

Horváth Attila –Tóth Bence

A magyarországi vasúthálózat támadásokkal szembeni ellenállósága

DOI 10.17047/HADTUD.2019.29.E.93

Rezümé:

A magyarországi vasút-hálózat állomásközeinek forgalomból való véletlenszerű kizárása csak kismértékben zavarja meg a hálózat működését. Egy megfelelően célzott támadás azonban már néhány állomásköz rombolása esetén is jelentősen csökkenti a hálózat teljesítőképességét. Cikkünkben azonosítjuk ezen kiemelten védendő hálózati elemet.

Kulcsszavak:

vasút-hálózat; gráfelmélet; kritikus infrastruktúra; robusztusság; támadás.

Horváth, Attila –Tóth, Bence

The Resilience of the Railway Network of Hungary Against Attacks

Abstract:

The random disruption of line sections of the railway network of Hungary causes only a minor deterioration in the network performance but a targeted attack on a few specific line section makes the network unable to operate. In this paper we identify these network elements.

Key words:

railway network; graph theory; critical infrastructure; robustness; attack.

A 2080/2008. (VI. 30.) Kormányhatározat a Kritikus Infrastruktúra Védelem Nemzeti Programjáról a kritikusság következmény alapú megközelítését vezeti be. A zavarok következményeit három kategória mentén elemzi: kiterjedés, súlyosság és időbeli hatás. Közlekedési infrastruktúrák esetében a kiterjedés jellemezhető például a lehetséges kerülőutak térbeli elhelyezkedésének növekedésével, a súlyosság az érintett forgalom nagyságával, az időbeli hatás pedig az eredeti állapot helyreállításához szükséges idővel.

A kormányrendelet kritikusnak nevez egy infrastruktúraelemet, ha annak zavara akár csak az egyik szempont szerint is kritikus hatást gyakorol a teljes hálózatra. Ezért egy alternatíva nélküli, forgalmas és rombolás esetén nehezen helyreállítható hálózati elem (mely tehát mindhárom kormányrendeletbeli szempont alapján kritikus) az egész nemzetgazdaság szempontjából kiemelt jelentőségű és ezért fokozottan védendő, illetve kritikusságának megszüntetése érdekében lépéseket kell tenni.

Egy zavar kiváltó oka továbbá kétféle lehet: véletlen és akaratlagos. A véletlen zavarok lehetnek az időjárás következményei (például árvíz, belvíz, felsővezeték-szakadás a zúzmarától, vagy útra dőlt fa egy vihartól), melyekre csak felkészülni lehet, bekövetkezésük gyakoriságát és erősségét befolyásolni nem tudjuk (Teknős László 2014), illetve lehetnek ipari vagy civilizációs eredetűek (Horváth Attila 2013). Ez utóbbiak adódhatnak emberi mulasztásból is (például egy rosszul rögzített sínszál hő hatására történő vetemedése, kihajlása, vagy akár két vonat szembemenesztése is), vagy csak egy berendezés elöregedéséből, rejtett hibájából, esetleg sérüléséből.

Ugyanakkor ezeket az eseményeket nem a normál üzem megzavarása, a forgalom ellehetetlenítése vagy a lehető legnagyobb rombolás elérése motiválja, hanem emberi akaratától függetlenül következnek be. Ezzel szemben a támadásoknak mindig célja: minél kisebb behatással egy adott zavart generálni, vagy csak a rendszerben minél nagyobb kárt okozni. A vasúti közlekedés ebből a szempontból ún. puha célpontnak számít, könnyű sebezhetőségéből és sérülékenységéből fakadóan (Horváth Attila 2009). Bár a véletlen

zavarokkal szemben a célzott támadás sokkal ritkábban fordul elő, de egy „... katasztrófahelyzet vagy terrortámadás hatásai nemcsak lokálisan jelentkezhetnek, hanem hosszabb-rövidebb időre megbéníthatják egy-egy régió, országrész, vagy egy egész ország forgalmát is” (Horváth Attila 2006), ezért fontos az egyes hálózati elemek hatásának meghatározása, hogy a kritikus elemek védhetőek legyenek.

Jelen cikkben mindkét típusú zavarral foglalkozunk: milyen hatással van a magyarországi vasúthálózatra több véletlen helyen, de azonos időben bekövetkező zavar, illetve különböző stratégiák alapján, célzottan egyszerre rombolt állomásközpontok hogyan befolyásolják a hálózat teljesítőképességét. Előbbi esetben célunk annak feltárása, hogy a hálózat milyen mértékű sérülése van jelentős hatással a hálózat egészére, utóbbi esetében pedig azon hálózati elemek azonosítása, melyek a különböző támadási stratégiák esetén a hálózat legveszélyeztetettebb, ezért leginkább védendő elemei, illetve amelyek kiváltására alternatívákat lenne szükséges beépíteni a hálózatba.

A modell

A magyarországi vasúthálózatot egy gráffal modelleztük. Mivel ezt a modellt korábbi cikkeinkben (Tóth Bence 2017), (Tóth Bence 2018a) már részletesen bemutattuk, ezért itt csak a jelen kutatás megértéséhez szükséges részletességig tárgyaljuk azt.

A bemutatott számítások és az eredmények vizualizálása az *R* programozási nyelv és környezetben (R Core Team 2012) történtek a Csárdi Gábor és Nepusz Tamás által megalkotott *igraph* csomag (Csardi Gabor 2006) segítségével.

A magyarországi vasúthálózat gráfmodellje

A magyarországi vasúthálózat leírására egy élsúlyozott gráfot használtunk. A gráf csúcsai reprezentálták az állomásokat, az élek a köztük levő vasútvonalakat. A csúcsok közti éleket (melyek a vasútvonal-szakaszokat reprezentálták) a számításokhoz két különböző értékkel súlyoztuk. Az egyik súly a vonalszakasz hossza, a másik a hosszértékekből és a rajtuk érvényes megengedett sebességből számított menetidők voltak (Vasútvonalak 2019). Emiatt a modellbeli menetidők egy alsó korlátot jelentenek, a különböző sebességkorlátozások miatt ezeknél nemcsak a valós menetidők, hanem még a tiszta menetidők is hosszabbak. Minden állomási irányváltásnál figyelembe vettünk továbbá 15 perc menetidő-növekedést.

A legrövidebb út keresése

Mivel mind a távolság-, mind a menetidőértékek pozitív valós számok és a gráf is viszonylag kisméretű, így két állomás közötti legrövidebb út meghatározására az *igraph* csomag *distances()* függvényében implementált Dijkstra-algoritmust (Dijkstra, Edsger Wybe 1959) használtuk, mely pozitív súlyú gráfokra egyben a függvény alapbeállítása.

Hálózatok teljesítőképességének mérőszámai

a) Hatékonyság

Összefüggő gráfok jellemzésére gyakran használt mérőszám az ún. közelség (closeness centrality, C_C). Ez az összes csúcspár közti (térben, illetve időben) legrövidebb utak hosszai összegének a reciproka (Bavelas, Alex 1950), (Sabidussi, Gert 1966):

$$C_{C,l} = \frac{1}{\sum_{\langle a,b \rangle} \ell_{ab}} \#(1)$$

$$C_{C,t} = \frac{1}{\sum_{\langle a,b \rangle} t_{ab}} \#(2)$$

ahol ℓ_{ab} az a és a b állomások közti térben legrövidebb út hossza, t_{ab} pedig az a és a b állomások közti időben legrövidebb út menetideje. Ezt a mennyiséget értelmezhetjük az egyes k élekre is: ekkor csak azoknak a legrövidebb utaknak a hosszára végezzük el a szummázást, melyek keresztülhaladnak a k élen.

Ez a mérőszám azonban egyszeresen él-összefüggő gráfok esetében (mint amilyen a magyarországi vasúthálózat is), egy olyan él törlésével (azaz olyan állomásköz rombolásával), mely zsákvonalhoz tartozik, legalább egy állomás elérhetetlen lesz a többi állomás számára, azaz távolsága tőlük végtelenné válik. Ebből következik, hogy a közelség nevezőjében az összeg végtelen és így a közelség értéke nulla lesz. Ugyanakkor az is igaz, hogy ezek a vonalszakaszok nem végtelenül fontosak az egész hálózat szempontjából. Gondoljunk a Déli pályaudvar–Kelenföld állomásközre: amikor 2015-ben a Déli alagútjának rézsűje megcsúszott, a forgalom Kelenföld állomásról és kisebb részben a Keleti pályaudvarról továbbra is fenntartható volt. Éppen ezért célszerűbb nem a távolságok összegének reciprokát, hanem a távolságok reciprokainak összegét használni a hálózat jellemzésére. Ezt a mennyiséget hatékonyságnak nevezzük (Latora, Vito 2001), (Crucitti, Paolo 2004):

$$\varepsilon_\ell = \sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{\ell_{ab}} \#(3)$$

$$\varepsilon_t = \sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{t_{ab}} \#(4)$$

A hatékonyság értéke az egyes állomásközök kizárásával csökken, de nullává csak akkor válik, ha minden $\langle a,b \rangle$ állomáspár elérhetetlenné válik egymás számára. Egy adott $\langle a,b \rangle$ állomáspárra is a hatékonyság egy-egy állomásközt kizárva csak monoton csökken, nullává csak akkor válik, ha az adott állomáspár között már nem létezik út.

b) Kapcsolatköztiség

Egy állomásköz fontosságát jellemezhetjük a rajta keresztülhaladó legrövidebb utak számával is. Ezt a mennyiséget kapcsolatköztiségnek (betweenness centrality) nevezzük és C_B -vel jelöljük. Értéke természetesen különböző a kilométerben és az időben legrövidebb utakra, hiszen a két esetben a pontos útvonalak különbözhetnek, és gyakran különböznek is az egyes állomáspárokra.

Míg a hatékonyság az egyes állomásközök kizárásával monoton csökken, ahogy az állomáspárok közti legrövidebb utak hossza nő (de legalábbis nem csökken), addig az állomásközök egymás utáni kizárásával a többi állomásköz kapcsolatköztiség-értéke növekszik (de legalábbis nem csökken) egészen addig, amíg legalább egy állomáspár elérhetetlen lesz egymás számára. Ekkor a kapcsolatköztiség-értékek hirtelen lecsökkennek, azaz ez a függvény már nem lesz monoton. Monotonitás csak olyan súlyozás esetében lenne várható, amikor például egy adott él nem része egy legrövidebb útnak sem, majd a legnagyobb kapcsolatköztiségű él törlése után az összes azon áthaladó menetvonal ezen az addig kihasználatlan élen halad át. Szigorú monotonitás pedig csak fa gráfokkal jellemezhető hálózatok esetében fordulhat elő.

Támadási stratégiák

A magyarországi vasúthálózat viselkedését kétféle támadási stratégia esetén vizsgáltuk. Mindkettőnél állomásközök zavarát feltételeztük, állomásokét nem, mivel „... a nyílt vonalak elleni terrortámadások (...) főként a kedvezőtlen közlekedési hálózattal rendelkező régiókat és országokat érinthetik súlyosabban. Ezek közé tartozik Magyarország is, ahol a sugaras szerkezetű, a túlzott mértékben Budapest-központú vasúti hálózat egy kritikus műtárgyánál (pl. hidak, felüljárók stb.) bekövetkező rombolás komoly forgalomkiesést eredményezne” (Horváth Attila 2006). Egy egy- vagy akár többvágányú nyílt pályát ugyanis könnyebb rombolni, forgalomra alkalmatlanná tenni, mint egy állomást (Horváth Attila 2009).

Az első támadási stratégiánál minden lépésben azt az állomásközt reprezentáló élpart töröltük a hálózatból, amely a legnagyobb teljes hatékonyságcsökkenést okozza a hálózatban. Ennek meghatározásához minden lépésben az összes, még meglévő állomásközt egyesével töröltük és számítottuk ki az így lecsökkent teljes hatékonyságot. Ennek a támadási stratégiának a modellezése tehát négyzetesen nő az élek számával.

A második támadási stratégiánál minden lépésben a legnagyobb kapcsolatköztiségű állomásközt töröltük a hálózatból. Ez egyszerűen meghatározható az összes legrövidebb út pontos vonalának ismeretében, melyet a *distances()* függvény kiszámít és az *\$epath* paranccsal kilistázza a legrövidebb út által érintett állomásközöket. Ezeket összegezve az egyes állomásközökre megkapjuk a kapcsolatköztiség-értékeket. Ennek a támadási stratégiának a modellezése lineárisan nő az állomásközök számával.

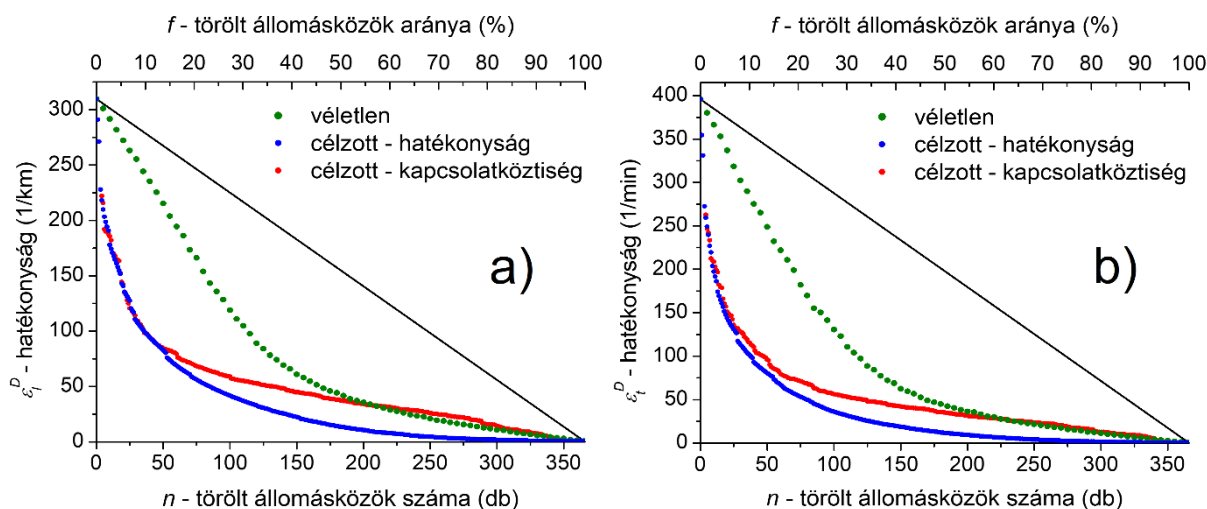
Megvizsgáltuk a véletlen zavar hatását is: mekkora lesz a teljes hatékonyság csökkenése, ha n darab véletlenszerűen kiválasztott állomásközt törölünk a hálózatból. Mivel itt az eredmények az állomásközök konkrét kiválasztástól függően erősen szórhatnak, ezért minden n értékre százszor lefuttattuk a szimulációt és a kapott eredményeket átlagoltuk.

Eredmények

A következőkben bemutatjuk a véletlen zavar, a hatékonyságalapú és a kapcsolatköztiség-alapú támadás hatását a hálózatra a teljes hatékonyság és a maximális kapcsolatköztiség változásán keresztül.

A teljes hatékonyság változása

Az 1. ábrán láthatjuk a hálózat teljes hatékonyságának változását véletlen zavarok és a két vizsgált támadási stratégia esetén a távolság- és a menetidőértékekkel súlyozott gráfban.



1. ábra

A teljes hatékonyság változása véletlen zavarok, valamint hatékonyság- és kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén

a) minimális távolságokra és b) minimális menetidőkre
(saját szerkesztés)

A kapott eredmények alapján a magyarországi vasúthálózat más kritikus infrastruktúrákhoz hasonló viselkedést mutat (Shuliang Wang 2012). A rendszer kifejezetten ellenálló a véletlen zavarokkal szemben: kb. 100 darab véletlenszerűen törölt állomásközig (azaz az összes állomásköz kb. 30%-áig) mind a távolság-, mind az idődimenzióban a teljes hatékonyság kb. 1%-al csökken, ahogy n értéke 1-gyel nő, azaz a viselkedés lineáris. Kb. 200 törölt állomásköztől (azaz az összes állomásköz kb. 60%-ától) a teljes hatékonyság csökkenése ismét lineárisává válik, de más, kisebb meredekséggel.

A hálózat teljes hatékonysága természetes módon a hatékonyságalapú támadásnál csökken a leggyorsabban, de ettől nem sokkal marad el a kapcsolatköztiség-alapú támadás során tapasztalható hatékonyságcsökkenés sem. Az első három állomásköz a három Duna-hidat tartalmazó, a negyedik a Miskolc–Tiszai pályaudvar és a 92-es és 94-es vonalak közös szakasza az ötödik pedig a 150-es vonal Budapestről kivezető szakasza. A konkrét hatékonyságértékek exponenciálisan csökkennek, az első öt állomásköz elvételével a teljes hatékonyság a zavarmentes hálózaténak 93, 77, 74, 71, illetve 69 százaléka lesz mind menetvonal-hosszak, mind menetidők esetében.

Azt látjuk továbbá az 1. ábrából, hogy a teljes hatékonyság változása a kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén is szigorúan monoton változást mutat. Ez azt jelenti, hogy a legforgalmasabb (azaz legnagyobb kapcsolatköztiségű) állomásközök egyben nagy összmenetvonal-hossz, illetve összmenetidő-növekedést is okoznak. Ennek jelentőségére a kapcsolatköztiség-alapú támadásnál még visszatérünk.

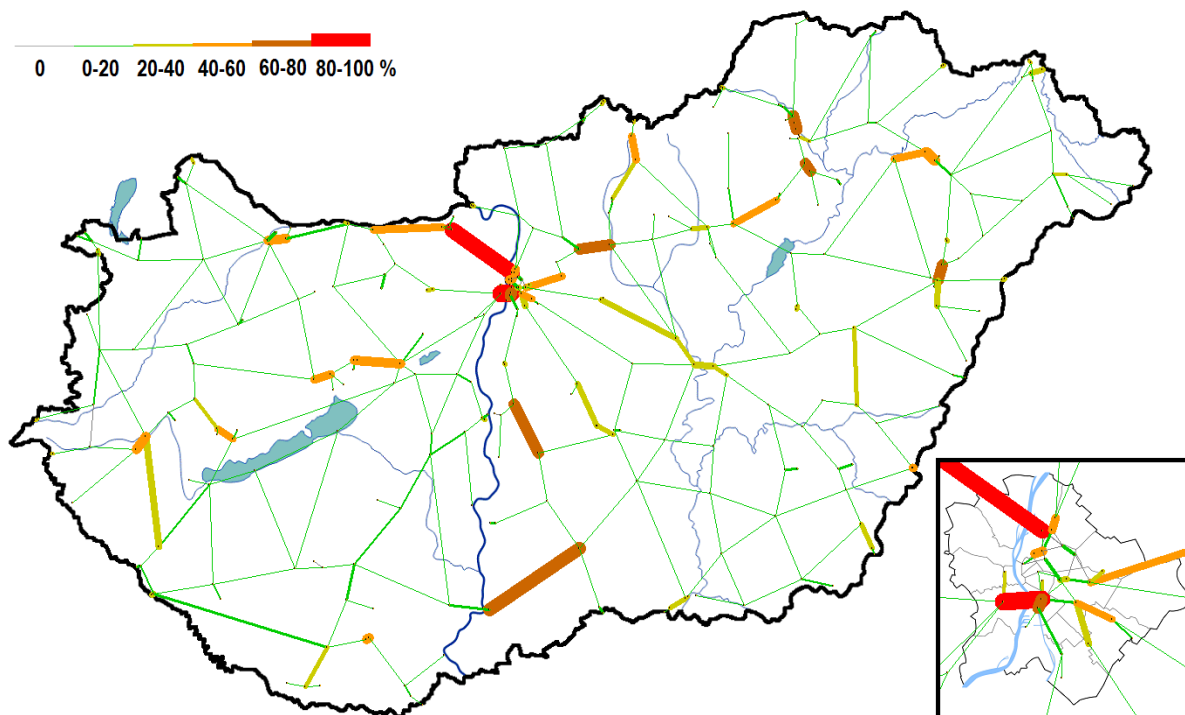
A fentebb bemutatott viselkedés, azaz a véletlen zavarokkal szembeni ellenállóság és a célzott támadásokkal szembeni sérülékenység a kis-világ vagy a skálafüggetlen hálózatokra jellemző (Lewis, Ted 2006, 71–92.), (Mackin, Thomas J. 2007). A magyarországi vasúthálózat pontos típusának meghatározásához a bemutatott analízis mellett szükséges lenne még az úgynevezett óriáskomponens méretének, az óriáskomponens átlagos úthosszának (Albert Réka 2002), a feldarabolódás során megjelenő, az óriáskomponenshez nem tartozó részgráfok átlagos méretének és a gráf fokszám-eloszlásának (Barabási Albert-László 2017, 292–304.) részletes vizsgálata, melyre itt nincs lehetőségünk kitérni.

A veszélyeztetett állomásközök

A 2. és 3. ábrákon a hálózat teljes hatékonyságát láthatjuk az adott vonalszakasz, mint legnagyobb hatékonyságcsökkenést okozó vonalszakasz elvételekor, minimális hosszúságú és minimális menetidejű utakra. Az állomásközöket reprezentáló élek vastagsága arányos a teljes hálózatnak abban az állapotában vett hatékonyságával, amikor az adott állomásköz kizárása megtörténik.

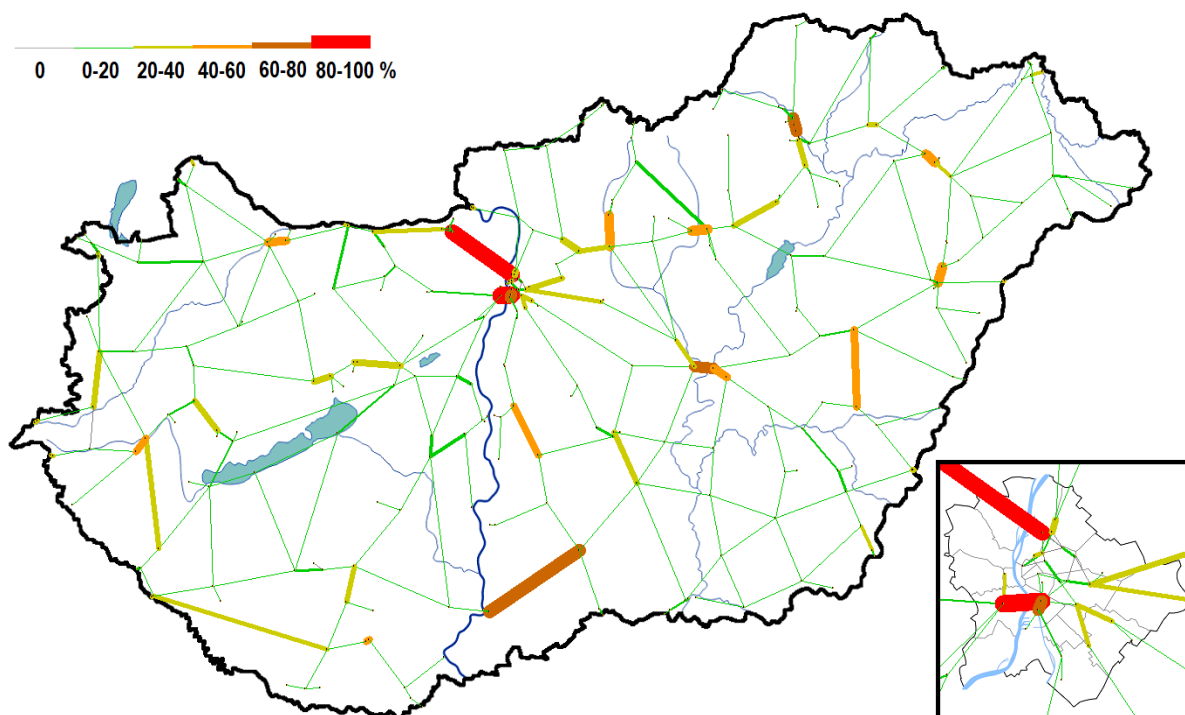
A magyarországi vasúthálózat tehát célzott támadásokkal szemben rendkívül sérülékeny: kevés, de jól megválasztott állomásköz rombolása a hálózat teljesítményének jelentős csökkenését, sőt hálózatként való funkcionálásának megszűnését vonja maga után.

Az az eredmény azonban, miszerint az első rombolt vonalszakasz (az Összekötő vasúti hidat tartalmazó Ferencváros–Kelenföld állomásköz) után a hálózat még összefüggő és bizonyos tereléssel még funkcionálhat, sajnos távol áll a valóságtól. *„A jelenleg meglévő közlekedési vonalak kapacitása, (...) vonalvezetése nem tenné lehetővé a rombolt műtárgy gyors kiváltását. Így a részleges vagy teljes helyreállításig elterelésekkel nem oldható meg a forgalom folyamatos fenntartása más, kerülő közlekedési útvonalakon”* (Horváth Attila 2006), hiszen ez az egyetlen villamosított és ráadásul az egyetlen kétvágányú dunai átkelés az országban, mely emellett a két, Magyarországon keresztülhaladó TEN-T folyosó, a Mediterrán és az Orient közös eleme is. Jelenlegi kiemelt helyzetén a már villamosított Újpesti Vasúti Híd és a 2-es számú Budapest–Esztergom vonal teljes kétvágányúsítása sem változtatna, hiszen csak a 4-es számú, jelenleg egyvágányú és nem villamosított, Esztergom–Almásfüzítő vonalon át lehetne ez az útvonal, mint kerülőirány az 1-es fővonal valódi alternatívája, ahogy arra egy korábbi cikkben más szempontból már felhívtuk a figyelmet (Tóth Bence 2019a), (Tóth Bence 2019b). Igaz ugyanakkor, hogy ez egy szintén Budapesten keresztülhaladó vasútvonal, melynél jobb megoldás egy Budapestet elkerülő kétvágányú villamosított vonal, a „V0” vonal lehetne. Bár ez sokáig az országos vasúti törzshálózat tervezett eleme volt, többek között a 2014–2020-as EU költségvetési ciklusra is, megépítése (az Összekötő vasúti híd három-vágányúsításával ellentétben) jelenleg nincs napirenden.



2. ábra

A vonalszakaszok által okozott kumulatív hatékonyságcsökkenés a zavarmentes hálózathoz képest hatékonyságalapú támadás esetén, a támadás azon lépésében, amikor az adott vonalszakasz a legnagyobb hatékonyságcsökkenést okozó állomásköz, távolságban legrövidebb utakra.
(saját szerkesztés)



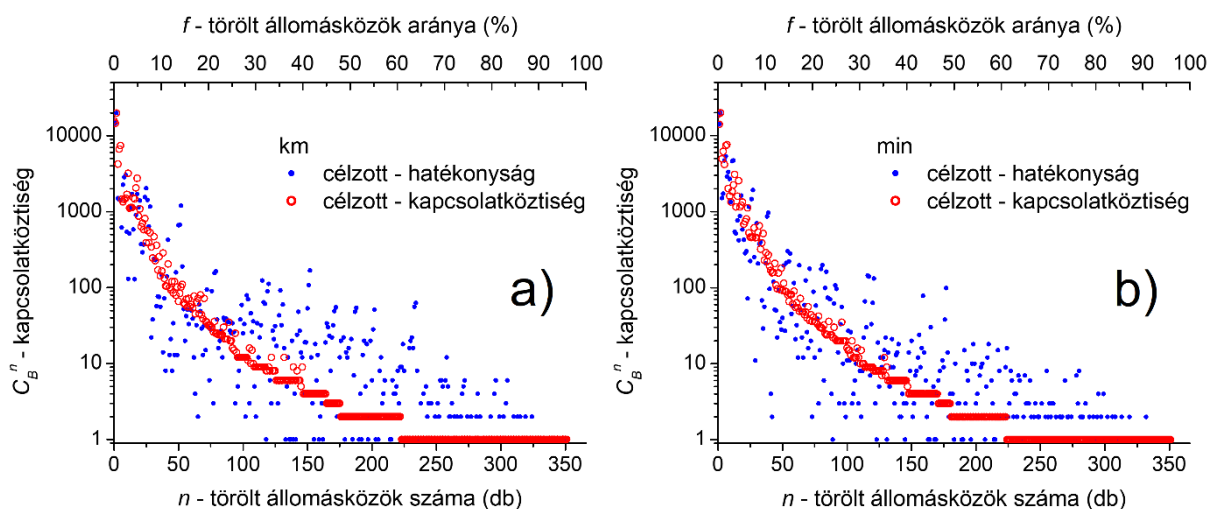
3. ábra

A vonalszakaszok által okozott kumulatív hatékonyságcsökkenés a zavarmentes hálózathoz képest hatékonyságalapú támadás esetén, a támadás azon lépésében, amikor az adott vonalszakasz a legnagyobb hatékonyságcsökkenést okozó állomásköz, időben legrövidebb utakra.
(saját szerkesztés)

Szükséges lenne ugyanakkor egy megfelelő dízel vontatóállomány fenntartása is az elektromos hálózat sérülése esetére. Ennek ellentmond a jelenlegi trend, miszerint „... a villamosított vonalak hosszának növekedésével, ami a jövőben valószínűleg várható, folyamatosan csökkenni fog a dízel-vontatójárművek száma, hiszen a vasúttársaságoknak nem lesz érdeke csak olyan számban rendszerben tartani, amilyen arányban a hálózat ezt igényli” (Szászi Gábor 2013). Ez tehát egy újabb nehézséget okozhat a forgalom megszervezésében. Egy, a Magyar Honvédség bevonását szükségessé tevő esemény esetén, megfelelő számú dízelmozdony hiányában, a szállítások, csapatmozgatások az áramellátás zavara esetén nem, vagy csak nehezen lennének kivitelezhetőek.

A kapcsolatköztiség változása

A 4. ábrán láthatjuk a hálózat teljes kapcsolatköztiségének csökkenését a két támadási stratégia esetén (a függőleges tengely logaritmus!).



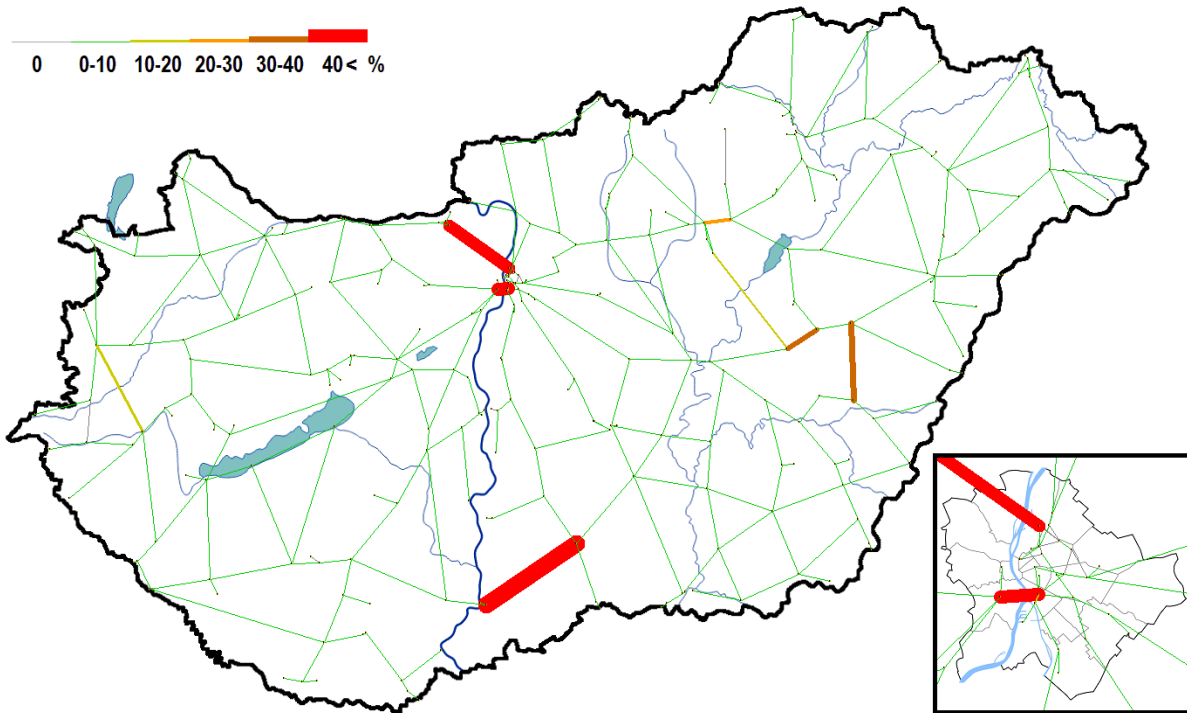
4. ábra

A maximális kapcsolatköztiség változása hatékonyság- és kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén a) minimális távolságokra és b) minimális menetidőkre (log-lin skála!) (saját szerkesztés)

A maximális kapcsolatköztiség változása a teljes hatékonyság esetétől lényegesen különbözik. Bár kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén a kapcsolatköztiség csökkenő trendet mutat (a mérték definíciójánál elmondottak alapján monoton csökkenés csak egészen speciális hálózatok esetében lenne várható), hatékonyságalapú támadás esetén a kapcsolatköztiség-értékek rendkívül erős szórást mutatnak. Ez azt jelenti, hogy a legnagyobb összmenetvonal-hossz, illetve összmenetidő-növekedést okozó állomásközök nem feltétlenül a legforgalmasabbak. Csak a TEN-T hálózaton 31% a sebességkorlátozással érintett pályahossz, az eleve alacsonyabb kiépítési sebességű és kevésbé karban tartott mellékvonalakon a helyzet még ennél is rosszabb. Összességében „... a vasúti pályák kevesebb, mint 62%-ban alkalmasak arra, hogy a vonatok kiépítési sebességgel közlekedhessenek” (Szászi Gábor 2007). Szélsőséges esetben egy állomásköz kizárása kétszeres menetidő-növekedést is okozhat az azt érintő menetvonalakon (Tóth Bence 2018b) a rendkívül hosszú kerülők miatt, ami a fő oka a hálózat 4. ábrán látható viselkedésének.

A veszélyeztetett állomásközök

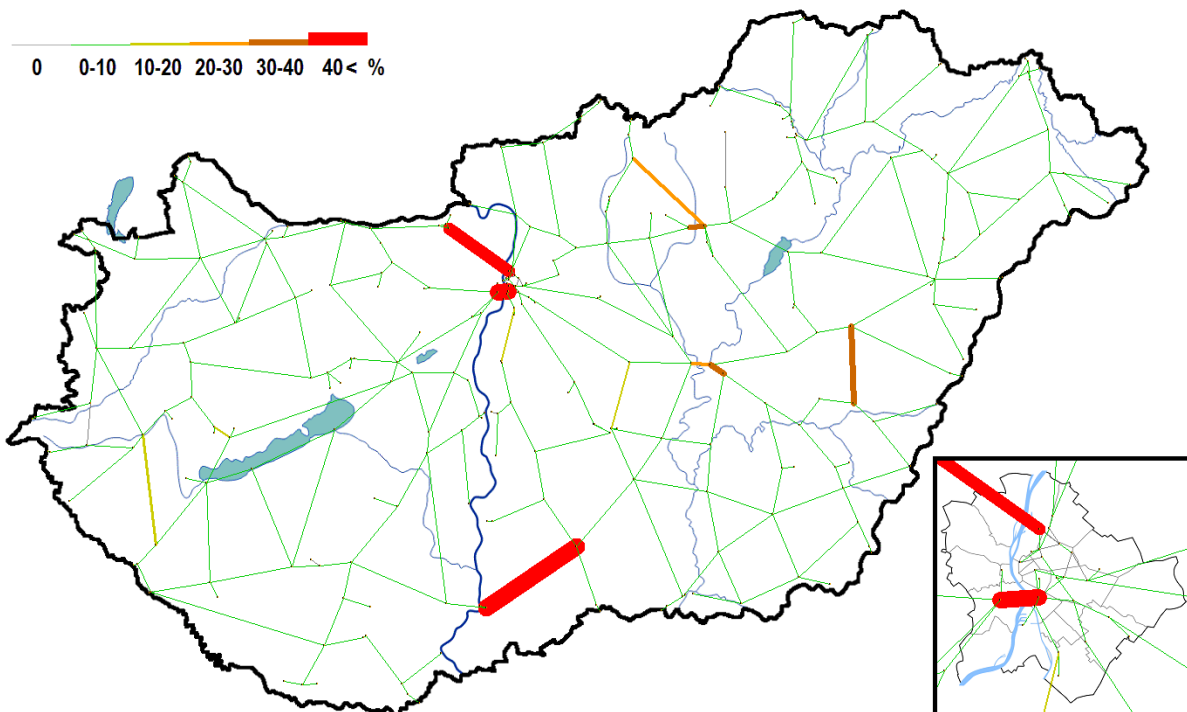
Az 5. és 6. ábrákon az egyes vonalszakaszok kapcsolatköztiségét láthatjuk minimális hosszúságú és minimális menetidejű utakra. Az állomásközöket reprezentáló élek vastagsága arányos azok kizárás kori kapcsolatköztiségével.



5. ábra

Az egyes vonalszakaszok kapcsolatköztisége a zavarmentes hálózat összes menetvonalának arányában, kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén, a támadás azon lépésében, amikor az adott vonalszakasz a legnagyobb kapcsolatköztiségű és így a következő lépésben törlendő állomásköz, távolságban legrövidebb utakra.

(saját szerkesztés)



6. ábra

Az egyes vonalszakaszok kapcsolatköztisége a zavarmentes hálózat összes menetvonalának arányában, kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén, a támadás azon lépésében, amikor az adott vonalszakasz a legnagyobb kapcsolatköztiségű és így a következő lépésben törlendő állomásköz, időben legrövidebb utakra.

(saját szerkesztés)

Azt látjuk, hogy a kapcsolatköztiség-értékek rendkívül gyorsan csökkennek, ahogy a rombolás előrehalad. Ez azt jelenti, hogy a hálózat hamar szétesik kisebb, egymással nem összefüggő „szigetekre”. Az első két ilyen „sziget” a Duna két partja, melyek a három Duna-híd, illetve a korábban már említettek alapján, villamos vontatás szempontjából már az első állomásköz, az Összekötő vasúti híd rombolásával elérhetetlenek lesznek egymás számára (Szászi Gábor 2014).

Érdekes megfigyelni a 5–6. ábrákon, hogy az első négy-öt állomásköz kiesése után már nemcsak a fővonalak (80, 100, 120) állomásközei, hanem az ezek alternatívájaként szolgáló olyan vonalszakaszok válnak forgalmassá, mint a Püspökladány–Szeghalom, a Kál-Kápolna–Kisújszállás, a Szombathely–Zalaszentiván, a Kál-Kápolna–Kisterenye vagy a Zalaszentiván–Nagykanizsa vonalszakaszok. Ez újra felhívja a figyelmet arra, hogy kisebb jelentőségű vonalszakaszok is kerülhetnek olyan helyzetbe, hogy együttesen fővonal alternatívájaként kellene annak zavara esetén üzemelniük, ez viszont csak megfelelő áteresztőképesség esetén lenne lehetséges. A szűk keresztmetszetek ilyen, mellékvonalak karbantartása által történő csökkentése a közlekedési hálózat sajátos katonai-védelmi követelményeinek egy relatíve kis beruházással megvalósítható módja.

Megítélésünk szerint a magyarországi vasúthálózat támadásokkal szembeni ellenállóságának általunk választott módszertana jól hasznosítható a különleges jogrendi állapotokhoz kapcsolódó védelmi tervezés során. Szövetségi szinten alkalmazható a szövetséges erők Befogadó Nemzeti Támogatási Képességek tervezésekor és az Erők Fogadásával, Állomásoztatásával és Előrevonásával (Reception, Staging and Onward Movement – RSOM) kapcsolatos műveletek szervezésekor.

A megváltozott biztonságpolitikai környezet ismételten fontossá tette a NATO-tagállamok területének védelmét. A Szövetség egészében és tagállami szinten is a stratégiai szintű védelmi tervezéskor nem csupán a hálózati kapacitást és adottságokat kell a tervezőknek ismerniük, hanem a hálózatnak az egyes hálózati elemek sérülésével, illetve támadásokkal szembeni ellenállóságát és a különböző stratégiák alapján végrehajtott esetleges rombolások következményeinek a felszámolási lehetőségeit is.

Következtetések

Gráfelméleti alapú modellezés vizsgálatok alapján bemutattuk, hogy a magyarországi vasúthálózat nem egyformán érzékeny a véletlen zavarokra és a célzott támadásokra. Egy-egy véletlen zavar csak kis átlagos csökkenést okoz a hálózat összmenetidejében és össz-menetvonalhosszában, jelentős kapacitáscsökkenést csak több tíz állomásköz egyidejű használhatatlanná válása okozna.

Ezzel szemben egy, a közlekedési hálózat működésének lényegét jellemző paraméter célzott csökkentésére tervezett támadás már akár egy állomásköz megzavarása esetén is kritikus helyzetet képes okozni, legyen ez a hálózat teljes összmenetidejének vagy össz-menetvonalhosszának legnagyobb növelésére való törekvés, vagy a mindenkori legforgalmasabb állomásköz rombolása. Az ország védelmi felkészítése szempontjából ezért elengedhetetlen az egyes hálózati elemek ilyen szempontból való rangsorolása.

Az Összekötő Vasúti Híd a hálózat legkritikusabb eleme, mivel sem kétvágányú, sem villamosított alternatív Duna-híd nincs az országban, ezért mindkét vizsgált támadási stratégia esetén az ezt tartalmazó Ferencváros–Kelenföld állomásköz lenne az első rombolt hálózati elem. Emiatt ezt a hidat kell a hálózatban a leginkább védeni.

A forgalmas fővonalak mellett, az ezek közötti nem villamosított mellékvonalak hálózata, mint lehetséges kerülőutak, is komoly szerephez juthatnak a támadások hatásainak kezelésében. Bár kisebb az áteresztőképességük, megfelelő karbantartásuk

és elégséges méretű dízel vontatóállomány esetén párhuzamos kerülőutakat tudnak biztosítani, ezért szükséges az ország védelmi felkészítésében megfelelő figyelmet fordítani rájuk.

Jelenleg azonban a mellékvonalak alacsony engedélyezett sebessége miatt előfordul, hogy míg a legforgalmasabb vonalszakaszok, kizárásuk esetén, nagy hatékonyságcsökkenést okoznak, addig a kizárásuk esetén nagy hatékonyságcsökkenést okozó állomásközök nem feltétlenül a legforgalmasabbak. Ez az aszimmetria egy védelmi veszélyhelyzet esetén a hálózat előnyére is kihasználható: egy kisebb forgalmú, de stratégiaileg fontos állomásköz védelme könnyebben biztosítható.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Albert Réka – Barabási Albert-László 2002: Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics* 74/1. pp. 47–97. (DOI: 10.1103/RevModPhys.74.47)
- Barabási Albert-László 2017: *A hálózatok tudománya*. Budapest, Libri. (ISBN 9789633107874)
- Bavelas, Alex 1950: Communication Patterns in Task-Oriented Groups. *The Journal of the Acoustical Society of America* 22/6., pp. 725–730. (DOI: 10.1121/1.1906679)
- Crucitti, Paolo – Latora, Vito – Marchiori, Massimo – Rapisarda, Andrea 2004: Error and attack tolerance of complex networks. *Physica A* 340., pp. 388–394. (DOI: 10.1016/j.physa.2004.04.031)
- Csardi Gabor – Nepusz Tamas 2006: *The igraph software package for complex network research*, InterJournal, Complex Systems 1695. 2006. <http://igraph.org>
- Dijkstra, Edsger Wybe 1959: A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1/1, pp. 269–271. (DOI: 10.1007/BF01386390)
- Horváth Attila 2006: *A közúti, vasúti és vízi közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői*. In: Tálás Péter (szerk.): *Válaszok a terrorizmusra II*. Budapest, Mágustúdió, 2006., pp. 321–336.
- Horváth Attila 2009: A vasúti közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői a városokban. *Hadmérnök*, 2009/3. szám, pp. 180–189. hadmernok.hu/2009_3_horvatha.pdf (letöltve: 2019. 07. 03.)
- Horváth Attila 2013: *A kritikus infrastruktúra védelem komplex értelmezésének szükségessége*. In: Horváth Attila (szerk.): *Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből*. Budapest, Magyar Hadtudományi Társaság, 2013., pp. 18–37. (ISBN 9789630869263); http://mhht.eu/hadtudomany/KIV_tanulmanykotet.pdf (letöltve: 2019. 07. 03.)
- Latora, Vito – Marchiori, Massimo 2001: Efficient Behavior of Small-World Networks. *Physical Review Letters* 87/19., 198701/1-4 (DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.198701)
- Lewis, Ted 2006: *Critical Infrastructure Protection*. Hoboken, NJ, USA, Wiley (ISBN 9780471786283)
- Mackin, Thomas J. – Darken, Rudy – Lewis, Ted G. 2007: *Managing Risk in Critical Infrastructures Using Network Modeling*. In: *Critical Infrastructure Protection: Elements of Risk*. S.I., George Mason University, pp. 65–78.
- R Core Team 2012. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- Sabidussi, Gert 1966: The Centrality Index of a Graph. *Psychometrika* 31/4., pp. 581–603. (DOI: 10.1007/bf02289527)
- Szászi Gábor 2007: Magyarország közlekedési infrastruktúrájának fejlesztése napjainkban: Közút vagy vasút? *Katonai Logisztika* 15. 2007/2. szám, pp. 32–59. <https://docplayer.hu/5704898-Magyarország-kozlekedesi-infrastrukturajanak-fejlesztese>

- [napjainkban-kozut-vagy-vasut-1-a-kerdes-feltevesehez-vezeto-okok.html](#) (letöltve: 2019. 07. 03.)
- Szászi Gábor 2013: *A vasúti közlekedési alágazat, mint kritikus infrastruktúra*
In: Horváth, A. (szerk.): *Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből*;
Magyar Hadtudományi Társaság, Budapest, 2013., 167–190. o.
(ISBN 9789630869263); http://mhtt.eu/hadtudomany/KIV_tanulmánykotet.pdf
(letöltve: 2019. 07. 03.)
- Szászi Gábor 2014: *Nagyfolyami vasúti hidak, mint közlekedési létfontosságú rendszerelemek*. In: Horváth Attila – Bányász Péter – Orbók Ákos (szerk.): *Fejezetek a létfontosságú közlekedési rendszerelemek védelmének aktuális kérdéseiről*. Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014. pp. 83–99. (ISBN 9786155305306)
- Teknős László – Endrődi István 2014: *A szélsőséges időjárás hatása a magyarországi közlekedési alrendszerekre – kiemelten a közút és vasút alágazatokra*. In: Horváth Attila – Bányász Péter – Orbók Ákos (szerk.): *Fejezetek a létfontosságú közlekedési rendszerelemek védelmének aktuális kérdéseiről*. Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014. pp. 83–99. (ISBN 9786155305306)
- Tóth Bence 2017: *Állomások és állomásközpontok zavarának gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton*. *Hadmérnök*, 2017/4. szám, pp. 52–66.
hadmernok.hu/174_06_toth.pdf (letöltve: 2019. 07. 03.)
- Tóth Bence 2018a: *A magyarországi vasúthálózat zavarainak gráfelméleti alapú vizsgálata*; In: Horváth Balázs – Horváth Gábor – Gaál Bertalan (szerk.): *Közlekedéstudományi Konferencia, Győr, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék*, 2018., pp. 505–519. (ISBN 9786155776137); real.mtak.hu/78843/ (letöltve: 2019. 07. 03.)
- Tóth Bence 2018b: *Menetidő- és menetvonalhossz növekedés gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton állomások és állomásközpontok zavara esetén*. *Hadmérnök* XIII. 2018/1. szám, pp. 118–132.;
hadmernok.hu/181_09_toth.pdf (letöltve: 2019. 07. 03.)
- Tóth Bence 2019a: *A magyarországi vasúthálózat redundanciáját biztosító vonalszakaszok*. *Hadmérnök* XIV. 2. (2019), 74–86. o.;
hadmernok.hu/192_06_toth.pdf (letöltve: 2019. 07. 03.)
- Tóth Bence 2019b: *Forgalmatlan, de nélkülözhetetlen – A magyarországi vasúthálózat redundanciavizsgálata*. In: Horváth, B.; Horváth, G., Gaál, B. (szerk.): *Közlekedéstudományi Konferencia, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr*, 2019., 37/1–9. o. (ISBN 9789638121868); real.mtak.hu/92194/ (letöltve: 2019. 07. 03.)
- Vasútvonalak 2019: http://www.vpe.hu/takt/vonal_lista.php (letöltve: 2019. 07. 03.)
- Wang, Shuliang – Hong, Liu – Ouyang, Min – Zhang, Jianhua – Chen, Xueguang 2013: *Vulnerability analysis of interdependent infrastructure systems under edge attack strategies*. *Safety Science* 51., pp. 328–337.