam.

A következő vizsgált modell a falak hővezetésének számítása . Itt is találtam problémákat, ezeket javítottam. Az akkori számítástechnikai körülmények miatt használt durva és ugyanakkor nem egyszerű fal-nodalizációt is megváltoztattam. Az új falmodell egyszerűbb, mint a régi, és pontosabban képes modellezni a falakat érő energiahatásokat és képes két fázissal működni.

A reaktorcsarnok modell kiegészítése a HERMET programnak, itt a hermetikus térből történő szivárgásokat vizsgáltam, a következő jelenségek figyelembe vételével:

- a hermetikus téren kívüli erőművi helyiségek puffer hatása,
- az ezekben történő radioaktív bomlás,
- a szellőzés, a légcsere hatása,
- az aeroszol szűrés.

A reaktorcsarnok modell felhasználásával megvizsgáltam, hogy az üzemanyag sérülés bekövetkezésének kezdő ideje milyen hatással van a kibocsátásra. Ennek jelentőségét az adja, hogy a hermetikus térben nem feltétlenül akkor sok az üzemanyagból kikerülő hasadási termék, amikor a környezet felé való szivárgás feltételei adottak.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A sugárzással kapcsolatos alapfogalmak

Az ionizáló (köznyelven: inkább radioaktív) sugárzást az emberek többsége egyértelműen a káros, kerülendő, veszélyes dolgok közé sorolja.

A kép ennél a valóságban sokkal árnyaltabb, elég csak az orvosi diagnosztikai és a gyógyító eljárásokra gondolni. Az ionizáló sugárzások jelen voltak az élet kialakulásánál, valószínűsíthető hogy az élet mai formáinak kialakulásában fontos szerepük volt. A mai életünkben betöltött szerepük is indokolja, hogy minél tisztább, valósághűbb képünk legyen róluk.

Először is szeretnék tisztázni pár alapfogalmat.

Sugárzásnak nevezzük az energia-átadás olyan speciális formáját, melyben az energia a kibocsátó testtől távoli pontban is megjelenhet. Ehhez a kölcsönhatáshoz nem kell közvetlen kapcsolat a testek között. A sugárzást kísérheti tömegáramlás is, de történhet tömegáramlás nélkül is.

Nézzünk pár példát, hogy megvilágítsam a folyamatot.

Ha a tűzoltó a csövön nagy nyomású vizet enged ki, akkor – ahogy a köznyelv is sugárnak hívja - a vízsugár a vizet és a magával vitt mozgási energiát jelenti. Itt a víz 'viz' magával energiát.

Ha hangsugárzásról beszélünk, akkor az energia átvitel valamilyen rugalmas közeg deformációjának a tovaterjedését jelenti, itt az az érdekes helyzet van, hogy bár a közeg feltétlen szükséges a terjedéshez, maga a közeg mozgása (szilárd közegben) akár merőleges is lehet az energia áramlás irányára.

A fény, mint sugárzás felfogható tisztán energiaáramlásnak, nem szükséges hozzá semmilyen közeg, és nem áramlik vagy mozog semmilyen tömeg.

Tehát a sugárzást felfoghatjuk valamilyen módon távolról kapott energiának.

Az atomfizikában megkülönböztetünk részecske és elektromágneses rezgések útján tovaterjedő sugárzásokat. A részecske sugárzások a fenti példák közül inkább a tűzoltócsöves példára hasonlítanak, itt a sugárzást a benne résztvevő részecskék típusával, energiájával jellemezhetjük (pl. elektronsugár). Az elektromágneses sugárzásokat jellemezhetjük az energiájukkal, frekvenciájukkal. Ilyen sugárzás maga a fény is, ennek kisebb energiájú fajtáit nevezzük infravörös sugárzásnak vagy hőszugárzásnak, a láthatónál nagyobb energiát képviselő megjelenéseit röntgen (forrása az elektron mozgásállapot változása), vagy gamma-sugárzásnak (forrása az atommagban játszódó folyamatok).

Most már van valamilyen képünk arról, hogy mit jelent az, hogy sugárzás, de vízsugarat vagy a hangsugárzást nem érezzük veszélyesnek (bár lehetnek azok), a radioaktív (helyesebben ionizáló) sugárzást viszont nagyon veszélyesnek érezzük. Mi lehet ennek a vélekedésnek az alapja ?

A magyarázatot az ionizációban kell keresnünk.

Az atomok egyszerű modelljében [7] a pozitív töltésű atommag körül mozognak a negatív töltésű elektronok. Ugyanannyi pozitív töltés van az atommagban, mint ahány negatív elektron kering körülötte, vagyis az egész atom kifelé semleges.

Az ionizálás azt jelenti, hogy ezt az egyensúlyt megbontjuk, vagyis valamelyik fajta töltésből több lesz. Az ionizált anyag sok szempontból másképpen viselkedik már azon egyszerű oknál fogva is, hogy töltéssel rendelkezik, mozgásba jöhet elektromos tér hatására, kémiai tulajdonságai is változhatnak. Tehát, ha ionizálunk egy anyagot sugárzással, akkor egy távolról érkező hatás az anyagban lényeges módosulásokat okozhat. Tágabb értelemben minden olyan sugárzást, amely képes részecskét kiszakítani egy atomból vagy molekulából ionizáló sugárzásnak hívunk.

Az a tény, hogy az ilyen fajta (ionizáló) sugárzás azonnal jelentős változást okozhat a sugárzást elnyelő szövetben, és hogy az ilyen fajta sugárzásra az embereknek nincsen érzékszerve (a hatás pillanatában észre se vesszük a sugárzást, csak az esetleges hatásait bizonyos idő elteltével) magyarázhatja azt a félelmet, amit az efféle sugárzás fajták keltenek.

A meglévő ellenérzéseket fokozhatja, hogy az ionizáló sugárzások szöveggörnyezetében gyakran szereplő *nukleáris* szó szörnyű erejű tömegpusztító fegyverekkel forrt össze a hidegháború évei alatt.

Sok ember úgy tekint erre a területre, mintha ez egy teljesen mesterséges, természetén kívüli jelenség lenne, ami csak a kárunkra válhat. Néhány bekezdésben szeretném bemutatni, hogy ezek a félelmek eltúlzottak, és hogy az ionizáló sugárzások, valamint a nukleáris energia a természet szerves része..

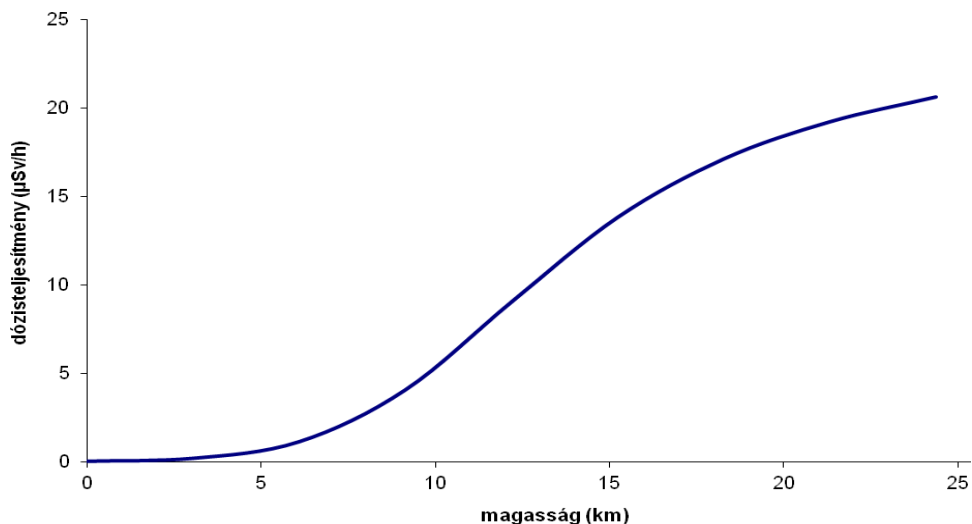
2.2. Az ionizáló sugárzások a természetben

A természetben két forrásból kapunk ionizáló sugárzásokat: világból és a földben levő radioaktív elemekből. [10]

Az űr felől érkező sugárzás részben a napból, részben a galaxisból jön, nagy energiájú (tipikus energiatartomány 1 MeV - 1 GeV) részecskék formájában, amelyeknek nagy része a légkörrel kerül kölcsönhatásba. A sugárzás többféle részecskéből állhat, de akár lehetnek nagy energiájú gamma-sugarak is. A leggyakoribb részecskék protonok és a hélium atommagok.

E sugárzás hatására különféle radioaktív izotópok keletkeznek a légkörben, ilyen például a ^{14}C izotóp (felezési idő 5730 év). A ^{14}C egyensúlyban van, vagyis a mennyisége a földön előforduló szén atomok között arányaiban közel állandó ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C} \approx 1,7 \cdot 10^{-12}$). Ez a jelenség azt teszi lehetővé, hogy leletekben, geológiai mintákon, ahol a szén atomok nem tudnak cserélődni, ennek az aránynak a megváltozásából kormeghatározást lehet végezni, mivel a ^{14}C folyamatosan bomlik, a $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ arány változik. A kozmikus sugárzás létrehoz még a légkörben tríciumot és egyéb radioaktív elemeket is.

A kozmikus sugárzás által keltett dózisteljesítmény a magassággal növekszik: egy több kilométer magasságban végrehajtott repülőutazás jelentős többlet dózist okoz (1. ábra).



1. ábra. A kozmikus sugárzásból származó dózteljesítmény a magasság függvényében, a tengerszinten a kozmikus eredetű dózis 0,04 µSv/h [8].

1. táblázat. A természetes és mesterséges eredetű sugárterhelések és források t a világban és két iparilag fejlett országban (2008-2009) [9].

| A sugárzás forrása | Világ [11] | USA [12] | Japán [13] | Megjegyzés |
|---|------------|----------|------------|--|
| Belégzés | 1,26 | 2,28 | 0,4 | Főleg radonból az épülettől függően |
| Étel és vízfogyasztás | 0,29 | 0,28 | 0,4 | (K-40, C-14, stb..) |
| A földkérgi sugárzás | 0,48 | 0,21 | 0,4 | A talajtól és az építési anyagoktól függ |
| A kozmikus sugárzás | 0,39 | 0,33 | 0,3 | Magasságfüggő |
| Összes természetes eredetű | 2,4 | 3,1 | 1,5 | Jelentős társadalmi csoportok 10-20 mSv-et kapnak |
| Orvosi eredetű | 0,6 | 3 | 2,3 | A sugárterápiát nem tartalmazza |
| Fogyasztási cikkek | - | 0,13 | | Dohányzás, repülés, építőanyagok, stb., |
| Légköri nukleáris fegyver kísérletek | 0,005 | - | 0,01 | A csúcs érték 1963-ban volt (0,11 mSv) azóta csökken, a kísérleti területeken magasabb |
| Foglalkozásból eredő (többnyire egészségügyi és légi közlekedési alkalmazottak) | 0,005 | 0,005 | 0,01 | A világátlag az összes dolgozóra 0,7 mSv, többnyire a radon a bányákban |
| Csernobili baleset | 0,002 | - | 0,01 | A csúcs érték 0,04 mSv 1986-ban, azóta csökken, a helyszínen magasabb |
| Nukleáris üzemanyagciklus | 0,0002 | | 0,001 | A maximuma 0,02 mSv a helyszínekhez közel |
| Egyéb | - | 0,003 | | Ipari, biztonsági, orvosi, oktatási, és kutatási forrásokból |
| Összes mesterséges eredetű | 0,61 | 3,14 | 2,33 | |
| Összesen | 3,01 | 6,24 | 3,83 | mSv/év |

A természetes sugárzás másik forrása a Föld anyagában van. Ezek forrása többnyire az olyan hosszú felezési idejű izotópok, amelyek jelen voltak a Föld kialakulásánál, de még nem volt 'idejük'

elbomlani, mert a felezési idejük összemérhető a Föld korával. Ezek az elemek az urán, a tórium és kálium 40-es tömegszámú természetes izotópja. Az urán és a tórium nem túl gyakori elem, általában a Föld mélyén vannak, így a hatásuk nagyrészt, nem közvetlenül, hanem a radon nevű nemesgáz bomlástermékük révén érvényesül. Ez a gáz szivárog ki a talajból, vizekből, és okoz terhelést a bioszféra számára, az élő szervezetbe elsősorban légzéssel bejutva. A kálium fontos építőköve az emberi szervezetnek, ezért a természetes ^{40}K izotóp belső terhelést okozhat.

A sugárzás által keltett biológiai hatás, a tapasztalatok szerint, a besugárzott anyag által elnyelt energiától és a szervek sugárzási érzékenységétől függ. Az ezt leíró mennyiséget, egyenérték dózissnak nevezzük, mértékegysége a Sievert (Sv). Ha mérjük, akkor csak az aktuális időpontra érvényes értéket tudjuk megállapítani, ezt a mennyiséget dózisteljesítménynek hívjuk, szokásos mértékegysége a Sv/h. Az 1. táblázat összefoglalja a természetes és mesterséges eredetű sugárterheléseket. Látható hogy a világban a mesterséges forrásból való terhelés csak negyede a természetesnek, a fejlett országok mesterséges terhelését nagyrészt az orvosi – tehát az egyén érdekét szolgáló – alkalmazás okozza.

2.3. A sugárzás hatása az élőlényekre

Az élő szervezetekre a sugárzás kétféle hatásmechanizmusát különböztetjük meg: a determinisztikus és a sztochasztikus hatást.

Az első esetben a sugárzás és a biológiai hatás egyértelműen összeköthető, a sugárzás megtörténte után rövid idővel jelentkeznek, ez a fajta hatás egyértelmű tüneteket okoz (sugárbetegség), rendelkezik küszöbdózissal, ami alatt nincs ilyen hatás.

A sztochasztikus hatás egy, az időben később keletkező hatás, amely csak statisztikai módszerekkel mutatható ki, az okozott tünetek nem sugár specifikusak, tehát egyedi esetben lehetetlen megmondani, hogy mi okozta a tünetet. Ma azt feltételezzük, hogy a sztochasztikus hatásnál nincs küszöbdózis.

A hirtelen nagy dózissal sugárzás egyértelmű hatásokkal rendelkezik az emberek esetében is, ezt tudjuk az atombomba robbantások áldozataival történelemből és a nagy dózissal járó balesetekből is. Ezeknél az eseteknél azonban az áldozatok a háttérsugárzásnál több nagyságrenddel nagyobb sugárzást kaptak hosszabb-rövidebb ideig.

A háttérsugárzástól nem ilyen nagymértékben eltérő intenzitású sugárzások esetén nem ennyire egyértelmű a helyzet. A földön vannak helyek, ahol a háttérsugárzás jelentősen nagyobb mint a Föld átlaga, és az élővilágon nem mutatható ki semmilyen károsodás, változás. Ilyen hely pl. az Iráni Ramsar [17], ahol a háttérsugárzás a szokásosnak 50-200-szorosa, és a helyi lakosságon nem mutatható káros hatás (pl. a tüdőrák esetek gyakoriságának növekedése), ami azt valószínűsíti, hogy az emberek bizonyos határok között képesek alkalmazkodni a sugárzáshoz. Amely talán nem meglepő

annak tudatában, hogy az élet kialakulásánál is jelen volt sugárzás, ami jóval nagyobb volt mint manapság, mivel a lassan bomló izotópokból több volt jelen abban az időben.

Azt sem szabad elfelejtenünk, hogy a fajok fejlődését, az evolúció ma már tudományos tényként elfogadott elmélete szerint, a mutációk segítették, a mutációknak az egyik okozója pedig éppen a sugárzás lehet, vagyis a fajok kifermálásában is szerepe volt a sugárzásnak.

2.4. A nukleáris energia szerepe a természetben

A környezetünkre leginkább ható nukleáris energiaforrás a Nap. Az energiaforrása egy nukleáris folyamat, amelyben hidrogén atommagok egyesülnek héliummá. Ez nagyon tiszta, hulladékmentes formája az energiatermelésnek, sajnos ezt a folyamatot a földön még nem sikerült energiatermelésre fordítani.

A földön felhasznált energia túlnyomórésze közvetve nukleáris eredetű, ugyanis a fosszilis típusú energiák lényegében a sok évvel ezelőtti napenergiát tárolják, a növényvilág az éghető anyagok 'előállításához' a napenergiát használta, amelyet kémiai formában tárolt sok ezer évig.

A földön a víz mozgása is nagyrészt a napenergiájára vezethető vissza – a nap energiája párologtatja el – és ezzel mozgatja a föld vizeit, bár a föld vizeinek mozgatásánál a hold gravitációs hatása is jelentős. A szélenergia is a napsugárzás okozta hőmérséklet különbségekből adódó nyomás eltérésekből keletkezik.

A Föld belseje mai tudásunk szerint a nukleáris bomlások miatt is termel hőt, ami azt is okozza, hogy a középső szilárd mag mellett a föld rendelkezik egy folyékony vasból álló réteggel, aminek a megléte és mozgása felel a Föld mágneses teréért, amely jelentős mértékben véd a kozmikus sugárzás ellen. Ha ez nem lenne, akkor a Földet sokkal nagyobb intenzitású sugárzás érné a világűrből.

Afrikában – Gabon területén – kutatók olyan helyeket találtak [14], ahol helyi urán dúsulások elérhették a kritikusságot (n számú hasadásnál keletkezett neutron n számú hasadást okoz, vagyis a láncreakció fent maradhat külső neutronforrás nélkül). Több millió évvel ezelőtt, amikor még a hasadásra képebb, de rövidebb felezési idejű urán 235-ös izotóp aránya nagyobb volt a 238-as izotóphoz képest (ez az arány ma csak 0,7%). A helyszínen levő talajvíz volt a moderátor (moderátor egy olyan anyag, amely a neutronokat lassítja, mivel a bomlásnál keletkező neutronok túl gyorsak ahhoz hogy újabb bomlást indukáljanak), amikor a melegezés miatt a víz elpárologott, a kritikusság a moderálás elégtelensége miatt megszűnt, és a láncreakció leállt, a víz esetleges visszaszivárgása, lehűlése után megint létrejöhetett a láncreakció feltétele. Ezek a reaktorok a feltételezések szerint sok évig periodikusan működhettek.

A bemutatott példákból látszik, hogy a nukleáris energia ugyanolyan természetes része a környezetünknek, mint akármelyik másik energiaforrás.

2.5. Az atomerőművek általános bemutatása

Az atomerőművek ma a környezetbarát (2. táblázat) energiatermelés fontos eszközei. Normál üzemi körülmények között nincs semmilyen káros hatása a környezetre (kevesebb radioaktív anyagot bocsát ki, mint egy szénerőmű), csak néhány tonna üzemanyagra van szüksége évente (1 kg uránnal annyi energiát lehet termelni, mint 200 tonna szénnel), nem szükséges semmilyen különleges természeti feltétel. Hátránya az egyszeri nagy beruházási költség, és a kiégett üzemanyagok tárolása miatt fellépő társadalmi feszültségek. A tárolás műszakilag általában nem okoz problémát.

2. táblázat. Egy 500 MW teljesítményű erőmű környezeti hatása különböző energiatermelési módszerek esetén [15]

| Kéménykibocsátás, t/év | Fosszilis tüzelőanyagú erőmű | | | Nukleáris erőmű |
|--|------------------------------|---|-------------------------|--|
| | olaj | szén | Gáz | |
| CO ₂ | 750000 | 938000 | 600000 | 0 |
| SO ₂ | 4625 | 1875 | 12.5 | 0 |
| NO _x | 1875 | 2500 | 1000 | 0 |
| Nehézfémek | 18,75 | 2,5 | 0 | 0 |
| Radioaktív hatás | változó, néha magas | Gyakran magasabb a természetes háttérszintnél | Gyenge radon kibocsátás | Kisebb a természetes szint 1/1000-énél |
| Hamu, t/év | 310 | 25000-600000 | 50 | 0 |
| Üzemanyag szállítás, t/év | 230000 | 360000 | 250 | 10-15 |
| Nagy aktivitású hulladék, m ³ /év | 0 | 0 | 0 | 1-5 |

A mai fejlett országokban óriási az energiaéhség, s az is látszik, hogy egy társadalom fejlettsége és energia felhasználása között szoros korreláció van. Ha egy ország fejlődni akar, akkor mindenképpen gondoskodni kell a fejlődés energiaigényének kielégítéséről.

Egy energiatípus hasznosíthatóságát nemcsak annak mennyisége befolyásolja, hanem a koncentráltasága és rendelkezésre állása is. Ha végigtekintünk a mai jelentősebb energiatermelési folyamatokon a következőket tapasztaljuk:

- A napenergia rendelkezésre állása bizonytalan, energiasűrűsége közepes
- A szélenergia rendelkezésre állása bizonytalan, energia sűrűsége csekély.
- A vízenergia rendelkezésre állása megfelelő, energia sűrűsége (víz mozgási energiája) közepes.
- A fosszilis energiák ebből a két szempontból sokkal előnyösebbek, viszont környezetvédelmi szempontból kifogásolhatóak, sok hulladékot termelnek, és a légkört üvegházhatású gázokkal szennyezik, nagy mennyiségű anyag mozgatását (sokszor bányászását) kívánják, ami nem mindig van környezetvédelmi szempontból jól megoldva.

- Ezekkel szemben az atomenergia tudja nyújtani a legnagyobb energiakonzentrációt és a rendelkezésre állása is kiváló. Mivel az atomenergiánál van a legnagyobb energiasűrűség, ez azzal is jár hogy itt kell a legfejlettebb technológia a szabályzására valamint a fejlődő hő elvezetésére.

Ha az energiatermelési módok kockázatait nézzük, ott is gyengén teljesítenek a fosszilis energiahordozókat használó erőművek. A 3. táblázatban 1000 MW·év elektromos energiát előállító erőművek által okozott halálos, vagy egészségkárosodással járó esetek adatai láthatóak. Az erőművek kiszolgáltatásával járó szállítás baleseteit és a lakosságra ható egyéb következményeket is tartalmazza a táblázat. A fosszilis tüzelőanyagok bányászása veszélyes folyamat, aminek rendszeresen vannak áldozatai, gondoljunk csak a bányabalesetekre. A légkörbe kerülő anyagok hosszútávon jelentős egészségügyi, és környezeti (savas eső) károkat okoznak, és jelentős radioaktív szennyezést is okozhatnak.

Itt azt is meg kell említeni, hogy a nukleáris a legfiatalabb olyan energiatermelési mód mely nagy koncentrátságú energiát használ, így itt volt a legkevesebb idő a biztonság fejlesztésére, amelyhez a működési tapasztalat elengedhetetlen.

Felmerül a hasonlóság a repülés történetével, amely a korai időkben áldozatokat követelt, de ma a legbiztonságosabb, legfejlettebb utazási mód. Valószínűleg ilyen összetett technológiák kialakulásnak velejárója az, hogy eleinte történnek balesetek, melyek aztán a technológia tovább fejlődését ösztönözhetik.

3. táblázat. Átlagos kockázat 1000 MW·év elektromos energia termelésnél [15]

| Energiaforrás | Haláleset | Ember-nap veszteség |
|-----------------|-----------|---------------------|
| Szén | 40 | 1000 |
| Olaj | 10 | 400 |
| Nukleáris | 1 | 8 |
| Földgáz | 0,3 | 3 |
| Vízenergia | 3 | 40 |
| Szélenergia | 5 | 70 |
| Metilalkohol | 20 | 160 |
| Napenergia | Űrojektum | 8 |
| | Termikus | 5 |
| | Napelem | 5 |
| Óceán, termikus | 2 | 25 |

Az energiatermelési folyamat vége egy atomerőműnél (vízmelegítés, turbina, generátor) nem különbözik lényegesen a hagyományos energiatermelő erőművektől. Ami lényeges különbség, hogy a hőenergia forrása nukleáris. Sokféle hűtőközegű reaktor létezik az energiatermelő reaktorok ma még

többnyire vízhűtéssel működnek (néhány kivétel: BN-600 – nátriumhűtés, Magnox – gáz hűtés), a hűtővíz lehet nehézvíz is (CANDU).

A vízhűtésű reaktorokon belül két csoportot különböztetünk meg, a nyomottvizes és a forraló vizes reaktorokat.

A nyomottvizes reaktor azt jelenti, hogy a víz olyan nagy nyomáson van, hogy ne forrjon fel, ebből adódóan tökéletesebben tudja a hőenergiát elszállítani a fűtőelemekből, ezzel kevésbé terheli azokat. A nyomottvizes reaktoroknál azt mérlegelik, hogy lehet minél magasabb hőmérsékleten járítani a reaktort úgy, hogy közben a nyomás olyan nagy legyen, hogy ne forrjon fel a víz. A magas hőmérséklet a hatásfok növelése miatt fontos (egy hőerőgép hatásfoka a belépő és kilépő közeg hőmérséklet különbségétől függ, minél nagyobb ez a különbség annál nagyobb a hatásfok). A hőmérséklet emelésének az szab gátat, hogy egyre nagyobb nyomás szükséges ahhoz, hogy a víz ne forrjon fel. A turbinákhoz szükséges gőzt egy hőcserélőn keresztül állítják elő.

A forralóvizes reaktorok ezzel szemben közvetlenül állítják elő a turbinákhoz szükséges gőzt, ennek az előnye az, hogy nem kell hőcserélő, hátránya, hogy az enyhén radioaktív primerkörü vízből képződött gőz hajtja meg a turbinákat, ezért a turbinákat is sugárvédelemmel kell ellátni.

A neutronok lassítására használt moderátor közeg a mai erőművekben többnyire víz, de létezik nehézvíz moderátoros és grafit moderátoros energiatermelő reaktor is.

Az atomerőművekkel kapcsolatban a két fő kifogás, hogy radioaktív hulladékot termelnek, és hogy baleset esetén nagy környezeti károkozás történhet.

A kiegészített üzemanyag elhelyezése műszakilag megoldható. Magyarországon is vannak olyan helyek, amelyek nagyon stabil hosszú idejű tárolásra alkalmasak. Ilyen például a Nyugat-Mecsekben található Bodai Agyagkő Formáció. Itt olyan konténerekben lehet tárolni ezeket az anyagokat, amelyek számítások szerint 10000 évig tudják szivárgásmentesen tárolni a veszélyes anyagokat, amellett hogy az ottani agyag visszatartó képessége is jelentős.

A kiegészített üzemanyag hasznosítása is lehet megoldás, ebben az irányban valószínűleg nagy fejlődés előtt állunk.

A környezeti kibocsátás elhárítására szolgáló konténmentről részletesebben írok az alábbiakban.

2.6. A konténmentek felépítése, működése, szerepe a nukleáris biztonságban

A környezetbe kerülés ellen az atomerőművek mélységi védelemmel rendelkeznek, az első védvonal a fűtőelem (az üzemanyag-mátrix visszatartja az aktivitás több, mint 98%-át) és annak tokozása, ezt követi a primerkör, az utolsó védelmi gát pedig a konténment.

A fejlett nyugati országokban korábban felismerték a konténmentek jelentőségét, és csak úgy engedték az atomerőművek építését, hogy a reaktor és a primerkör konténment épületben legyenek.

Sajnos az orosz típusoknál később jött ez a felismerés, így történhetett, hogy konténment nélküli atomerőművek létesültek, ilyen volt pl. a csernobili RBKM típusú erőmű is.

Konténmentnek nevezzük azt a robusztus vasbeton épületet, ami arra szolgál, hogy bármely tervezett üzemállapot esetén megakadályozza, hogy a környezetbe radioaktív szennyezés kerüljön, illetve ha ez nem lehetséges, a kikerülést minimalizálja.

A konténment üzemzavar esetén lokalizálja az esetlegesen a primerkörből kikerülő anyagokat, ezt hűtéssel, kondenzációval, nyomáscsökkentéssel és a hermetikusság lehető legnagyobb fokának fenntartásával éri el.

További elvárás a konténmentektől, hogy külső behatás ellen is védjék az erőmű berendezéseit, ilyen lehet extrém időjárási körülmények fennállása, terrorista vagy katonai támadás, földrengés, tűzvész, repülőgép rázuhanás.

Ellát sugárvédelmi funkciót is, a bent lévő aktivitás által kibocsátott ionizáló sugárzást a konténment általában 1 métert is meghaladó beton fala jelentősen legyengíti.

Normál üzem esetén a konténment funkciója egyszerűen a technológia berendezések befogadása, zavarmentes működésükhöz való környezet biztosítása, a termelt hő elvonása, az üzemi hőmérséklet biztosítása.

Fontos, hogy a konténment egyszerre legyen tömör, kevésbé szivárgó, de adott esetben hozzáférést is tudjon biztosítani.

Ha egy konténment típus jóságát akarjuk vizsgálni, akkor több szempontot kell értékelnünk. Az egyik ilyen a szivárgás mértéke.

A konténmentek több tíz méter magas és átmérőjű épületek, amelyeknél hozzáférést és szellőzést is kell biztosítani, így a tökéletes hermetikusság elérése nem lehetséges. A konténmentek bizonyos túlnyomásra vannak méretezve, a mérvadó szivárgási adatot akkor kapjuk meg, ha azt vizsgáljuk, hogy a maximális tervezési túlnyomás mellett a bent levő légnemű anyag hány százaléka szivárog ki. Ez konténment típusonként különböző szám lehet. Hangsúlyozni kell, hogy ezek a maximális nyomás egynapos fennállása esetén érvényes számok. A valóságban egy üzemzavar nem tud egy helyesen méretezett és jól működő konténment esetén a tervezettnél nagyobb nyomást elérni, és ez az atmoszferikus nyomást jóval meghaladó tervezett nyomás is csak korlátozott ideig áll fent.

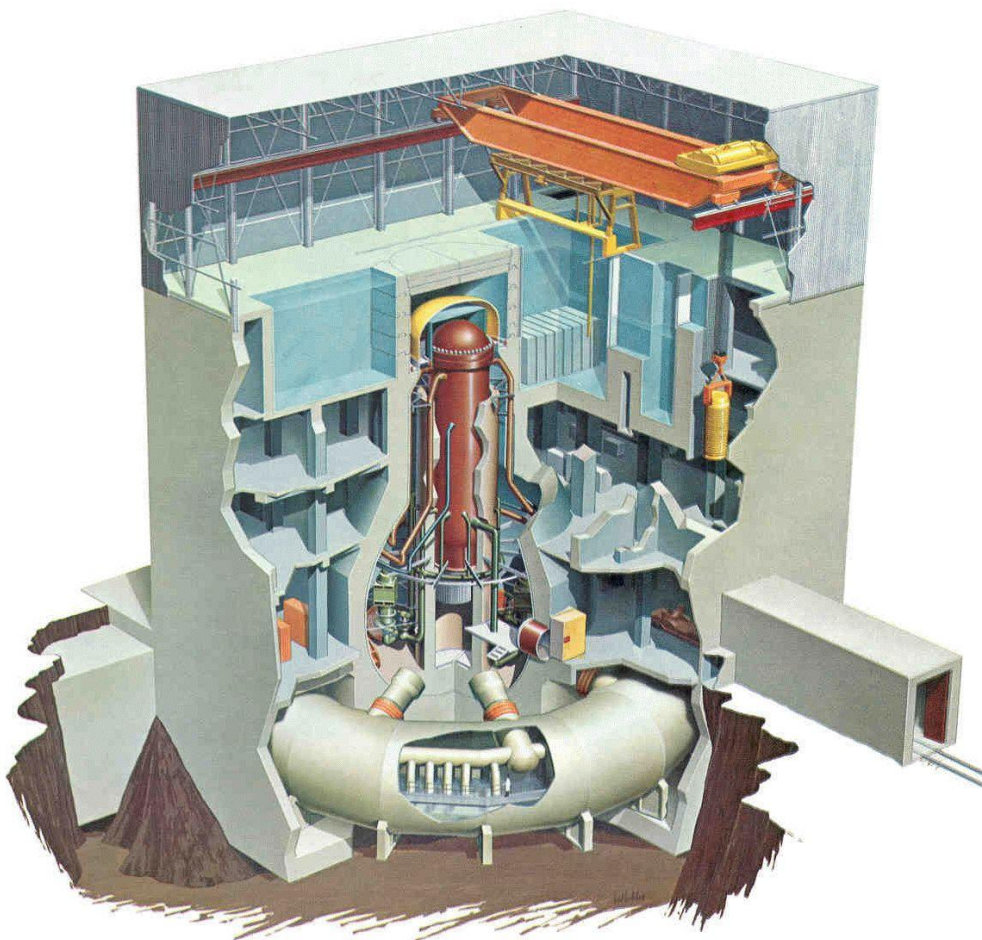
Fontos szempont, hogy semmilyen csővezeték ne menjen úgy ki a konténmentből, hogy azon radioaktivitás juthasson ki a környezetbe anélkül, hogy a konténment rendszerei azt észlelnék.

Lényeges, hogy a konténment biztosítani tudja a lakosságra és a személyzetre vonatkozó sugárvédelmi korlátok betartását.

A konténmentnek kezelni kell tudni az esetleges robbanásveszélyes gázok keletkezését, ezt a veszélyt megfelelő katalitikus folyamatok segítségével semlegesítenie kell.

A radioizotópokat esetleges zóna és reaktortartály olvadásnál sem szabad kiengednie. A konténmentet az illető primerkör lehető legnagyobb közegkiáramlásával járó üzemzavarára kell méretezni.

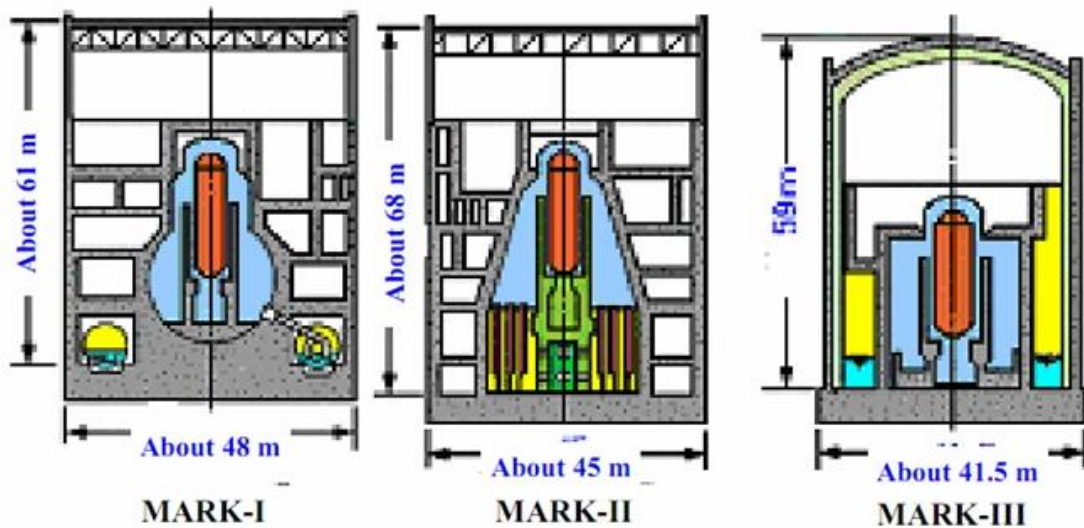
A régebbi erőműveket tervezési balesetre méretezték, ami gyakorlatban a legnagyobb csőtöréses üzemzavart jelenti (LOCA - Loss Of Coolant Accident: hűtőközegvesztéses baleset), a maiakat súlyos balesetre tervezik (el kell viselniük egy fukushimai jellegű balesetet), a régebbi erőműveket pedig átalakítják, hogy a súlyos baleseteket is tudják kezelni (H₂ égető, szűrt leeresztés).



2. ábra. BWR Mark 1-es konténment, ilyen típus van Fukushimában [16]

A nyomottvizes reaktorok esetén a konténment tartalmazza a gőzfejlesztőket és a térfogat kompenzátort is. A nyomott vizes konténmentek tipikusan nagyobbak, mint a forralóvizesek, hogy legyen térfogattartalék, ahova az esetlegesen kiszabadult primerköri víz kerülhet anélkül, hogy konténment sérülést eredményező nyomás alakulna ki. A konténmentek a jó nyomás/feszültség tűrés miatt henger vagy gömb alakúak, esetleg e két alakból vannak összeállítva.

A forralóvizes konténmentek kisebbek, és tartalmaznak egy vízzel telt medencét valamilyen elrendezésben. A konténmentek úgy vannak kialakítva, hogy LOCA esetén a kiszabadult gőz ebbe a medencébe legyen bevezetve, így csökkentve a nyomást kondenzáció által. A forralóvizes reaktorok esetén a konténment 3 generációját különböztetjük meg (Mark I, Mark II, Mark III). A fukusimai reaktor konténmentje Mark I konténment volt (2. ábra), amelynél gyors egymásutánban 2 tervezésen túli esemény történt (nagyon erős földrengés, amely már sérüléseket okozott, és utána egy 15 m magas szökőár, ami a hűtőrendszereket tette működésképtelenné).



3. ábra. A BWR kontémentek 3 típusának vázlata [18]



4. ábra. CANDU blokkok közös vákuumépülettel [23].

Kívülről a forralóvizes kontémentek (3. ábra) általában inkább téglatest alakúak, mivel ott a turbinára enyhén radioaktív víz megy, ezért a turbina ház is takarva kell, hogy legyen.

Külön kategóriát képvisel a kanadai fejlesztésű CANDU típus, amely egy nehézvíz moderátoros reaktor típust alkalmaz, ennek előnye, hogy természetes uránnal működik, és menet közben cserélhetőek a fűtőelemek, nem kell időszakos leállásokkal számolni.

A CANDU konténment a nyomott vizes reaktorok konténmentjére hasonlít. Különleges megoldásnak számít, hogy több CANDU reaktor egymás melletti telepítése esetén alkalmaznak egy úgynevezett vákuumépületet (4. ábra), ez egy nagy térfogatú beton épület, kondenzációt elősegítő nyomáscsökkentő berendezésekkel, amely vastag csövekkel van összekötve az egyes egységek

konténmentjével. LOCA esemény esetén ez az épület jelentős plusz térfogatot tud biztosítani a kiszabaduló gőz/víz keverék számára.

A konténmentek egyéb szempontok szerint is csoportosíthatóak, ilyen lehetőség a nyomás csökkentés módszerei szerinti felosztás: van olyan konténment, amit egyszerűen az elképzelhető legnagyobb nyomásra kell méretezni nyomáscsökkentés nélkül, ezeket nevezzük teljes nyomású száraz konténmentnek. Ennek létezik kettős falú változata is. Van buborékoltató kondenzátoros konténment (ilyen a paksi is), itt a kiszabadult gőzt vízrétegbe vagy azon keresztül vezetve érnék el nyomáscsökkentést. Van jégkondenzátoros konténment (Finnországban), itt a jég megolvasztásához elhasznált hőmennyiség már nem a konténment légkörét melegíti - a halmazállapot változtatáshoz sok energia szükséges.

Az újabb konténmenteknél fontos szempont, hogy képes legyen passzívan is hűteni az esetleg a hálózatról leszakadt, energiaellátás nélkül maradt reaktort, hogy a maradványhő ne okozzon üzemanyag olvadást. Az ilyen konténmenteket passzív hűtésű konténmenteknek nevezik (ilyen konténment alkalmazása esetén, Fukushima-ban nem történt volna kibocsátás). Ezek a konténmentek többnyire kettős falúak, és vízmedence van beépítve sokszor a tetejükbe (5. ábra).



5. ábra. AP 1000-es típusú passzív konténment, külső energia nélkül képes elvezetni a maradék hőt a természetes cirkuláció segítségével [24].

A passzív AP-1000 konténment úgy van kialakítva, hogy a természetes áramlás meginduljon LOCA esetén a két fal között, és a víz belső falon történő elpárolgása, a külsőn való kondenzálása hatékonyan vigye el a hőt a környezet irányába.

A legtöbb konténment rendelkezik valamilyen befecskendező és vízporlasztó berendezéssel, ez ugyanis nemcsak a nyomást képes csökkenteni, hanem az esetlegesen a konténment légterébe került radioaktív anyagokat is képes kimosni az alul összegyűlő vízbe.

Meg kell említeni, hogy létezik egy ritkán beépített és használt módszer is, amit szűrt leeresztésnek hívnak. Ez a megoldás a konténmentekkel kapcsolatos egyik veszélyes esemény, a lassú túlnyomás képződés kezelésére született. Ilyenkor az üzemzavar nagy nyomással járó részét már épségben túlélte a konténment, de a maradvány hő miatt lassan növekszik belül a nyomás, és a nyomáscsökkentő berendezések nem képesek ezt ellensúlyozni. A szűrt leeresztés azt jelenti, hogy a konténment légteréből szűrőkön keresztül gőzt, levegőt engednek le. Ez nem egy kívánatos eljárás, de ha a konténment nyomása olyan magas, hogy az esetleges nagymértékű sérülés is lehetséges, akkor inkább ezt kell választani. A leeresztés több lépcsős (jód szűrő, zeolit, fémgyapot) szűréssel történik.

A konténmentekkel kapcsolatban végeztek kísérleteket. Az egyik kísérletsorozat az USA-ban a Sandia laboratóriumnál történt [25][26], itt bizonyos méretarányú (1/4-1/32) konténmenteket építettek meg, egy már megvalósult konténment típus modelljét. Ezeken a modelleken mechanikai és egyéb méréseket végeztek. A kísérletnél, a konténmentet ugyanolyan technológiával és anyagok felhasználásával építették meg, mint a valós konténmentet (6. ábra).



6. ábra. A Sandia laboratórium által épített konténment modell, jól látható a készülő vasbeton szerkezet [26].

A méréseket úgy végezték, hogy, a konténmentet folyadékkal töltötték fel, és a folyadék felett levő gázpára nyomásával szabályozták a konténmentben uralkodó nyomást. Mivel a kísérlet igen költséges, ezért rengeteg műszert és nagyon komoly számítástechnikai háttérrel telepítettek. Az utolsó kísérletnél lassan növekvő túlnyomás alá helyezik a konténmentet. Tesztelték a konténment valóságos nyomásállóságát. A kísérletek azt mutatták, hogy a méretezett nyomásnál jóval nagyobb nyomásnál történt a nagymértékű konténment sérülés (7. ábra).



7. ábra. A nyomás által felhasított konténment [26].

A paksi VVER-440/213-as hermetikus teréről – amely ennél a típusnál a konténment feladatait látja el - külön alfejezetben írok részletesebben.

2.7. Atomerőmű balesetek és tanulságaik a konténment szerepének szemszögéből

A legnagyobb környezeti hatást okozó esemény az 1986 áprilisában bekövetkezett csernobili baleset volt. Az erőmű Ukrajnában, Kijevtől 120 km-re található. A baleset a 4-es blokkban történt. A reaktor típusa RBKM-1000 (1000 MW elektromos teljesítményű reaktor). Ez egy grafit moderátoros, forralóvízes, termikus reaktor volt. A grafit, mint moderátor, a hasadást létrehozni képes sebességre lassítja a gyors neutronokat ennél a típusnál.

A baleset idején 4 blokk üzemelt, további 2 blokk üzembe helyezését tervezték. Az RBKM-1000 reaktor termikus teljesítménye 3200 MW. Ennek a típusnak nagy előnye, hogy az üzemanyag kazetták egy robot segítségével menet közben is cserélhetők. Hátránya viszont, hogy bizonyos körülmények

között felülmoderált, vagyis ha a hűtőközeg melegszik, elgőzölög, akkor többlet reaktivitás jelenik meg a rendszerben. (A paksi VVER típus alulmoderált, vagyis a hűtőközeg elvesztése, elgőzölgése a láncreakció leálláshoz vezet, ebből következik, hogy ilyen szempontból is sokkal biztonságosabb).

1986. április 25-én, egy kísérlet végrehajtása során, a kezelő személyzet az erőmű biztonsági rendszerébe történő megengedhetetlen beavatkozás és egy tervezési hiba együttes hatása miatt, a reaktor hőteljesítménye másodpercek alatt a többszörösére nőtt, a reaktor 'megszaladt'. Az intenzív gőzképződés miatt a hűtés hatásfoka is lecsökkent, az üzemanyag túlmelegedett, megsérült, összetört. A magas hőmérséklet miatt különböző káros kémia reakciók zajlottak le, melyek éghető gázokat is eredményeztek (H_2 , CH_4), a túlnyomás dehermetizálta a rendszert, ezért levegő jutott be.



8. ábra. A csernobili reaktor épület a robbanások után [19].

Az oxigén jelenléte és a magas hőmérséklet az éghető gázok robbanásához vezettek (8. ábra). Ennek következtében súlyosan megsérült a reaktor épület tetőszerkezete és falai, amelyeknek sugárvédelmi funkciói is voltak. A robbanás miatt tüzek is keletkeztek a környező épületekben, illetve meggyulladt a grafit. Az intenzíven égő (kb. 70 MW teljesítményű) grafit tüzet a tűzoltók nem tudták azonnal eloltani, és ennek következtében erős feláramlás alakult ki, amelynek magassága elérte az 1200 m-t. Ez a feláramlás magával vitte az ott keletkezett radioaktív gázokat, aeroszolókat, amelyek több száz km-re is eljuthattak. A balesetnél az üzemanyag hozzávetőleg 3%-a jutott ki a környezetbe, ami hatalmas, földrészeken átívelő terhelést okozott a környezetnek, de az erőmű környezetében

csökkentette az oda kikerült aktivitást. A balesetnek több halálos áldozata is volt a robbanás és az elszennvedett sugárdózis miatt.

A konténment, mint biztonsági tényező szerepét jól mutatja az 1979-ben történt TMI-2 (Three Mile Island-i erőmű 2. blokk) baleset lefolyása. Ez az erőmű az USA területén Middletown városhoz közel épült. A blokk nyomottvízes típusú 850 MW elektromos teljesítményű. A balesetet néhány műszaki probléma, és téves operátori beavatkozás együttese okozta. Tévesen zárva maradtak tápvezetékek szelepek, ezért a gőzfejlesztők kiszáradtak, és képtelenek voltak hűteni a reaktort, ami emiatt melegedett és nőtt a nyomás. A túlnyomás ellen védő szelep kinyílt, a primerköri víz hozzávetőleg 30 %-a kifolyt, vagyis LOCA baleset történt. A távozott primerköri víz miatt nyomáscsökkenés történt, amire bekapcsolt a tartalék hűtőrendszer, és hűtővizet injektált a primerkörbe. Az erőmű operátorai a helyzetet rosszul értékelve kikapcsolták a tartalék hűtőrendszert és a keringető szivattyúkat a primer körben abban bízva, hogy a természetes cirkuláció elegendő hűtést fog adni. Amikor az operátorok észlelték a beragadt szelepet, bekapcsolták a vészhűtő rendszert, ami hideg vizet jutatott a zónára, de addigra a felmelegedett zóna a beáramló hidegviztől hősokkot szenvedett, és súlyosan megsérült, és részben meg is olvadt. A zóna sérülése hasonló súlyosságú volt, mint a csernobili, de csak elhanyagolható környezeti terhelést okozott. Ez több egyéb tényező mellett annak volt köszönhető, hogy a nyugati erőműveket már akkor is masszív, hermetikusan záró konténment vette körbe. A környezetbe kijutott radioaktivitás kismértékű volt, és túlnyomórészt csak rövid felezési idejű nemesgázok tudtak kikerülni, amelyeknek a környezeti hatása elhanyagolható volt.

A fukusimiai balesetet (2011. március 11.) többszörös (földrengés, szökőár) természeti katasztrófa okozta.

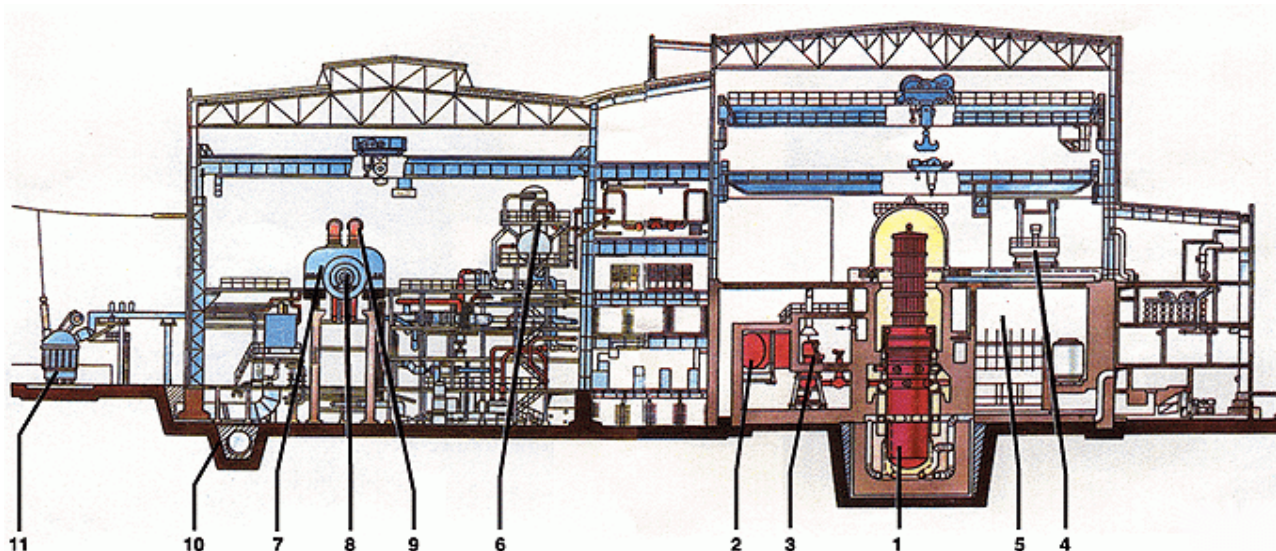
A 3 működő (1-es, 2-es 3-as egység) blokk a földrengés miatt automatikusan leállt, a 4,5,6-os egység karbantartás miatt állt. Ilyenkor a maradványhő keletkezése miatt hűtésre van szükség. A reaktor leállás és tápvezeték sérülés miatt elektromos energia nem állt rendelkezésre, ezért a hűtést biztosító szivattyúk működtetését dízel generátorokkal oldották meg. Ezek rendben elindultak, és hűtötték a reaktorokat. Ezután mintegy egy órával azonban egy minden eddiginél magasabb szökőár érte el a telephelyet, és a dízelgenerátorokat megrongálta. A reaktorok hűtés nélkül maradtak, fokozatosan melegedtek. A helyzetet a külső szivattyúk üzembe helyezésével próbálták megoldani 9 óra elteltével. Sajnos, ez elégtelennek bizonyult és mindhárom reaktorban a üzemanyag megolvadt, a reaktortartály és a konténment is megsérült. A konténmentből a hűtésre bejutott víz folyamatosan szivárgott ki, radioaktív anyagot is magával hozva a környezetbe, elsősorban a tengervízbe. A fukushimai robbanások azért jöhettek létre, mert nem volt bennük hidrogénégető. Ennél a balesetnél a konténmentek nem tudták megóvni a környezetet a jelentősebb kibocsátástól, de a kibocsátás mennyiségét nagyban csökkentették, a 3 blokkból együttesen a csernobili kibocsátás mintegy ötöde szivárgott ki, jóval lokalizáltabban. Az erőműben egy munkás a földrengés miatt felboruló daruval

történt baleset miatt életét vesztette, de senki se kapott jelentős, olyan azonnali hatásokat kiváltó sugárdózist, mint a csernobili balesetnél.

Az eset a konténmentekkel kapcsolatban a hűtés fontosságára világít rá: ma már készülnek olyan konténmentek amelyek úgynevezett passzív hűtéssel bírnak, ami azt jelenti, hogy semmilyen külső vagy belső energiaforrásra a hűtéshez nincsen szükség, ezek a típusok sokszor dupla falú konténmentel rendelkeznek.

2.8. A paksi hermetikus tér felépítése, működése, modellezése

A Pakson is üzemelő VVER-440/213 típusú erőművekben a tervező hermetikus térnek nevezi a konténment funkciót ellátó épületelemekből álló teret, megkülönböztetésül a szokványos – az előző fejezetekben bemutatott – konténmentektől. A VVER-440/213 a VVER-440/230 típus továbbfejlesztésével keletkezett. A VVER-440/213 hermetikus tere egy úgynevezett lokalizációs toronyhoz csatlakozik.



9. ábra. A VVER-440/230 blokk sematikus rajza 1. reaktor tartály 2. gőzfejlesztő, 3. keringető szivattyú, 4. átrakó, 5. pihentető medence, 6. gáztalanító, 7. turbinaház, 8. tubina, 9. csepleváltó, 10. kondenzátor, 11. transzformátor [20].

A cél az volt, hogy a legnagyobb mértékű tervezési üzemzavarokat is tudja kezelni az erőmű nagymértékű ellenőrizetlen kibocsátás nélkül. Az ilyen típusú atomerőműnél az a legveszélyesebb, ha a hűtőközeg egy része vagy egésze kifolyik a primerkörből, és a fűtőelemek hűtés nélkül maradnak. A primerkörben szereplő legnagyobb átmérőjű cső, ami eltörhet a 492 mm-es belső átmérőjű, és a keringető szivattyúval köti össze a reaktortartályt. Itt olyan törést feltételezünk – ez az úgynevezett dupla *guillotine* törés – ami a cső két végét teljesen nyitottá teszi, vagyis mintha egy darab kiesne abból a csőből. Ez egy konzervatív feltételezés: ilyen törésnek a gyakorlatban elenyésző a valószínűsége, inkább repedés, vagy egy kisebb darab kiesése lehet jellemző.

Ezt természetesen nem a paksi erőműi tapasztalatok támasztják alá, hanem széntüzelésű erőművek esetei, amelyekről anyagvizsgálatban járatos kollégák elbeszéléséből tudok.

A fenti törés több helyen is előfordulhat. Ha a legrosszabbat akarjuk feltételezni, akkor a hidegági törést feltételezzük, ekkor ugyanis a reaktortartály felől a primerköri nyomás nyomja ki a vizet, a törés másik oldalát pedig a keringető szivattyú táplálja.

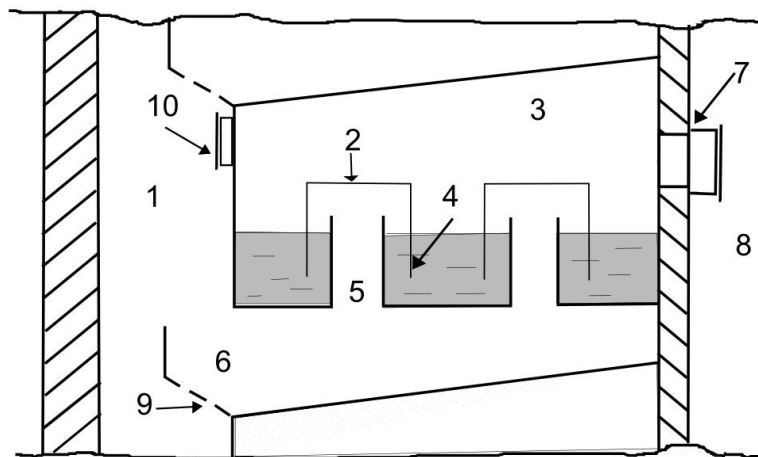
Az erőmű biztonsági rendszereinek az a feladatuk, hogy az ilyen esetben feltételezhetően felaktiválódott és esetleg a fűtőelem sérülése esetén hasadási termékeket és hasadó anyagokat is kimosó vizet a hermetikus térben tartsa, és gondoskodjon a fűtőelemek hűtéséről. Itt van nagy különbség egy hagyományos erőműhöz képest, ugyanis ott nem okoz nagy környezeti terhelést, ha kiengedik a gőzt a kazánból a környezetbe, illetve a hőtermelő folyamat hamar leállítható az égés valamelyik feltételének megszüntetésével. Ezzel szemben egy atomerőműnél nem megengedhető a primerköri víz környezetbe jutása, és gondoskodni kell a maradvány hő elvezetéséről is: ugyanis a láncreakció megszűnése után az üzemi hőteljesítmény 7-8 %-a keletkezik a fűtőelemekben (amely idővel csökken), ami hűtés nélkül a fűtőelemek (esetleg a reaktortartály aljának) megolvadását eredményezheti. A kifolyt primerköri víz környezettől elszeparálása a hermetikus tér feladata, a fűtőelemek hűtését az üzemzavari hűtőrendszernek kell megoldani.

Az épületre a legveszélyesebb tényező a túlnyomás. A hermetikus térben normál üzemben kb. 50°C-os levegő van, ide ömlik ki a tartályból a 130 bar nyomású 270°C hőmérsékletű víz. A túlnyomást nyilván a víz egy részének elforrásából keletkező gőz okozza, mivel a gőznek azonos térfogaton és hőmérsékleten nagyságrendileg 1000-szer nagyobb a térfogata a konténment körülményei között.



10. ábra. Buborékoltató tálcák a paksi lokalizációs toronyban [28].

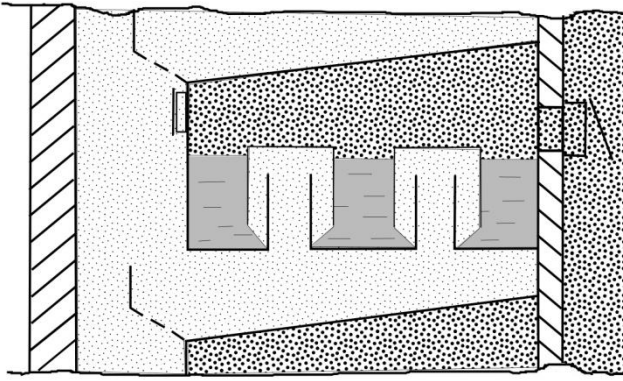
A feladatra a paksi hermetikus tér két módon van felkészítve. Az első az, hogy a lokalizációs torony térfogata sokkal nagyobb, mint a reaktortartályé, tehát van hely tágulni, a másik megoldás, hogy aktív és passzív berendezések segítségével igyekszik elősegíteni a kondenzációt. Passzív kondenzálást segítő eszközöknek azokat nevezzük (10. ábra), amelyek nem igényelnek szabályozást illetve külső energiaforrást.



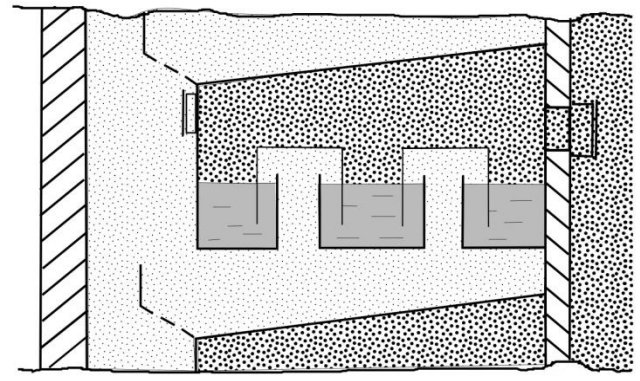
11. ábra. A buborékoltató tálcák szerkezetét mutató rajz. 1. főtér légtér, 2. zárósapka, 3. köpenytér, 4. vízzár, 5. tálcanyílás, 6. vízgyűjtő hely, 7. visszacsapó szelep, 8. légsapda, 9. perforált lemez, 10. a köpenytér és a főtér közötti szelep. Az ábra a normál üzemi állapotot mutatja.

A törésen kiszabaduló gőz minden hidegebb felületre kicsapódik, ez a jelenség ilyen fizikai paraméterek mellett robbanásszerű sebességgel játszódik le, néhány tized másodperc alatt a hidegebb felületeken víz filmréteg keletkezik. A másik passzív kondenzációt elősegítő fő eszköz a buborékoltató tálcák rendszere (11-15. ábra), ezek a tálcák szifonszerűen képeznek egy 50 cm vastag vízzáró réteget. Az 50 cm vízréteg hidrosztatikai nyomása 0,05 bar, vagyis ennyi túlnyomásnak kell keletkezni ahhoz, hogy a gőz/levegő keverék átbuborékoljon a vízzáró rétegen. Ha megvan a megfelelő túlnyomás, akkor a víz gőz keverék át tud buborékolni a vízzáró rétegen.

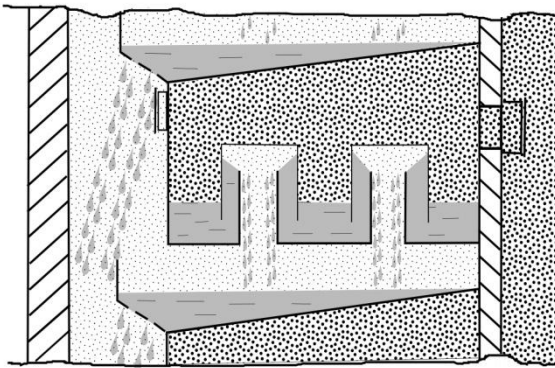
Kezdetben a tálcákban levő víz 45°C-nál kisebb hőmérsékletű (ez üzemi előírás, a nyári nagy melegben sokszor hűteni kell a tálcavizet) [29], ezért azt feltételezhetjük, hogy a törés felől jövő gőz teljes mértékben kondenzálódik a tálca vizébe, és az esetleg keletkezett aeroszolok is a vízben maradnak. Ez azt is jelenti, hogy aktivitás csak a nemesgázok révén tud túl jutni a buborékoltató tálcán, a tálcák légterébe. A tálcák után a légsapdába kerül az átbuborékoltott gázkeverék. Egy légsapda 3 tálcához csatlakozik.



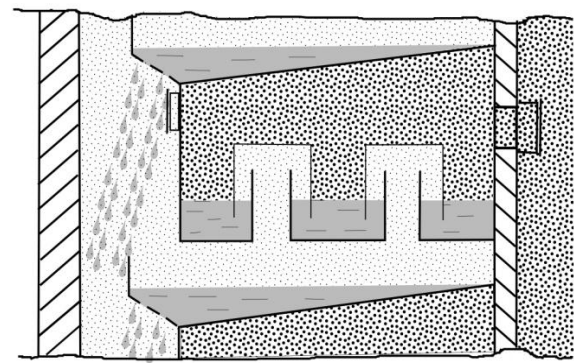
12. ábra. A gőz-levegő keverék behatol a tálcába az emelkedő nyomás miatt, a visszacsapó szelep kinyit



13. ábra. A nyomás kezd csökkenni a főtérben a visszacsapó szelep becsukódik



14. ábra. Ha a köpenytérben nagyobb a nyomás, mint a főtérben, a víz elkezd kiömleni a tálcából



15. ábra. A tálcák tetejéről ömlik a szétporlasztott víz a főtérbe

A tálcák felé a légsapdának visszacsapó szelepeik vannak (16. ábra). Ez azt jelenti, hogy a légsapdák felől a tálcák felé nem áramolhatnak vissza a gázok (csak ha a szelep szivárog). A légsapdák a legnagyobb térfogatú egységei a hermetikus térnek. A nagy rendelkezésre álló térfogat lehetővé teszi, hogy a főtérben a nyomás csökkenjen. Ha a tálcák légterében a nyomás lecsökken a légsapdákban mérhető nyomás alá, akkor a szelepek zárnak, és nem engedik a légsapdába bejutott gázokat vissza a tálcák felé, ami azért nagyon előnyös, mert így a főtérben a nyomás könnyebben tud csökkenni, mivel nem történhet a főtér felé anyagáramlás.

A légsapdának a környezettel nincs kapcsolata, szivárgás nem lehetséges, mert a környezet felé nem rendelkezik nyitható berendezéssel.



16. ábra. Légsapda a paksi atomerőmű lokalizációs tornyában, látható a három 500 mm-es visszacsapó szelep, amelynek a túloldalán három tálca helyezkedik el [28].

A tálca rendszer kétféleképpen tud viselkedni [39]. Ha a nyomás nem éri el az 1,65 bar-t, akkor a tálcák légtere összeköttetésben marad a főtér légterével, könnyen ki tud egyenlítődni a nyomás ilyen módon. Ha a nyomás 1,65 bar fölé emelkedett, akkor a tálcák feletti légtér szelepe reteszelődik, és nyomás-kiegyenlítés csak a vízáron keresztül lehetséges. Ez azzal jár, hogy ha a főtérben a nyomás lecsökken a tálcák feletti levegőnyomás kit tudja nyomni a vizet a tálcákból. A víz az alatta levő tálca tetejére kerül, és onnan egy erre kiképzett porlasztó-vályú segítségével lefolyik a főtérbe. Ezt a jelenséget nevezzük tálcaleömlésnek. Ekkor nagy mennyiségű víz kerülhet viszonylag hamar a főtérbe, a jelenség pozitív visszacsatolással működik, vagyis a tálcákról lefolyó víz csökkenti a főtérben tapasztalható nyomást, emiatt a tálca légtere és a főtér nyomáskülönbsége nőni fog, és ez még intenzívebbé teszi a tálca leömlést. A tálcákon 120 tonna víz van, ami ilyenkor majdnem teljesen lefolyik. A jelenség lejátszódása akkor előnyös biztonsági szempontból, ha a főtérben nagy csőtörés történt, ami akár olyan nyomást is létre hozhatna, amely az épület épségét veszélyeztetné.

Egy ilyen tálcaleömlés depressziót (a légnyomásnál kisebb nyomást) is előidézhet a főtérben. Ez úgy lehetséges, hogy a tranziens elején a nyomásnövekedés a főtérben levő levegő jelentős részét a légsapdába tudja nyomni. A visszamaradt anyag légnemű része ezért gőzben

gazdagabb lesz, és ha valami miatt kondenzáció indul be, akkor a nyomás sokkal gyorsabban tud csökkenni, mint tiszta levegő esetén, ha a víz lekondenzálódik, akkor térfogata egy nagyságrenddel kisebb lesz, míg a lehülő levegő térfogata csak a hőmérséklet csökkenéssel arányosan változik (csökken).

Az aktív kondenzációt segítő berendezés a sprinkler rendszer, ami a főtér légtérébe vizet spriccel. A tálcákkal ellentétben a sprinkler szabályozható, és a nyomás függvényében szabályozva is van. A sprinkler (vízporlasztó) rendszer kisebb mennyiségű vizet képes megmozgatni adott idő alatt, mint a tálca leömlés, ezért a nyomásra való hatása is kisebb.

A sprinkler rendszer a tranziens kezdete után 72 másodperccel tud indulni. Ennek az oka, hogy a biztonsági rendszereknek saját dízel-elektromos energiaforrásuk van, hogy akkor is tudjanak működni, amikor az erőműben megszűnik a villamos áramellátás. Egyrészt a dízelek indításához is időre van szükség, másrészt a tervezők gondoskodtak arról, hogy több rendszer ne próbáljon egyszerre indulni: ugyanis nagy teljesítményű elektromos eszközöknél jellemző az, hogy az indulásnál nagy áramot vesznek fel.

A tranziens után a sprinkler rendszer bekapcsol, ha a főtér nyomása 1,1 bar fölé emelkedik, illetve leáll, ha a nyomás 0,85 bar alá csökken. Ezzel az a cél, hogy tranziens esetén is lehessen biztosítani az enyhe depressziót. A sprinkler rendszer másik jelentősége, hogy a légtérből radioaktív anyagokat tud kimosni a főtér alján összegyűlő zsomp (hely, ahol a folyadék összegyűlik) vizébe. Ez azért előnyös, mert így a környezet felé szivárgás csak légnemű anyagok esetén lehetséges.

2.9. Atomerőmű - szimulátorok

Az atomerőmű üzemeltetésénél fontos, hogy a kezelő személyzet jól képzett legyen, és felismerje, ha közbe kell avatkoznia. Az olyan munkahelyeken, ahol a személyzet téves beavatkozásának nagymértékű káros befolyása lehet egy esetleges vészhelyzet esetén, sokszor alkalmaznak szimulátort a dolgozók gyakoroltatására. Ilyen munka például a pilótáké, ahol közismert, hogy alkalmaznak szimulátort, de ilyen az atomerőmű operátorok munkája is. Azt is meg kell említeni, hogy a pilóták mindennap felszállnak, az atomerőműben leállás vagy indulás jó esetben csak évente egyszer van. Erre a feladatra való az oktató szimulátor [34][35]. A szimulátoroknak további alkalmazásai is lehetségesek az atomerőműveknél. Így megkülönböztetünk, oktató, mérnöki, fejlesztő, kompakt, és teljes léptékű szimulátorokat. A

szimulátorok két lényeges eltérése az egyéb modellező szoftverekhez képest, hogy real time futnak és a futás közben beavatkozásra van lehetőség. A valós időben futás azt jelenti, hogy ha egy jelenség 10 percig tart, akkor a modellező szimulátor is 10 percig fog futni, vagyis a szimulátoroknál fontos, hogy az időzítés is meg legyen oldva. Ahhoz, hogy oktatni lehessen egy szimulátorral lényeges a közbeavatkozás biztosítása a folyamatokba, különben a tanuló csak passzívan nézhetné a lejátszódó folyamatokat. Vegyük sorba az említett szimulátor típusokat: ha interaktív azt nevezzük mérnöki szimulátornak, ha valós idejű az fejlesztő szimulátor, ha a kezelés is valóság-hű, akkor oktató szimulátor, ha annyira valóság-hű hogy az egész vezénylő meg van építve, akkor az a teljes léptékű szimulátor. Megkülönböztetünk még kompakt szimulátort, amely valóság-hű eredményt ad, de a kezelése nem valóság-hű.

A szimulátor részei:

- A fizikai jelenségeket modellező programok
- A fizikai interfész valamennyi eszközzel (pl. blokk számítógép)
- Az instruktori rendszer (folyamatok kezelése, beavatkozás)

Egy szimulátornak sok olyan feltételnek kell megfelelnie, amely egy off-line programnál nem merül fel. Ilyenek a pillanatfelvételek készítése, ezekhez való visszatérés, és újbóli futtatás eltérő beavatkozásokkal, előre beprogramozott meghibásodások bármilyen kombinációjának szimulálása. A szimulátor a különböző technológiai rendszerek modelljeinek összehangolt működését feltételezi. Ez úgy valósítható meg, hogy a szimulátor ütemezve működik, ami azt jelenti, hogy bizonyos idő alatt az összes modellszámításnak le kell futnia. Az MTA EK-ban készült teljes léptékű szimulátor 0,2 s időlépéssel rendelkezik. Ezt az összehangoltságot úgy lehet elérni, hogy a szimulátor rendelkezik egy ütemezővel, egy vezérlő programmal és egy közös memória területtel. Az ütemező gondoskodik, róla hogy minden modellszámítás lefusson, a modellek mindig a 0,2 s-al későbbi állapotot számolják ki. Az így kiszámolt eredményeket a közös memória területen tárolják. Erre azért van szükség, mert a modellek nem függetlenek egymástól, használják egymás eredményeit. A legnagyobb erőforrást igénybe vevő modell a primerkör termohidraulika modellje, a (RETINA nevű kétfázisú kód), és a KIKO3D neutron kinetikai modell. Természetesen több más modell is szükséges.

A jelen dolgozat tárgyához leginkább kapcsolódó modell a HERMET. Ez a modell számolja a hermetikus tér fizikai paramétereit. Modellezi az itt található biztonsági berendezéseket, és aktivitásterjedési modullal is rendelkezik, amely négy csoport aktivitás

transzport folyamatait képes számítani. Az input adatokat a szimulátoros verzióban a közös memória területről veszi, ezeket az adatokat a RETINA kód állítja elő. A HERMET programnak készült a szimulátortól független off-line verziója is, itt fájlokból veszi a szükséges inputot. A részletesebb aktivitási modellel kiegészített verziót HERMAKT-nak hívják, ez is offline programként működik, a HERMAKT aktivitás terjedési modulját beépítettem a szimulátorba is. A program a szimulátor kiszolgálására jött létre, hogy modellezze a hermetikus térben lezajló folyamatokat és jelezze, hogy a buborékoltató tálcák vízszintjét, és hogy volt-e tálca leborulás.

2.10. A VVER 440/213 típusú hermetikus tér számítógépes modellezése

Mivel a konténment az utolsó védvonal a környezetbe esetlegesen kikerülő sugárzó izotópokkal szemben, ezért nagyon fontos, hogy az itt lezajló folyamatokat minden üzemállapotban a lehető legpontosabban ismerjük, mert ezen fizikai állapotok alapján következtethetünk az esetleges környezeti terhelésre.

A normál üzemállapot esetére gyakorlati tapasztalat is van a konténment tulajdonságaival kapcsolatban, de baleseti helyzetben csak számítógépes modellek vagy esetleg modell kísérletek lehetségesek. A modell kísérleteknél anyagi okokból csak makettel végzett kísérletek lehetségesek.

A hermetikus tér viszonyai túl összetettek ahhoz, hogy egy egyszerű egyenlettel leírjuk, mindenképpen összetett számítógépes modellezésre van szükség. A nemzetközi irodalom ismer kísérletileg validált kódokat (CONTAIN, ASTEC), amelyek használhatóak pontos számításra. Ezekkel kapcsolatban egy probléma van: a paksi hermetikus tér (VVER-440/213) esetében alkalmazott megoldások közt vannak egyediek, amelyeket az említett kódok valóságúen nem tudnak modellezni, itt elsősorban a buborékoltató tálcák légsapdákkal való együttműködését és a tálca leömlést értem. Természetesen egy 'worst case scenario' esethez lehet számításokat végezni, ami biztonsági elemzéshez jó lehet, de teljesen valóságú eredményt nem ad.

Magyarországon a VEIKI-ben készült először modellező eszköz a paksi típusú konténmentek (17. ábra) baleseti viselkedésének leírására [27]. Ez 1988-ban készült el, Téchy Zsolt munkája volt. A program neve BURST illetve később BURST-ST. A program 6 rész-térfogatra osztotta a hermetikus teret, tartalmazott termohidraulikai modellt, áramlási modellt, és a tranziensek rövidtávú leírását célozta meg. Hosszabb időtartamú számításokra a BURST-NLT kód szolgált, amely már részletesebb tálcamodellt tartalmazott. A MARCH3M kódot is

alkalmazták akkor a VEIKI-ben. Ebben az időben kezdték el használni a CONTAIN nevű általános konténment modellező eszközt, mely rugalmasan alakítható többféle konténment modellezéséhez. A programok eredményeit a nagy csőtörés esetére hasonlították össze, az eredmények jó egyezéssel 2.1 és 2.3 bar nyomás között szórtak. A VEIKI (később NUBIKI) munkatársai azóta is végeznek számításokat a CONTAIN kóddal, és ezen a téren nagy tapasztalatra tettek szert, több biztonsági elemzéshez készítették el baleseti forgatókönyvek szimulációját.



17. ábra. VVER-440/213-a konténment [30].

Németországban fejlesztették ki a COCOSYS [32] nevű általános könnyűvizes reaktoroknál alkalmazható konténment modellező eszközt. A programot ugyanaz az intézet készítette el, amely a termohidraulikai modellezésre használt ATHLET kódot. Amit itt ki szeretnék emelni, hogy a COCOSYS program (a CONTAIN-al ellentétben) fel van készítve, és tesztelve van az egyedi megoldású VVER 440/213-as buborékolató tálcás nyomáscsökkentő

berendezés modellezésére. A COCOSYS kód validálásánál 1/100 buborékoltató tálca modellt is használtak az eredmények kísérleti igazolására.

Itt említem meg, hogy intézetünkben a hermetikus téren belüli modellezési munkát a CONTAIN-TIBSO [31] program páros segítségével végzi. A termohidraulika részét a modellnek a CONTAIN program számolja. Ezek a számítások az egyes helyiségek állapotainak, és az ezek közötti anyagáramlások mértékének, minőségének meghatározásából állnak. Ezeket az adatokat használja az intézetünkben fejlesztett TIBSO program mint inputot. A TIBSO program a hermetikus téren belüli aktivitás terjedést modellezi, ehhez több nódus típust használ. Ezek a következők:

- Átvezetés – két nódus közötti forgalmat szimbolizálja
- Forrás – az aktivitás forrását jelöli, ilyen a törés helye ahol a primerköri víz hasadó anyagokat tartalmazhat
- Kétféle elágazás, skaláris (az izotópokat nem különbözteti meg), vektor (az izotópok anyagi minőségétől is függ, hogy milyen módon történik az elágazás)
- Nódus be és kivezetéssel
- Nódus bevezetéssel
- Nódus kivezetéssel

Ezekhez a nódus típusokhoz a TIBSO program fejlesztője piktogramokat rendelt, így ezek segítségével az egyes üzemzavari esetek folyamat ábrához hasonlóan ábrázolhatók.

A TIBSO kód első rendű differenciál egyenletet old meg a lépésenkénti integrálás módszerével.

A TIBSO program 1976 óta folyamatos fejlesztés alatt van, nem kötődik semmilyen konkrét megvalósult technológiai rendszerhez, rendkívül rugalmas.

A primerköri kifolyás idősorait a RELAP kódtól kapja, s ahogy már említésre került, a hermetikus helyiségek közötti áramlás számolásáért a CONTAIN program felel.

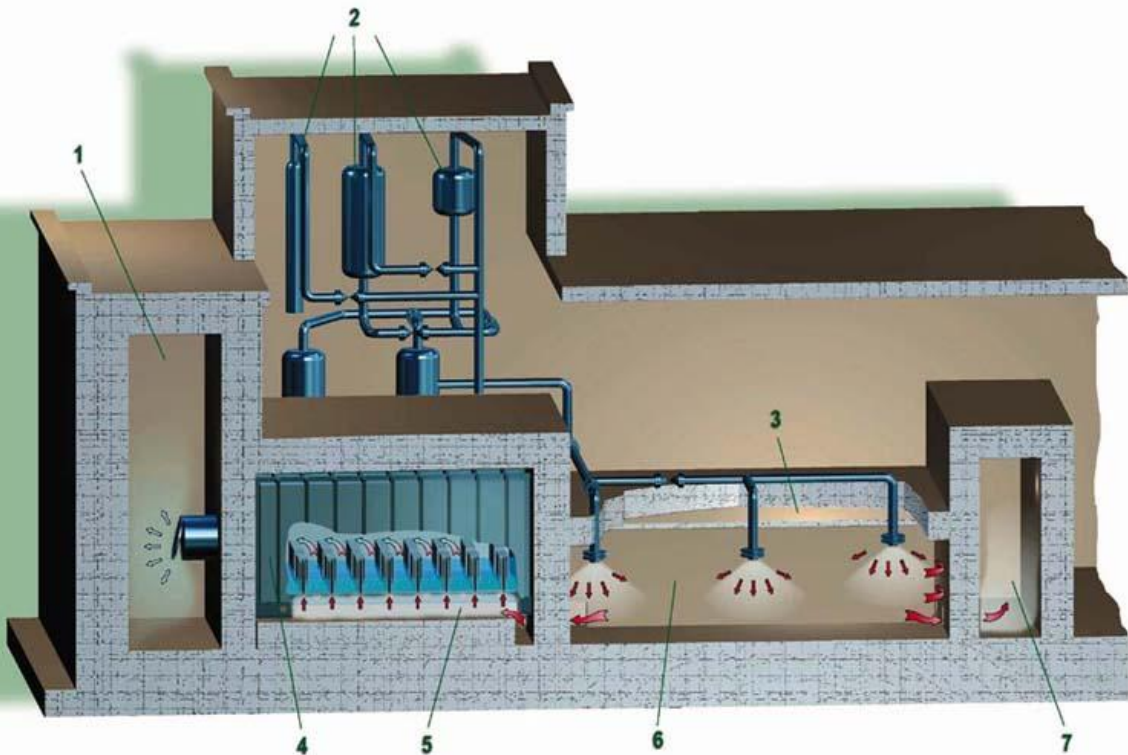
A nuklid leltár adatokat az ORIGEN kód számolja.

Ezek az inputok szükségesek a programnak, amely környezeti terjedési modellekhez képes input adatokat adni.

Az ORIGEN kód képes egyszerűbb TIBSO esetek számítására, ily módon a TIBSO programmal sikeres validációs számításokat is végeztek.

2.11. A VVER 440/213 típusú hermetikus tér kísérleti vizsgálatai

A buborékoltató tálcás megoldás egyéni volta miatt már a hetvenes évek végén felmerült a megoldás hatékonyságának a kísérleti igazolása. Több kelet európai országban építettek modelleket. A modellek 1/40-1/100 méretarányú kicsinyítései voltak az eredeti berendezésnek. A kísérleti elrendezés komplexitása se volt az eredeti rendszerhez mérhető, ezekben a berendezésekben csak egy tálcá elrendezés volt (a valóságban 12 van egymás felett), és a tálcák szerkezetét is egyszerűsítették. Ilyen kísérletek voltak az orosz VTI (70-es évek) intézetben, Magyarországon a VEIKI-ben (1978), a Varsói Műszaki Egyetemen, és a Cseh Műszaki Kutató Intézetben. A kísérletek azt mutatták, hogy a kondenzáció a várt hatékonysággal működik, a kondenzációs effektus csak akkor csökkent le, amikor a víz közelítette a forráspontot, de ilyen helyzet a valódi méretű berendezésnél és kifolyásnál se a számítások, se a kísérletek szerint nem fordulhat elő. Csak az a kérdés maradt némileg nyitva, hogy maga a berendezés nem sérül-e a legnagyobb elképzelhető csőtörés esetén kialakuló nyomásviszonyok esetén.



18. ábra. A BC V-213 kísérleti eszköz sematikus rajza 1. légcsapda modell, 2. nagynyomású rendszer, 3. befűjő szelepek, 4. a légcsapda szelepe, 5. buborékoltató tálcák, 6. a főtér modellje [33].

Valószínűleg, a valósághoz legközelebb eső kísérleteket a német (GRS intézet) és az orosz (EREC központ) közös munkája eredményezte, mivel ez a berendezés volt a legnagyobb léptékű, a valóságot legjobban megközelítő eszköz. A kísérleti berendezés modellezte a buborékoltató tálcák mellett a légsapdát és a sprinkler rendszert is, és az átömlő folyosó is a modell része volt. A berendezés neve BC V-213 (18. ábra). Az itt szerzett tapasztalatok sokat gazdagították a buborékoltató tálcákról való tudásunkat, de az is igaz hogy nem minden VVER 440/213-as erőműre alkalmazhatóak ugyanúgy, mert vannak eltérések az egyes VVER 440/213-as blokkok megvalósításai között.

Ilyen eltérés hogy a Kola-i VVER-440/213 atomerőműben kétszer több 500 mm-es visszacsapó szelep van a tálcák és a légsapdák között, mint Pakson, vagy hogy az átömlő folyosó keresztmetszete a két esetben nem egészen egyenlő. A berendezés 5 térfogatelemből áll, a teljes térfogata 500 m^3 körül van. A tálca rendszerről csak egy részlettel rendelkezik, de ez a részlet valódi méretű. A kísérletnél 12 teszt feladatot tűztek ki, melyeknek nagy része nagy LOCA-ra vonatkozik, de voltak közepes LOCA-ra vonatkozó kísérletek és olyanok, amelyek a kondenzáció lefolyását vizsgálták. A kifolyást nagynyomású tartály segítségével állították elő, és fűvóka mérettel állították be a vizsgálandó LOCA forgatókönyvnek megfelelő kifolyás intenzitást. A mérés eredményeit kódvalidációs célokra használták fel.

3. A HERMET PROGRAM FEJLESZTÉSE

A HERMET kódot a 1990-es évek elején fejlesztették ki a paksi teljes léptékű szimulátorhoz [34][35][36][37] A hermetikus tér termohidraulikai viselkedését leíró kód egy későbbi változatát nyolc kelet-európai VVER-440 erőmű részére készített francia szimulátorba [38] és az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) súlyos baleseti szimulátorába is beépítették.

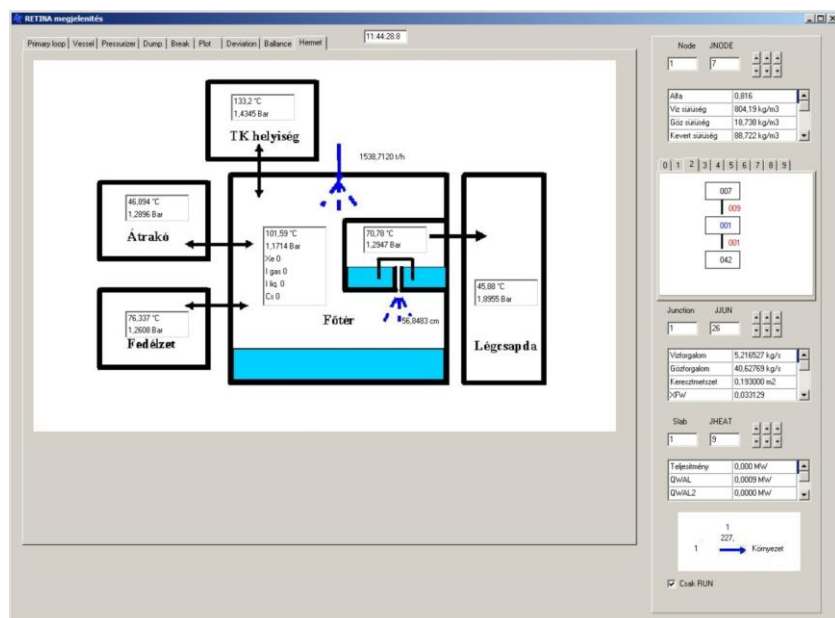
A HERMET kódot a szimulátorban a nagycsőtöréses üzemzavar modellezésére használják, ennek megfelelően történt a kód fejlesztése és validálása, „bejátszása” is. A HERMET ma is jól betölti azt a szerepet a szimulátorban, ami az eredeti feladata volt. Ennélfogva nem volt várható, hogy kisebb, időben elhúzódó üzemzavarok lejátszására alkalmas lesz. A HERMET modellezi a jódtalakra való kiülepedését és a cézium sprinkler általi kimosását, de kérdéses, hogy ezek a modellek alkalmasak-e a biztonsági elemzésekben jelenleg is használt erősen konzervatív feltételezések kiváltására. Ezek miatt a tényezők miatt kellett továbbfejleszteni a HERMET modelljeit. További igény volt, hogy a kifejlesztendő kód írja le a radioaktív anyagok terjedését a hermetikus téren belül, valamint azok kibocsátását úgy, hogy a TIBSO kód további használata szükségtelessé váljon. A dolgozat ezen problémák egy részének megoldásával foglalkozik.

A HERMET kód a hermetikus tér helyiségeit elemi térfogatokra osztja, amelyekhez koncentrált paramétereket rendel. Ez azt jelenti, hogy a térfogaton belüli paraméter eloszlás nincs modellezve, kivéve az alsó (folyadék) és felső (gáz) térfogatókat. A térfogatok közötti áramlások leírására összekötő elemeket használnak. A térfogatokhoz falak tartoznak, amelyek modellezik a térfogatok közötti, illetve a térfogatok és a környezet közötti hővezetési jelenségeket. A térfogatok belső oldalán folyadék filmek adhatók meg, amelyek kezelik a falakon történő kondenzáció során keletkező folyadék viselkedését. A térfogatok, összekötő elemek, falak és folyadék filmek olyan termohidraulikai rendszert alkotnak, amely alkalmas a hermetikus tér helyiségeiben, tálcákon, légcspadákban lejátszódó folyamatok numerikus modellezésére, és egyúttal képes a külső technológiai rendszerek hatásának figyelembe vételére is. A HERMET kód egyik fontos eleme a tálcákon történő átbuborékolás részletes modellezése, ami a hűtőközegvesztéses üzemzavarok során jelentősen csökkenti a belső terek nyomását. A kód nem modellezi a hermetikus helyiségrendszer szellőzését, de fogadja a szellőzőrendszer adatait a szimulátor más modelljeiből. A kód legfontosabb bemenő adatait az üzemzavarok

modellezéséhez a primerkörből, a törésen keresztül érkező hűtőközeg jellemzői jelentik, amelyeket primerköri modellek számolnak.

A program eredetileg a VAX rendszeren futó szimulátor FLECS nevű programnyelven készült, ez a programnyelv a FORTRAN egy modernebb, struktúrákat jobban támogató változata. A külföldi szimulátorokban a HERMET kód C++ verziója került és ezen a nyelven áll rendelkezésre a kód off-line változata is.

A teljes léptékű szimulátorhoz készült egy program, amely hálózati kapcsolat segítségével képes a szimulátorról lehívott adatokat megjeleníteni. A program neve IS_NODE (19. ábra).



19. ábra. Az IS_NODE kijelző

Az eredeti HERMET kódban lehetőség volt néhány izotópcsoport megadásával az aktivitásterjedés modellezésére is. Az erőművi radioaktív kibocsátás becsléséhez, illetve az erőművön belüli dózisviszonyok számításához azonban részletesebb modellekre volt szükség. Ezért a HERMET kód C++ off-line változatából kiindulva elkészült a HERMAKT kód [42], amely grafikus felületet is kapott (20. ábra). Az aktivitás terjedési modul a HERMET termohidraulikai részét használva, az ott kiszámolt anyagáramlásokhoz kapcsolja a hasadási termékeket. A hermetikus térbe került radioaktív izotópok megjelennek a légtérben, a zsompban, a tálcák vizében, a légsapdáknban, a falakon képződő folyadékfilmben és hermetikus tér szivárgásain keresztül kikerülnek a környezetbe is. A hermetikus térbe áramló hűtőközezből a

nemesgázok 100%-a, a halogének 65%-a és a többi izotóp 10%-a kerül a hermetikus tér légterébe. A légterbe nem kerülő radionuklidok a vízfázisban maradnak. A sprinkler működések hatására a légtérből kimosódik a radionuklidok egy része. Az [46] ajánlások a légtérből való teljes eltávolításhoz időállandókat adnak meg, amelyeket a HERMAKT kód is használ. A kód továbbfejlesztett változata lehetővé teszi különböző kimosási és kiülepedési időállandók alkalmazását is [40].

The screenshot shows the 'Input' window of the HERMAKT program. It is divided into several sections:

- Nuklidfüggetlen input:** Includes 'LOCA forgatókönyv' and 'Törési paraméterek' (492mag). There are checkboxes for 'Egyedi eset' and '10 tálcás mód'.
- Kimosás (Decontamination):** A table with columns for 't (h)', 'Kimosási időállandó (1/h) t-ig', 'Kimosási időállandó (1/h) t-től', and 'Maximális dekontaminációs faktor'. Rows include 'Elemi halogén', 'Aeroszol halogén', and 'Többi aeroszol'.
- Kiülepedés (Deposition):** A similar table with columns for 't (h)', 'Kiülepedési időállandó (1/h) t-ig', 'Kiülepedési időállandó (1/h) t-től', and 'Maximális dekontaminációs faktor'.
- Primer vízbe kerülés ideje (s) / Kikerülés a légterbe (%):** A table for gas release parameters for 'Nemesgáz', 'Elemi halogén', 'Aeroszol halogén', and 'Egyéb aeroszol'.
- Számítás időtartománya (s):** Input field set to 900.00.
- Időlépés (Time Step):** Input field set to 0.2.
- Extrapoláció időlépése (s):** Input field set to 5.
- Extrapolált kifolyási tömegáram (kg/s):** Input field set to 150.
- Extrapolált entalpia:** Radio buttons for 'Nulla' and 'Utolsó érték'.

Buttons at the bottom include 'Ment', 'Betölt', 'Mégsem', and 'Futtat'.

20. ábra. HERMAKT program kezelő felülete

A HERMAKT program aktivitás terjedés modulját építtem be a szimulátoros HERMET-be, ami sikeres volt. Annyi volt vele csupán a probléma, hogy a szimulátorban nincsen fűtőelem sérülés modul. Így a beépített modul csak külső fájlkból tud dolgozni.

A HERMAKT program használatával kapcsolatban problémaként felmerült, hogy a termohidraulikai modell nem mindig van összhangban a nemzetközileg elfogadott CONTAIN számításokkal. Elég nehéz a két programot összevetni, mivel teljesen más nodalizációt használnak, és a CONTAIN nem rendelkezik korrekt buborékoltató tálcá modellel.

A HERMAKT program off-line program, vagyis fájlból dolgozik. A törésen kifolyó víz mennyiségét és entalpiáját az intézetünkben számolták a nemzetközileg elismert ATHLET és RELAP programokkal.

4. A HERMETIKUS TÉR FIZIKAI MODELLJE A HERMET KÓDBAN

A hermetikus tér termodinamikai és termohidraulikai modelljeinek feladata, hogy az ott előforduló fizikai folyamatok széles körét leírja. A fő folyamatok, amelyek modellezésre kerülnek:

- víz – gőz - levegő rendszer viselkedése
- párolgás, kondenzáció
- hővezetés a falakban
- közegáramlás

Modellezni kell a hermetikus térben található műszaki berendezések működését, úgy mint:

- szelepek, visszacsapó szelepek, hasadótárcsák
- buborékoltató tálcák,
- sprinklerek,

Normálüzem esetén a feladat kevésbé összetett, mivel jelentős mennyiségű közeg a hermetikus térbe nem áramlik, a szellőzés miatt dinamikus termodinamikai egyensúly van. LOCA esetén a helyzet megváltozik: ilyenkor nagy mennyiségű közeg áramolhat a rendszerbe, és a különböző védelmi berendezések is működni kezdenek.

A hermetikus tér modelljét csak vázlatosan mutatom be, a teljes leírás meghaladná ennek a dolgozatnak a terjedelmét.

A hermetikus teret részekre osztjuk a modellezéshez. Ezeket a részeket nódusoknak nevezzük. A nódusokat koncentrált paraméterekkel írjuk le. Ez azt jelenti, hogy egy nódusban egy hőmérséklet, nyomás stb. paraméterrel számolunk, feltesszük, hogy ez az érték érvényes a nódus teljes térfogatában. Úgy is mondhatjuk, hogy a nóduson belüli hőmérséklet, nyomás eltéréseket elhanyagoljuk.

A nódusokat két részre osztjuk, a felső részben gőz és levegő keveréket feltételezünk, az alsóban vizet.

A nódusokat átvezetések kötik össze, amelyekben a közegáramlás szintén modellezve van.

A nódusokban levő közeget (amely túlnyomó részt gőz-víz-levegő) falak veszik körül, ezek a falak hőenergiát vezethetnek el a nódusból, vagy bizonyos körülmények között kondenzáció történhet a felületükre.

A nódusok és átvezetések rendszere egy termodinamikai rendszert határoz meg, amely numerikus leírása a hermetikus térben zajló folyamatoknak.

A számításokat 0,2 s-os időlépéssel végezzük el.

A buborékoltató tálcánál azt feltételezzük, hogy az átbuborékolt keverékből a gőz tartalom 100%-ban a vízbe kondenzálódik, a víz, és annak belső energia tartalma is a buborékoltató tálcá vizében marad. Modellezve van a köpenytér szelepe is, amely 1,65 bar nyomásnál reteszelődik, és ha ezt a nyomást eléri a főtér nyomása, akkor a köpenytérből csak a tálcavizeket kinyomva tud a nyomás kiegyenlítődni.

A sprinkler berendezésekből 3 db van egyenként 150 kg/s vízforgalommal. A sprinkler rendszer LOCA esetén bekapcsol, ha nyomás eléri az 1,1 bar-t, és kikapcsol, ha nyomás 0,85 bar-ra csökken. A sprinkler jelentősége a kondenzáció elősegítésében és az aktivitás vízbe mosásában van. Modellezése úgy történik, hogy a nódus állapot számításnál a sprinkler forgalma is mint a nódusba történő anyagáramlás van figyelembe véve, a befecskendezett hideg víz kondenzálja a főtérben található gőzt és csökkenti a légtér hőmérsékletét.

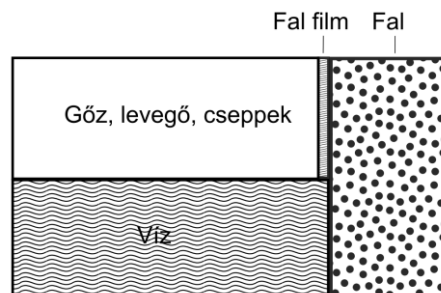
4.1. A modellnél alkalmazott feltételezések

A hermetikus tér modellje alapvetően tömeg és energia áramlások modellezéséből áll.

A következő elvárásaink vannak a modellel:

- egy közös hőmérséklet legyen minden nódusban
- a fázis átalakulásokat a nóduson belül modellezni kell
- a hővezetésnek és a ki- valamint befelé irányuló áramlásoknak hatással kell lenniük a nódus állapotára

A felső részét a nódusnak hőmérséklettel és nyomással jellemeztük, a nyomás a levegő és a gőz nyomásából alakul ki, az alsó rész leírásához elegendő a hőmérséklet (21. ábra).



21. ábra. Nódusok szerkezete

A falak hővezetését egy dimenzióban számoljuk. A falak két részre vannak osztva: száraz fal és nedves fal. A nódus felső részét veszi körül a száraz fal, az alsót a nedves. A felső száraz falról a párolgást és a falra való kondenzációt is modelleztük.

A következő feltételezésekkel élünk:

- mind az alsó, mind a felső nódusokban tökéletes a keveredés
- a nódus nyomását a felsőrészében kialakuló nyomás határozza meg
- hőmérsékleti egyensúly van az alsó és a felső nódus rész között
- a falakban csak vízszintes irányú hőmérséklet különbség van
- a folyadékfilm vastagsága a magasságtól független
- a nóduson belüli két fázis közötti áramlások elhanyagolhatók
- lökéshullámokat nem szimuláljuk
- a hőmérséklet 10-150°C fok között marad.

4.2. Alapegyenletek

A numerikus modellek az anyag és energia megmaradás egyenleteit oldják meg a rendszer különböző elemeire. A tömeg megmaradás egyenlet a levegő komponensre, az i -edik nódusra a következő:

$$\frac{d\varphi_i M_i}{dt} = \sum_{in} \varphi_k G_j - \varphi_i \sum_{out} G_j \quad (1)$$

ahol: φ a levegő/gőz tartalom aránya, M a tömeg (kg), G a forgalom (kg/s).

A tömeg egyenlet a gőz-víz összetevőkre az összes a nódusba be és kiáramló anyag összege lesz:

$$\frac{d(1-\varphi_i)M_i}{dt} = \sum_{in} (1-\varphi_k)G_j - (1-\varphi_i)\sum_{out} G_j \quad (2)$$

A felső nódus belső energiáját számoló egyenlet a nódusba be és kiáramló energiát valamint a hővezetésből adódó energia veszteséget veszi számba:

$$\frac{dU_i}{dt} = \sum_{in} \{(1-\varphi_k)h_k^{steam}G_j + \varphi_j h_k^{air}G_j\} - \sum_{out} \{(1-\varphi_i)h_i^{steam}G_j + \varphi_i h_i^{air}G_j\} + \sum Q \quad (3)$$

ahol: U : energia (MJ), Q : energiaváltozás (MJ/s), $\sum Q$: energia változások összege (MJ/s).

A fenti három egyenletet megoldva megkapjuk a nódus aktuális energia, víz és levegő tömegét, ami lehetővé teszi a felső nódus állapotának a kiszámolását. Ha ez a számítás elkészül,

utána vehetjük figyelembe az egyéb folyamatok (pl. hővezetés, átvezetések forgalma) okozta energiaváltozásokat.

A nódusok felső részének számításánál feltesszük, hogy a gőz, vagy túlhevített, vagy telített állapotban van. LOCA eseménynél gyakorlatilag csak a telített állapot fordul elő.

Az átvezetések forgalmát a következő egyenlettel számolja a modell, ez az egyenlet akkor érvényes, ha az áramlás sebessége kisebb, mint a hangsebesség:

$$G_j = \sqrt{\Delta P (\mu F)^2 / v^{keverék}}, \quad \text{ha } G_j < G_{kritikus} \quad (4)$$

egyébként $G_j = G_{kritikus}$

ahol G a forgalom (kg/s), ΔP a nyomás különbség (Pa), F a felület (m^2), μ hidraulikai ellenállási tényező, $v^{keverék}$ fajlagos térfogata (m^3/kg).

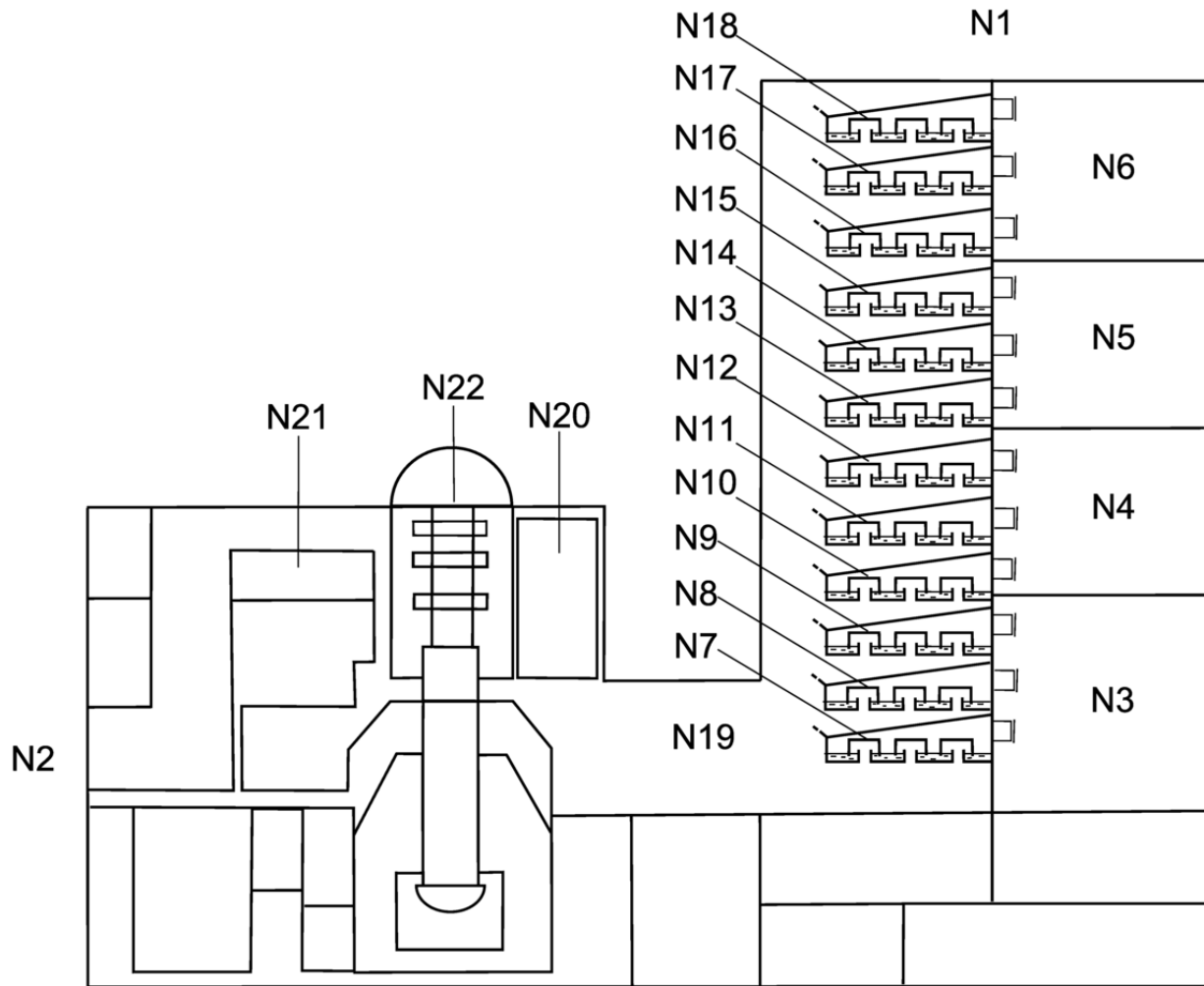
A fal hővezetésének számolása úgy történik, hogy a falat rétegekre osztjuk – lényegében nodalizáljuk – úgy hogy az egyes rétegeken belül a hőmérsékletet azonosnak vesszük. A HERMET programban a fal felosztása úgy történik, hogy a rétegek vastagsága mértani sorozatot alkot. Ezt a számolási igény csökkentése indokolja.

4.3. Nodalizáció

A HERMET modell térrészekre oldja meg az állapot egyenleteket és a térrészek között számolja a forgalmakat.

A paksi teljes léptékű szimulátorban a kódhoz rögzített nodalizációs séma az alábbi elemeket tartalmazza:

- 22 részes térfelosztást alkalmazunk (22. ábra), az első két térrész a környezetet jelképezi (N1-N2). Az N1 térrész a környezetet jelzi, az N2 az erőmű hermetikus téren kívüli részét. N3-N6 nódusok a légszűrők, N7-N18 nódusok a buborékoltató tálcák, N19 a főtér, N20 a fedélzet, N21 térfogat kompenzátor, N22 a reaktorkupola.
- Az átvezetések 2 nódus között lehetnek, az átvezetéseket a résztvevő 2 nódus határozza meg. Lehetnek átvezetések definiálva a nódusok alsó és felső részére is. A modellben 176 összekötő elem van.
- A modellben szerepelnek falak, ezek kétfélek lehetnek, egyrétegű (24 db) vagy többrétegű (14 db) falak. Falak két nódus között, vagy egy nódus és a környezet között lehetnek.
- Folyadékfilmek jöhetnek létre a falakon, 42 db folyadékfilm van definiálva a modellben, film létrejöhet a fal mindkét oldalán.

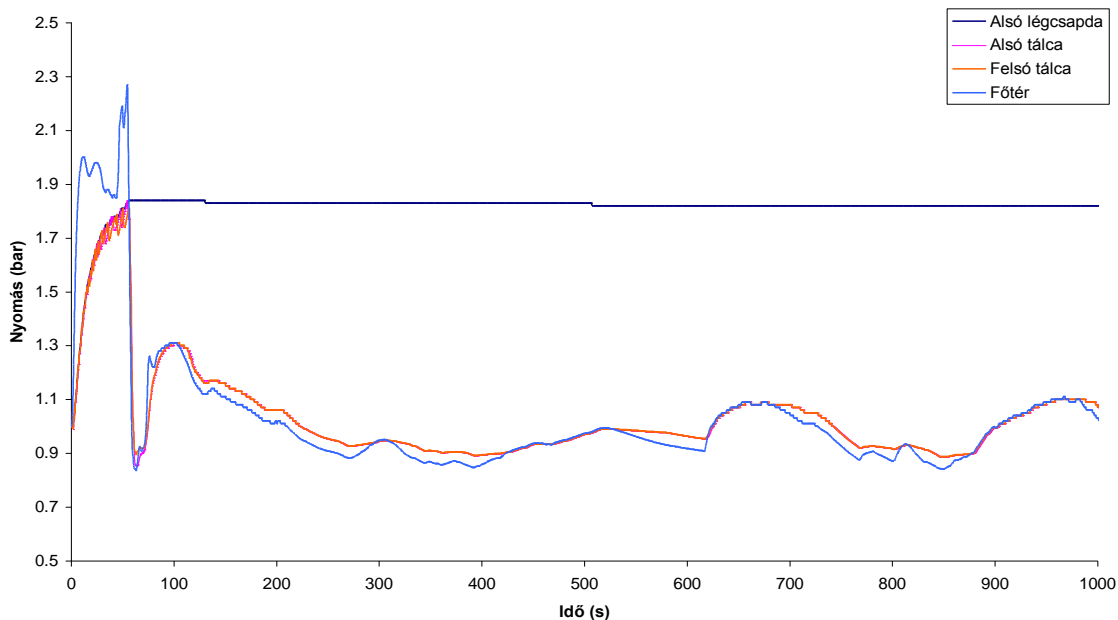


22. ábra. A paksi hermetikus tér nodalizációja a HERMET kódban

5. A MODELLEL VÉGZETT SZÁMÍTÁSOK

Az eredeti modell képességeit két LOCA eset számításával mutatom be (4. táblázat), az első a legnagyobb elképzelhető csőtörés (492 mm), a második egy közepes méretű (233 mm).

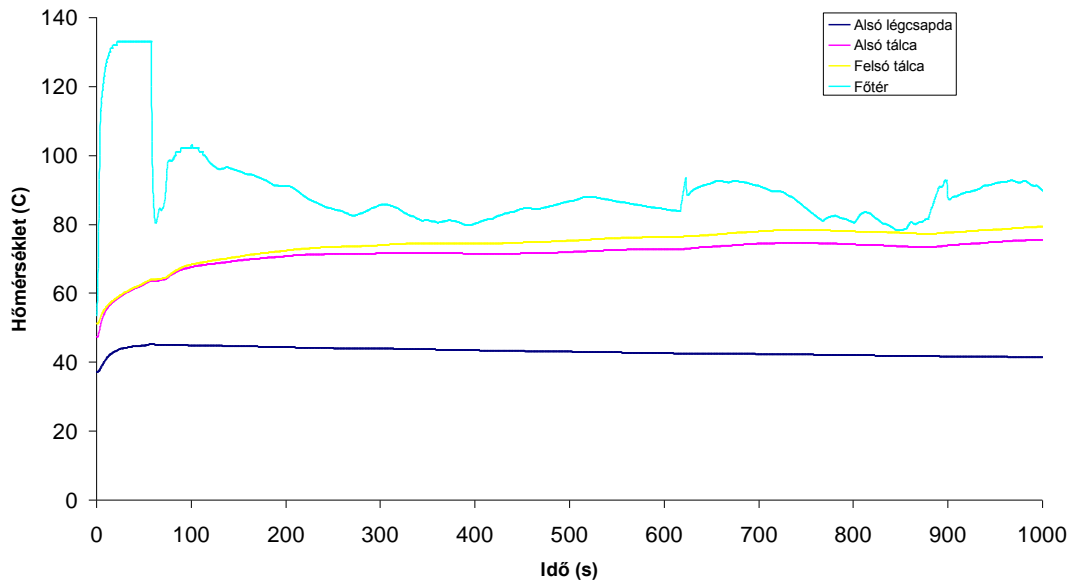
A nagy LOCA számítás azért is fontos, mert erre a tervezési balesetre lett méretezve a hermetikus tér, vagyis ennél a balesetnél is a nyomásnak 2,5 bar alatt kell maradnia. A kifolyást a szimulátorba épített RETINA kétfázisú termohidraulika kód számolja. A tranziens kezdetén a kiáramló primerkörü vízforgalma eléri a 14134 kg/s-ot. Ennek hatására a nyomás eléri a 2,3 bar-t (23. ábra).



23. ábra. A nyomás időbeli változása a 492 mm-es LOCA esetnél

A maximum nyomás jól egyezik egyéb VVER-440/213 kontémet számításokkal [42]. A további nyomás növekedést megakadályozza a kifolyás intenzitásának meredek csökkenése, a falakra történő kondenzáció és a buborékoltató tálcák kondenzációs működése. Az éles nyomáscsökkenés a tálcavíz főtérbe való ömlésének köszönhető, a tálcákon levő víz jóval hidegebb, mint a kiömlő víz és a mennyisége is nagyjából tízszerese a primerkörü tömegének. Ennek hatására a nyomás depresszióba megy. Ezután a nyomás újra növekedni kezd, de a sprinkler üzembe lépése megakadályozza a további növekedést. A tálcáknál és a légcsapdában a nyomás 1,8 bar alatt marad. Jól látható, hogy a visszacsapó szelep működése után a légcsapdában

a nyomás nem változik. A légsapdákban a hőmérséklet se változik jelentősen, mivel oda gőz nem kerül, így kondenzáció se lép fel (24. ábra).



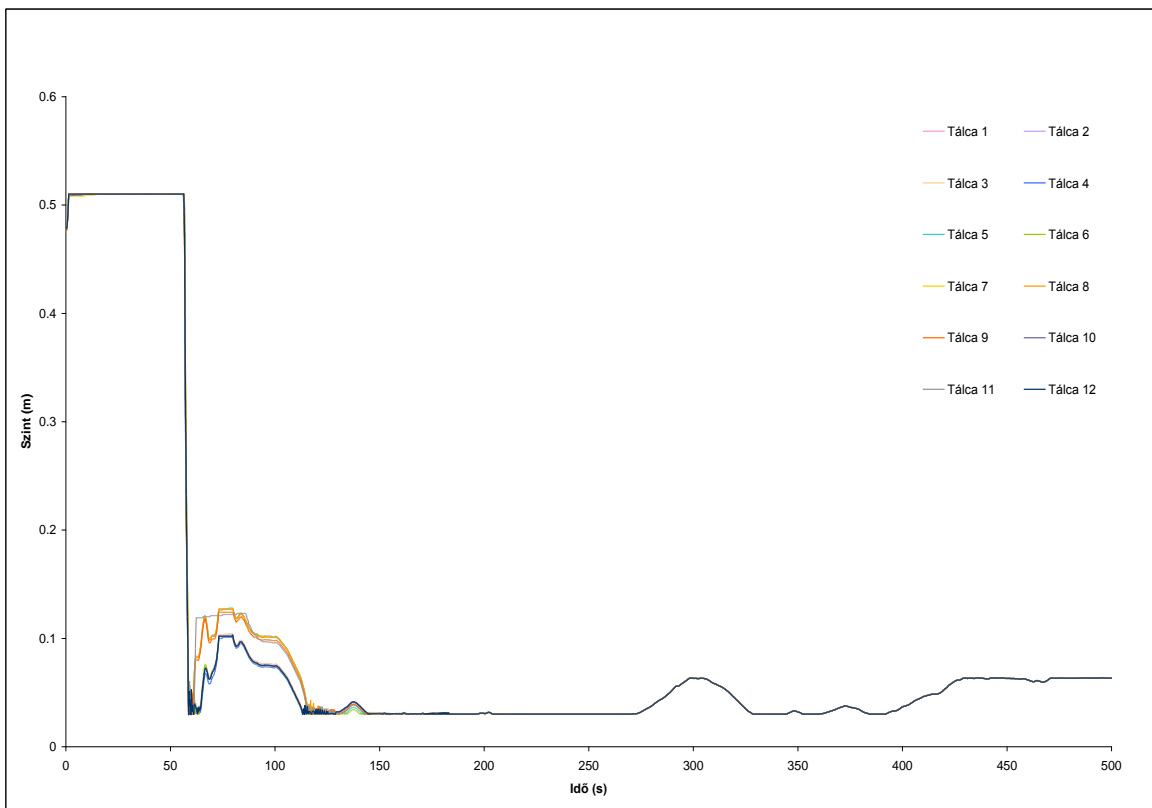
24. ábra. A hőmérséklet változása a 492 mm-es LOCA esetről

A hirtelen hőmérsékletváltozás csak a főtérre jellemző, ott a csúcshőmérséklet meghaladja a 130°C fokot.

A tálca vízszintek nagyon gyorsan a maximumra nőnek a tranziens elindulása után, és 58 s elteltével rövid idő alatt gyakorlatilag egyszerre ömlenek le (25. ábra).

A főtér fala 81°C fokra melegszik fel a tranziens során, az 5 mm-re alatta levő réteg 67°C fok hőmérsékletet ér el.

A számítások szerint a falon a kondenzáció 45 s alatt eredményez 2 mm-es filmréteget. A szimulációban ez a határ, ennél vastagabb film nem képződhet, azt feltételezzük, hogy a víz lefolyik az alsó térrészbe.



25. ábra. A tálcavízszint változása a 492 mm-es LOCA esetről

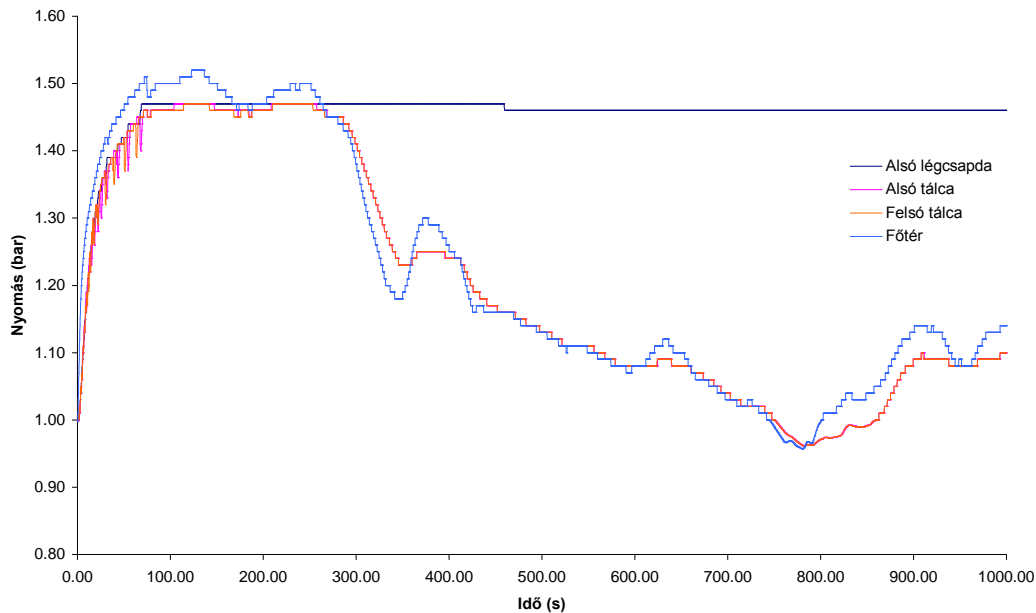
A zsomp szint eléri az 1,4 métert, a számítások szerint ebből a vízszintből 1 méterért a tálca leborulás vize felelős. A sprinkler rendszer 74 s-nél indul és 392 s-nál leáll, mivel a depresszió eléri a 0,85 bar-t.

A szellőzést a biztonsági rendszerek 0,8 s-el a tranziens indulása után leállították.

A másik törés (233 mm) kisebb szimulációjánál a nyomáscsúcs jóval kisebb (1,45 bar, 26. ábra)

A nyomás grafikonok a különböző nódusoknál nagyon hasonlóak, kivéve természetesen a légcspadát, ahol a nyomáscsökkenést megakadályozza a visszacsapó szelep működése.

A törés forgalma hamar azt okozza, hogy a tálcavízen átbuborékol a gőz/levegő keverék és emiatt a tálca vízszint megemelkedik. A tálcavízszint maximális marad 120 s-ig. A köpenytér szelepe nem reteszeli, mivel a nyomás nem éri el az 1,65 bar, így tálcacölmlés se lehetséges.



26. ábra. A nyomás időbeli változása a 233 mm-es LOCA esetről

A sprinkler rendszer 74s-nál kezd működni, és le se áll addig, amíg a számítás tart. A sprinkler rendszer nem tudja a nyomást 1,1 bar alá csökkenteni.

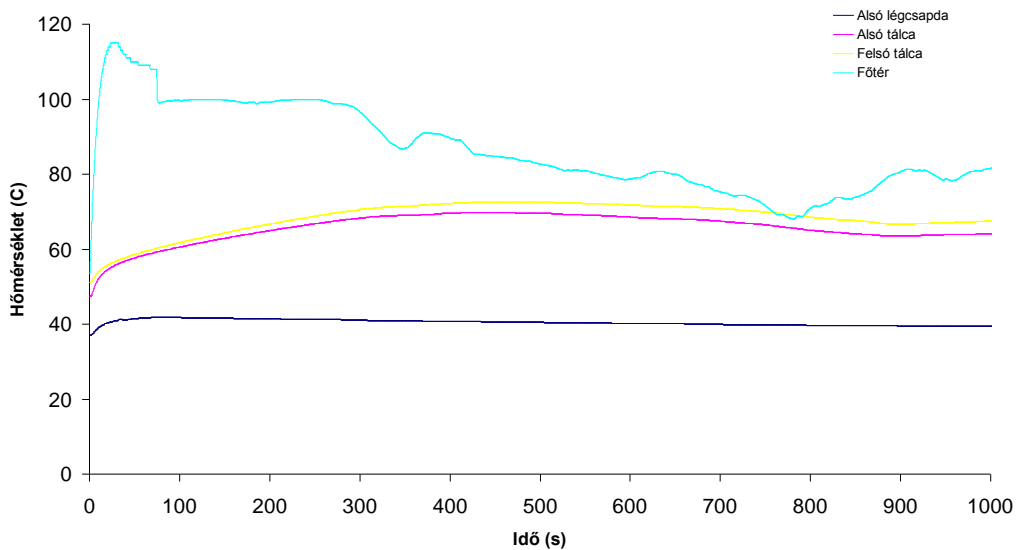
A hőmérséklet (27. ábra) az előző esethez hasonlóan csak a főtérben változik meg jelentősen.

A zsomp szint 0,3 m, a víz a primerkörből és a sprinkler rendszerből származik.

A főtér falának belső oldala 70°C fokra melegszik fel, az 5 mm–el alatta levő réteg csak 65°C-ig melegszik.

A kondenzáció miatt a maximális vastagságú (2 mm) vízfilm 89 s alatt képződik a falakon.

A főbb adatokat az alábbi táblázatban foglaltam össze, a kifolyás forgalmakat a RETINA kód számolta.



27. ábra. A hőmérséklet időbeli változása a 233 mm-es LOCA esetnél

4. táblázat. Az eredeti HERMET modell számítási eredményeket összefoglaló táblázat

| Paraméter / esemény | 492 mm-es LOCA | 233 mm-es LOCA |
|--|----------------|----------------|
| Maximum törésforgalom (kg/s) | 14314 | 2071,1 |
| Maximum főtér nyomás (bar) | 2,3 | 1,45 |
| Maximum légcsapda nyomás (bar) | 1,8 | 1,42 |
| Maximális hőmérséklet (°C) | 130 | 115 |
| Maximális fal felület hőmérséklet (°C) | 81 | 73 |
| Maximális fal felület hőmérséklet 5 mm mélyen (°C) | 67 | 65 |
| Szivárgás a környezet felé (kg) | 105,18 | 337,51 |
| A légcsapda szelep nyitás (s) | 1,6 | 1,6 |
| A légcsapda szelep csukódás (s) | 52,4 | 73,6 |
| A köpenytér szelep nyitása (s) | - | 279,2 |
| A diafragmák szakadása (s) | 2,2 | 4,2 |
| A tálcáleömlés kezdete (s) | 59 | - |
| Sprinkler indulás (s) | 74 | 74 |
| Sprinkler leállítás (s) | 392 | - |
| Szellőzés lekapcsolása (s) | 0,8 | 0,8 |
| 2 mm-es falfilm képződése (s) | 45 | 89 |
| Maximális zsomp szint (m) | 1,4 | 0,3 |
| Számítás időtartama (s) | 500 | 500 |

A HERMET kóddal végzett számítások rámutattak, hogy kód továbbfejlesztése elsősorban az alábbi területeken lenne fontos:

- A víz-gőz-levegő összetételű nódusok paramétereinek számítása a modell egyik legfontosabb lépése. A HERMET kód mintegy húsz évvel ezelőtti fejlesztésekor a szimulátor real-time igénye és az akkori számítógépes háttér miatt egy viszonylag egyszerű, mindössze néhány iterációt használó algoritmus készült. Ez megfelelő pontosságú eredményt ad akkor, ha a nódus paramétere nem változnak hirtelenszerűen. A csőtöréses üzemzavarok során a törést követően akár több tonna forró primerköri hűtőközeg is bekerülhet a hermetikus térbe, ami hirtelen megnöveli a nyomást és a hőmérsékletet. Ennek a folyamatnak a pontosabb leírásához szükséges volt és egy részletesebb és – a mai számítógépes lehetőségeket kihasználva - több iterációból álló modell kidolgozására. A részletes vizsgálatok rámutattak arra is a korábbi HERMET modell nem számolt a tágulási munkával, így annak beépítésére is sor került az új modellben. Ezeket a fejlesztéseket részletesen a 6. fejezetben mutatom be.
- A falban történő hővezetés modellezésre a HERMET kódba egy minimális memória és számítógépidő igényvel rendelkező analitikus modell volt beépítve. A falak vastagsága előre megadott, fix felosztással rendelkezett. A hermetikus tér belső részét vékonyabb, a külső pedig vastagabb rétegek alkották. A modell így jól vissza tudta adni a belső felülettel érintkező falak viselkedését, de elnagyolta a külső rétegeket. A szimulátoros oktatások során legfeljebb néhány órás folyamatok értékelésére van mód, ezért ott nem is jelentkezett igény arra, hogy a falak nagyon hosszú idejű viselkedéséről legyenek adatok. A modell lecserélése egy flexibilis új eljárásra jelentősen növelheti az eredmények megbízhatóságát hosszú idejű elemzésekben, illetve lehetőséget adhat a környezeti hőhatások figyelembe vételére is. Az új falmodellt a 7. fejezetben ismertetem.
- A HERMET, illetve a HERMAKT kódokban a szivárgások a hermetikus tér falánál érnek véget. A környezeti kikerülés útvonala azonban ennél bonyolultabb, az erőmű több helyiségét érinti és számolni kell a szellőztetés és szűrés hatásával is. A környezeti kibocsátás pontosabb meghatározásához szükségesnek tartottam a tényleges kibocsátási útvonalak modellezését, ezzel bővítve a korábban kidolgozott modelleket. A környezeti kibocsátás számításáról a 8. fejezetben számolok be.

6. A NÓDUSOK TERMOHIDRAULIKAI ÁLLAPOTÁNAK SZÁMÍTÁSA

6.1. A HSTATE függvény vizsgálata

A HERMET program egyik legfontosabb feladata a nódusok minél pontosabb állapotának kiszámítása. Ez az állapot a nódusba bekerült anyag és energia függvénye.

Minden nódusról minden időlépésben leltár készül, ami meghatározza az állapotát, ha energia vagy anyag kerül be illetve távozik, a nódus állapota változhat.

Ezt az állapotot az eredeti HERMET programban a HSTATE nevű függvény számolja. Ahhoz, hogy ezt a függvényt vizsgálni tudjam kivettem a HERMET programból és egy magában futó szoftvert készítettem belőle, így az egyéb modellek hatásait ki tudtam kapcsolni.

A függvény sorfejtéssel működik iteratív módon, az előző állapotból kiindulva határozza meg a ΔT és a ΔP értékeit, és fixen 3 iterációval fut. A függvény kimenetét a levegő, illetve gőztáblázat értékeihez hasonlítottam.

Először a tiszta levegő állapotát számoltattam vele, egy 1000 m³-es nódust használva. Megadtam a nódusban levő levegő tömegét valamint belső energia tartamát, és vizsgáltam a HSTATE függvény által kiszámolt nyomást, hőmérsékletet. Apróbb hibák javítása után a függvény már jól számolt, az eredményeket az *Engineering Toolbox* nevű internetes oldalon talált értékekhez hasonlítottam (5. táblázat).

5. táblázat. A HSTATE számítás eredményei csak levegő esetén

| | | | | |
|-----------------|----------|----------|---------|----------|
| Várt érték | 325 K | 1 bar | 350 K | 1 bar |
| hstate számítás | 325,59 K | 1.01 bar | 351,57K | 1.01 bar |
| eltérés (%) | 0,18 | 1,536 | 0,45 | 1,186 |

Az eredmények jól egyeznek, de ez még nagyon egyszerű eset számítása volt, egy egyszerű gáztörvényt kellett csak a programnak számolni.

A következő összehasonlítást túlhevített gőz esetére végeztem, hasonlóan jártam el, a hivatkozásnak a WAHA program gőztáblázatát használtam.

Itt úgy jártam el, hogy kiválasztottam egy hőmérsékletet (40°C), ehhez a hőmérséklethez kiválasztottam egy sort, ahol az ott található adatokból a térfogat ismeretében meghatározható a tömeg, a tömeg és a hőmérséklet ismeretében a belső energia. A tömeg és a belső energia értéke

volt a HSTATE függvény inputja. Azt vártam, hogy a HSTATE függvény visszaadja a tömeg és belsőenergia felhasználásával kiszámolt nyomás és hőmérséklet értéket. A függvény 10 iterációs lépésig futattam, a 2. iterációtól kezdve nem változott az eredmény. A használt táblázat sor:

| T (K) | p (Pa) | rho_vap (kg/m ³) | u_g (J/kg) | rho_liq (kg/m ³) | u_f (J/kg) |
|------------|------------|------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| 0,3131E+03 | 0,6114E+03 | 0.4231E-02 | 0.2430E+07 | 0,9921E+03 | 0,1676E+06 |

6. táblázat. A HSTATE számítás eredményei telített gőz esetén

| | | |
|-----------------|-----------|---------------|
| várt érték | 313,15 °K | 6,11E-03 bar |
| hstate számítás | 313,36 °K | 6.04 E-03 bar |
| eltérés (%) | 0,067 | 1,14 |

Az eredmények itt is jól egyeznek (6. táblázat), az eltérés 1% körüli, de ez is még viszonylag egyszerű eset, mivel csak egy fázis van.

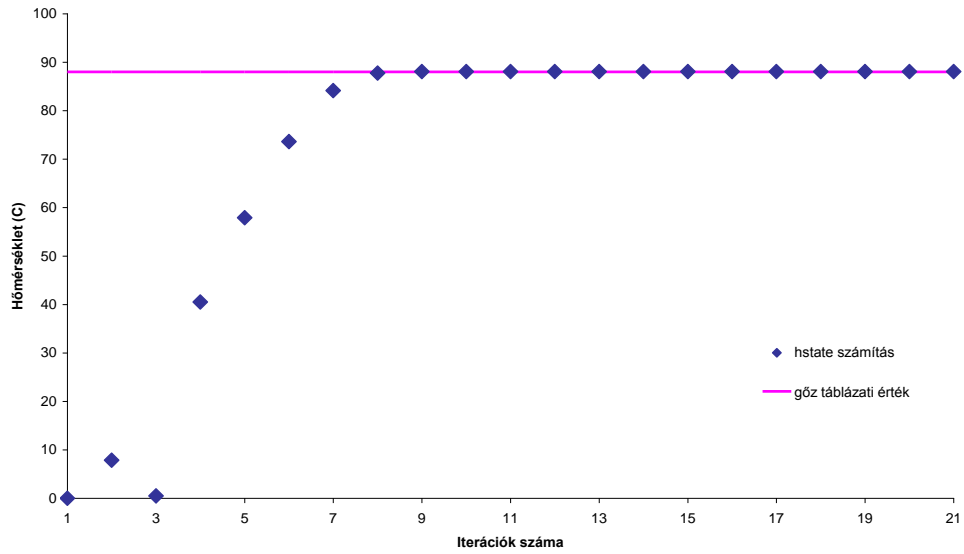
A következőkben telített gőz-víz fázisok esetére végeztem számításokat. Ezekben az esetekben úgy jártam el, hogy egy $V=1000 \text{ m}^3$ térfogatú térrészbe $m_{\text{össz}}=1000 \text{ kg}$ tömegű vizet tettem meghatározott belső energia nagysággal, ami különböző eseteknél rendre 300, 1200, 1600, 2100, 2600, 3000 MJ volt. Ez az input meghatározza a gőz/víz keverék állapotát, így a HSTATE függvény meg tudja határozni a gőz/víz elegy hőmérsékletét és nyomását valamint a víz és gőz fázis tömeg arányát ($x \text{ kg/kg}$). Az előzőekben is használt víz-gőz táblázatban ez a hőmérséklet és a nyomás meghatároz egy sort, ebben a sorban megtalálhatjuk az ilyen állapotú víznek és gőznek is a sűrűségét és fajlagos belsőenergia értékét. A HSTATE eredményből tudjuk, hogy mennyi külön a víz ($m_{\text{össz}} \cdot x$) és külön a gőz ($m_{\text{össz}} \cdot (1-x)$) tömege, ebből, a táblázatbeli fajlagos belsőenergia tartalomból, és a hőmérsékletből vissza tudjuk számolni a belső energiát. Ha a HSTATE összhangban van a táblázattal a különböző eseteknél, rendre vissza kell kapnunk a HSTATE inputjában szereplő belső energiát.

Ezeknél az eseteknél már több iterációs lépésre volt szükség a helyes eredmény meghatározásához, ennek szemléltetésére készítettem grafikonokat.

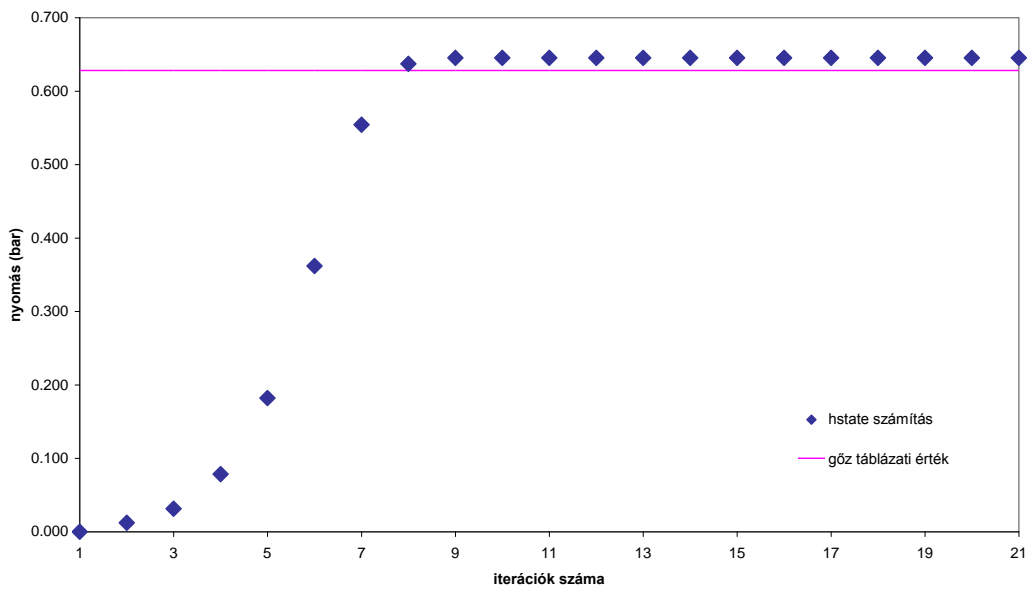
Az összes számítás grafikonjait nem illeszttem be ide terjedelmi okokból, 6 esetet számoltam végig, esetenként 3 grafikont készítettem. Három eseten mutatom be a kapott eredményeket (1200 MJ, 2100 MJ és 2600 MJ).

Az első esetben (1200 MJ) látható (28-30. ábra), hogy az eredmények jók, a probléma az, hogy az iteráció száma a jó eredményig jóval nagyobb, mint 3 (ennyi van fixen beépítve a HERMET programba).

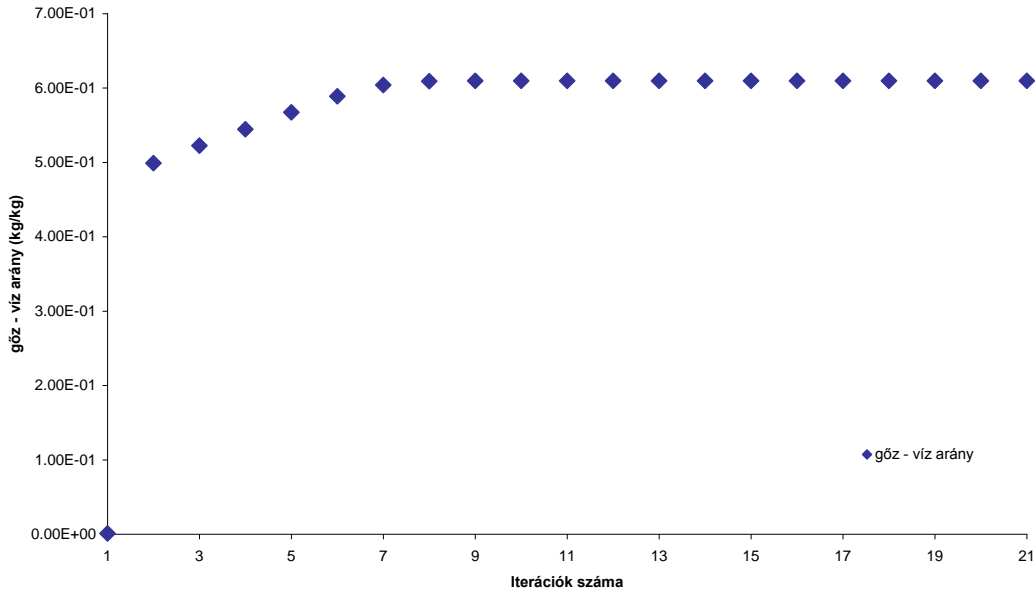
A HERMET futásakor nem „0” a kezdeti érték hanem az előző időlépésben számolt érték ezért a 3 iteráció sok esetben elég lehet.



28. ábra. A HSTATE függvény számítási eredményei a példa nódusra 1200 MJ belső energia esetén



29. ábra. A HSTATE függvény számítási eredményei a példa nódusra 1200 MJ belső energia esetén



30. ábra. A HSTATE függvény számítási eredményei a példa nódusra 1200 MJ belső energia esetén

HSTATE eredmények:

$$T = 88,07^{\circ}\text{C},$$

$$P = 0,64 \text{ bar},$$

$$X = 0,60$$

Az ehhez legközelebbi táblázat sor:

| T (K) | p (Pa) | rho_vap (kg/m ³) | u_g (J/kg) | rho_liq (kg/m ³) | u_f (J/kg) |
|------------|------------|------------------------------|------------|------------------------------|------------|
| 0,3611E+03 | 0,6280E+04 | 0,3771E-01 | 0,2498E+07 | 0,9666E+03 | 0,3685E+06 |

A táblázati értékekből kiszámolt belső energia értékek:

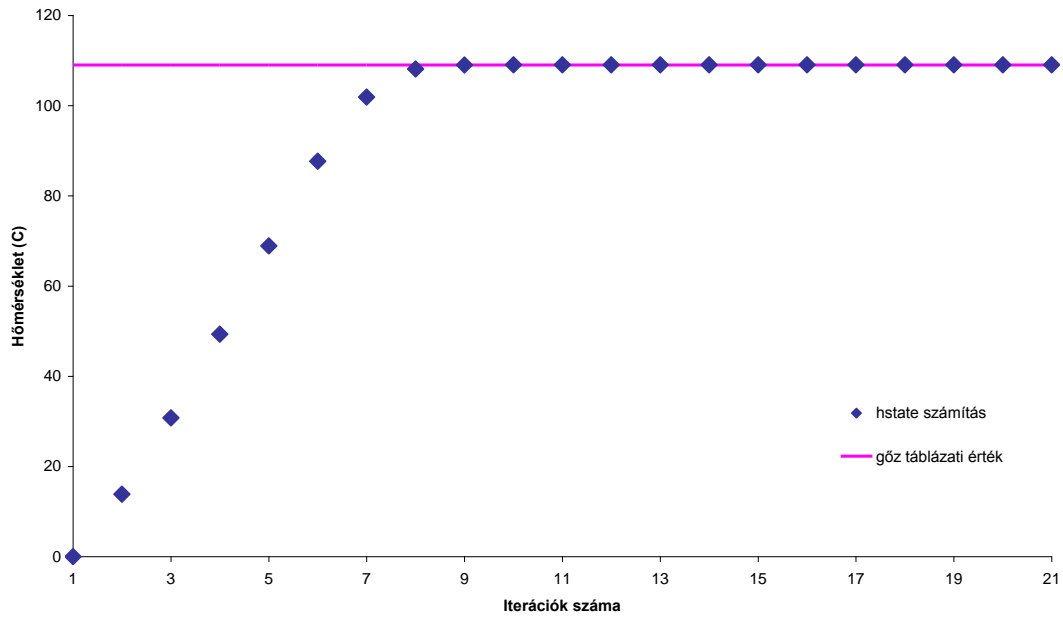
$$U_{\text{víz}} = 224,66 \text{ MJ}$$

$$U_{\text{gőz}} = 975,10 \text{ MJ}$$

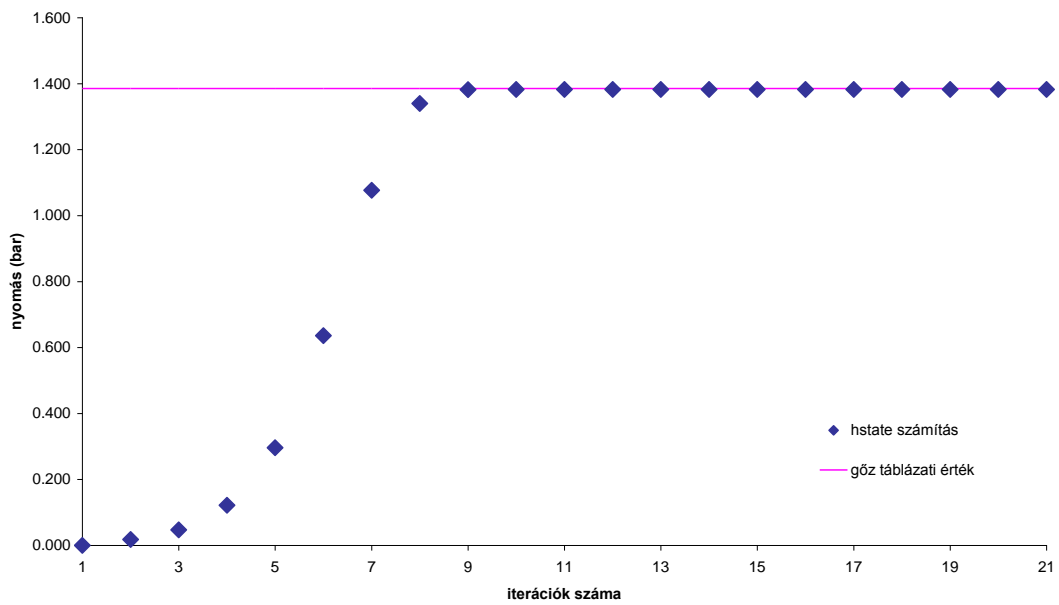
$$U_{\text{össz}} = 1199,77 \text{ MJ}$$

Az eltérés: 0,018 %

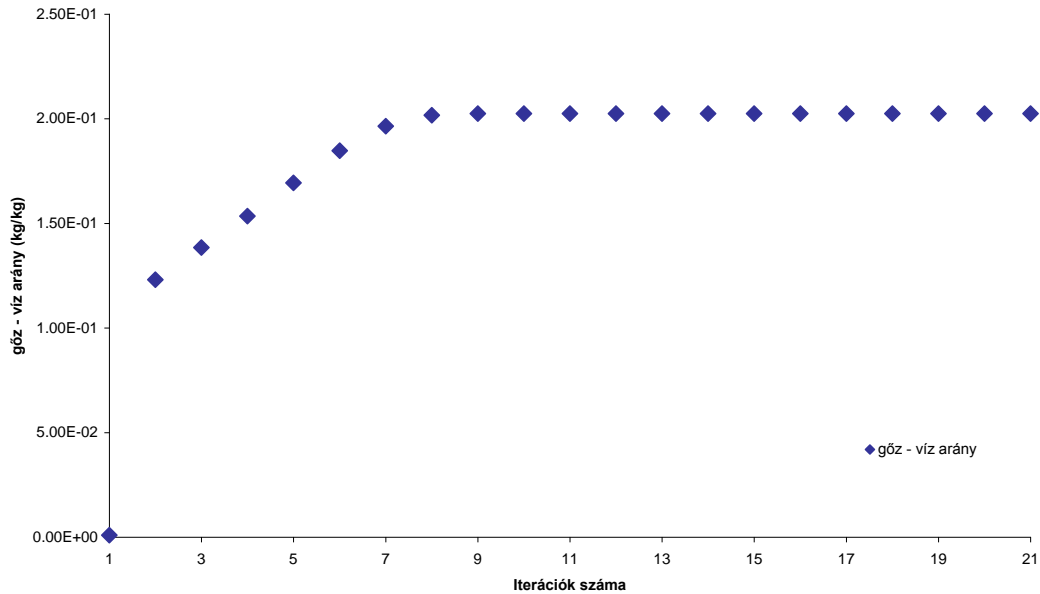
A 2100 MJ belső energia esetén kapott grafikonok (ábra 31-33.):



31. ábra. A HSTATE függvény számítási eredményei a példa nódusra 2100 MJ belső energia esetén



32. ábra. A HSTATE függvény számítási eredményei a példa nódusra 2100 MJ belső energia esetén



33. ábra. A HSTATE függvény számítási eredményei a példa nódusra 2100 MJ belső energia esetén

HSTATE eredmények:

T= 109,04°C,
P= 1,38 bar,
X= 0,202

Az ehhez legközelebbi táblázat sor:

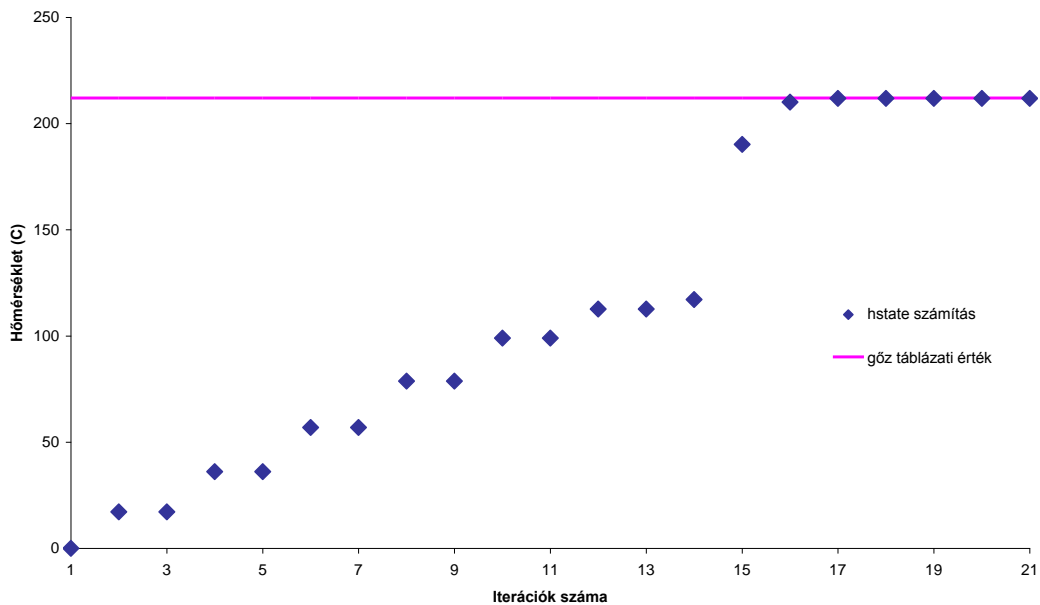
| T (K) | p (Pa) | rho_vap (kg/m3) | u_g (J/kg) | rho_liq (kg/m3) | u_f (J/kg) |
|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|
| 0,3821E+03 | 0,1384E+06 | 0,8003E+00 | 0,2516E+07 | 0,9517E+03 | 0,4569E+06 |

A táblázati értékekből kiszámolt belső energia értékek:

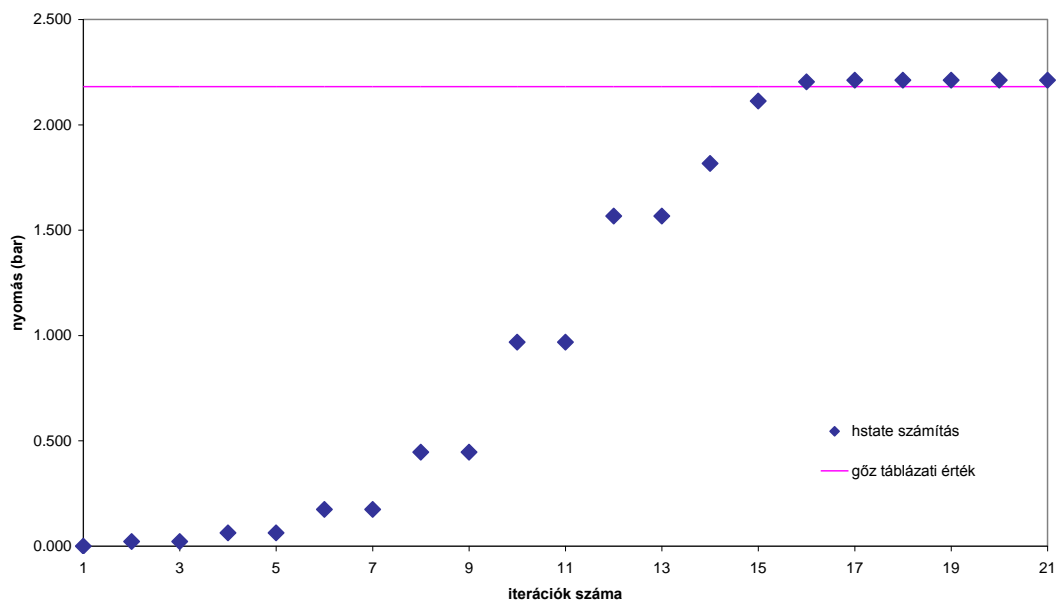
$U_{\text{víz}} = 92,5248 \text{ MJ}$
 $U_{\text{gőz}} = 2007,1583 \text{ MJ}$
 $U_{\text{össz}} = 2099,6831 \text{ MJ}$

Az eltérés: 0,015 %

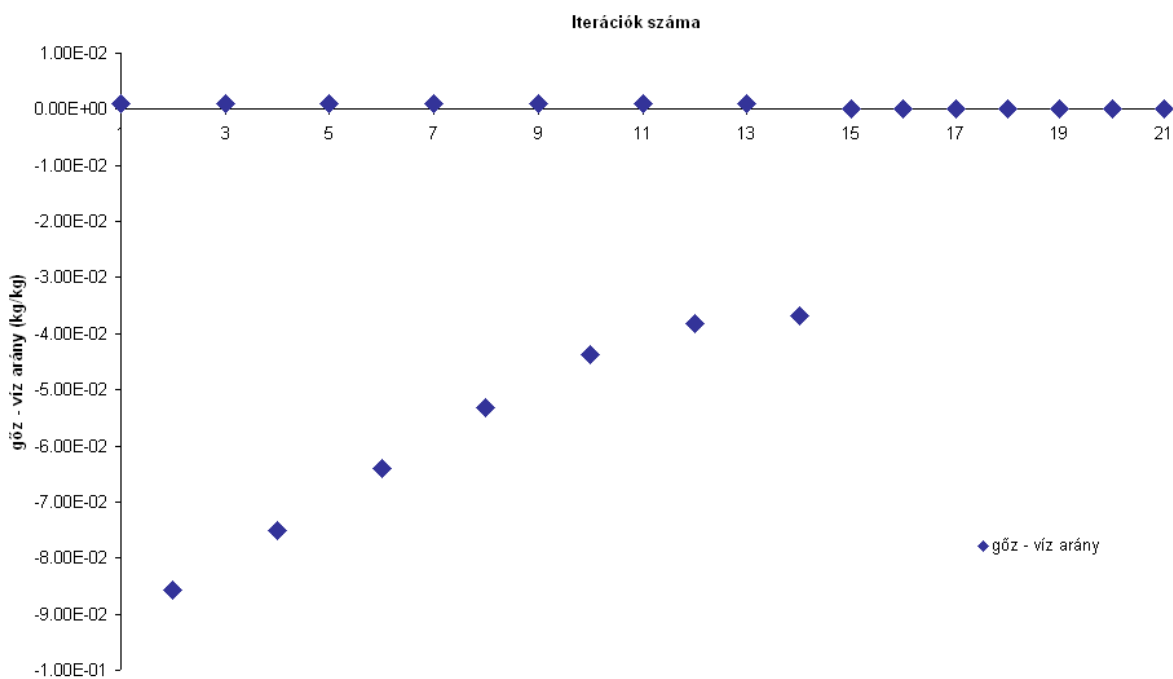
A 2600 MJ belső energia esetén kapott grafikonok (ábra 34-36.):



34. ábra. A HSTATE függvény számítási eredményei a példa nódusra 2600 MJ belső energia esetén



35. ábra. A HSTATE függvény számítási eredményei a példa nódusra 2600 MJ belső energia esetén



36. ábra. A HSTATE függvény számítási eredményei a példa nódusra 2600 MJ belső energia esetén

HSTATE eredmények:

T= 211,87°C,
P= 2,211 bar,
X= 0,0000

Az ehhez legközelebbi táblázat sor:

| T (K) | p (Pa) | rho_vap (kg/m3) | u_g (J/kg) | rho_liq (kg/m3) | u_f (J/kg) |
|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|
| 0,4851E+03 | 0,2180E+06 | 0,9842E+00 | 0,2671E+07 | 0,8488E+03 | 0,9059E+06 |

A táblázati értékekből kiszámolt belső energia értékek:

$U_{\text{víz}} = 0,0 \text{ MJ}$
 $U_{\text{gőz}} = 2671,7602 \text{ MJ}$
 $U_{\text{össz}} = 2671,7602 \text{ MJ}$

Az eltérés: 2,69 %

Az előzőkből kiderült, hogy a HSTATE program jól számolja külön a levegő és a vízgőz különböző állapotait, végül meg kívántam győződni róla, hogy amikor a térrészben egyszerre van

jelen víz, gőz és levegő akkor is jól számol-e a program. Ezt úgy értem el hogy először külön kiszámoltattam víz/gőz keverék és levegő állapotát, majd ezeket egyszerre betéve a térrészbe újra futattam a számítást, majd úgy is, hogy a kiinduláshoz képest a kiinduló víz/gőz keverék és levegő tömegét és belső energiáját is megfeleltettem.

A kiindulási paramétereket úgy állítottam be, hogy a hőmérséklet közel legyen 200°C fokhoz, a nyomás pedig a 2 bar- hoz. Az első esetben azt vártam, hogy a hőmérséklet 200°C környékén lesz, a nyomás viszont összeadódik, a 2. esetben pedig azt, hogy a hőmérséklet marad 200°C körül de a nyomás marad a kiindulási 2 bar közelében. A térfogat maradt 1000 m³.

A kizárólag levegőt tartalmazó térrész számítása:

input:
 $m_{\text{air}}=1472,06 \text{ kg}$
 $U=500 \text{ MJ}$

a számítás eredménye:
 $T=200,00^\circ\text{C}$
 $P_{\text{air}}=2 \text{ bar}$

A kizárólag víz/gőz keveréket tartalmazó térrész számítása:

input:
 $m_{\text{vöz}}=945,6 \text{ kg}$
 $U=2452 \text{ MJ}$

a számítás eredménye:
 $T=200,10^\circ\text{C}$
 $P_{\text{vöz}}=2,040 \text{ bar}$

A két inputot egyszerre alkalmazva:

input:
 $m_{\text{vöz}}=945,6 \text{ kg}$
 $m_{\text{air}}=1472,06 \text{ kg}$
 $U=2952 \text{ MJ}$

a számítás eredménye:
 $T= 200,0381^\circ\text{C}$
 $P_{\text{air}} = 2,040 \text{ bar}$
 $P_{\text{vöz}} = 2,000 \text{ bar}$
 $P_{\text{össz}} = 4,040 \text{ bar}$

A két inputban levő mennyiségeket felére csökkentve majd egyszerre alkalmazva:

input:

$$m_{\text{víz}} = 472,8 \text{ kg}$$

$$m_{\text{air}} = 736,03 \text{ kg}$$

$$u = 1476 \text{ MJ}$$

a számítás eredménye:

$$T = 200,0381^\circ\text{C}$$

$$P_{\text{air}} = 1,0000 \text{ bar}$$

$$P_{\text{víz}} = 1,0202 \text{ bar}$$

$$P_{\text{össz}} = 2,0202 \text{ bar}$$

Amint az a grafikonokból (28–36. ábra) látható, ahogy nő a belső energia, egyre több iteráció szükséges ahhoz, hogy a jó eredményhez közelítsen a függvény, vagyis biztos, hogy egy LOCA esemény indulásakor nem fog jó eredményt adni, a másik ezzel összefüggő hiba, hogy nincsen az eredménynek semmiféle ellenőrzése. Az se szerencsés, hogy a függvény ΔT és ΔP értéket számol ki. Ez azért hátrányos, mert ha valamiért egy időlépésben elcsúszik a számítás, akkor ezt a hibát ezzel a módszerrel tovább viheti a következő időlépésekre.

6.2. A nódusparaméterek számítása új algoritmussal

A fenti problémák javítása érdekében új számítási eljárást dolgoztam ki, amihez az is inspirációt adott, hogy Taubner Róbert a NUBIKI munkatársa, aki a CONTAIN nemzetközileg elismert konténment modellező eszköz jó ismerője, beleegyezett abba, hogy egyszerű, egy nódusos esetre mintaszámításokat végezzem számomra, és az eredményeket felhasználjam a HERMET kód állapotszámoló részének ellenőrzésére, javítására.

A összehasonlításhoz négy feladatot készítettem. A feladatok kiindulása mindenhol egy 50000 m^3 térfogatú nódus volt, amelyben 1 bar nyomású 50°C -os levegő van, mint kiindulási állapot. Ez az elrendezés közelíti a hermetikus tér valódi normál üzemi állapotát.

Azért nem használtam valódi kifolyást, mert azokban nagy és hirtelen változások vannak, és itt a fizikai modell jóságát akartam vizsgálni nem a numerikus stabilitást.

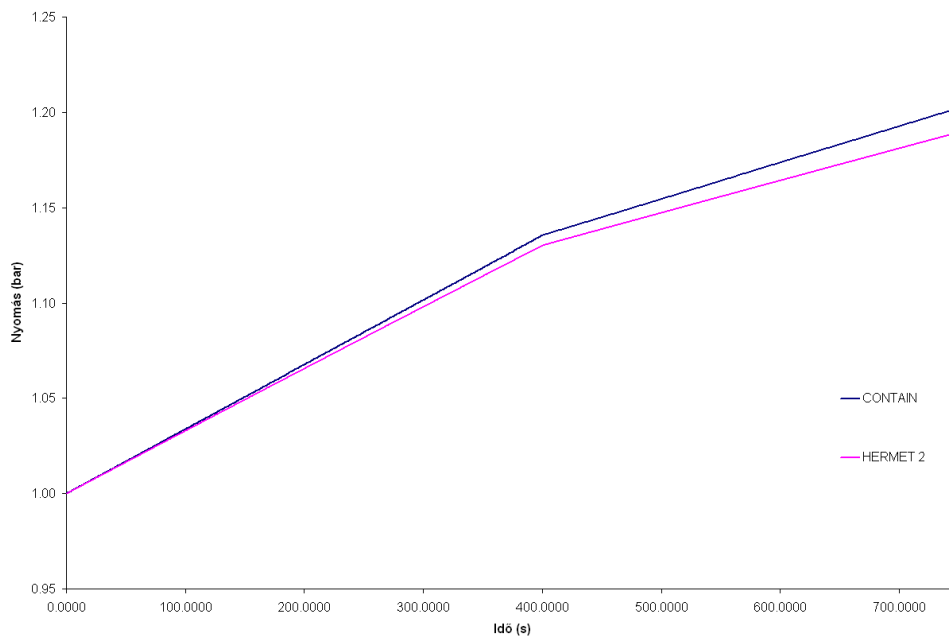
A feladatok (minden futás 750 s hosszú volt) :

- egyenletes 13 kg/s -s forgalommal levegőt nyomunk be a hermetikus térbe. A benyomott levegő hőmérséklete 400 s-ig 50°C volt majd -100°C lett a 750 s végéig.

- 492 mm-es törést utánzó kifolyás állapot számítása
- 233 mm-es törést utánzó kifolyás állapot számítása
- 73 mm-es törést utánzó kifolyás állapot számítása

A tisztán levegőt számító feladatnál meg is találtam az első eltérést, ugyanis a HERMET nem számolta a térfogati munkát, ami ahhoz kell, hogy a már bent levő levegőt összenyomjuk ahhoz, hogy még többet tudjunk bepréselni. Amíg bentivel azonos hőmérsékletű levegő került be, a hőmérséklet nem változott csak a nyomás a gáztörvények szerint.

A térfogati munkát $\Delta P \cdot \Delta V$ képlet alapján számoltam, ahol a ΔP az előző időlépéshez viszonyított nyomáseltérést jelentette, a ΔV pedig azt a térfogatot amennyivel kisebbre kellett az adott nyomáson összenyomnunk a bent levő levegőt ahhoz, hogy a befűvott levegő is be tudjon kerülni a térfogatba.

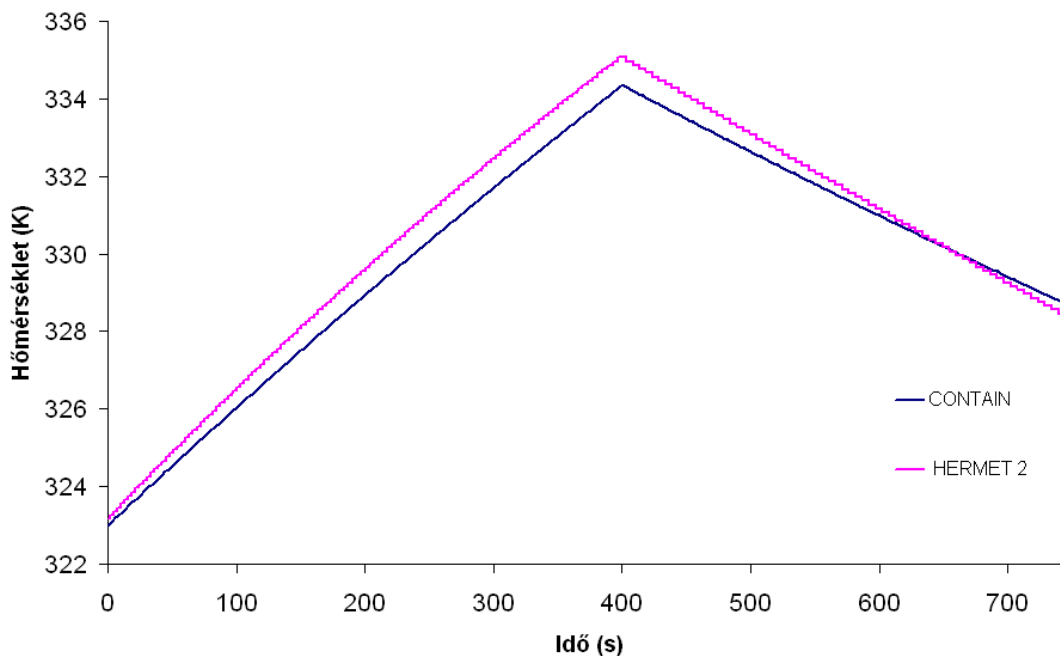


37. ábra. A tisztán levegő befűvatasos eset nyomás grafikonja

A módosítás után, ahogy a látható, a grafikonok (37, 38 ábra) jellege teljesen megegyezik, számértékek eltérése se jelentős (esetleg pontosabb levegő paraméterekkel lehet javítani a pontosságot)

Ezt a rutint az átvezetések számításánál kell majd elsősorban figyelembe venni.

A következő három olyan esetre is számításokat végeztem, amikor az előzőekben megszabott térbe már nem csak tisztán levegő, hanem entalpia tartalommal meghatározott víz-gőz keverék is kerül a térbe. A három esetben használt idősor utánozta egy nagy LOCA (492 mm) egy közepes (277 mm) és egy kicsi (73 mm) idősorát.



38. ábra. A tisztán levegő befűtatásos eset hőmérséklet grafikonja

Az inputokban az idő oszlopa mellett a víz forgalom (kg/s) és ennek a víznek a pillanatnyi entalpiája (kJ/kg) volt még megadva. Igyekeztem a kifolyásoknál felismerhető 3 szakaszt (tisztá víz, 2 fázis, majd végül tiszta gőz) is utánozni.

A HERMET gőz/víz számoló rutinja jelentős átalakítást kapott, az eredeti verzió a ΔT és a ΔX -et számolta ki, ami azzal jár, hogy egy esetlegesen bekövetkező téves számítás tovább 'öröklődhet'. A módosított számítási eljárás nem veszi figyelembe az előző állapotot, azt a feladatot számolja ki, hogy adott térfogatban adott tömegű levegő és víz milyen hőmérsékletű adott entalpia tartalom mellett. A számítás algoritmus is különbözik a régi HERMET rutintól, ahol egy sorfejtés iterációját számolta a program (a számítás jóságát nem ellenőrizte), az új algoritmus a gőz-víz arányt keresi, mivel ez az arány meghatározza a víz-gőz rendszer

hőmérsékletét, ha ismerjük a hőmérsékletet, akkor abból a telítettséget feltételezve kiszámíthatjuk a gőz térfogatát, ennek a térfogatnak és a víz térfogatának együtt ki kell adni a nódus térfogatát.

Ha nagyobb térfogat jön ki, akkor az algoritmus csökkenti a gőz mennyiségét, ha kisebb térfogatot kapunk akkor növeli. A módszer intervallumfelezéssel közelít.

A gyakorlatban ez úgy néz ki, hogy az első közelítés az, hogy a gőz-víz tömeg egyenlő, vagyis a teljes víz-gőz tömeg 50%-a gőz. A belső energia ismeretében kiszámítjuk a hőmérsékletet, abból pedig az össztérfogatot (víz+gőz). Ha a kijött térfogat nagyobb, mint a nódus térfogata akkor tudjuk, hogy gőz/gőz+víz arány a 0 és 0,5 tartományban lesz. Ekkor feltesszük, hogy 0,25 az eredmény, ennek ismerete után tudhatjuk, hogy a további keresést a 0-0,25 vagy a 0,25-0,5 intervallumban keressük.

A nódus összes belső energiáját és térfogatát a következő összefüggésekkel fejezem ki:

(U : belső energia (kJ), c fajhő (kJ/kg), m tömeg (kg), x gőz víz arány, ρ sűrűség (kg/m³), μ fajtérfogat (m³/kg).

$$U_{\text{nódus}} = x \cdot m_{\text{v}} \cdot c_{\text{v}} \cdot T_{\text{nódus}} + (1-x) m_{\text{v}} \cdot c_{\text{g}} \cdot T_{\text{nódus}} + m_{\text{levegő}} \cdot c_{\text{levegő}} \cdot T_{\text{nódus}} \quad (5)$$

A hőmérsékletet kifejezve:

$$T_{\text{nódus}} = U_{\text{nódus}} / (x \cdot m_{\text{v}} \cdot c_{\text{v}} + (1-x) m_{\text{v}} \cdot c_{\text{g}} + m_{\text{levegő}} \cdot c_{\text{levegő}}) \quad (6)$$

A nódus térfogata a következőképpen írható fel

$$V = x \cdot m_{\text{v}} \cdot \mu_{\text{telített gőz}} + (1-x) m_{\text{v}} \cdot \mu_{\text{telített gőz}} \quad (7)$$

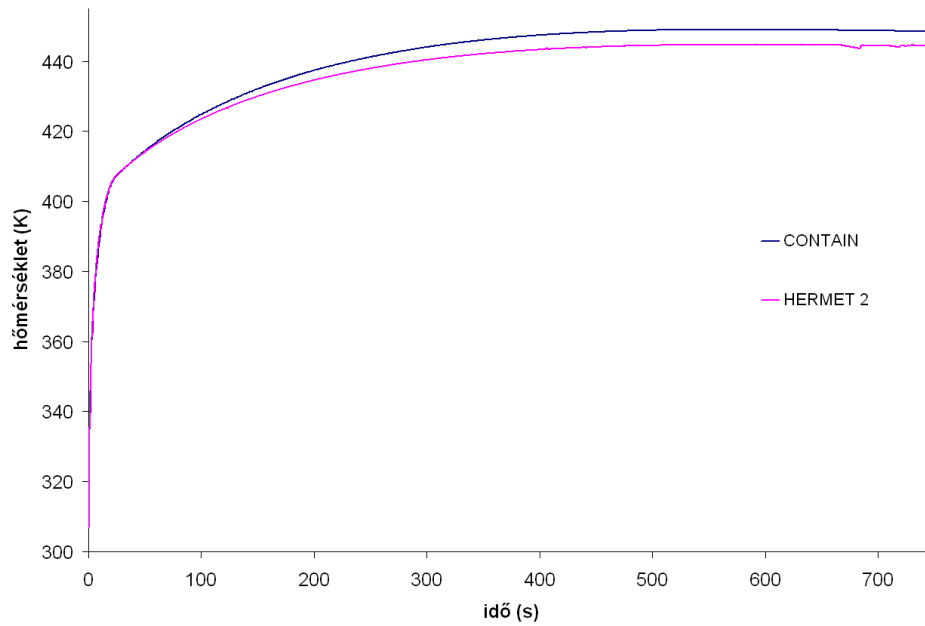
A telített gőz fajlagos térfogatának számértékét a következő függvénnyel számolom:

$$\mu_{\text{telített gőz}} = e^{(4700,8/(T)-11,88)} \quad (8)$$

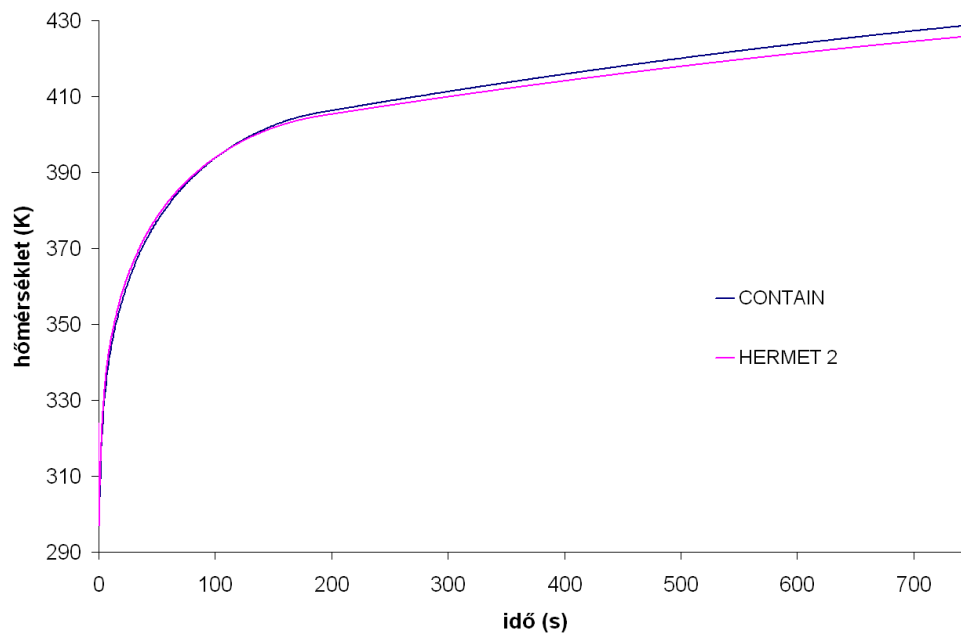
(A (8) függvény nagyon hasonló a HERMET programban használt eredeti állapotfüggvényhez, amelyet szűk paramétertartományra végzett illesztéssel állítottak elő [47].)

Ezzel a módszerrel tetszőleges pontossággal közelíthető a jó megoldás. A kereső algoritmus leállási feltétele az, hogy a gőz-víz rendszer állapotából visszakapott térfogat és a nódus térfogata között a különbség egy korlátnál (pl. 1%) kisebb legyen.

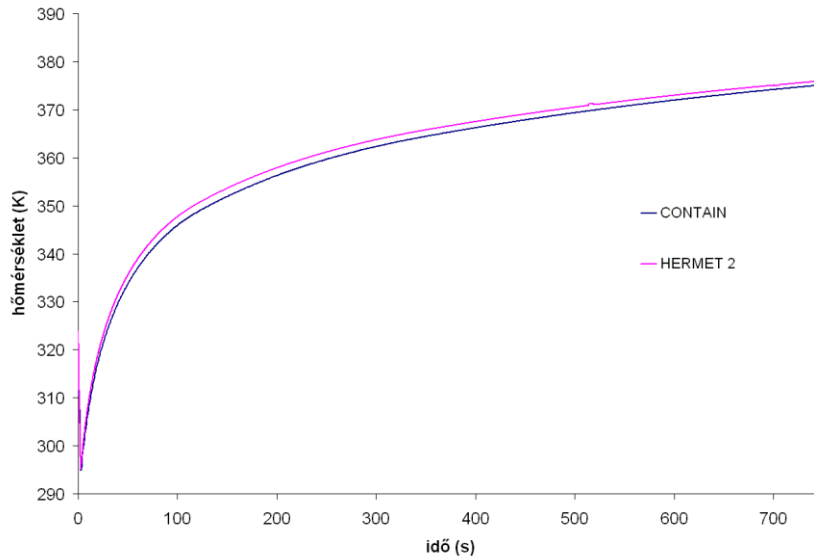
Az elkészített inputokat futtattam a CONTAIN programmal, az összehasonlítás szemléltetésére grafikonokat készítettem (39-41. ábra).



39. ábra. A hőmérsékletek összehasonlítása nagy LOCA közeli kifolyás esetén



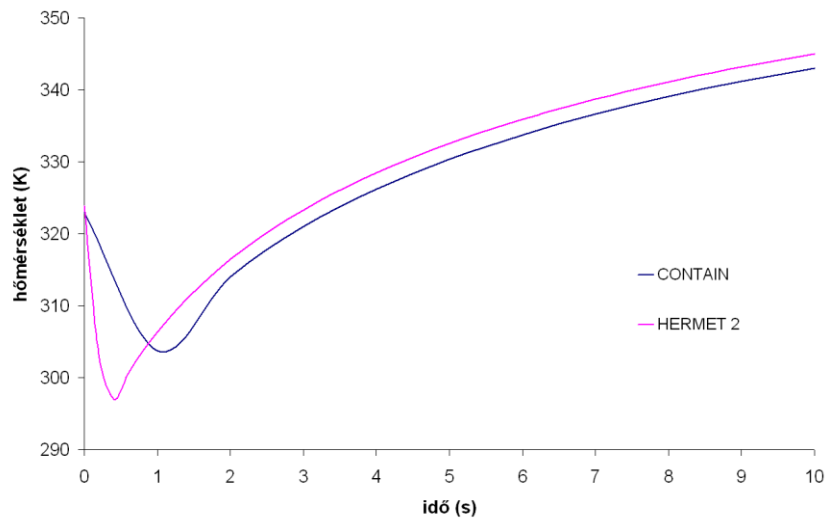
40. ábra. A hőmérsékletek összehasonlítása közepes LOCA közeli kifolyás esetén



41. ábra. A hőmérséklet összehasonlítása kis LOCA közeli kifolyás esetén

A 39-41. ábrákon látható, hogy a görbék jellege teljesen megegyezik, számértékben is kicsi az eltérés, ami a telített gőz állapotát számoló függvény módosításával valószínűleg tovább csökkenthető.

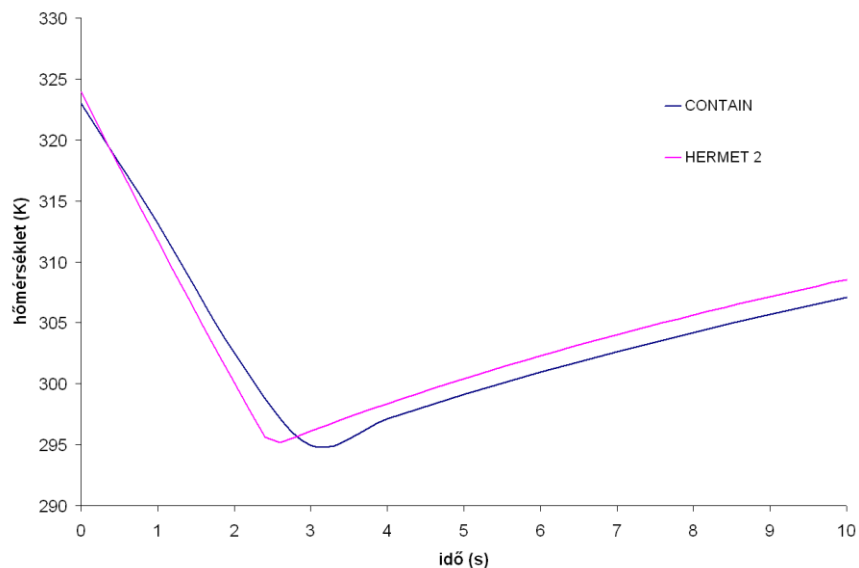
Ha közelebbről megvizsgáljuk az ábrákat, érdekes jelenséget vehetünk észre. A jobb láthatóság kedvéért két ábrát kinagyítottam, olyan módon, hogy csak az első 10 s-os futás látszódjon rajtuk (42-43. ábra).



42. ábra. A hőmérséklet összehasonlítása közepes LOCA közeli kifolyás esetén az első 10 s-ban

Ahogy a 42-43. ábrán látható a víz beömlésének hatására a térrész átlag hőmérséklete meredeken (kb. 20–30 K-t) zuhan.

A jelenség magyarázata lehet, hogy a kiömlő víz nagyságrendileg 1200 KJ/kg entalpiával rendelkezik. Gőz telítési entalpiája ezen a hőmérsékleten nagyságrendileg 2500 kJ/kg, a 100°C-os vízé 410 kJ/kg (nyilván a kettő különbsége a hőmérséklethez tartozó forráshő), vagyis a kiömlő vízben nincs elég entalpia ahhoz, hogy teljes egészében elforrjon és a telített állapot elérése ilyen viszonyok mellett csak hűléssel lehetséges.



43. ábra. A hőmérsékletek összehasonlítása kis LOCA közeli kifolyás esetén az első 10 s-ban

A valóságban egy LOCA első pár tized másodpercében, az hogy a teljes nádusban a gőz telített állapotban van, durva közelítés, ugyanis ilyenkor a kiömlés helyén víz és túlhevített gőz van, aminek egy kis idő kell, hogy a telített állapotot elérje a teljes nádusban, amíg ezt nem éri el a függvény nem tud pontosan számolni, mivel a jelenség csak pár másodpercig tart, így a gyakorlatban nincs nagy jelentősége.

Az általam kifejlesztett algoritmus lehetővé teszi, hogy a nádus állapotát az előző időlépéstől függetlenül nagy pontossággal meghatározzam. A CONTAIN-al való nagyfokú egyezés miatt, az algoritmust érdemes használni a régi függvény helyett, mivel - főleg egy LOCA esemény első pár percében - nagyrészt ez a modell felelős a nádus állapotának számításáért.

7. KÉTFÁZISÚ FALHŐVEZETÉS MODELL

LOCA eseménynél fontos modelleznünk az összes olyan folyamatot, ami a nódus hőmérsékletét, és ennek következményeként a nyomását befolyásolhatja. Az egyik legfontosabb ilyen folyamat a falak hővezetése.

Az eröműben levő falak többsége vastag betonfal, amelyek jelentős hőkapacitással rendelkeznek, ezeknek a falaknak a felmelegítése egy LOCA esetén jelentős mennyiségű hőt képes elvonni a hermetikus tér belsejéből.

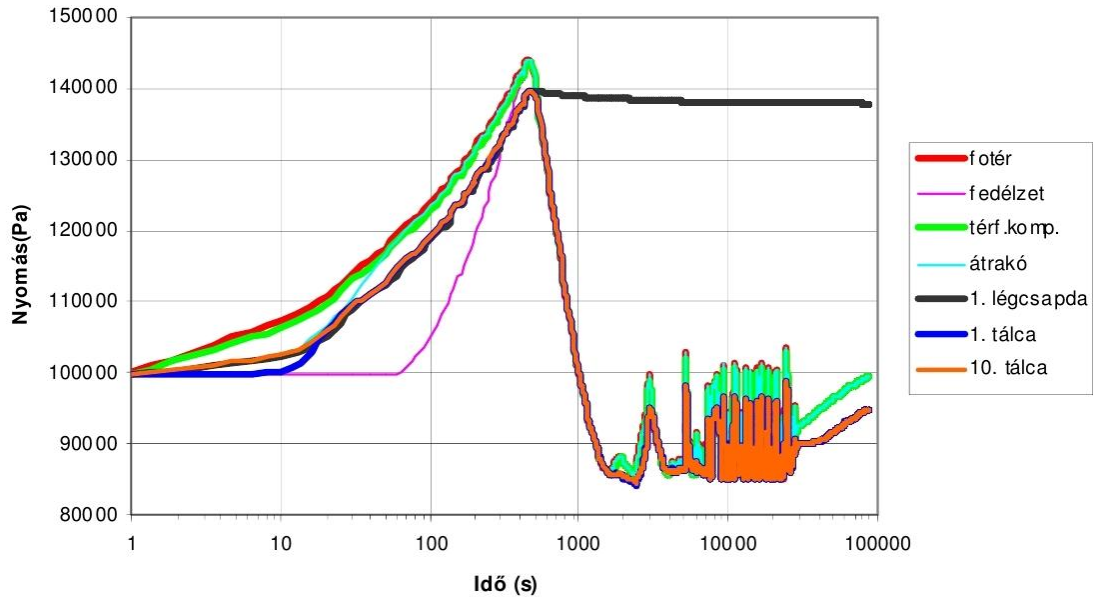
Ennek modellezése fontos része a hermetikus téri modellnek, a legfontosabb elvárás, hogy a falak által elvont energiát minél pontosabban meg tudjuk határozni, természetesen emellett a követelményen túl is igyekeztem minél pontosabban, jobban működő falmodellt létrehozni.

Kétfázisú működésre azért van szükség, mert a falak nemcsak gáz halmazállapotú anyagtól kaphatnak hőt, hanem a zompvíztől is, a két halmazállapot között nagyon nagy eltérés van hőátadási tényező szempontjából, ezt feltétlen figyelembe kell venni.

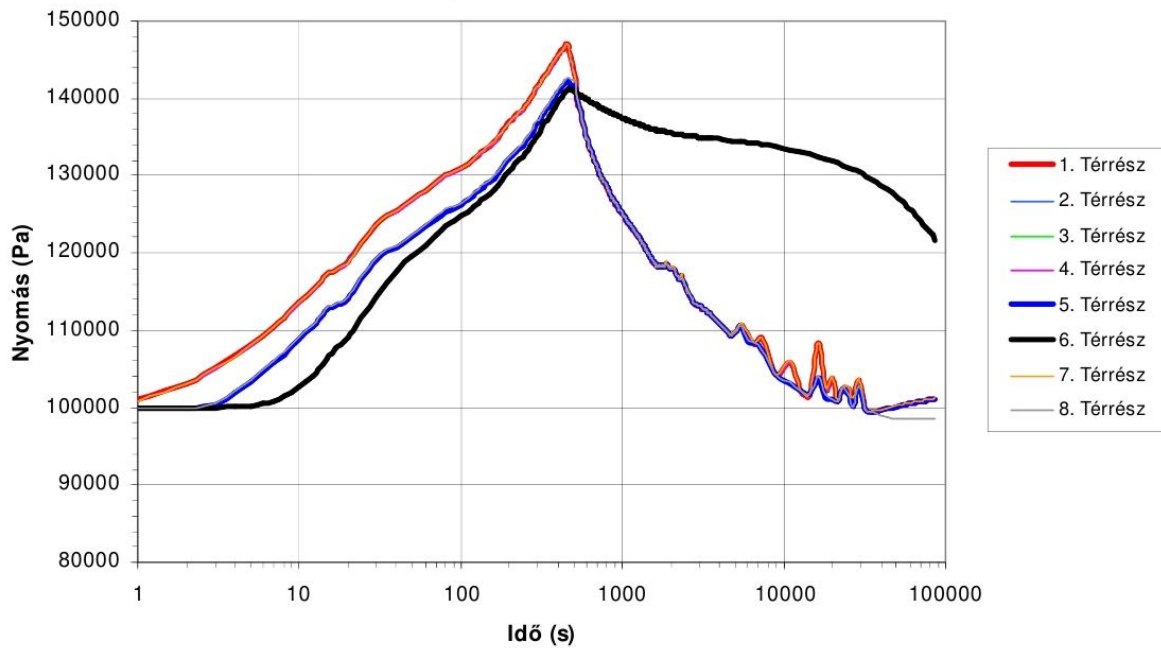
A HERMET program rendelkezik falhővezetés modellel – ami a program eredeti céljának, a nagycsőtöréses üzemzavarok első pár percének modellezésének megfelel -, de több ok miatt is jelentős fejlesztésre szorul. A számítási igények visszaszorítása miatt meglehetősen durva nodalizációval rendelkezik, a főtér és a kültér közötti vastag (1,5 m) fal például csak 9 részre van osztva. A fal felosztása nem egyenletes, (a rétegek vastagsága mértani sorozatot alkot) a fal belső oldalán néhány milliméteres réteget használ, míg a külső réteg majdnem 1 m vastag.

Ennek a rétegnek ráadásul a környezethez van rögzítve a hőmérséklete, ami azt jelenti, hogy hővezetés a környezet irányába nem lehetséges, és mint felvevő hőkapacitás se tud működni. Ez az elrendezés egy LOCA esemény kezdetén jól közelíthet, de hosszabb futásoknál eltérésekhez vezethet, erre utal a HERMAKT – CONTAIN összehasonlítások grafikonja (44-45. ábra). Falhővezetés vizsgálata szempontjából a légsapda paramétereit érdemes nézni, mert ott nincsenek biztonsági berendezések, csak levegő kerül be, tehát nincs kondenzáció, az állapotot hosszútávon a falhővezetés szabja meg. Ha megnézzük a grafikonokat (fekete vonal) akkor szembetűnő, hogy a HERMAKT légsapda nyomás grafikonja alig változik, míg a CONTAIN viszonylag nagy nyomáscsökkenést mutat. Ez arra utalhat, hogy a falak hővezetésének modellezése fejlesztésre, változtatásra szorul.

Meg kell jegyezni, hogy a CONTAIN számításnál a nyomásesést csak a falhővezetés nem magyarázhatja, ahhoz kicsi a fal (30 °C) és a levegő (40 °C) kezdeti hőmérséklet különbsége, itt elenyésző visszacsapószelep szivárgást is feltételeztek.



44. ábra. 90 mm-es törés HERMAKT nyomás görbéi [40]



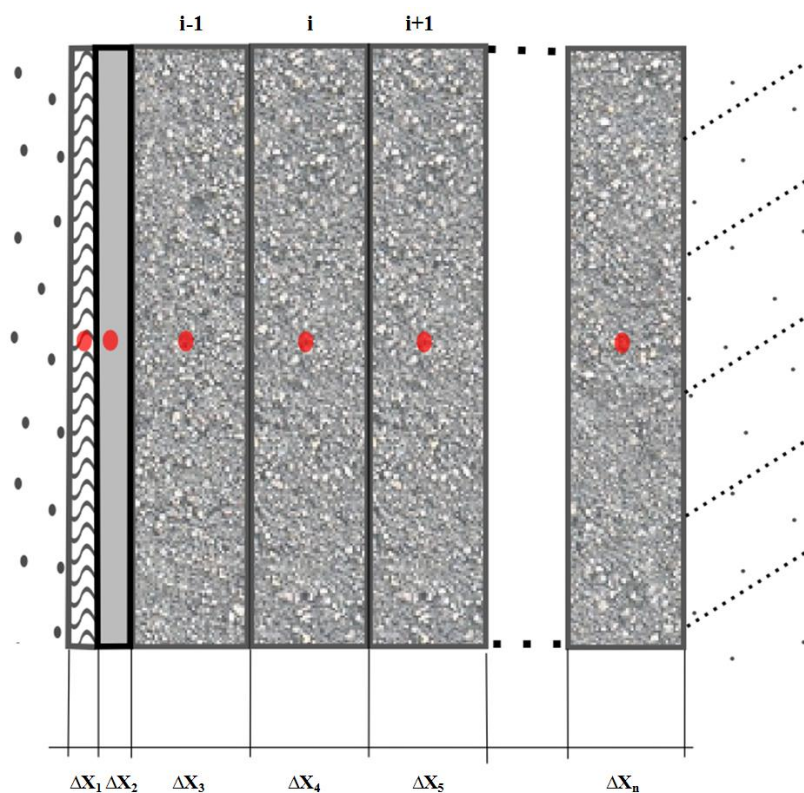
45. ábra. 90 mm-es törés CONTAIN nyomás görbéi [40]

Az eredeti HERMET modell a hővezetés differenciál egyenletének analitikus megoldását használja, amely gyors, de számos korláttal rendelkezik a numerikus megoldásokhoz képest.

A fentiek miatt új, numerikus megoldáson alapuló modell kidolgozása mellett döntöttem.

A 46. ábrán ábrázoltam a sémát, amit alapul vettem [48]. A baloldali szürke pöttyözés jelenti a hermetikus térben levő gőz-levegő keveréket, a hullámos vonallal satírozott rész a falon levő vízfilmet, a szürke réteg az acélborítást, a homokmintájú részek a betonban definiált rétegeket jelölik, az apró szürke pontok a külső levegőt jelképezik, a ferde szaggatott vonalak a napsugárzást.

A Δx_n jelöli a réteg vastagságát, i_n a réteg sorszámát. A piros pöttyök jelképezik, hogy annak a területnek egy hőmérsékletet feltételezünk. A lenti levezetésben az i -edik réteg hőmérsékletét számolom ki. A hővezetést úgy határozom meg, hogy a falat és az időt is diszkrét elemekre bontom.



46. ábra. A fal modell sémája

Az új modellnél nem a hővezetés differenciál egyenletéből indultam ki, hanem az energiaáramlás egyensúlyát (energiamegmaradást) írtam fel a falban, a nódusok között.

A T-nél a felső index az időlépést jelenti, az alsó a réteget jelöli. Δt jelöli az időlépést.

Az i -edik réteg hőmérsékletét szeretnénk kiszámolni a következő időlépésben.

A baloldalon zárójelben levő különbség két tagja a két oldalról kapott előjeles hőteljesítmény. Δt : az időlépés (s), k : hővezetési tényező (W/mK), T_i^p : az i -edik réteg hőmérséklete a p -edik időpontban ($^{\circ}\text{C}$), A : a felület (m^2), Δx : réteg vastagság (m)

$$\Delta t \cdot \left[-k \cdot A \cdot \frac{T_i^p - T_{i-1}^p}{\Delta x} + k \cdot A \cdot \frac{T_{i+1}^p - T_i^p}{\Delta x} \right] = \rho \cdot c_p \cdot A \cdot \Delta x (T_i^{p+1} - T_i^p) \quad (9)$$

Az anyagra jellemző állandókat összevonjuk:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (10)$$

Az egyenletet rendezve:

$$\frac{\alpha \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \cdot [T_{i-1}^p - 2 \cdot T_i^p + T_{i+1}^p] = T_i^{p+1} - T_i^p \quad (11)$$

Újabb egyszerűsítő jelölés bevezetése:

$$r = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (12)$$

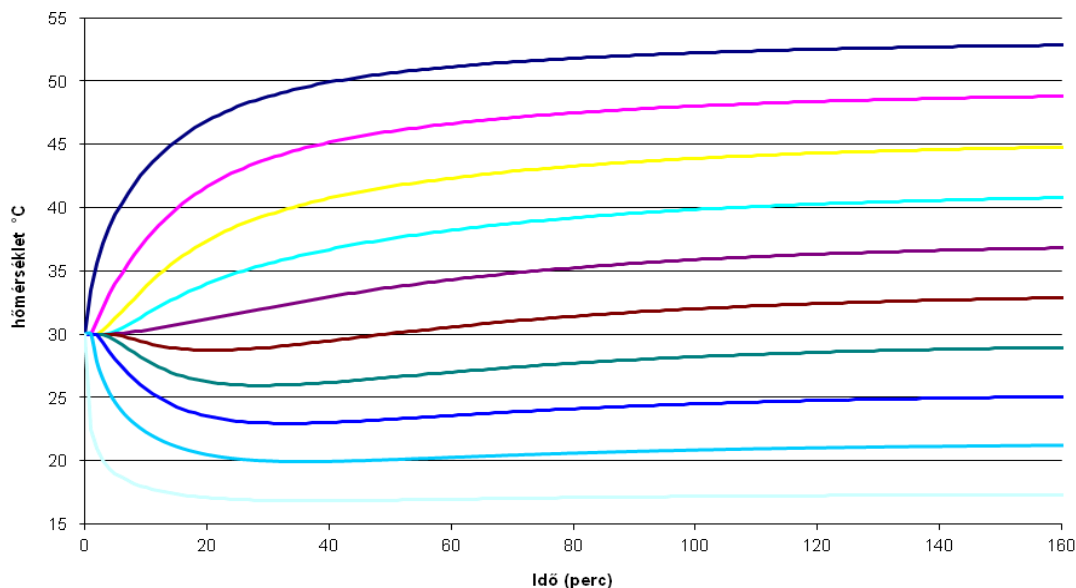
A végeredmény:

$$r \cdot T_{i-1}^p + (1 - 2 \cdot r) \cdot T_i^p + r \cdot T_{i+1}^p = T_i^{p+1} \quad (13)$$

Látható, hogy a kívánt hőmérséklet maradt csak a jobb oldalon, a baloldalon az előző időlépés hőmérsékletei mellett csak az r változó található, ami anyagi jellemzőkből áll, és idő valamint térbeli felosztásra jellemző adatokat tartalmaz. A számítás jól algoritmizálható, egy ciklusnak végig kell futnia i szerint (47. ábra). Az eljárás számítás igénye a mai számítástechnika szint mellett elenyésző, így ha szükséges finom felosztás is futtatható.

A fenti eljárás azonban csak azonos szélességű és anyagú rétegekre alkalmazható.

A többféle anyagból, és réteg vastagságból álló fal esetén összetettebb lesz a helyzet. Ebben az esetben egy falnak tekintjük a több részből álló falat, feltételezzük, hogy olyan szoros a kapcsolat hogy nem kell a hőátadás számítással törődni. Így tekintek a falon képződött vízfilm rétegre is.



47. ábra. Az egyenletes felosztású falmodell futtatása 55°C-os belső és 15°C külső hőmérséklet esetén, a vonalak az egyes rétegek hőmérséklet változását mutatják az időben. A fal kezdeti hőmérséklete 30°C volt.

Az egyenlet a következőképpen alakul:

$$\Delta t \cdot \left[-k_1 \cdot A \cdot \frac{T_i^p - T_{i-1}^p}{\Delta x_1} + k_2 \cdot A \cdot \frac{T_{i+1}^p - T_i^p}{\Delta x_2} \right] = \rho \cdot c_p \cdot A \cdot \Delta x_3 (T_i^{p+1} - T_i^p) \quad (14)$$

A kiszámítandó mennyiségre rendezve, és a felülettel egyszerűsítve:

$$\frac{\Delta t}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x_3} \cdot \left[-k_1 \cdot \frac{T_i^p - T_{i-1}^p}{\Delta x_1} + k_2 \cdot \frac{T_{i+1}^p - T_i^p}{\Delta x_2} \right] + T_i^p = T_i^{p+1} \quad (15)$$

Így nem kaptunk olyan elegáns, egyszerű összefüggést, mint az előző esetben, de végigtekintve az egyenleten azt láthatjuk, hogy a baloldalon az előző időlépésből ismert mennyiségek vannak.

Foglalkozni kell még a szélső rétegek esetével. Itt háromféle energiaátadással tudunk számolni:

- Hőátadás - mivel itt a fal mellett elhelyezkedő gőz, víz vagy levegőrétegről van szó (vagy ezek keverékéről), ezért számolni kell a hőátadási tényezővel. Ez szerepet játszhat a belső és a környezet felé eső oldalon is
- Kondenzáció - a falra lekondenzálódott víz az elforralásához szükséges energiát a falnak adja le, ez előfordulhat LOCA esemény esetén a forró gőz és a jóval alacsonyabb hőmérsékletű fal találkozásánál. A fal belső oldalán valósulhat meg.
- Hősugárzás - a konténmentet kívülről sütheti a nap, ami egy forró, derült nyári napon jelentős melegedést okozhat.

Ebben az esetben az egyik oldali falból származó hőáramlást felcserélem egy, a felületre normált ($P_{felületi}$ (W/m^2)) hőteljesítményre, ami a külső hőhatást írja le. Így ebből és az első valamint a második réteg előző hőmérsékletéből tudom számolni az egyes réteg hőmérsékletét a következő időpillanatban.

$$\Delta t \cdot \left[-A \cdot P_{felületi} + k \cdot A \cdot \frac{T_2^p - T_1^p}{\Delta x_2} \right] = \rho \cdot c_p \cdot A \cdot \Delta x_1 (T_1^{p+1} - T_1^p) \quad (16)$$

Itt is lehet a felülettel egyszerűsíteni, majd az első réteg következő időlépésére rendezve:

$$\frac{\Delta t}{\rho \cdot c_p \cdot A \cdot \Delta x_1} \cdot \left[-P_{felületi} + k \cdot \frac{T_2^p - T_1^p}{\Delta x_2} \right] + T_1^p = T_1^{p+1} \quad (17)$$

A modell attól lesz kétfázisú, hogy képes kezelni azt a helyzetet, amikor a fal mellett egy bizonyos magasságig víz van.

A víz hőátadási tényezője 10-50-szer nagyobb, mint a légnemű anyagoké. A modell előző levezetésénél is azt számítottam ki, hogy egy 1 m^2 fal hogy viselkedik hőátadás szempontjából. Természetesen egy valódi falnál a felület arányában nőhet, csökkenhet a fal által szállított hő, de a hőmérsékleti profil nem változik.

Hermetikus téri modell számításoknál azt tapasztaltam, hogy egy nagy LOCA esetén a zsompvíz magassága eléri az 1,4 m-t, vagyis a víz jelentős hőhatással lehet a falra.

A modellben ezt úgy kezelem, hogy az 1 m^2 -re felületre, ha megjelenik a víz a nádusban az előzőeknek megfelelően, van egy víz hőátadási tényezővel számított hőprofil (h magasságig) és egy gőz-levegő keverékre számított hőprofil ((1-h) magasságig).

A víz magasságán a következőkben a valódi falmagasság 1 m-es falmagasságra normált vízmagasságát értem.

A víz magassága változhat. Ez úgy jelenik meg a modellben, hogy ha nő a víz magassága (h , (m)), akkor a h értéke nagyobb lesz, tehát nagyobb magasságig lesz a víz hőátadási tényezőjével számított hőprofil.

Ezzel az a probléma, hogy a Δh -hoz tartozó levegő hőprofilhoz képest a víz profillal többlet energiát vinnék a falba a nagyobb hőátadási tényező miatt, ezért azt teszem, hogy a Δh -hoz tartozó levegő és víz hőátadásból származó többlet energiát levonom a vízprofillal számolt falrészről, nódusonként. Így energia szempontjából korrekt marad a modell, a vízzel szomszédos rész hőprofilja van a valóságos eredményhez képest módosítva. Mivel azonban nem számítunk nagyon gyors vízszint változásra, ez megengedhető közelítés.

Egy tálca leborulásokos esetről az 1 m-es vízmagasságot 70 s alatt éri el, vagyis egy időlépés alatt kb. 3 mm-rel változik meg a víz magassága.

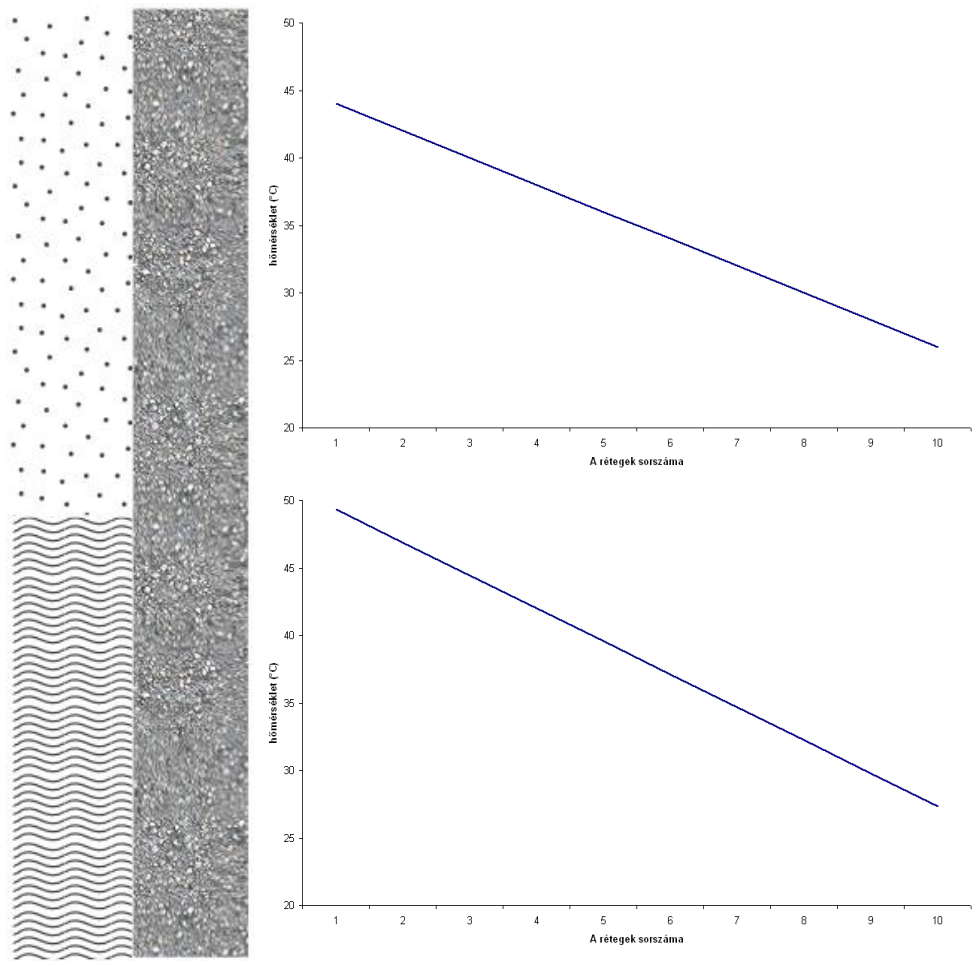
A tálca leborulás nélküli esetről a zompvíz 10 perc alatt éri el a 0,5 m-es magasságot. Itt az egy időlépés alatti vízszintváltozás 0,16 mm.

Ha csökken a vízszint, akkor csökkentem a vízprofillal számolt fal arányát, természetesen itt korrigálva a vízprofillal rendelkező részt úgy, hogy az energia megmaradás ne sérüljön.

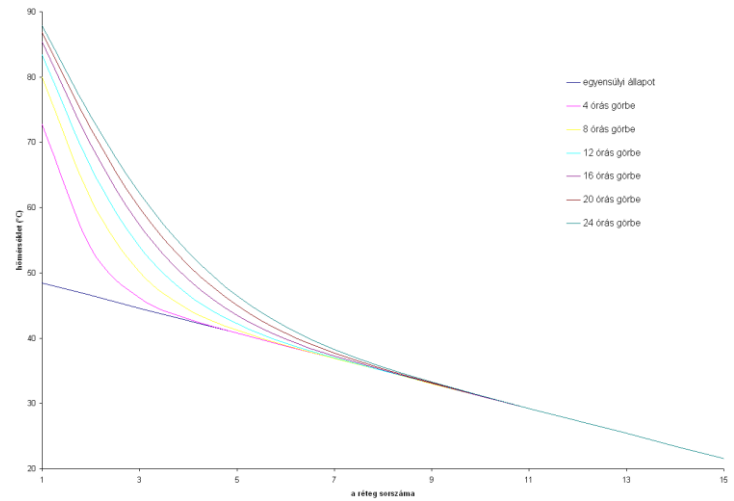
Példaként bemutatok egy futtatást (48. ábra), ahol a nóduson belüli részre 50°C-ot definiáltam, a külső hőmérsékletet 20 °C-nak vettem, a modellt addig futtattam, amíg a stacionárius állapot be nem állt. Látható, hogy a gázzal szomszédos részen a egyensúlyi hőmérséklet 46 °C környékére állt be, míg a víz alatti részen meghaladta a 49 °C-ot. A külső hőmérséklet csak kis mértékben tért el (vízhőprofilnál: 27,3 °C gőz/levegőhőprofilnál: 26 °C).

Az általam fejlesztett modellnek a hosszabb LOCA futtatásoknál lehet szerepe, ugyanis a felhővezetés a 'lassabb' folyamat, ami sok órás, vagy akár napon túli futtatásnál lehet jelentős.

A modell pontos működése nagyon fontos lehet olyan kisebb LOCA eseményeknél ahol a nagy hatású rendszerek (buborékoltató tálcák) nyomás és hőmérséklet csökkentő reakciója kisebb (nincs tálca leborulás csak buborékolás), mint egy nagy LOCA-nál. Ezekben az esetekben a falhővezetés nagyobb jelentőséggel bírhat, pl. az esetleges lassú túlnyomás alá kerülés vizsgálata szempontjából.



48. ábra. A levegő és víz hőátadási tényezőjéből származó különbség szemléltetése



49. ábra. Hosszú idejű falmodell futtatás: a kezdeti belső hőmérséklet 50 °C, külső hőmérséklet 20 °C, a tranziens alatti belső hőmérséklet 100 °C, a fal 1,5 m vastag betonfal, 10 cm-es rétegekre osztva

8. A REAKTORCSARNOK MODELL, A KÖRNYEZETI KIBOCSÁTÁS BECSLÉSE

8.1. A hermetikus tér szivárgása

A környezet terhelésének számításához, nemcsak a hermetikus térben lejátszódó termodinamikai, egyéb fizikai, áramlástani (pl. aktivitás terjedési) folyamatokat kell ismernünk, hanem a túlnyomás okozta esetleges szivárgás mértékét és útjait is.

A hermetikus tér szivárgása radioaktív anyagot juttathat ki a környezetbe.

A hermetikus tér, mint a neve is mutatja, megépítésénél arra törekedtek, hogy légmentesen zárjon. A valóságban ez az elvárás nem reális, kismértékű szivárgás előfordulhat. Ennek az az oka, hogy az épület nagyméretű, és többféle nyitható elemmel rendelkezik, melyek szivároghatnak. A szivárgás mértéke nem modellezhető az épület összetettsége miatt, csak méréssel szerezhetünk információt róla. Az egyes, a szivárgásban valószínűleg résztvevő elemekre korlát van meghatározva, hogy mennyi legyen a maximális szivárgás. Ezeket a szivárgási faktorokat 1,5 bar nyomás különbségre adják meg (7. táblázat). Ha ezek az értékek a valóságban is teljesülnek, akkor a hermetikus tér térfogatát 50000 m³-nek véve a napi szivárgás csak ≈0,02%-os lenne.

7. táblázat. Az egyes technológiai elemek szivárgásának mértéke [41]

| A berendezés megnevezése | A szivárgás mértéke (m ³ /h) |
|--|---|
| Hermetikus ajtók | 1,93 |
| Szerelőnyílások | 7,266 |
| Csővezetékek, hermetikus tér lemezburkolat hegesztési varratok | 0,0263 |
| Kábelátvezetések | 0,0975 |
| Izoláló szerelvények | 0,0767 |
| Összesen | 9,3965 |

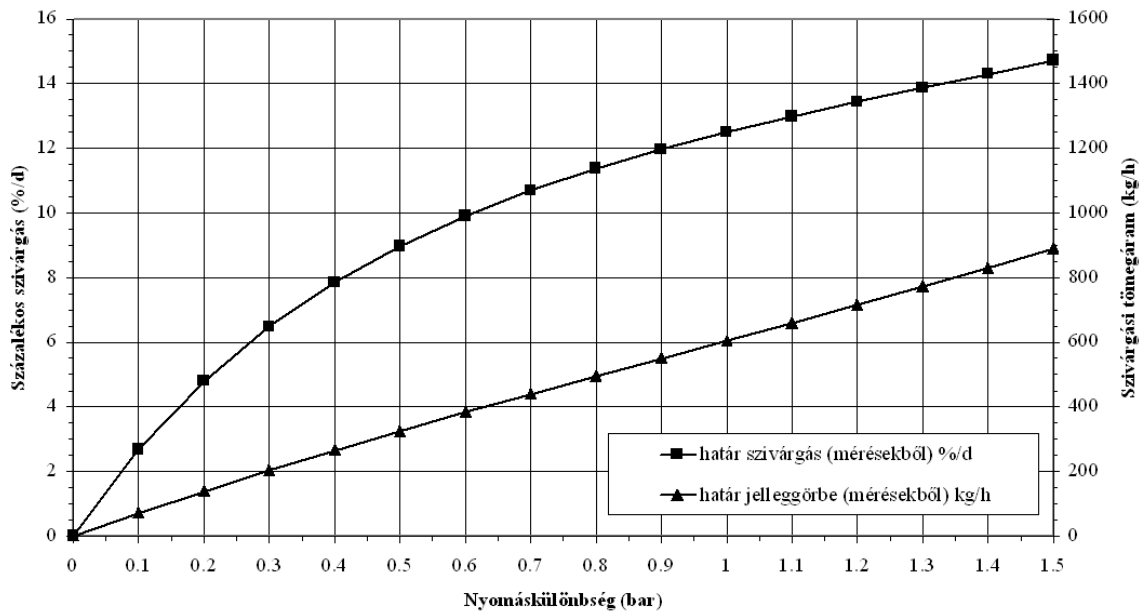
A szivárgási érték környezetvédelmi fontossága miatt rendszeres mérésekkel is meg kell győződni a valódi értékről.

A hermetikus tér napi szivárgási korlátja 14,7%/nap, vagyis a bent levő gáznak maximum 14,7%-át vesztheti el, teljes túlnyomáson (1,5 bar), egy nap alatt.

A mérést teljes méretezési túlnyomáson az üzembe helyezéskor végezték el [41], ez volt az első integrális tömörségpróba: ez egyben az épület szilárdságát is ellenőrizte.

A paksi atomerőműben éves rendszerességgel végeznek méréseket, amelyek a hermetikus tér tömörségét hivatottak ellenőrizni.

Ezeket a méréseket 0,2 bar túlnyomáson hajtják végre (főjavítás után megnövelt nyomáson (0,7 bar)).



50. ábra. A hermetikus tér szivárgását és a nyomását mutató grafikon [41].

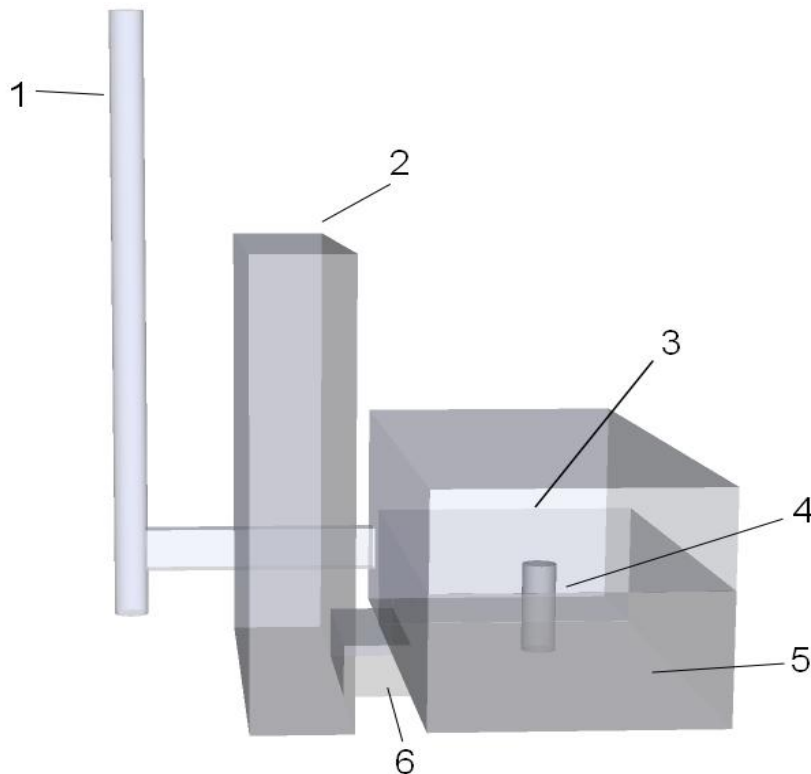
Mivel csak az 1,5 bar nyomásra lett meghatározva szivárgási korlát, ezért a csökkentett nyomással végzett mérésekből származó adatokat át kell számolni 1,5 bar nyomásra. Ehhez felhasználják az első integrális tömörségpróbán kapott értékeket.

A mérések a korlát alatti, 8-10% körüli napi szivárgást mutatnak a négy blokkon (50. ábra).

Az integrális tömörség vizsgálatot kétféle módon végzik:

- A hermetikus teret feltöltik levegővel a vizsgálati nyomásra, a levegőbefúvatást megszüntetik, mérik a levegő termodinamikai állapotjelzőit ebből a tömegvesztés számolható.
- A vizsgálati nyomás érték elérése után a nyomást tartják állandó értéken, levegő befúvatással, az ehhez szükséges levegőpótlás mértéke adja a szivárgás mértékét.

A hermetikus térből kiszivárgott gázok a kémény felé mozognak, legnagyobb részük (37%) a reaktorcsarnokon keresztül (51. ábra). A maradék szivárgásra hat másik út létezik, különböző helyiség-láncokon keresztül, közelítőleg egyenlő mértékben (10,5%) osztozva.



51. ábra. A VVER-440/213 reaktor sematikus rajza 1. kémény, 2. lokalizációs torony, 3. reaktor csarnok, 4. reaktor tartály, 5. hermetikus tér, 6. átömlő folyosó

A szivárgó gázok csak a kéményen – ellenőrzött úton – keresztül juthatnak a szabadba.

A környezetbe kerülő aktivitást két módon csökkentik:

- A gázok útjába szűrőket helyeznek.
- Igyekszenek a kibocsátást késleltetni, így a gyorsan bomló nuklidoknak csak a töredéke juthat ki.

8.2. A reaktorcsarnok fizikai modellje

Ahhoz, hogy számításokat tudjunk végezni, az előző fejezetben leírt rendszerre modellt hoztam létre, Deme Sándor konzulensem irányításával.

A modell tulajdonságai (52. ábra):

- A hermetikus tér nyomása, az oda kikerült aktivitás input adat.

- Feltételezzük, hogy a szivárgás arányos a túlnyomás mértékének négyzetgyökével, és 1,5 bar túlnyomáson éri el a napi 10%-os szivárgási értéket. Ha a hermetikus tér nyomása a légköri nyomás alá esik, a szivárgás megszűnik. Depresszió esetén a környezet felől a hermetikus térbe történő szivárgást nem vesszük figyelembe.
- Szivárgásban csak a gázhalmaz állapotú anyagok vehetnek részt.
- A modell figyelembe veszi a különböző hasadvány termékek eltérő viselkedését. A fűtőelem sérülésekor sokféle izotóp kerülhet be a primerköri vízbe. A modell felállításánál kiválasztottunk három izotópot, amelyeknek viselkedése hasonló lehet több egyéb izotóphoz (ilyenek például a nemesgázok), vagy sugárvédelmi, környezetvédelmi szempontból nagy jelentőséggel bírnak. A választott izotópok: ^{131}I elemi, ^{133}Xe , ^{137}Cs .
- Azt feltételezzük, hogy a ^{133}Xe teljes mennyisége – ahogy a többi nemesgáz is - a hermetikus tér légterébe kerül.
- A ^{137}Cs esetén azt feltételezzük, hogy egyenletesen oszlik el a kikerült vízben, annak halmazállapotától függetlenül, vagyis a szivárgásban résztvevő ^{137}Cs tömeg, a gőz/teljes közeg tömegarányától függ.
- A ^{131}I aktivitás is 100%-ban a légtérbe jut.
- A hermetikus térből csak az erőmű helyiségei felé van szivárgás.
- A helyiségek feléből az aktivitás közvetlenül jut a kéménybe, a másik feléből 99% hatásfokú aeroszol szűrőn át.
- Az aeroszol szűrők a ^{137}Cs 99%-át visszatartják, de nem tudják megfogni a ^{131}I elemi, és a ^{133}Xe izotópokat.
- A helyiségekben óránként egyszeres légcseré van.
- Az izotópok bomlását is figyelembe vettük.

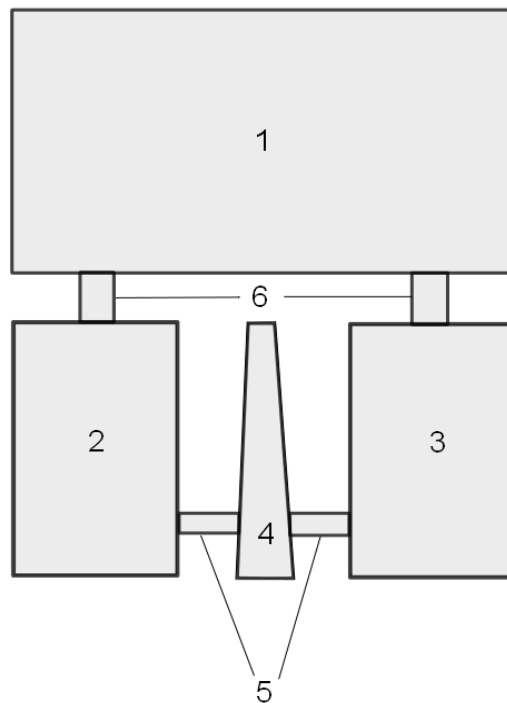
Az óránkénti egyszeres légcseré azt jelenti, hogy a szellőztetés olyan mértékű, hogy óránként a reaktor csarnok, és a szivárgásban résztvevő egyéb helyiségek levegő tartalmának megfelelő mennyiségű levegő kerül ki óránként a szellőzés által. Ha az aktivitás utánpótlás megszűnt egy LOCA-nál, akkor folyamatos aktivitáshígulást eredményez.

A primerkörbe kikerülő aktivitás mennyiségét a LOCA típusától tesszük függővé. A kikerülő aktivitás az EUR LOCA modell konzervatív megközelítése szerint adjuk meg, ami definiálja, hogy a zónaleltár hányad része jut ki a sérült fűtőelemekből a primerköri hűtőközegbe

[46]. Feltételezzük, hogy nagy (492 mm) LOCA esetén a fűtőelemek 100%-a, az összes többi esetben 1%-a sérül meg.

A modell nem számol a jód kiülepedésével a konténment falán, illetve a cézium kimosódásával a sprinkler hatására, ez a modell fontos továbbfejlesztési iránya lesz.

A fenti modellre számítógépes szimulációt készítettem.



52. ábra. A reaktorcsarnok modelljének sémája, 1. hermetikus tér, 2. helyiségek szűréssel, 3. helyiségek szűrés[nubi nélkül, 4. kémény, 5. átvezetések

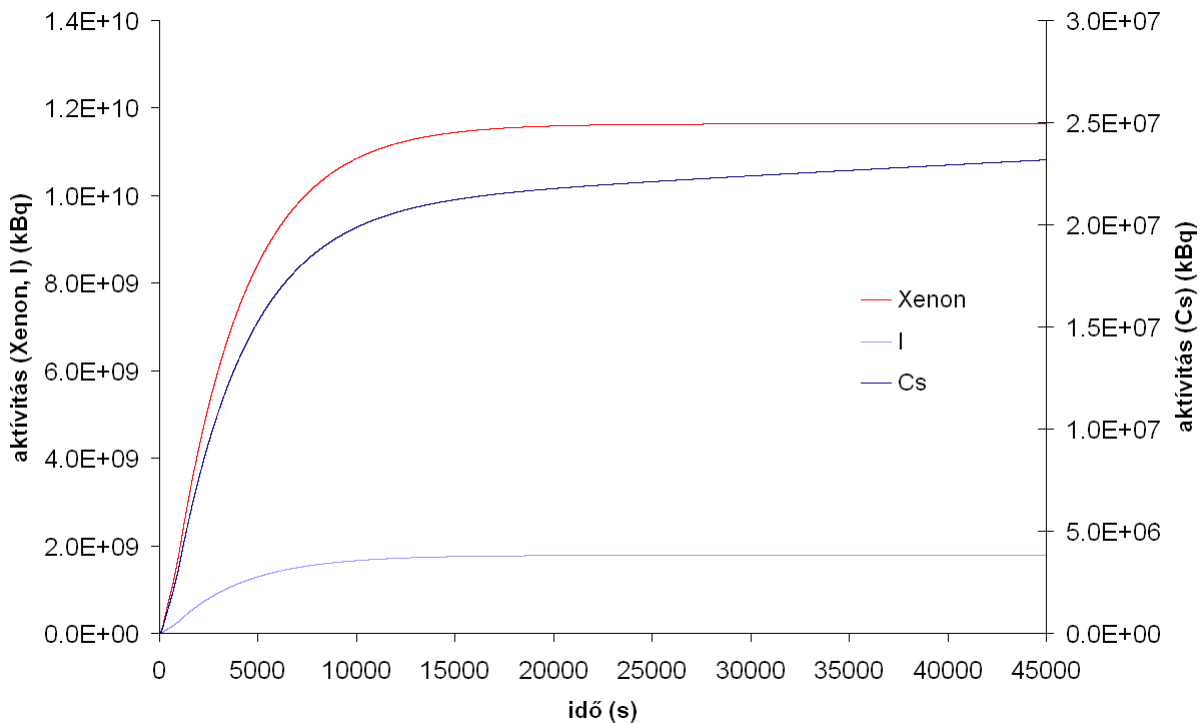
Az input adatok kiszámítására a HERMAKT programot használtam, ezekben az esetekben a nyomás grafikonjai jól egyeznek a NUBIKI (régábban VEIKI) munkatársai által végzett CONTAIN számításokkal a főtérre [40][42], és a HERMAKT képes az aktivitást is számolni, bár fűtőelem modellel nem rendelkezik. Ez az EUR konzervatív megközelítéshez [46] nem is szükséges. Három csőtörésre alkalmaztam a programot. Nagy csőtörés 492 mm-es (100%-a sérül meg), 111 mm-es (1%-a sérül meg), 73 mm-es (1%-a sérül meg). Az eredmények megértéséhez fontos a nyomás időbeli alakulásának ismerete, ezért a nyomás grafikonokat is közlöm.

8.3. A 492 mm-es törés számítása

A 492 mm-es törés esetén, mivel a nyomás meghaladja az 1,65 bar-t túlca leömlés is van, ami gyors nyomáscsökkenést, és átmeneti depressziót okoz. Utána a nyomást a sprinkler rendszer ciklikus működése a légköri nyomás környékén vagy az alatt tudja tartani.

A 492 mm-es törésnél azt feltételezzük, hogy a fűtőelemek 100%-a sérül, ami azt jelenti, hogy nagy mennyiségű izotóp kerül a primerköri vízbe. Amint (23. ábra) az ábrán látszik 50-60 s után, a légköri közelébe kerül a nyomás, így azt várhatjuk, hogy az azonnali illetve a késleltetett kibocsátás között jelentős különbség lesz.

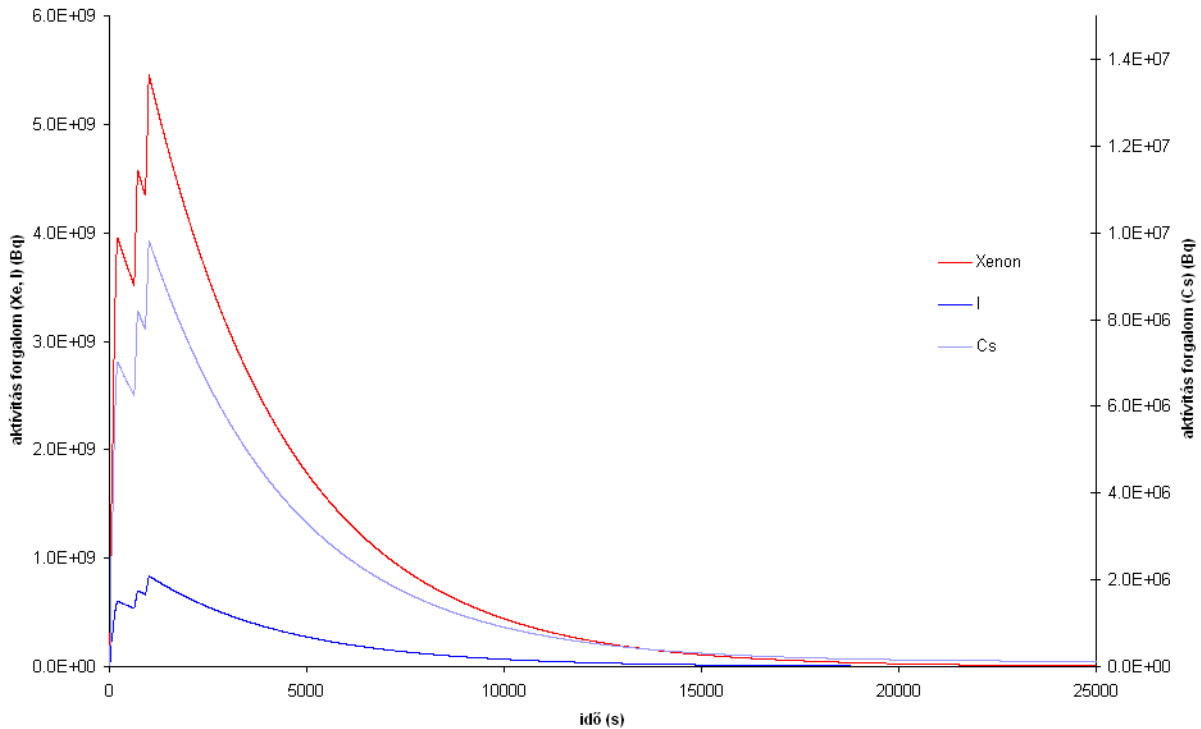
Grafikonon ábrázoltam (53-54. ábra) az összes kibocsátást, ami azt az aktivitás mennyiséget jelenti, ami a kéményen keresztül összesen kiment (ami nem egyezik meg az összes környezetben levő aktivitással), illetve vizsgáltuk az aktivitás forgalmát is.



53. ábra. Az összes a kéményen kikerült aktivitás a 492 mm-es csőtörés esetén

A hermetikus téren kívüli helyiségek puffer hatása miatt a kibocsátás egyre csökkenő mértékben, de akkor is folytatódik, amikor a hermetikus térben már nincs, vagy nincs jelentős túlnyomás (6. ábra). A szivárgás körülbelül 25000 s múlva lesz alig észlelhető mértékű. A cézium

esetén ez az idő kissé hosszabb ez azzal magyarázható, hogy a cézium felezési ideje jóval hosszabb (kb. 30 év), mint a másik két vizsgált izotóp pár napos felezési ideje, jódt és xenon esetében a szivárgás lecsengésében az izotópok bomlásának is jelentősége van.



54. ábra. A kémény aktivitás forgalma a 492 mm-es csőtörés esetén

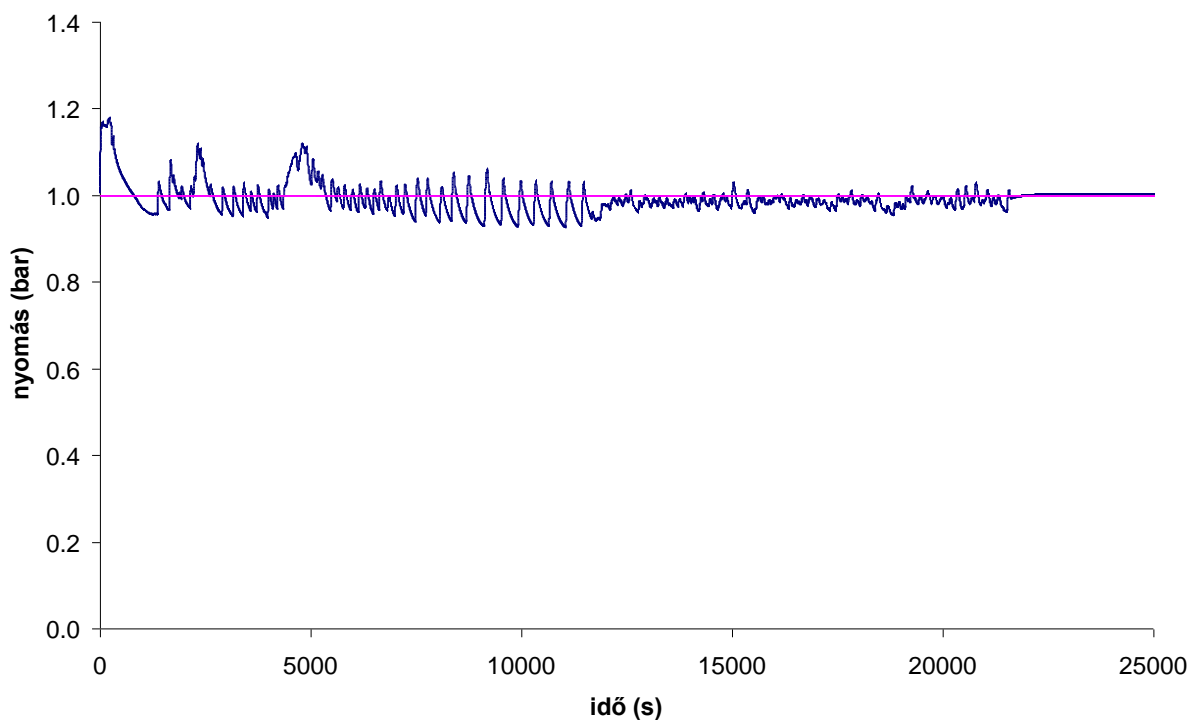
A legnagyobb kikerült aktivitás a xenon izotópból (53. ábra) származik.

A görbék jellege szabályos exponenciális függvényhez közeli, ami azt mutatja, hogy a kezdeti nagy nyomás által kinyomott aktivitás ürül ki folyamatosan a helyiségekből a kémény felé. 50 s után az atomerőmű nem hermetikus helyiségei felé jelentős szivárgás nincs a hermetikus térből.

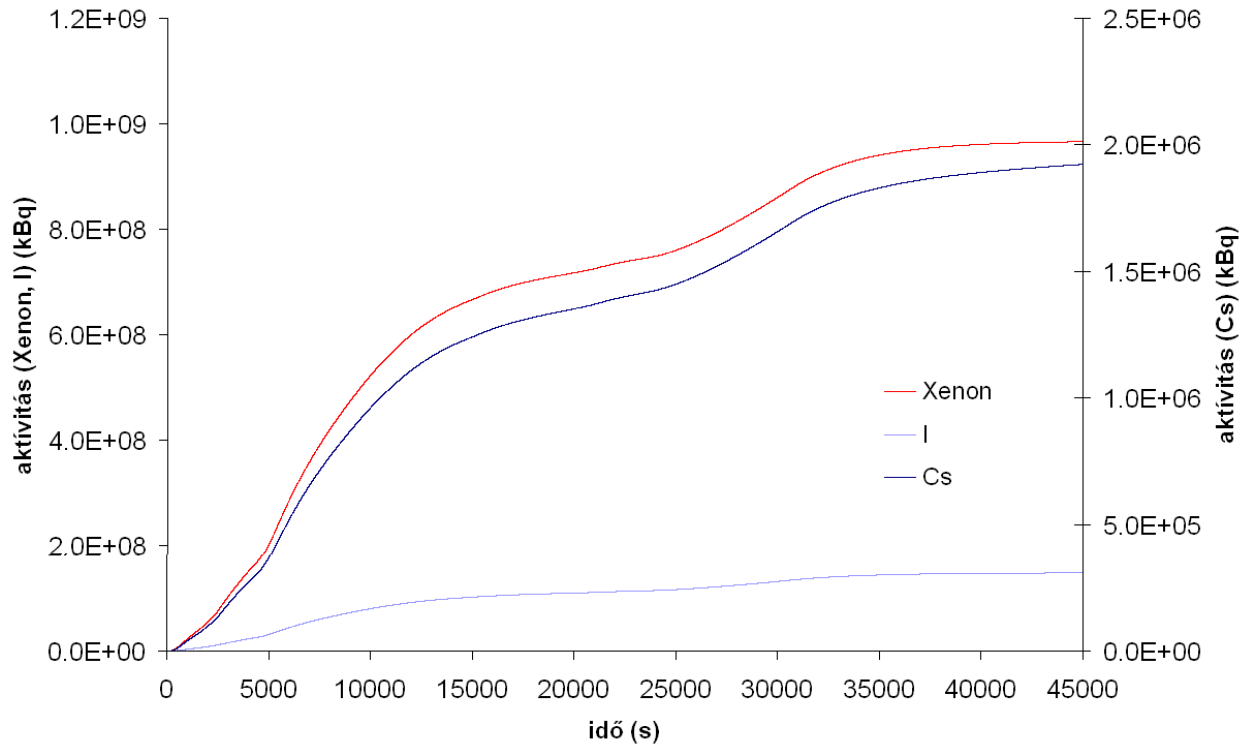
8.4. A 111 mm-es törés számítása

Ennél az esetről a nyomás végig 1,2 bar alatt marad (55. ábra), ami azt jelenti, hogy tálcavíz leömlés nem történik, nincs hirtelen nyomásesés. A nyomáscsökkentést itt a fal kondenzáció és a sprinkler rendszer okozza. Az üzemzavar lefolyása során időről időre a nyomás kissé a légköri nyomás fölé nő, ami a sprinkler berendezések bekapcsolását okozza. A sprinkler

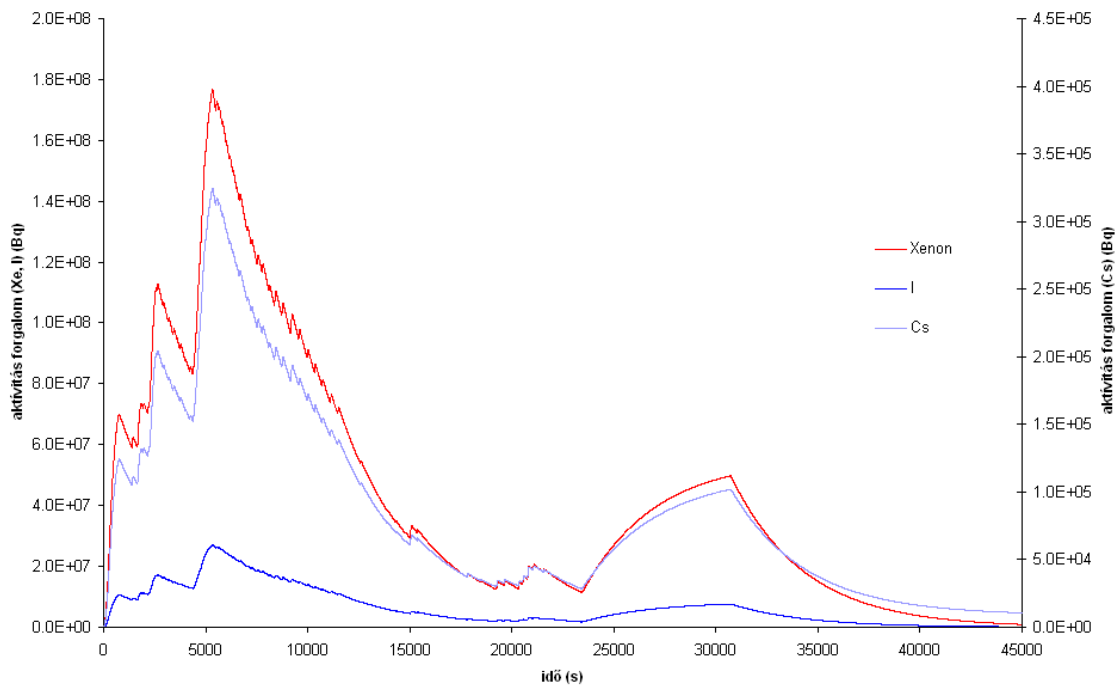
rendszerek a nyomás csökkenését okozzák, és ha a nyomás depresszióba vált, a sprinklerok kikapcsolnak. A nyomás 12000 s után már csak kisebb ingadozásokat mutat, illetve 20000 s után már tartósan légköri nyomásra áll vissza, így a kibocsátás időegység alatt rohamosan csökkenni kezd (56. ábra). Ennél az esetenél is a xenon felelős a legnagyobb kikerült aktivitásért a választott három izotóp közül (57. ábra). Az aktivitás forgalom csúcsai jól egyeznek a nyomás csúcsokkal.



55. ábra. A főtéri nyomás 111 mm-es csőtörés esetén



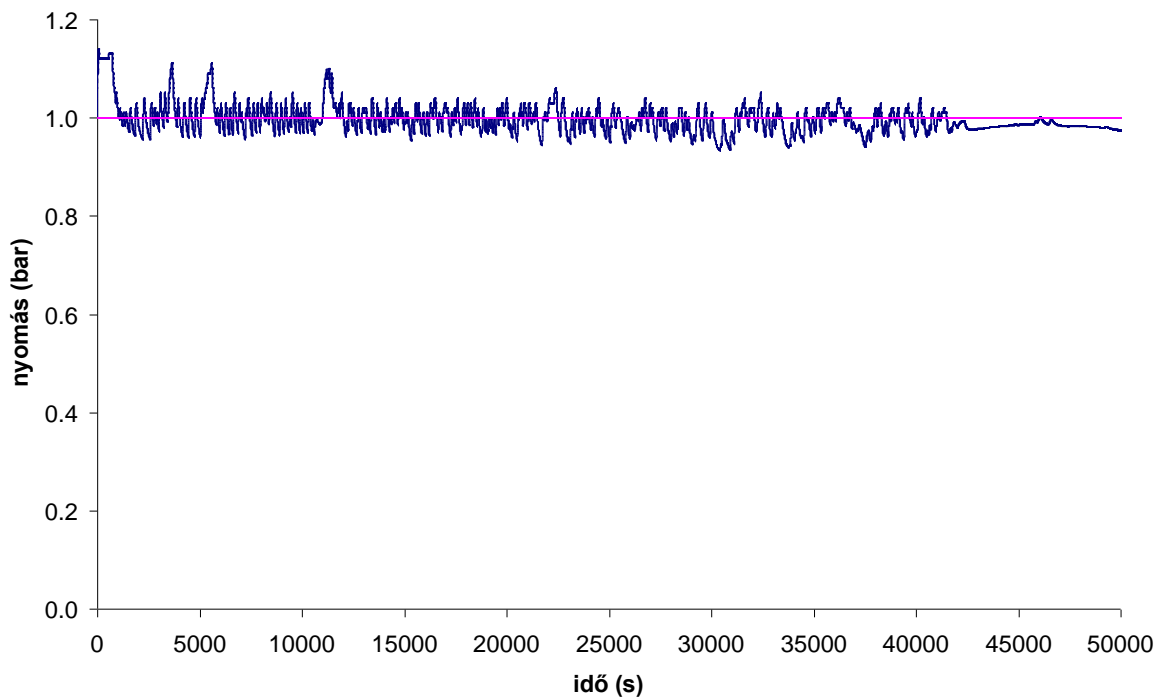
56. ábra. Az összes a kéményen kikerült aktivitás a 111 mm-es csőtörés esetén



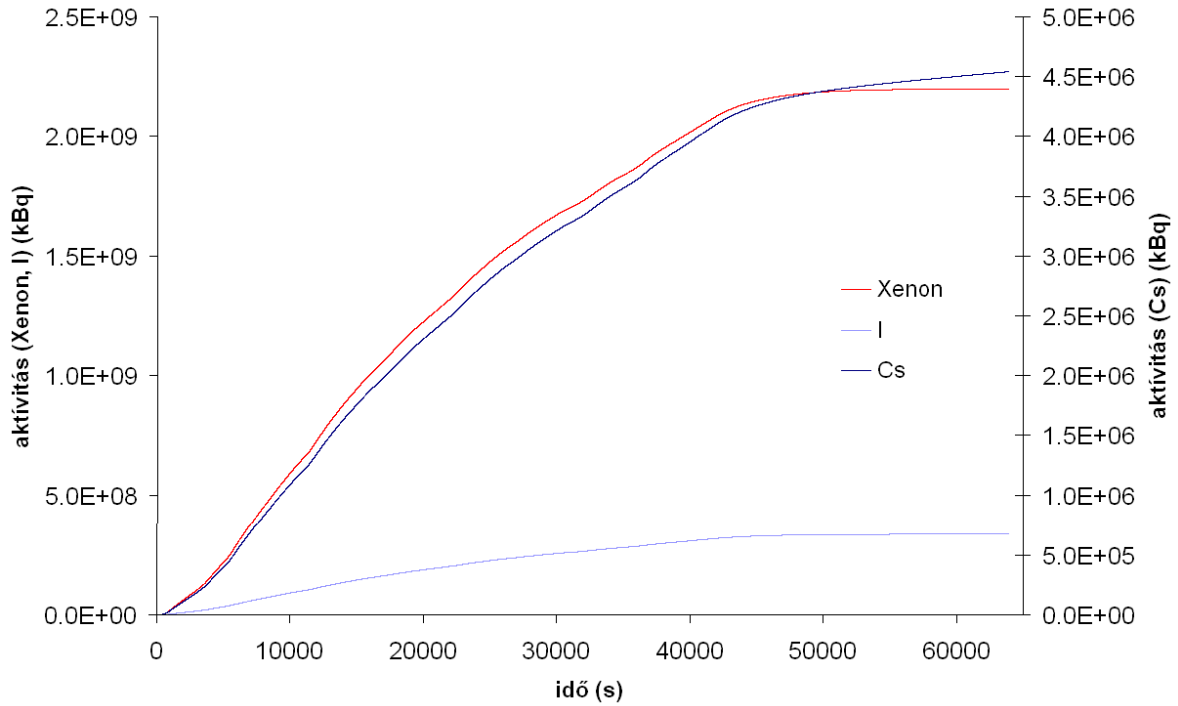
57. ábra. A kémény aktivitás forgalma a 111 mm-es csőtörés esetén

8.5. A 73 mm-es törés számítása

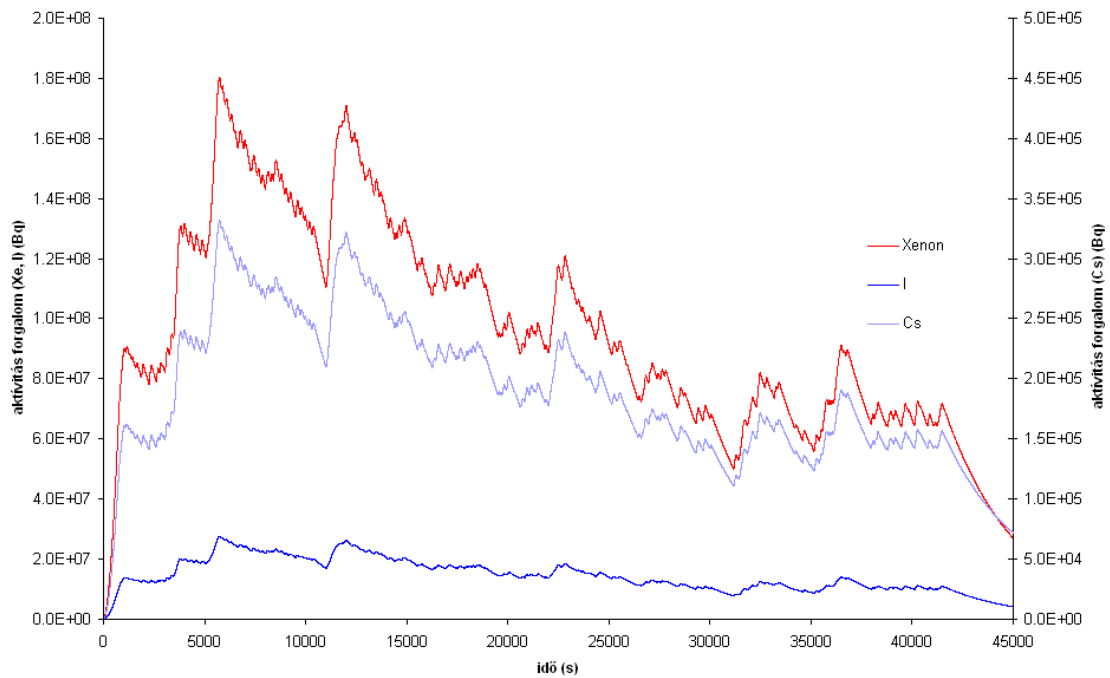
A 3 vizsgált üzemzavar közül a legkisebb cső törésénél a nyomás végig 1,15 bar (58. ábra) alatt marad (természetesen tálca leömlés itt sincs). Ennél az esetenél a nyomás hosszabb idő alatt épül fel. A nyomás csak a 40000 s után áll be stabilan a légköri nyomás alá, ez jól összevág az összes kibocsátott aktivitás mennyiségével, ugyanis ezután az már nem növekszik tovább (59. ábra). A 40000 s érték után az aktivitás forgalom is leesik, és az utánpótlás nélküli hígulásnak köszönhetően exponenciális jelleggel csökken tovább (60. ábra). Az aktivitás forgalom csúcsai itt is jól egyeznek a nyomás csúcsokkal.



58. ábra. A főtéri nyomás 73 mm-es csőtörés esetén



59. ábra. Az összes a kéményen kikerült aktivitás a 73 mm-es csőtörés esetén



60. ábra. A kémény aktivitás forgalma a 73 mm-es csőtörés esetén

9. AZ ÜZEMANYAG SÉRÜLÉS KEZDŐ IDŐPONTJÁNAK HATÁSA A KIBOCSÁTÁSRA

A reaktor csarnok modellnél az feltételeztük, hogy az üzemanyagsérülés a LOCA-val egyszerre történik, ami konzervatív feltételezés és valószínűleg nem reális. A fűtőelemek sérüléséhez LOCA üzemzavarok során elsősorban a burkolat felfúvódása és felhasadása vezethet. A hasadási termékek kikerülése a fűtőelemből a felhasadás után kezdődhet meg. A felhasadást időpontja – illetve, hogy a felhasadás egyáltalán létrejön-e — elsősorban a burkolat felmelegedésétől és a külső és belső nyomások különbségétől függ. A zónában különböző belső nyomással rendelkező fűtőelemek vannak és ezek felmelegedése nem egyenletes. Ezért a LOCA üzemzavar alatt a felhasadások időpontja sem esik egybe az összes fűtőelemnél, ha egyáltalán felhasadnak. A felhasadt fűtőelemekből a hasadási termékek először a primerkörbe kerülnek, ahonnan – a hűtőközeg kiáramlásnak megfelelően – csak valamilyen késleltetéssel jutnak ki a hermetikus térbe. A zónában található valamennyi fűtőelem felhasadásának pontos számítására, valamint a primerköri transzport folyamat modellezésére a jelenleg használt fejlett modellekkel sincs reális lehetőség. Ezért a biztonsági elemzésekben azzal a konzervatív megközelítéssel számolnak, hogy a fűtőelemek felhasadása a törés pillanatában megtörténik és a belőlük kikerülő aktivitás azonnal megjelenik a hermetikus térben. A valóságban nyilvánvalóan valamilyen késésnek kell lennie a hermetikus térbe történő kibocsátásnál, de hogy ez mekkora, illetve időben hogyan oszlik el, arra nincsenek ismereteink. Ugyanakkor a késés hatása értékelhető, ha feltételezzük, hogy a pillanatszerű sérülés és kibocsátás nem a törés időpontjában, hanem később történik. Egy egyszerű számítási sorozat – különböző időpontokban bekövetkező sérüléssel – illusztrálhatja, hogy mennyire konzervatív a törés időpontjában történő sérülése feltételezése. Ezért minden kiválasztott LOCA esetre külön-külön számításokat végeztem úgy, hogy az aktivitás a hermetikus térben nem a törés pillanatában, hanem későbbi időpontokban jelenik meg.

Nagy csőtörésnél viszonylag hamar megtörténhet, hogy az üzemanyag egy része szárazra kerül, olyankor egy nagy átmérőjű csövön ömlik ki a primerköri víz, az üzemzavari hűtőrendszer beindulásáig már jelentős mennyiség hiányozhat a tartályból.

Azonban egy kis átmérőjű (pl. 73 mm-es) törésnél a víz nem tud olyan intenzíven távozni, így a primerköri pótvíz befecskendezéseknek köszönhetően, az üzemanyag nagyrészt elégséges hűtést kaphat a sérülés elkerüléséhez.

Vizsgálatot végeztem, hogy felderítsem az összes kibocsátás és az üzemanyag kezdeti sérülési ideje közti összefüggést.

Ehhez a reaktorcsarnok modellt úgy futattam, hogy az üzemanyag sérülést 10 s-os lépésekben, 0-tól 60 s-ig, egyre nagyobb mértékben késleltettem. Az eredményeket (61. ábra) grafikonon ábrázoltam. Az egyes LOCA eseteknél az összes kibocsátás nyilván különböző, így az összehasonlítás nehéz lenne, ezért az egyes késleltetésekhez tartozó összkibocsátásokat az azonnali kibocsátás százalékában adtam meg.

A grafikonon látszik, hogy a legnagyobb különbség a nagy LOCA-nál van. Ez azért lehetséges, mert a ott a nyomás a tranziens elején magas (ezért a szivárgás is), de a tálca leömlés miatt hamar lecseng. Ha az üzemanyag később sérül, akkor az aktivitás a tranziens nagynyomású részénél kevésbé van jelen. A 111 mm-es törésnél is van egy kezdeti nyomás felfutás, de az integrálisan nem tér el olyan nagymértékben a későbbi nyomás csúcsoktól, mint a nagyobb törés esetében. A 73 mm-es törés esete hasonló a 111 mm-es töréshez, de a kezdeti nyomás csúcs kisebb. Amint a grafikonon látszik, a nagy csőtörésnél a késleltetés két szélsősége között (0 s – 60 s), hozzávetőleg tízszeres különbség van, a 111 mm-es törés esetén 5% körüli a különbség. A legkisebb LOCA esetén 1% körüli a különbség.

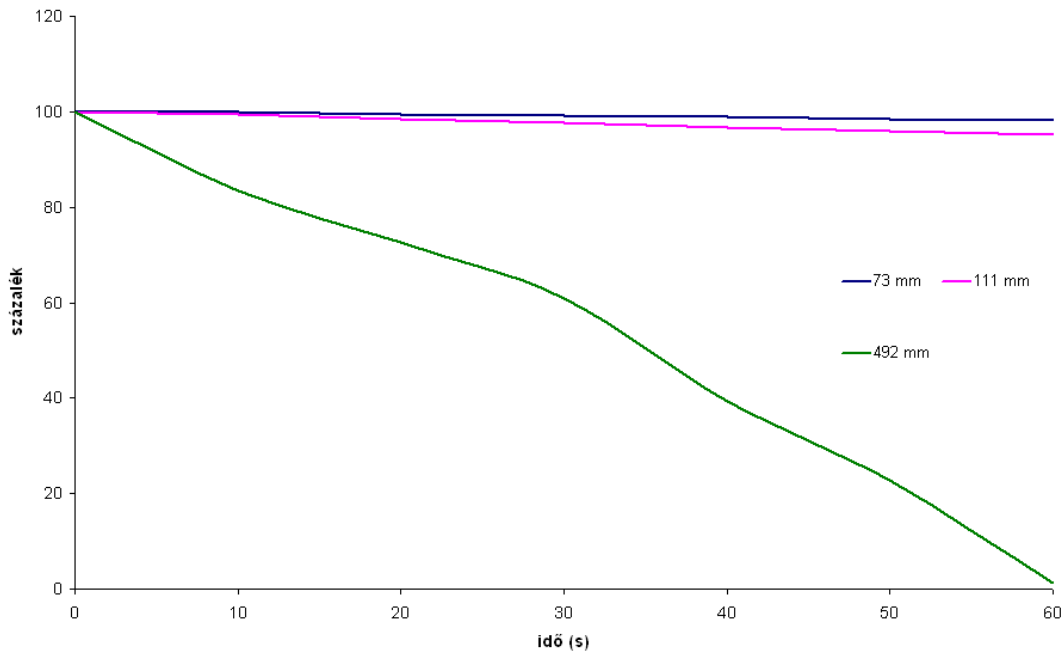
Készítettem számításokat sokkal nagyobb (3000 s) üzemanyag sérülés késés esetére is a modell határainak vizsgálatára. Azt tapasztaltam, hogy a közepes LOCA esetén a kibocsátás 49%-ra módosult, a kisLOCA esetén 76%-ra, a nagy LOCA esetén nem volt kibocsátás.

Hogy az egyes töréseket is össze tudjuk hasonlítani, táblázatokat (táblázat 8-9.) készítettem az összes kibocsátott aktivitásról, azonnali és 30 s-al késleltetett kibocsátás esetére, hasonló táblázat készült a forgalom maximumokra.

A nagy LOCA esetén a sokkal nagyobb túlnyomás ellenére közelítőleg csak tízszer nagyobb a kibocsátás, ami ha figyelembe vesszük, hogy 100-szor akkora résaktivitást kikerülését feltételeztük, elég meglepő. A másik két esetet vizsgálva azt tapasztaltam, hogy a kisebb törésnél nagyobb a szivárgás, ami azért lehetséges, mert a 73 mm-es törésnél tovább áll fent a túlnyomás. A képet egy valóságosabb üzemanyag sérülési modell sokat árnyalhatná.

Az üzemanyagleltár a három izotópra: ^{133}Xe : $2.65 \cdot 10^{18}$ Bq, ^{131}I : $1.25 \cdot 10^{18}$, ^{137}Cs : $1.23 \cdot 10^{17}$ (kiegés: 50 MWd/kgU).

Ahogy a táblázat adatai mutatják a leltár nagyon kis töredéke ($10^{-9} - 10^{-11}$) vesz részt a szivárgásban.



61. ábra. A kibocsátás mennyiségének függése az üzemanyag sérülés kezdeti idejének függvényében, 100% az azonnali sérülésnél kikerült aktivitás mennyiség

8. táblázat. Az összes kibocsátott aktivitás

| Izotóp | Leltár (kBq) | 492 mm-es csőtörés | | 111 mm-es csőtörés | | 73 mm-es csőtörés | |
|-------------------|----------------------|----------------------------------|--|----------------------------------|--|----------------------------------|--|
| | | Azonnali üzemanyag sérülés (kBq) | 30 s-al késleltetett üzemanyag sérülés (kBq) | Azonnali üzemanyag sérülés (kBq) | 30 s-al késleltetett üzemanyag sérülés (kBq) | Azonnali üzemanyag sérülés (kBq) | 30 s-al késleltetett üzemanyag sérülés (kBq) |
| ^{133}Xe | $2,65 \cdot 10^{15}$ | $1,16 \cdot 10^{10}$ | $7,25 \cdot 10^9$ | $9,66 \cdot 10^8$ | $9,43 \cdot 10^8$ | $2,19 \cdot 10^9$ | $2,17 \cdot 10^9$ |
| ^{131}I | $1,25 \cdot 10^{15}$ | $1,78 \cdot 10^9$ | $1,11 \cdot 10^9$ | $1,48 \cdot 10^8$ | $1,44 \cdot 10^8$ | $3,37 \cdot 10^8$ | $3,34 \cdot 10^8$ |
| ^{137}Cs | $1,3 \cdot 10^{17}$ | $2,31 \cdot 10^7$ | $1,48 \cdot 10^7$ | $1,92 \cdot 10^6$ | $1,88 \cdot 10^6$ | $4,55 \cdot 10^6$ | $4,52 \cdot 10^6$ |

9. táblázat. Az aktivitás kibocsátás forgalom maximuma

| | 492 mm-es csőtörés | | 111 mm-es csőtörés | | 73 mm-es csőtörés | |
|-------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| | Azonnali üzemanyag sérülés (Bq/s) | 30 s-al késleltetett üzemanyag sérülés (Bq/s) | Azonnali üzemanyag sérülés (Bq/s) | 30 s-al késleltetett üzemanyag sérülés (Bq/s) | Azonnali üzemanyag sérülés (Bq/s) | 30 s-al késleltetett üzemanyag sérülés (Bq/s) |
| ^{133}Xe | $5,46 \cdot 10^9$ | $3,56 \cdot 10^9$ | $1,77 \cdot 10^8$ | $1,74 \cdot 10^8$ | $1,80 \cdot 10^8$ | $1,78 \cdot 10^8$ |
| ^{131}I | $8,35 \cdot 10^8$ | $5,44 \cdot 10^8$ | $2,71 \cdot 10^7$ | $2,68 \cdot 10^7$ | $2,76 \cdot 10^7$ | $2,73 \cdot 10^7$ |
| ^{137}Cs | $9,82 \cdot 10^6$ | $6,56 \cdot 10^6$ | $3,24 \cdot 10^5$ | $3,21 \cdot 10^5$ | $3,32 \cdot 10^5$ | $3,29 \cdot 10^5$ |

10. táblázat. A VBJ-ben levő számítások eredményei [41]

| | 492 mm-es csőtörés (kBq) | 111 mm-es csőtörés (kBq) | 73 mm-es csőtörés (kBq) |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| ^{133}Xe | $2,298 \cdot 10^{10}$ | $3,144 \cdot 10^9$ | $1,807 \cdot 10^{10}$ |
| ^{131}I | $4,270 \cdot 10^9$ | $5,846 \cdot 10^8$ | $3,363 \cdot 10^9$ |
| ^{137}Cs | $1,058 \cdot 10^8$ | $1,452 \cdot 10^7$ | $8,452 \cdot 10^7$ |

Összevettem az eredményeket a VBJ-ben (Végleges Biztonsági Jelentés) levő számításokkal (10. táblázat), és azt tapasztaltam, hogy az eredmények mindenhol a VBJ számításoknál kisebb kibocsátást prognosztizálnak. Az input adatok különbözősége miatt (VBJ nyomásszámítás: CONTAIN, nálam HERMET, VBJ aktivitásterjedés számítás: TIBSO, nálam HERMAKT) az eredmények nehezen összehasonlíthatóak. Ennek ellenére néhány lehetséges okot igyekszem találni az eltérésekre:

- A VBJ elemzésekben a maximális megengedhető szivárgási értékkel (14,7%/nap) számoltak, az én számításaimban az aktuális mérésekhez közelebb eső 10%/nap szivárgási érték szerepel.
- A reaktorcsarnok modell hatásai (a VBJ elemzéseiben nincs olyan modell, ami a kibocsátási útvonal visszatartó hatását figyelembe venné, míg az új számításokban szerepel ilyen hatás).
- A kéményszűrés modellezése (a VBJ elemzéseiben nem számolnak a szűrők hatásával, míg az új modell ezt is figyelembe veszi).

- Időben eltérő hosszúságú számítások történtek.
- A radioaktív izotópok terjedése hermetikus téren belül, a helyiségek visszatartó hatása.(A HERMAKT kódban, a hermetikus téren belüli aktivitásterjedés leírására alkalmazott közelítések szerint a gázfázisba bekerült aktivitás a hermetikus tér egészét tekintve a radioaktív bomlás, a falakra való kiülepedés, a sprinklerek általi kimosás, továbbá a főtérben fellépő túlnyomás hatására létrejövő, a hermetikus tér környezetébe történő ellenőrizetlen szivárgás következtében csökkenhet [40]. A TIBSO kódban az aktivitásterjedés nem kapcsolódik a kondenzációs folyamatokhoz, ezért a VBJ számításokban a felületi kiülepedés és a sprinklerek általi kimosás nem jelenik meg. Ez azt jelenti, hogy a légtérben több aktivitás marad és a szivárgás így nagyobb kikerülést eredményez.)

Általánosságban, a VBJ számítások konzervatív számítások, én reális (best estimate) értékeket igyekeztem kapni.

10. ÖSSZEFOGLALÁS, TÉZISPONTOK

A dolgozatban az atomerőmű üzemzavari állapotában várható radioaktív kibocsátást befolyásoló folyamatok modellezésével és ezen keresztül a környezeti kibocsátással foglalkoztam. Felhasználtam és továbbfejlesztettem az MTA EK-ban korábban kidolgozott számítógépes modelleket a környezeti szennyezés mértékének számításához. Az elvégzett kutatásokról a dolgozatban részletesen beszámoltam. A kutatások során a következő új eredményeket értem el:

1. Megállapítottam, hogy a HERMET kód milyen feltételek teljesülése mellett, és milyen mértékben alkalmazható kielégítő pontossággal a különböző méretű csövek (73 mm-492 mm) esetleges törése esetén történő hűtőközegvesztéses üzemzavarok számítására. Megállapítottam, hogy a nódusok állapotát leíró paraméterek és a falmodell pontosságának növelésére van szükség.
2. Algoritmust dolgoztam ki a levegő-gőz-víz rendszert számító állapotfüggvény megfelelő pontosságú számítására.
3. A nódusokra jellemző integrális adatok számítását kibővítettem az egyes nódusokban bekövetkező térfogati munka meghatározásával.
4. Új fal hővezetés modellt hoztam létre, amely részletesebben modellezi a falban lejátszódó termodinamikusan folyamatokat, amely számításba tudja venni, hogy különböző halmazállapotú közegek lehetnek a fallal hőkapcsolatban, valamint a fal felületén történő termodinamikai folyamatokat is tekintetbe veszi. Igazoltam, hogy az átalakított modell alkalmas a hosszan tartó – és így környezeti hatásaikban nem elhanyagolható – LOCA folyamatok számítására.
5. Új modellt hoztam létre a reaktorcsarnok hígító-, szűrő- és visszatartóképességének szimulációjára, mely a hermetikus térből történő üzemzavari szivárgás útját követi egészen a környezetig, az erőmű valós geometriai elrendezésének és technológiai megoldásainak megfelelően.
6. Az új reaktorcsarnok modell segítségével meghatároztam a törés méretének és a fűtőelemsérülés kezdeti időpontjának hatását a kéményen keresztül történő környezeti kibocsátásra.

11. A TÉMAKÖRBEN PUBLIKÁLT KÖZLEMÉNYEK, ELŐADÁSOK

Folyóirat cikkek:

- [1] Attila Nagy, Zoltán Hózer, János Sebestyén Jánosy: **Modelling of VVER-440/213 hermetic rooms in training simulator**, *Annals of Nuclear Energy* Volume 55, May 2013, Pages 272–278
- [2] Attila Nagy, Sándor Deme, Zoltán Hózer: **Activity emission model for VVER 440/213 reactor LOCA**, *Annals of Nuclear Energy*, Volume 62, December 2013, Pages 413–420

Konferencia előadás és közlemény:

- [3] Attila Madaras, Sándor Deme, Zoltán Hózer, Edit Láng, István Németh, Tamás Pázmándi and Péter Szántó: **A new simulation code for analyzing loss of coolant accidents in VVER-440/213 reactors concerning activity transport**, Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17 July 12-16, 2009, Brussels, Belgium, ICONE17-75306

12. IRODALOMJEGYZÉK

(A hivatkozási számok folytatólagosak.)

- [4] Fényes Imre: Entrópia, Gondolat Kiadó, Budapest, 1962.
- [5] Fényes Imre: Termodinamika és termosztatika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
- [6] Budó Ágoston: Kísérleti fizika, Nemzedékek Tudása, Tankönyvkiadó, 2004.
- [7] Kiss Dezső, Horváth Ákos, Ádám Kiss Ádám: Kísérleti atomfizika, egyetemi tankönyv, Budapest, 1998.
- [8] NOAA / Space Weather Prediction Center - Notes on the Natural Radiation Hazard at Aircraft Altitudes <http://www.swpc.noaa.gov/info/RadHaz.html>
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Background_radiation
- [10] Fehér István, Deme Sándor: Sugárvédelem, ELTE Eötvös Kiadó 2010.
- [11] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (2008 (published 2010)). Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations. p. 4. ISBN 978-92-1-142274-0. Retrieved 9 November 2012.
- [12] Ionizing radiation exposure of the population of the United States. Bethesda, Md.: National Council on Radiation Protection and Measurements. 2009. ISBN 978-0-929600-98-7. NCRP No. 160.
- [13] Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology of Japan "Radiation in environment" retrieved 2011-6-29
- [14] F. Gauthier-Lafaye¹, P. Holliger², P-L. Blanc: Natural fission reactors in the Franceville basin, Gabon: A review of the conditions and results of a “critical event” in a geologic system *Geochimica et Cosmochimica Acta* Volume 60, Issue 23, December 1996, Pages 4831–4852
- [15] Fejezetek a környezetfizikából, szerk. Kiss Árpád Zoltán Debrecen, Debreceni Egyetem 2003.
- [16] <http://energyfromthorium.com/2011/03/15/fd-thoughts/bwr-mark1-cutaway2/>
- [17] M. Ghiassi-nejad, S. M. J. Mortazavi, J. R. Cameron, A. Niroomand-rad, and P. A. Karam: Very High Background Radiation Areas of Ramsar, Iran, Preliminary Biological Studies , *Health Physics* January 2002, Volume 82, Number 1

- [18] <http://depletedcranium.com/bwrreactorcontainment.jpg>
- [19] http://assets.nydailynews.com/polopoly_fs/1.111203.1313945155!/img/httpImage/image.jpg_gen/derivatives/landscape_635/alg-chernobyl-jpg.jpg
- [20] http://environnement.irsn.fr/document/site_1/fckfiles/Image/dossiers/tchernobyl/vver440_230.jpg
- [21] Hózer Z, J. Vigassy: Primary Circuit and Containment LOCA Models for the Paks NPP Full Scope Simulator, in Transactions of IAEA Specialists' Meeting on Training Simulators for Safe Operation in Nuclear Power Plants, pp. 356-367, Balatonfüred, 1991.
- [22] Jánosy J S, Ivancsics P, Hózer Z, Végh E: Upgrading of the Paks Full Scale Simulator, Proceedings of the 1993 Simulation Multiconference, Simulation Series Vol. 25. No. 4. pp. 59-64.
- [23] http://www.gg.uwyo.edu/content/laboratory/nuclear/power/reactor_components/containment/candu.asp?callNumber=14276&SubcallNumber=0&color=993300&unit=2
- [24] <http://www.decodedscience.com/the-first-u-s-nuclear-power-plant-licensed-in-three-decades/10734>
- [25] M. F. Hessheimer R. A. Dameron: Containment Integrity Research at Sandia National Laboratories. An Overview NUREG/CR-6906, 2006.
- [26] M.F. Hessheimer, E.W. Klamerus, L.D. Lambert, G.S. Rightley, R.A. Dameron: Overpressurization Test of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model Sandia National Laboratories, NUREG/CR-6810, 2003
- [27] Zsolt Téchy, Gábor Lajtha, Róbert Taubner: Accident loads for a VVER-440/213 containment Nuclear Engineering and Design 157 (1995) 375-385.
- [28] Füstös Tibor - MVM Paksi Atomerőmű Zrt., személyes közlés, 2010.
- [29] Angyal Ferenc – Lokalizációs torony rendszere – Tanfolyami jegyzet primerkörü gépészek számára
- [30] <http://www.seas.sk/en/the-company/about-us/slovenske-elektrarne/nuclear-safety/safety-systems>
- [31] Péter Vértes: Multinodal Treatment Of Production, Decay, And Spreading Of Radioactive Isotopes Nuclear Technology, 1999. Pages 124-130 Vol 128

- [32] H-J. Allelein, S. Arndt, W. Klein-Heßling, S. Schwarz, C. Spengler, G. Weber: COCOSYS: Status of development and validation of the German containment code system Nuclear Engineering and Design 238 (2008) 872–889
- [33] Vladimir N. Blinkov,1 Oleg I. Melikhov,1 Vladimir I. Melikhov,1 Mikhail V. Davydov,1 Holger Wolff, and Siegfried Arndt Experimental Studies for the VVER-440/213 Bubble Condenser System for Kola NPP at the Integral Test Facility BC V-213 Thermo-Hydraulics Division 2012 Science and Technology of Nuclear Installations Volume 2012 (2012), Article ID 275693, 20 pages
- [34] Janos Sebestyén Janosy: Simulators Used to Enhance the Safety and Efficiency of Nuclear Power Generation. Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation, AMS 2010, Kota Kinabalu, Sabah, Borneo, Malaysia, 26 - 28 May 2010, IEEE Computer Society Order Number E4062, BMS Part Number: CFP1009C-CDR, ISBN 978-0-7695-4062-7
- [35] Janos Sebestyén Janosy: Protection System Refurbishment at Paks Nuclear Power Plant using Full-scope Simulator. Proceedings of the Industrial Simulation Conference, ISC 2008, June 9-11, Lyon, France, pp. 209-214, ISBN9789077381403
- [36] Végh E, Hegyi Gy, Hegedűs Cs, Hózer Z, Jánosy J S, Keresztúri A: Simulation of the Rod Ejection Accident in the Paks Full-Scale Simulator, Simulation Series, vol. 26, No.3., 1994, pp. 109-113, ISBN-1-56555-071-4
- [37] Végh E, Jánosy JS, Hózer Z: Different LOCA Scenarios in the Paks Full-Scale Simulator, Proceedings of the 1995 Simulation Multiconference, Simulation Series Vol. 27. No. 3. pp. 73-78.
- [38] Hózer Z.: EVVEREST Modular Design File. HERMET Code. CORYS-BELGATOM-SIEMENS-THOMSON, EVST-DCS/4-PG, 8 May 1996
- [39] H. Karwat: The evaluation of the bubble condenser containment of VVER-440/213 plants Nuclear Engineering and Design 157 (1995) 363 374
- [40] Deme Sándor Láng Edit Madaras Attila Németh István Pázmándi Tamás Szántó Péter: A HERMAKT 3.0 PROGRAM FIZIKAI MODELL – Tanulmány - AEKI-AT-2009 Budapest
- [41] Paksi Atomerőmű Zrt.1-4. blokk VÉGLEGES BIZTONSÁGI JELENTÉS 2012.

- [42] Deme Sándor, Láng Edit, Madaras Attila, Németh István, Pázmándi Tamás, Szántó Péter: A HERMAKT 3.0 PROGRAM SZÁMÍTÁSI EREDMÉNYEI Tanulmány AEKI-AT-2009-114-04
- [43] http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html
- [44] Beata Kucienska, Jean-Marie Seynhaeve, Michel Giot Friction: Relaxation model for fast transient flows application to water hammer in two-phase flow – The WAHA code International Journal of Multiphase Flow Volume 34, Issue 2, February 2008, Pages 188–205
- [45] <http://www.katasztrofak.abbcenter.com/?id=79484&cim=1>
- [46] W Stephenson, LMC Dutton, BJ Handy, C Smedley: Realistic methods for calculating the releases and consequences of large LOCA, EUR 14179 EN, 1991
- [47] Személyes közlés, Vigassy Józseftől kapott e-mail (2013.09.16)
- [48] <http://www.faculty.virginia.edu/ribando/modules/>

12. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani a témavezetőmnek, Dr. Hózer Zoltánnak, aki szakmailag példakép számomra, és sokat köszönhetek neki a munkámmal kapcsolatban.

Dr. Deme Sándornak, aki nélkül a második publikációm nem jöhetett volna létre, a reaktorcsarnok modell az ő ötlete alapján lett kidolgozva, egyéb területeken is számos alkalommal segítségemre sietett.

Jánosy János Sebestyénnek, aki kitalálta a témámat, átvett a szimulátor laboratóriumba és ezzel új lehetőségekhez jutott.

Dr. Gadó Jánosnak, aki engedélyezte, hogy doktori iskolába járhassak, és tanulmányi szerződéselem lehessen.

Kollégáimnak – Farkas István, Dr. Házi Gábor, Páles József, Dr. Kiss Sándor, Dr. Imre Attila, Németh István, Dr. Pázmándi Tamás, Dr. Zagyvai Péter – akik a kisebb nagyobb felmerült problémáknál önzetlenül segítettek, biztattak, tanácsokkal láttak el.

Taubner Róbertnek, a CONTAIN számításokért.

Gombos Erzsébetnek, aki nagyon gondosan átnézte, és javította a dolgozat egyes fejezeteit.

13. KIVONAT

Az értekezés a paksi atomerőmű üzemzavari kibocsátás számításokhoz készített fizikai modelleket és az azokkal végzett futtatások eredményeit tartalmazza.

A munkához az intézetünkben készült HERMET programot használok, a program tanulmányozása mellett megismertem a paksi üzemzavar elhárítási rendszerek felépítését, működését, az ezekkel kapcsolatos elméleti és kísérleti kutatásokat. A HERMET programot több csőtöréses üzemzavari esetre alkalmaztam. A számítási eredményeket részletesen elemeztem, értelmeztem.

A HERMET programban található fizikai modelleket vizsgáltam és fejlesztettem:

- A HERMET gőz-víz-levegő állapot számoló program algoritmusát kicseréltem, az algoritmust a CONTAIN kód segítségével ellenőriztem.
- A HERMET kódhoz térfogati munkát számító részt készítettem, ezt a CONTAIN kódhoz hasonlítottam sikeresen.
- A HERMET programban található fal modell helyett újat dolgoztam ki, az új modell egyszerűbb működésű, de több szempontból – két fázis, hősugárzás számítás - többet tud, mint a régi.

A környezet felé a hermetikus térből lehetséges szivárgás az erőmű egyéb helyiségein keresztül. Ennek a szivárgásnak a modellezéséhez reaktorcsarnok modellt hoztam létre. Ezt a modellt több üzemzavarra alkalmaztam, három kiválasztott, sugárvédelmi szempontból jelentős izotópra

Az új reaktorcsarnok modell segítségével vizsgáltam az üzemanyag sérülés kezdeti időpontjának hatását a kibocsátásra. Ezt több késleltetési időtartamra vizsgáltam 0 és 60 s között, az eredményeket mind grafikusán, mind táblázatos formában feldolgoztam, valamint elemeztem a korábbi számításoktól való eltérésük okát.

14. **ABSTRACT**

The possible activity emission in a case of a LOCA (Loss Of Coolant Accident) in the Paks NPP was simulated in the present work. Safety calculations were carried out and new physical models were developed.

The thermohydraulic model of the containment was improved as it follows.

- New steam – water – air state calculating algorithm and an additional term of pressure volume work was introduced into the HERMET code and the calculated results were compared to CONTAIN calculation (an internationally accepted code).
- New wall heat conduction model was developed for the HERMET code. It provides detailed simulation of the heat conduction phenomena in the walls and it takes two different phases into account and considers heat radiation, as well.

One of the main environmental issues is the emission of radioactive isotopes to the environment. This phenomena was earlier calculated by separate codes. In the framework of the present work an integrated model was created. A new reactor hall model was added and several different analyses considering different LOCA scenarios were performed for the three most important isotopes.

The results the emission simulations showed that the fuel failure starting time had an important effect on the environmental release.