

Szűcs Herman¹ 

CFD-szimuláció folyamatának kockázatelemzése

Risk Analysis of CFD Simulation Process

A CFD-szimulációk folyadék áramlási és transzportjelenségeinek vizsgálatára széles körben használatosak az ipar számos területén. Ennek oka, hogy a fejlesztési folyamatban nem szükséges költséges prototípusokat legyártani, illetve olyan paraméterek is vizsgálhatók, amelyek laboratóriumi mérésekkel nem. Ezen felül a CFD-szimulációk a hadiipar számára is széles körű alkalmazási területeket biztosítanak. A cikk a CFD-szimulációk folyamatát és lépéseit mutatja be, majd a folyamatra készített kockázatelemzést. A CFD-szimulációkra végzett kockázatelemzés segít feltárni a folyamat kritikus lépéseit és kimeneteleit, továbbá a szimulációs folyamatban rejlő fejlesztési potenciált is megmutatja.

Kulcsszavak: CFD-szimuláció, folyamat, kockázatelemzés, Leopold-mátrix

CFD simulations are widely used in numerous areas of the industry to study the flow and transport phenomena of fluids. The reason for this is that in the development process it is not necessary to produce expensive prototypes, and parameters that cannot be examined by laboratory measurements can also be tested. Besides, CFD simulations also provide a wide range of applications for the military industry. The article presents the process and steps of CFD simulations, followed by a risk analysis for the process. The risk analysis for CFD simulations helps to reveal the critical steps and outcomes of the process and also shows the development potential inherent in the simulation process.

Keywords: CFD simulation, process, risk analysis, Leopold matrix

¹ Széchenyi István Egyetem Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, PhD-hallgató; Audi Hungaria Zrt., fejlesztőmérnök, e-mail: szucsherman@outlook.hu

1. Bevezetés

A Computational Fluid Dynamics (CFD) szerepe a mérnöki előrejelzésekben olyan erőssé vált, hogy napjainkban a folyadékdinamika új, harmadik dimenziójának tekinthető a másik két dimenzió, a tiszta kísérlet és a tiszta elmélet klasszikus esetei mellett. 1687-től, amikor Isaac Newton lefektette a klasszikus mechanika alapjait, az 1960-as évek közepéig az úttörő kísérletek és az alapvető elméleti elemzések kombinációja hozzájárult a folyadékmechanika fejlődéséhez. A különböző kísérletek szinte mindig az áramlás egyszerűsített modelljeinek használatát igényelték azért, hogy az áramlást leíró alapegyenletek zárt formájú megoldásait megkapják. Ezeknek a zárt formájú megoldásoknak az előnyük az, hogy azonnal azonosítják a probléma néhány alapvető paraméterét, és kifejezetten bemutatják, hogy a problémákra adott válaszokat hogyan befolyásolják a paraméterek eltérései. Hátrányuk, hogy nem tartalmazzák az áramlás összes szükséges fizikáját. Ebbe a képbe az 1960-as évek közepén lépett a CFD, amely azon képességével, hogy „pontos” formában tudja kezelni az alapegyenleteket, valamint részletes fizikai jelenségek bevonásával, gyorsan népszerű eszköz lett a mérnöki elemzésekben. Ma a CFD támogatja és kiegészíti a tiszta kísérletet és a tiszta elméletet. Összefoglalva, a CFD állandó helyet foglal el az áramlástan minden aspektusában, az alaputatástól a mérnöki tervezésig.²

Természetesen az az eszköz, amely lehetővé tette a CFD gyakorlati elterjedését, a nagy sebességű digitális számítógépek megjelenése. A CFD-megoldások általában több ezer vagy akár millió parciális differenciálegyenlet ismételt számítását igénylik – ezt a feladatot a tudomány mai állása szerint analitikusan nem lehetséges megoldani valós komplex esetekben, csupán egyszerű áramlástan feladatoknál. A számítógép segítségével csupán numerikus, azaz közelítő megoldások realizálhatók. Ezért a CFD fejlődése, valamint alkalmazása az egyre részletesebb és kifinomultabb problémákra szorosan kapcsolódik a számítógépes hardver fejlődéséhez, különös tekintettel a tárolási (memória) és a végrehajtási sebességre (processzor). Éppen ezért az új szuperszámítógépek fejlődését ösztönző legjelentősebb erő a CFD-közösség részéről származik.³

A folyadékáramlás fizikai vonatkozásait három alapelv vezérli, amelyeken az összes folyadékdinamika, illetve azok szimulációs szoftverei alapulnak:⁴ 1. tömegmegmaradás; 2. lendületmegmaradás (Newton második törvénye); 3. energiamegmaradás törvénye.

Ezeket az alapelveket kifejezhetjük matematikai egyenletekkel, amelyek legáltalánosabb formájukban többnyire parciális differenciálegyenletek. A számítási folyadékdinamika részben az a tudományág, ahol az áramlás parciális differenciálegyenleteit számokkal helyettesíti, és ezeket a számokat térben és/vagy időben előre lépteti, ami a teljes vizsgált áramlási mező numerikus leírását adja meg. Ez nem a CFD mindent magában foglaló meghatározása; vannak olyan problémák, amelyek lehetővé teszik az áramlási mező azonnali megoldását anélkül, hogy előre kellene léptetni az időben vagy a térben, és vannak olyan alkalmazások, amelyek integrálegyenleteket tartalmaznak, nem pedig parciális differenciálegyenleteket. Mindenesetre minden ilyen probléma magában foglalja a számok manipulálását és egyenletek megoldását.

² John D. Anderson: Governing equations of fluid dynamics. In John W. Wendt (szerk.): *Computational fluid dynamics, An introduction*. Berlin, Springer, 2009. 15–51.

³ Anderson (2009) i. m.

⁴ Anderson (2009) i. m.

A CFD végterméke valójában számok gyűjteménye, ellentétben a zárt formájú analitikai megoldással. Hosszú távon azonban a legtöbb mérnöki elemzés célja zárt formában vagy másként a probléma kvantitatív leírása, vagyis a számok.⁵

A CFD-szimulációk fontosak a hadiipar számára, különösen a repülőgéptervezésben, ahol rendkívül komplex áramlások valósulnak meg komplex geometriák körül. A CFD-szimuláció ez esetben egy olyan alkalmas eszközt, illetve környezetet biztosít a tervezésben, amellyel a valós fizikai folyamatok modellezhetők. CFD-szimulációval vizsgálható továbbá a töltény hiperszonikus áramlása is, amelynek segítségével a lövedék repülési stabilitása növelhető és aerodinamikai optimalizálása elvégezhető. A CFD-szimuláció alkalmas repülőgéphordozó körül kialakult áramlás, különböző szélirányok és az azok által keltett turbulencia elemzésére is. Bomba és üres tüzelőanyag-tartály légi járműről történő leválásának CFD-szimulációja segítségével az ütközés elkerülhető a repülőgéppel, ezáltal a biztonság szintje növelhető, és a katasztrófális balesetek megelőzhetőek. A helikopterek aerodinamikája és a rotor körüli áramlás egyaránt vizsgálható CFD-szimulációval.⁶

2. A CFD-szimulációk folyamata

Általánosságban egy CFD-szimuláció futtatásához egy folyamatot kell követni, különös tekintettel az ipari környezetre, illetve komplex esetekre. Ezáltal függetlenül az áramlástani problémától, azonos felépítésű lesz a modell, ami egyszerűbb, gyorsabb, átláthatóbb szimulációhoz vezet. Egy a szerző által alkalmazott általános folyamat az 1. ábrán látható.⁷

Első lépésben a számítási tartományt kell definiálni, ami további lépésekre bontható. Ehhez a geometriát kell beolvasni a CFD-szoftverbe, ami komplex esetekben egy 3D modellt jelent, ezért CAD-környezetben kell elkészíteni, illetve előkészíteni a CFD-szimulációhoz. Ezután a számítási paramétereket kell meghatározni, ami azon változókat jelenti, amelyeket a szimulációval meg szeretnénk határozni, például sebesség, nyomás, hőmérséklet, sűrűség. A beolvasott geometrián definiálni kell a peremfeltételeket, azaz a számítási tartomány határoló részeit. Minden esetben szükséges egy bemenet, ahol a folyadék beáramlik, illetve egy kimenet, ahol kiáramlik. Ezen felül az összes határoló részt definiálni kell, például fal, szimmetria stb. megadható. Ez a számítási problémától függ.

⁵ Anderson (2009) i. m.

⁶ Michel Delanaye et alii: *From CAD to adapted solution for error controlled CFD simulations*. RTO AVT Symposium on "Reduction of Military Vehicle Acquisition Time and Cost Through Advanced Modelling and Virtual Simulation". Paris, France, 2002; Ulrich Kowarsch – Manuel Keßler – Ewald Krämer: *CFD-simulation of the rotor head influence to the rotor-fuselage interaction*. European Rotorcraft Forum, Southampton, 2014; Aleksander Olejnik – Adam Dziubiński – Łukasz Kizskowiak: Separation safety analysis using CFD simulation and remeshing. *Aerospace Science and Technology*, 106. (2020). 1–10.; Jian Shen et alii: Aerodynamics analysis of a hypersonic electromagnetic gun launched projectile. *Defence Technology*, 16. (2020), 4. 753–761.; Neale A. Watson et alii: Computational and experimental modelling study of the unsteady airflow over the aircraft carrier HMS Queen Elizabeth. *Ocean Engineering*, 172. (2019). 562–574.; Berkay Yasin Yildirim – Görkem Demir – Onurhan Ayhan: *Computational fluid dynamics modeling of a mortar bomb separation from a fixed-wing aircraft*. AIAA Scitech 2020 Forum, 2020.

⁷ Szűcs Herman: *Konstruktive Auslegung des EA855 Kühlkreislaufes im Hinblick auf EU7 Abgasnorm*. MSC-diplomadolgozat. Széchenyi István Egyetem, 2020.



1. ábra. CFD-szimulációk általános folyamata

Forrás: Szűcs (2020) i. m.

Második lépésben a numerikus módszert kell definiálni, amely további két lépésre bontható. A szoftver meghatározása kiemelt fontosságú, és normál esetben már nulladik lépésként kiválasztják. Ekkor csupán a szükséges programkiegészítőket kell kiválasztani, amelyek igazodnak a számításos tartományhoz. Ezt követően a differenciálegyenleteket kell definiálni, amelyeket minden egyes cellában megoldanak. Kereskedelmi szoftverek esetében ez a lépés a fizika kiválasztását jelenti, azaz kiválasztanak minden fizikai paramétert/tulajdonságot, és a program ezekhez definiálja az egyenleteket. Minden kereskedelmi forgalomban kapható program hasonlóan működik, viszont a CFD-mérnöknek ismernie kell annak hátterét.

Harmadik lépésben az áramlási szimulációt kell előkészíteni, ami további három lépésre bontható fel. Definiálni kell a parciális differenciálegyenletek kezdeti értékét, azaz $t = 0$ időpontban, feltéve, ha időben változó (*unsteady-state*) szimulációt futtatunk. Állandósult állapotbeli (*steady-state*) szimulációkhoz is definiálni kell a kezdeti értékeket, de ott a kezdeti iteráció értékét definiáljuk. Az első lépésben megadott/kiválasztott peremeken definiálni kell a differenciálegyenletek értékét, a kezdeti értékeknek megfelelően. Végül a konvergenciakritériumokat kell megadni, ami a szimuláció pontosságát rögzíti. Korábban említettem, hogy a CFD-szimulációk esetében néhány alaproblémától eltekintve analitikus megoldás nem lehetséges, csak numerikus. Ezzel a kritériummal kvázi a numerikus hiba nagyságát lehet konkretizálni.

Negyedik lépés a háló generálása, ami két fő lépésre bontható: felületi és térfigati háló generálása. A háló minden egyes cellájában lesznek kiszámítva a vizsgált paraméterek, azaz minden egyes cella tartalmazza a meghatározott parciális differenciálegyenleteket. A felületi háló létrehozása is további két lépésre bontható fel: globális és lokális háló generálása. Globális

háló alatt egy olyan felületi háló értendő, amely a teljes tartományt lefedi, viszont nincs besűrítve ott, ahol nagy gradiensek várhatók. A lokális háló esetében a globális hálót kell finomítani, azaz sűríteni a számításos tartomány azon részein, ahol a paraméterek változása várhatóan nagy. Végül a térfogati háló generálása következik. Általánosan kijelenthető, hogy a hálót ott kell sűríteni, ahol nagy gradiensek várhatók.

A szimuláció futtatását követően az eredményeket verifikálni kell, ami a következő kérdésre adja meg a választ: „Helyesen oldottuk meg az egyenleteket?” Azaz ellenőrizni kell, hogy a definiált egyenletek megoldása során a numerikus hiba határértéken belül van-e. A gyakorlatban ehhez a lépéshez hálófüggetlenségi tesztet oldanak meg a CFD-mérnökök. Ez a teszt azt jelenti, hogy a hálósűrűséget kétszeresére kell növelni, majd monitorozni egy adott paraméter (például nyomás) értékét, azaz változását. Ha a változás még érzékelhető, a hálót tovább kell sűríteni. Ha a paraméter értéke már nem változik, akkor az eggyel ritkább háló az ideális a szimuláció számára, és kijelenthető, hogy azzal a hálóval a numerikus hibák határértéken belüliek.

A verifikációt követi a validáció, ahol a következő kérdésre kell megadni a választ: „A helyes egyenleteket oldottuk meg?” Ehhez kísérleteket kell végrehajtani és a szimuláció eredményét ahhoz hasonlítani, vagy teóriával kell összevetni a szimuláció eredményét. Egyszerű esetben a teória a jobb döntés, viszont komplex esetekben sajnos nem mindig áll rendelkezésre teória, ezért ekkor kísérleteket kell végrehajtani, hogy validálni tudjuk a szimulációt. Fontos kijelenteni, hogy ipari környezetben nem kell minden egyes futtatott szimulációt validálni. Adott áramlási probléma esetében egy kidolgozott folyamat is elegendő, és a folyamatot kell validálni. Ezt követően pedig csak azt kell ellenőrizni, hogy a folyamatot követtük-e az áramlási probléma szimulálása során.

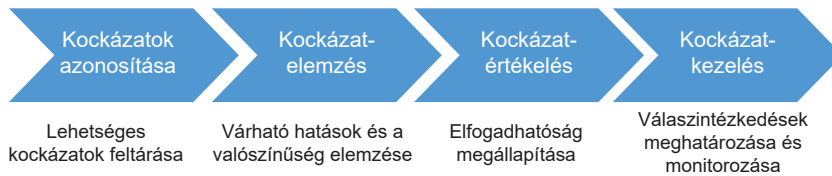
Sikeres verifikációt és validációt követően elkezdhető a szimuláció eredményeinek kiértékelése. Ez a lépés magában foglalja a vizsgált paraméterek vizualizálását (ábra és grafikon segítségével). Végül projekttől és beszámolási kötelezettségtől függően egy riportot kell készíteni a szimuláció eredményeiből, azok kiértékeléséből. Ezek a riportok is hasonlóképp épülnek fel, mint a jelen folyamat. Riportok esetében a legfontosabb irányelv az, hogy megfelelő háttérudással bárkinek képesnek kell lennie úgymond lemásolni a szimulációt. Ebből következik, hogy nemcsak a „mit”, hanem a „hogyan” kérdésekre is választ kell adnia a beszámolónak. Általánosan kijelenthető, hogy egy fejlesztési folyamatban elsősorban nehéz elérni a kívánt eredményt, ezért egy optimalizációs folyamatról beszélhetünk. Ehhez az elkészített riportnak tartalmaznia kell a fejlesztési potenciálokat, amelyek a következő szimuláció alapjaiként szolgálnak. Azaz a szimulációs folyamatot az elejéről meg kell ismételni, és a következtetéseket/ötleteket be kell dolgozni az új geometriába.

3. CFD-szimuláció kockázatelemzése

A CFD-szimuláció általános folyamatát (1. ábra) és fő lépéseit már bemutattam a 2. pontban. Minden szimuláció esetében érdemes definiálni egy folyamatot, mivel erre el lehet végezni egy általános kockázatelemzést, amely a tevékenységek és lehetséges kimenetek közötti kapcsolatot írja le. A hatékonyságot növeli, ha egy általános folyamatot vezetünk be, amely az áramlási problémától függetlenül alkalmazható. Ebből következik, hogy nem kell minden

egyes futtatott szimulációra elvégezni az elemzést, csupán a folyamatot kell követni. Ezek alapján az 1. ábrán bemutatott folyamatra végeztem el a kockázatelemzést.

A kockázatelemzés segítségével a nem kívánt események, körülmények és azok hatása vizsgálható. Számos területen alkalmazható, mint például a szélsőséges időjárási események káros hatásainak, földrengések kockázatának, illetve olajszármazékok talajszennyezésének vizsgálata. A kockázatelemzés folyamatának fő lépése a kockázatok azonosítása, a kockázatelemzés, a kockázatértékelés és a kockázatkezelés (2. ábra).⁸



2. ábra. Kockázatelemzés folyamata

Forrás: a szerző szerkesztése

A kockázatelemzéshez a Leopold-mátrixot választottam, mivel fontos az egyes tevékenységeket külön megvizsgálni, mert a lehetséges hatások erősen feladatspecifikusak. A Leopold-mátrix a grafikus kockázatelemzési módszerek egyik legegyszerűbb megoldása, és Luna B. Leopold nevéhez köthető, amely a várható környezeti hatások elemzésére és a hatások súlyozására készült. Jól alkalmazható folyamatokra, projektekre is. A mátrix soraiban az egyes tevékenységek vannak feltüntetve, amelyek minden esetben bekövetkeznek, mivel egy folyamatról beszélünk. Ezeknek a tevékenységeknek viszont különböző hatásai, kimenetelei lehetnek. Az oszlopokban az egyes problématerületek vagy más körülmények vannak feltüntetve, amelyek a tevékenységet/projektet esetlegesen befolyásolhatják. A mátrix feltöltése többféleképpen történhet, lehet egy x-szel jelölni, ahol hatás jelentkezik, vagy egy számmal jellemezni a hatás mértékét. A mátrix kiegészíthető különböző súlyfaktorokkal: hatás mértéke, bekövetkezés gyakorisága/valószínűsége, felismerhetőség, szabályozhatóság, társadalmi felelősség stb. Egyes változataiban a hatás nagysága és annak jelentősége/fontossága is fel van tüntetve ugyanazon mátrixban, míg mások külön mátrixot készítettek ezekre. Egyik előnye, hogy a mátrix oszlopai és sorai külön is összegezhetőek, így a kritikus tevékenységek, problémák feltárhatóak. Az összesített eredmények grafikusan is ábrázolhatóak. A módszer hátránya, hogy az értékelés szubjektív.⁹

⁸ Beke Dóra – Földi Alexandra – Kuti Rajmund: Közúti balesetek során bekövetkező talajszennyezések és kárelhárítási eljárások vizsgálata. *Hadmérnök*, 14. (2019), 3. 13–20.; Domokos László et alii: Kockázatelemzés és kockázatkezelés a közszférában és a közpénzügyi ellenőrzésben. *Pénzügyi Szemle*, (2015), 1. 7–28.; Kegyes-Brassai Orsolya – Richard P. Ray – Kuti Rajmund: Seismic risk and disaster management perspectives in Hungary, presented on a case study performed in Győr. *AARMS – Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 16. (2017), 2. 5–16.; Kuti Rajmund – Nagy Ágnes: Weather extremities, challenges and risks in Hungary. *AARMS – Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 14. (2015), 4. 299–305.

⁹ Fatin A. Al-Nasrawi – Sumaya L. Kareem – Lilian A. Saleh: Using the Leopold Matrix Procedure to assess the environmental impact of pollution from drinking water projects in Karbala city, Iraq. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671. (2020), 1–13.; Bosko Josimovic – Jasna Petric – Sasa Milijic: The use of the Leopold Matrix in carrying out the EIA for wind farms in Serbia. *Energy and Environment Research*, 4. (2014), 1. 43–54.; Torma András: *Környezetmenedzsment rendszerek*. 2011.

Első lépésként feltártam a szimulációs folyamat lehetséges nem kívánt kimeneteleit. A CFD-szimulációk esetében a következő nem kívánt eseményeket azonosítottam:

- téves problémadefiniálás,
- nem hálózható geometria,
- szingularitásprobléma,
- numerikus hiba,
- pontatlan eredmény,
- konvergenciaprobléma,
- nagy számítási igény.

A nem kívánt események azonosítását követően az egyes kimeneteleket a CFD-szimuláció folyamatához rendeltem. A kockázatok értékeléséhez készítettem egy Leopold-mátrixot (1. táblázat), amelyben a lehetséges nem kívánt kimeneteleket tüntettem fel az egyes tevékenységekre. A hatások vizsgálatához, következmények elemzéséhez egy 1-től 4-ig terjedő skálán értékeltem a következmény súlyosságát. A mátrixban alkalmazott skálabeosztás a hatás mértéke: 1 – nincs jelentős hatás, 2 – kis jelentőségű, 3 – közepes jelentőségű, 4 – nagy jelentőségű hatás.

1. táblázat. CFD-szimuláció folyamatának Leopold-mátrixa: hatáselemzés

Lehetséges kimenetel		Téves probléma-definiálás	Nem hálózható geometria	Szingularitásprobléma	Numerikus hiba	Pontatlan eredmény	Konvergencia-probléma	Nagy számítási igény	Összeg
1.	Számítási tartomány definiálása	3	2	3	1	3	3	1	17
2.	Numerikus módszer	1	3	4	4	4	3	2	22
3.	Áramlástan szimuláció előkészítése	1	2	1	4	4	3	2	18
4.	Háló generálása	1	2	3	1	4	3	2	17
5.	Szimuláció verifikálása	1	1	1	4	4	1	2	15
6.	Szimuláció validálása	1	1	1	1	4	1	1	11
7.	Eredmények és kiértékelés	1	1	1	1	4	1	1	13
Összeg		9	12	14	16	27	15	11	

Forrás: a szerző szerkesztése

A fenti táblázatból mind a tevékenységenként, mind a lehetséges kimenetelenként összegzett hatás mértéke leolvasható, ezáltal megállapítható, hogy mely tevékenységek jelentenek nagy kockázatot, mely kimenetel bekövetkezésének van a legjelentősebb hatása.

A folyamat legkritikusabb eleme a numerikus módszer, azaz a szoftver, illetve kiegészítő programcsomagok kiválasztása, valamint a differenciálegyenletek megválasztása, amelyek az aktuális áramlástan esetet a valóságnak megfelelően (elfogadható hibahatáron belül) írják le. A kimenetelekre vetítve a téves probléma definiálására nincs jelentős hatása a numerikus

módszernek. Ezenfelül nagy összhatással rendelkezik az áramlástan szimuláció előkészítése a CFD-szimuláció folyamatában. Kiemelném, hogy a lehetséges kimenetek tekintetében a legkritikusabb rész a pontatlan eredmény tekintetében mutatkozik meg. Minden tevékenységre vetítve magas jelentőségű hatása van – kivéve a számítási tartomány definiálását, ami közepes jelentőségű besorolást kapott. Nagy összhatással van még a numerikus hiba a kimenetek tekintetében.

A hatáselemzést követően a lehetséges hatások, illetve negatív kimeneteknek a bekövetkezési valószínűségét kell mérlegelni, amelyhez egy másik mátrixot készítettem. A készített Leopold-mátrix a 2. táblázatban látható. A bekövetkezés valószínűségét egy 1-től 4-ig terjedő skálán értékeltem. A mátrixban alkalmazott skála beosztás a bekövetkezés valószínűsége a következő lehet: 1 – nem jelentős valószínűség, 2 – alacsony bekövetkezési valószínűség, 3 – közepes valószínűség, 4 – magas bekövetkezési valószínűség.

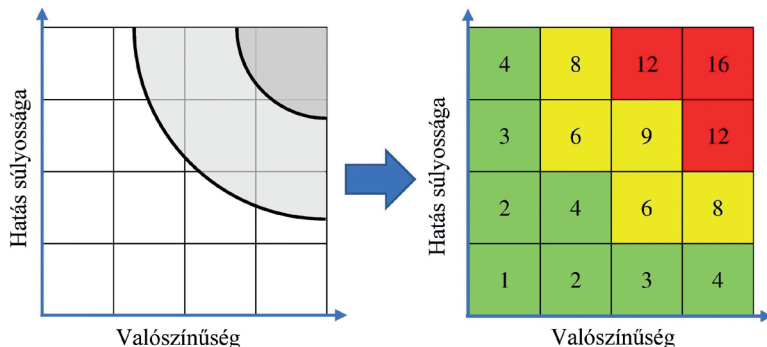
2. táblázat. CFD-szimuláció folyamatának Leopold-mátrixa: a bekövetkezés valószínűsége

Lehetséges kimenetel		Tevékenységek							Összeg
		Téves probléma-definiálás	Nem hálózható geometria	Szingularitási-probléma	Numerikus hiba	Pontatlan eredmény	Konvergencia-probléma	Nagy számítási igény	
1.	Számítási tartomány definiálása	3	3	2	1	2	3	1	16
2.	Numerikus módszer	1	2	3	3	3	3	3	19
3.	Áramlástan szimuláció előkészítése	1	2	1	3	2	4	2	16
4.	Háló generálása	1	4	2	1	3	4	3	19
5.	Szimuláció verifikálása	1	1	1	1	1	1	4	11
6.	Szimuláció validálása	1	1	1	1	4	1	1	11
7.	Eredmények és kiértékelés	1	1	1	1	2	1	1	10
Összeg		9	14	11	11	17	17	15	

Forrás: a szerző szerkesztése

Az elemzés alapján látható, hogy a pontatlan eredmény, illetve konvergenciaprobléma nagy valószínűséggel következik be. Az egyes tevékenységekre vetítve az összegzett bekövetkezési valószínűséget látható, hogy a numerikus módszer definiálása és a háló generálása tekinthető kritikus tevékenységnek. A szimuláció elkészítése során ezekre mindenképpen nagy figyelmet kell fordítani.

A hatáselemzés és a lehetséges kimenetek bekövetkezési valószínűségének meghatározását követően meg kell állapítani az elfogadhatósági tartományt, ami a 3. ábrán látható.



3. ábra. Elfogadhatósági tartomány meghatározása

Forrás: a szerző szerkesztése

A diagrammokon a hatás súlyosságát és a bekövetkezés valószínűségét ábrázoltam, amelyeket az 1. és 2. táblázatokban vizsgáltam. Az egyes kockázati szintek a kockázati vonalak alapján határozhatók meg. A piros szín magas kockázati szintet, a sárga közepes, míg a zöld szín alacsony kockázati szintet jelöl. A magas kockázati szint nem elfogadható kockázatot, a közepes átmenetileg elfogadható, míg az alacsony elfogadható kockázatot jelent.

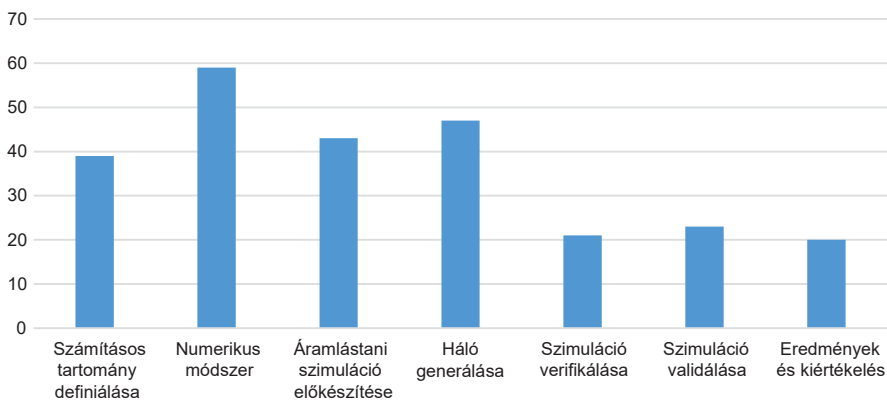
A kockázati szintek meghatározását követően a kockázati értéket kell megvizsgálni, amely alapján az elfogadhatóság eldönthető. A kockázat a hatás súlyossága szorozva a bekövetkezés valószínűségével. Az így számított kockázati értékek megjelenítéséhez a 3. táblázatban látható Leopold-mátrixot készítettem el. A kockázatok értékéhez a 2. ábra alapján az egyes elfogadhatósági szinteket is hozzárendeltem, amit a táblázatban az adott szint színével jelöltem: alacsony – zöld, közepes – sárga, piros – magas.

3. táblázat. CFD-szimuláció folyamatának Leopold-mátrixa: kockázat

Lehetséges kimenetel		Tevékenységek							Összeg
		Téves probléma-definiálás	Nem hálózható geometria	Szingularitási-probléma	Numerikus hiba	Pontatlan eredmény	Konvergencia-probléma	Nagy számítási igény	
1.	Számítási tartomány definiálása	9	6	6	1	6	9	1	39
2.	Numerikus módszer	1	6	12	12	12	9	6	59
3.	Áramlási szimuláció előkészítése	1	4	1	12	8	12	4	43
4.	Háló generálása	1	8	6	1	12	12	6	47
5.	Szimuláció verifikálása	1	1	1	4	4	1	8	21
6.	Szimuláció validálása	1	1	1	1	16	1	1	23
7.	Eredmények és kiértékelés	1	1	1	1	8	1	1	20
Összeg		15	27	28	32	66	45	27	

Forrás: a szerző szerkesztése

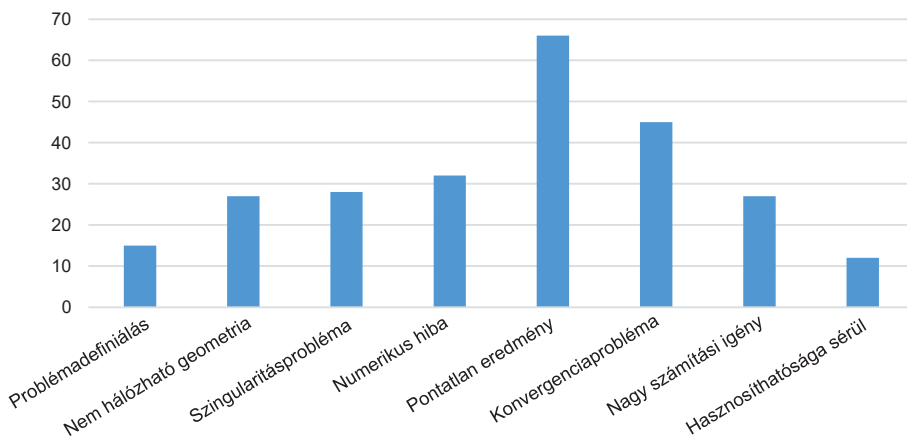
Az eredmények alapján látható, hogy a szingularitáshiba, a numerikus hiba, a pontatlan eredmény és a konvergenciaprobléma nem elfogadható kockázatot jelentenek. Ezenfelül a folyamat lépései közül a numerikus módszer, az áramlástan szimuláció előkészítése, a háló generálása és a szimuláció validálása nagyon kritikus lépésnek számít. Az összesített eredményeket a tevékenységekre (4. ábra) és a lehetséges kimenetekre (5. ábra) is ábrázoltam oszlopdiaagramokban.



4. ábra. Összesített kockázati szintek – tevékenységek

Forrás: a szerző szerkesztése

A szimulációs folyamat tevékenységei közül a numerikus módszer rendelkezik a legnagyobb kockázati szinttel, ezt követi a háló generálása és a szimuláció előkészítése. E tevékenységek a nem elfogadható kategóriába estek. Magas kockázattal rendelkezik még a számításos tartomány definiálása. Érdekes tény, hogy a validáció, amely szintén a nem elfogadható kategóriába tartozik, alacsony kockázatot jelent az összesített eredményekben.



5. ábra. Összesített kockázati szintek – lehetséges kimenetek

Forrás: a szerző szerkesztése

A lehetséges kimenetek közül magas kockázati szinttel rendelkezik a pontatlan eredmény és a konvergenciaprobléma, amelyek a nem elfogadható kockázatok közé lettek sorolva. A szingularitáshiba és a numerikus hiba, amelyek szintén nem elfogadható kockázatok láthatóan alacsonyabb kockázati szinttel rendelkeznek.

A 3. táblázat alapján a kockázatok kezelésére különböző válaszingedések meghatározása szükséges, amelyeket a CFD-szimuláció általános folyamatára fogalmaztam meg az 4. táblázatban.

4. táblázat. Kockázatkezelés

Kockázat	Értékelés	Intézkedések
Téves problémadefiniálás	Kockázat elfogadása	Ún. „best practice” dokumentum készítése, amely általános áramlástanai eseteket tartalmaz. Amennyiben olyan esetet szimuláltunk, amelyet eddig még nem, akkor ennek a dokumentumnak a kiegészítése.
Nem hálózható geometria	Kockázat elfogadása	Nem szükséges intézkedés, mivel a folyamat nem tud tovább menni addig, amíg a geometria nem lett behálózva.
Szingularitáscsökkenés	Kockázat csökkentése	Megfelelő numerikus módszer kiválasztása, a kiválasztáshoz egy „best practice” dokumentum létrehozása.
Numerikus hiba	Kockázat csökkentése	Megfelelő numerikus módszer kiválasztása és a szimuláció előkészítése során megfelelő kritériumok beállítása. Az értékek kiválasztásához „best practice” dokumentum létrehozása.
Pontatlan eredmény	Kockázat csökkentése	Optimális hálósűrűség beállítása. A validáció alapos megtervezése és precíz kivitelezése. Elvonatkoztatás a szimulációtól, azaz annak ismerete, hogy nagyságrendileg mekkora eredmény várható. Ehhez az áramlástanai ismeretek elmélyítése szükséges.
Konvergenciaprobléma	Kockázat csökkentése	Megfelelő numerikus módszer kiválasztása és a szimuláció előkészítése során megfelelő kritériumok beállítása. A kezdeti érték beállítását is a szimulációtól elvonatkoztatva, azaz a várható érték (nagyságrend) figyelembevételével kell megtenni.
Nagy számítási igény	Kockázat elfogadása	Adott áramlástanai problémákra nagyságrendileg a cellaszám meghatározása, ami útmutatóként használható, ezzel megakadályozva azt, hogy a számítási igény drasztikusan nagy legyen.

Forrás: a szerző szerkesztése

A kockázatkezeléshez ajánlott megoldás, hogy a kritikus lépésekhez egy „best practice” dokumentumot szükséges létrehozni. Ezzel a kockázatok jelentősen csökkenthetők lennének.

4. Összefoglalás

A CFD-szimuláció hatékony módszer az áramlástanai jelenségek vizsgálatára, amelyet ma már számos mérnöki területen használnak az iparban és a hadiiparban egyaránt. A CFD-szimuláció folyamata jól elhatárolható részfolyamatokra bontható, amelyeket a cikk részletesen bemutat. E lépéseknek eltérő kockázata van a szimulációra nézve. A CFD-szimulációkra végzett kockázatelemzés segít feltárni a folyamat kritikus lépéseit és kimeneteleit. A kockázatelemzéshez a Leopoldmátrixot használtam, amelynek segítségével a lehetséges hatások súlyosságát és a bekövetkezés valószínűségét is megvizsgáltam. A vizsgálat után meghatároztam az elfogadhatósági szinteket, és hozzárendeltem az egyes tevékenységekhez. A nem elfogadható kockázatokra válaszingedéseket is meghatároztam. Ennek segítségével megállapítottam, hogy a szimulációs folyamat mely lépéseinek fejlesztése szükséges még a jövőben. A kockázatelemzés jól szemlélteti, hogy a szimuláció mely lépéseire érdemes különösen nagy figyelmet fordítani a szimulációs mérnököknek.

Felhasznált irodalom

- Al-Nasrawi, Fatin A. – Sumaya L. Kareem – Lilian A. Saleh: Using the Leopold Matrix Procedure to assess the environmental impact of pollution from drinking water projects in Karbala city, Iraq. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671. (2020). 1–13. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012078>
- Anderson, John D.: Governing equations of fluid dynamics. In John F. Wendt (szerk.): *Computational fluid dynamics. An introduction*. Berlin, Springer, 2009. 15–51. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-540-85056-4_2
- Beke Dóra – Földi Alexandra – Kuti Rajmund: Közúti balesetek során bekövetkező talajszennyezések és kárelhárítási eljárások vizsgálata. *Hadmérnök*, 14 (2019), 3. 13–20. Online: <https://doi.org/10.32567/hm.2019.3.2>
- Delanaye, Michel et alii: *From CAD to adapted solution for error controlled CFD simulations*. RTO AVT Symposium on "Reduction of Military Vehicle Acquisition Time and Cost through Advanced Modelling and Virtual Simulation", Paris, 2002.
- Domokos László – Nyéki Melinda – Jakovác Katalin et alii: Kockázatelemzés és kockázatkezelés a közszférában és a közpénzügyi ellenőrzésben. *Pénzügyi Szemle*, (2015), 1. 7–28. Online: http://real.mtak.hu/39200/1/domokos_2015_1_m.pdf
- Josimovic, Bosko – Jasna Petric – Sasa Milijic: The use of the Leopold Matrix in carrying out the EIA for wind farms in serbia. *Energy and Environment Research*, 4. (2014), 1. 43–54. Online: <https://doi.org/10.5539/eer.v4n1p43>
- Kegyés-Brassai Orsolya – Richard P. Ray – Kuti Rajmund: Seismic risk and disaster management perspectives in Hungary, presented on a case study performed in Győr. *AARMS – Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 16. (2017), 2. 5–16. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/aarms/article/view/1584>
- Kowarsch, Ulrich – Manuel Keßler – Ewald Krämer: *CFD-simulation of the rotor head influence to the rotor-fuselage interaction*. European Rotorcraft Forum, Southampton, 2014.
- Kuti Rajmund – Nagy Ágnes: Weather extremities, challenges and risks in Hungary. *AARMS – Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, 14. (2015), 4. 299–305. Online: <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/aarms/article/view/1927>
- Olejnik, Aleksander – Adam Dziubiński – Łukasz Kiszowski: Separation safety analysis using CFD simulation and remeshing. *Aerospace Science and Technology*, 106. (2020). 1–10. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106190>
- Shen, Jian – Shao-bo Fan – Ya-xin Ji et alii: Aerodynamics analysis of a hypersonic electromagnetic gun launched projectile. *Defence Technology*, 16. (2020), 4. 753–761. Online: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.01.008>
- Szűcs Herman: *Konstruktive Auslegung des EA855 Kühlkreislaufes im Hinblick auf EU7 Abgasnorm*. MSc-diplomadolgozat. Széchenyi István Egyetem, 2020.
- Torma András: *Környezetmenedzsment rendszerek*. 2011. Online: https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0021_Kornyezetmenedzsment_rendszerek/index.html
- Watson, Neale – A. M. F. Kelly – I. Owen et alii: Computational and experimental modelling study of the unsteady airflow over the aircraft carrier HMS Queen Elizabeth. *Ocean Engineering*, 172. (2019). 562–574. Online: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.024>
- Yildirim, Berkay Yasin – Görkem Demir – Onurhan Ayhan: *Computational fluid dynamics modeling of a mortar bomb separation from a fixed-wing aircraft*. AIAA Scitech 2020 Forum, 2020. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2020-1995>