

Híd-struktúrájú rendszerek megbízhatóságának érzékenységelemzése

Pokorádi László

Óbudai Egyetem, Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet, 1081 Budapest, Népszínház utca 8.
(e-mail: pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu)

Kivonat: A komplex kapcsolatú rendszerek vizsgálata egyre fontosabb szerepet kap a műszaki és közlekedéstudomány különböző területein. Az egyik legfontosabb kérdés ezen rendszerek megbízhatósága, illetve a megbízhatóságuk érzékenysége. A Szerző munkájának fő célja a repülőgép sárkány rendszerek és gázturbinás hajtóművel matematikai diagnosztikai módszerének adaptálása véges, komplex kapcsolatú rendszerek megbízhatósági érzékenységelemzésére. A tanulmány a kidolgozott eljárást mutatja, valamint annak alkalmazási lehetőségét egy híd-struktúrájú rendszer lehetséges üzemmódjainak példán keresztül.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre nagyobb szerephez jut a bonyolult, integrált rendszerek, különféle hálózatokban lejátszódó folyamatok kockázat-, illetve megbízhatóság-szemponjú vizsgálata, főleg a korszerű közlekedés-, és járműmérnöki tudományokban.

Balogh és Hanka (2013) dolgozatában a Bayes-féle módszer alkalmazási lehetőségét mutatják be a kockázatelemzés illetve a mérnöki tervezés problémakörében. A Bayes-féle módszer vonzóereje abban áll, hogy képes egyesíteni a megfigyelésből kapott adatokból valamint az a priori feltevésekből kapott információkat, ezáltal generálva egy a posteriori információt olyan mennyiségekkel kapcsolatban, amelyek a vizsgálatok szempontjából fontosak lehetnek. Ez a módszer egyaránt hatékonyan alkalmazható ritka eseményekkel kapcsolatos mérnöki tervezésben valamint kockázatelemzésben és a tudomány egyéb területein is.

Az EFOP-3.6.2-16 „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában” címet viselő projekt kutatási feladatainak ellátásában a Széchenyi István Egyetem, a Neumann János Egyetem, a Dunaújvárosi Egyetem és az Óbudai Egyetem konzorciuma vesz részt. A kutatási projektünk egyik célja olyan matematikai módszerek, eljárások kidolgozása, amelyek támogatják az autonóm járművekben és közlekedési rendszerekben megjelenő és egyre nagyobb bonyolultsági fokot elérő technikai rendszerek és rendszerelemek tervezését a működési biztonság és üzemeltetési kockázati tényezőinek figyelembevételével. Ezek közé tartozik a jármű szenzorok és szenzorhálózatok, járművek közti kommunikációs rendszerek, folyamatok megbízhatóságának, illetve a hozzájuk kapcsolódó kockázatok moduláris érzékenységelemzési eljárásainak kidolgozása, továbbfejlesztése (Pokorádi & Lázás-Fülep, 2019).

A korszerű gépjárművekben egyre nagyobb mértékben alkalmazott szenzorok alapvetően híd-struktúrával rendelkeznek (Nagy & Tuloki, 2019). Az úgynevezett hídmódszerrel való mérés az egyik legpontosabb mérési módszer egyenáramú és váltakozó áramú áramkörökben egyaránt. A leggyak-

rabban használt híd a Wheatstone-híd, mellyel nem csak ellenállásokat, hanem ellenállás-változásra visszavezethető nem-elektromos mennyiségeket (hőmérsékletet, erő, deformáció, nyomás, nyomaték vagy elmozdulás) is lehet mérni (Tuloki & Nagy, 2018). Általában a híd négy ellenállásból áll, melyeket egy négyzet oldalai mentén helyezünk el; a hidat az egyik átló mentén tápláljuk egyenfeszültséggel, a másik átlójára pedig egy galvanométert kötünk.

Zentai (2018) dolgozatában javaslatot tett gráfok – mint például a járművek közt kialakítandó kommunikációs hálózatok – csomópontjainak kockázati osztályokba sorolására olyan módon, hogy az egy osztályon belüli távolság minél kisebb legyen. Meghatározta egy kockázat alapú távolságfüggvényt tetszőleges gráf csomópontjai között, melyre az adatbázisból ismert klaszterező eljárások használhatók.

Az alkalmazott dinamikus hálózati modell a kutatásainkban, a szűkített hálózati forgalmi modellt alkalmazza szerzőtársai-val Péter (2017a) (2017b). A városi trajektórák menti környezetterhelés analízisére gyorsított módszerek kifejlesztésére és validálása nyílik mód. Az általunk alkalmazott nagyméretű hálózati modellből korábbi validálások alapján, kinyerhetők a haladási profilok, amelyek a valóságnak megfelelően bonyolultak, összetettek, gyorsulások, lassulások és gyakori megállások sorozatából állnak. Ezek az eredmények egyszerre gyakorolnak pozitív hatást az új diagnosztikai rendszer kifejlesztésre és a közúti-városi közlekedésre és a biztonságra is.

A moduláris megközelítésű érzékenységelemzés lényege, hogy a rendszert részegységekre bontjuk és azok érzékenységi együtthatóit külön-külön determináljuk, majd a későbbiekben részletesen leírt mátrixalgebrai eljárással adjuk meg a rendszer kimenő jellemzőjének, jellemzőinek érzékenységi együtthatóit.

A Szerző kutatómunkájára nagymértékben hatott Myers (2010) könyve, mely a komplex rendszerek megbízhatóságát, és megbízhatóság-elemző módszereit írja le. Megfogalmazása szerint az a rendszer, mely nem csak egyszerű kölcsönös kapcsolatokkal bír, tekinthető komplex rendszernek. Myers megfogalmazásában a komplex kapcsolatú (SwCI – System with Complex Interconnections) rendszerek a többszörös, redundáns részeket tartalmazó hálózatok. Megállapítja, az

ügynevezett egyszerű kapcsolatokkal bíró rendszerek megbízhatósági elemzése során előszeretettel használt blokkdiagrammos modellezési módszerek közvetlenül nem alkalmazhatóak a komplex kapcsolatú rendszerek megbízhatósági elemzése során, viszont, ismeretük elengedhetetlen. Ezen megállapítás tette szükségessé az eredetileg „csak” adaptálni tervezett elemző eljárás módosításának keresését, valamint az átdolgozott érzékenységvizsgálati módszer alkalmazhatóságának megállapítását vagy elvetését.

A kutatómunka során adaptálásra tervezett lineáris diagnosztikai modellek repülőműszaki tudományokon belüli alkalmazásának eredményei Pokorádi (2008), publikációjában leheltek fel.

A Szerző korábbi eredményei a (Pokorádi, 2013), (Pokorádi, 2015), valamint (Pokorádi & Seebauer 2019) publikációkból ismerhetők meg.

Jelen tanulmány célja a repülőgép-rendszerek és gázturbinás hajtóművek lineáris diagnosztikai elemzéseinél már jól alkalmazott rendszerérzékenységi, modellvizsgálati eljárások módosításának kidolgozása úgy, hogy azok alkalmassá váljanak a komplex kapcsolatú (esetünkben híd-struktúrájú) hálózatok és rendszerek megbízhatóságának, megbízhatóság-érzékenységének, valamint bizonytalanságának megfelelő minőségű leírására, elemzésére. Ezen moduláris, csomóponti megközelítésű, könnyen algoritmizálható módszerek módosításával új eljárások dolgozhatók ki hálózatok és rendszerek megbízhatósági, valamint paraméter érzékenységi és bizonytalansági elemzésére.

A moduláris, csomóponti megközelítés következtében a vizsgálati módszerekhez tipizált, vagy tipizálható modellblokkokat tudunk meghatározni, melyek segítségével egy konkrét vizsgált hálózat érzékenységi, paraméterbizonytalansági modellje könnyen, jól algoritmizálható eljárással állítható fel. Ennek következtében olyan elemzési módszereket, technikákat kaphatunk, melyek nem igénylik az alkalmazó mély, megalapozott matematikai ismereteit. A moduláris érzékenységi elemzési eljárás előnyei a következőkben fogalmazhatóak meg:

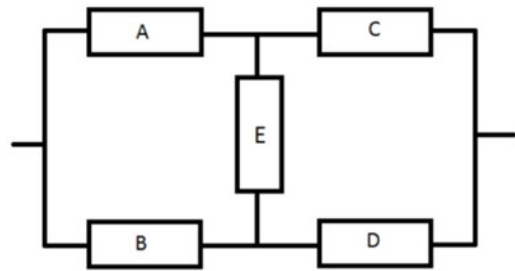
- jól algoritmizálható;
- a rész-érzékenységi együtthatók – az egyszerű függvények következtében – viszonylag könnyen meghatározhatóak;
- a tipikus, vagy tipizálható részegységek érzékenységi együtthatói struktúrája azonos, így csak a paramétereik behelyettesítésével egyszerűen kiszámíthatóak;
- az érzékenységi mátrix megadja a részrendszerek, elemcsoportok érzékenységi együtthatóit is, nem csak a teljes rendszer kimenő jellemzőjének, jellemzőinek.

A tanulmány az alábbi fejezetekből áll: A 2. fejezet a híd-struktúrájú rendszerek igazságtáblázat alkalmazásával történő megbízhatóság elemzési módszerét mutatja be – különböző lehetséges üzemmódok esetén. A 3. fejezetben az előzőekben felállított megbízhatósági modellek moduláris érzékenységvizsgálata kerül leírásra. A 4. fejezetben a modelleredményekből levonható következtetések olvashatók. Végezetül a Szerző összegzi a tanulmány eredményeit és megfogalmazza a jövőbeni kutatási célkitűzéseit.

2. A RENDSZER-MEGBÍZHATÓSÁG MEGHATÁROZÁSA

Az 1. ábrán látható híd-struktúrájú rendszer öt – A; B; C; D; E – blokkból áll. Az elemeknek – és így a rendszernek is – csak két állapota van – üzemképes (a szükséges funkciót teljesíti) és a hibás (nem látja el a szükséges funkciót) Az elemállapotok az r_i megbízhatósággal, illetve a p_i meghibásodási valószínűséggel jellemezhetők, melyek összege:

$$r_i + p_i = 1 \quad (1)$$



1. ábra Híd-struktúrájú rendszer blokkdiagramja

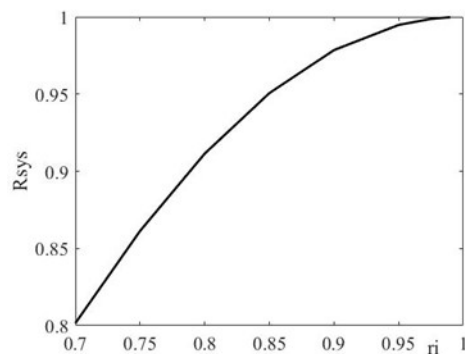
Az egyik megközelítés a híd-struktúrájú rendszer megbízhatóságának korrekt kiszámítása a vizsgált rendszer összes jó rendszerállapota valószínűségének összegzésével történhet.

2.1 Általános rendszer-megbízhatóság

Általános esetben egy híd-struktúrájú rendszer működik, ha egy jel vagy anyag „átmegy” rajta. Például ez lehet két párhuzamos útvonal, melyeket egy összekötő úttal kapcsolunk össze, a forgalmuk ingadozásának kiegyenlítésére. Az üzemképes rendszert eredményező állapotokat a 6.; 8.; 11; 12; 14; 15; 16; 22; 23; 24; 26; 27; 28; 30; 31. és 32. sorok szemléltetik az 1. Táblázatban, így a rendszerállapot valószínűségek

$$R_{sys} = Q_6 + Q_8 + Q_{11} + Q_{12} + Q_{14} + Q_{15} + Q_{16} + Q_{22} + Q_{23} + Q_{24} + Q_{26} + Q_{27} + Q_{28} + Q_{30} + Q_{31} + Q_{32} \quad (2)$$

összege a rendszer megbízhatósága. A 2. ábra a R_{sys} rendszer megbízhatóságát mutatja a komponensek r_i különböző, de azonos értékű megbízhatóságai esetén.



2. ábra Híd-struktúrájú rendszer megbízhatósága az elemek megbízhatósága függvényében

1. Táblázat híd-struktúrájú rendszer igazságtáblája

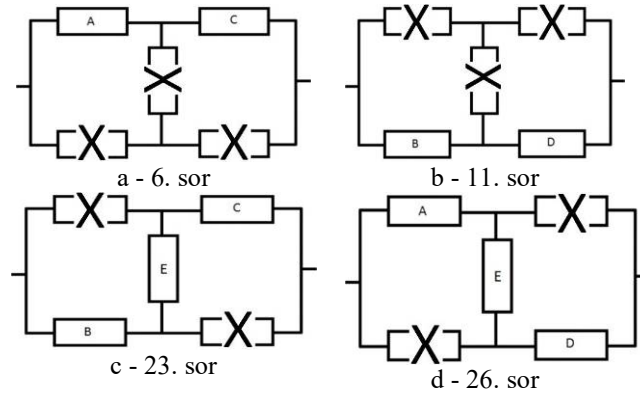
i	A	B	C	D	E	System	Q_i
1	0	0	0	0	0	0	$p_A p_B p_C p_D$
2	1	0	0	0	0	0	$r_A p_B p_C p_D$
3	0	1	0	0	0	0	$p_A r_B p_C p_D$
4	1	1	0	0	0	0	$r_A r_B p_C p_D$
5	0	0	1	0	0	0	$p_A p_B r_C p_D$
6	1	0	1	0	0	1	$r_A p_B r_C p_D$
7	0	1	1	0	0	0	$p_A r_B r_C p_D$
8	1	1	1	0	0	1	$r_A r_B r_C p_D$
9	0	0	0	1	0	0	$p_A p_B p_C r_D$
10	1	0	0	1	0	0	$r_A p_B p_C r_D$
11	0	1	0	1	0	1	$p_A r_B p_C r_D$
12	1	1	0	1	0	1	$r_A r_B p_C r_D$
13	0	0	1	1	0	0	$p_A p_B r_C r_D$
14	1	0	1	1	0	1	$r_A p_B r_C r_D$
15	0	1	1	1	0	1	$p_A r_B r_C r_D$
16	1	1	1	1	0	1	$r_A r_B r_C r_D$
17	0	0	0	0	1	0	$p_A p_B p_C p_D$
18	1	0	0	0	1	0	$r_A p_B p_C p_D$
19	0	1	0	0	1	0	$p_A r_B p_C p_D$
20	1	1	0	0	1	0	$r_A r_B p_C p_D$
21	0	0	1	0	1	0	$p_A p_B r_C p_D$
22	1	0	1	0	1	1	$r_A p_B r_C p_D$
23	0	1	1	0	1	1	$p_A r_B r_C p_D$
24	1	1	1	0	1	1	$r_A r_B r_C p_D$
25	0	0	0	1	1	0	$p_A p_B p_C r_D$
26	1	0	0	1	1	1	$r_A p_B p_C r_D$
27	0	1	0	1	1	1	$p_A r_B p_C r_D$
28	1	1	0	1	1	1	$r_A r_B p_C r_D$
29	0	0	1	1	1	0	$p_A p_B r_C r_D$
30	1	0	1	1	1	1	$r_A p_B r_C r_D$
31	0	1	1	1	1	1	$p_A r_B r_C r_D$
32	1	1	1	1	1	1	$r_A r_B r_C r_D$

2.2 Kritikus rendszerállapot

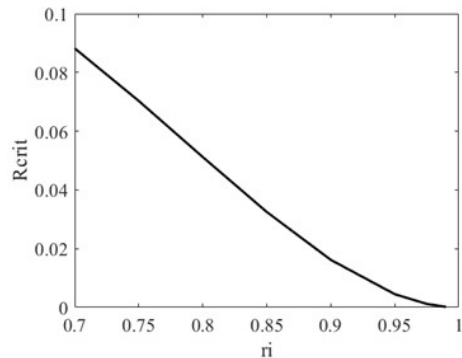
A kritikus rendszerállapot esetén nincs redundancia a rendszerben. Ez azt jelenti, hogy egyetlen elem kiesése is már a rendszer leállítását eredményezi. A lehetséges kritikus rendszer állapotokat – a 6; 11; 23. és 26. sorok az 1. Táblázatban – a 3. ábrán mutatjuk be. A kritikus rendszer bekövetkezési valószínűsége az

$$R_{crit} = Q_6 + Q_{11} + Q_{23} + Q_{26} \quad (3)$$

egyenlettel határozható meg. A 4. ábra az R_{crit} kritikus rendszer megbízhatóság változását mutatja a komponensek különböző, de azonos értékű r_i megbízhatóságai esetén.



3. ábra Híd-struktúrájú rendszer lehetséges kritikus rendszerállapotai



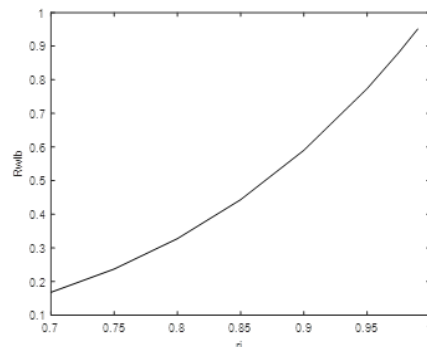
4. ábra Híd-struktúrájú rendszer kritikus állapotainak valószínűsége az elemek megbízhatósága függvényében

2.3 Wheatstone hídhoz hasonló rendszerek megbízhatósága

A járművekben általában a Wheatstone hídhoz hasonló kialakítású (Wheatstone Like Bridges – WLB) szenzorokat alkalmaznak. A Wheatstone hídhoz hasonló rendszerek üzemképes állapotában az összes alkatrésznek működőképesnek kell lennie. Ebben az esetben a Wheatstone hídhoz hasonló rendszer megbízhatósága kiszámítható a 32. rendszerállapot valószínűségére (lásd az I. táblázatot):

$$R_{WLB} = r_A r_B r_C r_D r_E \quad (4)$$

Az 5. ábrán a Wheatstone hídhoz hasonló kialakítású rendszer R_{WLB} megbízhatóságának változása látható a komponensek különböző, de azonos értékű r_i megbízhatóságai esetén.



5. ábra Wheatstone hídhoz hasonló rendszer megbízhatósága az elemek megbízhatósága függvényében

3. AZ ÉRZÉKENYSÉGELEMZÉS

Egy skalár-vektor függvény x_i független változó szerinti érzékenységi együtthatója a

$$K_{xi} = \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{f(\mathbf{x})} \quad (5)$$

parciális differenciálegyenlettel határozható meg.

Moduláris érzékenység vizsgálat esetén nem a rendszert leíró egyetlen skalár-vektor függvényt írjuk fel és határozzuk meg annak érzékenységi együtthatóit. Ekkor a vizsgálat szempontjából fontos modulokra – esetünkben a lehetséges rendszerállapotokra – bontjuk a rendszert és külön-külön határozzuk meg azok érzékenységét. A modulokat úgy célszerű kiválasztani, hogy azok érzékenységi együtthatói tipizálhatóak legyenek.

A komplex kapcsolatú rendszerek megbízhatósági modelljeiben a lehetséges rendszerállapotok bekövetkezési valószínűségei – lásd 1. Táblázat jobboldali oszlopának egyenleteit – az alábbi általános formában írhatóak fel:

$$Q_k = f_k(r_A; r_B; r_C; r_D; r_E) = \prod_{j=A}^E u_j(r_j) \quad (6)$$

ahol az u_j belső függvény az alábbi két forma egyikét veheti fel az (1) összefüggés alapján:

- ha a vizsgált elem üzemképes, akkor a belső függvény, illetve a (6) függvény r_j szerinti érzékenységi együtthatója:

$$u_j = r_j \rightarrow K_{Q_k r_j} = 1 \quad (7)$$

- ha a vizsgált elem hibás, akkor a belső függvény, illetve a (6) függvény r_j szerinti érzékenységi együtthatója:

$$u_j = 1 - r_j \rightarrow K_{Q_k r_j} = -\frac{r_j}{Q_k} \prod_{\substack{i=A \\ i \neq j}}^E u_i \quad (8)$$

A rendszer megbízhatóságának – lásd (2), illetve (3) egyenleteket – az üzemképes rendszerállapotok bekövetkezési valószínűségei szerinti érzékenységi együtthatók:

$$K_{R_i} = \frac{Q_i}{R} \quad (9)$$

Ha a vizsgált rendszer és a lehetséges rendszerállapotainak megbízhatósága egy $\mathbf{y} = f(\mathbf{x})$ általános vektor-vektor függvénnyel írható le (ahol \mathbf{y} a függő; \mathbf{x} a független változók vektora) a függő változók relatív érzékenységét a

$$\mathbf{A} \delta \mathbf{y} = \mathbf{B} \delta \mathbf{x} \quad (10)$$

illetve

$$\delta \mathbf{y} = \mathbf{D} \delta \mathbf{x} \quad (11)$$

mátrixegyenletekkel tudjuk leírni, ahol

$$\mathbf{D} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad (12)$$

érzékenységi mátrix elemei megmutatják, hogy a független paraméterek változása a függő változók milyen mértékű csökkenését, illetve növekedését okozzák. Esetünkben megfogalmazva: mely rendszerelemek megbízhatóságának változása bír a legnagyobb hatással a teljes rendszer megbízhatóságára, illetve a rendszerállapotok valószínűségére.

Híd-struktúrájú rendszerek megbízhatóságának vizsgálatakor a független változók vektora:

$$\mathbf{x}^T = [r_A \ r_B \ r_C \ r_D \ r_E] \quad (13)$$

3.1 Általános rendszer-megbízhatóság

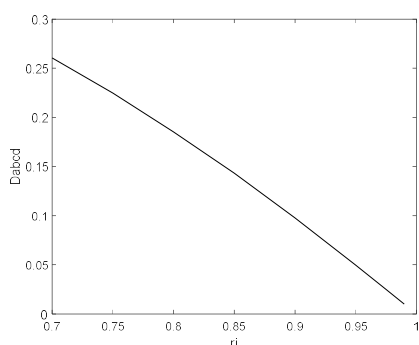
A függő paraméterek (a rendszer megbízhatóságának és a üzemképes rendszerállapotok valószínűségének) vektora a rendszer általános megbízhatóságának elemzése esetén – lásd a 2.1 alfejezetet és a (2) egyenletet:

$$\mathbf{y}_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} R_{\text{sys}} \\ Q_6 \\ Q_8 \\ Q_{11} \\ Q_{12} \\ Q_{14} \\ Q_{15} \\ Q_{16} \\ Q_{22} \\ Q_{23} \\ Q_{24} \\ Q_{26} \\ Q_{27} \\ Q_{28} \\ Q_{30} \\ Q_{31} \\ Q_{32} \end{bmatrix} \quad (14)$$

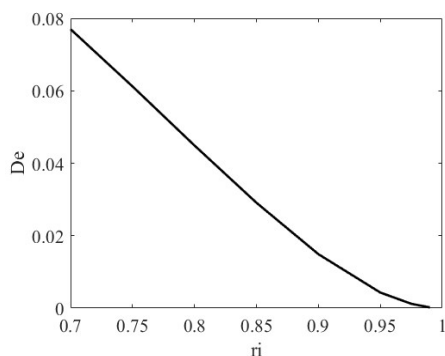
A függő és független változók együttható mátrixai:

$$\mathbf{A}_{\text{sys}}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{11} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{11} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{12} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{16} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{26} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{27} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{28} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{30} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -K_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -K_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{B}_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & K_{6B} & 1 & K_{6D} & K_{6E} \\ 1 & 1 & 1 & K_{8D} & K_{8E} \\ K_{11A} & 1 & K_{11C} & 1 & K_{11E} \\ 1 & 1 & K_{12C} & 1 & K_{12E} \\ 1 & K_{14B} & 1 & 1 & K_{14E} \\ K_{15A} & 1 & 1 & 1 & K_{15E} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & K_{16E} \\ 1 & K_{22B} & 1 & K_{22D} & 1 \\ K_{23A} & 1 & 1 & K_{23D} & 1 \\ 1 & 1 & & K_{24D} & 1 \\ 1 & K_{26B} & K_{26C} & 1 & 1 \\ K_{27A} & 1 & K_{27C} & 1 & 1 \\ 1 & 1 & K_{28C} & 1 & 1 \\ 1 & K_{30B} & 1 & 1 & 1 \\ K_{31A} & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$



6. ábra Rendszer megbízhatóság érzékenységi együtthatója az A; B; C és D elemek megbízhatóságainak függvényében



7. ábra Rendszer megbízhatóság érzékenységi együtthatója az E elem megbízhatóságainak függvényében

3.2 Kritikus rendszer-állapot

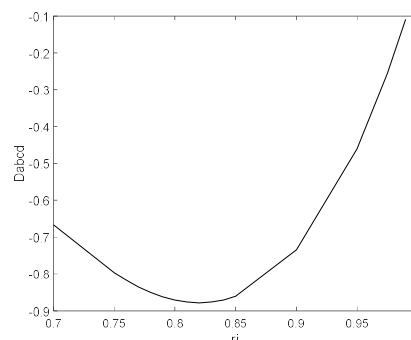
A függő paraméterek vektora a rendszer kritikus megbízhatóságának elemzése esetén, a (3) egyenlet alapján:

$$\mathbf{y}_{\text{crit}}^T = [R_{\text{sys}} \quad Q_6 \quad Q_{11} \quad Q_{23} \quad Q_{26}] \quad (17)$$

A függő és független változók együttható mátrixai:

$$\mathbf{A}_{\text{crit}} = \begin{bmatrix} 1 & -K_6 & -K_{11} & -K_{23} & -K_{26} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{B}_{\text{crit}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & K_{6B} & 1 & K_{6D} & K_{6E} \\ K_{11A} & 1 & K_{11C} & 1 & K_{11E} \\ K_{23A} & 1 & 1 & K_{23D} & 1 \\ 1 & K_{26B} & K_{26C} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$



8. ábra Híd-struktúrájú rendszer kritikus állapota valószínűségének érzékenységi együtthatója az A; B; C és D elemek megbízhatóságainak függvényében

4. KÖVETKEZTETÉSEK

Az elvégzett elemzések során mindegyik elem ugyanazon megbízhatóságát feltételeztük. A kapott eredmények alapján az alábbi következtetések vonhatóak le:

- A-1:** A rendszer megbízhatósága aszimptotikusan közeledik az 1-hez, ha az alkatrészek megbízhatósága nő (lásd 2. ábra).
- A-2:** Az összetevők azonos megbízhatósága esetén a rendszer megbízhatóságának az A; B; C és D komponensek megbízhatóságához viszonyított relatív érzékenysége ugyanaz.
- A-3:** A rendszer megbízhatóságának az E komponens megbízhatóságához viszonyított relatív érzékenysége – az elemek azonos megbízhatósága esetén – kisebb, mint a többi.
- A-4:** Ha a komponensek megbízhatósága megnő, a rendszer megbízhatóságának az összetevők megbízhatóságára gyakorolt érzékenysége csökken (lásd a 6. és 7. ábrákat).

B-1: A kritikus rendszerállapot valószínűsége aszimptotikusan közeledik a nullához, ha az alkatrészek megbízhatósága nő.

A komponensek megbízhatóságának javítása növeli a redundanciák lehetőségeit is. Ezért a kritikus rendszerállapotok kialakulásának valószínűsége csökkenni fog.

B-2: Az összetevők azonos megbízhatósága esetén a rendszer megbízhatóságának az A; B; C és D komponensek megbízhatóságához viszonyított relatív érzékenysége minimummal bír (lásd 8. ábra).

B-3: A rendszer megbízhatóságának az E komponens megbízhatóságához viszonyított relatív érzékenysége gyakorlatilag nulla.

A szimulációk eredményei numerikus hibának tekinthetők (kevesebb, mint 10^{-16}).

C-1: A Wheatstone hídhoz hasonló rendszerek megbízhatósága közeledik 1-hez, ha az alkatrészek megbízhatósága nő, de nem aszimptotikusan.

Azonos elem-megbízhatóságok esetén a rendszer megbízhatósága egy hatványfüggvénnyel határozható meg.

C-2: A Wheatstone hídhoz hasonló rendszerek megbízhatóságának relatív érzékenysége az összetevők megbízhatóságára ugyanaz – 1.

Ezt a következtetést levonhatjuk a (4) és (7) egyenletekből.

D-1: A javasolt módszer alkalmas a komplex kapcsolatú rendszerek megbízhatóságának érzékenység elemzésére.

D-2: Az együttható mátrixok elemei könnyen meghatározhatók.

Mivel a valószínűségi egyenletek azonos struktúrák tipikus elemeiből állnak, a tipikus érzékenységi együtthatók könnyen meghatározhatók.

D-3: A javasolt módszer hátránya, hogy a rendszer lehetséges állapotainak száma exponenciálisan növekszik az elemek száma függvényében.

Ha új elem jelenik meg, a lehetséges rendszerállapotok száma megduplázódik.

E-1: Az **A-2**; **B-2** és **C-2** következtetések alapján a szerző javasolja a „**strukturális érzékenység**” és a „**strukturális érzékenységi együttható**” fogalmak bevezetését.

A strukturális érzékenységi együttható az adott komponens megbízhatóságának a teljes rendszer megbízhatóságára gyakorolt hatását csak konstrukciós szempontból jellemzi. Értékét csak az adott rendszerben való elhelyezkedése határozza meg – nem az megbízhatóságának értéke.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A tanulmány egy moduláris megközelítésű megbízhatóság-érzékenységelemzési eljárást mutatott be, mely az alkalmas komplex kapcsolatú véges hálózatok és (például híd struktúrájú) rendszerek megbízhatóságának, megbízhatóság-érzékenységének megfelelő pontosságú leírására, elemzésére. A kitzűzött célokból, és az elért eredményekből adódóan általánosítható eredmények születtek a komplex kapcsolatú rendszerek és hálózatok modellezései feltételeinek, valamint a felállított modellek, algoritmusok gyakorlati alkalmazási módjainak leírására. Az elemzési módszer kidolgozása során szerzett tapasztalatok felhasználhatóak szenzorok, szenzorhálózatok, illetve közlekedési, logisztikai hálózatok megbízhatóságának érzékenység és parametrikus bizonytalanság elemzéseire.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával megvalósuló EFOP-3.6.2-16-2017- 00016: „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában” projekt támogatta.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Hanka, L., Balogh, Z. (2013). Bayes analízis a kockázatelemzésben, diszkrét valószínűségeloszlások alkalmazása. *épüléstudományi Közlemények*, XXV.(2), 232–244.
- Myers, A. (2010). *Complex System Reliability*. Springer-Verlag, London, 2010.
- Nagy I. Tuloki Sz. (2018). Fault Analysis and System Modelling in Vehicle Engineering. In *IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2018)* (pp. 313–319).
- Péter, T., Csiszár, C., & Mándoki, P. (2017). Különböző felszíni közlekedési hálózatok forgalmának együttes modellezése és komplex analízise. *KÖZLEKEDÉSTUDOMÁNYI SZEMLE*, 67(1), 16–34.
- Péter, T., Lakatos, I., Szauter, F., & Szabó, K. (2017). Közúti járművek biztonságának analízise nagyméretű hálózaton a pozitív dinamikus rendszerek és valószínűségelméleti módszerek alkalmazásával. In *IFFK 2017*.
- Pokorádi, L. (2008). *Rendszerek és folyamatok modellezése*. Debrecen: Campus Kiadó.
- Pokorádi, L. (2013). *Hálózatok moduláris érzékenység-, és bizonytalanság elemzése*. Debrecen: MTA Debreceni Akadémiai Bizottság.
- Pokorádi, L. (2015). Failure probability analysis of bridge structure systems. In *10th Jubilee IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2015)* (pp. 319–322).
- Pokorádi, L., & Lázár-Füle, T. (2019). Komplex kapcsolatú járműrendszerek megbízhatósági kérdései. *Repüléstudományi Közlemények*, 2019(1), 77–84.
- Pokorádi, L., Seebauer, M. (2019). Sensitivity Analysis of Bridge Structure Systems' Reliability. In *SACI 2019: IEEE 13th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics: PROCEEDINGS* (pp. 370–375).
- Tuloki Sz., Nagy I. (2018). Elektromos gépjárművek szenzorhálózatának feltérképezése és biztonsági elemzése. In *A XXIII. FMTÚ*. (pp. 243–247).
- Zentai, D. (2018). Gráfcsomópontok kockázat alapú osztályozása. In *IFFK 2018: XII. Innováció és fenntartható felszíni közlekedés* (p.).