

Tóth Bence¹

Magyarország nagyvasúti kapcsolat szempontjából kritikus régiói a hálózat célzott rombolása esetén

The Critical Regions of Hungary by Railway Connectivity in the Case of Targeted Attacks of the Network

A magyarországi vasúthálózat leírására egy élsúlyozott irányított gráfot használtam. Az egyes állomások és állomásközök két stratégia szerinti célzott rombolásának modellezésével meghatároztam az ország azon régióit, amelyek több hálózati elem egyidejű kiiktatásával a leghamarabb maradnak nagyvasúti kapcsolat nélkül. A három Duna-híd, illetve a hozzájuk kapcsolódó állomások, Miskolc-Tiszai pályaudvar és a csatlakozó mellékvonalrendszer és a három északkeleti megye, különösen Szabolcs-Szatmár-Bereg bizonyult a leginkább veszélyeztetettnek. A Dunántúl északi és déli régióinak egymástól való elvágása is viszonylag kevés hálózati elem rombolásával kivitelezhető. A kitétség csökkentésére a megoldás kellő számú, megfelelő földrajzi helyzetű mellékvonal elégséges kapacitásúra bővítése.

Kulcsszavak: vasúthálózat, gráfelmélet, kritikus infrastruktúra, robusztusság, óriáskomponens

To describe the railway network of Hungary, a weighted directed graph was used. By modelling the attack on stations and line sections based on two strategies, I identified the regions of the country that first become disconnected from the railway network on the disruption of multiple network elements. The three bridges on the river Danube and their connecting stations, Miskolc-Tiszai Station and its connecting branch line system and the three counties in the northeastern part of the country, especially Szabolcs-Szatmár-Bereg County, are resulted to be the most threatened regions. The separation of the Transdanubia region into a northern and southern part can be done by the destruction of relatively few network elements. To lower

¹ Nemzeti Közszerológálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Természettudományi Tanszék, adjunktus, e-mail: toth.bence@uni-nke.hu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3958-187X>

their exposure, the development of several appropriately located branch lines to a sufficient capacity is advised.

Keywords: railway network, graph theory, critical infrastructure, robustness, giant component

Bevezetés

A különféle közlekedési módok különböző típusú szállítások számára optimálisak [1]. Rövid távon mind személy-, mind teherszállításra a közút, hosszú távú személyszállításra a légi, teherszállításra a szállítandó áru típusától függően a légi vagy a tengeri szállítás a legolcsóbb, középtávon azonban általában a vasúti szállítás a leginkább rentábilis. Emellett bizonyos típusú eszközök (különösen haditechnikai eszközök) például tömegük miatt bizonyos célállomásokra közúton nem is szállíthatók [2: 86], illetve „a technikai eszközök és a szükséges készletek az esetek túlnyomó többségében már vasúti és tengeri szállítással juttathatók hatékonyan el az alkalmazási terület közelébe. A balkáni békefenntartási feladatok során ezen eszközök és készletek Európán belüli szállítására széles körben alkalmazták és a mai napig alkalmazzák a résztvevő nemzetek a vasúti szállítást” [3].

Az egyes közlekedési alágazatok ezért az ország védelmi felkészítésében és különleges jogrend idején betöltött szerepük miatt úgynevezett kritikus infrastruktúrának minősülnek [4]. Védelmük éppen ezért kiemelt feladatnak tekintendő, különösen mivel „a közlekedési rendszer elemei a könnyen támadható célpontok közé tartoznak. A vasúti közlekedés terrortámadások iránti érzékenysége az alágazat műszaki-technikai jellemzőinél fogva a többi szállítási módhoz képest is »magas szintűnek« értékelhető,” [4] ezért elengedhetetlen annak feltárása, hogy az egyes hálózati elemek sérülése milyen hatással lenne a teljes hálózatra.

A szállítások bizonyos vasúthálózati elemek sérülése esetén általában kerülőúton megoldhatók, azonban több állomásköz egyidejű rombolása esetén a hálózat szerkezetéből fakadóan bizonyos állomások már elérhetetlenek lesznek a többi számára. Két-három, önmagában helyettesíthető hálózati elem koordinált rombolása nagyobb kárt tud okozni a hálózatban, mint egyetlen zsákvonallal rombolása, ami által egy hálózati elem kiiktatásával válnak állomások elérhetetlenné. Előbbi esetben ugyanis egész régiók vasúti kapcsolata szűnhet meg a hálózat többi részével, egy zsákvonallal pedig csak ritkán kiemelt jelentőségű (a legfontosabbak talán a Miskolcnál csatlakozó 92-es és 94-es vonalak, a 89-es tiszaujvárosi vonal és a debreceni repülőtér iparvágánya [5]).

Az értő szemű olvasó az előző zárójelű megjegyzésre azonnal felkaphatja a fejét: a 92-es és 94-es vonalak nem zsákvonalak, hiszen Bánrévénél és Tornanádaskánál csatlakoznak a Felvidék vasúthálózatához. Azonban az ország védelmi felkészítésekor nem hagyatkozhatunk másik államra, jelen esetben Szlovákiára, hogy adott esetben (például különleges jogrend idején) az MH szerelvényét akár csak korridorvonatként közlekedtessük [6]. Ezért a nemzetközi határállomásokat végig fejállomásként kezeltem, hogy reális képet kapjunk az ország azon régióiról, amelyek csak egyetlen vonalon érhetőek el kizárólag a MÁV pályahálózatát igénybe véve.

Rombolás alatt azonban nem feltétlenül csak a pálya megrongálását kell érteni. Villamosított vonalak esetén elegendő az áramellátás vagy akár csak a felsővezeték-hálózat rongálása egy fővonal időleges megbénításához [7]. A zavar helyének pontos meghatározása és a helyreállítás idejére rendelkezésre kell állnia vagy elégséges áteresztőkapacitást biztosító kerülőútnak, vagy megfelelő dízel vontatóállomálynak. A kerülés által okozott menetvonalhossz-, illetve menetidő-növekedés szintén erősen befolyásolja a terelés költségét [8]. A vontatóállományról „köztudott, hogy a MÁV járműparkja jelenleg csak a legszükségesebb mértékben felel meg a katonai követelményeknek,” [9] emellett „a jövőben valószínűleg várható, hogy folyamatosan csökkenni fog a dízelvontatójárművek száma, hiszen a vasúttársaságoknak nem lesz érdeke csak olyan számban rendszerben tartani, amilyen arányban a hálózat ezt igényli. Kérdés, hogy milyen eszközökkel lehet majd a vállalkozásokat érdekeltté tenni abban, hogy a kritikus helyzetek kezeléséhez szükséges, a normál működéshez nem indokolt kapacitásokat, vontatójárműveket rendszerben tartsanak” [7]. Az elégséges kerülőirányok biztosításáról azonban kijelenthető, hogy a rombolt hálózati elemek „részleges vagy teljes helyreállításáig elterelésekkel nem oldható meg a forgalom folyamatos fenntartása más, kerülő közlekedési útvonalakon” [10]. Ennek fő oka, hogy a lehetséges kerülőútvonalak áteresztőképessége sok esetben kisebb, mint a helyettesítendő útvonalon fekvő vonalszakaszoké [11], illetve hogy a kerülőutak sok esetben nem villamosítottak [12].

Célom tehát az ország azon régióinak, megyéinek azonosítása, amelyek egy bizonyos stratégiájú koordinált támadás esetén az elsők között válnak vasúton elérhetetlenné országon belülről. Ennek kiszámításához egy, a magyarországi vasúthálózatot gráfelméleti alapon leíró modellt fogok használni.

A magyarországi vasúthálózat gráfmodellje

A magyarországi vasúthálózat leírására egy élsúlyozott irányított gráfot használtam [13], [14]. A gráf csúcsai reprezentálták az állomásokat, az élek a köztük levő vasútvonalszakaszokat. Az állomásoknál azonban az egyes vonalak középállomásait nem vettem figyelembe [15], csak az elágazó- és csatlakozóállomásokat. Az éleket a számolásokhoz két különböző értékkel súlyoztam: az egyik súly az egyes vonalszakaszok hossza, a másik a hosszértékekből és a rajtuk érvényes megengedett sebességből számolt menetidők voltak [16]. 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 vettem 15 perc menetidő-növekedést [17], [18].

A számolásokat az *R* programozási nyelv és környezetben [19] végeztem, a Csárdi Gábor és Nepusz Tamás által kifejlesztett *igraph* csomag segítségével [20]. Mivel mind a távolság-, mind a menetidőértékek pozitív valós számok és a gráf is viszonylag kis méretű, így két állomás közötti legrövidebb út meghatározására az *igraph* csomag *distances()* függvényében implementált Dijkstra-algoritmust [21] használtam, amely pozitív súlyú gráfokra egyben a függvény alapbeállítása is.

Támadási stratégiák

A tapasztalatok azt mutatják, hogy mind a nyílt vonalak, mind az állomások lehetnek célpontjai terrortámadásoknak [22], [23]. Ezért megvizsgáltam mind az állomások, mind az állomásközök egymás után történő kizárásának hatását a hálózat teljesítőképességére. Az egyes állomásközök rombolását a megfelelő gráfbeli élek törlésével, az állomások rombolását az állomást reprezentáló csúcshoz kapcsolódó gráfbeli élek törlésével modelleztem. „Kevert” típusú rombolást, azaz állomások és állomásközök egyidejű rombolását nem vizsgáltam. Jelöljük a rombolt hálózati elemek számát n -nel. Mind állomásokra, mind állomásközökre minden támadási stratégia esetén egyesével, azaz $n = 1$ -től az adott típusú hálózati elemek maximális számáig növeltem a hálózathoz törölt elemek számát.

Hatékonyságalapú támadás

Összefüggő gráfok jellemzésére gyakran használt mérőszám az úgynevezett közelség (*closeness centrality*, CC) [24], [25]. Ez az összes csúcspár közti (térben, illetve időben) legrövidebb utak hosszai összegének a reciproka:

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

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

ahol ℓ_{ab} az a és b állomások közti távolságban legrövidebb út hossza, t_{ab} pedig az a és b állomások közti időben legrövidebb út menetideje.

Ez a mennyiség azonban egyszerűen élısszefüggő gráfok esetében (mint amilyen a magyarországi vasúthálózat is) egy olyan állomásköz rombolásával, amely zsákvonalzhoz tartozik, vagy olyan állomással, amely egy zsákvonalt (hálózat) és a törzshálózat csatlakozási pontja, végtelenné válik, mivel legalább egy állomás elérhetetlen lesz a többi állomás számára. Ebből az következik, hogy a közelség nevezőjében az összeg végtelen és így a közelség értéke nulla lesz. De ezek az állomások és vonalszakaszok nem végtelenül fontosak az egész hálózat szempontjából, éppen ezért célszerűbb nem a távolságok összegének reciprokát, hanem a távolságok reciprokainak összegét használni a hálózat jellemzésére. Ezt a mennyiséget hatékonyságnak nevezzük, és a következőképpen definiáljuk menetvonalhosszakra és menetidőkre [26], [27]:

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

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

A hatékonyság értéke az egyes hálózati elemek kizárásával csökken, de nullává csak akkor válik, ha minden $\langle a, b \rangle$ állomáspár elérhetetlenné válik egymás számára.

Az első támadási stratégiánál minden lépésben azt az állomást, illetve állomásközt reprezentáló éleket töröltem a gráfból, amely a legnagyobb teljes hatékonyság-csökkenést okozza a hálózatban. Ennek meghatározásához minden lépésben az összes, még meglévő állomást, illetve állomásközt egyesével töröltem és kiszámítottam az így lecsökkent teljes hatékonyságot.

Kapcsolatköztiség-alapú támadás

Egy állomás vagy egy állomásköz fontosságát jellemezhetjük a rajta keresztülhaladó legrövidebb utak darabszámával is. Ezt a mennyiséget kapcsolatköztiségnek (*betweenness centrality*) [28] 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.

Ennél a támadási stratégiánál minden lépésben a legnagyobb kapcsolatköztiségű állomást, illetve állomásközt töröltem a hálózatból. Ez egyszerűen meghatározható az összes legrövidebb út pontos vonalának ismeretében, amelyet a *distances()* függvény kiszámít és a *\$vpath* paranccsal kilistázhatóak a legrövidebb út által érintett állomások, az *\$epath* paranccsal pedig az érintett állomásközök. Ezek segítségével az áthaladó legrövidebb utak darabszámát összegezve az egyes hálózati elemekre megkapjuk a kapcsolatköztiség-értékeket.

Véletlen zavar

Megvizsgáltam a véletlen zavar hatását is: hogyan változik a hálózat struktúrája, ha n darab véletlenszerűen kiválasztott állomást, illetve állomásközt törölök a hálózatból. Mivel itt az eredmények az állomások, illetve állomásközök konkrét kiválasztástól függően erősen szórhatnak, ezért minden n értékre százszor lefuttattam a szimulációt és a kapott eredményeket átlagoltam.

Hálózat fragmentálódásának jellemzése

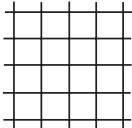
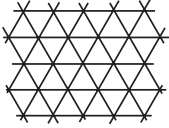
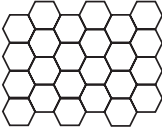
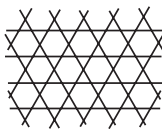
A hálózat széttöredezésének folyamatát két mennyiséggel szokás jellemezni, amelyek végtelen hálózatok perkolációján alapulnak. Az egyik a hálózat úgynevezett óriáskomponensének mérete, a másik pedig az óriáskomponenshez nem tartozó csúcsok összefüggő klasztereinek átlagos mérete.

Az óriáskomponens

Képzeljünk el egy végtelen nagy hálózatot, amely kezdetben legyen összefüggő. Ezután kezdjük el törölni az egyes éleket (vagy csúcsokat) úgy, hogy mindegyiket egy adott f valószínűséggel ($0 \leq f \leq 1$) töröljük. Minden típusú hálózatra létezik egy kritikus f_c valószínűség-érték, amelynél kisebb f értékekre még létezik egy végtelen sok csúcsot tartalmazó komponens, nagyobb f értékekre azonban már nem. Ha éleket vizsgálunk, kötésperkolációról, ha csúcsokat, rácspont-perkolációról² beszélünk [29: 295].

Egy gráf egy komponensének vagy klaszterének nevezzük azoknak a csúcsoknak a halmazát, amelyek mindegyike között létezik véges hosszúságú út, azaz az eredeti gráf egy maximális összefüggő részgráfját [30: 6]. Egy összefüggő gráf komponenseinek száma tehát egy. Óriáskomponensnek (C) nevezzük azt a komponenset, amelyiknek a legnagyobb a mérete, ahol méret alatt az adott komponenshez tartozó csúcsok számát értjük. Ez azt jelenti, hogy végtelen hálózatokban az óriáskomponens mérete ($|C|$) végtelen [31]. Az f_c kritikus valószínűség-érték ennek segítségével is értelmezhető: azt a kritikus arányt jelenti, ahányad részét törölve az éleknek, illetve a csúcsoknak, minden klaszter mérete véges lesz.

Négy egyszerű (végtelen) síkbeli rácra az 1. ábrán láthatóak a kötés- és rácspont-perkolációhoz tartozó f_c értékek.

				
	négyzetrács	háromszöggrács	hatszöggrács	kagome-rács
kötésperkoláció:	0,5	0,653	0,35	0,476
rácspont-perkoláció:	0,407	0,5	0,303	0,347

1. ábra

Néhány egyszerű végtelen rács kötésperkolációjához és rácspont-perkolációjához tartozó f_c értékek [32]

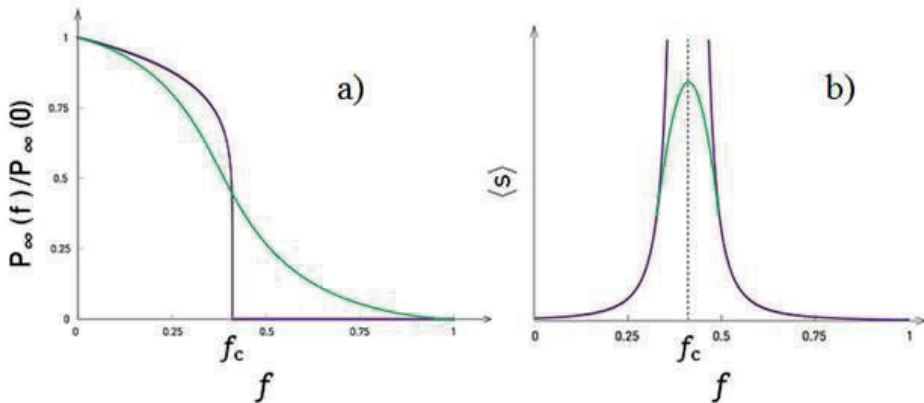
² Az elnevezés a kávéfőző angol nevéből (*percolator*) ered: a kutyogóban a víz el tud jutni a kávéfőző aljától a kávéig, azaz a kávéörlemény között van egy perkoláló útja. Ha azonban túl finom szemcséjű kávéval túlságosan megtömjük a kutyogót, akkor a víznek elzárjuk az útját, nem tud keresztüljutni a kávéra és a kávéfőző fellobban.

Végtelen hálózatok esetében annak a valószínűsége, hogy egy véletlenszerűen kiválasztott csúcs az óriáskomponenshez tartozik, a 2/a. ábrán látható módon változik f növelésével és az adott gráfra jellemző f_c -nél válik nullává. Végés hálózatok esetében ez megegyezik az óriáskomponens méretének az összes komponens méretének összegéhez képesti arányával.

Kezdetben a hálózat összefüggő, egyetlen komponensből áll. Ennek a mérete megegyezik a hálózatban lévő állomásokéval (ami esetünkben 289). Az állomásközöket egyesével törölve, amikor legalább egy állomás elérhetetlenné válik az óriáskomponens többi állomása számára, az óriáskomponens mérete lecsökken. Minden ilyen csökkenés, ami egy kisebb-nagyobb régió elérhetetlenné válását jelenti, a hálózat degradálódásának egy meghatározó lépése. Ez általánosságban jelentősebb, mint egy, bármilyen fontos állomásköz rombolása, hiszen ezzel az adott régió az adott hálózatban teljesen elérhetetlenné válik, még kerülőúton sem lesz megközelíthető.

Állomások törlésénél más a helyzet, ugyanis minden lépésben legalább eggyel csökken az óriáskomponens mérete: az adott lépésben törölt állomással. Amikor legalább kettővel csökken az óriáskomponens mérete, azaz amikor legalább egy funkcionáló állomás elérhetetlenné válik a többi számára, akkor mondjuk, hogy az óriáskomponens mérete lecsökkent.

Végés hálózatokra is értelmezhető az f_c kritikus valószínűség-érték, ami ebben az esetben a törölt élek, illetve csúcsok arányát jelenti akkor, amikor az óriáskomponens megszűnik létezni, azaz az „óriáskomponens” mérete összemérhető lesz a róla levált komponensekkel. Ellentétben azonban a végtelen hálózatokkal, itt az óriáskomponens mérete folytonos változást mutat (2/a ábra), azaz az f_c értéke pusztán ebből nem határozható meg pontosan.



2. ábra

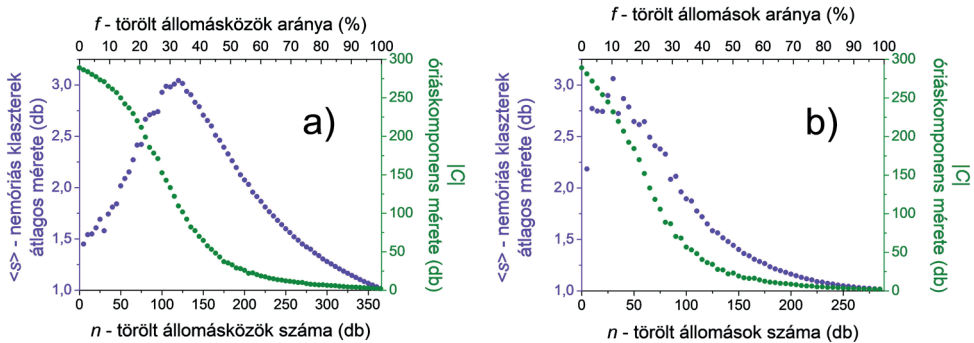
a) Az óriáskomponens méretének és b) az óriáskomponenshez nem tartozó csúcsok klasztereinek átlagos mérete végtelen (lila vonal) és végés hálózatokra (zöld vonal) ([29: 294.] alapján)

Az óriáskomponenshez nem tartozó klaszterek

Az f_c pontos kiszámításához az óriáskomponens fragmentálódásával megjelenő kisebb komponenseket kell vizsgálnunk. Jelöljük ezen óriáskomponenshez nem tartozó klaszterek méretének átlagát (s)-al. Ezen mennyiség végtelen hálózatokban szingularitást mutat f_c -nél [29: 294.], míg véges hálózatok esetében egy szélsőértéket ugyanezen értéknél (2/b. ábra). Az (s)-ot leíró függvény maximumának illesztésével a hálózat rombolását jelentő törölt hálózati elemek kritikus aránya meghatározható.

Az óriáskomponenshez nem tartozó klaszterek méretének változása

A 3. ábrán láthatjuk n darab állomásköz és n darab állomás véletlen rombolásának hatására az óriáskomponens méretének és óriáskomponenshez nem tartozó klaszterek átlagos méretének változását.



3. ábra

A magyarországi vasúthálózat n darab véletlenszerűen rombolt állomásközének (a) vagy állomásának (b) hatására létrejövő, az óriáskomponenshez nem tartozó állomások klasztereinek átlagos mérete (s), (lila), valamint az óriáskomponens méretének ($|C|$), (zöld) változása [a szerző szerkesztése]

Az eredmények azt mutatják, hogy az állomásközök 34%-ának rombolásakor esik szét az óriáskomponens. Ez azonos fokszámeloszlású (azaz azonos fokszámú csúcsokat azonos arányban tartalmazó [30: 28.]), de skálafüggetlen [29: 133–147.] tulajdonságú hálózatokra 53%, úgynevezett Erdős–Rényi véletlen gráfokra 41% [29: 326–333.]. Ez azt jelenti, hogy a magyarországi vasúthálózat még a véletlen hálózatokénál is kedvezőtlenebb tulajdonságokat mutat. Ennek fő oka a hálózat Budapest-centrikus struktúrája, illetve kiterjedt zsákvonalhálózatai [33]. Az állomásközök véletlenszerűen kiválasztott harmadában tehát átlagosan mindig lesznek olyan vonalszakaszok, amelyek a teljes hálózatot teszik működésképtelenné.

A 3/b ábrából azt láthatjuk, hogy állomások esetében már jóval kevesebb hálózati elem véletlen rombolása esetén szétesik az óriáskomponens: elegendő ehhez

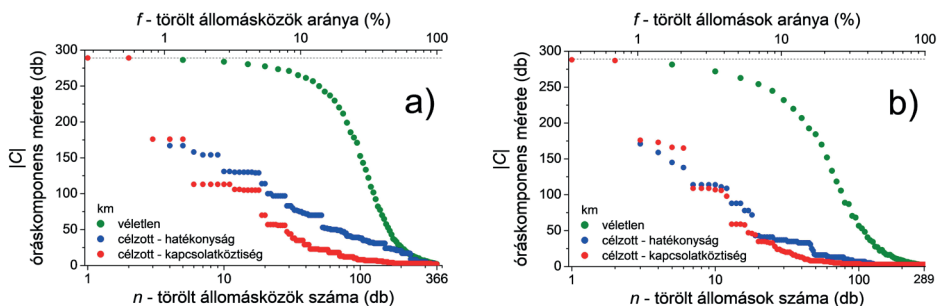
átlagosan az állomások 13%-át rombolni. Ez egyrészt a számításokhoz használt modell következménye: a 2 fokszerű csúcsok, azaz a vasútvonalak középállomásai kitranszformálásával csak a csatlakozó állomások szerepeltek a hálózatban, ezek rombolása pedig legalább két vasútvonalon okoz egyszerre zavart. Azonban mutatja a hálózat rendkívüli sérülékenységet is, hiszen például Miskolc állomás rombolása esetén a 92-es és 94-es vonalak mellett a 80-as fővonal is sérülne. Kiskunhalas rombolása esetén a 150-es fővonal mellett a 154-es és 155-ös vonalak is, és így a bajai Duna-híd is átjárhatatlanná válna. Székesfehérvár, Kecskemét és Debrecen kiesése esetén pedig az öt-hat kapcsolódó vonal is egyszerre válna alkalmatlanná forgalom lebonyolítására.

Az óriáskomponens méretének változása

A két rombolási stratégiának a számításait állomásokra és állomásközökre, illetve minimális menetvonalhosszakra és minimális menetidőkre is elvégezve nyolc támadási forgatókönyvet kapunk. A közös mindben, hogy az első tíz-húsz rombolt hálózati elem szinte kizárólag a TEN-T hálózathoz [34] tartozik.

Minimális menetvonalhosszak

Az óriáskomponens mérete a 4. ábrán bemutatott módon változott állomások, illetve állomásközök különböző stratégiájú támadásának hatására (az ábra véletlen zavart bemutató adatai analógok a 2/a ábrával egy 289-es normálási faktortól eltekintve).



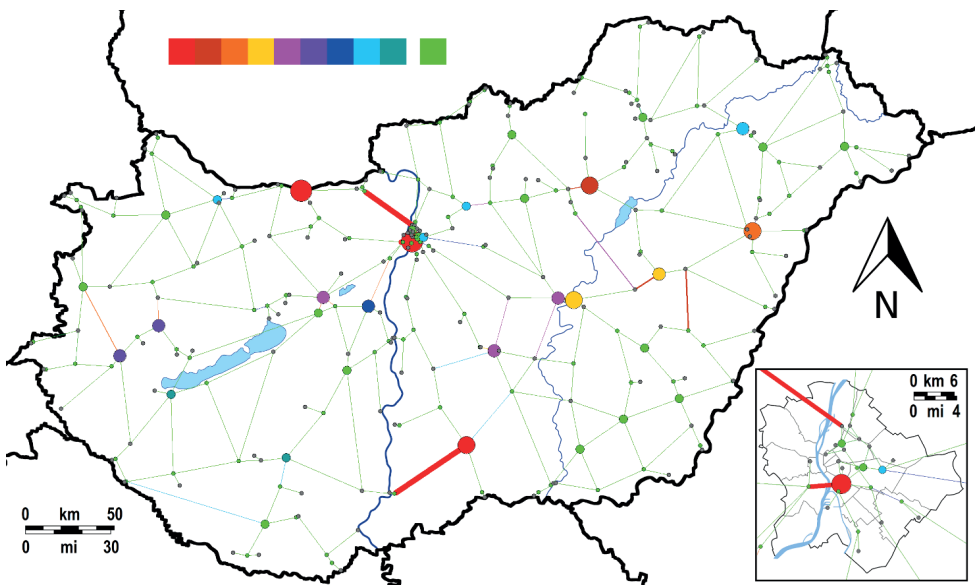
4. ábra

Az óriáskomponens méretének változása n darab állomásköz (a) vagy állomás (b) kizárásának hatására hatékonyság-alapú (kék), kapcsolatköztiség-alapú (piros) támadás és véletlen zavarok (zöld) esetén minimális menetvonalhosszakra [a szerző szerkesztése]

Azt látjuk a 4. ábrából, hogy a célzott támadások hatására az óriáskomponens mérete a törölt állomások és állomásközök számának növelésével exponenciálisan csökken. Az első három rombolt állomásköz mindkét támadási stratégia esetében a három Duna-híd, illetve az ezekhez tartozó vasútvonalak elágazó állomásai, amelyek tehát a hálózat kiemelten védendő elemei [35]. Ferencváros és Kiskunhalas mindkét esetben az első, illetve harmadik, a második helyen azonban eltérés mutatkozik: Angyalföld állomás rombolása a hatékonyságot csökkenti leginkább, míg Almásfüzitő az aktuálisan, a rombolásakor a legnagyobb kapcsolatköztiségű állomás. Utóbbi ugyanis nemcsak a 4-es vonal végpontja, amely a 2-es vonalat az Újpesti vasúti híddal a törzshálózatba köti, hanem az 1-es fővonalnak az állomása is, hiánya ezáltal nagyobb forgalmat érint (az Összekötő vasúti híd forgalmának jelentős részét is).

Kapcsolatköztiség-alapú támadás

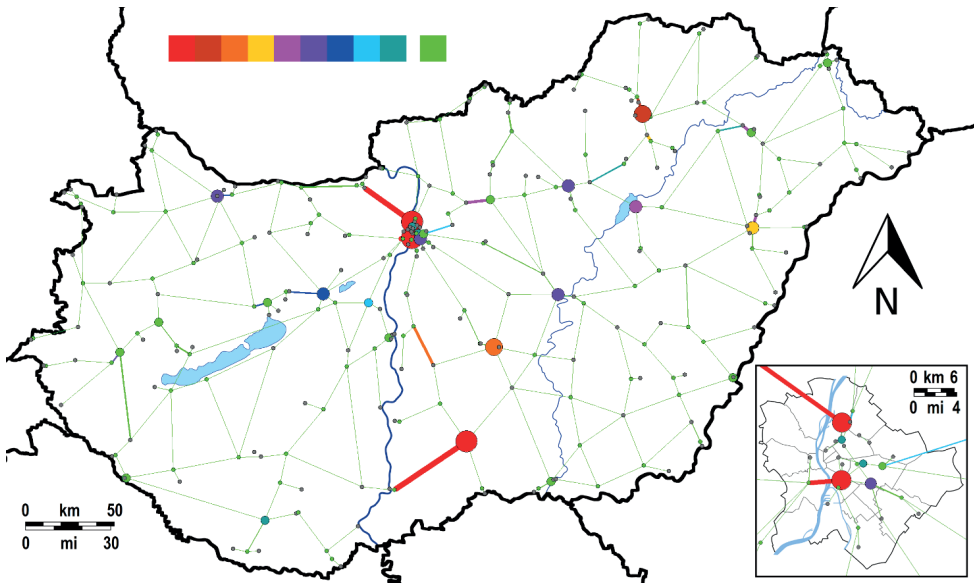
Az 5. ábrán láthatjuk az egyes hálózati elemek relatív kapcsolatköztiségét a kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén. Az állomásközöket reprezentáló vonalak vastagsága, illetve az állomásokat reprezentáló körök mérete arányos kizáraskori kapcsolatköztiség-értékükkel. A kilenc eltérő színnel jelölt állomás-, illetve állomásközcsoport okozza az első kilenc részhálózat óriáskomponensről való leválását.



5. ábra

A magyarországi vasúthálózat hálózati elemeinek rombolási sorrendje kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén minimális menetvonalhosszokra [a szerző szerkesztése]

A Duna-hidak után Füzesabony és Debrecen, Szajol és Karcag állomások rombolása történik meg, amellyel a három északkeleti megye lesz elérhetetlen. Kecskemét,



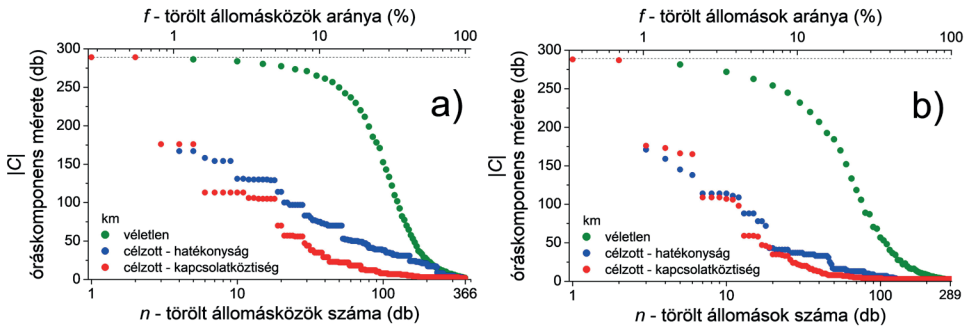
6. ábra

A magyarországi vasúthálózat hálózati elemeinek rombolási sorrendje hatékonyságalapú támadás esetén minimális menetvonalhosszakra [a szerző szerkesztése]

Ennél a támadási stratégiánál tehát kevésbé az egyes országrészek, megyék törzshálózattól való elvágása történik, mint inkább a fővonalak rombolása, aminek következtében a hosszabb mellékvonalakra terelődik a forgalom, jelentősen megnövelve a menetvonalak hosszát. Emellett lényeges a mellékvonalhálózatok leválasztása a hálózatról, amelyből szintén a hatékonyság jelentős csökkenése következik. Szabolcs-Szatmár-Bereg megye jelentősége a záhonyi átrakóközvet elérésében van, amely az ország egyetlen kapcsolata az ukrán széles nyomtávú hálózat felé. A Miskolcnál csatlakozó mellékvonalrendszer többek között a Borsodi Vegyi Kombinát vasúti kapcsolatát teremti meg.

Minimális menetidők

Az óriáskomponens méretének változását állomások és állomásközpontok különböző stratégiájú rombolása esetén a 7. ábrán láthatjuk.



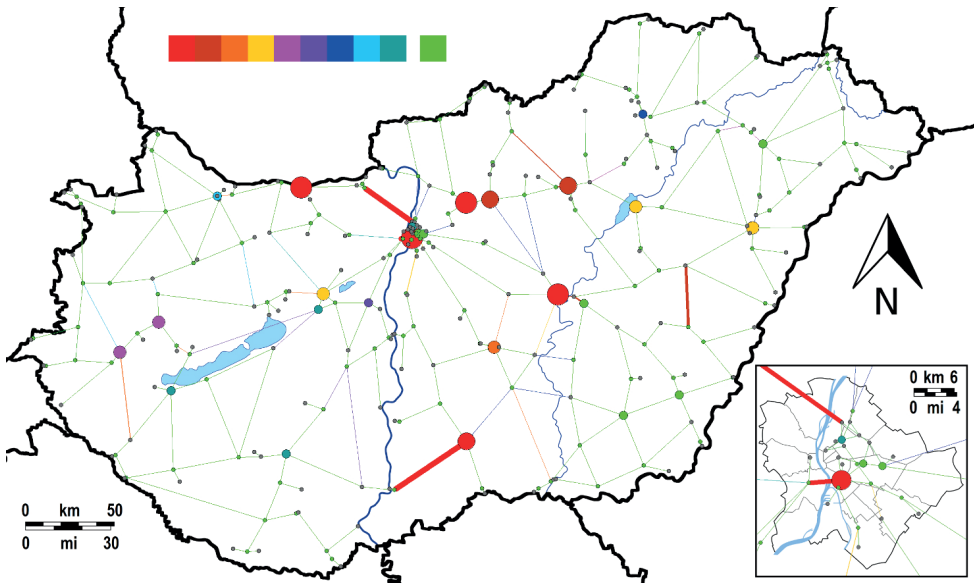
7. ábra

Az óriáskomponens méretének változása n darab állomásköz (a) vagy állomás (b) kizárásának hatására hatékonyságalapú (kék), kapcsolatköztiség-alapú (piros) támadás és véletlen zavarok (zöld) esetén minimális menetidőkre [a szerző szerkesztése]

Az első rombolt állomásköz minimális menetidők esetében is az Összekötő vasúti híd, azonban a hatékonyságalapú támadásnál és az egyes állomások sorrendjében is jelentős eltéréseket tapasztalunk. Látni fogjuk, hogy a menetidőkkel való számolással Ferencváros mint az Összekötő vasúti hírhoz a pesti oldalon csatlakozó állomás, rombolása után a másik két Duna-híd állomásközeinek csatlakozó állomásai helyett más állomások rombolása jobban csökkenti a hálózat teljesítőképességét. A modell tehát „tudja”, hogy az Újpesti vasúti híd és a bajai híd nem reális alternatíva. De tudja ezt az is, aki ártó szándékkal tekint a hálózatra, és az is, akinek ezen hálózati elem zavarát kell kezelnie akár műszaki meghibásodás, akár egy Duna-mederben talált világháborús bomba miatt. Éppen ezért „védelmi szempontból egységes, a terrorizmus elleni védelem és katasztrófavédelem feladataival összehangolt egységes katonai koncepciót kell kialakítani” [23].

Kapcsolatköztiség-alapú támadás

A 8. ábrán láthatjuk az egyes hálózati elemek relatív kapcsolatköztiségét a kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén. Az állomásközöket reprezentáló vonalak vastagsága, illetve az állomásokat reprezentáló körök mérete arányos kizáráskori kapcsolatköztiség-értékükkel. A kilenc eltérő színnel jelölt állomás-, illetve állomásközcsoporthoz az első kilenc részhálózat óriáskomponensről való leválását.



8. ábra

A magyarországi vasúthálózat hálózati elemeinek rombolási sorrendje kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén minimális menetidőkre [a szerző szerkesztése]

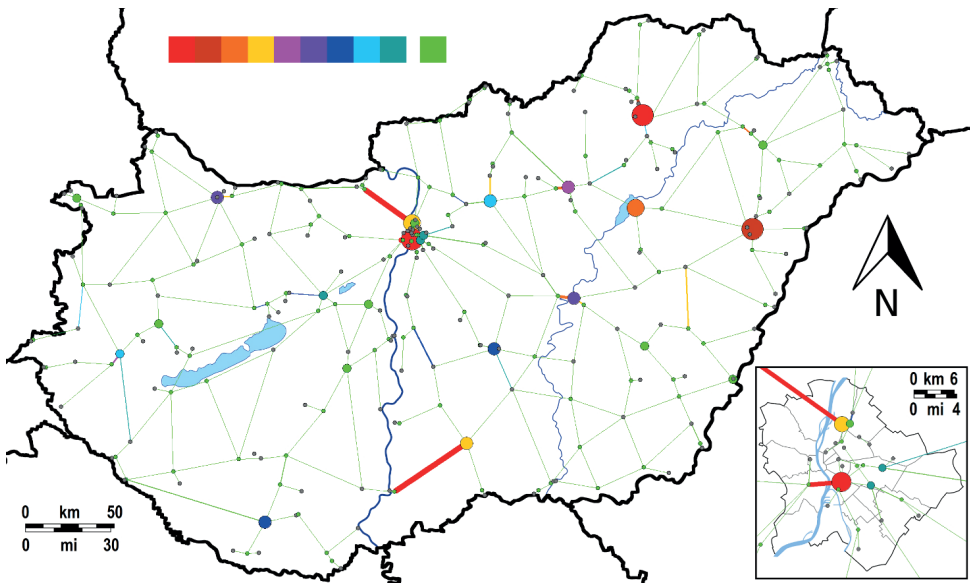
A Duna-hidak állomásközeinek rombolása után a 120-as fővonalon a Szolnok–Szajol (a legforgalmasabb Tisza-híddal) és a Szajol–Tiszatenyő, a 80-as fővonalon pedig a Kál–Kápolna–Nagyút állomásköz a következőnek rombolt vonalszakasz. Ekkor a forgalom jelentős része a 128-as és a (személyforgalmat nem bonyolító) 84-es vonalra terelődik át, amelyek kizárásával Borsod, Szabolcs és Hajdú-Bihar megyék vasúthálózata leszakad a törzshálózatról. Ezután az Észak- és a Dél-Dunántúl szeparációja, majd meglepő módon Borsod megyéé történik meg. Ez utóbbinak a módja különös, ugyanis nem a korábban látott Miskolc-Tiszai pályaudvar és Sajóecseg közti, a 92-es és 94-es szákvonalak bevezető szakaszának rombolása történik, hanem a 80-as fővonal két állomásközéé Miskolctól valamivel távolabb.

Állomások kapcsolatköztiség-alapú rombolása esetén viszonylag későn, öt rombolás után lesz egy régió elérhetetlen, ugyanis a három Duna-híd állomásközeinek végpontjai között megtörténik Szolnok és Aszód rombolása is. Előbbi oka a Tisza legforgalmasabb hídja, amelynek reális „helyettesítése csak új híd építésével lenne biztosítható” [36] (az állomásközök esetéhez hasonlóan), utóbbié pedig a 80a fővonal csatlakozóállomásaként betöltött centrális szerepe. Ezután viszont felgyorsul a feldarabolódás, amiben szerepe van a folyamat elején kiiktatott jelentős állomásoknak. Hatvan és Kál–Kápolna kizárásával a 80-as fővonal Kisterenyén keresztül vezető kerülőútja, majd Kecskeméttel a Tiszántúl és Borsod megye szeparációja következik be. Ez „osztódik tovább” Debrecen és Tiszafüred kizárásával, amikor leválik az északkeleti országrész. A következő lépés a Dunántúl északi és déli részre való hasadása, majd ebből a Szentlőrincnél csatlakozó mellékvonalrendszer leválása.

Ahogy tehát e fejezet *Kapcsolatköztiség-alapú támadás* című alfejezetében bemutatottak alapján is láthattuk, a kapcsolatköztiség-alapú támadások kezelésére elegendő számú, megfelelő áteresztőképességű alternatív útvonal biztosítása lenne a megoldás. Azzal, hogy nem egy „maradék”, kitüntetett (akár mellékvonali) útirány, mint például a Kál–Kápolna–Kisterenye vonalszakasz, lesz az egyetlen lehetséges elméleti eljutás bizonyos régiókba, hanem esetlegesen több mellékvonal egyidejű használatával történik meg a forgalom elvezetése, az „optimálisan” rombolandó állomások, állomásközpontok beazonosítása megnehezül.

Hatékonyágalapú támadás

A 9. ábrán láthatjuk a hálózat hatékonyságértékének változását a hatékonyságalapú támadás esetén. Az állomásközpontokat reprezentáló vonalak vastagsága, illetve az állomásokot reprezentáló körök mérete arányos a hálózat hatékonyságértékével abban a lépésben, amikor az adott hálózati elem kizárása megtörténik. A kilenc eltérő színnel jelölt állomás-, illetve állomásközpont okozza az első kilenc részhálózat óriáskomponensről való leválását.



9. ábra

A magyarországi vasúthálózat hálózati elemeinek rombolási sorrendje hatékonyságalapú támadás esetén minimális menetidőkre [a szerző szerkesztése]

A hatékonyságot lehető legjobban növelő, menetidőkkel számoló rombolási stratégia az óriáskomponens méretét tekintve lassan, de közben a lehető legnagyobb kerülőket okozva halad. Itt a Duna-hidak után a Miskolcnál csatlakozó mellékvonalrendszer a következő rombolt állomásközponttal azonnal leválik a még meglévő hálózatról. Ezután

egy sokáig ható rombolássorozat következik: Ferencvárosnál a 150-es vonal, a szolnoki Tisza-híd, Kál-Kápolnánál a 80-as, Debrecennél a 100-as, végül Görögszállásnál ismét a 80-as vonal állomásköze, amelyekkel tehát korábbi stratégiákhoz hasonlóan Borsod, Szabolcs és Hajdú-Bihar megye kapcsolata szűnik meg az országos hálózattal.

Állomások esetén az első Ferencváros, majd Miskolc-Tiszai pályaudvar, amellyel a már többször említett mellékvonalhálózat vasúti kapcsolata szűnik meg. Debrecen, majd Tiszafüred kizárásával a teljes északkeleti országrész veszíti el összeköttetését és csak ezután következik Angyalföld és Kiskunhalas, a maradék két Duna-híd állomásközéhez tartozó állomások rombolása. Ezután (többek között) Szajol és Kecskemét kizárásával a Délkelet-Alföld válik le a hálózatról, Szentlőrincsel a baranyai zsákvonalak, majd a Dunántúl esik szét északi és déli részre.

A hatékonyságalapú támadásra tehát úgy lehet felkészíteni a hálózatot (a *Hatékonyságalapú támadás* című alfejezetben bemutatottak figyelembevételével is), ha a modellszámítások eredményeként adódott alternatív útirányokon az engedélyezett sebességet megemeljük. A szükséges kapacitás itt is elérhető több egyvágányú vonal egyidejű fejlesztésével. Ezáltal egy-egy rombolt fővonal forgalma nem egyben csatornázódik át, mint például a Püspökladány–Szeghalom vonalszakasz esetében is láttuk, hanem egyenletesebben oszlik el a hálózatban.

Következtetések

A magyarországi vasúthálózat rombolásának gráfelméleti alapú modellezésével azt találtam, hogy míg a hatékonyságalapú támadással inkább hosszú kerülok válnak szükségessé, addig a kapcsolatköztiség-alapú támadásnál a hálózat gyors szétdarabolódása az elsődleges veszélyforrás. Ez felhívja a figyelmet arra, hogy a védendő hálózati elemek azonosítása, illetve rombolásának sorrendje függ attól, hogy milyen stratégiát feltételezünk, ami alapján a támadások végrehajtása bekövetkezhet. Azonban minden támadási stratégia esetében kiemelten védendőnek bizonyultak a nagyfolyami hidak, illetve a nagy kiterjedésű zsákvonalak, különösen a nemzetgazdasági jelentőségűek.

A hatékonyságalapú támadásra úgy lehet felkészíteni a hálózatot, ha a megfelelő alternatív útirányok engedélyezett sebességeit elégséges mértékűre emeljük. A kapcsolatköztiség-alapú támadásra való védelmi felkészítés kiemelt feladata lenne az elegendő számú, megfelelő áteresztőképességű alternatív útvonal biztosítása. Mindkettő megvalósítható több egyvágányú vonal szimultán fejlesztésével, ami által azok együttesen képesek pótolni a kieső fővonalú útirányokat.

Hivatkozások

- [1] B. Tóth, „A magyarországi vasúthálózat zavarainak gráfelméleti alapú vizsgálata,” In *Közlekedéstudományi Konferencia*, B. Horváth, G. Horváth és B. Gaál szerk., Győr: Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, 2018, pp. 505–519.
- [2] G. Szászi, *A vasúti hálózati infrastruktúrával szemben támasztott újszerű védelmi követelmények kutatása, a továbbfejlesztés feltételrendszerének vizsgálata*. Dok-

- tori (PhD) értekezés, Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Katonai Műszaki Doktori Iskola, 2013. DOI: <https://doi.org/10.17625/NKE.2014.028>
- [3] G. Szászi, „Katonai vasúti szállítások a Magyar Honvédség missziós feladatainak rendszerében” *Szolnoki Tudományos Közlemények*, 14. évf. pp. 101–118, 2010.
- [4] A. Horváth, „A kritikus infrastruktúra védelem komplex értelmezésének szükségessége” In *Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből*, A. Horváth szerk., Budapest: Magyar Hadtudományi Társaság, 2013, pp. 18–37. [Online]. Elérhető: mhht.eu/hadtudomany/KIV_tanulmánykotet.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [5] G. Szászi, „A védelmi szempontból meghatározó repülőterek vasúti kapcsolatainak helyzete Magyarországon,” *Repüléstudományi Közlemények, (1997-től)*, 21. évf. Klnsz., pp. 1–22, 2009. [Online]. Elérhető: www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2009_cikkek/Szaszi_Gabor.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [6] G. Szászi: „Nagyfolyami vasúti hidak, mint közlekedési létfontosságú rendszerrelemek,” In *Fejezetek a létfontosságú közlekedési rendszerrelemek védelmének aktuális kérdéseiről*, A. Horváth, P. Bányász és Á. Orbók szerk., Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014, pp. 27–46.
- [7] G. Szászi, „A vasúti közlekedési alágazat, mint kritikus infrastruktúra,” In *Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből*, A. Horváth szerk., Budapest, Magyar Hadtudományi Társaság, 2013, pp. 167–190. [Online]. Elérhető: mhht.eu/hadtudomany/KIV_tanulmánykotet.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [8] B. Tóth, “Redundancy Analysis of the Railway Network of Hungary,” In *Solutions for Sustainable Development: Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Solutions for Sustainable Development (ICESSD 2019)*, K. Szita Tóthné, K. Jármái and K. Voith eds. October 3-4, 2019, Miskolc, CRC Press, 2019.
- [9] G. Szászi, „Magyarország közlekedési infrastruktúrájának fejlesztése napjainkban: Közút vagy vasút?” *Katonai Logisztika*, 15. évf. 2. sz., pp. 32–59, 2007. [Online]. Elérhető: http://epa.oszk.hu/02700/02735/00062/pdf/EPA02735_katonai_logisztika_2007_2_032-059.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [10] A. Horváth, „A közúti, vasúti és vízi közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői” In *Válaszok a terrorizmusra II.*, P. Tálás ed., Budapest: Mágustúdió, 2006, pp. 321–336.
- [11] B. Tóth, „Forgalmatlan, de nélkülözhetetlen – A magyarországi vasúthálózat redundanciavizsgálata,” In *Közlekedéstudományi Konferencia*, B. Horváth, G. Horváth és B. Gaál szerk., Győr: Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, pp. 37/1–9, 2019.
- [12] B. Tóth, „A magyarországi vasúthálózat redundanciáját biztosító vonalszakaszok,” *Hadmérnök*, 14. évf. 2. sz., pp. 74–86, 2019. [Online]. Elérhető: hadmernok.hu/192_06_toth.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [13] B. Tóth, „Állomások és állomásközpontok zavarának gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton,” *Hadmérnök*, 12. évf. 4. sz., pp. 52–66, 2017. [Online]. Elérhető: http://hadmernok.hu/174_06_toth.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [14] B. Tóth, „Menetidő- és menetvonalhossz növekedés gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton állomások és állomásközpontok zavarának esetén,” *Had-*

- mérnök, 13. évf. 1. sz., pp. 118–132, 2018. [Online]. Elérhető: http://hadmernok.hu/181_09_toth.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [15] E. Jenelius, T. Petersen and L-G. Mattsson, "Importance and exposure in road network vulnerability analysis," *Transportation Research Part A*, vol. 40, no. 7, pp. 537–560, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.11.003>
- [16] VPE Kft., „Vasútvonalak,” VPE Kft., 2019. [Online]. Elérhető: www.vpe.hu/takt/vonal_lista.php (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [17] I. Szily és L. Szabó, *Vasúti üzemtan II.*, Győr: Széchenyi István Egyetem – Universitas-Győr Kht., 2006.
- [18] Z. Ercsey, M. Kisteleki és T. Vincze, „Lassújelek hatásai a vasúti közlekedés költségeire 2. rész.,” *Vasútgépészet*, 3. sz., pp. 16–19, 2012.
- [19] R Core Team, R: "A language and environment for statistical computing." *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. [Online]. Elérhető: www.R-project.org/ (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [20] G. Csardi and T. Nepusz, "The igraph software package for complex network research," *InterJournal, Complex Systems*, 1695., 2006. [Online]. Elérhető: <http://igraph.org> (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [21] E. W. Dijkstra, "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, no. 1. pp. 269–271, 1959. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- [22] A. Horváth, „A vasúti közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői a városokban,” *Hadmérnök*, 4. évf. 3. sz., pp. 180–189, 2009. [Online]. Elérhető: www.hadmernok.hu/2009_3_horvatha.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [23] A. Horváth, „Közlekedési hálózat és az ország védelmi képesség kapcsolata,” [Online]. Elérhető: http://old.biztonsagpolitika.hu/documents/1277414270_horvath_attila_kozlekedesi_halozat_es_az_oroszag_vedelem_kepessseg_kapcsolata_-_biztonsagpolitika.hu.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [24] A. Bavelas, "Communication Patterns in Task-Oriented Groups," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 22, no. 6, pp. 725–730, 1950. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.1906679>
- [25] G. Sabidussi, "The Centrality Index of a Graph," *Psychometrika*, vol. 31, no. 4, pp. 581–603, 1966. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02289527>
- [26] V. Latora and M. Marchiori, "Efficient Behavior of Small-World Networks," *Physical Review Letters*, vol. 87, no 19. 198701/1–4, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.198701>
- [27] P. Crucitti, V. Latora, M. Marchiori and A. Rapisarda, "Error and Attack Tolerance of Complex Networks," *Physica A*, vol. 340, no. 1–3, pp. 388–394, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.04.031>
- [28] L. Freeman, "A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness," *Sociometry*, vol. 40, no. 1, pp. 35–41, 1977. DOI: <https://doi.org/10.2307/3033543>
- [29] A-L. Barabási, *A hálózatok tudománya*. Budapest: Libri, 2017.
- [30] P. Hajnal, *Gráfelmélet*. Szeged: Polygon, 2017.
- [31] R. Albert, A-L. Barabási, "Statistical mechanics of complex networks," *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, no. 1, pp. 47–97, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.47>

- [32] Wikipedia the Free Encyclopedia, "Percolation threshold," [Online]. Elérhető: https://en.wikipedia.org/wiki/Percolation_threshold (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [33] B. Tóth és A. Horváth, „A magyarországi vasúthálózat támadásokkal szembeni ellenállósága,” *Hadtudomány*, 29. évf. e.sz., 2019. DOI: <https://doi.org/10.17047/HADTUD.2019.29.E.93>
- [34] G. Szászi, „Transz Európai Közlekedési Hálózat (TEN-T) tervezett fejlesztési iránya, várható hatása Magyarország vasúthálózatának fejlesztésére,” *Szolnoki Tudományos Közlemények*, 16. évf. pp. 402–425, 2012.
- [35] G. Szászi, "Long-span railway bridges in the transport system of Hungary," *Hadmérnök*, 8. évf. 2. sz., pp. 98–107, 2013. [Online]. Elérhető: hadmernok.hu/132_09_szaszig.pdf (Letöltve: 2019. 09. 15.)
- [36] G. Szászi, „Jász-Nagykun-Szolnok megye vasúthálózatának védelmi szempontú elemzése,” *Szolnoki Tudományos Közlemények*, 13. évf. pp. 101–125, 2009.