

Forgalmatlan, de nélkülözhetetlen – a magyarországi vasúthálózat redundanciavizsgálata

Dr. Tóth Bence

Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztviselői Kar
telefon: 1 / 432 9000 (29260)
e-mail: toth.bence@uni-nke.hu

Kivonat: A magyarországi vasúthálózatban kiemelt jelentőségűek a nagy forgalmat bonyolító vonalak, hiszen gazdaságilag is fontos ezek megfelelő műszaki állapotban tartása és zavar elleni védelme. Zavar azonban bármikor bekövetkezhet és akkor a forgalmat a lehető legrövidebb kerülőúton és/vagy a legkisebb menetidőnövekedéssel kell továbbítani. Ezek a kerülőutak pedig sokszor olyan mellékvonalakon vezetnek, melyek a napi forgalomban csak alacsony kihasználtsággal vesznek részt. A kerülőútként számításba jövő vonalszakaszok azonosítására az úgynevezett redundanciát használtam. Ehhez első lépésben meghatároztam a hálózat zavarmentes állapotában minden állomáspár között a legrövidebb útvonalat. Ezután megkerestem az egyes, legrövidebb útvonalon fekvő vonalszakaszok forgalomból való teljes kizárása esetén a legrövidebb kerülőutat (a v vonalszakasz kizárása esetében a megnövekedett menetvonalhossz- és menetidőértékek ℓ^v és t^v). A kerülőút azon u szakaszait is kizárva a forgalomból, melyek a zavarmentes hálózatban nem voltak részei a legrövidebb útnak, a zavart hálózatbeli legrövidebb út hossza tovább nő (ℓ^{uv} és t^{uv}). Ezen mennyiségek segítségével meghatározható az u vonalszakaszhoz a v vonalszakaszhoz adott redundanciája az adott a és b állomás közti útvonalra:

$$r_{\ell,ab}^{uv} = \ell_{ab}^{uv} - \ell_{ab}^v, \quad r_{t,ab}^{uv} = t_{ab}^{uv} - t_{ab}^v.$$

Ezen értékeket összegezve minden $\langle a,b \rangle$ állomáspárra és minden v vonalszakaszra megkapjuk az u vonalszakaszhoz a teljes hálózathoz nyújtott r^{uv} redundanciáját.

Az eredmények azt mutatják, hogy a 80-as vonal Miskolc és Nyíregyháza közti, nagyobb részt egyvágányú szakasza a hálózathoz legjelentősebb redundanciát biztosító vonala. A 100/100a és a 80/80a vonalak egymás számára biztosítják a redundanciát a transzverzális mellékvonalakon keresztül.

A 2-es és a 4-es vonalak az 1-es vonal és különösen az Összekötő vasúti híd számára nyújthatnának redundanciát megfelelő műszaki állapot és áteresztőképesség esetén. A 77-es vonal a Nyíregyháza és Szeged felől Szob irányába lenne megfelelő kerülőút.

Kulcsszavak: kritikus infrastruktúra, vasúthálózat, redundancia, gráfelmélet

Bevezetés

Nem csak azt kell védeni, ami közvetlenül veszélyeztetett. Budapesten az Összekötő vasúti hídon engedély nélkül tilos az átjárás, fegyveres őrök védik, hiszen ez a magyarországi vasúthálózat legneuralgikusabb pontja: zavarára az egész hálózat érzékenyen reagál. Ugyanakkor a Kelenföld-Ferencváros állomásköz többi, kisebb hídja vagy a Dombóvári út és a Hamzsabégi út menti nyílt pálya egyáltalán nincs védve. Ezek rombolása, megzavarása vagy akár csak az állomásköz egyik vágányának használhatatlanná válása egy meghibásodás miatt, szintén jelentős hatással lenne az ország vasúti közlekedésére. Tisztában kell tehát lenni a legvédehetőbb hálózati elemek zavara esetén igénybe vehető kerülőutakkal és ezek védelméről is gondoskodni kell.

A következőkben tárgyalom az ezen hálózati elemek azonosítására felállított matematikai modellt, majd a számítási módszerek ismertetése következik, végül a kapott eredményeket és az ezekből levonható következtetéseket mutatom be.

1. A magyarországi vasúthálózat gráfmodellje

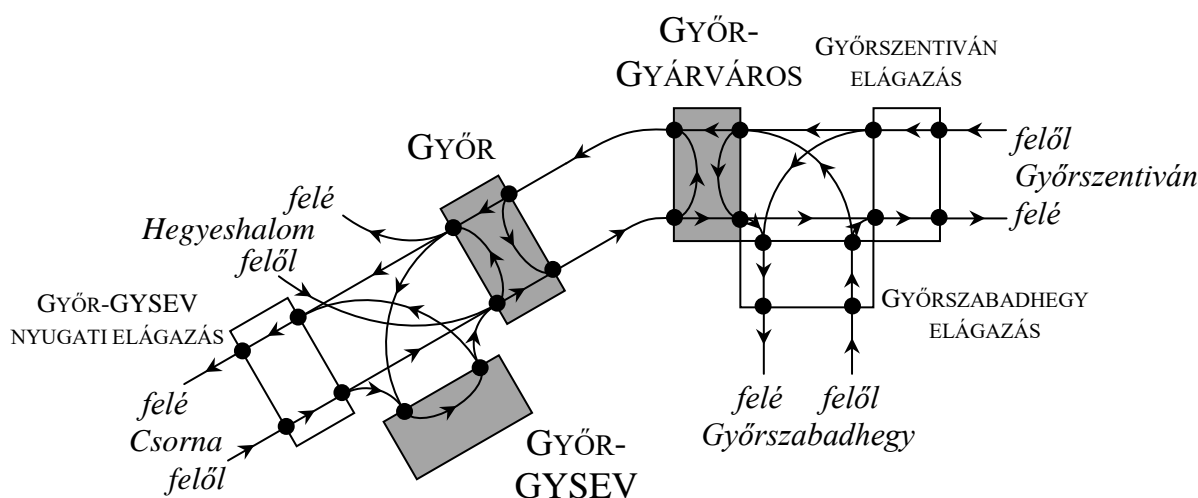
A magyarországi vasúthálózat modellezésére egy élsúlyozott gráfot [1] használtam, melyben az egyes csúcsok állomásokat, az élek pedig a közöttük levő vasútvonal-szakaszokat reprezentálták. A modell részletes leírása egy korábbi cikkben megtalálható [2], itt annak csak a lényegesebb elemei kerülnek bemutatásra.

A modellben nem szerepelnek a nyílt vonali megállóhelyek, csak állomások, ahol irányváltásra is lehetőség van. Ezek közül sem mindet tartalmazza a modell, csak az elágazó- és csatlakozó állomásokat, a zsákvonalak végpontjait, a határátmeneteket, valamint az ez utóbbiakat közvetlenül megelőző állomásokat. Mivel nem minden állomás része a modellnek, az „állomásköz” kifejezést a gráfelméleti „él” értelemben használom két, állomást reprezentáló csúcs között. Egy „él” tehát sok esetben több valódi állomásközt jelent a vonalszakasz közbenső állomásai nélkül.

Az egyes élekhez rendelt súlyok vagy az állomásközök hosszai voltak kilométerben, vagy az adott állomásközre érvényes maximális engedélyezett sebesség alapján számított menetidők percben. Az egyes állomások egymástól mért távolságainak fő forrása a Vasúti Pályakapacitás-elosztó Kft. (VPE Kft.) weblapján [3] elérhető értékek voltak. Néhány, itt nem szereplő iparvágány hosszadata a vonatkozó kormányrendelet [4] alapján lett a modellbe beépítve. Az állomások közötti menetidők ezen távolságadatok és az engedélyezettsebesség-értékek [3] alapján lettek meghatározva. Ebből az is következik, hogy ezek a menetidő-értékek egy alsó korlátot jelentenek, melyek még a tiszta menetidőnél is alacsonyabbak. Ahol kisebb engedélyezettsebesség-érték vonatkozott a nagyobb tengelyterhelésű vagy a mozdonyal továbbított szerelvényekre, ott ezt az alacsonyabb sebességértéket vettem alapul a számolásokhoz [5].

Az állomási irányváltásoknál (ahol erre szükség volt) minden alkalommal egy előre meghatározott értéket, 15 percet [6],[7] adtam hozzá a teljes menetidőhöz. Ennek érdekében minden állomást (pontosabban minden elágazást, a deltavágányok egyes kitérőit is) négy csúcsként kezeltem. Például Győr állomás esetében (lásd az 1. ábrát) annak kezdő- és végpontján is definiáltam egy „érkező” és egy „induló” csúcsot, melybe, illetve melyből a szomszédos állomásokat reprezentáló csúcsokba, illetve csúcsokból a gráf élei be- és kifutnak. Az irányváltás időigényét egy, a kezdőponti „érkező” és „induló”, illetve egy, a végponti „érkező” és „induló” csúcsok közötti 15 perc súlyú éllel reprezentáltam. Emellett szükséges még a gráf egyes éleinek irányítása is [1], hogy az „induló” csúcsok biztosan induló csúcsokként, az „érkezők” pedig érkezőkként funkcionáljanak és ne legyen lehetséges irányváltás a 15 perc súlyú él elkerülésével. Éppen ezért szükséges volt az állomásközöket reprezentáló élek megkettőzése: két szomszédos állomás esetében az állomásköz egyik irányított éle az egyik állomásnak az adott állomásközhez tartozó „induló” csúcsából mutat a másik állomás megfelelő „érkező” csúcsába és vice versa. Egy „induló” csúcsot természetesen akármennyi, másik állomáshoz tartozó „érkező” csúccsal összeköthet egy-egy irányított él és egy „érkező” csúcsba bármennyi, másik állomás „induló” csúcsából mutató él mutathat.

Az állomásokon való áthaladáshoz 0 perc és 0 km súlyt, az irányváltáshoz pedig 0 km súlyt rendeltem. Deltavágányon önmagában, állomásra való behaladás nélkül, irányváltás nem lehetséges, csak áthaladás, ezért ezek esetében, bár szintén négy csúccsal reprezentáltam őket a gráfban, csak áthaladó éleket rendeltem hozzájuk. Fejállomások esetében, ahol csak egy bemeneti és egy kimeneti irány van (és ez a kettő megegyezik), az állomás reprezentálásához elegendő két csúcs és köztük egy 15 perc vagy 0 km súlyú él.



1. ábra: A magyarországi vasúthálózat gráfmodelljének felépítési elvei Győr és néhány környező állomás (szürke) és deltavágány (fehér) példáján szemléltetve.

A számolások alapjául szolgáló gráfban összesen 1136 csúcs található, melyek 291 állomást és 26 deltavágányt írnak le négy (fejállomások esetén két) csúccsal. A gráf összesen 1808 élből áll, melyből 732 él (366 él-pár) szomszédos állomások közti viszonylatot ír le, a többi az állomások „belső szerkezetét” és a deltavágányok kapcsolatait írja le. Mindegyik élhez tartozik tehát két súly; a számítások során természetesen egyszerre csak az egyiket rendelem hozzá az élekhez (az azonos állomásközkhöz tartozó két ellentétesen irányított él súlya megegyezik). Jelöljük a gráfot $G_t^0 = (V, E, W_t)$ -al a menetidőkkel való súlyozás esetén, illetve $G_\ell^0 = (V, E, W_\ell)$ -al távolságsúlyozás esetén, ahol V a csúcsok, E az élek halmaza, W_t és W_ℓ pedig a súlyok halmazai. Ekkor az egyes élekhez tartozó $w_t \in W_t$ és $w_\ell \in W_\ell$ súlyok az egyes élek $w_t(e)$, illetve $w_\ell(e)$ függvényei, ahol $e \in E$.

2. Számítógépes megvalósítás

A bemutatott számolások az R programozási nyelv és környezetben [8] történtek a Csárdi Gábor és Nepusz Tamás által kifejlesztett `igraph` csomag [9] segítségével.

2.1 Legrövidebbút-keresés

Két állomás között a legrövidebb utat menetidő vagy menetvonalhossz szerint Dijkstra algoritmussal [1],[10] határoztam meg, pozitív élsúlyok és viszonylag kis méretű gráfok esetében ugyanis ez a leghatékonyabb eljárás. A módszer az `igraph` csomagban a `distances()` függvényben van implementálva és kizárólag pozitív élsúlyok esetében ez a függvény alapbeállítása szerinti módszer is.

Lefuttatva a legrövidebbút-keresést minden $\langle a, b \rangle$ állomáspárra ($a \neq b$) a menetidő- és a távolságsúlyokkal is, kétszer 42 195 értéket kapunk, mely számértéket jelöljünk N^0 lal. Jelöljük a G_t^0 gráfon az a és a b állomás közötti leggyorsabb út időtartamát t_{ab}^0 -al, a G_ℓ^0 gráfon ezen két állomás közti legrövidebb út hosszát pedig ℓ_{ab}^0 -al.

2.2 Állomásközök zavara

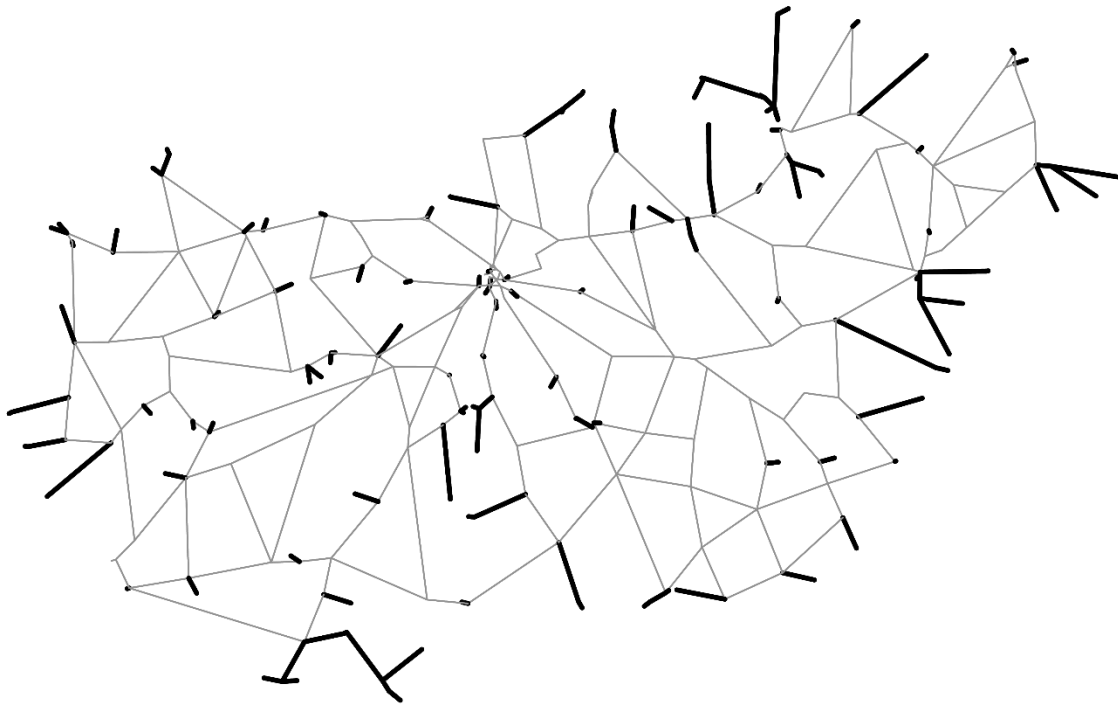
Zavar alatt egy állomásköz hálózatból való teljes kizárását fogom érteni, azaz azt, hogy egyáltalán nem lehet rajta végighaladni. Jelöljük a zavart állomásközt reprezentáló gráfbeli élpárt e -vel, $e \subseteq E$. Az e élpárt nem tartalmazó, időtartamokkal súlyozott gráfot jelöljük $G_t^e = (V, E \setminus e, W_t^e)$ -vel, az e élpárt nem tartalmazó, távolságértékekkel súlyozott gráfot pedig $G_\ell^e = (V, E \setminus e, W_\ell^e)$ -vel, ahol W_t^e és W_ℓ^e a megmaradó élekhez tartozó súlyok halmazai: $W_t^e \subseteq W_t$, $W_\ell^e \subseteq W_\ell$ és az egyes $w_t^e(f)$ és $w_\ell^e(f)$ idő- és távolságsúlyokra pedig igaz, hogy $w_t^e \in W_t^e$, $w_\ell^e \in W_\ell^e$ és $f \in (E \setminus e)$.

3. A redundancia

Egy olyan állomásköz, melynek sérülése esetén a hálózatban lesznek egymás számára elérhetetlen állomások, pótolhatatlan, hiszen nincsen egy, akár rendkívül hosszú, kerülőút sem. Ezen, úgynevezett zsákvonalakhoz tehát egyik állomásköz sem ad, nem tud adni redundanciát, azaz nem kiválthatóak.

Ha egy menetvonal a zavarmentes hálózatban áthalad egy zsákvonal egy u állomásközén, akkor két eset lehetséges. Vagy a zavart hálózatban is keresztülhalad az u állomásközön, és ebben az esetben nincs értelme a redundanciának, hiszen u nem sérült. Vagy a sérült v állomásköz az adott zsákvonal egy másik szakasza, de ebben az esetben már nincs menetvonal, hiszen a célállomás elérhetetlen lett a hálózat legalább egy másik állomása részére és nincs a redundanciát biztosítani képes út vonal.

A magyarországi zsákvonalak elhelyezkedését a 2. ábrán láthatjuk.



2. ábra: A magyarországi vasúthálózat zsákvonalai

3.1 A hálózatrobustussági index

Hálózatok rendszerszintű zavarállóságának kvantitatív jellemzésére gyakran használt globális mérőszám az úgynevezett hálózatrobustussági index (Network Robustness Index, NRI), melyet D. M. Scott és társszerzői [11] vezettek be 2006-ban megjelent cikkükben. Az index a hálózatot reprezentáló gráf minden éléhez hozzárendel egy, a gráf súlyozásától függő számértéket, melyek alapján az egyes élek fontosság szerint rendezhetőek.

A gráf egy tetszőleges u éléhez tartozó hálózatrobustussági index kiszámításához a zavarmentes hálózat összes lehetséges, menetvonal kezdő- és végpontjaként szolgáló állomáspár között meghatározzuk a legrövidebb út hosszát vagy menetidejét és ezeket összeadjuk. A kapott összeget c -vel jelöljük.

Ezután eltávolítjuk a gráfból a v élt, melynek NRI értékére kíváncsiak vagyunk, és ismét meghatározzuk az összes állomáspár között a legrövidebb út hosszát vagy menetidejét és ezeket is összeadjuk. Ezt, a zavart hálózat esetében kapott az összeget c^v -vel jelöljük. Az NRI ezen két összeg különbsége, melyet q^v -vel jelölünk:

$$q^v = c^v - c. \quad (1)$$

A különbségképzés sorrendje azért a fenti, hogy a q^v értékre pozitív szám adódjon, hiszen a legtöbb súlyozás (pl. távolság, idő, költség, stb.) esetében egy él eltávolítása a legrövidebb utak összsúlyait növelni fogja (de legalábbis nem csökkenti). Ez elvégezhető minden $v \in E$ élre, de akár több él, például az u és a v él zavara esetén:

$$q^{uv} = c^{uv} - c, \quad (2)$$

ahol c^{uv} az összes menetvonal összhossza, illetve összmenetideje azon hálózatban, melyben nem szerepel az u és a v él, azaz a G^{uv} gráfon.

Az NRI egy adott állomáspárra vett értéke azt is megmutatja, hogy a két állomás közti legrövidebb út a zavarmentes hálózatban érinti-e a v élt. Ha $q_{ab}^v = 0$, azaz $c^v = c$, az azt jelenti, hogy a v él nem szerepel az a és a b állomások közti optimális úton a G^0 gráfban. Ha $q_{ab}^v > 0$, azaz $c^v > c$, az azt jelenti, hogy a v él törlésének hatására megnőtt a legrövidebb út hossza, illetve menetideje az $\langle a, b \rangle$ állomáspár között a zavarmentes gráfhoz képest, azaz a zavarmentes hálózatban az v él része volt a legrövidebb útnak.

3.2 A redundanciaindex

A hálózatrobusztussági index tehát egy él törlése, azaz egy állomásköz zavara által a teljes hálózaton okozott növekményt méri az adott súlyozás mellett. Egy adott v élnek a hálózatot reprezentáló gráfból való törlése azonban azt is jelenti, hogy a zavarmentes hálózathoz képest a zavart hálózatban egyes állomáspárok közti legrövidebb utak pontos útvonala változni fog: például ha a G^0 gráfban nem haladt keresztül az u élen, a G^v gráfban már át fog. Mekkora további növekménnyel számolhatnánk, ha az u élt is törölnénk a gráfból?

Arra vagyunk tehát kíváncsiak, hogy mekkora teljes növekményt okoz a v mellett az u él törlése is azon állomáspárok közti legrövidebb, illetve leggyorsabb úton, melyek a G^0 gráfban nem haladtak keresztül az u élen, de a G^v gráfban már igen. Ez a növekmény mutatja meg az u élhez adott teljes redundanciát. Azon legrövidebb, illetve leggyorsabb utak, melyek sem a G^0 , sem a G^v hálózatban nem haladtak keresztül az u élen, illetve melyeknek mindkét hálózatban része volt, nem relevánsak, hiszen ezen utak nem érzékenyek a v él törlésére.

Azon utakkal foglalkozunk tehát, melyekre $q^u = 0$. Az r^{uv} redundanciaindex értéke a legrövidebb út hosszának, illetve menetidejének a G^v hálózatbeli értékéhez képesti növekménye lesz a G^{uv} hálózatban:

$$r^{uv} = q^{uv} - q^v = (c^{uv} - c) - (c^v - c) = c^{uv} - c^v. \quad (3)$$

Az összes olyan v élre, mely nem azonos u -val, meghatározva r^{uv} értékét és ezeket összegezve kapjuk az u él által a v élekhez adott teljes redundanciát:

$$r^u = \sum_v r^{uv} = \sum_v (q^{uv} - q^v) = \sum_v (c^{uv} - c^v) \quad (4)$$

Ezt a definíciót Erik Jenelius alkotta meg 2010-ben [12].

3.3 Alkalmazás egyszerűen élösszefüggő gráfokra

A redundanciaindex meghatározásának módjából azonban látszik, hogy ha egy olyan élt törölünk, mely által egy vagy több állomás elérhetetlen lesz a többi állomásból, akkor mind a q^u , mind az r^u értéke végtelenné válik. Az ilyen típusú gráfokat egyszerűen élösszefüggőnek nevezzük, ilyen a magyarországi vasúthálózat is. A G^0 gráf esetében egy él törlése esetén még nem túl sok esetben esik két részgráfra a hálózatunk, két él törlése esetében már jelentősen csökken az értelmezhető eredmények száma. Ha az ilyen állomásközöket kihagyjuk a teljes vizsgálatból, akkor rendkívül kevés élünk marad a gráfban, melyekre tudunk számolni; míg ha csak az éppen aktuális számolásban végtelen eredményt adó éleket hagyjuk ki, minden v él esetében más-más éleket veszünk csak figyelembe, ami viszont az egyes r^u értékek egymással való összehasonlítását torzítja.

Éppen ezért célszerű áttérni az egyes súlyok reciprokterébe: a két pont között meghatározott legrövidebb útnak nem a kilométerben vagy percben vett hosszát, hanem annak reciprokát (1/km vagy 1/min egységekben) használjuk a további számolásokban. Emiatt a két tagot fel kell cserélni a v re való szummázás mögött a (4) kifejezéshez képest, hogy a redundanciaindex pozitív maradjon, hiszen a reciproktérben a hosszabb utaknak kisebb értékek felelnek meg.

Az egyes redundanciaindexeket összegezve minden v élre megkapjuk az egyes u élek teljes redundanciáját:

$$\sum_v r_\ell^{uv} = \sum_v (c_\ell^{v'} - c_\ell^{uv'}) = \sum_v \left(\sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{\ell_{ab}^v} - \sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{\ell_{ab}^{uv}} \right), \quad (5)$$

$$\sum_v r_t^{uv} = \sum_v (c_t^{v'} - c_t^{uv'}) = \sum_v \left(\sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{t_{ab}^v} - \sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{t_{ab}^{uv}} \right). \quad (6)$$

Ugyanakkor informatívabb, és ezért célszerűbb is ehelyett a zavarmentes hálózatbeli össz-menetvonalhosszra, illetve összmenetidőre normálni ezeket az értékeket, azaz c_ℓ -lel vagy c_t -vel leosztani a kapott összeget:

$$r_{\ell}^{uv'} = \frac{\sum_v r_{\ell}^{uv'}}{c_{\ell}'} = \frac{\sum_v (c_{\ell}^{v'} - c_{\ell}^{uv'})}{c_{\ell}'} = \frac{\sum_v \left(\sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{\ell_{ab}^v} - \sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{\ell_{ab}^{uv'}} \right)}{\sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{\ell_{ab}^0}}, \quad (7)$$

$$r_t^{uv'} = \frac{\sum_v r_t^{uv'}}{c_t'} = \frac{\sum_v (c_t^{v'} - c_t^{uv'})}{c_t'} = \frac{\sum_v \left(\sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{t_{ab}^v} - \sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{t_{ab}^{uv'}} \right)}{\sum_{\langle a,b \rangle} \frac{1}{t_{ab}^0}}, \quad (8)$$

Ezt a mennyiséget fogom az adott vonal teljes redundanciájának vagy csak egyszerűen redundanciájának nevezni.

Belátható azonban, hogy ha egy tetszőleges, a és b állomást összekötő (a, b) élt, melynek súlya $w(ab)$, úgy helyettesítünk egy (a, c) és egy (c, b) éllel, hogy $w(ac) + w(cb) = w(ab)$, akkor mindkét új élnek azonos lesz a redundanciája az eredeti (a, b) élével (és emellett az élek számának változása miatt az összes többi él redundanciaértéke is módosul), ez azonban a szummázásnál módosít(hat)ja az egyes élek teljes redundanciaértékeit. Éppen emiatt fontos az eredmények értelmezésénél szem előtt tartani, hogy a teljes redundancia abszolút értékben nem mond semmit az egyes élekről önmagukban, hanem az egymáshoz való viszonyukat mutatja meg a hálózaton belül. Vagyis hálózatok egymás közti összehasonlításában nem használható, csak egy hálózaton belül rangsorolhatók az egyes élek.

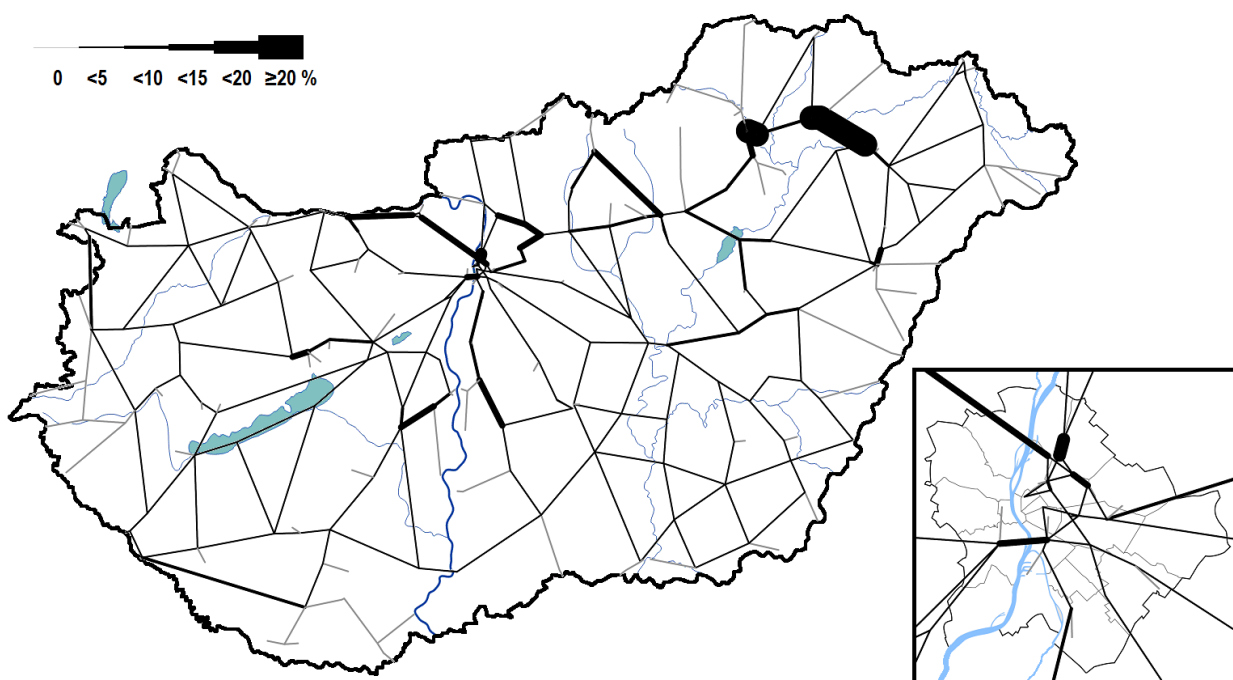
Az r^u redundanciaindex tehát aszerint rangsorolja az éleket, hogy az egyes v élek zavara esetén az u él felé kerülő legrövidebb, illetve leggyorsabb utak hossza összesen mennyire nőne meg a többi élhez viszonyítva, ha az u él is kiesne a rendszerből.

4. A magyarországi vasúthálózat redundanciát biztosító elemei

Ezek után nézzük meg, melyek a magyarországi vasúthálózat azon elemei, melyek az egyes vonalszakaszok zavara esetében a legrövidebb kerülőutakat biztosítják az állomáspárok közti utak számára.

4.1 Minimális hosszúságú menetvonalak

A G_{ℓ}^0 gráf minden u élére meghatározva az $r_{\ell}^{u'}$ index értékét a 3. ábrán látható eredményeket kapjuk.



3. ábra: A magyarországi vasúthálózat állomásközeinek relatív redundanciaértékei minimális hosszúságú menetvonalak esetében.

Azt látjuk, hogy a legnagyobb teljes redundanciája a 80-as vonalon fekvő (egyvágányú) Görögcsallás és Mezőzombor közti vonalszakasznak van ($r_t' = 32\%$), azaz ez a szakasz az, amely sérülése a kerülőutak legnagyobb arányú növekedését eredményezné (megjegyzendő, hogy ezen a vonalszakaszon található a tokaji Tisza híd is). A vonalszakasz redundanciájának 84%-át a 80-as vonal Füzesabony–Miskolc szakasza adja, azaz ennek kiváltásához járul hozzá leginkább: mindkettő zavara esetén az eredetileg a 80-as vonalon haladó menetvonalak harmadukkal hosszabbak lennének.

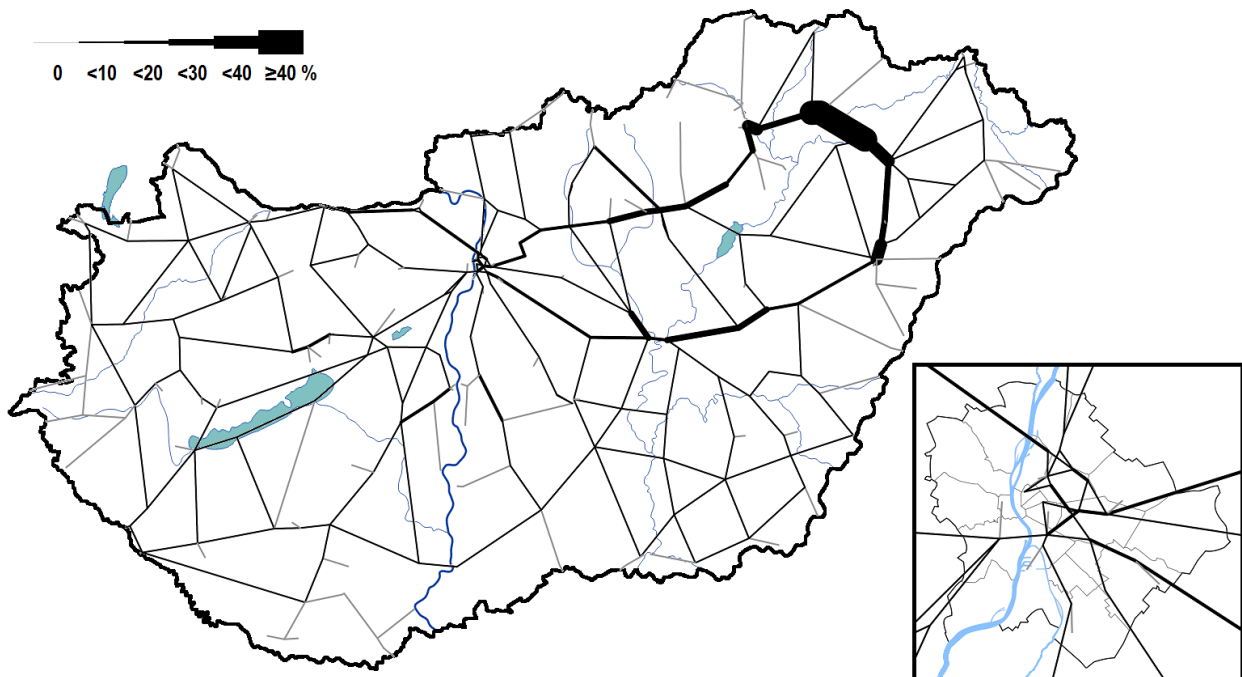
Szintén a 80-as vonal része a második és harmadik legnagyobb teljes redundanciájú állomásköz, a Szerencs–Mezőzombor ($r_t' = 27\%$) és a Felsőzsolca–Miskolc Tiszai állomásköz ($r_t' = 22\%$), mely redundanciák 88%-át szintén a 80-as vonal Füzesabony–Miskolc szakasza adja. Azt látjuk tehát, hogy a három legmagasabb teljes redundanciaértéket mutató állomásköz ugyanannak a Miskolc–Nyíregyháza vonalszakasznak a része, mely a Miskolc–Füzesabony vonalszakasz kiváltásában elsődleges, mivel megteremt a kapcsolatot a 100-as vonal felé.

Megemlítendő még a 14%-os redundanciájú Angyalföld–Almásfüzitő közti, a 2-es és a 4-es vonalhoz tartozó szakasz, mely főleg az Összekötő vasúti hídon áthaladó számtalan menetvonalhoz ad redundanciát: a redundancia több mint fele a Ferencváros–Kelenföld állomásközéből származik, az 1-es vonal Almásfüzitőig tartó szakasza pedig további 40%-ot ad. Ez azonban, főleg a 4-es jelenlegi állapota miatt, csak elméleti lehetőség, hiszen bár ez az útvonal csak némileg hosszabb a Budapest–Tatabánya–Almásfüzitő útvonalnál, többi paraméterében lényegesen rosszabb nála.

Kiemelendő a 77-es Aszód–Galgamácsa–Vácrátót vonal 12%-os redundanciája: a számolások alapján ez az irány eredeti funkciójával összhangban valóban hatékonyan tudja terelni elsősorban a Szlovákia felé Nyíregyháza és Szeged felől tartó forgalmat.

4.2 Minimális menetidők

A G_t^0 gráf minden u élére meghatározva az $r_t^{u'}$ index értékét is, a 4. ábrán látható eredményeket kapjuk.



4. ábra: A magyarországi vasúthálózat állomásközeinek relatív redundanciaértékei minimális menetidejű menetvonalak esetében.

A legnagyobb redundanciát $r_t' = 48\%$ értékkel a minimális menetvonalhosszak esetéhez hasonlóan itt is a Görögcsallás–Mezőzombor állomásköz adja, azaz az ezt az állomásközt a zavarmentes hálózatban nem, csak zavar esetén igénybe vevő menetvonalak esetében ennél a legnagyobb a kerülőutak menetidőnövekedése. A 80-as vonal szomszédos szakaszai szintén nem sokkal maradnak el: a Mezőzombor–Szerencs állomásköz redundanciaértéke 42%, a Felsőzsolca–Miskolc Tiszai állomásközé pedig 36%. Ez azt mutatja, hogy a 80-as vonal Miskolc és Nyíregyháza közti szakasza fontos szerepet tölt be mint lehetséges kerülőút a 100-as vonal felé, elsősorban a 80-as vonalat Miskolc és Füzesabony között

használók számára. A 31%-os redundanciájú Görögszállás–Nyirtelek szakasz szerepe pedig fordított: Ez a 100-as vonal forgalmának a 80-asra terelésében játszik kitüntetett szerepet.

A Debrecen–Apafa állomásköz redundanciájának (32%) több mint felét a 80-as vonal adja. Ez az állomásköz szűk keresztmetszet voltát jelzi: kerülni csak a transzverzális mellékvonalakon lehet, mely mind kilométerben, mind időben jelentős növekményt okoz. Azonban összességében is elmondható, hogy a 80/80a és a 100/100a vonalak kb. 20%-os redundanciájukat jórészt egymás számára biztosítják, azaz zavar esetén a transzverzális vonalakon keresztül a két fővonal közti kapcsolat többé-kevésbé (a konkrét zavart állomásköztől függő mértékben) megoldott.

A 2-es és a 4-es vonalak redundanciája kevésbé jelentős menetidők tekintetében, mint kilométerben, de a kerülőirány megfelelő paraméterei esetében még mindig nem lenne elhanyagolható, mint az Összekötő vasúti híd alternatívája, szemben a bajai Duna-híddal.

Érdekes az Összekötő vasúti híd alacsony redundanciaértéke (3%). Ez arra hívja fel a figyelmet, hogy azon útvonalak, melyek a zavarmentes hálózatban nem haladnak keresztül rajta, terelés esetén nem befolyásolják lényegesen a hálózat működését. Ilyen menetvonalak lehetnek a Dunán nem áthaladók – ezek esetében mindegy, van-e híd. Az Újpesti vasúti hídon lényegében csak a 2-es vonalon közlekedő vonatok járnak, ezek alacsony száma miatt a (fiktív) terelésük Baja felé az Összekötő vasúti híd helyett a rendkívül magas növekmény ellenére nem befolyásolja érdemben a hálózat működését (hiába ezek adják az Összekötő vasúti híd redundanciájának majdnem felét). A zavarmentes hálózatban a bajai vasúti hídon áthaladó menetvonalak számára pedig lényegében mindegy, hogy az 1-es vagy a 2-es és a 4-es vonal felé kell-e kerülniük az amúgy is jelentős menetidőnövekedés miatt.

Konklúzió

A normál üzemben nagy forgalmú vasútvonalak védelme kiemelt jelentőségű az ország gazdasága szempontjából. Azonban elkerülhetetlenek ezek alkalmankénti forgalomból hosszabb-rövidebb időre történő kizárása. Ezekre az esetekre fel kell készülni megfelelő minőségű kerülőirányok biztosításával, azaz olyan vasútvonalak megfelelő műszaki állapotban tartásával (és akár fejlesztésével egy lehetséges nagyobb forgalom átbocsátására), melyek a megtett út vagy a menetidő minél kisebb növekedése mellett át tudják venni azok szerepét. Ezeknek a vonaloknak a szerepe normál üzemben lehet, hogy kicsi, de bizonyos hálózati elemek sérülése esetén nélkülözhetetlenek a hálózat egésze zavarérzékenységének csökkentésében.

A legfontosabb ilyen vonal a 80/80a vonalak Miskolc és Budapest közti és a 100/100a vonalak Nyíregyháza és Budapest közti szakaszának a kapcsolatát megteremtő (a 80-as vonalhoz tartozó) nagyobb részt egyvágányú Miskolc–Nyíregyháza szakasz.

Hasonló lehetne a szerepe az 1-es vonal zavarérzékenységének csökkentésében a 2-es és 4-es vonalaknak azok teljes villamosítása (és kétvágányúsítása) után, illetve a 77-es Aszód–Vácrátót vonalnak a Nyíregyháza és Szeged felől érkező és Szob felé tartó forgalom számára.

Irodalomjegyzék

- [1] Hajnal P.: Gráfelmélet, Szegedi Egyetemi Kiadó Polygon, Szeged, 2017. (ISSN 1417 0590)
- [2] 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, p. 505-519. (ISBN 9786155776137)
- [3] Vasútvonalak, http://www.vpe.hu/takt/vonal_lista.php (letöltve: 2019.02.15.)
- [4] 277/2014. (XI. 14.) Kormányrendelet a vasúti közlekedési hatóság által kiszabható bírság mértékéről és megfizetésének részletes szabályairól
- [5] F. 2. sz. Forgalmi Utasítás függelékei, 15. sz. függelék; MÁV ZRt. Pályavasúti Üzletág Forgalmi Főosztály, 101. o.
- [6] Szily I.; Szabó L.: Vasúti üzemtan II.; Széchenyi István Egyetem – Universitas-Győr Kht. (Győr), 2006.
- [7] Ercsey Z.; Kisteleki M.; Vincze T.: Lassújelek hatásai a vasúti közlekedés költségeire 2. rész; Vasútgépészet 2012/3. 16-19. o.
- [8] 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/>

- [9] Csardi G., Nepusz T.: The igraph software package for complex network research, InterJournal, Complex Systems 1695. 2006. <http://igraph.org>
- [10] E. W. Dijkstra: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs; Numerische Mathematik I. (1959) 269 271. o. (DOI 10.1007/BF01386390)
- [11] D. M. Scott, D. Novak, L. Aultman-Hall, F. Guo: Network Robustness Index: A New Method for Identifying Critical Links and Evaluating the Performance of Transportation Networks, Journal of Transport Geography 14 (3), pp. 215-227 (2006) (DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2005.10.003)
- [12] E. Jenelius: Redundancy importance: Links as rerouting alternatives during road network disruptions, Procedia Engineering 3, pp. 129-137 (2010)