

A GASFLOW kód sprinkler modelljének adaptálása a VVER-440 konténment folyamatok szimulálásához

Kósa Péter, Kostka Pál

VEIKI Villamosenergiaipari Kutató Intézet Zrt.
H-1251 Budapest, Pf. 80, Tel.: 4578-239

A súlyos baleseti hidrogén koncentráció eloszlását a konténmentben a GASFLOW (CFD) kóddal elemezzük. A sprinkler működése jelentősen befolyásolja a térben kialakuló gázkoncentráció eloszlását. A GASFLOW kód rendelkezik a sprinkler rendszer működését leíró modellel.

A GASFLOW kód alapesetben a kétfázisú, cseppeket is tartalmazó közeg térfogati kondenzációját homogén egyensúlyi modellel kezeli (a folyadékcseppek egyenletesen eloszlanak a gázban, a fázisok sebessége megegyezik és termikus egyensúlyban vannak). A GASFLOW sprinkler modellje a sprinkler cseppek gázfázistól eltérő hőmérsékletével, de a gázfázissal megegyező sebességével számol. A cseppek kihullását a térfogati kondenzációhoz hasonlóan, egy relaxációs összefüggéssel veszi figyelembe.

A GASFLOW sprinkler modelljét adaptáltuk a VVER sprinkler rendszeréhez. A sprinkler modellt kiegészítettük a rendszer működésének nyomásról történő vezérlésével. Tesztfeladat segítségével győződünk meg róla, hogy a rendszer nyomásról történő vezérlése kívánt módon működik. Két tesztfeladat segítségével és az eredményeket a CONTAIN kód eredményeivel összehasonlítva meghatároztuk a modellben szereplő relaxációs kihullási időállandó értékét a VVER sprinkler rendszer paramétereinek megfelelően.

GASFLOW kód

A GASFLOW 2.4 gázok 3 dimenziós áramlásának számítására alkalmas számítógépes program. A kód eredeti változatát a Los Alamos National Laboratory (LANL) fejlesztette ki, a továbbfejlesztés jelenleg Forschungszentrum Karlsruheban (FzK) folyik. A kód gázok, folyadékcseppek és aeroszolok transzportját, keveredését és éghető gázok (hidrogén) égését számolja zárt terekben. A kód képes bonyolult geometriájú belső struktúrákat és több térrészt is tartalmazó tereket modellezni.

A GASFLOW 2.4 véges elemes kód, amely az időben változó, 3 dimenziós, összenyomható közegekre vonatkozó Navier-Stokes-egyenletet oldja meg. A belső energia, különböző gáz komponensek, folyadékcseppek és aeroszol részecskék eloszlását áramlási és mérlegegyenletekkel számolja. A számításhoz a teret elemi térrészekre, úgynevezett cellákra kell felosztani. A skalár mennyiségeket, mint a sűrűség, belső energia, nyomás, a kód a cellák középpontjában határozza meg, míg a vektormennyiségek, mint a sebesség és tömegfluxus, a cellahatárokon vannak értelmezve.

A VEIKI eddig a GASFLOW kód 2.1.3-as (GF2.1.3) verzióját alkalmazta [1]. Mivel a kódnak ez a régebbi változata még nem tartalmazott sprinkler modellt, újabb verzió beszerzése és alkalmazása vált szükségessé. A legújabb sprinklert is tartalmazó verzió, a GASFLOW 2.4. (GF2.4) [2].

GASFLOW kód sprinkler modelljének összehasonlítása csepp kihulláson alapuló modellel

GASFLOW kód sprinkler modellje

A GASFLOW kód alapesetben a kétfázisú, cseppeket is tartalmazó közeget a homogén egyensúlyi modellel (HEM) kezeli, vagyis a feltételezés szerint a folyadékcseppek egyenletesen oszlanak el a gázban, a termikus egyensúlyban lévő fázisok sebessége megegyezik. Ehhez képest a sprinkler rendszer modellje termikusan nem-egyensúlyi, vagyis a gáz és a sprinkler cseppek hőmérséklete különböző. A modell konvektív hőátadást és kondenzációs transzportot értelmez a cseppek felületén. A mechanikai egyensúly azonban továbbra is fennáll, vagyis a modell nem számolja a sprinkler cseppek kihullási sebességét, hanem a gáz- és folyadékfázis-sebességek továbbra is egyenlők. A

cseppek kihullását a térfogati kondenzációhoz hasonlóan, egy relaxációs eljárással modellezi a kód.

Az elemi cellában a folyadéktömeg megváltozása a cellába bejövő és távozó forrástagok különbségével egyenlő

$$\frac{d}{dt}(\rho\Delta V) = g^+\Delta V + g^-\Delta V \quad (1)$$

A $g^+\Delta V$ tag az adott cellába belépő sprinkler tömegáramot jelenti.

A $g^-\Delta V$ tagot, a cseppek kihullását a következő összefüggés adja meg:

$$g^-\Delta V = \Delta V \cdot c_r \cdot \min[0, (\rho_{\text{lim}} - \rho)] \quad (2)$$

Ez a formula azt fejezi ki, hogy ha a térben a víz sűrűsége meghalad egy bizonyos ρ_{lim} értéket, akkor a határérték feletti vízmennyiségnek egy c_r relaxációs együtthatóval megszorított része kihullik a térből, ami egy negatív előjelű tömegáramot jelent.

Ha az (1) és (2) összefüggést egyesítjük és a teljes térfogatra integráljuk akkor a teljes térben jelenlevő folyadéktömeg megváltozására kapunk egy összefüggést. Ezt az $M(t=0) = 0$ kezdeti feltétel mellett megoldva a térben levő víz (M) tömegére igen hosszú ($t \rightarrow \infty$) idő elteltével a következő összefüggést kapjuk:

$$M = \frac{G^+}{c_r} + \rho_{\text{lim}} \cdot V \quad (3)$$

A c_r relaxációs tényező és a ρ_{lim} kritikus sűrűség a GASFLOW kódban input paraméter. A alap értékek: $c_r = 0,01 \text{ s}^{-1}$, $\rho_{\text{lim}} = 2 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$, ami azt jelenti, hogy ha köbméterenként a térben levő lebegő víz tömege meghaladja a 2 g-ot, akkor a feleslegnek 1%-a kihullik a térből. Az értékek a térfogati kondenzációból származó apró cseppekre vannak beállítva, a sprinkler ennél lényegesen nagyobb cseppei esetén irreálisan sok vizet tartanak az atmoszférában. Az értékek jobb meghatározásához összehasonlítjuk a modellt egy a cseppek kihullási sebességét figyelembe vevő másik modellel (CONTAIN kód modellje).

CONTAIN kód sprinkler modellje

A CONTAIN sprinkler modellje [3] az atmoszférában tartózkodó vízcseppek tömegét a kihullási sebesség figyelembe vételével határozza meg. Az előző pontban alkalmazott kezdeti és egyszerűsítési feltételeket alkalmazva M -re a ($t \rightarrow \infty$) esetre a következő kifejezést kapjuk:

$$M = \frac{G^+ H}{v} \quad (4)$$

ahol: v a kihullási sebesség, H a tér magassága, M a térben levő víz tömege.

Amennyiben a fenti modellel összehangba akarjuk hozni a GASFLOW modelljét, akkor a c_r értékét úgy kell beállítani, hogy

$$\frac{G^+}{c_r} + \rho_{\text{lim}} V = \frac{G^+ H}{v} \quad (5)$$

azaz

$$c_r = \frac{G^+}{\frac{G^+ H}{v} - \rho_{\text{lim}} V} \quad (6)$$

A CONTAIN kód igen kiterjedt validációs mátrixszal rendelkezik [3], amelyben ellenőrizték a kód sprinkler modelljét többek között a NUPEC M-7-1 (OECD International Standard Problem ISP 35) kísérlet során. A CONTAIN kód sprinkler modelljét ezért validáltnak tekinthetjük, amelyhez a GASFLOW sprinkler modellt hangolni lehet.

Ugyanakkor különbségek is vannak a két modell alkalmazásában. A GASFLOW-ban a c_r érték által meghatározott vízmennyiség az adott cellából azonnal kikerül, azaz nem vesz részt a további folyamatokban (a „kihullott” csepp nem jut tovább a következő cellába). Ezáltal az így meghatározott érték túl gyors kikerülést jelent, míg a kihullási sebéségen alapuló modellnél a csepp a kihullási sebesség és a tér magassága által meghatározott ideig a térben marad. Ez azt jelenti, hogy a sprinkler hatékonysága kisebb, mint a kihullási modellen alapuló sprinkleré.

Ezen kívül a (6) alapján megadott érték elhanyagolásokat is tartalmaz. Nem tartalmazza a CONTAIN esetében a térfogati kondenzáció során keletkező cseppeket, amelyeket a CONTAIN külön modellel kezel (jöllehet a két modell között van kapcsolat), míg a GASFLOW kihullási modellje összevontan kezeli a két cseppforrást, bár a térfogati kondenzáció nagyságrenddel kisebb cseppforrást jelent a sprinklerhez képest. Ezért a c_r relaxációs állandó reális értékét teszt feladatok és azok eredményeinek összehasonlítása alapján határozzuk meg.

Sprinkler vezérlés a konténment nyomásáról

A GASFLOW 2.4 verziója által tartalmazott sprinkler modell a sprinkler ki- és bekapcsolását csak az idő függvényében tudja megoldani. Ez a VVER-440 súlyos baleseti szimulációinál nem elegendő, szükségünk van sprinkler nyomás függvényében való be- és kikapcsolására is.

A kapcsoló paramétereit a már meglévő (spraydef) változó mellett bevezetett új (spraytrig) változóval értük el. A „spraytrig” változóval csak egy univerzális, az összes definiált sprinklerre egyaránt érvényes bekapcsolási-, kikapcsolási nyomást és „nyomásmérő helyet” lehet definiálni. Erre azért volt szükség, mert, ha a nyomást a

sprinkler modell forrásonként vizsgálná, előfordulhat, hogy nem egyszerre kapcsolna be vagy ki az összes sprinkler szelep annak ellenére, hogy azok a valóságban egy rendszert képeznek.

Az adaptált kód ellenőrzése tesztfeladatokkal

A sprinkler modell megfelelő működésének ellenőrzéséhez három teszt feladatot definiáltunk:

- gőzzel teli térben folyamatos sprinkler működés
- kettéválasztott, gőzzel teli tér felében folyamatos sprinkler működés
- szakaszos sprinkler működés konstans gőzáram betáplálása mellett

A tesztfeladatok paramétereit úgy alakítottuk ki, hogy azok megfeleljenek a konténmentben súlyos baleset során fennálló viszonyoknak, a geometriai méretek – térfogat, magasság – közelítőleg megfelelnek a gőzfejlesztő box paramétereivel.

Az eredményeket összehasonlítottuk a CONTAIN kóddal hasonló tesztfeladatokra elvégzett számítások eredményeivel.

Folyamatos sprinkler működés

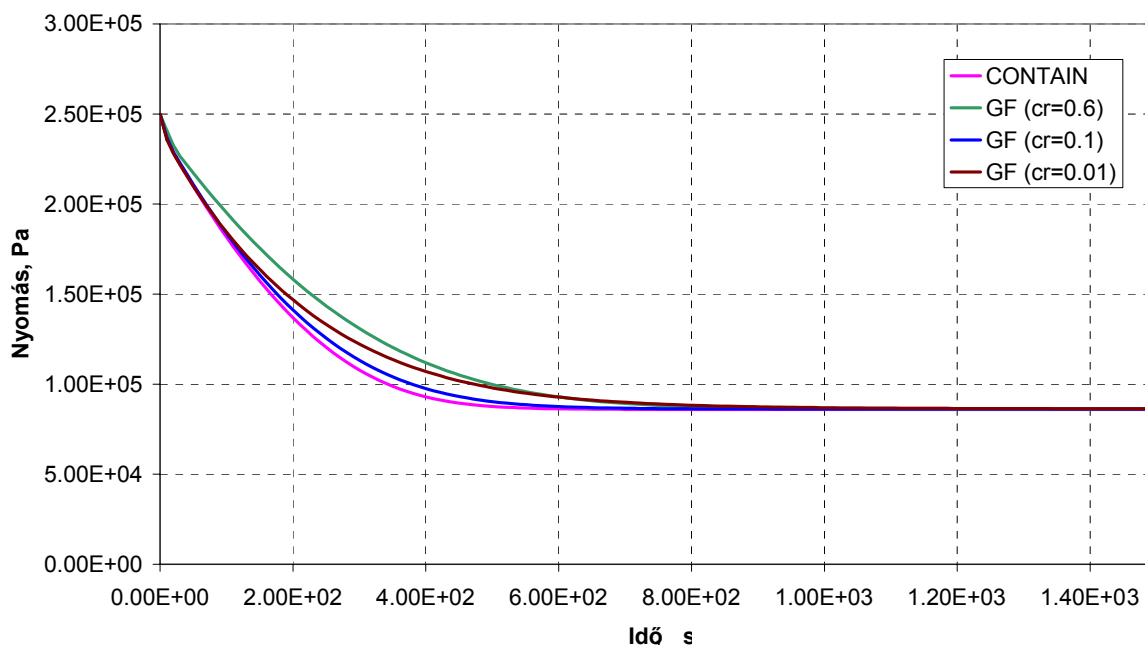
A feladatban egy adiabatikus határoló felületekkel rendelkező téglatesztet definiáltunk, melynek térfogata

$26 \times 26 \times 10 = 6760 \text{ m}^3$. A kezdeti nyomás 2,5 bar, a hőmérséklet 400 K. A tér kezdetben 60 térf% gőzt és 40 térf% levegőt tartalmaz. A sprinkler a falaktól 3,5 m távolságban 9,5 m magasan körben helyezkedik el. A sprinkler a kezdeti időponttól folyamatosan működik, tömegárama 167 kg/s , hőmérséklete $40 \text{ }^\circ\text{C}$, a cseppátmérő 1 mm. A sprinkler modell c_r relaxációs állandójának értéke (6) alapján meghatározva 0,6. A számítást elvégeztük az alapbeállítás szerinti $c_r = 0,01$ és a $c_r = 0,1$ értékekkel is. A számítást 1500 s-ig végeztük, erre az időpontra az atmoszféra hőmérséklete megközelíti a sprinkler hőmérsékletét és beáll egy egyensúlyi állapot.

A CONTAIN modell egy térrészből áll. A számítás során az atmoszférából kihulló vizet a GASFLOW eltávolítja a rendszerből, ezért a CONTAIN modellt is ennek megfelelően alakítottuk ki.

A sprinkler működésének hatására a nyomás, hőmérséklet és gőzkoncentráció értékek gyorsan csökkennek, majd beáll az állandósult állapot, amikor a tér hőmérséklete lecsökken a sprinkler víz hőmérsékletére és a sprinkler nem tud több gőzt lekondenzálni. Az eredmények azt mutatják, hogy az állandósult állapotban mindkét kód közel egyező értékeket ad. A tér hőmérséklete a sprinkler hőmérsékletével egyezik meg.

Sprinkler teszt feladat 1



1. ábra: Nyomás változása a sprinkler működés hatására

A tranziens során a CONTAIN gyorsabb nyomás, illetve hőmérséklet és gőztartalom csökkenést számol. Ez azt mutatja, hogy a CONTAIN sprinkler modellje hatékonyabban hűti le a teret. Ennek oka, hogy a CONTAIN, mint összevont paraméterű kód az egész teret egyetlen értékkel jellemzi, ezért egyenletesen, egyforma hatásfokkal hűti azt. A GASFLOW modellben azonban a sprinkler működése térbeli áramlást hoz létre, így a sprinkler hatása nem egyenletesen érvényesül. Az áramlás egy tóruszszerű képet mutat, ahol a közeg a falnál lefelé, míg a tér közepén felfelé áramlik. A kialakuló körkörös áramlás belsejében a gőzkoncentráció magasabb. Minél kisebb a relaxációs állandó, annál nagyobb a kialakuló koncentráció különbség. Ez a nagyobb állandó esetén néhány tized százalékot jelent, az alap $c_r = 0,01$ esetén megközelíti a 2%-ot. A kisebb relaxációs állandó több folyékony vizet jelent a légtérben, ami nagyobb inhomogenitást okoz a térben.

A különböző c_r relaxációs állandókkal végzett számítások összehasonlítása azt mutatja, hogy ha a relaxációs állandót (6) alapján határoztuk meg ($c_r = 0,6$), akkor a GASFLOW lassabb nyomáscsökkenést ill. gőzkoncentráció csökkenést

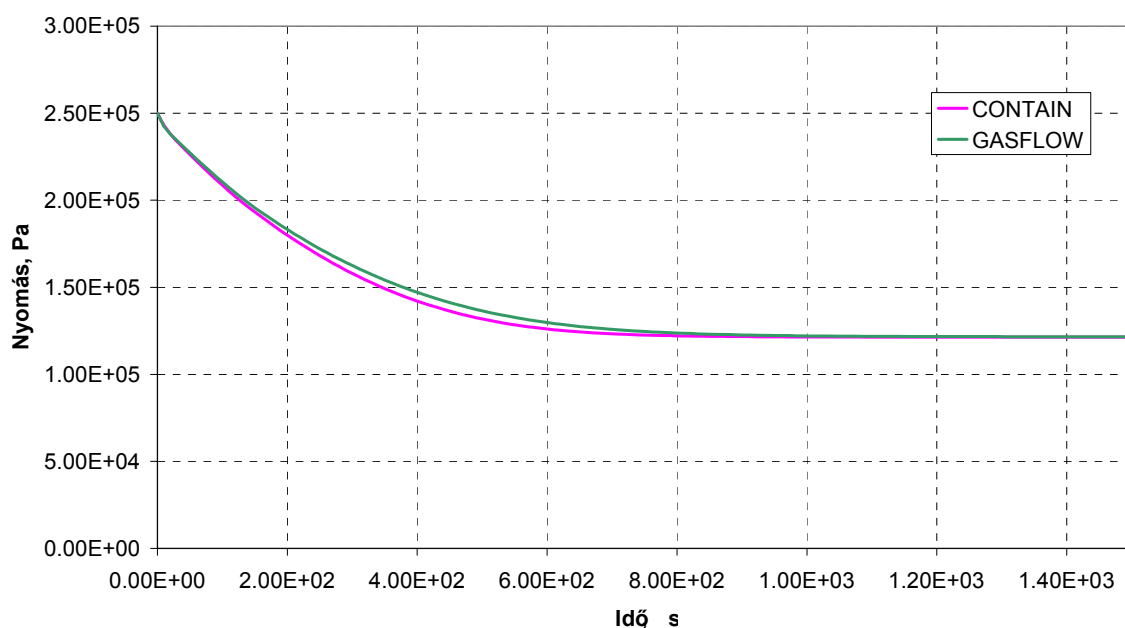
számol, mint a CONTAIN modellje. A két kód a legjobb egyezést a $c_r = 0,1$ érték mellett adta.

A módosított relaxációs állandó hatása a nem sprinklerezett térre

Ebben a feladatban az előző tesztben szereplő teret közepén fallal választottuk el, amelyben közepén egy átvezetés van. Mivel az átvezetés csak egy cella méretű, ezért a két térrész között nem tesz lehetővé cirkulációt sem a CONTAIN sem a GASFLOW kódban. A nyomás kiegyenlítődesét viszont engedi. A tér mindkét részében az előző feladathoz hasonlóan 2,5 bar nyomású 60 térf% gőzt tartalmazó közeg van 400 K hőmérsékleten. A sprinkler a tér jobb oldalán működik, csökkentve a nyomást, miáltal a tér baloldalán is elkezdődik a térfogati kondenzáció. A sprinkler tömegárama 83,5 kg/s, hőmérséklete 40°C, a cseppátmérő 1 mm. A c_r állandó értéke 0,1.

A sprinkler hatására a nyomás csökken (2. ábra), az átvezetés miatt a két térrészben a nyomás kiegyenlítődik. A GASFLOW és a CONTAIN eredményei jó egyezést mutatnak.

Sprinkler teszt feladat 2



2. ábra: A tér nyomása

A sprinklerezett térrészben a hőmérséklet és a gőzkoncentráció is jelentősen csökken, az állandósult állapotban a tér hőmérséklete megegyezik a sprinkler hőmérsékletével. A másik térrészben a hőmérséklet és gőzkoncentráció csökkenés kisebb mértékű. A GASFLOW és a CONTAIN eredményei jó egyezést mutatnak. A hőmérséklet és gőzkoncentráció változását a 3. és 4. ábra mutatja. Hasonlóan az előző tesztfeladathoz, a CONTAIN

kicsit gyorsabb csökkenést mutat, ami itt is a CONTAIN pontmodelljének a következménye.

4.3 Szakaszos sprinkler működés állandó gőzbetáplálás mellett

A harmadik feladatban a sprinkler nyomásról történő vezérlését ellenőriztük. A tesztmodell geometriai kialakítása azonos az első feladatban definiálttal. A kezdeti állapotban

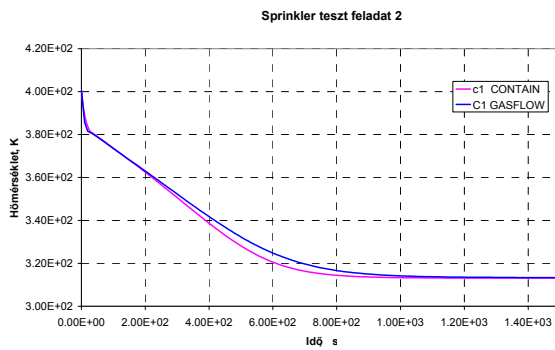
a nyomás 1 bar, a hőmérséklet 60 °C, a relatív nedvességtartalom 60%. A térbe 2 kg/s, 2,5 bar nyomású telített gőzt fecskendezünk be. A sprinkler bekapcsol, ha a nyomás nagyobb, mint 1,1 bar és kikapcsol, ha kisebb, mint 0,9 bar. A sprinkler tömegárama 167 kg/s, hőmérséklete 30 °C.

A számítást 1000 s-ig végeztük. A nyomás időbeni változását a 5. ábra mutatja. A gőz betáplálás hatására a nyomás nő, és eléri az 1,1 bar-t. Ekkor a sprinkler bekapcsol és a nyomás csökkenni kezd. Amikor eléri a 0,9 bar értéket, a sprinkler kikapcsol, és a nyomás újra növekedésnek indul. Az 1,1 bar elérésekor a sprinkler újra indul, és a nyomás csökkenni kezd.

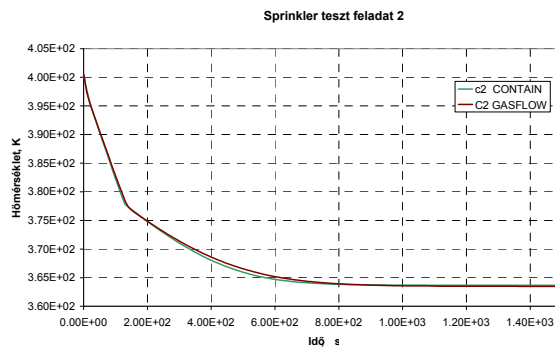
Az 3. ábrába berajzoltuk a CONTAIN által számolt eredményeket is. Látható, hogy amikor a sprinkler nem

működik, a nyomásnövekedés sebessége jól egyezik a két számításban. A sprinkler működés alatt a nyomáscsökkenés a GASFLOW számításnál viszont lényegesen lassabb. Ennek oka a 3D-s számításban keresendő. A CONTAIN-ban a sprinkler az egész térre egyformán hat, ugyanakkora a betáplált gőzforrás is egyenletesen növeli a tér gőztartalmát. A GASFLOW-ban a sprinkler befecskendezés és a gőzbetáplálás helye térben elválik egymástól. A gőzkoncentráció nem egyenletes a térben, a betáplálás helyén egy felfelé emelkedő csóva alakul ki, míg a sprinkler befecskendezés helyén kisebb a gőzkoncentráció. Ezért a sprinkler hatékonysága kisebb, mint a CONTAIN esetében.

A teszt feladat demonstrálta, hogy a sprinkler ki- és bekapcsolásának kódba beépített vezérlése jól működik.

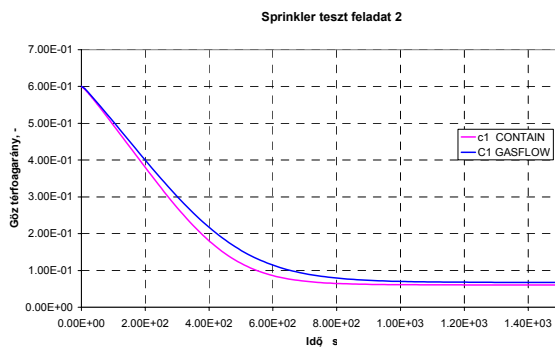


(a)

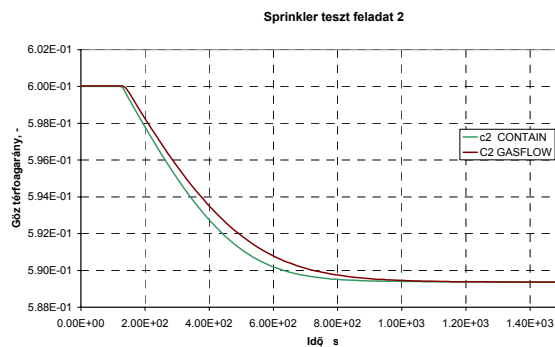


(b)

3. ábra: A tér átlagos hőmérséklete a sprinkler nélküli térrészben (a) és a sprinklerezett térrészben (b)



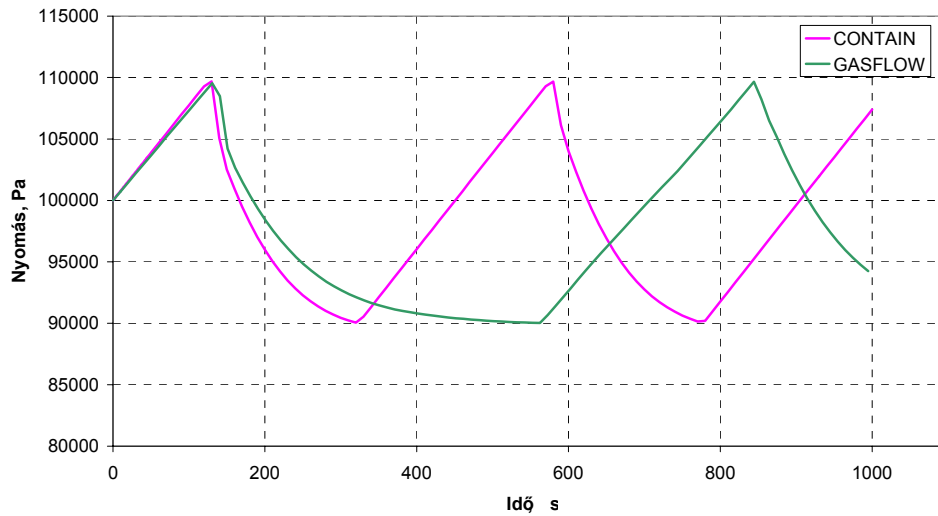
(a)



(b)

4. ábra: A tér átlagos gőzkoncentrációja a sprinkler nélküli térrészben (a) és a sprinklerezett térrészben (b)

Sprinkler teszt feladat 3



5. ábra: A nyomás időbeli változása

Összegzés

A munka során a GASFLOW kód sprinkler modelljét adaptáltuk a VVER sprinkler rendszeréhez. A konténment paramétereinek megfelelő tesztfeladatokkal ellenőriztük a sprinkler modell működését.

A hidrogénegések szempontjából a konzervatívabb eredmény az, ahol a sprinkler gyorsan csökkenti a gőzkoncentrációt, ezáltal megszüntetve a gőz inertáló hatását. A GASFLOW eredmények közül a legkonzervatívabb, azaz a leggyorsabb átlagos gőzkoncentráció csökkenést a $c_r = 0,1$ értékkel elvégzett számítás adta. Ez a számítás egyezett a legjobban a

CONTAIN számítással is, ahol mind a sprinkler, mind a betáplált gőz homogéne oszlik el a térben, ezáltal a sprinkler gyorsabban csökkenti a gőzkoncentrációt, ami ebben az esetben megegyezik a tér átlagos gőzkoncentrációjával.

Megvizsgáltuk, hogy a default értéktől eltérő relaxációs állandó hogyan hat annak a térnek a paramétereire, ahol nincs sprinkler befecskendezés, mivel a kódban a c_r paraméter globális érvényű. Az eredmény jó egyezést mutatott a CONTAIN kód eredményeivel.

Végül meggyőződünk róla, hogy a sprinkler konténment nyomásról történő vezérlése a kódban helyesen működik.

Irodalomjegyzék

- [1] Kostka, P., Téchy, Zs.: *Hydrogen Management for the VVER-440/213 Containment, Task 1, Analysis of hydrogen/steam distribution, combustion and pressure loads in the VVER-440/213 containment without mitigation measures, VEIKI Report, Rev.1, 21.51-414/1, July 2005.*
- [2] J.R.Travis et. al.: *GASFLOW: A Computational Fluid Dynamics Code for Gases, Aerosols, and Combustion, Vol. 1-3, LA-13357-M, FZKA-5994, October 1998.*
- [3] K.K. Murata et. al.: *Code Manual for CONTAIN 2.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Containment Analysis", NUREG/CR-6533, SAND97-1735, December 1997.*