

ÁLLOMÁSOK ÉS ÁLLOMÁSKÖZÖK ZAVARÁNAK GRÁFELMÉLETI ALAPÚ VIZSGÁLATA A MAGYARORSZÁGI VASÚTHÁLÓZATON

GRAPH THEORY-BASED ANALYSIS OF THE EFFECT OF BREAKDOWNS OF STATIONS AND LINE SECTIONS ON THE RAILWAY NETWORK OF HUNGARY

TÓTH Bence

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

toth.bence@uni-nke.hu

Absztrakt

A cikkben bemutatok egy, a magyarországi vasúthálózatot modellező súlyozott irányított gráfot. Ennek segítségével kiszámítom az egyes állomáspárok közötti minimális menetidőket és menetvonalhosszokat, valamint hogy ezek mekkora része érinti az egyes állomásokat és állomásközöket. Vizsgálom továbbá az egyes hálózati elemek zavarának hatását a teljes vasúthálózatra.

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

Abstract

A weighted directed graph modelling the railway network of Hungary is presented. Using this graph, the minimal running times and lengths of paths are calculated for every pair of stations. The ratio of these paths passing through each station and line section is determined. The effect of the damage of each station and line section on the whole system is also examined.

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

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2017.09.06.
A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2017.12.05.

BEVEZETÉS

A vasút mindig is alapvető szerepet töltött be a szállításban, közlekedésben. Infrastruktúrájának a közúthoz képesti drága kiépítését és fenntartását [1; 28-29. o.] ugyanis ellensúlyozza, hogy nagyobb távolságokra a közúti fuvarozáshoz képest „viszonylag olcsón egyszerre nagy tömegű árut és utastömeget képes szállítani” [1; 35. o.] (bár hogy mekkora az a távolság, amelynél ez már megéri, az egyes publikációk erős szórást mutatnak: 150-300 km [2], kb. 200 km [3], 200-350 km [4], 500-750 km [5]).

A vonatkozó kormányhatározat alapján „kritikus infrastruktúrának minősülnek azon hálózatok (...) melyek működésének meghibásodása, megzavarása, kiesése vagy megsemmisítése, közvetlenül vagy közvetetten, átmenetileg vagy hosszútávon súlyos hatást gyakorolhat az állampolgárok gazdasági, szociális jólétére, a közegészségre, közbiztonságra, a nemzetbiztonságra, a nemzetgazdaság és a kormányzat működésére.” [6],[7] Ezen definíció alapján a vasúthálózat is kritikus infrastruktúra, és mivel „Magyarország felszíni közlekedési hálózata erősen sugaras szerkezetű, és alapvetően egy (Budapest) központú, egy-egy kritikus műtárgynál bekövetkező »folyamatossági hiány« (pl. rombolás, baleset, hóakadály, sztrájk) komoly forgalomkiesést eredményezhet” [8]. Zavarérzékenysége és nehéz védhetősége miatt terrorfenyegetettség szempontjából az ún. puha célpontok közé tartozik [9], hiszen a teljes magyarországi „vasúthálózat vágányainak és műtárgyainak állandó őrzése és technikai megfigyelése megoldhatatlan feladatot jelent”, a jelenlegi erőforrások „csak a fontosabb műtárgyak és néhány vonalszakasz időleges védelmét teszik lehetővé.” [10]

De általánosan is elmondható, hogy a vasúti közlekedés a hálózat neuralgikus pontjain [11] fellépő bármilyen eredetű zavarra rendkívül érzékeny. A hálózat egy pontjának sérülése esetén ugyanakkor elvárt lenne, 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.” [12]

Annak összehasonlításához, hogy az egyes hálózati elemek zavara mekkora hatást gyakorol a hálózatra, célszerű ezen hatásokat számszerűsíteni. Jelen cikknek ez a fő célja egy egyszerű modell keretein belül.

MAGYARORSZÁG VASÚTHÁLÓZATÁNAK GRÁFMODELLJE

Magyarország vasúthálózata a 2016-os adatok alapján 7 438 kilométernyi építési hosszú normál nyomtávú vasúttal rendelkezik [13], ez $8,00 \text{ km}/100 \text{ km}^2$ vonalsűrűséget jelent. Ennek a hálózatnak a leírására kell keresni egy jól illeszkedő matematikai modellt, melyen a konkrét számítások elvégezhetők. Erre egy élsúlyozott gráfot [14; 36. o.] használtam, azaz egy olyan gráfot, melynek élein adott egy ún. távolságfüggvény, mely azonban nem csak fizikai távolságot jelenthet, hanem egy általánosabb távolságfogalmat takar, ami lehet például az út költsége vagy (ahogy esetünkben is) az időszükséglete. Az élsúlyozott modellgráfban – értelemszerűen – az egyes állomások voltak a gráf csúcsai, a köztük levő vasútvonal-szakaszok pedig az élek [14; 3. o.].

Alapfogalmak

Gyakran használt fogalmak lesznek a menetvonal, annak hossza és a hozzá tartozó menetidő. A vonatkozó törvény alapján [15] „menetvonal: a vasúti pályahálózat kapacitásának az a része, amely egy adott időszakban egy vonat két pont között történő közlekedtetéséhez szükséges”. A menetvonal hosszát annak két végpontja között a hozzá tartozó útvonal hosszaként értelmezzük és kilométerben mérjük. A két végpont között sok menetvonal lehetséges különböző állomások érintésével, melyeknek így a hossza különböző. A definícióban szereplő „adott időszak”, melyben a vonat közlekedik, a menetidő, azaz az érkezési és az indulási

időpontok különbsége (melyet percben mérünk). Az egyes állomáspárok közti menetvonalaknak ez a két tulajdonsága az a két paraméter, melyekre a számolásokat elvégzem. Más lehet ugyanis egy menetvonal konkrét útvonala és így az időtartama és a hossza is, ha a menetidőre vagy magára a megtett útra, annak hosszára, a menetvonalhosszra optimalizálunk.

Állomások

A megállóhelyek, ahol a vonatfordulás nem lehetséges, nem voltak a gráfban csúccsal reprezentálva, de az olyan állomások sem, melyek egy vonalszakasz közbenső állomásai. Csak az elágazó- és csatlakozó állomások [16; 23. o.] szerepeltek tehát csúcsként a gráfban, ez alól kivételt csak a zsákvonalak végpontjai és a határármenetek, valamint az ez utóbbiakat közvetlenül megelőző állomások, a határállomások jelentettek.

Állomásközpontok

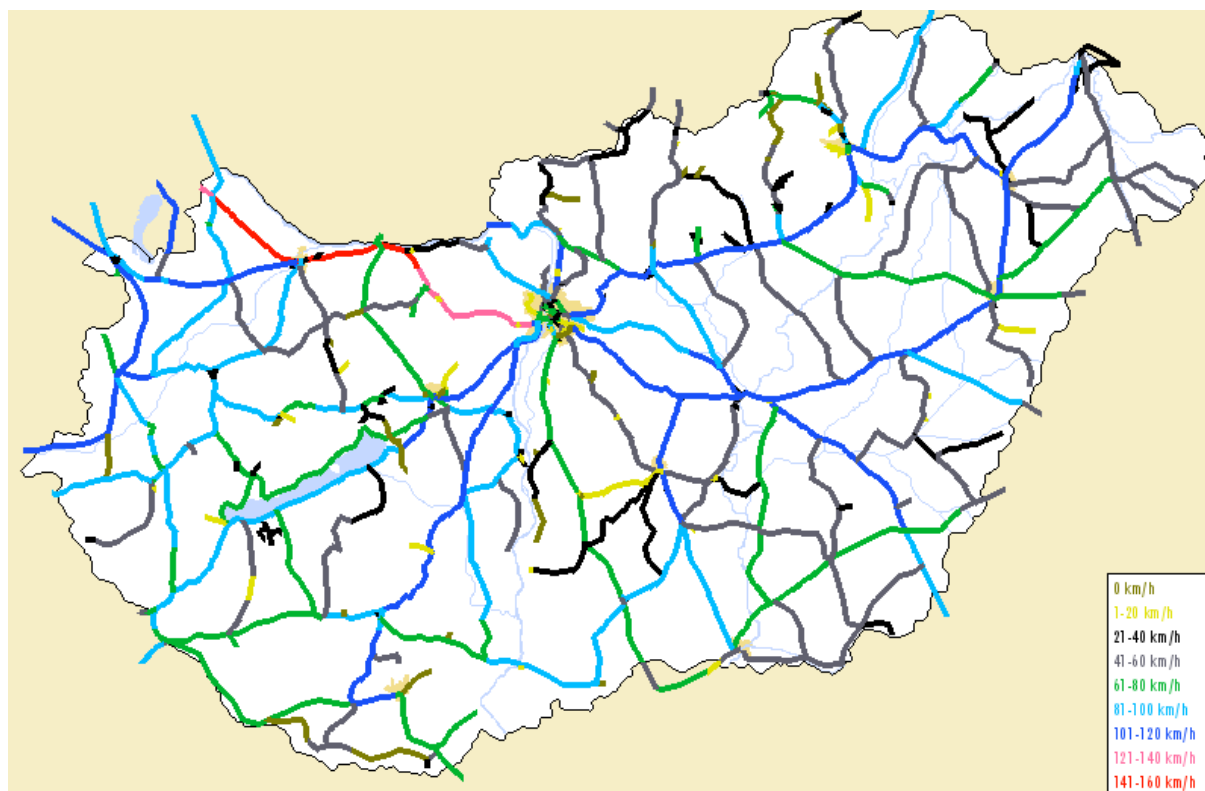
Állomásközpont alatt a két szomszédos állomás közötti nyílt pályát értjük. Mivel jelen modellben nem szerepel minden magyarországi állomás, itt az „állomásközpont” fogalmat a gráfelméleti „él” értelemben fogom használni, azaz a magyarországi vasúthálózatot leíró gráf egyes éleit fogom így nevezni, melyek a csúcsokkal reprezentált állomásokat összekötik.

A súlyozás, azaz az egyes élekhez hozzárendelt távolságfüggvény-érték, vagy az adott állomásközpont hossza volt kilométerben vagy az adott állomásközpontra érvényes maximális engedélyezett sebesség alapján számított menetidő percben. A vontatási nem, a tengelyterhelés, a vágányok száma nem szerepel a modellben.

Az egyes állomások egymástól mért távolságainak fő forrása a VPE Kft. weblapján [17] elérhető értékek voltak. Néhány, itt nem szereplő iparvágány hosszadata a vonatkozó kormányrendelet [18] alapján lett a modellbe beépítve, az ebben sem szereplőké pedig a Google Maps-en [19] végzett saját távolságmérések alapján.

Az egyes állomások közötti menetidők ezen távolságadatok és az engedélyezettsebesség-értékek [17],[20],[21] alapján lettek meghatározva. Ez természetesen azt is jelenti, hogy ezek a menetidő-értékek egy alsó korlátot képviselnek, melyek még a tiszta menetidőnél [22; 65. o.] is alacsonyabbak, mivel pl. az indítási és a fékezési idők, az ívekben engedélyezett alacsonyabb sebességértékek, az esetleges lassújelek (állomásiak is), a terepviszonyokból adódó sebességcsökkentések, melyek mind növelik a menetidőt, nem lettek figyelembe véve. De általánosságban is elmondható, hogy jelenleg a magyarországi vasúti pályáknak csak kevesebb mint kétharmadán közlekedhetnek a vonatok a kiépítési sebességgel [23],[24].

Itt jegyezném meg azt is, hogy bár a TEN-T hálózat részét képező vonalszakaszokon (lásd pl. [25]) elvárt lenne a legalább 160 km/h-s engedélyezett sebesség [26],[27], a MÁV-Start Zrt. tájékoztatása szerint [28] jelenleg csak az 1-es számú vasútvonal Tata és Hegyeshalom közti szakaszára van ez a sebesség engedélyezve, ott is csak legfeljebb 18,0 tonna tengelyterhelésű szerelvényeknek. Bár a pálya alkalmas 22,5 tonna tengelyterhelésű vonatok közlekedésére is, ezek csak 120 km/h-s korlátozott sebességgel közlekedhetnek [29]. Az egyes vonalakra engedélyezett maximális sebességeket lásd az 1. ábrán.



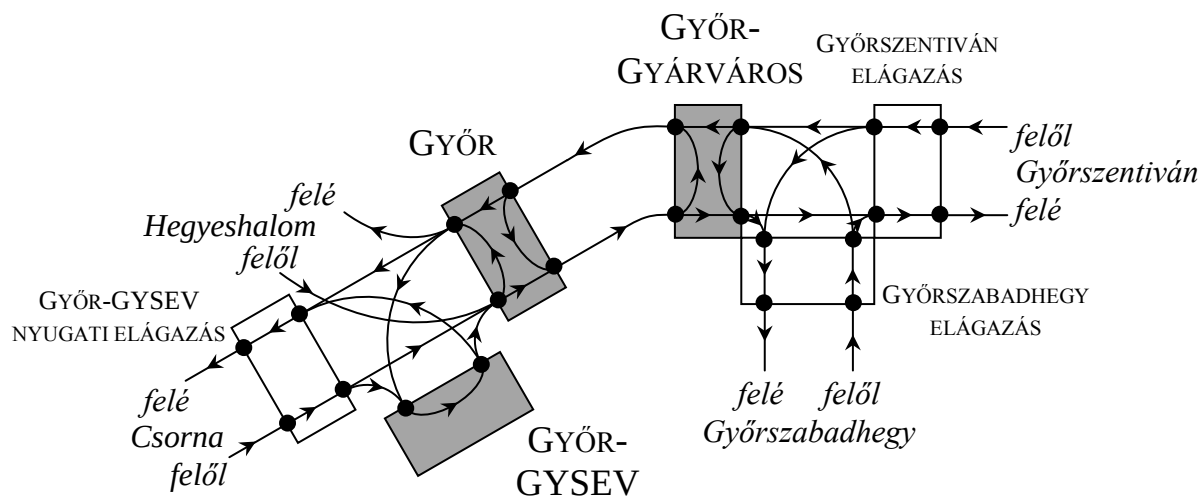
1. ábra Az egyes magyarországi vasútvonalakra engedélyezett maximális sebesség. [17]

Emiatt a számolásaimhoz, lévén célom a vasúti szállítás modellezése, a nagyobb tengelyterheléshez tartozó kisebb engedélyezett sebességet vettem figyelembe. Hasonlóan, amelyik pályaszakaszokon a motorkocsokra nagyobb sebesség engedélyezett, mint mozdonyal továbbított szerelvényekre [30] ott is a kisebb, mozdonyos szerelvényre vonatkozó engedélyezettsebesség-értéket vettem alapul.

Írányváltás

Figyelembe vettem ugyanakkor az egyes állomásokon esetlegesen szükséges irányváltás idejét, mégpedig úgy, hogy egy ilyen fordulás egy előre meghatározott értéket, 15 percet [22; 234. o.], [31] adjon hozzá a teljes menetidőhöz. Ennek érdekében minden állomást (pontosabban minden elágazást, a deltavágányok egyes kitérőit is) négy csúcsként reprezentáltam a gráfban (ezt csúcsházikónak nevezzük, lásd [32]). Például Győr állomás esetében annak keleti és nyugati oldalán is definiáltam egy bemeneti és egy kimeneti pontot, melybe, illetve melyből a szomszédos állomásokot reprezentáló csúcsokba, illetve csúcsokból a gráf élei be- és kifutnak. Az állomásokon való fordulás időigényét egy, az azonos oldali bemeneti és kimeneti csúcsok közötti 15 perc súlyú éllel lehet reprezentálni. Emellett szükséges még a gráf egyes éleinek irányítása [14; 21-22. o.], hogy a kimeneti pontok biztosan kimeneti pontokként, a bemenetiek pedig bemenetiekként funkcionáljanak és ne legyen lehetséges irányváltás a 15 perc súlyú él elkerülésével (lásd példának a 2. ábrán a Győr-GYSEV → Győr → Hegyeshalom útvonalat, melyben irányítás nélkül a Győr → Hegyeshalom útvonal indulhatna Győr állomás nyugati bemeneti pontjából is, figyelmen kívül hagyva az irányváltás időszükségletét. Az állomásokon való áthaladásnak a modellben nincs extra időszükséglete, ezen él súlya 0 perc. Mivel deltavágányon fordulás nem lehetséges, csak áthaladás, ezért bár szintén négy ponttal reprezentáltak a gráfban, csak 0 perc súlyú áthaladó él tartoznak hozzájuk. Minden, állomást leíró él távolság-súlya 0 km volt.

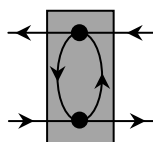
Fejállomások esetében, ahol csak egy bemeneti és egy kimeneti irány van (és ez a kettő megegyezik), az állomás reprezentálásához elég két csúcstól egy 15 perc súlyú éllel.



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

Egy kimeneti pontot természetesen akár mennyi, másik állomáshoz tartozó bemeneti ponttal összeköthet egy-egy irányított él (állomásköz).

Az állomások megvalósíthatóak lennének egyszerűbben is, két csúcs és a két irányváltást leíró él segítségével (3. ábra), azonban mint később látni fogjuk, ez nagyban elbonyolítaná egy állomás zavarának leprogramozását.



3. ábra Alternatív megoldás állomás reprezentálására (saját szerkesztés)

A számításokhoz használt gráf

A számolások alapjául szolgáló gráfban 291 állomás szerepel. Az ezeket leíró csúcsokon felül szerepel még benne 26 csúcs, melyek deltavágányokat írnak le. A gráf összesen 1808 élt tartalmaz, melyből 730 él (365 él-pár) szomszédos állomások közti viszonylatot, a többi az állomások „belső szerkezetét” és a deltavágányok kapcsolatát írja le. Mindegyik élhez tartozik két súly, egy hosszúságérték km-ben és egy menetidőérték percben. A számítások során természetesen egyszerre csak az egyiket rendelhetjük hozzá az élekhez. Az azonos viszonylathoz tartozó két ellentétesen irányított él súlya megegyezik. A későbbiekben az erre a két súlyozott gráfra való hivatkozás egyszerűsítése érdekében jelöljük a menetidőkkel súlyozott gráfot G_t^{00} -vel, a távolságokkal súlyozottat pedig G_s^{00} -l-el.

A gráfokat leíró éllista a súlyokkal együtt letölthető a <http://www.octans8.hu/railway01/> weblapról a később bemutatandó térképek nagyfelbontású változataival és az összes, állomásokra és állomásközökre vonatkozó numerikus eredménnyel együtt.

A SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREK

Az alábbiakban röviden bemutatom a számolásokhoz használt programot, módszereket, eljárásokat.

A legrövidebb út számolása

A két állomás közötti, menetidő vagy menetvonalhossz szempontjából legrövidebb út számítása az R programozási nyelv és környezetben [33] történt a Csárdi Gábor és Nepusz Tamás által kifejlesztett **igraph** csomag [34] **distances()** függvénye segítségével. Ez a függvény olyan élsúlyozott gráfok esetében, melyek csak nemnegatív súlyú éleket tartalmaznak (mint a mi esetünkben is), a Dijkstra-algoritmust [35],[14; 37. o.] használja a legrövidebb út meghatározásához.

Lefuttatva a legrövidebbút-keresést minden $\langle a, b \rangle$ állomáspárra (ahol $1 \leq a \leq 291$ és $1 \leq b \leq 291$) a menetidő- és a távolságsúlyokkal is és a kapott értékeket egy mátrixba rendezve úgy, hogy a sorok a kiinduló, az oszlopok az érkező állomást jelentik (azaz egy klasszikus szállítási feladat költségmátrixához hasonlóan), egy-egy 291×291 -es mátrixot kapunk, melyeket jelöljünk $\mathbf{T}^{00}$ -al, illetve $\mathbf{L}^{00}$ -al. Ezek a jelenlegi magyarországi vasúthálózaton az adott két állomás közötti legrövidebb eljutási idők és távolságok – amelyekhez tartozó menetvonalak útvonalai nem feltétlenül esnek egybe.

A főatlóban az $a = b$ esetekhez tartozó zérus értékek szerepelnek. Mind a $\mathbf{T}^{00}$, mind az $\mathbf{L}^{00}$ mátrix szimmetrikus, mivel adott a és b állomásokhoz tartozó minimális menetidőre és a minimális menetvonalhosszra is igaz, hogy $\mathbf{T}_{a,b}^{00} = \mathbf{T}_{b,a}^{00}$ és $\mathbf{L}_{a,b}^{00} = \mathbf{L}_{b,a}^{00}$. Az egyes mátrixok tehát $N^{00} = 42\,195$ darab független menetidő-, illetve menetvonalhossz-értéket tartalmaznak.

Állomások és állomásközök zavarának számítása

Zavar alatt egy állomás vagy állomásköz hálózathoz való teljes kiesését fogom érteni: a zavart állomáson nem haladhat át menetvonal és annak végpontja sem lehet. Hasonlóan, zavart állomásközön 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

Az **igraph** csomag a gráfot élek halmazaként kezeli: egy élt az a két csúcs definiál, amelyek között az élt található. Egy gráfból tehát csak az egyes éleket lehet eltávolítani, csúcsokat önmagukban nem. Egy csúcs csak akkor szűnik meg, ha az összes oda vezető és onnan kiinduló élt töröljük. A 3. ábra szerinti állomásreprezentáció esetében tehát meg kellene keresni az adott csúcsához tartozó összes élt törölni őket.

Ebből a szempontból tehát egyszerűbb az alkalmazott reprezentáció, mivel egy állomás kiiktatásához négy (fejállomás esetében egy), pontosan ismert élt kell törölni a gráfból. Ezek az állomásokat leíró élek ezért az egyszerűbb kezelhetőség érdekében egymás után, az állomások közötti viszonylatokat leíró élektől elkülönítve kerültek bele a gráfot leíró éllistába.

Ekkor azonban még lehetséges a b állomás zavara esetén is az $a \rightarrow b$ menetvonal számítása. Ennek kiküszöbölésére először mindig az került megvizsgálásra, hogy a számítandó menetvonal valamelyik végpontja a zavart állomás volt-e, és ha igen, akkor a legrövidebbút-keresés nem lett elvégezve, hanem annak értéke automatikusan nullává lett téve. Később látni fogjuk, hogy ez a fajta definíció miért célszerű a zavarok vizsgálatához.

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 elérhetetlenné vált állomásokat, mint végpontot tartalmazó menetvonalak hossza és menetideje is nulla értékkel szerepel a számolásokban.

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 $\mathbf{T}^{i0}$ -al és $\mathbf{L}^{i0}$ -al az i -edik állomás zavara esetén az állomáspárok közötti legrövidebb menetidőket, illetve menetvonalhosszakait tartalmazó mátrixot.

Állomásközpontok zavara

Az állomásközpontok zavara egyszerűbben kezelhető: az ezeket leíró 730 irányított él közül az azonos viszonylatot leíró (és az éllistában is egymás mellett szerepeltetett) két élt kell egyszerre törölni a gráfból.

Ha azonban az adott állomásközpont nem része egy körvonalnak [14; 16. o.], akkor megszüntetésével lesz olyan állomás, ami elérhetetlenné válik. A G_t^{00} és a G_ℓ^{00} gráf is ilyen, ún. egyszerűen élösszefüggő [14; 34. o.] gráf. Az így elérhetetlenné vált állomásokat végpontként tartalmazó menetvonalak menetideje és hossza is nulla értékkel van szerepeltetve.

Jelöljük G_t^{0j} -vel és G_ℓ^{0j} -lel a j -edik állomásközpontot leíró két irányított él törlésével előállított, menetidők, illetve távolságok szerint súlyozott gráfot, ahol $1 \leq j \leq 365$.

A j paraméter minden lehetséges értékére lefuttatva a legrövidebbút-keresést kétszer 365 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 MENETIDŐKRE ÉS A MENETVONALHOSSZAKRA

A legrövidebbút-keresések lefuttatása után összesen 1314 darab, 291×291 -es mátrixot kapunk, melyek analízise több, a vasúthálózatra vonatkozó információt is szolgáltat.

Az egyes állomásokon és állomásközpontokon áthaladó menetvonalak

Az első kérdés, ami felmerül, hogy az egyes állomásokat és állomásközpontokat az összes menetvonal hány százaléka érinti.

A legkisebb menetidejű átmenő menetvonalak aránya

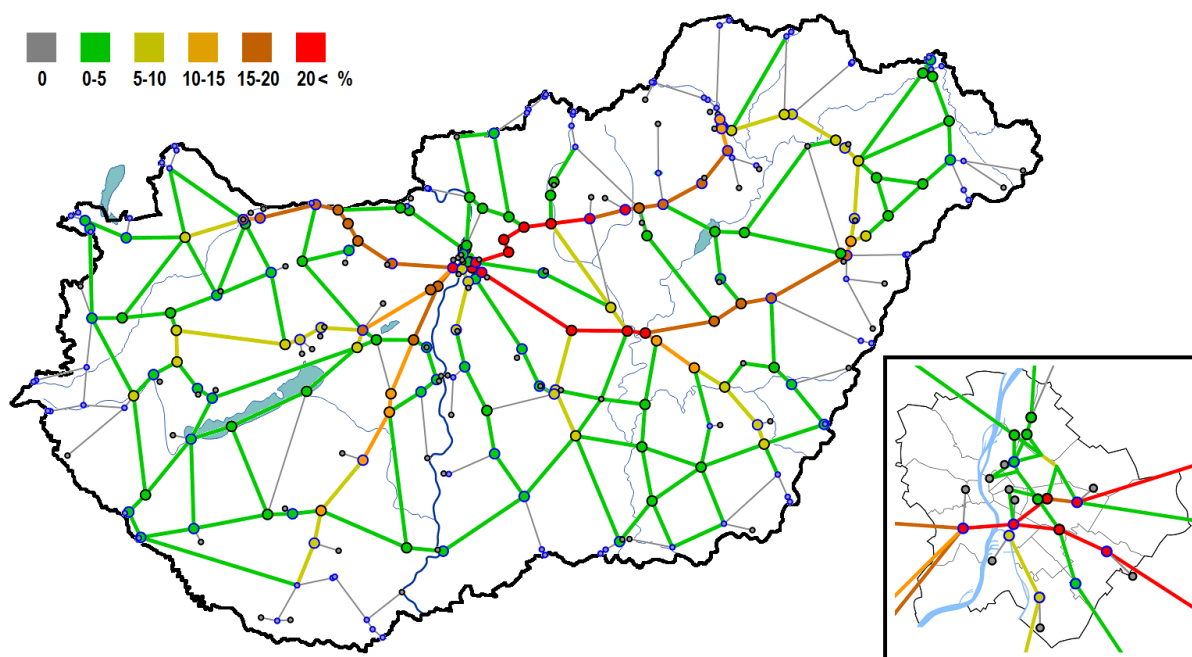
Az i -edik állomást érintő minimális menetidejű menetvonalak darabszámának meghatározásához vizsgáljuk meg a $\Delta \mathbf{T}^{i0} = \mathbf{T}^{i0} - \mathbf{T}^{00}$ mátrixot. Ennek egyes elemei lehetnek pozitívak, negatívak vagy nullák. A $\Delta \mathbf{T}_{a,b}^{i0}$ elem csak akkor lehet pozitív, ha a zavarmentes és a zavart hálózatban is létezik menetvonal az a és a b állomások között, 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. Azaz $\mathbf{T}_{a,b}^{i0} \geq \mathbf{T}_{a,b}^{00} \quad \forall i$.

A $\mathbf{T}_{a,b}^{i0} = \mathbf{T}_{a,b}^{00}$ egyenlőség két esetben lehetséges. Lehet, hogy a minimális menetidejű menetvonal nem érintette az adott állomást sem a G_t^{i0} , sem a G_t^{00} gráfban, így az i -edik állomás megszüntetésével a legrövidebb menetidejű menetvonal nem változott: $\mathbf{T}_{a,b}^{i0} = \mathbf{T}_{a,b}^{00} \neq 0$ és $\Delta \mathbf{T}_{a,b}^{i0} = 0$. 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 $\Delta \mathbf{T}_{a,b}^{i0} = 0$.

A $\Delta T_{a,b}^{i0}$ elem negatív akkor lesz, ha a G_t^{00} gráfban létezik menetvonal az a és a b állomások között ($T_{a,b}^{00} > 0$), azonban az i -edik állomás megszüntetésével a két állomás elérhetetlenné válik egymás számára ($T_{a,b}^{i0} = 0$). Ez azonban azt is jelenti, hogy a G_t^{00} gráfbeli menetvonal áthalad az i -edik állomáson.

Megszámolva tehát a ΔT^{i0} mátrix pozitív és negatív elemeit, és ezt leosztva az összes menetvonal darabszámával, N^{00} -al, megkapjuk zavarmentes hálózatban az i -edik állomást érintő minimális menetidejű menetvonalak arányát az összes menetvonalhoz képest.

Hasonlóan, a $\Delta T^{0j} = T^{0j} - T^{00}$ mátrix negatív és a pozitív elemeit összeszámolva és leosztva N^{00} -al megkapjuk a zavarmentes hálózatban a j -edik állomásközponton áthaladó minimális menetidejű menetvonalak arányát. A számolások eredménye a 4. ábrán látható.



4. ábra Az egyes állomásokat és állomásközpontokat érintő minimális menetidejű menetvonalak aránya (a zsákvonalak kivételével). A kék szegélyű állomások bármelyikének elhagyásával a gráf két részgráfra esik szét. (saját szerkesztés)

Látható, hogy még ebben az egyszerű modellben is, pusztán a menetidők figyelembe vételével és országon belüli menetvonalakra (azaz a szomszédos országokon keresztül történő kerülést figyelmen kívül hagyva) is a TEN-T hálózat Mediterrán és Orient folyosóihoz [25] tartozó hálózati elemek adódtak a legfrekvenciáltabb vonalszakaszoknak. Ez persze nem véletlen: éppen a többenél magasabb kiépítési sebességük miatt ezek az állomásközpontok „vonzzák” a minimális menetidejű menetvonalakat.

Azonban a rendszernek vannak szűk keresztmetszetei. Az Összekötő vasúti hídon tizenkétszer több minimális menetidejű menetvonal halad át, mint az Újpesti vasúti hídon és a bajai Türr István hídon összesen (az összes menetvonal majdnem fele) vagyis „az ország keleti és nyugati fele közötti tranzitforgalom lényegében egy műtárgyon, a Déli Vasúti Duna-hídon bonyolódik le” [36]. Az átkelő forgalmának pedig csak egy részét lehet annak zavara esetén átcsatolni, azt is csak jelentős kerülővel és kisebb kapacitással [37]. A két leginkább érintett állomás is ennek az állomásközpontnak a két végpontja.

A második legtöbb menetvonal a Szolnok–Szajol állomásközponton, vagyis a szolnoki vasúti Tisza-hídon halad át, mely „a legterheltebb tiszai vasúti átkelési lehetőség” [27]: a rajta áthaladó minimális menetidejű menetvonalak darabszáma ötszöröse a második legterheltebb átkelőnek, a

Tokaj–rakamazi vasúti Tisza-hídnak és 3,5-szerese az összes többi Tisza-hídon átmenők együttes darabszámának. A harmadik és a negyedik legértékesebb állomás is ennek az állomásközpontnak a két végpontja.

Erre a két műtárgyra azonban nem teljesül az az elvárás, hogy legalább egy helyettesítő létesítmény azonnal rendelkezésre álljon [38].

A 100a számú, Budapest–Cegléd–Szolnok és a 80a Budapest–Hatvan vasútvonal az ország legforgalmasabb vasútvonalai közé tartozik.

Kilenc viszonylatra hívnám még fel a figyelmet (1. táblázat), melyek a 4. ábrán szürke színnel jelennek meg úgy, hogy létezik a két állomás között alternatív útvonal. Ezek az állomásközpontok ugyanis nem részei egyetlen ideális útvonalnak sem, így a rendszerből való kivételük egy állomáspár közti legrövidebb útvonalra sem gyakorol befolyást.

A 4. ábra alapján ilyennek tűnhet a 22-es számú Körmen–Zalalövő vonal is, de az ezen engedélyezett legnagyobb sebesség jelenleg 0 km/h. Ez az állomásközpont azért szerepel mégis a gráfban, mert a Mediterrán TEN-T folyosó zavara esetén annak Boba és a szlovén határ közti szakaszán kerülőútirányként szóba jöhető vasútvonal [40], illetőleg a tervezett RFC11 korridor egyik lehetséges útirányának is része [41].

viszonylat	ℓ (km)	t (min)	kerülő állomás(ok)	ℓ (km)	t (min)	$\Delta\ell$ (%)	Δt (%)
Kaposvár–Siófok	100	200	Fonyód ($\leftrightarrow$)	94	79	−6	−61
Rákospalota–Újpest– Vácrátót ($\nleftrightarrow$)	31	47	Vác ($\nleftrightarrow$)	35	35	+13	−26
Vámosgyörk–Újszász	61	61	Hatvan ($\nleftrightarrow$)	73	42	+20	−31
Tócsóvölgy–Tiszalök	62	93	Debrecen, Nyíregyháza	87	54	+40	−42
Fülöpszállás–Kecskemét	42	120	Kiskunhalas, ($\nleftrightarrow$) Kiskunfélegyháza	120	78	+186	−35
Szerencs–Hidasnémeti	51	77	Felsőzsolca ($\nleftrightarrow$)	90	66	+76	−14
Sárbogárd–Börgönd	29	44	Pusztaszabolcs ($\leftrightarrow$)	50	42	+72	−5
Kisterenye–Kál–Kápolna	54	81	Hatvan ($\leftrightarrow$)	92	79	+70	−2
Mezőhegyes–Kétegyháza	39	79	Békéscsaba, Orosháza	87	79	+123	−0

1. táblázat Az állomásközpontok, melyeken a menetidő nagyobb, mint a két végpont közötti menetidő egy (alkalmasan megválasztott) kerülő állomáson át. $\nleftrightarrow$: villamosított vonalszakasz, $\leftrightarrow$: irányváltás szükséges (saját szerkesztés)

A 35-ös Kaposvár–Siófok vonal 100 km-ét 200 perc alatt lehet megtenni, míg a 30-as és 36-os vonalakon, fonyódi irányváltással is csak 39 percig tart a 94 km-es út. A Somogyi-dombságon át vezető vonal tehát nem csak menetidőben, de kilométerben is hosszabb úton köti össze a két várost.

A 71-es vonal Rákospalota–Újpest és Vácrátót közti, a 86-os vonal Vámosgyörk és Újszász közti és a 109-es vonal Tócsóvölgy és Tiszalök közötti szakasza helyett kerülőutat választani a kilométerben hosszabb út ellenére a jelentős megtakarított menetidő miatt lehet figyelemre méltó.

A 152-es számú Fülöpszállás–Kecskemét vonal és a 98-as Szerencs–Hidasnémeti vonal esetében már kétséges a menetidőben rövidebb kerülőirány választásának előnyös volta hosszabb út árán. Mégis, a 152-es vonal (az azóta meghíúsult) V0 vonal részeként, a 98-as vonal pedig a 90-es Miskolc–Hidasnémeti TEN-T vonal alternatív útvonalaként jöhet(ett) számításba [40].

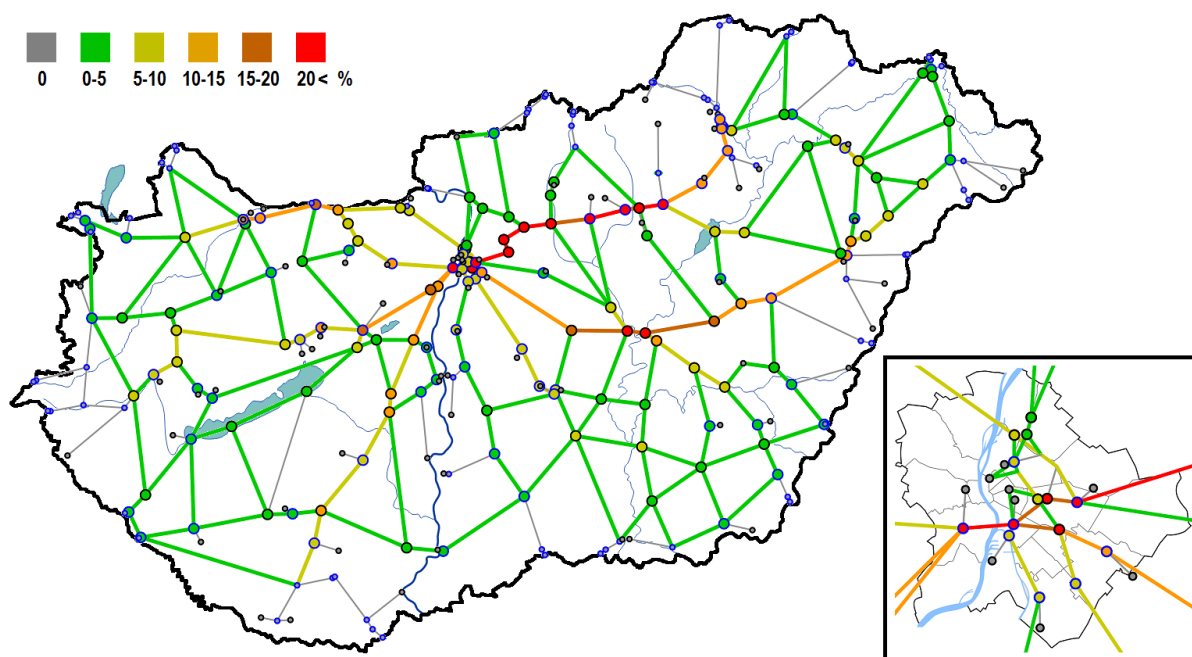
A 45-ös vonal Sárbogárd és Börgönd közti szakasza, a 84-es Kisterenye–Kál–Kápolna vonal és a 121-es vonal Mezőhegyes és Kétegyháza közötti szakaszának kerülőútja már csak

hibahatáron belül rövidebb időben, ugyanakkor kilométerben jelentősen hosszabb. Ennek ellenére a 84-es vonal az MH ARB (mára már kiüritett, de scvp. vágánykapcsolattal továbbra is rendelkező [18]) káli bázisa miatt bírhat még jelentőséggel [39].

A határállomások és a zsákvonalak állomásai mellett több másik csomópont is szürke színű a 4. ábrán. Ez azt jelenti, hogy az adott állomást csak olyan minimális menetidejű menetvonalak érintik, melyeknek az adott állomás az egyik végpontja.

A legkisebb hosszúságú átmenő menetvonalak aránya

Az előző alpontban leírtakhoz hasonlóan definiálhatjuk a $\Delta L^{i0} = L^{i0} - L^{00}$ és a $\Delta L^{0j} = L^{0j} - L^{00}$ mátrixokat és segítségükkel az ott leírt módon meghatározhatjuk azon minimális hosszúságú menetvonalak arányát, melyek érintik az adott állomást, illetve állomásközpont a zavarmentes hálózatban. A kapott eredményeket az 5. ábrán láthatjuk.



5. ábra Az egyes állomásokat és állomásközpontokat érintő minimális hosszúságú menetvonalak aránya (a zsákvonalak kivételével). A kék szegélyű állomások bármelyikének elhagyásával a gráf két részgráfra esik szét. (saját szerkesztés)

A menetidőkhöz hasonlóan itt is az átlagnál terheltebbek a Mediterrán és Orient TEN-T folyosók. Ezek a vonalak tehát nem csak az átlagosnál nagyobb engedélyezett sebességük miatt, hanem földrajzi elhelyezkedésükből fakadóan is az állomások közötti legrövidebb úton fekvő szakaszok.

Ez tehát a magyarországi vasúthálózat inherens tulajdonsága. A fővonalak nem csak az engedélyezett sebesség, a villamosítottság, esetleg a két vágány miatt fővonalak, hanem elhelyezkedésük, vonalvezetésük miatt is. Ez már csak a magyarországi vasúthálózat története miatt is így van: egy, a mellékvonali hálózat kiépülése előtti térképet megnézve (például 1885-ből [42]), azon gyakorlatilag csak ezek a vonalak szerepelnek. Azt láthatjuk tehát, hogy a mellékvonalak vonalvezetésük alapján is ráhordó, illetve lokális jelentőségű vasutak. Ennek ellenére, vagy inkább épp ezért, a mellékvonalak fontos részei a magyarországi vasúthálózatnak, hiszen annak a „legkisebb elemére is szükség van a ráhordó szerepe miatt” és „ha a mellékvonalakat felszámolják, akkor közvetve a fővonalak forgalmát is csökkentik” [43]. A (megfelelően kiválasztott) mellékvonalak ezért semmiképp sem elhanyagolandók, hogy a fővonalak zavara esetében reális idő- és úthossz-paraméterekkel rendelkező alternatív útvonalat tudjanak nyújtani.

A minimális hosszúságú menetvonalakról is elmondható az Összekötő vasúti híddal kapcsolatban, mint ami a minimális menetidejűekről: az összes menetvonal több mint harmada érinti a hidat. Mivel ez az egyetlen Duna-híd, mely a TEN-T folyosók része, ezért evidens, hogy „a páneurópai folyosó tehervonati forgalma (...) 100%-ban Budapesten keresztül (...) a Déli vasúti összekötő hídon vezet át” [24].

A minimális menetidejűekhez hasonlóan a Tiszán áthaladó minimális hosszúságú menetvonalak fele a szolnoki Tisza-hídon halad át, és „a szolnoki Tisza-híd és a Zagyva-híd stratégiai jelentőségét tovább növeli az a sajnálatos tény, hogy jelentős kapacitású tiszai átkelő a közelben nem található” [27].

A menetvonalhossz szerinti minimalizálás során a 80 és a 80a számú vonalak Budapest és Füzesabony közti szakasza adódott a legtöbb menetvonal által érintettnek mind az állomások mind az állomásközpontok szempontjából.

Zavar hatása a hálózat egészére

Akár egyetlen állomásnak vagy állomásközpontnak is országos jelentőségű hatása lehet. Elég csak Kelenföld és Ferencváros állomásokra és a köztük levő hídra gondolnunk: mivel a Dunán áthaladó menetvonalak nagy része itt lép át a folyón, ennek a hálózati elemeknek a zavara a lokális környezeténél jóval nagyobb területre terjedhet ki.

Zavar országos hatása a menetidőkre

Ennek meghatározásához azokat az $\langle a, b \rangle$ állomáspárokat kell figyelembe venni, melyekre $T_{a,b}^{i0} > 0$, illetve $T_{a,b}^{0j} > 0$, azaz az összes, a zavart hálózatban létező menetvonalat. A

$$T_{i0} = 100 \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} T_{a,b}^{i0}}{\sum_{\langle a,b \rangle} T_{a,b}^{00}} - 100 \quad (1)$$

kifejezés azt mutatja meg, hogy az i -edik állomás zavarának hatására a hálózat összes minimális menetidejű menetvonalának összmenetideje hány százalékkal nő meg a zavarmentes hálózat összmenetidejéhez képest. Hasonlóan, a j -edik állomásközpont zavarának esetében:

$$T_{0j} = 100 \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} T_{a,b}^{0j}}{\sum_{\langle a,b \rangle} T_{a,b}^{00}} - 100. \quad (2)$$

Ezen számítások eredményeként azt kapjuk, hogy Ferencváros és Kelenföld állomások és a köztük levő állomásközpont okoz a teljes vasúthálózaton 20 %-nál nagyobb menetidőnövekedést, azaz mindössze ezek miatt a hálózati elemek miatt nem felel meg a magyarországi hálózat a robusztusság követelményének [40]. A következő két állomás Hatvan és Szajol, állomásközpont pedig a Szajol–Szolnok viszonylat. Ezek zavara kb. 10%-kal kisebb, de még messze nem elhanyagolható hatást gyakorol a teljes hálózatra.

Mint az előző pontban is láttuk, éppen ez az a két állomásközpont, melyet a legtöbb menetvonal érint, azaz nem pusztán az átmenő menetvonalak darabszáma szempontjából kiemelt jelentőségű állomásközpontok (hidak) ezek, hanem zavaruknak a hálózat egészére kiterjedő hatása miatt is.

Természetesen a fellépett zavar áthidalásaként felmerülhet a „megkerülés a szomszédos országok vasúthálózatának igénybevétele” vagy „a jelenleg rendelkezésre álló vasúti hidak

kerülő úton történő igénybe vétele”, de „ezek a megoldások csak részben tudják átvenni a kieső hídon átmenő forgalmat” [36].

Zavar országos hatása a menetvonalhosszakra

Hasonlóan az előző alpontban leírtakhoz, azokat az $\langle a, b \rangle$ állomáspárokat figyelembe véve, melyekre $L_{a,b}^{i0} > 0$, illetve $L_{a,b}^{0j} > 0$, meghatározhatjuk, hogy az adott állomás vagy állomásközpont zavarának hatására a teljes hálózat menetvonalhosszainak összege hány százalékkal nő meg:

$$L_{i0} = 100 \frac{\sum_{\langle a,b \rangle} L_{a,b}^{i0}}{\sum_{\langle a,b \rangle} L_{a,b}^{00}} - 100, \quad (3)$$

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

Az eredmények azt mutatják, hogy egy állomás sem növeli meg a hálózat összes menetvonalának összhosszát több mint 20%-kal: a legnagyobb növekedést Ferencváros állomás zavara okozza, 12%-ot. A Kelenföld–Ferencváros állomásközpont zavara 10%-kal növeli az összmenetvonalhossz értékét.

Azonban az az eredmény, hogy nem csak a menetvonalak jelentős hányada halad át az Összekötő vasúti hídon, hanem hogy kiesése országos hatású zavart eredményez, újra felhívja a figyelmet arra, hogy „a Dunán az egyik legégetőbb probléma a megfelelő számú és területi eloszlású híd biztosítása” [12] és ezért egy alternatív útvonal kialakítása mielőbb szükséges lenne. De nem csak zavar esetén válik kritikussá egy alternatív dunai átkelő hiánya, hanem mivel nem kielégítő a nagy folyókon levő hidak mennyisége és területi eloszlása, „a kedvezőtlen hídhelyzetből adódó kényszerkerülők miatt évente több milliárd forint nagyságrendű közlekedésüzemi többletköltségek jelentkeznek.” [44]

Az átjárhatóság az Összekötő vasúti híd és az Újpesti vasúti híd között közvetve ugyan megoldott [38], azonban az eltérő vontatási nem és sok esetben a vonatfordulás is megnehezítheti kerülő irány használatát.

A fentiek miatt időről időre előkerül a Déli (vagy a Kelenföldi) és a Nyugati pályaudvar összekötése egy Duna alatti vasúti alagúttal [45],[46].

ÖSSZEFOGLALÁS

A magyarországi vasúthálózat modelljeként egy élsúlyozott irányított gráfot használtam. Az egyes állomások és állomásközpontok zavarát a megfelelő élek gráfból való törlésével modelleztem. A zavarmentes és a zavart hálózatokban is kiszámítottam az összes állomáspár közötti minimális menetidő- és menetvonalhosszakat.

Ezek alapján meghatároztam az egyes hálózati elemeken áthaladó menetvonalak arányát. Az országos fővonalak mind az idő, mind a távolság szerinti optimalizálás esetében a legforgalmasabb vonalszakaszoknak adódtak, azaz ez a tulajdonságuk a rendszer felépítéséből ered. Kiemelkedik ezek közül is az Összekötő vasúti híd és a szolnoki Tisza-híd.

Kiszámítottam, hogy egy hálózati elem zavarának következtében módosuló minimális menetidejű, illetve hosszú menetvonalak mekkora átlagos hatást gyakorolnak a hálózat menetvonalainak összességére. Az Összekötő vasúti híd menetidő szempontjából abszolút

kritikusnak bizonyult országosan 20% fölötti átlagos menetidőnövelő hatásával, de a menetvonalhosszakban is országosan 10% fölötti növekedést eredményez a zavara. A második legkritikusabb műtárgy a szolnoki vasúti Tisza-híd.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ERDŐSI, F.: *Európa közlekedése és a regionális fejlődés*, Dialóg Campus Kiadó, Budapest; Pécs, 2004.
- [2] SHORT, H.: *Pipes, Trains, and Trucks: How to move biomass cost effectively*; <https://snrecmitigation.wordpress.com/2009/04/24/pipes-trains-and-trucks-how-to-move-biomass-cost-effectively/> (letöltve: 2017.08.23.)
- [3] MARINOV, M.; GIUBILEI, F.; GERHARDT, M.; ÖZKAN, T.; STERGIOU, E.; PAPADOPOULOS, M.; CABECINHA, L.: *Urban freight movement by rail*; J. Transp. Lit. 7 (3), pp. 87-116 (2013) (DOI 10.1590/S2238-10312013000300005)
- [4] GONZALES, D.; SEARCY, E.M.; EKŞIOĞLU, S.D.: *Cost analysis for high-volume and long-haul transportation of densified biomass feedstock*; Transportation Research Part A 49, pp. 48-61 (2013) (DOI 10.1016/j.trra.2013.01.005)
- [5] RODRIGUE, J. P.; COMTOIS, C.; SLACK, B.: *The geography of transport systems*; Routledge, London and New York, 2013., p. 107. (ISBN 978-0-415-82253-4)
- [6] 2080/2008 (VI. 30.) Kormányhatározat a Kritikus Infrastruktúra Védelem Nemzeti Programjáról
- [7] 2012. évi CLXVI. törvény a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről
- [8] TÓTH, A.; TÓTH, B.: *A nagyvárosok felszíni közlekedési rendszereinek vizsgálata a terrorfenyegetettség tükrében*; Hadmérnök IV. 4. (2009) 108-122. o.
- [9] HORVÁTH, A.: *A vasúti közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői a városokban*; Hadmérnök IV. 3. (2009) 180-189. o.
- [10] HORVÁTH, A.: *A közúti, vasúti és vízi közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői* In: TÁLAS P. (szerk.): *Válaszok a terrorizmusra II.*; Mágustúdió, Budapest, 2006., 321-336. o.
- [11] 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)
- [12] 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)
- [13] Vasútvonalak hossza (2007–) http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_odmv004.html (letöltve: 2017.08.23.)
- [14] HAJNAL, P.: *Gráfelmélet*; Szegedi Egyetemi Kiadó Polygon, Szeged, 2017. (ISSN 1417-0590)
- [15] 2005. évi CLXXXIII. törvény a vasúti közlekedésről
- [16] F. 2. sz. Forgalmi Utasítás; MÁV ZRt. Pályavasúti Üzletág Forgalmi Főosztály; 22-23. o.

- [17] Vasútvonalak http://www.vpe.hu/takt/vonal_lista.php (letöltve: 2017.08.23.)
- [18] 277/2014. (XI. 14.) Kormányrendelet a vasúti közlekedési hatóság által kiszabható bírság mértékéről és megfizetésének részletes szabályairól
- [19] Google Maps <https://www.google.hu/maps/>
- [20] SZÁSZI, G.: *A védelmi szempontból meghatározó repülőterek vasúti kapcsolatának helyzete Magyarországon*, Repüléstudományi Közlemények (1997-től) XXI. Különszám (2009) 1-22. o.
- [21] SZÁSZI, G.: *Katonai vasúti szállítások a Magyar Honvédség missziós feladatainak rendszerében*; Szolnoki Tudományos Közlemények XIV. (2010) 101-118. o.
- [22] SZILY, I.; SZABÓ, L.: *Vasúti üzemtan II.*; Széchenyi István Egyetem - Universitas-Győr Kht. (Győr), 2006.
- [23] SZÁSZI, G.: *Magyarország közlekedési infrastruktúrájának fejlesztése napjainkban: Közút vagy vasút?* – Katonai Logisztika 15. 2. (2007) 32-59. o.
- [24] KÁLMÁN, L.: *Budapest vasúti közlekedésének fejlesztése - Vasút a Duna alatt (1. rész)*; Sínek Világa 2011/4, 16-20. o.
- [25] SZÁSZI, G.: *Transz Európai Közlekedési Hálózat (TEN-T) tervezett fejlesztési iránya, várható hatása Magyarország vasúthálózatának fejlesztésére*; Szolnoki Tudományos Közlemények XVI. (2012) 402-425. o.
- [26] *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)
- [27] SZÁSZI, G.: *Jász-Nagykun-Szolnok megye vasúthálózatának védelmi szempontú elemzése*; Szolnoki Tudományos Közlemények XIII. (2009) 101-125. o.
- [28] TENCZER, G.: *Mikor fogunk itthon szazhatvannal vonatozni?*; http://index.hu/belfold/2017/01/31/mikor_fogunk_itthon_szazhatvannal_vonatozni/ (letöltve: 2017.08.23.)
- [29] *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: 2017.08.23.)
- [30] *F. 2. sz. Forgalmi Utasítás függelékei, 15. sz. függelék*; MÁV ZRt. Pályavasúti Üzletág Forgalmi Főosztály, 101. o.
- [31] ERCSEY, Z.; KISTELEKI, M.; VINCZE, T.: *Lassújelek hatásai a vasúti közlekedés költségeire 2. rész*; Vasútépítészet 2012/3. 16-19. o.
- [32] ZENTAI, D.: *Gráfelméleti módszerek a kritikus infrastruktúra védelemben*; Hadmérnök XII. 2. (2017) 341-347. o.
- [33] 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/>
- [34] CSARDI, G., NEPUSZ, T.: *The igraph software package for complex network research*, InterJournal, Complex Systems 1695. 2006. <http://igraph.org>

- [35] DIJKSTRA, E. W.: *A Note on Two Problems in Connexion with Graphs*; Numerische Mathematik I. (1959) 269-271. o. (DOI 10.1007/BF01386390)
- [36] 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)
- [37] SZÁSZI, G.: *Long-span railway bridges in the transport system of Hungary*; Hadmérnök VIII. 2. (2013) 98-107. o.
- [38] ENDRŐDI, I.: *A közlekedési ágazat kritikus infrastruktúra elemei, kapcsolatuk a katasztrófavédelemmel, figyelemmel az Európai Unió Kritikus Infrastruktúrák Azonosításáról és Kijelöléséről szóló 2008. évi 2008/114/EK Tanácsi Irányelvében megfogalmazottakra* In: HORVÁTH, A. (szerk.): *Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből*; Magyar Hadtudományi Társaság, Budapest, 2013., 238-267. o. (ISBN 978-963-08-6926-3)
- [39] 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)
- [40] FELLER, T; HÍDVÉGI, G.; KÖLLER, L.: *A nemzetgazdaság és nemzetbiztonság által igényelt „kritikus infrastruktúra” hálózatok komplex szemléletű vizsgálata (tanulmány)*; Budapest, 2010.
- [41] KÖLLER, L.: *Hatékonyság, versenyképesség a vasúti hálózatokon (A különböző vasúti hálózatok vonali és hálózati hatékonysága, illetve a versenyképesség értelmezése a vasútnál hazai tapasztalatok és nemzetközi példák alapján)*; <http://www.vki.hu/~tfleisch/~haver/indulo.html> (leöltve: 2017.08.23.)
- [42] PÉTERI, L.: *Környezetbarát vasúti közlekedés (vissza)fejlesztési tendenciái Németországban és Magyarországon*; <http://realzoldek.hu/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=242> (letöltve: 2017.08.23.)
- [43] KOVÁCS, Gy. A.: *A regionális vasutak helye vasúti közlekedésünkben*; Földrajzi értesítő XLVIII. 3-4. (1999) 303-312. o.
- [44] TÓTH, B.; HELMECZI, G.: *Védelmi követelmények a gazdasági és közlekedési minisztérium közlekedési szakterületén*; Katonai Logisztika XIV. 2. (2006) 37-55. o.
- [45] SZAMOS, A.: *Budapest vasúti és elővárosi közlekedésének fejlesztése*; Sínek Világa Különszám (2006) 24-29. o.
- [46] *A Budapesti Regionális Gyorsvasúti Rendszer koncepciója*; Főmterv-Közlekedés konzorcium, 2007.