

MENETIDŐ- ÉS MENETVONALHOSSZ NÖVEKEDÉS GRÁFELMÉLETI ALAPÚ VIZSGÁLATA A MAGYARORSZÁGI VASÚTHÁLÓZATON ÁLLOMÁSOK ÉS ÁLLOMÁSKÖZÖK ZAVARA ESETÉN

GRAPH THEORY-BASED ANALYSIS OF THE INCREASE OF THE LENGTHS OF PATHS AND RUNNING TIMES ON THE RAILWAY NETWORK OF HUNGARY IN THE CASE OF BREAKDOWNS OF STATIONS AND LINE SECTIONS

TÓTH Bence

(ORCID: 0000-0003-3958-187X)

toth.bence@uni-nke.hu

Absztrakt

A cikkben egy, a magyarországi vasúthálózatot modellező súlyozott irányított gráf segítségével az egyes állomáspárok közötti minimális menetidőket és menetvonalhosszakot mutatom be a zavarmentes és az egyes állomások és állomásközök törlésével létrehozott zavart hálózatokban. Ezek segítségével az adott hálózati elem zavarának hatását vizsgálom a rajtuk áthaladó menetvonalak menetidejére és hosszára.

Kulcsszavak: kritikus infrastruktúra, vasúthálózat, gráfelmélet, legrövidebbút-probléma

Abstract

A weighted directed graph modelling the railway network of Hungary is used to determine the minimal running times and lengths of paths for the actual network and on disturbed networks describing the damage of each station and line section by deleting the corresponding edges of the graph. By using these data, the effect of the damage of the stations and line sections on the paths passing through them is examined.

Keywords: critical infrastructure, railway network, graph theory, shortest path problem

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2017.10.27.
A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2018.03.14.

BEVEZETÉS

A vasúthálózat az ún. kritikus infrastruktúrák körébe tartozik. A kritikus infrastruktúra meghatározása a vonatkozó kormányrendelet alapján a „Magyarországon található azon eszközök, rendszerek vagy ezek részei, amelyek elengedhetetlenek a létfontosságú társadalmi feladatok ellátásához, az egészségügyhöz, a biztonsághoz, az emberek gazdasági és szociális jólétéhez, valamint amelyek megzavarása vagy megsemmisítése, e feladatok folyamatos ellátásának hiánya miatt jelentős következményekkel járna”. [1],[2] Ezen létfontosságú feladatok ellátásához szükséges, hogy rendelkezzenek tartalék kapacitásokkal is zavar esetére, ugyanis „a közlekedési rendszer jellemzői miatt egy tömegbaleset, katasztrófa helyzet vagy terrortámadás hatásai nem csak lokálisan jelentkezhetnek, hanem hosszabb-rövidebb időre megbéníthatják egy-egy régió, országrész, vagy egy egész ország forgalmát is.” [3] A vasúthálózat lehetséges zavarai közül kiemelkedik a terrortámadás lehetősége, mivel „a vasúti közlekedés terrortámadások iránti érzékenysége az alágazat műszaki-technikai jellemzőinél fogva a többi szállítási módhoz képest is magas szintűnek értékelhető.” [4]

Egy ország vasúthálózata sosem homogén, hanem vannak kitüntetett vonalak, vonalszakaszok (az ún. fővonalak) és ezek találkozásánál jelentősebb csomópontok (mint Magyarországon pl. Szolnok, Székesfehérvár, Dombóvár, Szombathely vagy Budapesten Kelenföld és Ferencváros). Ezek jellegükből adódóan olyan állomások, állomásközök, melyeken a forgalom jelentős hányada áthalad, ezért az ilyen elemek zavara, esetleges rombolása időben és térben is messzire kiterjedő hatást tud gyakorolni az alágazat egészére. [5] Ezért különösen lényeges, hogy legyen „viszonylag rövid időn belül (a sérülés nagyságától függően 1-3 nap) helyreállítható a vasúti közlekedési rendszer működőképessége, vagy aktiválhatók a szükséges helyettesítő kapacitások” [6], amennyiben ez utóbbiak rendelkezésre állnak.

A rendkívüli események mellett azonban figyelemmel kell lenni a vasúti pálya folyamatos karbantartására is. Mivel az állagromlás exponenciális folyamat, ezért a helyreállítási költségek is idővel egyre növekszenek [7], így a tartalékkapacitások, azaz a vasúti közlekedés esetében a jó állapotú mellékvonali kerülőirányok folyamatos biztosítása létfontosságú a rendszer zavartalan működéséhez. Ehhez „évi 200 kilométer pálya folyamatos rehabilitációját kellene elvégezni. Az elmúlt 20 év valós felújításai azonban alulmaradnak a szükségestől.” [8][9]

Éppen ezért célom a magyarországi vasúthálózat sérülékenységének vizsgálata, pontosabban annak feltárása, hogy az egyes állomások, állomásközök zavara esetén az időben és/vagy térben legrövidebb kerülőirányok mekkora növekményt okoznak a mentidőben, illetve a megtett útban.

Az elemzés során gyakran használt fogalmak lesznek a menetvonal és ennek hossza, valamint a menetidő, ezért célszerű ezek definiálása már rögtön az elején. A „menetvonal a vasúti pályahálózat-kapacitásnak az a része, amely egy adott időszakban egy vonat két pont között történő közlekedtetéséhez szükséges”. [10] A menetvonal két végpontja közötti út megtételéhez szükséges idő a menetidő (ez a vasúti törvény szövegében található „adott időszak”, amelyben a vonat közlekedik, azaz az indulási és az érkezési időpont között eltelt idő). Természetesen egy menetvonal két végpontja között számtalan alternatív útvonal létezik, mindnek más a hossza, más a bejárásukhoz szükséges menetidő, épp ezért ezekre különböző menetvonalakként hivatkozunk. Az adott két végponthoz tartozó minimális menetidejű és minimális hosszúságú menetvonal konkrét útvonala gyakran eltér, ezért nem mindegy, hogy melyik paraméterre optimalizálunk. A menetidőt percben, a menetvonalhosszat kilométerben fogom megadni.

MAGYARORSZÁG VASÚTHÁLÓZATÁNAK GRÁFMODELLJE

Egy korábbi cikkemben [11] részletesen bemutattam a számolásaimhoz használt modellgráf leírását, ezért itt csak annak alapvető tulajdonságait foglalom össze.

A magyarországi vasúthálózat a 2016-os adatok alapján 7 438 kilométernyi építési hosszú normál nyomtávú vasúttal rendelkezik. [12] Ez 80,0 km/1000 km² vonalsűrűséget jelent. A forgalom döntő többségét kiszolgáló országos törzshálózat figyelembe vételével ez az érték azonban csak 50,1 km/1000 km². [13]

A hálózatnak a leírására egy élsúlyozott gráfot [14; 36. o.] használok. Az egyes csúcsok reprezentálják az állomásokat, az élek a vasútvonal-szakaszokat. [14; 3. o.] Az élek között a jelentősebb iparvágányok is szerepelnek.

Nem szerepel a gráfban csúcsként egy megállóhely sem, csak állomások, ahol vonatfordulás is lehetséges. Általában nem szerepelnek az egyes vonalszakaszok átmenő állomásai, azaz amelyekre a gráfban a csúcsok fokszáma [14; 28. o.] 2 lenne, csak a hármas fokszámú elágazó- és csatlakozó állomások. [15] Szerepelnek viszont olyan speciális állomások, mint zsákvonalak végpontjai, a határátmenetek és a határállomások.

Az egyes állomásközökhöz (az „állomásköz” kifejezést a továbbiakban a gráfelméleti „él” fogalommal szinonim kifejezésként használom) rendelt súlyok, azaz a gráf élein értelmezett ún. távolságfüggvény kétféle volt. Az egyik az adott állomásköz hossza volt kilométerben, mely adatok fő forrása a Vasúti Pályakapacitás-elosztó Kft. (VPE Kft.) weblapján [16] elérhető értékek voltak. Néhány, itt nem szereplő iparvágány hosszadata a vonatkozó kormányrendeletből [17], illetve saját, Google Maps-en [18] végzett mérésekből lett meghatározva.

A másik súlyozás az állomásközökhöz tartozó menetidő volt, mely az állomásköz hossza és az azon engedélyezett sebesség [16],[19],[20] alapján lett meghatározva. Ezek a menetidő-értékek ezért egy alsó korlátot képviselnek, hiszen például az indítási és a fékezési idők, az ívekben engedélyezett alacsonyabb sebességértékek, az esetleges lassújelek (állomásiak is), a terepviszonyokból adódó sebességcsökkentések nem lettek figyelembe véve.

Annak ellenére, hogy TEN-T hálózat részét képező vonalszakaszokon [21] legalább 160 km/h az elvárt engedélyezett sebesség [22],[23], a MÁV-Start Zrt. tájékoztatása szerint [24] jelenleg csak az 1-es számú vonal Tata és Hegyeshalom közti szakasza, a 120-as vonal Szajol és Békéscsaba közti szakasza, valamint 30a vonal egy része alkalmas az emelt sebességre. Ezek közül is csak az 1-es vonalon van engedélyezve ez a sebesség motorvonatoknak, illetve legfeljebb 18,0 tonna tengelyterhelésű mozdony vontatta szerelvényeknek. [25] Bár a pálya alkalmas 22,5 tonna tengelyterhelésű vonatok közlekedésére is, ezek csak 120 km/h-s korlátozott sebességgel közlekedhetnek. [26] Összességében a magyarországi vasúti pályáknak is csak kevesebb, mint kétharmadán közlekedhetnek a vonatok a kiépítési sebességgel. [27],[28] Ezért, mivel célom a vasúti szállítás modellezése, a nagyobb tengelyterheléshez tartozó kisebb engedélyezett sebességet vettem alapul.

A menetidők számításakor az irányváltáshoz szükséges időt (15 perc [29],[30]) hozzáadtam a teljes menetidőhöz. Ez úgy történt, hogy az egyes állomásokat (és a deltavágányok kitérőit is) nem egy, hanem négy csúcsként szerepeltettem a gráfban. Az állomások kezdő- és végpontján is definiáltam egy-egy bemeneti és kimeneti csúcsot. Ezekbe, illetve ezekből érkeznek és futnak ki a szomszédos állomásokat reprezentáló csúcsok felé a gráf élei. A fordulás időigényét egy, az azonos oldali bemeneti és kimeneti csúcsok közötti 15 perc súlyú éllel reprezentáltam. A gráf éleinek irányítására [14; 21-22. o.] a kimeneti és bemeneti csúcsok „rövidre zárásának” elkerülése miatt volt szükség. Az állomásokon való áthaladásnak a modellben nincs extra időszükséglete, ezen élek súlya 0 perc.

A feállomások nem négy, hanem csak két csúccsal jelennek meg, ugyanis csak egy bemeneti és a kimeneti irány van, melyek közt elegendő egy 15 perc súlyú, fordulást leíró él.

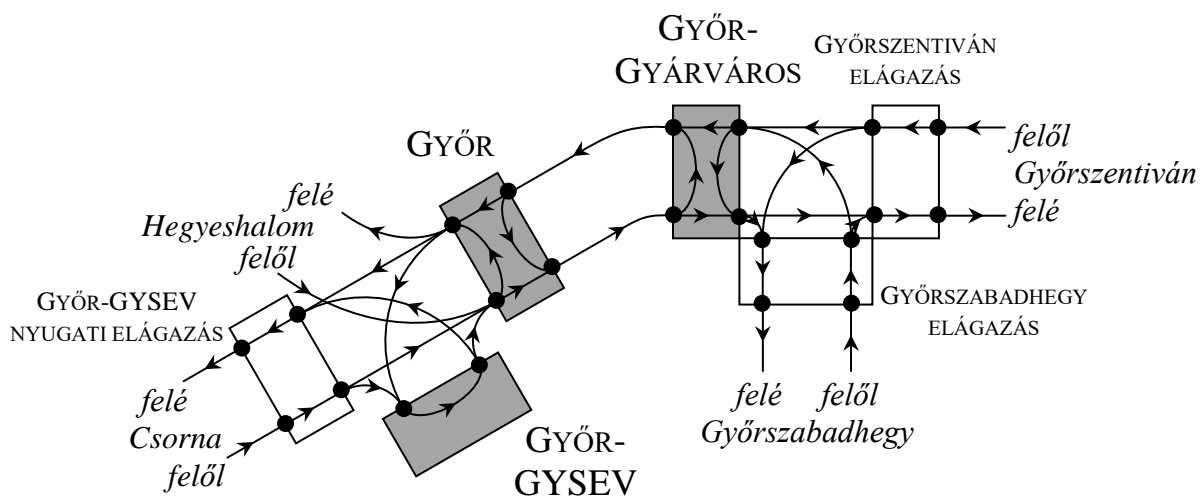
Az állomásokat leíró élek távolságsúlyai nulla értékűnek lettek definiálva.

Mindegyik élhez tartozhat tehát két súly, egy menetidőérték percben vagy egy hosszúságérték kilométerben. A számítások során természetesen egyszerre csak az egyik van hozzárendelve az élekhez. Az azonos viszonylathoz tartozó két ellentétesen irányított él súlya megegyezik.

A két súlyozott gráfot G_t^{00} -vel és G_ℓ^{00} -l-lel fogom jelölni.

A vontatási nemet, a tengelyterhelést, a vágányok számát nem vettem figyelembe a modellben.

A modell felépítését Győr és a környező állomásokon szemléltetem (1. ábra).



1. ábra Magyarország vasúthálózata gráfmodelljének felépítési elvei Győr és néhány környező állomás (szürke) és deltavágány (fehér) példáján szemléltetve (saját szerkesztés)

A gráfokat leíró éllista (mely 291 állomást és 366 állomásközt tartalmaz) a súlyokkal együtt letölthető a <http://www.octans8.hu/railway02/> weblapról a később bemutatandó térképek nagyfelbontású változataival és az összes, állomásokra és állomásközökre vonatkozó numerikus eredménnyel együtt.

A legrövidebb út számolása

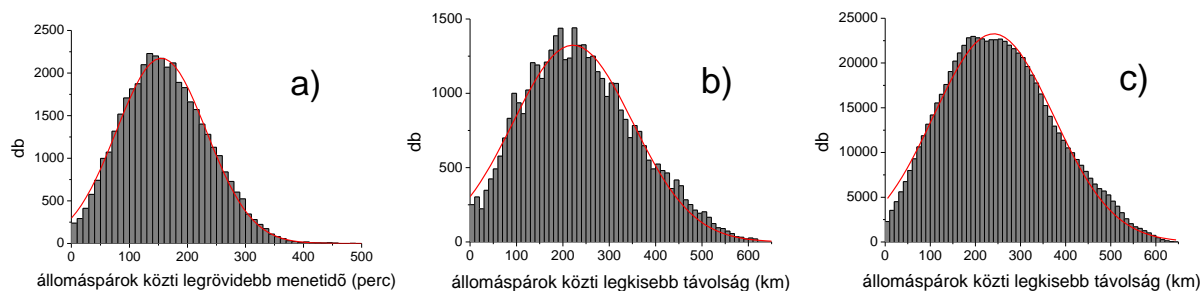
A két állomás közötti, menetidő vagy menetvonalhossz szempontjából legrövidebb út számítását az R programozási nyelv és környezetben [31] végeztem a Csárdi Gábor és Nepusz Tamás által kifejlesztett `igraph` csomag [32] `distances()` függvényével. A függvény által a legrövidebb út meghatározásához használt eljárás a Dijkstra-algoritmus. [33],[14; 37. o.]

Minden $\langle a, b \rangle$ állomáspárra (ahol $1 \leq a \leq 291$ és $1 \leq b \leq 291$) le lett futtatva egy legrövidebbút-keresés mind a menetidő-, mind a távolságsúlyokkal. A kapott értékeket egy mátrixba rendeztem úgy, hogy a sorok a kiinduló, az oszlopok az érkező állomást jelentik (egy klasszikus szállítási feladat költségmátrixához hasonlóan). Az így kapott 291×291 -es mátrixokat jelöljük T^{00} -l, illetve L^{00} -l a menetidőkkel és a távolságokkal való súlyozás esetében.

Az egyes mátrixok $N^{00} = 42\,195$ független menetidő- és menetvonalhossz-értéket tartalmaznak, mivel a főátlóban szereplő, $a = b$ esetekhez tartozó értékek nullák és a \mathbf{T}^{00} és az \mathbf{L}^{00} mátrix is szimmetrikus (azaz $\mathbf{T}_{a,b}^{00} = \mathbf{T}_{b,a}^{00}$ és $\mathbf{L}_{a,b}^{00} = \mathbf{L}_{b,a}^{00}$) a szimmetrikus súlyozás miatt.

A 2/a-b ábrákon a \mathbf{T}^{00} és az \mathbf{L}^{00} mátrixban szereplő menetidő-, illetve menetvonalhossz-értékeknek az eloszlását láthatjuk hisztogramon ábrázolva. Az eloszlásokra Gauss- Lorentz- és lognormális eloszlást illesztve a legjobban a Gauss-görbe [34] írja le mind a menetidők mind a menetvonalhosszak eloszlását: a menetidők esetében 155 perces várható értékkel és 155 perces szórással, a menetvonalhosszak esetében pedig 222 km-es várható értékkel és 259 km-es szórással.

A MÁV Zrt. 2016-2017. évi menetrendje [35] tartalmazza a személyszállításba bevont vonalakon az egyes állomások és megállóhelyek egymástól való távolságát (az ún. díjszabási távolságot). Az ebben szereplő 1230 állomásra és megállóhelyre hasonló módon kiszámítva a pártávolságokat (2/c ábra), jellegében nagyon hasonló hisztogramot kapunk, melyre Gauss-görbét [34] illesztve a várható értékre 240 km-t, a szórásra 266 km-t kapunk. Ebből a szempontból tehát az átmenő állomások nagy részének kihagyása csak minimálisan van hatással az állomáspárok távolságának eloszlására. Hasonló eredményre vezetnek a vasutallomasok.hu távolságadataival végzett pártávolság-számítások is. [36]



2. ábra A legkisebb menetidők és menetvonalhosszak eloszlása az összes állomáspárhoz tartozó menetvonalakra a) modellgráf, menetidő b) modellgráf, menetvonalhossz c) MÁV 2016-17. évi menetrend, díjszabási távolság, vö. [36] (saját szerkesztés)

Állomások és állomásközök zavarának számítása

Zavar alatt egy állomás vagy állomásköz hálózatból való teljes kiesését fogom érteni: zavart állomáson nem haladhat át menetvonal és annak végpontja sem lehet, zavart állomásközön pedig szintén nem lehet végighaladni. Egyszerre a hálózatnak csak pontosan egy elemének zavarát vizsgáltam, mégpedig úgy, hogy az adott állomást vagy állomásközt leíró éleket töröltem a gráfból. Az így keletkezett új gráfon elvégeztem a menetidők és a menetvonalhosszak kiszámítását minden lehetséges állomáspárra, ugyanúgy, mint a zavarmentes esetben.

Állomások zavara

A b állomás zavarának számításakor, azaz amikor a b állomás belső szerkezetét leíró élek törlésre kerülnek, még benne maradnak a gráfban a b állomáshoz vezető állomásközök. Így még lehetséges az $a \rightarrow b$ menetvonal számítása. Ennek elkerülésére először mindig azt vizsgáltam meg, hogy a számítandó menetvonal valamelyik végpontja a zavart állomás volt-e. Ha igen, akkor a legrövidebbút-keresést nem végeztem el, hanem a menetvonalhoz tartozó értéket nullává tettem.

Több olyan állomás található a magyarországi vasúthálózaton, melyek elhagyásával még legalább egy állomás elérhetetlen lesz, azaz a G_t^{00} és a G_ℓ^{00} gráf is egyszeresen összefüggő. [14; 34. o.] Az így elérhetlenné váló állomásokat, mint végpontot tartalmazó menetvonalakra

azok hosszát és menetidejét is zérussá tettem. Később látni fogjuk, hogy ez a fajta definíció miért célszerű a zavarok vizsgálatához.

Jelöljük G_t^{i0} -vel és G_ℓ^{i0} -lel az i -edik állomást leíró élek törlésével létrehozott, menetidők, illetve távolságok szerint súlyozott gráfot ($1 \leq i \leq 291$). A zavarmentes hálózatot leíró gráfokhoz hasonlóan minden állomáspárra lefuttatva a legrövidebbút-keresést az i paraméter minden lehetséges értékére, kétszer 291 darab 291×291 -es mátrixot kapunk. Jelöljük ezeket az i -edik állomás zavar esetén az állomáspárok közötti legrövidebb menetidőket, illetve menetvonalhosszakot tartalmazó mátrixokat \mathbf{T}^{i0} -lal és \mathbf{L}^{i0} -lal.

Állomásközök zavara

Állomásközök zavarát modellezni az adott állomásközt leíró két irányított él gráfból való törlésével lehet.

Ha azonban az adott állomásköz nem része egy körvonalnak [14; 16. o.], akkor megszüntetésével lesz olyan állomás, ami elérhetetlenné válik, vagyis a G_t^{00} és a G_ℓ^{00} gráf is egyszeresen élösszefüggő. [14; 34. o.] Az így elérhetetlenné vált állomásokat végpontként tartalmazó menetvonalak menetidejét és hosszát is nullaként vettem figyelembe.

Jelöljük G_t^{0j} -vel és G_ℓ^{0j} -lel a j -edik állomásközt leíró két irányított él törlésével előállított, menetidők, illetve távolságok szerint súlyozott gráfot, ahol $1 \leq j \leq 366$.

A j paraméter minden lehetséges értékére lefuttatva a legrövidebbút-keresést kétszer 366 darab 291×291 -es mátrixot kapunk a menetidőre és a menetvonalhosszra, melyeket az állomások zavaránál használt jelöléshez hasonlóan jelöljünk \mathbf{T}^{0j} -vel, illetve \mathbf{L}^{0j} -vel.

A ZAVAROK HATÁSA A MENETVONALAKRA

A zavarmentes és a zavart hálózatokra lefuttatott legrövidebbút-keresések összesen 1316 darab 291×291 -es mátrixot eredményeznek. Ezek segítségével meghatározható az egyes állomásokat és állomásközöket érintő menetvonalak menetidő- és hosszváltozása.

Zavar hatása az érintett menetvonalak menetidőire

Vizsgáljuk meg először azt, hogy zavar hatására hogyan változik meg az egyes menetvonalak menetideje. Ennek meghatározásához először képezzük az i -edik állomás zavarát leíró G_t^{i0} , és a zavarmentes G_t^{00} gráfbeli összes $\langle a, b \rangle$ állomáspár közti minimális menetidőket tartalmazó mátrixok különbségét: $\Delta \mathbf{T}^{i0} = \mathbf{T}^{i0} - \mathbf{T}^{00}$. Ennek az egyes $\Delta \mathbf{T}_{a,b}^{i0}$ elemei bármilyen előjelűek lehetnek.

A $\Delta \mathbf{T}_{a,b}^{i0}$ elem csak akkor lehet pozitív, ha a zavarmentes és a zavart hálózatban is létezik menetvonal az a és a b állomások között, azaz egyik érték sem nulla. Ekkor pedig $\mathbf{T}_{a,b}^{i0} \geq \mathbf{T}_{a,b}^{00} \forall i$, hiszen $\mathbf{T}_{a,b}^{00}$ definíció szerint a lehető legkisebb menetidő a két állomás között a G_t^{00} gráfban. A kevesebb élt tartalmazó G_t^{i0} gráfban nem lehetséges ennél rövidebb időtartamú menetvonal.

A fenti egyenlőtlenségből a $\mathbf{T}_{a,b}^{i0} = \mathbf{T}_{a,b}^{00}$ eset kétféleképpen állhat elő. Az egyik, hogy a minimális menetidejű menetvonal nem érintette az adott állomást sem a G_t^{00} , sem a G_t^{i0} gráfban, így az i -edik állomás megszüntetésével a legrövidebb menetidejű menetvonal nem változott: $\mathbf{T}_{a,b}^{00} = \mathbf{T}_{a,b}^{i0} \neq 0$ ezért $\Delta \mathbf{T}_{a,b}^{i0} = 0$. Azonban az is lehet, hogy az a és a b állomások

elérhetetlenek egymás számára mind a G_t^{00} , mind a G_t^{i0} gráfban, azaz $\mathbf{T}_{a,b}^{00} = \mathbf{T}_{a,b}^{i0} = 0$ és így szintén $\Delta\mathbf{T}_{a,b}^{i0} = 0$.

A $\Delta\mathbf{T}_{a,b}^{i0}$ elem negatív akkor lesz, ha a G_t^{i0} gráfban létezik menetvonal az a és a b állomások között ($\mathbf{T}_{a,b}^{00} > 0$), azonban az i -edik állomás megszüntetésével a két állomás elérhetatlenné válik egymás számára ($\mathbf{T}_{a,b}^{i0} = 0$), és így $\Delta\mathbf{T}_{a,b}^{i0} < 0$. Ezen utóbbi típusú zavarokat nem fogom figyelembe venni, csak azokat az eseteket vizsgálom, amikor van menetvonal az a és b állomások között a zavart hálózatban is.

A figyelembe veendő $\langle a, b \rangle$ állomáspárok tehát azok, melyekre $\Delta\mathbf{T}_{a,b}^{i0} > 0$. Megszámolva hány ilyen van, megkapjuk, hogy hány menetvonal érinti az i -edik állomást a zavarmentes és a zavart hálózatban is. Jelöljük ezt a számot N_t^{i0} -vel. Hasonlóan, összeszámolva, hogy a $\Delta\mathbf{T}^{0j} = \mathbf{T}^{0j} - \mathbf{T}^{00}$ mátrixnak hány pozitív eleme van, megkapjuk, hogy hány menetvonal érinti a j -edik állomásközt a zavarmentes és a zavart hálózatban is. Ezt a számot jelöljük N_t^{0j} -vel.

A menetidőértékek nominális növekedése

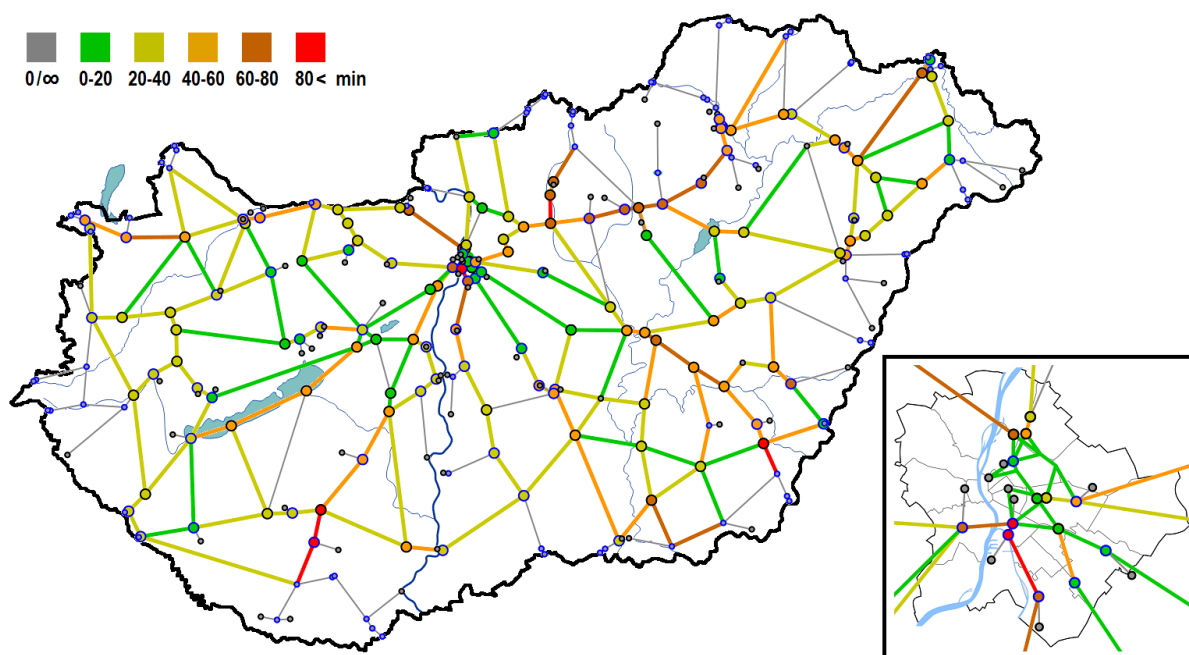
Az i -edik állomás zavara esetén az adott állomást a zavarmentes hálózatban érintő menetvonalak menetidejének átlagos növekedését megkapjuk, ha a $\Delta\mathbf{T}^{i0}$ mátrix azon elemeit összeadjuk, melyekre tehát igaz, hogy $\Delta\mathbf{T}_{a,b}^{i0} > 0$, majd ezt az összeget elosztjuk az adott állomáson a zavarmentes hálózatban áthaladó minimális menetidejű menetvonalak számával:

$$t_{i0} = \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} \Delta\mathbf{T}_{a,b}^{i0}}{N_t^{i0}}. \quad (1)$$

Hasonlóan, a j -edik állomásközre (csak a $\Delta\mathbf{T}_{a,b}^{0j} > 0$ feltételt teljesítő $\langle a, b \rangle$ állomáspárok figyelembe vételével):

$$t_{0j} = \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} \Delta\mathbf{T}_{a,b}^{0j}}{N_t^{0j}}. \quad (2)$$

A számolások eredményét a 3. ábrán láthatjuk.



3. ábra Az egyes állomások és állomásközök zavarának hatására történő nominális menetidőnövekedés. A kék szegélyű állomások bármelyikének elhagyásával a gráf két részgráfra esik szét. (saját szerkesztés)

A kritikus állomások és állomásközök két, sokszor összeadódó hatás miatt okoznak jelentős menetidőnövekedést. Ha hasonló engedélyezett sebességű, de kilométerben lényegesen hosszabb az igénybe veendő kerülőút, már az is a menetidő jelentős növekedését okozza (például Godisa, Ferencváros vagy Kál-Kápolna állomások és a Dombóvár–Godisa, Ferencváros–Soroksári út vagy a Makó–Mezőhegyes állomásközök esetében). Ha azonban egy állomás olyan vonalak találkozásánál fekszik, melyek mindegyikén alacsony az engedélyezett sebesség vagy egy nagy sebességgel bejárható állomásköz zavara miatt lényegesen alacsonyabb engedélyezett sebességű állomásközöket kell igénybe venni kerülőútként, már egy kisebb útnövekedés is jelentős menetidőnövekedést eredményez. Ezen két körülmény együttes hatása pl. Békéscsaba állomás zavara esetében majdnem másfél órával növeli az állomáson áthaladó menetvonalak átlagos menetidejét. De emiatt kritikus például még a Békéscsaba–Kétegyháza állomásköz is.

A menetidők százalékos növekedése

Azonban egy 20 perces menetidőnövekedés nem ugyanazt a hatást jelenti két, a zavarmentes hálózatban egymástól 10 percre és két, egymástól 100 percre található állomás esetében. Célszerű tehát az átlagos menetidőnövekedést százalékosan kifejezni. Ehhez ismét csak azon $\langle a, b \rangle$ állomáspárokat figyelembe véve, melyekre a $\Delta \mathbf{T}_{a,b}^{i0}$ mátrixelemek pozitívak, a

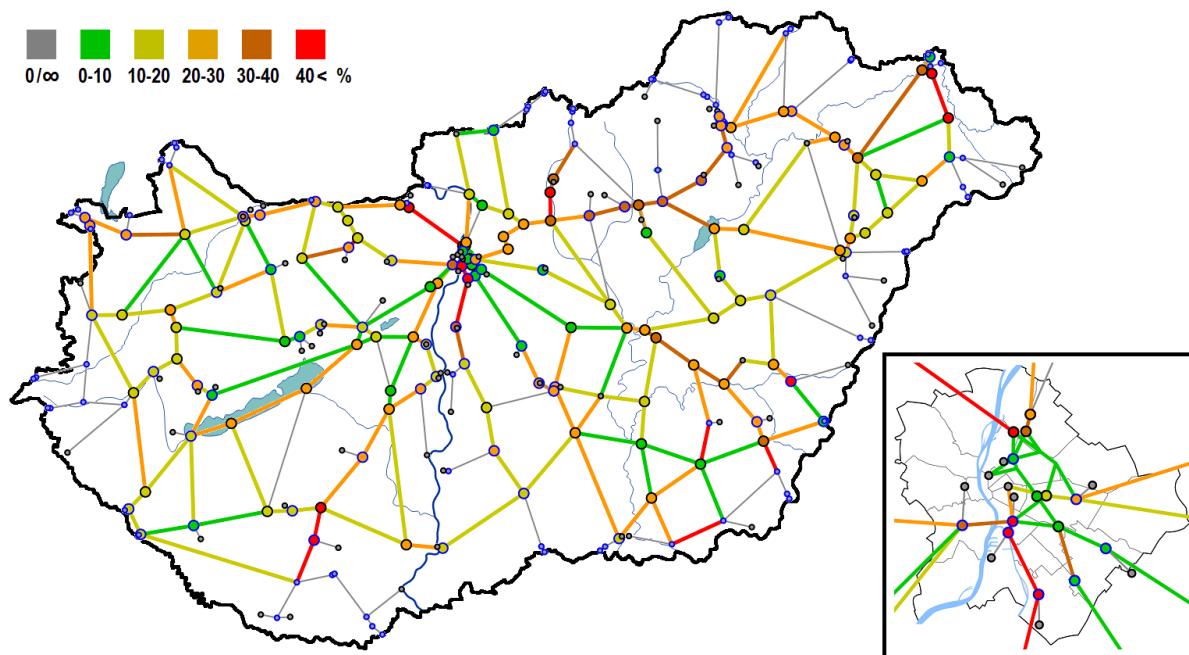
$$\tilde{t}_{10} = 100 \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} \mathbf{T}_{a,b}^{i0}}{\sum_{\langle a,b \rangle} \mathbf{T}_{a,b}^{00}} - 100 \quad (3)$$

kifejezés megmutatja, hogy az adott állomás zavara átlagosan hány százalékos menetidőnövekedést eredményez az állomást a zavarmentes hálózatban érintő minimális menetidejű menetvonalakon a zavarmentes hálózatbeli menetidőkhöz képest.

Hasonlóan, a j -edik állomásköz zavarának hatására a $\Delta T_{a,b}^{0j} > 0$ feltételt teljesítő $\langle a,b \rangle$ állomáspárok esetében az érintett menetvonalak menetidőinek átlagos növekedése százalékosan kifejezve:

$$\tilde{t}_{0j} = 100 \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} T_{a,b}^{0j}}{\sum_{\langle a,b \rangle} T_{a,b}^{00}} - 100. \quad (4)$$

A kapott eredményeket a 4. ábrán láthatjuk.



4. ábra Az egyes állomások és állomásközök kiesése által az azokat érintő viszonylatokon okozott átlagos menetidőnövekedés százalékban. A kék szegélyű állomások bármelyikének elhagyásával a gráf két részgráfra esik szét. (saját szerkesztés)

Mivel itt nem percekről, hanem százalékokról beszélünk, ezért a hosszú menetvonalakon a nagy menetidőnövekedést okozó zavarok az igazán kritikusak, míg egy rövid menetvonalon sokkal kisebb menetidőnövekmény is kritikus lehet.

A hosszú menetvonalak a minimális menetidő követelménye miatt nagy részben a nagy engedélyezett sebességű országos fővonalakon futnak. Éppen ezért ezek állomásközeinek vagy a rajtuk fekvő állomásoknak a zavara, különösen ha csak alacsony sebességgel bejárható mellékvonalak képeznek kerülőirányt, jelentős menetidőnövekedést okoznak már viszonylag kis útnövekedés mellett is. Ilyen állomás például Angyalföld, Soroksári út, Godisa vagy Dombóvár, állomásköz pedig a Békéscsaba–Kétegyháza, a Környe–Tatabánya vagy a Ferencváros–Soroksár vonalszakasz. Ez utóbbi a 150-es, Budapest–Kelebia vonal része, mely eredetileg 100 km/h engedélyezett sebességű volt [37], de jelenleg szinte teljes hosszán csak 80 km/h sebességgel járható. A vonal 160 km/h engedélyezett sebességűre (és kétvágányúra) való átépítése után [37] a 4. ábrán látható helyzete csak romlani fog, hiszen míg a vonalat érintő minimális menetidejű menetvonalak száma emiatt várhatóan növekedni fog, a zavar esetén igénybe vehető alternatív útirányok paraméterei változatlanok maradnak, ami nagyobb arányú menetidőnövekedést eredményez.

A kilométerben rövid, mellékvonali menetvonalak zavara esetében ezen felül még a sokszor akár több mint kétszer olyan hosszú, lassan bejárható kerülőút miatt is drasztikusan növekszik a menetidő. Ezt láthatjuk például Vésztő vagy Vásárosnamény állomás és a Békéscsaba–Kétegyháza vagy a Kisszénás–Orosháza állomásköz esetében.

Ez a néhány kiragadott példa azonban csak a jéghegy csúcsát jelenti. A 4. ábrán zölddel jelölt állomásközök száma, azaz melyek zavara legfeljebb 10%-os menetidőnövekedést okoz, töredéke az összes állomásköz számának. Ez az eredmény is rávilágít a magyarországi vasúthálózat azon hiányosságára, miszerint „a vasúthálózat minőségi jellemzőit tekintve az egyik legnagyobb lemaradás az engedélyezett sebességek területén figyelhető meg.” [38] A szélsőséges példa a Békéscsaba–Kétegyháza vonalszakasz, melynek kiesése átlagosan majdnem kétszeres menetidőnövekedést okoz, hiába sűrűbb ezen régió mellékvonali hálózata az országos átlagnál.

Zavar hatása az érintett menetvonalak hosszára

A menetidők esetéhez hasonlóan definiálhatjuk a $\Delta \mathbf{L}^{i0} = \mathbf{L}^{i0} - \mathbf{L}^{00}$ és a $\Delta \mathbf{L}^{0j} = \mathbf{L}^{0j} - \mathbf{L}^{00}$ mátrixokat. Ismét csak azokat az $\langle a, b \rangle$ állomáspárokat figyelembe véve, melyekre az i -edik állomás vagy a j -edik állomásköz zavarának hatására $\Delta \mathbf{L}_{a,b}^{i0} > 0$ vagy $\Delta \mathbf{L}_{a,b}^{0j} > 0$, meghatározhatjuk az adott állomást vagy állomásközt a zavarmentes hálózatban érintő minimális hosszúságú menetvonalak hosszának a zavar hatására történő átlagos növekedését (vagyis elhagyva azokat az $\langle a, b \rangle$ állomáspárokat, melyekre $\mathbf{L}_{a,b}^{i0} = \mathbf{L}_{a,b}^{00}$ vagy $\mathbf{L}_{a,b}^{0j} = \mathbf{L}_{a,b}^{00}$ és így $\Delta \mathbf{L}_{a,b}^{i0} = 0$ vagy $\Delta \mathbf{L}_{a,b}^{0j} = 0$, azaz a zavar által nem érintetteket; és azokat, melyekre bár $\mathbf{L}_{a,b}^{00} \neq 0$, de $\mathbf{L}_{a,b}^{i0} = 0$ vagy $\mathbf{L}_{a,b}^{0j} = 0$ és így $\Delta \mathbf{L}_{a,b}^{i0} < 0$ vagy $\Delta \mathbf{L}_{a,b}^{0j} < 0$, azaz amikor a zavar hatására az a és a b állomás elérhetetlen lesz egymás számára). Az i -edik állomást (a zavarmentes és a zavart gráfban is) érintő minimális hosszúságú menetvonalak darabszámát jelöljük N_ℓ^{i0} -lel, a j -edik állomásközt érintők darabszámát pedig N_ℓ^{0j} -lel.

A menetvonalhossz-értékek nominális növekedése

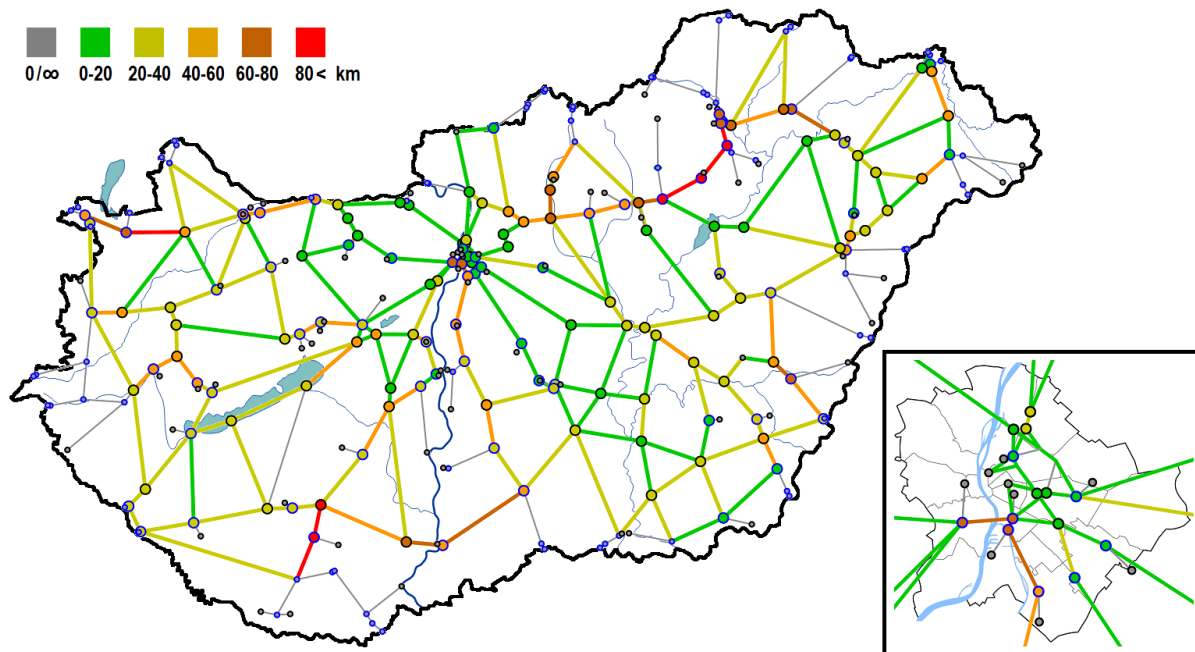
Hasonlóan az menetidők esetében bemutatottakhoz, a $\Delta \mathbf{L}^{i0}$ mátrixnak a pozitív elemeit összeadva és az összeget az adott állomáson áthaladó minimális hosszúságú menetvonalak számával leosztva megkapjuk az i -edik állomást a zavarmentes hálózatban érintő minimális hosszúságú menetvonalak hosszának km-ben mért átlagos növekedését az adott állomás zavara esetén:

$$\ell_{i0} = \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} \Delta \mathbf{L}_{a,b}^{i0}}{N_\ell^{i0}}. \quad (5)$$

Hasonlóan a j -edik állomásközre (csak a $\Delta \mathbf{L}_{a,b}^{0j} > 0$ feltételt teljesítő $\langle a, b \rangle$ állomáspárok figyelembe vételével):

$$\ell_{0j} = \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} \Delta \mathbf{L}_{a,b}^{0j}}{N_\ell^{0j}}. \quad (6)$$

A számolások eredménye az 5. ábrán látható.



5. ábra Az egyes állomások és állomásközök zavarának hatására történő nominális menetvonalhossz-növekedés. A kék szegélyű állomások bármelyikének elhagyásával a gráf két részgráfra esik szét. (saját szerkesztés)

Ahogy a menetidőknél említésre került, nem mindegy, mennyivel hosszabb egy menetvonal, még akkor sem, ha nagy sebességgel járható be. Ha egy állomás vagy állomásköz zavara átlagosan több mint száz kilométerrel hosszabb kerülőutat eredményez (ötöt ilyen van, Godisa, Dombóvár, Mezőkeresztes-Mezőnyárad, Füzesabony és Nyékládháza; Dombóvár–Godisa, Godisa–Szentlőrinc, Füzesabony–Mezőkeresztes-Mezőnyárad, Mezőkeresztes-Mezőnyárad–Nyékládháza és Miskolc–Nyékládháza) az egyértelműen a mellékvonali kerülőutak hiányára utal. Így Godisa zavara esetén Gyékényes érintésével (és irányváltással [39]), Dombóvár kiesésével pedig a Balaton déli partján való közlekedéssel oldható csak meg a zavart állomás elkerülése (ugyanaz igaz a Dombóvár–Godisa és a Godisa–Szentlőrinc állomásközökre).

Soroksári út állomás, a Ferencváros–Soroksári út és a Soroksár–Soroksári út állomásközök zavara esetében Kecskeméten át lehet csak kerülni [39], ami jól mutatja például egy Délegyháza–Dabas vonal hiányát. Ennek megvalósulására azonban a megművelt V0 vasútvonal megépítése nélkül semmi esély nem látszik, annak ellenére, hogy ez „katonai szempontból is meghatározó vonal.” [40]

A menetvonalhosszak százalékos növekedése

A menetidőket tárgyaló alfejezetben elmondottakhoz hasonlóan itt is figyelembe kell vennünk, hogy például egy 40 kilométeres menetvonalhossz-növekedés nem ugyanazt a hatást jelenti két, a zavarmentes hálózatban egymástól 20 kilométerre és két, egymástól 200 kilométerre található állomás esetében. Célszerű tehát az átlagos menetvonalhossz-növekedést is százalékosan kifejezni. Ehhez ismét csak azon $\langle a, b \rangle$ állomáspárokat vesszük figyelembe, melyekre a $\Delta L_{a,b}^{i0}$ mátrixelemek pozitívak, és így a

$$\tilde{\ell}_{i0} = 100 \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} L_{a,b}^{i0}}{\sum_{\langle a,b \rangle} L_{a,b}^{00}} - 100 \quad (7)$$

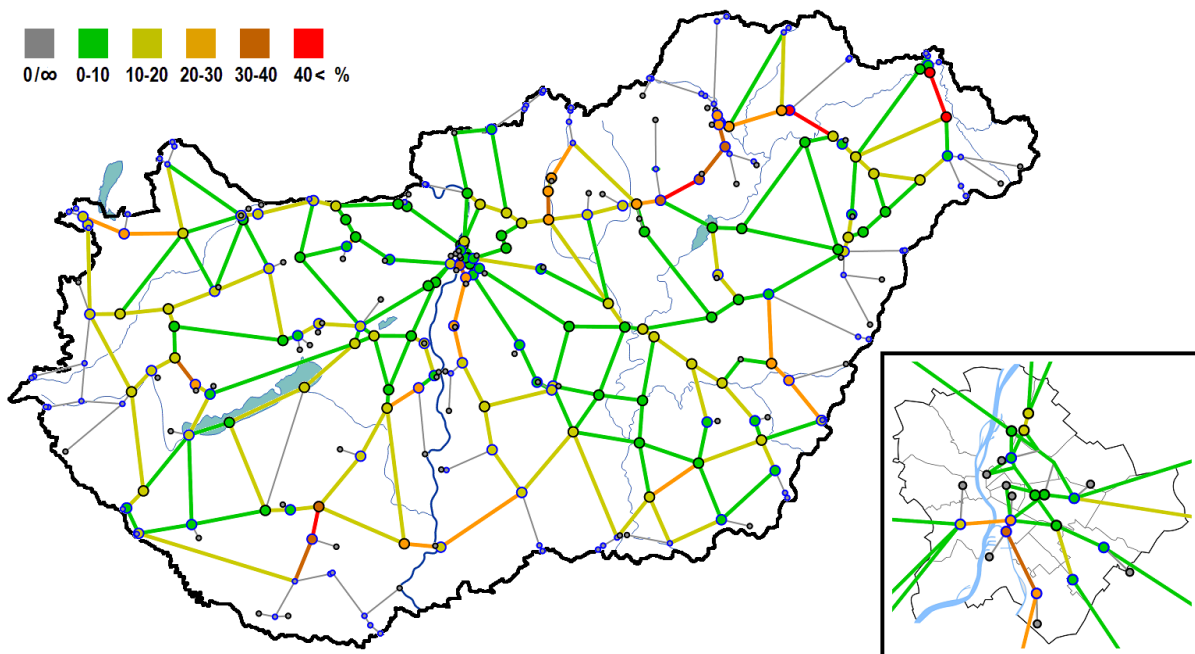
kifejezés megmutatja, hogy az adott állomás zavara átlagosan hány százalékos menetvonalhossz-növekedést eredményez az állomást a zavarmentes hálózatban érintő minimális hosszúságú menetvonalakon a zavarmentes hálózatbeli menetvonalhosszhoz képest.

Hasonlóan, a j -edik állomásköz zavarának hatására a $\Delta L_{a,b}^{0j} > 0$ feltételt teljesítő $\langle a,b \rangle$ állomáspárok esetében a zavarmentes hálózathoz képest a minimális hosszúságú menetvonalak hosszai átlagosan

$$\tilde{\ell}_{0j} = 100 \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} L_{a,b}^{0j}}{\sum_{\langle a,b \rangle} L_{a,b}^{00}} - 100 \quad (8)$$

százalékkal nőnek meg.

A kapott eredményeket a 6. ábrán láthatjuk.



6. ábra Az egyes állomások és állomásközök kiesése által az azokat érintő viszonylatokon okozott átlagos menetvonalhossz-növekedés. A kék szegélyű állomások bármelyikének elhagyásával a gráf két részgráfra esik szét. (saját szerkesztés)

A zavaruk esetén nagy arányú menetvonalhossz-növekedést kiváltó állomások és állomásközök okozhatnak hosszú menetvonalakon nagy útnövekedést, mint például Godisa és Dombóvár állomások (mindkettő zavara esetében Gyékényes az érintendő kerülőállomás [39]) vagy Füzesabony állomás (amit csak a 100-as vonalon lehet elkerülni). A Ferencváros–Soroksári út (kerülő Kecskeméten át), a Füzesabony–Mezőkeresztes–Mezőnyárád (kerülő a 100-as vonalon [39]) vagy az Ukk–Uzsa állomásköz (amit elkerülni legrövidebb úton Nagykanizsa érintésével lehet) esetében is hasonló a helyzet.

Okozhatnak azonban rövid menetvonalakon is kilométerben rövid, de arányaiban annál jelentősebb növekményt, mint például Mándok és Vásárosnamény állomások (kerülőút Nyíregyházán át), vagy Vésztő állomás, illetve a Mándok–Vásárosnamény állomásköz (melyek szintén Nyíregyházán át kerülhetők el).

KÖVETKEZTETÉSEK

A cikkben a magyarországi vasúthálózatot leíró élsúlyozott irányított gráf segítségével bemutattam az állomások és állomásközök zavarának hatását az őket érintő menetvonalak hosszára és menetidejére.

A menetvonalhosszakban jelentős növekedést olyan állomások és állomásközök zavara okoz, melyekhez csak nagy kerülőt jelentő alternatív útvonalak találhatók, azaz hiányoznak a rövid mellékvonali kerülőirányok. Ez a helyzet különösen Godisa és Dombóvár, illetve a 80-as fővonal esetében érzékelhető.

Nagy menetidő növekedést egy kilométerben jóval hosszabb, de azonos engedélyezett sebességű mellékvonali kerülőirány mellett már egy kilométerben nem sokkal hosszabb, de sokkal kisebb engedélyezett sebességű vonalszakasz alternatív útvonalként való igénybevétele is okozhat. Általánosan elmondható, hogy a mellékvonali hálózat elemein engedélyezett sebességek lényegesen alacsonyabbak, így a fővonalak sérülése esetén csak aránytalanul hosszabb menetidővel lehet azokat igénybe venni kerülőirányként.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] 234/2011. (XI. 10.) *Kormányrendelet a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról szóló 2011. évi CXXVIII. törvény végrehajtásáról*
- [2] BONNYAI, T.: *A kritikus infrastruktúra védelem fogalmi rendszere, hazai és nemzetközi szabályozása*; Pályamunka a Belügyminisztérium Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság Katasztrófavédelmi Tudományos Tanács pályázatán
- [3] HORVÁTH, A.: *A közúti, vasúti és vízi közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői* In: TÁLAS P. (szerk.): *Válaszok a terrorizmusra II.*; Mágustúdió, Budapest, 2006., 321-336. o.
- [4] HORVÁTH, A.: *A vasúti közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői a városokban*; Hadmérnök IV. 3. (2009) 180-189. o.
- [5] HORVÁTH, A.: *A kritikus infrastruktúra védelem komplex értelmezésének szükségessége* In: HORVÁTH, A. (szerk.): *Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből*; Magyar Hadtudományi Társaság, Budapest, 2013., 18-37. o. (ISBN 978-963-08-6926-3)
- [6] SZÁSZI, G.: *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 978-963-08-6926-3)
- [7] KÜZDY, G.: *A lassújelek felszámolásának jelentősége*; Sínek Világa 2012/2, 8-11. o.
- [8] SZÁSZI, G.: *Nagyfolyami vasúti hidak, mint közlekedési létfontosságú rendszerelemek* In: HORVÁTH, A.; BÁNYÁSZ, P.; ORBÓK, Á. (szerk.): *Fejezetek a létfontosságú közlekedési rendszerelemek védelmének aktuális kérdéseiről*; Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest, 2014. 27-46. o. (ISBN 978-615-5305-30-6)
- [9] HOMOLYA, R.: *Magyarország folyamatban lévő és tervezett közlekedési beruházásai*; <http://www.ktenet.hu/download.php?edid=1483> (letöltve: 2017.10.04.)
- [10] 2005. évi CLXXXIII. *törvény a vasúti közlekedésről*
- [11] TÓTH, B.: *Állomások és állomásközök zavarának gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton*; Hadmérnök XII. 4. (2017)

- [12] http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_odmv004.html (letöltve: 2017.10.04.)
- [13] SZÁSZI, G.: *Long-span railway bridges in the transport system of Hungary*; *Hadmérnök* VIII. 2. (2013) 98-107. o.
- [14] HAJNAL, P.: *Gráfelmélet*; Szegedi Egyetemi Kiadó Polygon, Szeged, 2017. (ISSN 1417-0590)
- [15] *F. 2. sz. Forgalmi Utasítás*; MÁV ZRt. Pályavasúti Üzletág Forgalmi Főosztály; 22-23. o.
- [16] http://www.vpe.hu/takt/vonal_lista.php (letöltve: 2017.10.04.)
- [17] 277/2014. (XI. 14.) *Kormányrendelet a vasúti közlekedési hatóság által kiszabható bírság mértékéről és megfizetésének részletes szabályairól*
- [18] <https://www.google.hu/maps/>
- [19] SZÁSZI, G.: *A védelmi szempontból meghatározó repülőterek vasúti kapcsolatának helyzete Magyarországon*; *Repüléstudományi Közlemények* (1997-től) XXI. Különszám (2009) 1-22. o.
- [20] SZÁSZI, G.: *Katonai vasúti szállítások a Magyar Honvédség missziós feladatainak rendszerében*; *Szolnoki Tudományos Közlemények* XIV. (2010) 101-118. o.
- [21] SZÁSZI, G.: *Transz Európai Közlekedési Hálózat (TEN-T) tervezett fejlesztési iránya, várható hatása Magyarország vasúthálózatának fejlesztésére*; *Szolnoki Tudományos Közlemények* XVI. (2012) 402-425. o.
- [22] *Trans-European transport network - TEN-T priority axes and projects 2005*; European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2005., 72. o. (ISBN 92-894-9837-4)
- [23] SZÁSZI, G.: *Jász-Nagykun-Szolnok megye vasúthálózatának védelmi szempontú elemzése*; *Szolnoki Tudományos Közlemények* XIII. (2009) 101-125. o.
- [24] TENCZER, G.: *Mikor fogunk itthon százhatvannal vonatozni?*; http://index.hu/belfold/2017/01/31/mikor_fogunk_itthon_szazhatvannal_vonatozni/ (letöltve: 2017.10.04.)
- [25] *F. 2. sz. Forgalmi Utasítás függelékei, 15. sz. függelék*; MÁV ZRt. Pályavasúti Üzletág Forgalmi Főosztály, 101. o.
- [26] *2016/2017. menetrendi időszakra vonatkozó Hálózati Üzletszabályzat a MÁV Zrt. és a GYSEV Zrt. nyílt hozzáférésű vasúti pályahálózata igénybevételének feltételeiről, 3.3.1.1 melléklet*; <https://www2.vpe.hu/hu/hatalyos-husz-2016-2017> (letöltve: 2017.10.04.)
- [27] SZÁSZI, G.: *Magyarország közlekedési infrastruktúrájának fejlesztése napjainkban: Közút vagy vasút?*; *Katonai Logisztika* 15. 2. (2007) 32-59. o.
- [28] KÁLMÁN, L.: *Budapest vasúti közlekedésének fejlesztése - Vasút a Duna alatt (I. rész)*; *Sínek Világa* 2011/4, 16-20. o.
- [29] SZILY, I.; SZABÓ, L.: *Vasúti üzemtan II.*; Széchenyi István Egyetem - Universitas-Győr Kht. (Győr), 2006., 234. o.
- [30] ERCSEY, Z.; KISTELEKI, M.; VINCZE, T.: *Lassújelek hatásai a vasúti közlekedés költségeire 2. rész*; *Vasútépészet* 2012/3. 16-19. o.

- [31] *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/>*
- [32] CSARDI, G., NEPUSZ, T.: *The igraph software package for complex network research*; InterJournal, Complex Systems 1695. 2006. <http://igraph.org>
- [33] DIJKSTRA, E. W.: *A Note on Two Problems in Connexion with Graphs*; Numerische Mathematik I. (1959) 269-271. o. (DOI 10.1007/BF01386390)
- [34] Lukács, O.: *Matematikai statisztika (Bolyai-sorozat)*; Műszaki, Budapest, 1999. 41. o.
- [35] <https://www.mavcsoport.hu/mav-start/belfoldi-utazas/2016-2017-evi-menetrend> (letöltve: 2017.10.04.)
- [36] FERENCI, T.: *A magyar vasúti infrastruktúra gráfelméleti elemzése*; <http://www.medstat.hu/anyagok.html> (letöltve: 2017.10.04.)
- [37] BALOGH, I.: *A X/B páneurópai vasúti közlekedési folyosósármány*; Közlekedéstudományi Szemle, 67. 2. (2017) 53-65. o.
- [38] LAKATOS, P., SZÁSZI, G, TAKSÁS, B: *A logisztikai infrastruktúra szerepe a regionális versenyképesség alakításában* In: CSATH, M. (szerk.): *Regionális versenyképességi tanulmányok*; NKE Szolgáltató Nonprofit Kft., Budapest, 2016., 181-228. o.
- [39] FELLER, T; HÍDVÉGI, G.; KÖLLER, L.: *A nemzetgazdaság és nemzetbiztonság által igényelt „kritikus infrastruktúra” hálózatok komplex szemléletű vizsgálata (tanulmány)*; Budapest, 2010.
- [40] SZÁSZI, G.: *A vasúti hálózati infrastruktúrával szemben támasztott újszerű védelmi követelmények kutatása, a továbbfejlesztés feltételrendszerének vizsgálata (Doktori értekezés)*; Nemzeti Közszolgálati Egyetem, katonai Műszaki Doktori Iskola, Budapest, 2013. (DOI: 10.17625/NKE.2014.028)