

A magyarországi vasúthálózat „gyenge láncszemei”

Dr. Tóth Bence

Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Természettudományi Tanszék
telefon: +36 1 4329000 / 29260
e-mail: toth.bence@uni-nke.hu

Kivonat: A magyarországi vasúthálózat a világon a negyedik legsűrűbb. Ennek ellenére mind a teher-, mind a személyforgalom legnagyobb hányada relatíve kevés számú vasúti fővonalon bonyolódik. Azon állomások tehát, melyek több fővonalnak is részei, kiemelt szerepet játszanak a hálózatban. Az azonban nem triviális, hogy melyek azok a „másodvonalbeli” hálózati elemek, melyek nélkül egyáltalán nem is képzelhető el forgalom. Ennek meghatározásához jelen kutatásban a magyarországi vasúthálózat viselkedését vizsgálom véletlen zavar és célzott támadás esetén. A kutatás egyik megválaszolandó kérdése, hogy a magyarországi vasúthálózat ún. skálafüggetlen tulajdonságú-e, illetve a hálózati elemek mekkora részének kiesése esetén csökken jelentős mértékben a hálózat funkcionalitása. A kutatás másik célja a kiemelten védendő hálózati elemek azonosítása volt, azon állomások és állomásközök beazonosítása, melyek szimultán rombolása a leggyorsabban bénítaná meg a rendszert. Ennek meghatározásához több támadási stratégiát is vizsgálok. Az eredmények azt mutatják, hogy a hálózat már 6-8 megfelelően megválasztott állomás vagy állomásköz kiesése esetén egymás számára elérhetetlen „szigetekre” esik szét; a konkrét hálózati elemek azonban jelentősen különböznek a vizsgált stratégiától függően.

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

Bevezetés

A jó hálózat kevésbé érzékeny a véletlen zavarokra. Ha egy adatforgalmi kábel, egy nagyfeszültségű távvezeték vagy egy utca valamilyen ok miatt használhatatlan lesz, az az ideális, ha van alternatív út, melyen az adatok, az áram és az autók, kitérővel ugyan, de el tudnak jutni a céljukhoz.

A jelen cikkben bemutatott kutatás célja a magyarországi vasúthálózat, mint kritikus infrastruktúra [1] sérülékenységének vizsgálata véletlen zavar és célzott támadás esetén. A hálózat szerkezetéből adódóan már egy állomás vagy állomásköz rombolása esetén is bizonyos állomások elérhetetlenek lesznek a többi számára [2], több hálózati elem kiesése pedig egész országrészek vasúti kapcsolatát vághatja el [3]. Azonban egy rövid zsákvonali hálózatból való kiesése sokkal kisebb probléma, mint ha az ország egy egész régiója válna elérhetetlenné, ezért fontos az adott sérülés, illetve rombolás hatását jellemző mérőszám helyes megválasztása.

Céлом tehát nem a legveszélyeztetettebb hálózati elemek, hanem ezek (akár csoportos) sérülése esetén a veszélyeztetett régiók azonosítása, melyek kapcsolata a törzshálózattal adott támadási stratégia esetén a leghamarabb szűnik meg, melyek ismerete kiemelten fontos az ország védelmi felkészítésében [4].

1. A modell

A magyarországi vasúthálózatot egy élsúlyozott irányított gráffal modelleztem. Mivel ezt a modellt korábbi cikkeimben [5][6] már részletesen bemutattam, ezért itt csak a jelen kutatás megértéséhez szükséges részletességig tárgyalom azt. A számítások és az eredmények vizualizálása az R programozási nyelv és környezetben [7] történt a Csárdi Gábor és Nepusz Tamás által fejlesztett *igraph* csomag [8] segítségével.

1.1 A magyarországi vasúthálózat gráfmodellje

A magyarországi vasúthálózatot leíró gráf csúcsai az állomásokat reprezentálták, az élek pedig a köztük levő vasútvonalakat, melyeket két különböző értékkel súlyoztam. Az egyik súly a vonalszakasz hossza, a másik a hosszértékekből és a rajtuk érvényes megengedett sebességből számított menetidők voltak [9]. Emiatt a modellbeli menetidők egy alsó korlátot jelentenek, a különböző sebességkorlátozások miatt ezeknél nem csak a valós menetidők, hanem még a tiszta menetidők is hosszabbak. Minden állomási irányváltásnál figyelembe vettem további 15 perc menetidőnövekedést.

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 [10] használtam, mely pozitív súlyú gráfokra egyben a függvény alapbeállítása is.

1.2 Hálózatok teljesítőképességének mérőszámai

1.2.1 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 [11], [12]:

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

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

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

Ez a mérőszám azonban egyszeresen összefüggő és egyszeresen élösszefüggő gráfok esetében (mint amilyen a magyarországi vasúthálózat is) egy olyan csúcs vagy él törlésével (azaz olyan állomás vagy állomásköz hálózatból való kiesésével) mely zsákvonalhoz tartozik, nullává válik. Ekkor ugyanis legalább egy állomás elérhetetlen lesz a többi állomás számára, azaz távolsága tőlük és az oda való eljutási idők is végtelenné válnak, ezáltal az össztávolság és az összmenetidő is végtelen lesz, reciprokuk, a közelség pedig nulla.

Ezek az állomások és állomásközök pedig nem is végtelenül fontosak az egész hálózat szempontjából: amikor 2015-ben megcsúszott a Déli alagútjának támfala, a forgalom Kelenföld állomásról és kisebb részben a Keleti pályaudvarról továbbra is fenntartható volt. Éppen ezért célszerűbb nem az összegek reciprokát, hanem a reciprokok összegét használni a hálózat jellemzésére. Ezt a mennyiséget hatékonyságnak nevezzük [13], [14]:

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

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

A hatékonyság értéke az egyes állomások és állomásközök kizárásával csökken, de nullává csak akkor válik, ha minden $\langle a,b \rangle$ állomáspár elérhetetlen lesz egymás számára.

1.2.2 Kapcsolatköztiség

Egy állomás vagy állomásköz fontosságát jellemezhetjük a rajta keresztülhaladó legrövidebb utak darabszámával is. Ezt a mennyiséget kapcsolatköztiségnek (betweenness centrality) nevezzük és C_B -vel jelöljük. [15] 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 állomások vagy állomásközök kizárásával monoton csökken, ahogy az állomáspárok közti legrövidebb utak hossza nő (de legalábbis nem csökken), addig az állomások vagy 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.

1.3 Támadási stratégiák

A magyarországi vasúthálózat viselkedését kétféle támadási stratégia esetén vizsgáltam. Mindig vagy csak állomásokat vagy csak állomásközöket töröltem a hálózatból, a kettőt vegyesen nem. A nemzetközi tapasztalatok azt mutatják, hogy nem csak állomásokon, hanem a nyílt pályán sem elhanyagolható az esetleges rombolások valószínűsége [16]. Éppen ezért szükséges az összes lehetséges kockázati helyszín azonosítása és ennek megfelelő védelmének biztosítása [17][18]

Az első támadási stratégiánál minden lépésben azt az állomást vagy állomásközt töröltem a hálózatból, amely a legnagyobb teljes hatékonyságcsökkenést okozza a hálózatban.

A második támadási stratégiánál minden lépésben a legnagyobb kapcsolatköztiségű állomást, illetve állomásközt töröltem a hálózathoz, mely az *igraph* csomag *distances()* függvényének *\$sepath* értékének felhasználásával egyszerűen meghatározható.

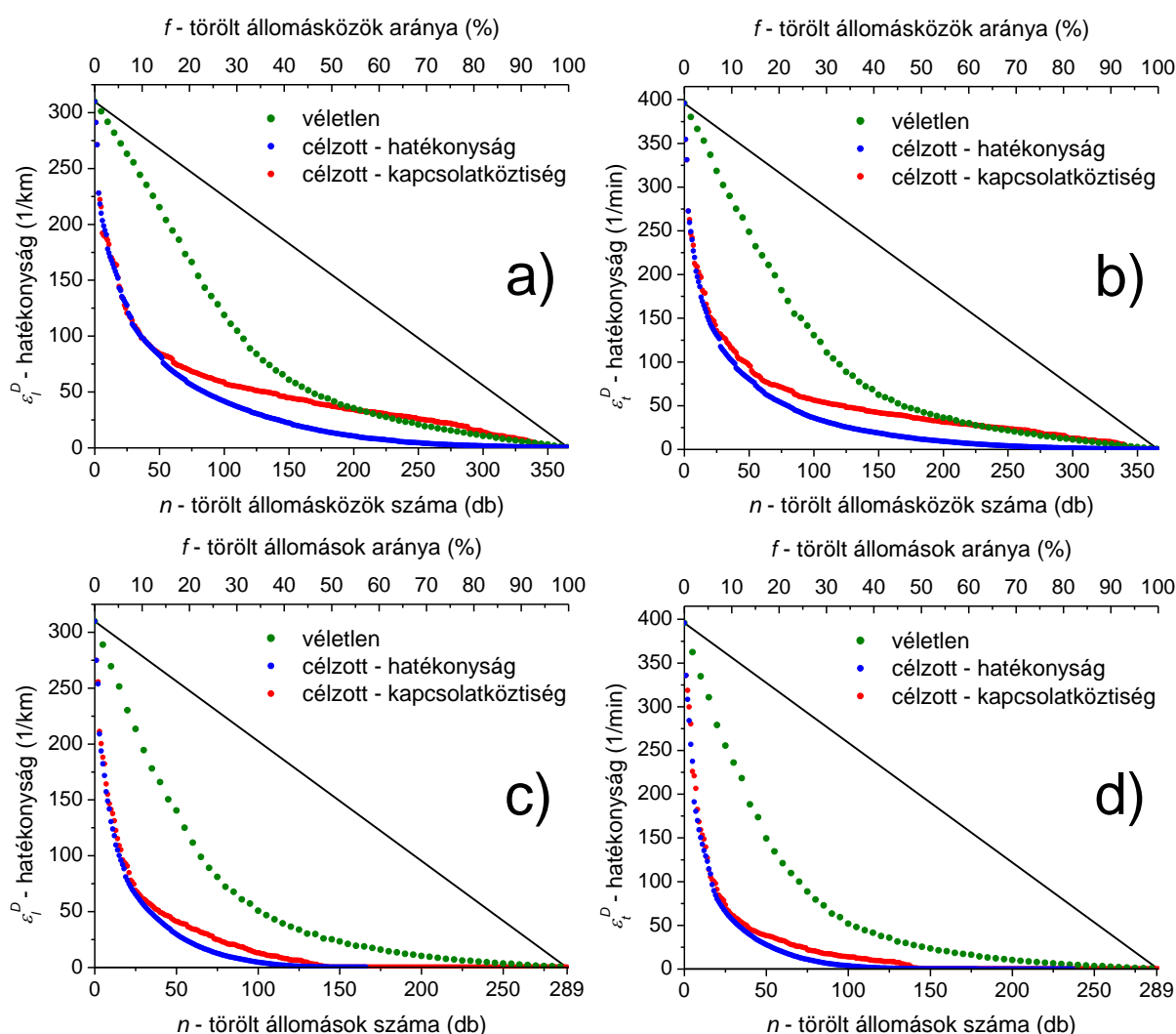
Megvizsgáltam továbbá a véletlen zavar hatását is, azaz hogy mekkora hatékonyságcsökkenést okoz, ha n darab véletlenszerűen kiválasztott állomást, illetve állomásközt törölök a hálózathoz. Mivel itt az eredmények az állomásközök konkrét kiválasztástól függően erősen szórhatnak, ezért minden n értékre százszor lefuttattam a szimulációt és a kapott eredményeket átlagoltam.

2. Eredmények

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

2.1 A hatékonyság változása

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



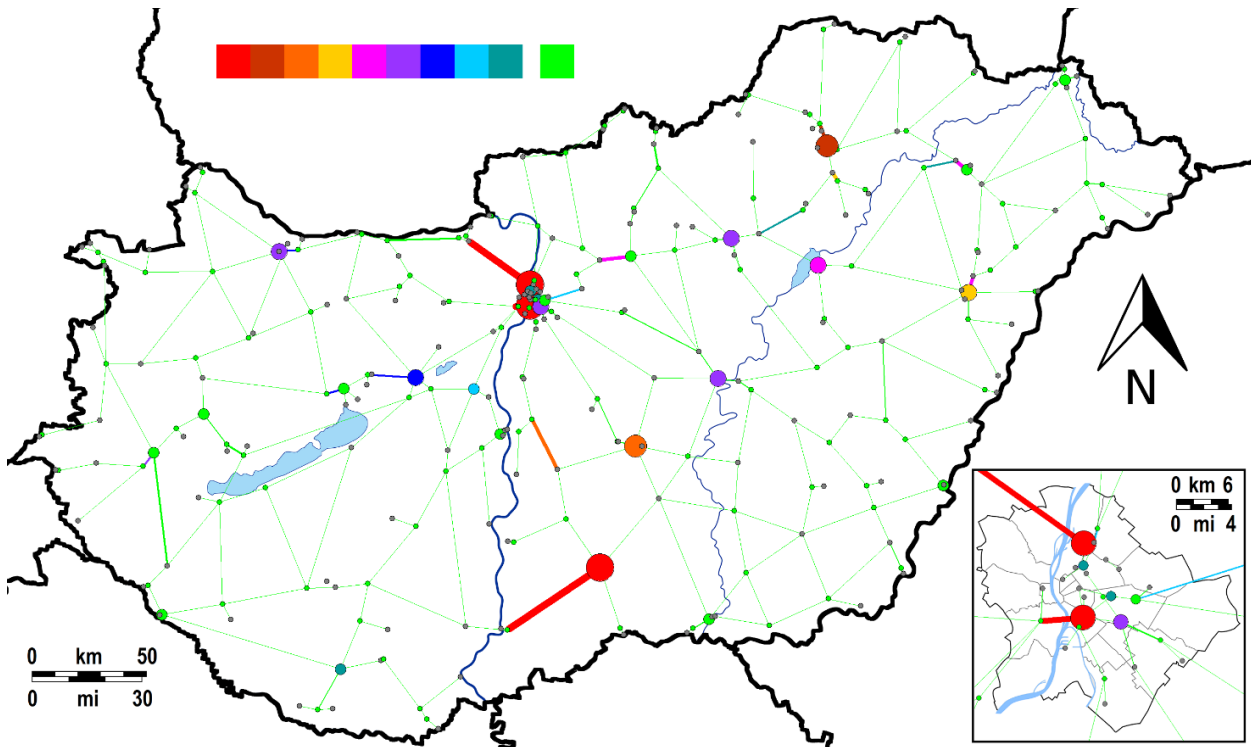
1. ábra: A hatékonyság változása véletlen zavarok, valamint hatékonyság- és kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén minimális távolságokra (a, c) és minimális menetidőkre (b, d) állomásközök (a, b) és állomások (c, d) rombolása esetén.

A rendszer kifejezetten ellenálló bizonyul a véletlen zavarokkal szemben: kb. 100 darab véletlenszerűen törölt állomásköz (azaz az összes állomásköz kb. 30%-áig) mind a távolság-, mind a menetidő-súlyozás esetén a hatékonyság kb. 1%-al csökken, ahogy a kizárt hálózati elemek száma 1-gyel nő, azaz a viselkedés lineáris. Kb. 200 törölt állomásköztől (azaz az összes állomásköz kb. 60%-ától), illetve kb. 150 törölt

állomástól (azaz az összes állomás kb. felétől) a hatékonyság csökkenése ismét lineárisra válik, de más, kisebb meredekséggel. Ez a viselkedés a kis-világ vagy a skálafüggetlen hálózatokra jellemző [19], [20].

Azt látjuk továbbá az 1. ábrából, hogy a hatékonyság változása a kapcsolatköztségi-alapú támadás esetén is szigorúan monoton változást mutat. Ez azt jelenti, hogy a legforgalmasabb (azaz legnagyobb kapcsolatköztségi) állomások egyben nagy összmenetvonalhossz-, illetve összmenetidő-növekedést is okoznak. Ennek jelentőségére a kapcsolatköztségi-alapú támadásnál még visszatérek.

A 2. és 3. ábrákon a hálózat hatékonyság-értékét láthatjuk az adott állomás vagy állomásköz, mint legnagyobb hatékonyságcsökkenést okozó hálózati elem rombolásakor, minimális hosszúságú és minimális menetidejű utakra. Az állomásokot reprezentáló körök nagysága, illetve az állomásközöket reprezentáló élek vastagsága arányos a teljes hálózatnak abban az állapotában vett hatékonyságával, amikor az adott hálózati elem rombolása megtörténik. Az egyes színek azokat a hálózati elem-csoportokat jelölik, melyek rombolása után a hálózat egy része elérhetetlen lesz a hálózat többi része számára.



2. ábra A magyarországi vasúthálózat hatékonyságának változása hatékonyságalapú támadás esetén minimális menetvonalhosszakra. Az állomásokot reprezentáló körök mérete, illetve az állomásközöket reprezentáló vonalak vastagsága arányos a hálózat hatékonyság-értékével a kizárásukkor. A kilenc eltérő színnel jelölt állomás és állomásközök okozzák az első kilenc részhálózat leválását.

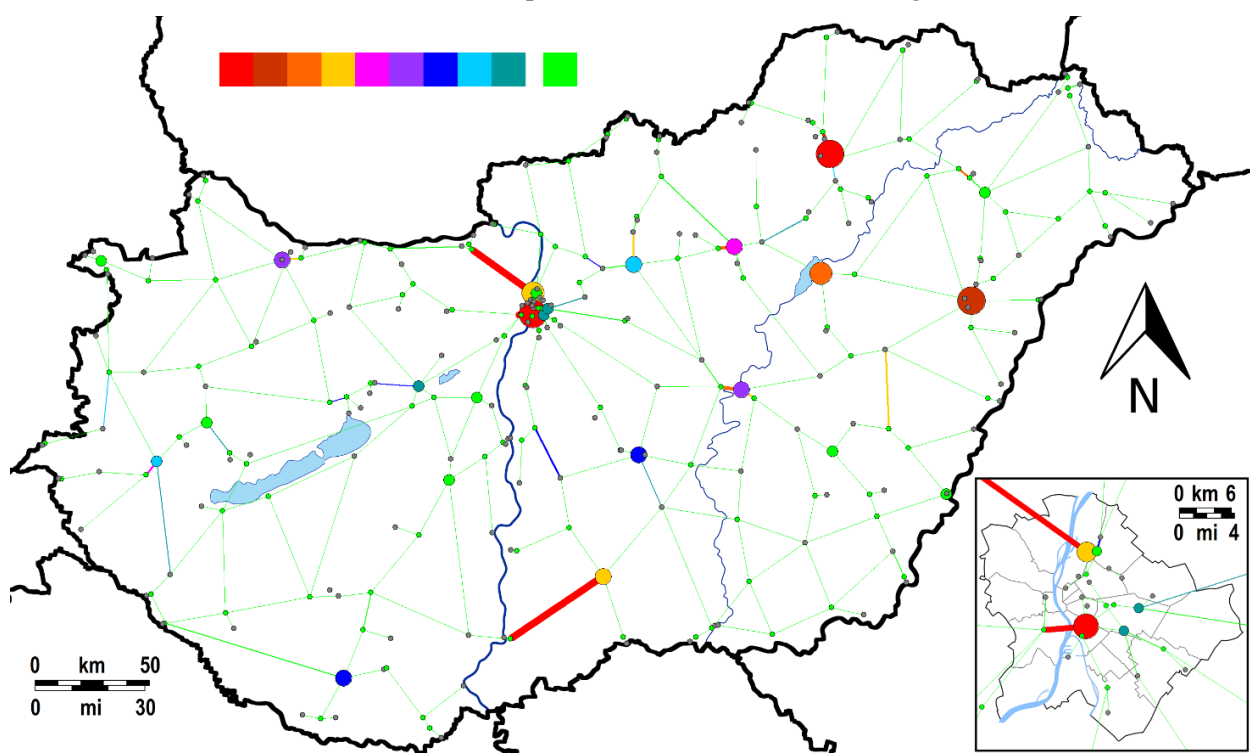
Minimális hosszúságú menetvonalakkal számolva és állomásközöket rombolva az első három célpont a három Duna-híd, pontosabban a hozzájuk tartozó állomásközök, melyek járhatatlanná tételével az ország két, a Duna által elválasztott részre szakad. Azonban ennek három állomásköz (híd) rombolása által történő bekövetkezése csak matematikai szempontból igaz. Mivel sem az Újpesti vasúti híd, sem a bajai Türr István híd nem villamosított, ráadásul mindkettő egyvágányú, ezek megléte nem biztosít kellő redundanciát [21] az Összekötő vasúti híd hiánya esetére, azaz a gyakorlatban ezen egyetlen hálózati elem sérülése megbontja a hálózat átjárhatóságát. A Duna-hidak kevés száma mellett a földrajzi elhelyezkedésük sem teszi lehetővé megfelelő üzemeltetésüket [22].

A rombolás következő lépései ezen stratégia alapján a 92-es és 94-es vonalak közös része, majd a 150-es vonal Budapestről kivezető szakasza. A Nyírtelek–Görögszállás (80-as vonal) és a Debrecen–Apafa (100-as vonal) rombolása után Szabolcs-Szatmár-Bereg megye elérhetetlen lesz, ami a záhonyi átrakóközvet és a széles nyomtávú hálózattal való kapcsolat miatt fontos része a hálózatnak [23]. A folytatásban a szobi fővonal rombolása, majd Borsod megye elérhetetlenné válása történik meg.

Állomások rombolása esetén a három Duna-híd állomásközének szélső állomásai, majd Miskolc-Tiszai pu., Kecskemét, és Debrecen állomások kizárása csökkenti leginkább a hatékonyságot. Utóbbi kettő az ország védelmi szempontjából meghatározó jelentőségű létesítmények, MH 59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis,

illetve Debrecen nemzetközi repülőtér (Ferihegy egyetlen reális alternatívája) vasúti kapcsolatának csatlakozó állomása [24]. Továbbá ezen három állomás mellékvonalak elágazó állomásai is, azaz sérülésük esetén nem csak a fővonalak forgalmának terelése, hanem a csatlakozó zsákvonalak elérhetetlenné válása is csökkenti a hatékonyságot, Miskolc esetében pedig egy kiterjedt vonalrendszer válik csak szomszédos országon keresztül megközelíthetővé vasúton, ami védelmi szempontból rendkívül kedvezőtlen [25]. A következő állomás Tiszafüred, melynek rombolása után a teljes északkeleti országrész (Borsod, Szabolcs és Hajdú-Bihar megye) vasúton elérhetetlenné válik. Ezután Pusztaszabolcs rombolásával a Dunántúl legnagyobb (Győrön és Székesfehérváron túli) része is elérhetetlen lesz a fővárosból; ebből hasad le a következő lépésben Szentlőrinc rombolásával Baranya megye.

Azt látjuk tehát, hogy ennél a rombolási stratégiánál még kevésbé az egyes országrészek, megyék törzshálózattól való elvágása történik, mint inkább a fővonalak rombolása, aminek következtében a mellékvonalakra terelődik a forgalom, jelentősen megnövelve a menetvonalak hosszát. Ez a támadási sorrendet meghatározó mérőszám, a hatékonyság definíciója miatt van így, az országrészek, megyék törzshálózattól való elvágása csak mintegy „melléktermék” a folyamatnak; az effektus csak nagyobb zsákvonalhálózatok leválasztása esetén jelentős. A mellékvonalak, mint alternatívák azonban sokkal kisebb áteresztőképességük miatt jelenleg azonban nem jöhetnek szóba. A fővonalak fejlesztése [26] mellett ezért célszerű lenne mellékvonali alternatívák kiépítése is a hálózat támadástűrőségének biztosítására.



3. ábra: A magyarországi vasúthálózat hatékonyságának változása hatékonyságalapú támadás esetén minimális menetidőkre. Az állomásközöket reprezentáló vonalak vastagsága, illetve az állomásokat reprezentáló körök mérete arányos a hálózat hatékonyság-értékével a kizárásukkor. A kilenc eltérő színnel jelölt állomások és állomásközök okozzák az első kilenc részhálózat leválasztását.

A hatékonyságot leginkább csökkentő, menetidőkkel számoló, állomásközöket kiiktató rombolási stratégia alapján a Duna-hidak után a Miskolcnál csatlakozó mellékvonalrendszer válik le 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 egy-egy állomásközének kiiktatása után a teljes északkeleti országrész kapcsolata szűnik meg az országos hálózattal. Ezután olyan mellékvonalak rombolása következik a stratégia alapján, mint például a Püspökladány–Szeghalom vagy a Hatvan–Kisterenye vonalszakasz. Ez azt mutatja, hogy a modell a fővonalak forgalmát azok sérülésével többek között ezekre a mellékvonalakra próbálja áterelni.

Állomások közül az elsőnek rombolt Ferencváros, azonban a következő nem a másik két Duna-híd állomásközének valamelyik szélső állomása (a többi stratégiával ellentétben), hanem Miskolc-Tiszai pu.,

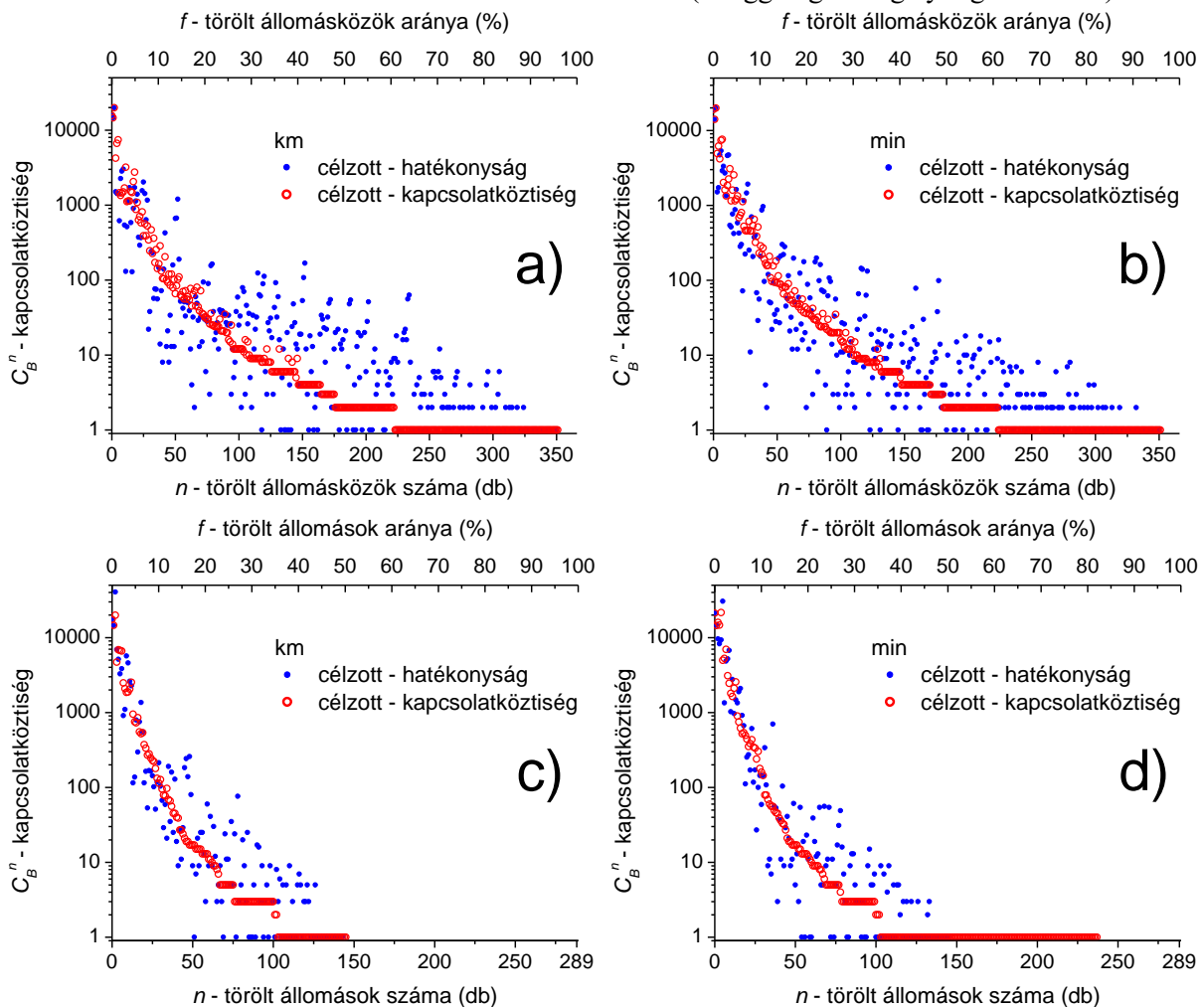
mellyel ismét az itt csatlakozó mellékvonalhálózat vasúti kapcsolata szűnik meg. Debrecen, majd Tiszafüred kizárásával a teljes északkeleti országrész veszíti el összeköttetését a törzshálózattal és csak ezután következik Angyalföld és Kiskunhalas rombolása. Ezután (többek között) Szajol és Kecskemét kizárásával a Délkelet-Alföld válik le a hálózatról, Szentlőrincel a baranyai zsákvonalak veszítik el kapcsolatukat, majd a Dunántúl esik szét északi és déli részre.

Az első néhány hálózati elem sorrendje azt mutatja, hogy a menetidők már sokkal jobban leírják a körülményt, hogy az Összekötő vasúti hídnak a másik két dunai átkelés nem alternatívája; és itt mindössze a 4-es és a 154-es vonalak alacsony engedélyezett sebességének figyelembe vétele vezetett erre az eredményre.

A hatékonyságalapú támadásra tehát úgy lehet első lépésben felkészíteni a hálózatot, ha a modellszámítások eredményeként adódott alternatív útirányokon az áteresztőképességet megnöveljük. Ezáltal egy-egy rombolt fővonal forgalma nem egy az egyben csatornázódna át (ahogy például a Püspökladány–Szegehalom vonalszakasz esetében láttuk), hanem egyenletesebben oszlana el a hálózatban.

2.2 A kapcsolatköztiség változása

A 4. ábrán láthatjuk a maximális kapcsolatköztiség-értékek változását a két támadási stratégia esetén minimális menetvonalhosszokra és minimális menetidőkre (a függőleges tengely logaritmusos!).

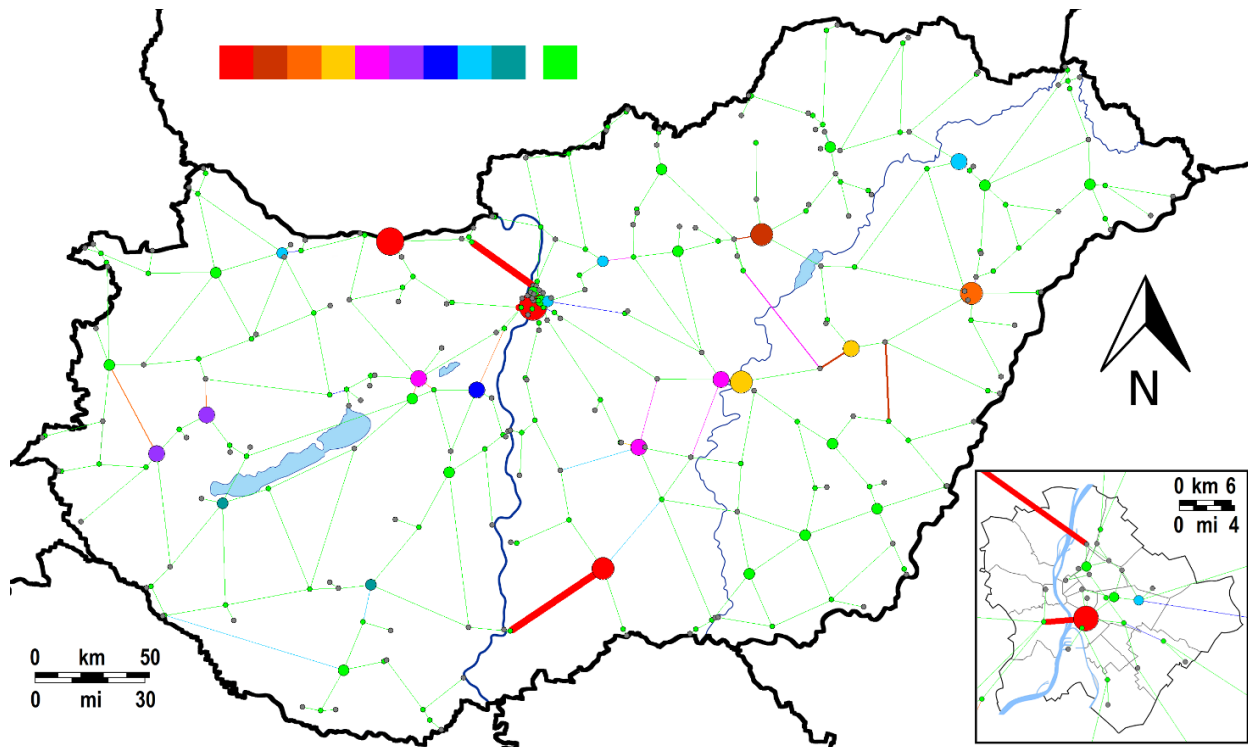


4. ábra: A maximális kapcsolatköztiség változása hatékonyság- és kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén minimális távolságokra (a, c) és minimális menetidőkre (b, d) állomásközök (a, b) és állomások (c, d) rombolása esetén (log-lin skála!).

A maximális kapcsolatköztiség változása a hatékonyság esetétől lényegesen különbözik. Bár kapcsolatköztiség-alapú támadás esetén a kapcsolatköztiség csökkenő trendet mutat (a mérték definíciójánál elmondottak alapján monoton csökkenés csak egészen speciális szerkezetű hálózatok esetében lenne várható), hatékonyságalapú támadás esetén a kapcsolatköztiség-értékek rendkívül erős szórást mutatnak. Ez azt jelenti, hogy a legnagyobb összmenetvonalhossz-, illetve összmenetidő-

növekedést okozó állomásközpökök nem feltétlenül a legforgalmasabbak. Szélsőséges esetben ugyanis egy állomásközp kizárása átlagosan kétszeres menetidőnövekedést is okozhat az azt érintő menetvonalakon [27] a rendkívül hosszú kerülökök miatt, ami a fő oka a hálózat 4. ábrán látható viselkedésének.

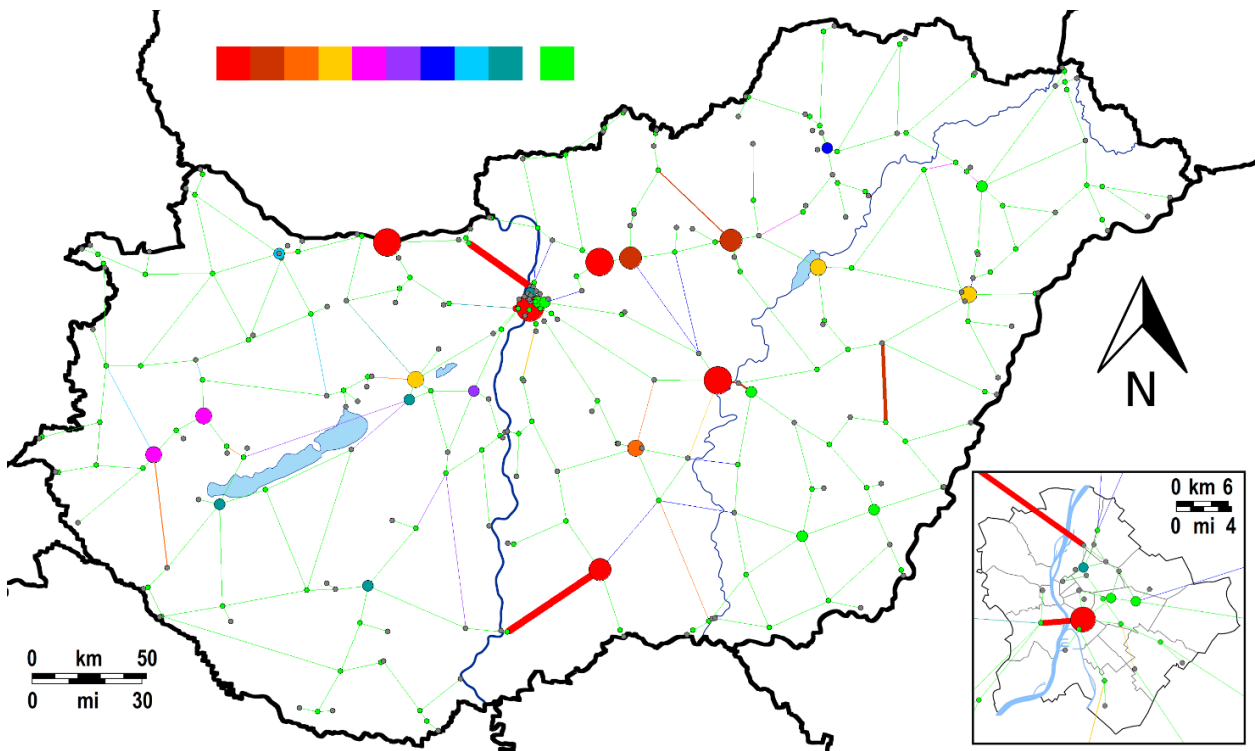
Az 5. és 6. ábrákon az egyes állomások és állomásközpökök kapcsolatközpöttségét láthatjuk minimális hosszúságú és minimális menetidejű utakra. Az állomásközpöket reprezentáló élek vastagsága arányos azok kizáráskori kapcsolatközpöttségével. Az egyes színek azokat a hálózati elem-csoportokat jelölik, melyek rombolása után a hálózat egy része elérhetetlen lesz a hálózat többi része számára.



5. ábra A magyarországi vasúthálózat maximális kapcsolatközpöttségének változása kapcsolatközpöttség-alapú támadás esetén minimális menetvonalhosszakra. Az állomásközpöket reprezentáló vonalak vastagsága, illetve az állomásokot reprezentáló körök mérete arányos kizáráskori kapcsolatközpöttség-értékükkel. A kilenc eltérő színel jelölt állomások és állomásközpökök okozzák az első kilenc részhálózat leválását.

Az egyes állomáspárok közti minimális hosszúságú menetvonalakat vizsgálva és minden lépésben a legforgalmasabb, azaz a legnagyobb kapcsolatközpöttségű állomásközpöt rombolva az első három helyen a három Duna-híd szerepel. Ezután a 80-as és a 100-as fővonalak egy-egy szakaszának kiiktatásával csak mellékvonali kerülöutakon át lesz az északkeleti országrész elérhető. Ezek közül a legforgalmasabbá a Püspökladány-Szeghalom vonalszakasz vált, ennek rombolásával válnak le Borsod-Abaúj-Zemplén, Szabolcs-Szatmár-Bereg és Hajdú-Bihar megyék a hálózat többi részéről. Ezután észak-déli irányú vonalszakaszok rombolásával a Dunántúl hasad északi és déli részre, majd a Dél-Alföld válik elérhetetlenné. Ezután némileg meglepő módon a Görögszállás–Nyírtelek és a Debrecen–Apafa állomásközpökök kiiktatásával Szabolcs-Szatmár-Bereg megye lehasad a már szigetként létező északkeleti országrészről, ami azt mutatja, hogy ezen részhálózatban a megmaradt menetvonalak továbbra is erősen koncentrálnak a 80-as fővonalra, lévén a lehetséges alternatív útvonalak lassan bejárható mellékvonalak. Ezután a Dunántúl északi fele is két részre válik, majd Baranya megye is elérhetetlen lesz, és a Miskolcnál csatlakozó mellékvonalrendszer csak ezután hasad le az északkeleti részhálózatról.

Állomások esetében is hasonlóan drasztikusan történik meg a feldarabolódás. Először „szokás szerint” a Duna-hidak rombolásával az ország vasúthálózata két részre esik. Utánuk Füzesabony, Debrecen, Szajol és Karcag állomások rombolása történik meg, először a 80-as fővonal forgalmát a 100-asra, majd az így megnövekedett forgalmat a 100-asról mellékvonalakra csatornázva át. Ezen állomások rombolása után a három északkeleti megye elérhetetlen lesz a hálózat többi részéről. A következőnek rombolt állomások Kecskemét, Szolnok és Székesfehérvár, majd Ukk, Zalaszentiván és Pusztaszabolcs, melyek hálózatból való kiiktatásával előbb a Délkelet-Alföld (Csongrád és Békés megyék), majd a teljes Dél-Dunántúl válik Budapestről elérhetetlenné.



6. ábra A magyarországi vasúthálózat maximális kapcsolatköztségeinek változása kapcsolatköztség-alapú támadás esetén minimális menetidőkre. Az állomásközöket reprezentáló vonalak vastagsága, illetve az állomásokot reprezentáló körök mérete arányos kizáráskori kapcsolatköztség-értékükkel. A kilenc eltérő színnel jelölt állomások és állomásközök okozzák az első kilenc részhálózat leválását.

Minimális menetidőkkel számolva és az egyes lépésekben a legnagyobb kapcsolatköztséggű állomásközöket kiiktatva a Duna-hidak (állomásközök) 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 jelenleg a valóságban nem bonyolító) 84-es vonalra terelődik át, melyek 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 pu. és Sajóecseg közti, a 92-es és 94-es zsákvonalak közös szakaszának rombolása által történik, hanem a 80-as fővonal két állomásközének kizárásával Miskolctól valamivel távolabb.

Érdekes megfigyelni az 5-6. ábrákon, hogy az első négy állomásköz kiesése után már nem csak fővonalak (pl. 80, 100, 120) állomásközök, 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; ahogy azt a hatékonyság-alapú, minimális menetidőket figyelembe vevő rombolási stratégia esetén is láttuk. 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.

Állomások kapcsolatköztség-alapú rombolása esetén viszonylag későn, öt hálózati elem rombolása után lesz egy régió (Nógrád megye nyugati és Komárom-Esztergom megye keleti része) elérhetetlen, ugyanis a három Duna-híd állomásközök végpontjai között megtörténik Szolnok és Aszód rombolása is. Előbbi a Tisza legforgalmasabb hídja miatt áll előkelő helyen a rombolások sorrendjében, melynek reális helyettesítése csak új híd építésével lenne biztosítható [28] (az állomásközök esetéhez hasonlóan), utóbbi pedig a 80a fővonal csatlakozó állomásaként betöltött centrális szerepe miatt. 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 lesz bejárhatatlan, majd Kecskeméttel a Tiszántúl és Borsod megye szeparációja következik be. Ez utóbbi „osztódik tovább” Debrecen és Tiszafüred kizárásával, amikor

leválik az északkeleti országrész. A következő lépés a Dunántúl északi és déli részre való hasadása, majd erről a Szentlőrincnél csatlakozó mellékvonalrendszer leválása.

Konklúzió

Gráfalapú modellezéssel bemutattam, hogy a magyarországi vasúthálózat nem egyformán érzékeny a véletlen zavarokra és a célzott támadásokra. Egy-egy véletlen zavar csak kis átlagos csökkenést okoz a hálózatot jellemző, ún. hatékonyság mértékben, ami a hálózatbeli menetvonalak menetidői, illetve menetvonalhosszai reciprokainak összege. Ezzel szemben egy, a hálózat teljesítőképességét jellemző mérőszámot célzottan befolyásoló támadás már akár egy hálózati elem megzavarása esetén is kritikus helyzetet képes okozni, legyen ez a hatékonyság legnagyobb csökkentésére való törekvés, vagy a mindenkori legforgalmasabb (legnagyobb, ún. kapcsolatköztségszerű) állomásköz rombolása.

A mellékvonalak alacsony engedélyezett sebessége miatt előfordul, hogy míg a legforgalmasabb vonalszakaszok kizárásuk esetén nagy hatékonyságcsökkenést okoznak, addig a rombolásuk 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 megfelelő kapacitású és stratégiaileg fontos állomásköz védelme könnyebben biztosítható.

Azt láttuk mind minimális menetvonalhosszak, mind minimális menetidők esetében, hogy a következmények összefüggenek a támadás alapjául választott mérőszámmal. Hatékonyságalapú támadással inkább hosszú kerülők válnak szükségessé, kapcsolatköztségszerű alapú támadásnál pedig a hálózat gyors szétदारabolódása az elsődleges veszélyforrás. Előbbire úgy lehet felkészíteni a hálózatot, ha a megfelelő alternatív útirányok engedélyezett sebességeit elégséges mértékűre emeljük, a kapcsolatköztségszerű alapú támadásra való felkészítés pedig megfelelő számú redundáns vonal beépítése a hálózatba [29]. Mindkettő megvalósítható több egyvágányú vonal szimultán fejlesztésével, ami által azok együttesen képesek pótolni a kieső fővonalú útirányokat.

Irodalomjegyzék

- [1] Szászi G.: A vasúti közlekedési alágazat, mint kritikus infrastruktúra, in: HORVÁTH, A. (szerk.): Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből, 167-190, Magyar Hadtudományi Társaság, Budapest, 2013, ISBN: 9789630869263
- [2] Tóth B.: Állomások és állomásközök zavarának gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton, Hadmérnök 12/4, 52-66, 2017.
- [3] Tóth B.: Menetidő- és menetvonalhossz növekedés gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton állomások és állomásközök zavara esetén, Hadmérnök 13/1, 118-132, 2018.
- [4] Horváth A.: Szempontok a katonai közlekedési védelemigazgatási és nemzetgazdasági kapcsolatrendszeréről, Katonai Logisztika 2016/különszám, 245-266, 2016.
- [5] Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat zavarainak gráfelméleti alapú vizsgálata, in: Horváth B. – Horváth G. – Gaál B. (szerk.): Közlekedéstudományi Konferencia, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr, 2018, 505-519, ISBN: 9786155776137
- [6] Tóth B.: 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, ISBN: 9789638121868
- [7] R Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- [8] Csardi G. – Nepusz T.: The igraph software package for complex network research, InterJournal, Complex Systems 1695. 2006. <http://igraph.org>
- [9] http://www.vpe.hu/takt/vonal_lista.php (2020.01.31.)
- [10] Dijkstra E. W.: A note on two problems in connexion with graphs, Numerische Mathematik 1/1, 269-271, 1959, DOI: 10.1007/BF01386390
- [11] Bavelas A.: Communication Patterns in Task-Oriented Groups, The Journal of the Acoustical Society of America 22/6, 725-730, 1950, DOI: 10.1121/1.1906679
- [12] Sabidussi G.: The Centrality Index of a Graph, Psychometrika 31/4., pp. 581-603, 1966, DOI: 10.1007/bf02289527
- [13] Latora V. – Marchiori M.: Efficient Behavior of Small-World Networks, Physical Review Letters 87/19, 198701/1-4, 2001, DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.198701

- [14] Crucitti P. – Latora V. – Marchiori M. – Rapisarda A.: Error and attack tolerance of complex networks, *Physica A* 340, 388-394, 2004, DOI: 10.1016/j.physa.2004.04.031
- [15] Freeman L.: A set of measures of centrality based on betweenness, *Sociometry* 40/1, 35-41, 1977. DOI: 10.2307/3033543
- [16] Horváth A.: A közúti, vasúti és vízi közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői, in: Tóth P. (szerk.): A politikai marketing fogságában, Mágustúdió, Budapest, 321-336, 2006.
- [17] Lévai Zs.: A vasút lehetséges válaszai a legújabbkori biztonsági kockázati kihívásokra, in: Horváth B. – Horváth G. – Gaál B. (szerk.): Közlekedéstudományi Konferencia, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr, 2019, 21/1-18, ISBN: 9789638121868
- [18] Lévai Zs.: A vasúti szektor védelmi lehetőségei terrorakciók ellen, *Közlekedéstudományi Szemle* 69/5, 50-71, 2019.
- [19] Lewis T.: *Critical Infrastructure Protection*, Hoboken, NJ, USA, Wiley, 2006, 71-92, ISBN: 9780471786283
- [20] Mackin T. J. – Darken R. – Lewis T. G.: Managing Risk in Critical Infrastructures Using Network Modeling, in: *Critical Infrastructure Protection: Elements of Risk*, 2007, 65-78, <https://cip.gmu.edu/wp-content/uploads/2016/06/ElementsofRiskMonograph.pdf> (2020.01.31.)
- [21] Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat redundanciáját biztosító vonalszakaszok, *Hadmérnök* 14/2, 74-86, 2019.
- [22] Lakatos P. – Szászi G. – Taksás B.: A logisztikai infrastruktúra szerepe a regionális versenyképesség alakításában, in: Csath M. (szerk.): *Regionális versenyképességi tanulmányok*, 181-288, NKE Szolgáltató Nonprofit Kft., Budapest, 2016.
- [23] Szászi G.: Katonai vasúti szállítások a Magyar Honvédség missziós feladatainak rendszerében, *Szolnoki Tudományos Közlemények* 16, 101-118, 2010.
- [24] Szászi G.: A védelmi szempontból meghatározó repülőterek vasúti kapcsolatának helyzete Magyarországon, *Repüléstudományi Közlemények (1997-től) 21/Különszám*, 1-22, 2009.
- [25] Szászi G.: Nagyfolyami vasúti hidak, mint közlekedési létfontosságú rendszer elemek, in: Horváth A. – Bányász P. – Orbók Á. (szerk.): *Fejezetek a létfontosságú közlekedési rendszer elemek védelmének aktuális kérdéseiről*, 83-99, Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014, ISBN: 9786155305306
- [26] Szászi G.: Transz Európai Közlekedési Hálózat (TEN-T) tervezett fejlesztési iránya, várható hatása Magyarország vasúthálózatának fejlesztésére, *Szolnoki Tudományos Közlemények*, 16, 402-425, 2012.
- [27] Tóth B.: Menetidő- és menetvonalhossz növekedés gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton állomások és állomásközpontok zavara esetén, *Hadmérnök* 13/1, 118-132, 2018.
- [28] Szászi G.: Jász-Nagykun-Szolnok megye vasúthálózatának védelmi szempontú elemzése, *Szolnoki Tudományos Közlemények*, 13, 101-125, 2009.
- [29] Szászi G.: Magyarország közlekedési infrastruktúrájának fejlesztése napjainkban: Közút vagy vasút? *Katonai Logisztika* 15/2, 32-59, 2007.