Bakos Tamás✧, Kovács Ferenc❖

Az interdependencia dimenziói és a kritikus szervezetek vizsgálata

DOI 10.17047/HADTUD.2025.35.3.106

A modern társadalmak működését biztosító kritikus infrastruktúrák egyre szorosabb kölcsönhatásban állnak egymással. Ezek a kölcsönös függőségek, vagyis az interdependencia, bár hatékony működést eredményez, de új sebezhetőségeket is teremt. Egyetlen infrastruktúra meghibásodása vagy támadása láncreakciót idézhet elő más rendszerekben, komoly következményeket okozva. Mindezek ellenére a kritikus infrastruktúrák közötti interdependencia vizsgálata továbbra is háttérbe szorul a szakirodalomban és a gyakorlati elemzésekben. A legtöbb kutatás még mindig elszigetelten kezeli az egyes rendszereket, figyelmen kívül hagyva azt a komplex hálózatot, amelyben ezek a rendszerek valójában működnek. Jelen cikk és tervezett folytatásának célja, hogy bemutassa e kevéssé vizsgált kapcsolatrendszerek természetét, az interdependencia jellemzőit és rávilágítson az ezekből fakadó kihívásokra és lehetőségekre.

KULCSSZAVAK: kritikus infrastruktúra, interdependencia, komplex hálózat

Dimensions of Interdependence and Investigation of the Critical Infrastructures

Critical infrastructures that ensure the functioning of modern societies are increasingly interconnected. This interdependence, although resulting in efficient operation, also create new vulnerabilities. A failure or attack against a single infrastructure can trigger a chain reaction in other systems, causing serious consequences. Despite all this, the scrutiny of interdependence between elements of critical infrastructures continues to be neglected in the literature and in practical analyses. Most research still applies separate approach to individual systems, ignoring the complex network in which these systems actually operate. The aim of this article is to present the nature of these little-studied relationships, the characteristics of interdependence, and to highlight the challenges and opportunities arising from them.

KEYWORDS: critical infrastructure, interdependence, complex network

✧ Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Műveleti Támogató Tanszék – *University of Public Service, Faculty of Military Science and Officer Training, Department of Operations and Support*; e-mail: bakos.tamas@uni-nke.hu; https://orcid.org/0000-0003-3104-6901

❖ Aktuál Mérnökiroda Kft., ügyvezető igazgató – *Aktual Engineering Office, executive director;* e-mail: drkftud@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-9017-9731

Bevezetés

Napjainkra a társadalmakat működtető szolgáltatások igen magas fejlettségi szintet értek el és jelenleg is folyamatosan fejlődnek. Ennek az állandó rendelkezésre állásnak és fejlődésnek az alapja az, hogy a szolgáltatások és infrastruktúrák egymásra támaszkodnak, speciális hálózattal rendelkező multifunkcionális és komplex rendszert alkotnak, mely óriási előnye, hogy képes a társadalmi elvárások apróbb változásainak lekövetésére is.

Ennek a komplex rendszernek az előnye az egymásra épülés, a folyamatos fejlődés, mely viszont sebezhetővé is teszi, így ez egyben a hátránya is. Bármely változás egy rendszerben, kihatással van a rendszer egyéb elemeire vagy más kapcsolódó rendszerekre, és előre nem, vagy csak nehezen meghatározható módon, akár láncreakció szerű hatásokat is kiválthat.

A kritikus szervezetek ellenálló képességéről szóló 2024. évi LXXXIV. törvény (a továbbiakban Ksze.tv.) értelmezésbeli különbséget tesz kritikus szervezet, alapvető szolgáltatás és kritikus infrastruktúra között, illetve a függőség fogalmának meghatározásánál is különbséget tesz az infrastruktúrák, kritikus infrastruktúrák, kritikus szervezetek, alágazatok, ágazatok vagy az állam, mint entitások között.[1] Tehát már a Ksze.tv. is érzékelteti alapvető szinten, hogy a függőségek, kölcsönös függőségek természete nem feltétlenül lineáris, és kiemelt figyelmet érdemel. Ezeket a vizsgálatokat a Ksze.tv végrehajtásáról szóló 474/2024. (XII. 31.) Korm. rendelet (a továbbiakban Ksze.tv.vhr.) a lehetséges kritikus szervezet feladatként határozza meg, de a végrehajtásához részletes leírást nem ad.[2]

A rendszerek, rendszerelemek kölcsönös függőségét, vagyis interdependenciáját tehát feltétlenül figyelembe kell venni, ha egy adott rendszer stabilitását vizsgáljuk. Az ilyen függőségek azonosítása, feltárása, vizsgálata komoly kihívást jelent. Bár az „*interdependencia*" kifejezés kölcsönös függőséget jelent, észrevehetünk olyan jelenséget, mely esetében két szervezet, szolgáltatás között egyirányú a függőség, vagyis „*dependencia*" figyelhető meg.[3] Jelenleg a kiemelten fontos, kritikus infrastruktúrák olyan rendszert alkotnak, melyek topológiájában egyirányú és kölcsönös függőség is megfigyelhető, mégis a rendszer egészét tekintve biztosak lehetünk benne, hogy egy esemény több rendszerelemet is érint, egyirányú függőségek sorozatából visszaható, kölcsönös függőség is kialakulhat. Például egy vihar miatt megsérült nagyfeszültségű vezeték olyan áramkimaradást okoz, mely hatással van a távközlésre és a közlekedési alrendszerekre is, mely összességében nehezíti a kármentést és az elektromos-áram-szolgáltatás visszaállítását.

Előzőeket figyelembe véve, az infrastruktúra rendszerek komplexitását tekintve joggal alkalmazhatjuk az interdependencia kifejezést. Ezt a következetességet alkalmazva cikkünkben egységesen az „*interdependencia*" kifejezést használjuk. Írásunk az interdependencia kiterjedését, dimenzióit, az interdependencia vizsgálati módszereit és az elemzési típusait igyekszik bemutatni.

1 Ksze.tv., 4.

2 Ksze.tv.vhr., 3.

3 Bakos 1978, 172, 376.

Az interdependencia dimenziói

Az interdependencia feltárásánál és vizsgálatánál további figyelmet igényel, hogy magának a függőségnek a jellemzői több összetevőből, tényezőből állhatnak.

Ezen tényezők széles körét *Terrence K. Kelly, James P. Peerenboom* és *Steven M. Rinaldi* 2002-ben megjelent cikkükben hat dimenzióval írták le.[4] Az általuk behatárolt hat dimenzió nagyon jó alapot ad az interdependencia elemzéséhez, de szükséges napjainkra jellemző tényezőkkel kiegészíteni, illetve az elmúlt években végbement széleskörű változások (biztonsági, gazdasági, technológiai, környezeti stb.) miatt egy új, hetedik dimenziót megfogalmazni.

1. A környezet jellege

Ezek lehetnek a kritikus szervezet vagy infrastruktúra működését érintő technológiai, gazdasági, társadalmi, politikai, jogi, ökológiai és biztonsági tényezők. Ezen környezeti tényezők befolyásolhatják nem csak a normál működés rendjét, de a vészhelyzeti és helyreállítási műveleteket is. Nem szabad figyelmen kívül hagynunk azt sem, hogy maga a kritikus infrastruktúra vagy szervezet is befolyással bír a környezetére.[5] Minél erősebb a környezeti tényezőkre gyakorolt hatása, annál szorosabb az a környezeti keret, melyen belül kell tartania működését. Ha egy magánkézben lévő kritikus szolgáltató társadalmi szerepet is betölt – például telekommunikációs cég – a gazdasági környezet és a kritikus szolgáltatókra vonatkozó állami jogi környezet egyaránt befolyásolja működését, hiszen a kritikus szervezetekre vonatkozó jogszabályok szigorú betartása mellett törekednie kell arra is, hogy pozitív jövedelemmel rendelkezzen.

2. A kapcsolat kiterjedése, mértéke és iránya

Az infrastruktúrák vagy szervezetek közötti kapcsolat lehet lineáris vagy komplex. Lineáris kapcsolat esetén közvetlenül követhető a kapcsolat vonala, könnyen megállapíthatók a függőség részletei, még abban az esetben is, ha kettőnél több szervezet vagy infrastruktúra alkotja. A komplex kapcsolat viszont olyan nehezen meghatározható kölcsönhatásokat tartalmaz, melyek alapján egy váratlan, nem tervezett eseménysorozat kimenetele nem látható, hiszen egy rendszeren belül több infrastruktúra, szervezet, szolgáltatás van egymással közvetett kapcsolatban, mely kapcsolatok kiterjedése, mértéke, iránya, típusa is eltérő lehet.[6]

Ezen kapcsolatok mértéke lehet lazább vagy szorosabb, vagyis az a tulajdonság, hogy az infrastruktúrák vagy szervezetek milyen mértékben függenek egymástól. A laza kapcsolatok viszonylag rugalmasak, de minél szorosabb a kapcsolat, a rendszerben csak kevés rugalmasság marad a változó körülményekre vagy meghibásodásokra

4 Rinaldi, Peerenboom, Kelly 2002.

5 Rinaldi, Peerenboom, Kelly 2002, 16.

6 Rinaldi, Peerenboom, Kelly 2002, 19.

való reagálásban.[7] A szoros, rugalmatlan kapcsolat súlyosbíthatja a problémákat, megkönnyítheti, gyorsíthatja az infrastruktúrák, szervezetek közötti láncreakció kialakulását.

A kritikus infrastruktúrák interdependencia vizsgálatánál általában egyirányú függőségről beszélünk, vagyis a rendszerelem működésére hatással van egy adott szolgáltatás vagy infrastruktúra folyamatos jelenléte (energia, kommunikáció stb.), de a rendszerelem esetleges kiesése esetén az infrastruktúra vagy szolgáltatás üzemszerű működése nem változik. A kétirányú függőség több kockázatot hordoz magában, de esetenként – akár technológiai vagy ellátási szükségszerűségből – számolni kell vele. Egy alapvető szolgáltatást nyújtó ipari területet kiszolgáló informatikai rendszer magas energia igényét biztosító országos energetikai hálózat nem függ az adott informatikai rendszer működésétől, tehát a függőség egyirányú. Viszont, ha a szóban forgó informatikai rendszer látja el az energetikai rendszer üzemeltetését is, kétirányú függőségről, tehát interdependenciáról beszélhetünk. Ebben az esetben jól látható, hogy maga a rendszer sebezhetőbb, érzékenyebb lehet a működési anomáliákra, hiszen – megfelelő védelmi intézkedések hiányában – az üzemfolytonosságban bekövetkező probléma a rendszeren belül újabb és újabb rendellenességeket generálhat.

3. A kapcsolat típusa

Az interdependencia alapját képező kapcsolat lehet fizikai, kibernetikai, logikai vagy földrajzi. A Ksze.tv. a függőség értelmezéseként mindössze ezt a dimenziót adja meg: „függőség: legalább két infrastruktúra, kritikus infrastruktúra, alapvető szolgáltatás, kritikus szervezet, alágazat, ágazat vagy állam (a továbbiakban együtt: entitás) közötti olyan logikai információs, fizikai vagy földrajzi kapcsolat, illetve összeköttetés, amely révén az egyik entitás állapota befolyásolja a másik entitását, vagy összefügg annak állapotával,…”, és nem tárgyalja részletesebben ezeknek a kapcsolattípusoknak a tartalmát.[8]

Fizikai kapcsolat abban az esetben valósulhat meg, ha egy infrastrukturális elem kimeneti terméke hatással van egy másik kritikus szervezet működésére. Például egy adott szervezet kimeneti terméke egy másik szervezet bemeneti alapanyagaként szolgál, vagyis egy fizikai termék az ellátási lánc része. Fizikai kapcsolat – melyben nem ellátási láncból adódik a függőség – úgy is kialakulhat, ha például egy ipari létesítmény károsanyagot bocsát ki, mely a megengedett határérték alatt van, de befolyásolja egy másik kritikus szervezet (például egy biológiai kutató szervezet) tevékenységét, technológiáját a kibocsátott károsanyag természetes mozgásából adódóan.

Egy infrastruktúra kölcsönös kiberfüggőséggel[9] rendelkezik, ha állapota az információs infrastruktúrán keresztül továbbított információktól függ. Nem feltétlenül csak az informatikai szervezetekre vonatkozhat ez a kapcsolat, napjainkra

7 Rinaldi, Peerenboom, Kelly 2002, 20.

8 Ksze.tv. 4.

9 Kiberfüggőség alatt elsősorban digitális viselkedési zavarokat értünk internetszolgáltatás alapú platformoknál.

a kiberfüggő infrastrukturális elemek száma már nagyon magas és egyre nő. Példaként a tömegközlekedés és a távközlés függőségét említhetjük.[10]

Amennyiben egy helyi környezeti esemény több infrastruktúrában, szervezetben is állapotváltozást idéz elő, ebben az esetben ezen infrastruktúrák, szervezetek földrajzi interdependenciájáról beszélhetünk. Vagyis egy tűz vagy robbanási esemény mindegyikre hatással van, földrajzi közelségük miatt.[11] A földrajzi közelségen kívül a kölcsönös függőség kritériumának is teljesülnie kell.

A logikai interdependencia inkább működési folyamatok egymásra hatásából keletkezhet, függetlenül a köztük lévő távolságtól vagy a fizikai, informatikai kapcsolattól. Logikai kapcsolat van például a jogalkotók és a termelő szervezetek között, hiszen egy jogszabály változása kihatással van a termelékenységre vagy annak költségeire. A termelők érdekvédelmi szervezetei szerencsés esetben visszajeleznek, és hatással vannak a jogalkotókra.

4. A kritikus szervezet vagy infrastruktúra jellemzői

A kritikus infrastruktúráknak vannak olyan jellemzőik, melyek nem hagyhatók figyelmen kívül az interdependencia vizsgálatánál.

A térbeli lépték az a jellemző, mely megmutatja, hogy egy rendszerben milyen mélységig kell vizsgálni a működést az interdependencia elemzésénél. Ez lehet akár egy részegység (például: egy generátor), egy alrendszer (például: másodlagos elektromos ellátó rendszer), vagy egy rendszer, mely alrendszerek csoportja (például: telekommunikációs szolgáltató szervezet), vagy infrastruktúra mely több rendszerből áll (például: kommunikációs infrastruktúra), vagy akár infrastruktúrák és a környezet összekapcsolódó, teljes hálózata is.

Az időbeli lépték az a jellemző, mely az interdependencia vizsgálatokban releváns folyamatok időbeli tartományát mutatja. Ezek az időintervallumok a milliszekundumtól (például: informatikai hálózatok működése) akár több évet is felölelhetnek (például: fejlesztések, kapacitásbővítések). Az időbeli jellemző pontos meghatározása fontos az interdependencia modellekkel és szimulációval történő elemzésénél, hiszen ehhez kell kialakítani a válaszreakciókat és a műveletek sorrendjét. Fontos megjegyezni, hogy nem csak egy adott folyamat vagy esemény időbeli léptékét kell figyelembe venni, hanem azt is, hogy annak hatása milyen időintervallumra húzódik ki.[12]

5. Működési állapot

A kritikus szervezetek és infrastruktúrák üzemi működése még normál időszakban is eltérést mutathat, például a csúcsidőszakban és a csúcsidőszakon kívüli működést összehasonlítva. Ha figyelembe vesszük, hogy az éppen aktuális működési állapot milyen hatással van egy bekövetkező zavar vagy meghibásodás mértékére és időtartamára, akkor jól látható, hogy szélesebb spektrumban kell vizsgálni az adott infrastruktúra

10 Dalecsik 2015, 25.

11 Rinaldi, Peerenboom, Kelly 2002, 15.

12 Rinaldi, Peerenboom, Kelly 2002, 21.

vagy szervezet lehetséges működési állapotait. Ide tartoznak az optimális tervezési működésen túl a csúcsidőszakok, esetleges túlterheléses időszakok, a javítás, karbantartás időszakai alatt fennálló működési állapotok. Kritikus infrastruktúrák és szervezetek esetében figyelembe kell vennünk olyan speciális eshetőséget is, mely esetben egy rendszeren belüli belső zavar mellett még biztosítható a normál, folyamatos üzem, de egy ugyanebben az időszakban érkező külső, interdependenciából adódó zavar már komoly károkat okozhat.[13]

Az interdependencia vizsgálatánál fontos figyelembe vennünk a működés minden lehetséges állapotát, mivel valószínű, hogy egy interdependenciából adódó zavar nem az optimális üzemi működés közben éri a rendszert.

6, A meghibásodások típusai

A kritikus infrastruktúrák és szervezetek közötti interdependencia egyértelműen növeli a meghibásodások vagy zavarok kockázatát. Ennek vizsgálata érdekében külön kell választanunk egy adott infrastruktúra vagy szervezet belső működésében elkülöníthető zavarokat és az interdependenciából eredő, külső okok miatt bekövetkező meghibásodásokat, zavarokat.

Ezek az interdependenciából következő zavarok bekövetkezhetnek kaszkád vagy dominóhatás szerű, eszkalálódó, illetve közös okokból kifolyólag.

Kaszkád-szerű meghibásodás akkor következik be, ha egy infrastruktúrában bekövetkező zavar egy másik infrastruktúra egy komponensének meghibásodását okozza, mely ezt követően zavart okoz egy újabb infrastruktúrában. Ezek a zavarok – legrosszabb esetben – nem csak lineárisan, hanem szélesebb körben is végigfuthatnak az egymástól függő infrastruktúrák és szervezetek interdependens hálózatán, akár egymás hatását erősítve is.[14] A Ksze.tv.vhr. mindössze erre az egy meghibásodástípusra tesz említést, melynek vizsgálatát ugyancsak az adott kritikus szervezet tisztségviselőinek hatáskörébe és felelősségébe adja.[15]

Eszkalálódó zavarnak azt a jelenséget tekinthetjük, ha egy interdependenciából eredő zavar beérkezésekor éppen egy belső, előzőtől független zavar is fennáll, melyek együttesen már felerősítik egymás hatását az adott infrastruktúrára vagy szervezetre.

Közös okból eredő zavarokról akkor beszélhetünk, ha a különböző infrastruktúrák működésében egyidőben fellépő zavarok bár egymástól függetlenek, de azonos időben következnek be, egyazon okból. Ez lehet például természeti, ipari katasztrófa, kibertámadás vagy terrorcselekmény, melyben egyszerre sérülnek telekommunikációs vezetékek, kapcsolatok, közlekedési vonalak stb. Ekkor több infrastruktúra zavara, bár egymástól függetlenek, de a földrajzi interdependencia miatt egyszerre lépnek fel, és kölcsönösen hatásokat generálnak, így erősségüket és a helyreállítás idejét növelhetik.[16]

13 Rinaldi, Peerenboom, Kelly 2002, 22.

14 Joydeep 2017, 2.

15 Ksze.tv.vhr., 5.

16 Rinaldi, Peerenboom, Kelly 2002, 22.

7. Belső/Külső interdependencia

A kritikus szervezetek és infrastruktúrák tekintetében, belső interdependenciáról beszélhetünk, ha a vizsgált rendszerelemek azonos ágazatba vagy alágazatba tartoznak.[17] Az azonos ágazatba tartozó rendszerelemek kölcsönös függőségének, vagyis az ágazati belső interdependenciának vizsgálata nem csak az adott rendszerelemek kockázatelemzésének lehet része, hanem a teljes ágazat sérülékenységének feltárásában, az ágazat rendszereinek és egészének stabilitásához szükséges szabályok megalkotásában is fontos szerepe lehet, illetve kiemelt szerepe lehet az alágazatok ellenálló képességének elemzésénél.

Külső interdependencia vizsgálat esetén egy adott rendszerelemmel függőségi viszonyban lévő infrastruktúraelem vagy alapvető szolgáltatás ágazati hovatartozása nem releváns. Fontos információ a rendszerelemre ható hatás, illetve az a mechanizmus, mely alapján ez a hatás kialakul.

Az interdependencia vizsgálatára kidolgozott elméleti módszerek

Az interdependencia vizsgálatára kidolgozott módszerek számbavétele azért fontos, mert jól alkalmazhatók a kritikus infrastruktúrák azonosítása, elemzése során, kiemelten a veszélyeztetettségi tényezőkre. A következőkben ismertetett módszerek más-más szempontból hasznosíthatók a kritikus infrastruktúrák kutatása és gyakorlati megoldásai során.

1. Hálózatelemzés (Network Analysis)

A hálózatelemzés egy módszer, amely a különböző elemeket (csomópontok) és az ezek közötti kapcsolatok (élek/edges) szerkezetét és dinamikáját vizsgálja. A célja, hogy feltárja a rendszerben a kölcsönös függőségeket, meghatározza a legfontosabb szereplőket, és elemezze a kapcsolatok erősségét. Az ehhez tartozó fokszám (degree) az egy csomóponthoz kapcsolódó elemek száma, amely megmutatja, hogy egy adott elem mennyire van beágyazva a hálózatba. Az élek (edges) a csomópontok közötti kapcsolatok, amelyek különböző típusúak lehetnek (például: információáramlási, kereskedelmi, diplomáciai stb.).[18]

Főbb alkalmazási területei:

– társadalmi hálózatok elemzése (például kapcsolati mintázatok feltárása, központi szereplők azonosítása stb.);
– kritikus infrastruktúrák és interdependencia elemzése;
– nemzetközi kapcsolatok és geopolitika (például országok kapcsolati hálójának feltárása súlyozás alapján is);
– ellátási láncok és logisztika (például szerkezetek feltárása, kockázati pontok felismerése stb.);

17 Ksze. tv. 1. melléklet, 32.

18 Joydeep 2017. 2.

– pénzügyi rendszerek stabilitásának vizsgálata (például bankok sebezhetőségének, fertőzési kockázatának feltárása);
– biológiai és egészségügyi kutatások (például rendszerek modellezésére, betegségek közötti kapcsolatok feltárása, járványok terjedésének modellezése stb.).

Tipikus mutatói: fokszám-központiság, betweenness, hálózat sűrűsége, modularitás. Mindez segít előre jelezni például a kritikus csomópontokat és a kaszkád hatásokat.

2. Input-output analízis (Leontief-modell)

Az input-output analízis, más néven Leontief-modell, egy közgazdasági módszer, amelyet Wassily Leontief dolgozott ki a gazdaság különböző ágazatai közötti kölcsönös függőségek (interdependenciák) vizsgálatára.

A modell azt mutatja meg, hogyan függenek az egyes gazdasági szektorok egymástól: azaz melyik ágazat mennyi inputot (erőforrást, terméket vagy szolgáltatást) használ fel más ágazatokból, illetve mennyi outputot (terméket vagy szolgáltatást) állít elő, amelyet más ágazatok használnak fel. Példaként tegyük fel, hogy van három ágazat: mezőgazdaság, ipar és szolgáltatások. A modell megmutatja, hogy az ipar mennyi mezőgazdasági terméket használ fel (például élelmiszer az ipari dolgozóknak), vagy a mezőgazdaság mennyi ipari terméket alkalmaz (például traktorokat).

Az infrastruktúrák közötti gazdasági és szolgáltatási kapcsolatok modellezésére használható. Például: mennyi elektromos energia kell a vízellátás fenntartásához, és fordítva, mennyi víz kell az energiatermeléshez.

Rendszerszintű műszaki-gazdasági kitettség feltárására alkalmas, a prioritások és erőforrás-allokáció támogatására válsághelyzetben, mely a kritikus infrastruktúrák esetében nagyon meghatározó.

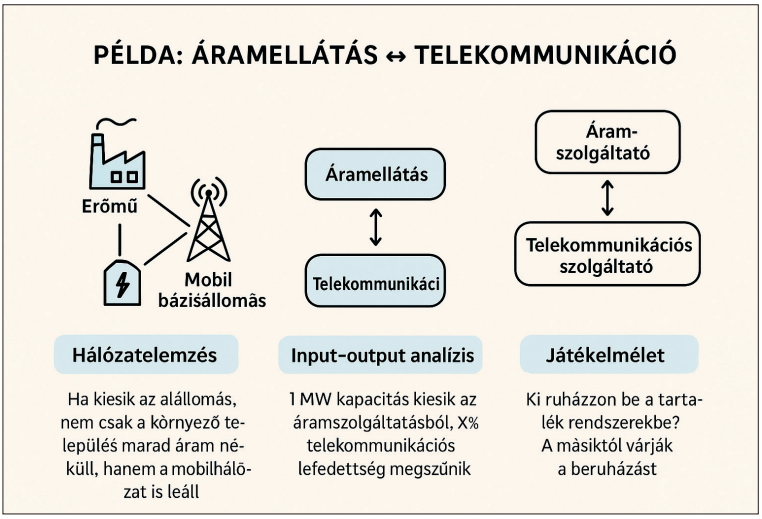
3. Játékelmélet

Több szereplő interakcióját modellezi, középpontjában a verseny, az együttműködés, a konfliktus áll. Klasszikus példa: fogolydilemma, ahol két szereplő döntése befolyásolja a másik eredményét. Döntéselmélet, mely figyelembe veszi a bizonytalanságot és a kockázatot. Alkalmazható például akkor, ha a döntéshozó nem tudja, mit lép majd a másik fél (vagy a "természet"). Használható versenytársak reakcióinak elemzésére (például árháború), stratégiai döntések meghozatalára (például belépés egy piacra) és tárgyalási helyzetek modellezésére (például szerződéskötés, kooperáció).

A módszer feltárja, hogy milyen ösztönzőkkel lehet az együttműködést elősegíteni, hogyan reagálnak a szereplők a kockázatokra, illetve mikor alakulhat ki alul biztosítás, amikor mindenki a másiktól várja az intézkedést vagy befektetést.

4. Rendszerelméleti és komplexitáselméleti megközelítés

A valóságot rendszerek összességeként értelmezi. Egy rendszerben különböző elemek, alrendszerek vannak, amelyek kapcsolatban állnak egymással és folyamatos kölcsönhatások, vagyis interakciók figyelhetők meg köztük. Az egyes elemek viselkedése nem külön-külön, hanem az egész rendszer működésének részeként értelmezhető.



1. ábra.
Áramellátás és telekommunikáció kölcsönös függése a három módszer szemszögéből
(Készítették a szerzők)

A rendszerelmélet alapvető fogalmai közé tartozik a visszacsatolás, amely lehet pozitív vagy negatív. A pozitív visszacsatolás olyan folyamatokra utal, amelyek során egy adott hatás felerősíti önmagát, míg a negatív visszacsatolás stabilizáló mechanizmusként működik. Például a globális hőmérséklet emelkedése fokozza a jégolvadást, amelynek következtében csökken a Föld felszínének fényvisszaverő képessége (albedója), ezáltal tovább nő a hőelnyelés és így a hőmérséklet is – ez egy klasszikus pozitív visszacsatolási kör. A rendszerek viselkedése ezen visszacsatolási mechanizmusok mentén alakul ki, amely meghatározhatja azok egyensúlyi állapotát, stabilitását vagy akár összeomlását is. A rendszerelméleti megközelítés fontos elemei továbbá a hálózatok, az anyag- és energiaáramlások, valamint a rendszerek határainak (például ökológiai vagy gazdasági rendszerek esetében) meghatározása, amelyek kulcsfontosságúak a komplex rendszerek működésének megértésében.

A kritikus infrastruktúra szempontjából tipikus rendszerelméleti kérdés a következő. Az áramszolgáltatás egy alrendszer, amely inputként szolgál a vízellátásnak és a távközlésnek. Ha az energia-rendszerben zavar keletkezik, az láncreakcióként jelentkezhet a többi szektorban is.

Komplexitáselméleti megközelítés azt jelenti, hogy a világ számos rendszere (például gazdaság, ökoszisztémák) komplex adaptív rendszerként működik. Ezekben a rendszerekben sok egyszerű szereplő (ügynök) lokálisan lép interakcióba, de a viselkedésükből összetett, kiszámíthatatlan mintázatok alakulnak ki. Példaként tekinthető egy pénzügyi piac, melyben a befektetők egyéni döntései alapján tőzsdei lufik vagy összeomlások alakulhatnak ki – pedig senki nem „tervezte” azokat.

Az interdependencia vizsgálata szempontjából fontos mindkét megközelítés, mivel a kölcsönös kapcsolatok és a hálózati jelleg hangsúlyozására épülnek, és segítenek megérteni, hogyan alakulnak ki összetett következmények sok egyszerű,

egymással kapcsolatban lévő döntésből. A kritikus infrastruktúrák komplex adaptív rendszerek, amelyekben sokféle, decentralizált szereplő van jelen, és a kölcsönhatások nem lineárisak. Például a közlekedési hálózatban egyetlen híd lezárása torlódási hullámot indíthat el, ami az egész logisztikai rendszerben érezhető lesz.

5. Klaszter- és korrelációelemzés

A klaszteranalízis és a korrelációelemzés az interdependencia vizsgálatok két különböző, de gyakran egymást kiegészítő módszere a statisztikában és adatbányászatban. Ezekkel nem egy függő változót vizsgálunk, hanem a változók vagy megfigyelések közötti kapcsolatokra, összefüggésekre vagy hasonlóságokra fókuszálunk.

A klaszteranalízis (*Cluster analysis*) célja olyan homogén csoportokat (klasztereket) találni az adathalmazban, amelyek tagjai egymáshoz hasonlóak, de más csoportoktól eltérnek. Alkalmazása gyakori a piackutatásban (vásárlók szegmentálása viselkedés alapján), a biológiában (fajok vagy gének csoportosítása), vagy a társadalomtudományban (hasonló jellemzőkkel bíró csoportok azonosítása).

A korrelációelemzés (*Correlation analysis*) célja, hogy két vagy több kvantitatív változó közötti kapcsolat erősségének és irányának vizsgálata megtörténjen. Fontos kiemelni, hogy a korreláció nem jelent ok-okozati viszonyt, csak együtt járást mutat.

6. Rendszerbiztonsági és sebezhetőségi elemzések

A rendszerbiztonsági és sebezhetőségi elemzések a kritikus infrastruktúrákban kulcsfontosságúak, mert ezek az elemzések közvetlenül befolyásolják a rendszerek működési stabilitását, megbízhatóságát és a nemzetbiztonságot.

A rendszerbiztonsági elemzések célja a kritikus infrastruktúra-kutatásban, hogy feltárják egy rendszer mely komponensei milyen mértékben befolyásolják egymás biztonságát, és hogyan terjedhet egy biztonsági hiba vagy támadás az egész rendszeren belül.

Klaszterezés segítségével azonosíthatók a biztonsági szempontból egymáshoz közel álló modulok (például hasonló konfigurációjú szerverek). Korrelációval vizsgálható például, hogy egy hiba gyakorisága és bizonyos rendszerelemek aktivitása között van-e kapcsolat. Klaszteranalízisnél csoportosíthatók azok az eszközök vagy felhasználók, amelyek hasonló kockázati profillal rendelkeznek (például sok bejelentkezési hiba, elavult szoftver, nyitott portok).

Korrelációelemzésnél vizsgálhatjuk, hogy van-e összefüggés a nyitott portok száma és a behatolási kísérletek száma között, ha szoros pozitív korreláció van, az adott konfiguráció sebezhető.

A rendszerbiztonsági és sebezhetőségi elemzések során az interdependencia-vizsgálatok segítenek összefüggéseket feltárni és prioritásokat meghatározni a védekezésben. Nemcsak az egyedi hibák, hanem azok hatása más rendszerekre is előtérbe kerül.

Az interdependencia vizsgálatának gyakorlati lépései

Egy adott kritikus infrastruktúra vagy szervezet interdependencia vizsgálata részét képezi a teljes kockázatelemzésnek, viszont érdemes a kockázatelemzés egy külön alfejezeteként tekinteni a végrehajtására. Míg a kockázatelemzés az üzemfolytonosságot veszélyeztető közvetlen és a folyamathoz köthető veszélyeket vizsgálja, tehát belső körből indul, az interdependencia-vizsgálatához érdemes „kívülről" közelíteni. Vagyis figyelembe kell vennünk – lehetőség szerint – minden külső tényezőt, szolgáltatást, kapcsolatot, és megvizsgálnunk, hogy milyen hatással vannak egymás működésére. Külső körből indulni sokkal nehezebb, mint a meglévő belső információkra építeni, ezért érdemes külön az interdependencia vizsgálatára gyakorlati lépéseket felállítani.[19]

Adott kritikus szervezet vagy infrastruktúra interdependencia vizsgálatának lehetséges gyakorlati lépései:

1. Adatgyűjtés és feltérképezés

Első lépésként szükséges meghatározni az összes infrastruktúrát, szolgáltatót, szervezetet, mellyel az adott rendszernek/rendszerelemnek kapcsolata van. Teljes listát kell készíteni, függetlenül a kapcsolat típusától és tulajdonságaitól. Ez magában foglalja a látótérbe került infrastruktúra, szolgáltató vagy szervezet működési folyamatainak objektív feltérképezését is, mely azt jelenti, hogy a működési folyamat vizsgálata ne a rendszerelemmel meglévő kapcsolata alapján kialakított előzetes feltételezéseken alapuljon, hanem ettől függetlenül, a teljes működési folyamatot adja meg. Ehhez szükség lehet a kritikus szervezettel vagy infrastruktúrával kapcsolatban lévő külső szervezet működési okmányainak vizsgálatán felül akár helyszíni bejárásokra és személyes interjúk végrehajtására is.

2. Kölcsönhatások azonosítása

A külső szervezet feltárt és vizsgált működési folyamatainak és az adott kritikus infrastruktúra vagy szervezet működési folyamatainak „egymás mellé helyezésével" azonosíthatók a kapcsolódási pontok, melyeken keresztül a folyamatok képesek hatni egymásra. Az előző részben tárgyalt vizsgálati módszerekkel ezen kölcsönhatásoknak a tulajdonságait és típusait vizsgálva feltérképezhető az interdependencia rendszere és dimenziói.

Külön figyelmet kell fordítani a kritikus beszállítók azonosítására, akár fizikai termék, akár valamely szolgáltatás tekintetében. Különböző helyzetek és események szimulálásával könnyebben felmérhetők a kapcsolódási pontok, illetve a kapcsolatok jellege és jelentősége is.

19 Frédéric 2015, 12.

3. Kockázatértékelés

A kockázatértékelések több módszerrel végrehajthatók, de kifejezetten az interdependencia-vizsgálat eredményeire kell fókuszálniuk. Tanulmányunkban nem térünk ki a kockázatelemzés módszereire, de a módszerek különbözhetnek attól függően, hogy milyen mélységben és részletességgel szükséges végrehajtani a vizsgálatot, illetve, hogy milyen jellegű folyamatot szükséges vizsgálnunk.

A feltárt kockázatokat a megfelelő prioritás szerint sorba rendezve, illetve az egyes kockázatok bekövetkezési valószínűségét vizsgálva, kialakítható az adott kritikus szervezet vagy infrastruktúra interdependenciára vonatkozó kockázati térképe, mely beilleszthető a rendszer/rendszerelem teljes kockázatelemzési struktúrájába, illetve alkalmazható annak kiterjesztésére, pontosítására, fejlesztésére.

4. Hatások és következmények

A következő lépés a kialakított kockázati térkép szerint felvázolt hatáselemzések végrehajtása. A különböző feltárt kockázatokat vizsgálva, láthatóvá válnak azok lehetséges hatásai és következményei. A korábban megfogalmazott kapcsolati tulajdonságok szerint vizsgálnunk kell az adott hatás irányát, mértékét is, így meghatározható, hogy a kritikus infrastruktúra vagy szervezet és a vele kapcsolatban lévő szolgáltató, infrastruktúra közötti kapcsolatokból eredő hatások hogyan hatnak a rendszerfolyamatokra.

5. Biztonsági intézkedések

A kockázati térkép alapján azonosított magas bekövetkezési valószínűségű, illetve igen komoly hatásokkal járó fenyegetések bekövetkezésére forgatókönyvet érdemes összeállítani, mely tartalmazza a vészhelyzet bekövetkezésének eredetét (természeti, emberi, technológiai), okait, a veszélyhelyzet részletes leírását, valamint megfelel az adott kritikus infrastruktúra vagy szervezet jellemzőinek, és figyelembe veszi a korábban már feltárt függőségeket.

A kidolgozott egyes forgatókönyvek alapján már pontosabban becsülhetők a veszélyhelyzetek kritikus infrastruktúrákra gyakorolt hatásai, felmérhetőek a lehetséges következmények, meghatározhatóak a függőségi rendszer kritikus pontjai.

Az előző pontokban felvázolt folyamattal felmért és elemzett kockázatok és hatások, valamint a részletesen kidolgozott forgatókönyvek alapján a kritikus infrastruktúrák, szervezetek üzemeltetői a függőségi viszonyban lévő külső szolgáltató üzemeltetőivel együttműködve képesek hatékony védelmi intézkedések kidolgozására, a költségek optimalizálása mellett. A megfelelő intézkedések kidolgozása és bevezetése segít csökkenteni a sebezhetőséget, minimalizálni a kockázatot és a hatásokat, megnövelni a szerveztek rezilienciáját, illetve megmutatja, hogy hogyan lehet a lehető leghamarabb visszaállítani a rendszer működését kritikus események után, akár helyreállítással, akár a kritikus szolgáltatás helyettesítésével.

A kritikus infrastruktúrák, szervezetek üzemi folyamataihoz kapcsolódó biztonsági intézkedések a megelőzés, védekezés és helyreállítás időszakára vonatkoztatva

is részletes eljárási szabályokat határoznak meg. Figyelembe veszik a kritikus infrastruktúrához, a külső szolgáltatásokhoz és a köztük lévő függőségi viszonyokhoz illeszkedő, megfelelő eszközöket, technológiákat és megoldásokat. A megfelelően kidolgozott biztonsági intézkedések jól integrálódnak a meglévő rendszerekbe, kiegészítik azokat. Az interdependenciát figyelembe vevő biztonsági intézkedések kidolgozása komplex feladat, folyamatos felülvizsgálatuk elengedhetetlen a kritikus szervezetek és infrastruktúrák ellenállóképességének biztosításához.

6. Képzés, ellenőrzés

A legjobban, legrészletesebben kidolgozott, rendszerhez illeszkedő biztonsági intézkedések is csak abban az esetben hatékonyak, ha a rendszert üzemeltető személyzet, a szervezet munkatársai elsajátítják, megértik az abban leírt alapelveket, eljárásokat és gyakorlatokat, valamint az adott rendszer biztonsági politikájával képesek tudatosan azonosulni. Ezeket a képességeket és tudatosságot oktatással, gyakorlatokkal lehet fejleszteni. Továbbá a ciklikusan végrehajtott, segítő szándékú, részletes ellenőrzések biztosítják és támogatják a kritikus szervezetek védelmi képességeit. Ennek részét képezi az üzemeltetők képzése és annak visszaellenőrzése is.

Fontos, hogy ez az alapelv – arányosság alapján – ugyanúgy kell, hogy vonatkozzon az interdependencia vizsgálattal feltárt külső szolgáltatás üzemeltetői köreire is, mint a kritikus szervezet belső személyzetére.

Összegzés

A kritikus infrastruktúrák interdependenciájának feltárása és működésük megértése kulcsfontosságú a társadalom működőképességéhez, és szükséges a kritikus szervezetek ellenállóképességének növeléséhez. A fenti elemzésünkből nyilvánvaló, hogy a különböző infrastruktúrák egymáshoz való viszonya több oldalról vizsgálható, egymástól való függőségük több tényezőből áll, mely tényezőket csoportokra osztva megkaphatjuk a vizsgálandó interdependencia dimenzióit.

Az interdependencia dimenzióinak feltárásából jól látható, hogy vizsgálatához nem minden esetben elegendő a leggyakrabban alkalmazott kockázati mátrix alapú elemzés. Bemutattunk több elméleti módszert, illetve olyan gyakorlati lépéseket, melyek széleskörű interdependencia vizsgálatot tesznek lehetővé. Elengedhetetlen a holisztikus szemléletmód alkalmazása, az interdependencia mélyebb modellezése, valamint az ágazatokon átívelő együttműködés erősítése. A jövőbeli vizsgálatoknak az adaptív kockázatértékelési módszerek, a szimulációs modellek fejlesztése, valamint a komplex rendszerekben jelentkező nemlineáris hatások analízise felé kell elmozdulniuk. Csak rendszerszintű megközelítéssel lehetséges olyan védelmi keretrendszer kialakítása, amely képes kezelni a kritikus infrastruktúrák közötti egyre szorosabb és bonyolultabb interdependencia hálóját. A kockázatcsökkentés, a rendszerek stabilitása és a kibervédelem javítása az egyes entitásoknál csak az interdependencia teljeskörű feltárásával lehetséges.

Az interdependencia elméleti kérdéseinek további kifejtésével, elemzésével következő írásunkban foglalkozunk.

FELHASZNÁLT IRODALOM

2024. évi LXXXIV. tv. a kritikus szervezetek ellenálló képességéről

474/2024. (XII. 31.) Korm. rendelet a kritikus szervezetek ellenálló képességéről szóló törvény végrehajtásáról.

ANL/GSS-15-4. 2015. Analysis of Critical Infrastructure Dependencies and Interdependencies. *Risk and Infrastructure Science Center Global Security Sciences Division*. 2025. 05. 02. Online: https://publications.anl.gov/anlpubs/2015/06/111906.pdf

Bakos Ferenc 1978. *Idegen szavak és kifejezések szótára*. Budapest: Akadémiai Kiadó.

Banerjee, Joydeep; Das, Arun; Sen, Arunabha 2017. A Survey of Interdependency Models for Critical Infrastructure Networks. *Arxiv.org*. 2025. 05. 29. Online: https://arxiv.org/abs/1702.05407

Cedergren, Alexander; Johansson, Jonas; Rydén Sonesson, Tove 2021. Governance and interdependencies of critical infrastructures – Exploring mechanisms for cross-sector resilience. *Sweden Safety Science,* vol. 142. 2025. 06. 21. *Online: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753521002277*

Dalicsek István, Répás Sándor 2015. Az információbiztonsági kockázatelemzés módszertani kérdései a kritikus infrastruktúra elemeket üzemeltető szervezetek esetében. *Pro Publico Bono – Magyar Közigazgatás*, 2015/4. 22–33.

Kelly T. K., Peerenboom J. P., Rinaldi S. M. 2001. Complex Networks, Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies. *IEEE Control Systems Magazine*: 11–25. https://doi.org/10.1109/37.969131

Petit, Frédéric; Paul Lewis, Lawrence 2019. Critical infrastructure interdependency analysis – Operationalising resilience strategies. *UNDRR*, 2025. 06. 10. Online: https://www.preventionweb.net/files/66506_f415finallewisandpetitcriticalinfra.pdf