

Kerényi Levente¹, Tóth Bence²

ALTERNATÍV VASÚTI ÚTVONALAK MINŐSÍTÉSE A MAGYAR HONVÉDSÉG SZÁLLÍTÁSI FELADATAINAK ELLÁTÁSÁBAN

DOI: 10.30583/2020/1-2/079

Absztrakt

Kötőtpályás közlekedési infrastruktúrák esetében nagy jelentősége van a zavar esetén igénybe vehető kerülőirányoknak, ezek megfelelő állapotának. A cikkben egy gráfelméleti alapú módszert adunk két állomás közti kerülőirányok meghatározására, az ezekben szereplő állomásközök rangsorolására egy mérőszám, az úgynevezett helyettesítési arány segítségével. Ennek ismeretében meghatározható, mely vonalszakaszok igényelnek fejlesztést, hogy a vasúti szállítások az egyes állomásközök zavara esetén is kivitelezhetőek legyenek. A módszer alkalmazását bemutatjuk két, a Magyar Honvédség vasúti kapcsolattal rendelkező bázisa esetére.

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

Abstract

For the railway network, the presence and good state of alternative routes for cases of disruptions have a great importance. In this paper, a graph theory-based method is presented for determining detours between two stations, and for the ranking of the line sections in these alternative routes by using a mathematical measure, the so-called substitution ratio. Knowing the value of this measure, one can determine which line sections need development for the network to remain functioning sufficiently in the case of disruptions. The application of the model is presented for the case of two units of the Hungarian Defence Force with railway connection.

1 Kerényi Levente honvédtisztjelölt, kerenyil96@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7259-3771

2 Tóth Bence PhD, egyetemi adjunktus, Nemzeti Közsolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, toth.bence@uni-nke.hu, ORCID: 0000-0003-3958-187X

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

Bevezetés

Magyarországon 2018-ban 7441 kilométernyi normál nyomtávú vasútvonalon lehetett végrehajtani a személy- és áruforgalom leközlekedtetését.³ Ez vasútvonal-sűrűségben 8,0 km/100 km²-t jelent, amely az európai átlagnál magasabb szám,⁴ azaz hazánk vasútvonal-sűrűsége megfelelőnek mondható. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a pálya mindenhol olyan kiépítettségű, illetve olyan állapotban van, hogy zavar esetén alkalmas lenne bármelyik másikkal a helyettesítésére: a magyarországi „vasúti pályák kevesebb mint 62%-ban alkalmasak arra, hogy a vonatok kiépítési sebességgel közlekedjenek.”⁵ Bár hazánkban a TEN-T (Trans-European Transport Network – transzeurópai közlekedési hálózat) hálózat több vonala is áthalad, és „ezeket 2030-ig az előírt paraméterek szerint (...) ki kell építeni”⁶, jelenleg Magyarországon mindössze a MÁV 1-es számú vasúti fővonalán (Budapest–Hegyeshalom/Rajka) találhatóak olyan állomásközpontok, ahol ezek a paraméterek adottak (azaz itt sem az egész vonalon). A kétvágányú és a villamosított vonalak részarányában is elmaradunk az EU-átlagtól: „az összvonal-hossznak mindössze 15,5%-a kétvágányú a 41,2%-os EU-átlaggal szemben. (...) A villamosított vonalak aránya is elmarad a 46,4%-os EU-átlagtól. Jelenleg a villamos vontatás aránya 34%.”⁷

A szállítási alágazatok előnyeinek és hátrányainak ismeretében, valamint ezek egymáshoz képest vizsgált katonai szempontú felhasználhatóságának látószögéből azonban a vasút olyan potenciált hordoz magában, melynek kihasználása manapság egyre kisebb mértékben jelentkezik, a katonai vasúti szállítások teljesítménye a 80-as évek óta folyamatosan csökken⁸ annak ellenére, hogy sokkal nagyobb

3 http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_odmv004.html

4 <https://w3.unece.org/PXWeb/en/CountryRanking?IndicatorCode=47>

5 Szászi G.: Magyarország közlekedési infrastruktúrájának fejlesztése napjainkban: Közút vagy vasút? *Katonai Logisztika* 15/2, 32-59, 2007.

6 Szászi G.: Transz Európai Közlekedési Hálózat (TEN-T) tervezett fejlesztési iránya, várható hatása Magyarország vasúthálózatának fejlesztésére, *Szolnoki Tudományos Közlemények*, 16, 402-425, 2012.

7 Szászi G.: Magyarország közlekedési infrastruktúrájának fejlesztése napjainkban: Közút vagy vasút? *Katonai Logisztika* 15/2, 32-59, 2007.

8 Szászi G.: Katonai vasúti szállítások a Magyar Honvédség missziós feladatainak rendszerében, *Szolnoki Tudományos Közlemények* 16, 101-118, 2010.

mennyiségű eszköz vagy áru egy időben történő szállítására kínál lehetőséget, mint például a katonai szállítások terén előnyben részesített közúti szállítás vagy akár a háromszor drágább légi szállítás.⁹ Továbbá magasabb az árubiztonság, a feladat végrehajthatósága kevésbé függ a külső környezeti – elsősorban időjárási és természeti – körülményektől, valamint alacsonyabb a munkaerőigénye is, mint a többi szállítási módnak.

Jelen vizsgálatunkba a MÁV és a GySEV által üzemeltetett pályák mellett tehát bevontuk a Magyar Honvédség kezelésébe tartozó, úgynevezett **saját célú vasúti pályákat** (továbbiakban: scvp.) is,¹⁰ miáltal olyan útvonalakat tudunk generálni, melyek a lehető legalkalmasabban a vasúton történő katonai szállítások végrehajtására.

Célunk a bemutatandó kutatással kettős volt:

- egy matematikai modell alapján megalkotni az útvonalakat, amelyek a legrövidebb idő alatt, illetve a legrövidebb úton lehet eljuttatni egy vasúti szerelvényt a rendeltetési helyére, továbbá

- alternatív útvonalak generálására és minősítése azokra az esetekre, ha egy szállítás optimális útvonalán valamely állomásköz kizárásra kerül, bármilyen vasútüzemi vagy egyéb külső környezeti behatás révén.

A feladat tehát kettős: optimalizálni távolságban, illetve időben legrövidebb útra két MH bázis között (annak függvényében, hogy a felhasználó számára melyik kritérium élvez prioritást), illetve meghatározni azon vonalszakaszokat, melyek a leggyakrabban szolgálhatnak kerülő útirány részeként az optimális útvonal valamely elemének sérülése esetén.

A magyarországi vasúthálózat védelmi szerepe

Magas sűrűsége ellenére a magyarországi vasútvonalak, és különösen a kiemelt jelentőségű műtárgyak földrajzi eloszlása rendkívül

9 Szászi G.: Katonai vasúti szállítások a Magyar Honvédség missziós feladatainak rendszerében, Szolnoki Tudományos Közlemények 16, 101-118, 2010.

10 277/2014. (XI. 14.) Kormányrendelet a vasúti közlekedési hatóság által kiszabható bírság mértékéről és megfizetésének részletes szabályairól; <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1400277.kor>

egyenetlen.¹¹ Közlekedés-stratégiai és hadászati-hadműveleti szempontból kiemelt problémát jelent a keleti és nyugati országrész vasúti hidakkal való összeköttetése, ugyanis mindössze három híd létesít kapcsolatot a Duna két partja között, melyek északról dél felé haladva az Újpesti vasúti híd és az Összekötő vasúti híd Budapesten, valamint a Türr István híd Baján.

Ezen hidak infrastruktúrájának tekintetében azonban hiányokat láthatunk, ugyanis a leterheltségük és kihasználtságuk közel sem azonos. Az egy nap alatt az Összekötő vasúti hídon áthaladó szerelvények száma ugyanis sokkal jelentősebb, mint az Újpesti vasúti híd esetében. Míg „az ország keleti és nyugati fele közötti tranzitforgalom lényegében egy műtárgyon, az Összekötő vasúti hídon bonyolódik le”,¹² addig az Újpesti vasúti hidat csak a Budapest-Piliscsaba/Esztergom viszonylat óránként négy vonatpárja használja, ezen a vonalon a teherforgalom gyakorlatilag megszűnt. Ugyanakkor a csatlakozó, villamosítatlan 4-es vonalon az esztergomi Suzuki-gyár miatt napi szinten zajlik teherforgalom. A személyszállításnak köszönhetően az Újpesti vasúti híd 2018 áprilisa óta villamosítva van, amely a civil felhasználás tekintetében kétségtelenül előnyt jelent, de a katonai szempontok háttérbe szorulnak. A bajai vasúti híd egyvágányú, villamosítatlan és 80/100 km/h engedélyezett sebességű vasútvonalon található, ami miatt alkalmatlan jelentősebb mennyiségű teherforgalom áteresztésére. Mindezek következtében nagyon fontos az Összekötő vasúti híd karbantartására kiemelt figyelmet fordítani, hiszen ennek a hídnak van a legfontosabb szerepe mind a hálózatba való bekötöttség, mind pedig a kihasználtság szempontjából.^{13,14}

A vasúti zavarok skálája rendkívül széles lehet. A szerelvények közlekedtetésénél megjelenhetnek olyan akadályozó tényezők is, mint az

11 B. G. Tóth – I. Horváth: How the Planned V0 Railway Line Would Increase the Resilience of the Railway Network of Hungary Against Attacks, *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science* 18 (3), pp. 109-129. (2019); DOI: 10.32565/aarms.2019.3.6

12 Szászi G.: Nagyfolyami vasúti hidak, mint közlekedési létfontosságú rendszer-elemek, in: Horváth A. – Bányász P. – Orbók Á. (szerk.): *Fejezetek a létfontosságú közlekedési rendszer-elemek védelmének aktuális kérdéseiről*, 83-99, Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014, ISBN: 9786155305306

13 Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat redundanciáját biztosító vonalszakaszok, *Hadmérnök* 14/2, 74-86, 2019.

14 Tóth B.: Forgalmatlan, de nélkülözhetetlen - A magyarországi vasúthálózat redundanciavizsgálata, in: Horváth B. – Horváth G. – Gaál B. (szerk.): *Közlekedéstudományi Konferencia, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék*, Győr, 2019, 37/1-9, ISBN: 9789638121868

infrastruktúra-elemek meghibásodása vagy támadása (gördülő állomány, pálya, a közlekedés biztonságát kiszolgáló berendezések^{15,16}); az utóbbi időkben ráadásul megjelentek a vasútállomások ellen elkövetett terrorakciók¹⁷ mellett a nyílt vonalakon végrehajtott rombolások is.¹⁸

Zavarok esetében lehet szó még időszakos akadályokról (például környezeti behatások), logisztikai problémákról (mint a központi felügyelet irányítási hiányosságai) vagy olyan vis major eseményekről, melyek kivédésére nem készült előzetes forgatókönyv. A hálózat zavartűrő képessége már a hálózat felépítéséből fakadóan is rendkívül rossz^{19,20}, de „a kritikus infrastruktúrákkal szembeni követelmények között megjelenő zavarállóság (»robusztus hálózat«) feltételeit alacsony műszaki színvonal esetén lehetetlen biztosítani.”²¹

Emellett meg kell említeni az MH vasúti járműparkkal kapcsolatos hiányosságait is. Bár kétséget kizáróan napjainkban a katonai vasúti szállítások – gazdaságosság tekintetében – a civil szféra szolgáltatásainak igénybevételével elégíthetők ki a legmegfelelőbbben, viszont ez a katonai vasúti szállítások polgári szervektől való rendkívüli függőségét okozza.²²

-
- 15 Lévai Zs: A vasút lehetséges válaszai a legújabbkori biztonsági kockázati kihívásokra, in: Horváth B. – Horváth G. – Gaál B. (szerk.): Közlekedéstudományi Konferencia, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr, 2019, 21/1-18, ISBN: 9789638121868
 - 16 Lévai Zs: A vasúti szektor védelmi lehetőségei terrorakciók ellen, Közlekedéstudományi Szemle 69/5, 50-71, 2019.
 - 17 Horváth A.: A vasúti közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői a városokban, Hadmérnök IV. (3), 180-189. (2009)
 - 18 Horváth A.: A közúti, vasúti és vízi közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői, in: Tálás P. (szerk.): A politikai marketing fogságában, Mágustúdió, Budapest, 321-336, 2006.
 - 19 Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat „gyenge láncszemei”, In: Horváth Balázs, Horváth Gábor, Gaál Bertalan (szerk.): Közlekedéstudományi Konferencia Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr, 2020
 - 20 Horváth A. – Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat támadásokkal szembeni ellenállósága, Hadtudomány XXIX. (E), pp. 93-104. (2019) DOI: 10.17047/HAD-TUD.2019.29.E.93
 - 21 Szászi G.: A vasúti közlekedési alágazat, mint kritikus infrastruktúra, in: Horváth A. (szerk.): Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből, 167-190, Magyar Hadtudományi Társaság, Budapest, 2013, ISBN: 9789630869263
 - 22 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

Az ország védelmi felkészítésében elengedhetetlen lenne legalább egy nehéz pórekocsikból és dízelmozdonyokból álló gördülő állomány megléte.²³ Ahogy az több, a vasút fejlődésével kapcsolatos tanulmányból is kitűnik, a polgári piac fokozódó érdeklődést mutat a vasútvonalak, illetve a vasúti járműpark villamosítása iránt. Azonban egyértelműen kijelenthető, hogy védelmi szempontból a dízelmozdonyokkal történő közlekedés a kedvezőbb, hiszen az elektromos hálózat szintén kritikus infrastruktúrának minősül, és könnyen válhat támadás célpontjává.

Az önálló vasúti járműpark, dízel vontatóállomány fenntartása ugyanakkor kérdéseket is felvet, mivel a közúti szállítások száma (és volumene) egyértelmű növekedést mutat az elmúlt években. Ugyanakkor az európai trendeket követendő és a meglévő infrastruktúrát hatékonyabban kihasználható, fontos lenne a kötöttpályás közlekedésnek a jelenleginél magasabb prioritást biztosítani.

Ahogy költség szempontjából nem mindegy, hogy közúton vagy vasúton (vagy légi úton) szállítunk; hogy vasúti szállítás esetén dízel vagy villamos vontatással történik egy szerelvény továbbítása; vagy hogy azt saját tulajdonú vasúti kocsikkal tesszük (azok minden fenntartási költségével együtt) vagy a gördülőállomány csak bérlemény; ugyanúgy nem mindegy, hogy két adott pont közötti szállítást minimális úton vagy minimális idő alatt akarjuk teljesíteni. Előbbi eset a kereskedelmi célú vasúti szállítások fő szempontja: a közlekedtetési és a felsővezeték-használati díj is kilométeralapú,²⁴ míg mozdonyokat gyakran munkanaponkénti fix összegért adnak bérbe. Egy különleges jogrendi időszak esetén azonban lényeges szempont lehet az idő: sok esetben előfordulhat, hogy a legrövidebb út nem a leggyorsabb.

A magyarországi vasúthálózat matematikai modellje

A következőkben bemutatjuk a számolások során használt fogalmakat és hogy milyen módon képeztük le a magyarországi vasúthálózatot egy matematikai modellé.

23 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

24 <https://www2.vpe.hu/dijszamitasi-dokumentum-dd>

Vasúti fogalmak

A modell működésének megértéséhez nélkülözhetetlen néhány, vasúttal kapcsolatos fogalom pontos definiálása. Menetvonal alatt a vasúti pályahálózat-kapacitásnak azt a részét fogjuk érteni, amely egy adott időszakban egy vonat két pont között adott időtartam alatt történő közlekedtetéséhez szükséges.²⁵ A menetvonal hosszát annak két végpontja között a hozzá tartozó útvonal hosszaként értelmezzük, a menetidő a leközlekedtetés időtartama, azaz az érkezési és az indulási időpontok különbsége.

Az állomás olyan szolgálati hely, ahol a vasúti szerelvény képes megfordulni, vagyis haladását az érkezési irányba tovább folytatni. Nem vettük figyelembe a modellünkben a megállóhelyeket, ahol nincs lehetőség irányváltásra, és az olyan állomásokat sem, melyek egy-egy vonalszakasz közbenső állomásai, csak az elágazó és a csatlakozó állomásokat. Kivételt képeztek azok az állomások, ahol az adott településen az MH egy bázisa található (pl. Tata). Állomásköz alatt a két szomszédos állomás közötti nyílt pályát értjük.

A magyarországi vasúthálózat gráfmodellje

Modellünk megalkotásához szükség volt olyan matematikai apparátusra, mely számításainkhoz a lehető legjobban képes leképezni a magyarországi vasúthálózatot. Választásunk a legtermészetesebb módon esett a kombinatorika egyik legdinamikusabban fejlődő ágára, a gráfelméletre. Mivel a modell korábbi cikkekben már részletesen be lett mutatva,^{26,27,28} itt csak a jelen cikkben bemutatott kutatás megértéséhez szükséges mélységben ismertetjük azt.

Gráf alatt csúcsok és élek rendezett halmazát értjük. Minden él pontosan két csúcst köt össze, de egy csúcshoz akár mennyi él csatlakozhat. Az egyes élek lehetnek irányítatlanok, illetve irányítottak, ez

25 2005. évi CLXXXIII. törvény a vasúti közlekedésről, <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0500183.tv>

26 Tóth B.: Állomások és állomásközök zavarának gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton, *Hadmérnök* 12/4, 52-66, 2017.

27 Tóth B.: Menetidő- és menetvonalhossz növekedés gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton állomások és állomásközök zavara esetén, *Hadmérnök* 13/1, 118-132, 2018.

28 Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat zavarainak gráfelméleti alapú vizsgálata, in: Horváth B. – Horváth G. – Gaál B. (szerk.): *Közlekedéstudományi Konferencia*, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr, 2018, 505-519, ISBN: 9786155776137

utóbbi esetben mozgás csak az előre meghatározott módon történhet. Az élek lehetnek továbbá súlyozatlanok vagy súlyozottak, előbbi esetben minden él egyforma „hosszú”, utóbbinál mindegyikhez egy előre meghatározott értéket, gyakorlatilag egy hosszértéket rendelünk; bár ez a „hossz” jelentheti a két összekötött csúcs valódi fizikai távolsága mellett az azok közti eljutási időt, költséget stb.

Modellünkben a gráf csúcsai reprezentálták az egyes állomásokat, míg az élek a köztük levő vonalszakaszokat. Az élek súlyozása a minimális út probléma esetében az egyes vonalszakaszok hossza volt, a minimális menetidő probléma esetében pedig a rajtuk engedélyezett sebességből és a hosszukból számított menetidő. Az adatok forrása a VPE Kft. weblapja volt.²⁹ A legrövidebb út, illetve a legrövidebb menetidő számításakor a menetvonal hossza, illetve a menetideje az érintett gráfbeli élekhez rendelt súlyok összegeként adódik. A használt gráf diagramját az 1. ábrán láthatjuk.

A tengelyterhelést, a sebességkorlátozásokat vagy a szerelvények gyorsulására vonatkozó adatokat (indítási és fékezési időket, vagy például a vasúti pálya kanyarjaiban engedélyezett alacsonyabb sebességet) nem építettük bele a modellünkbe, azaz az itt szereplő menetidőértékek idealizáltak, még a tiszta menetidőnél is rövidebbek. Bár kétségtelen, hogy a menetrendtervező programokhoz hasonlóan, differenciálegyenletek alkalmazásával ki lehetne számítani a pontos menetidőket ezen tényezők figyelembevételével, a vizsgálat szempontjából ezek olyan mértékű korrekciókat adnának, melyek nem befolyásolnák érdemben az eredményeket, ezért elhanyagolhatóak.

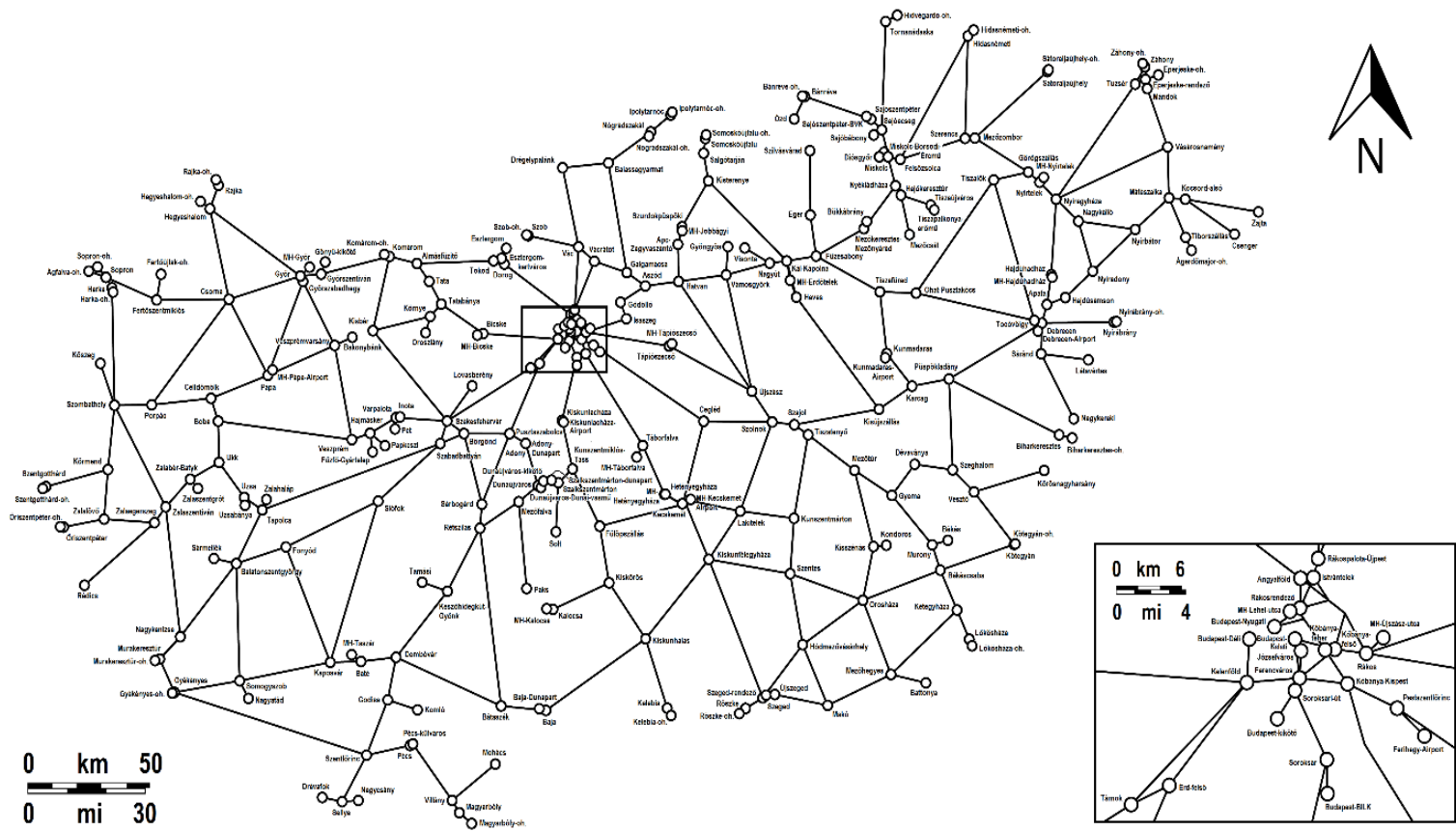
Az állomásokon esetlegesen szükséges irányváltás időszükségletét azonban beépítettük a modellbe, melyre 15 percet határoztunk meg.^{30,31} Ehhez szükséges volt az állomásokat úgynevezett csúcsthúzással³² nem egy, hanem négy gráfbeli csúccsal reprezentálni. Az egyes állomások kezdőponti és végponti oldalán is definiáltunk két-két csúcst (egy oldalon egy „indulási” és egy „érkezési” csúcst), melyeket a 2. ábrán látható módon kötöttünk össze irányított élekkel.

29 http://www.vpe.hu/takt/vonal_lista.php

30 Szily I. – Szabó L.: *Vasúti üzemtan II.*; Széchenyi István Egyetem - Universitas-Győr Kht. (Győr), 2006, 234. o.

31 Ercsey Z. – Kisteleki M. – Vincze T.: *Lassújelek hatásai a vasúti közlekedés költségeire 2. rész*; Vasútgépészet 2012/3. 16-19. o.

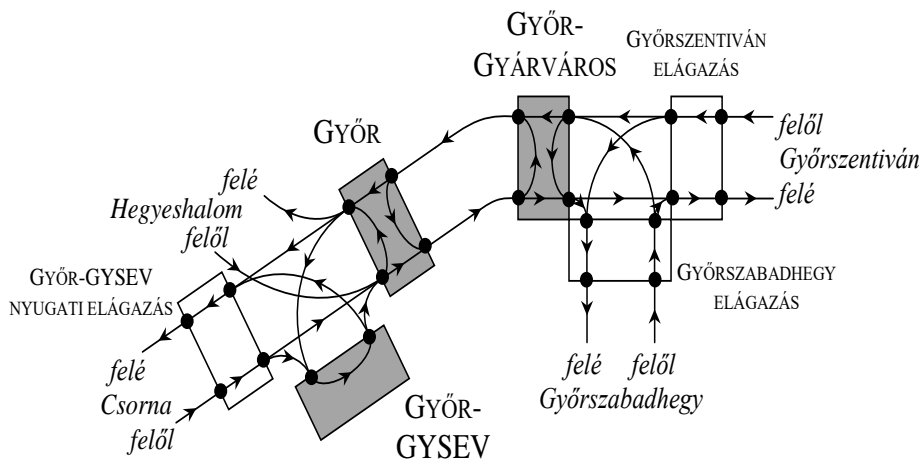
32 Zentai D.: *Gráfelméleti módszerek a kritikus infrastruktúra védelemben*; Hadmérnök XII. 2. (2017) 341-347. o.



1. számú ábra. A modellgráf felépítése

Szükséges volt továbbá az egyes állomásközöket reprezentáló élek megkettőzése is (azonos súllyal) és irányításuk úgy, hogy az egyik él a két szomszédos állomás egyikének „indulási” csúcsából a másik „érkezési” csúcsába mutasson, a másik pedig fordítva, ezzel biztosítva, hogy az irányváltást leíró élt a használt program figyelembe veszi a számítások során.

Egy állomáshoz tartozó azonos oldali csúcsok közötti élekhez, mint az irányváltást reprezentáló élekhez, rendeltük a 15 perc súlyt. Az elmentés oldali csúcsok közötti élek 0 perc súlyúak voltak (azaz az állomáson való áthaladáshoz nem rendeltünk extra időszükségletet), és a menetvonalhosszak meghatározásakor mind a négy él 0 km súllyal szerepelt.



2. számú ábra. Az állomások és állomásközök gráfbeli reprezentálása Győr példáján bemutatva. Az állomások szürke, a deltavágányok kiterői fehér színnel szerepelnek.³³

Ahogy a 2. ábrán is látható, a modellbe beépítettük a hálózatban levő deltavágányokat is, de ezeken csak az egyes állomások elkerülését tettük lehetővé, állomásra való behaladás nélküli irányváltást nem (az azonos oldali csúcsok között nincs él a gráfban). Fejállomások esetében egy „indulási” és egy „érkezési” csúcsot definiáltunk az állomás azonos oldalán, és ezeket is összekötöttük egy 15 perc, illetve 0 km súlyú élel.

33 Tóth B.: Állomások és állomásközök zavarának gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton, Hadmérnök 12/4, 52-66, 2017.

A modellünkben összesen 291 állomás és 366 állomásköz szerepel, melyeket összesen 1136 csúcs és 1808 él ír le a gráfban.

A legrövidebb út számítása

Két állomás között az időben, illetve távolságban legrövidebb utat az *R* programozási nyelv és környezetben³⁴ határoztuk meg a Csárdi Gábor és Nepusz Tamás által kifejlesztett *igraph* csomag³⁵ segítségével. Az *igraph* csomag egy gráfot egy úgynevezett éllistaként kezel, amely egy kétszlopos mátrix, melynek minden sora egy gráfbeli élnek felel meg. A mátrix elemei a gráf csúcsaihoz rendelt számok; irányított gráf esetében az élek az első oszlopbeli csúcstól a második oszlopbeli csúcsba mutatnak; irányítatlan gráfok esetében a csúcsok sorrendje egy-egy élt leíró sor esetében lényegtelen. Minden élhez hozzárendelhető egy súly; ennek hiányában a program az élek súlyát 1-nek veszi.

Az *igraph* csomag *distances()* függvénye minden állomáspár között meghatározza a legrövidebb út hosszát, amelyhez pozitív élsúlyú gráfok esetén (mint a mi esetünkben is) a Dijkstra-algoritmust használja³⁶. A *shortest_paths()* függvény segítségével meghatározható két pont között a legrövidebb út pontos útvonala is: a *\$vpath* paranccsal az érintett csúcsok, a *\$epath* paranccsal pedig az érintett élek listázhatóak ki. Jelöljük két csúcs közötti legrövidebb útnak a hosszát l_0 -al távolságokkal való súlyozás esetén és t_0 -al menetidőkkel való súlyozás esetén. Természetesen az l_0 -hoz és a t_0 -hoz tartozó konkrét csúcsoknak, illetve éleknek nem kell azonosaknak lenniük; sőt, általában, ahogy ezt látni is fogjuk később, ezek lényegesen különböznek.

Zavarok modellezése

Zavar alatt egy állomásköz teljes kizárását fogjuk érteni. Ezt a megfelelő gráfbeli élpár törlésével modelleztük. A lehetséges kerülő útirányok meghatározásához először tehát meghatároztuk a két végpont között az (adott súlyozás esetén) optimális útvonal által érintett állomásközöket, majd ezeket egyesével törölve újra meghatároztuk közöttük a legrövidebb utat az egyes zavart hálózatokban.

34 R Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>

35 Csardi G. – Nepusz T.: The *igraph* software package for complex network research, *InterJournal, Complex Systems* 1695. 2006. <http://igraph.org>

36 Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik* 1/1, 269-271, 1959, DOI: 10.1007/BF01386390

Ezután minden egyes kerülőút esetén minden érintett állomásköz-höz hozzárendeltük a zavart állomásköz hosszának a zavarmentes hálózatbeli menetvonal teljes hosszához képesti arányát (menetvonal-hosszra történő optimalizálás esetén); illetve a zavart vonalszakaszon való áthaladás menetidejének a zavarmentes hálózatbeli menetvonal teljes menetidejéhez képesti arányát (menetidőre történő optimalizálás esetén). Ezzel azt a feltételezést építettük be a modellbe, hogy a hosszabb, illetve lassabban bejárható vonalszakaszokon nagyobb valószínűséggel fordul elő zavar, mint a rövidebb vonalszakaszokon, illetve azokon, melyeken kevesebb ideig tartózkodik a szerelvény. Tegyük fel, hogy a zavarmentes hálózatban az optimális útvonal n darab állomásköz érint. Jelöljük az i -edik állomásköz hosszát l_i -vel, menetidejét t_i -vel ($1 \leq i \leq n$). Az i -edik állomásköz zavara esetén a kerülőút minden állomásközéhez rendeljük hozzá az $r_i^l = l_i / l_0$, illetve a $r_i^t = t_i / t_0$ arányt.

Ezután összeadtuk az egyes zavart hálózatokban az egyes állomásközökhöz meghatározott r_i arányokat, ezzel az adott viszonylatban a hálózat minden állomásközéhez meg tudtuk határozni egy mérőszámot, melyet helyettesítési aránynak (h) neveztünk:

$$h^l = \sum_{i=1}^n r_i^l = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{l_0} \quad (1)$$

$$h^t = \sum_{i=1}^n r_i^t = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{t_0} \quad (2)$$

A helyettesítési arány tehát azt jellemzi, hogy az adott állomásköz milyen gyakorisággal szerepel kerülőútvonal részeként az optimális útvonal egyes szakaszainak zavarai esetén, értéke 0 és 1 közé esik. Ha egy adott viszonylat esetében a zavarmentes hálózatbeli optimális útvonal bármelyik állomásközének zavara esetén ugyanaz az irány lesz a kerülőút, ezen útvonal állomásközének helyettesítési aránya 1 lesz. Ha legalább két különböző alternatív útvonal létezik, vagy valamely állomásköz nem helyettesíthető (mivel az zsákvonal), az állomásközök helyettesítési aránya 1-nél kisebb lesz. A helyettesítési arány értéke természetesen a hálózat legtöbb állomásközére nulla, hiszen a hálózat összes vonalszakaszának csak egy kis részét vesszük igénybe egy viszonylat leközlekedtetésében. Az egyes állomásközök helyettesítési

arányának értéke jelentősen eltérhet attól függően, hogy távolságra vagy menetidőre optimalizálunk.

Ezt az eltérést bemutatandó, egy olyan példán keresztül demonstráljuk módszerünket, mely jól szemlélteti a magyarországi vasúthálózat ezen kettősségét. A bemutatandó menetvonalak két végpontja Szentés vasútállomás és Rákos MH scvp. A szentesi MH 37. II. Rákóczi Ferenc Műszaki Ezred (melynek jogelődje éppen az 1. Vasút- és Hídépítő Zászlóalj³⁷) vasúti be- és kivagonírozás szempontjából egy optimális helyen települt egység még úgy is, hogy nem rendelkezik scvp. kapcsolattal, mivel a szentesi vasútállomás rakodóterén minden szükséges feladat kivitelezhető.³⁸ A Magyar Honvédség Anyagellátó Raktárbázis (MH ARB) budapesti Újszász utcai központja rendelkezik saját vágánykapcsolattal (Rákos MH scvp.).

Az eredmények vizualizálásánál a helyettesítési arányt ábrázoltuk az egyes állomásközhöz tartozó élek vastagságként. A zavarmentes hálózatbeli optimális utat zölddel, a kerülő útvonalakban szereplő állomásközeiket pirossal jelöltük.

Alkalmazás a Szentés – Rákos MH scvp. viszonylatra

A következőkben bemutatjuk a Szentésen található MH 37. II. Rákóczi Ferenc Műszaki Ezred és az Újszász utcában diszlokáló MH ARB közötti vasúti kapcsolat változását, ha az optimális útvonal valamely állomásköze zavart szenved.

Minimális hosszúságú menetvonalak

A 3. ábrán láthatjuk az egyes állomásköze h^f helyettesítési arányát a Szentés – Rákos MH scvp. viszonylaton minimális hosszúságú menetvonalakra.

Azt látjuk, hogy a vizsgált viszonylaton egy szerelvény a kilométerben legrövidebb úton a Szentés – Kiskunfélegyháza – Kecskemét – Lajosmizse – Budapest útvonalon közlekedne, melynek hossza 159 km. Ennek az útvonalnak a helyettesítési aránya azonban végig nagyon alacsony, 10% alatti, kivéve természetesen a zsákvonal Rákos –

37 <https://honvedelem.hu/alakulatok/mh-37-ii-rakoczi-ferenc-muszaki-ezred/>

38 <https://2010-2014.kormany.hu/hu/honvedelmi-miniszterium/honved-vezekar/hirek/vasuti-rakodast-gyakoroltak-a-katonak-szentesen>

Rákos MH scvp. szakaszt. Ezt az okozza, hogy bármelyik Budapesten kívüli állomásközének zavara esetén a kerülőútvonal teljesen más irányban halad, Szentés – Kunszentmárton – Tiszatenyő – Szolnok – Újszász – Budapest felé. Ezen egyetlen alternatív útvonalnak a helyettesítési aránya 91%. A Budapesten belüli állomásközök sérülése esetén szóba jön még a Kőbánya-Kispest – Ferencváros – Kőbánya felső, illetve a Kőbánya-Kispest – Zugló – Rákosrendező – Körvasút – Rákos útirány, ezek azonban nem jelentősek, a helyettesítési arányuk 2%.



3. számú ábra. Az egyes vonalszakaszok h^l helyettesítési aránya a Szentés – Rákos MH scvp. viszonylatra, távolságban legrövidebb utakra. A zavarmentes hálózatban optimális útvonalhoz tartozó állomásközök zölddel, a csak kerülőutak részeként használt állomásközök pirossal vannak jelölve.

A Budapestig való eljutás tehát egy teljesen másik útvonalon valósul meg, a 142-es vonal helyett a 130-as és 120/120a vonalakon. Ez azt jelenti, hogy az alternatív irány, mivel csak egy van belőle, az optimális iránnyal gyakorlatilag azonos fontosságú. Fontos szerep jut tehát a kerülőútvonalon fekvő állomásközöknek, melyek esetleges villamosítatlansága jelen helyzetben nem hátrány, mivel a zavarmentes hálózatbeli optimális útvonal a Kiskunfélegyháza – Kecskemét szakaszt leszámítva szintén villamosítatlan.

Ez azonban nemcsak a megfelelő dízel vontatóállomány szükségességére hívja fel a figyelmet, hanem az MH egységei vasúti

kapcsolatainak megfelelő karbantartására is. Mivel mindkét, Szentes vasútállomást érintő vonal villamosítatlan, és a 130-ason a megengedett sebesség 80 km/h, a 147-esen Kiskunfélegyháza felé 30/60 km/h, Orosháza felé pedig 50 km/h, nem csak a szállítások gazdaságossága kérdéses, hanem azok kivitelezhetősége is: a 130-as vonalon a tengelyterhelés ugyanis 210 kN, de a 147-esen Kiskunfélegyháza felé 160 kN, Orosháza felé pedig csak 120 kN, amely a 130-as vonal zavara esetén jelentősen korlátozhatja a szállítható eszközök spektrumát. Figyeljük meg, hogy a tengelyterhelés sehol sem éri el a 225 kN-os értéket, mivel erre a TEN-T hálózaton elvárt értékre az egész országban csak az 1-es, 15-ös, 21-es, 25-ös, 44-es, 92a, 100a, 120-as, 140-es vonalak egy szakasza van kiépítve, összesen 497 km hosszon (melynek harmada az 1-es fővonalon található).^{39,40}

Hasonlóan csak villamosítatlan vasúti kapcsolattal rendelkezik Pápa bázisrepülőtér,⁴¹ a Hódmezővásárhelyen települt 5. sz. Bocskai István lövészdandár egyes alegységei és az ARB táborfalvai, hetényegyházai, kalocsai, hajdúsámsoni és mezőfalvai raktárbázisai.

Minimális menetidejű menetvonalak

A 4. ábrán láthatjuk az egyes állomásközök h' helyettesítési arányát a Szentes – Rákos MH scvp. viszonylaton, minimális menetidejű menetvonalakra.

Azt látjuk, hogy a két vizsgált végpont között egy vonat leggyorsabban a Szentes – Kunszentmárton – Tiszatenyő – Szajol – Szolnok – Cegléd – Budapest útvonalon juthat el. Vagyis a lehető leggyorsabban a villamosított 120-as fővonalra vezet az út, majd a 100a fővonalon közelíti meg a fővárost, ahol Rákosrendezőn keresztül a Körvasúton át éri el Rákos vasútállomást. A teljes menetidő 136 perc.

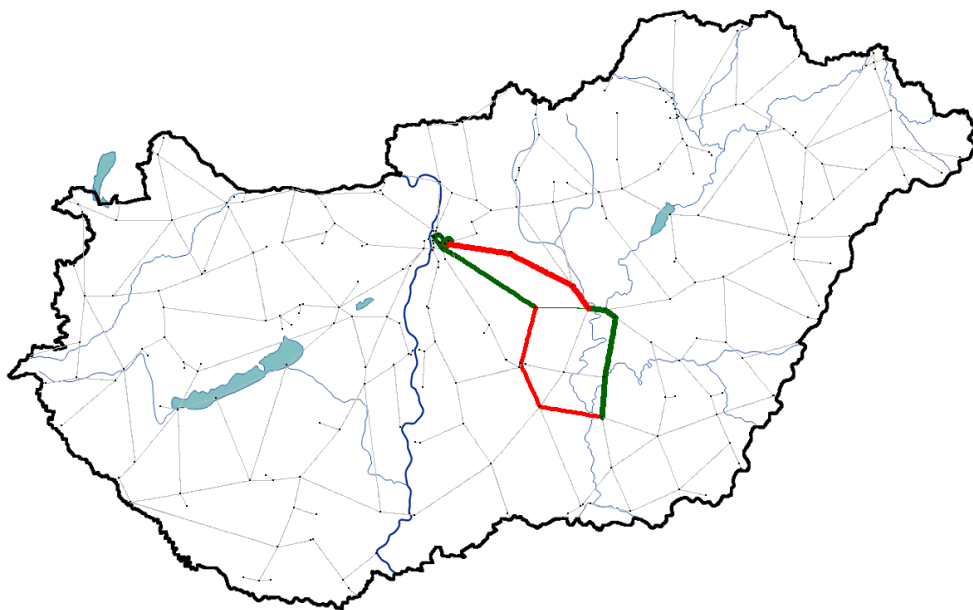
A 100a fővonal Cegléd–Szolnok szakaszának helyettesítési aránya minimális menetidők esetében 3%, amely Szolnok állomás belső vágányhálózatának sérüléseiből származik. Bármely, állomások közti nyílt vonal sérülése esetén tehát a zavarmentes hálózatbeli optimális menetvonal ezen szakasza sosem része kerülőútnak: azok vagy a

39 Szászi G.: Magyarország közlekedési infrastruktúrájának fejlesztése napjainkban: Közút vagy vasút? *Katonai Logisztika* 15/2, 32-59, 2007.

40 http://www.vpe.hu/takt/vonal_lista.php

41 Szászi G.: A védelmi szempontból meghatározó repülőterek vasúti kapcsolatainak helyzete Magyarországon, *Repüléstudományi Közlemények* (1997-től) 21/Különszám, 1-22, 2009.

140-es vonalon át érik el Ceglédet, majd onnan Kőbánya-Kispest felé haladva Budapestet, vagy Szolnok után a 120a fővonalon Újszászon át mennek a főváros felé. Ezen két kerülőirány azonban egyenrangú, 38, illetve 45 százalékos helyettesítési aránnyal.



4. számú ábra. Az egyes vonalszakaszok h^t helyettesítési aránya a Szentés – Rákospalota MH scvp. viszonylatra, időben legrövidebb utakra. A zavarmentes hálózatban optimális útvonalhoz tartozó állomásközp. zölddel, a csak kerülőutak részeként használt állomásközp. pirossal vannak jelölve.

A zavarmentes hálózatbeli optimális útvonal annyira kedvező, hogy a Budapesten belüli minimális menetidejű menetvonalak, ha nem Újszász felől érkezünk, minden esetben a fent leírt módon, a Körvasúton keresztül vezetnek Rákospalota vasútállomásra. Ez is jól mutatja a távolságra és a menetidőre való optimalizálás különbségét: minimális távolság esetében a Királyvágány volt az optimális útvonal a 100a és a 120a vonalak között Budapesten belül, amely az irányváltás és az alacsony engedélyezett sebesség miatt menetidő szempontjából közel sem optimális. Emellett a pálya is egyvágányú, amely kapacitás szempontjából is hátrány, de ezt a paramétert itt nem vettük figyelembe. A zavarmentes hálózatban a távolságban legrövidebb útvonal helyett egy 17%-kal hosszabb, 186 kilométeres útvonalat kellett választani ezen két végpont között menetidőre való optimalizálás esetén, amely 39%-os menetidő-csökkenést jelentett, a kilométerben legrövidebb útvonal menetideje ugyanis 223 perc volt.

Az Alföldön található vasúti vonalhálózat, bár az ország vasútvonalakkal legsűrűbben ellátott régiója, jelen állapotában nem képes megfelelni a kor kihívásainak. Ezen a példán is láthatjuk, hogy „logisztikai szempontból a vasúthálózat minőségi jellemzőit tekintve az egyik legnagyobb lemaradás az engedélyezett sebesség terén figyelhető meg. A sebességkorlátozással érintett pályahossz a TEN-T hálózaton is eléri a 31%-ot.”⁴²

Általános kitekintés az MH vasúti kapcsolattal rendelkező bázisaira

Minden, vasúti kapcsolattal rendelkező MH-bázispárra elvégeztük a helyettesítő utak megkeresését mind időre, mind távolságra optimalizálva. Az egyes alternatív útvonalak teljes hosszát, illetve teljes menetidejét súlyoztuk a megfelelő zavart állomásköz időben vagy távolságban mért hosszával, és így kiátlagoltuk őket. Azt találtuk, hogy átlagosan 26%-kal hosszabb távolságban és 38%-kal hosszabb időben egy vasúti kerülőút két bázis között, mint a zavarmentes hálózatbeli útvonal. A legszélsőségesebb ilyen pár a Székesfehérvár és Várpalota, melyek között a közvetlen összeköttetést megteremtő 20-as számú vasútvonal zavara esetén a kilométerben legrövidebb út Komáromon, Győrön és Veszprémen át vezet, nagy részben villamosítatlan és alacsony pályasebességű vonalakon, az időben legrövidebb út pedig a Balaton északi partján, Veszprémen, Bobán és Tapolcán át, szintén jelentős részben villamosítatlan vonalakon.

De eltekintve az ilyen és ehhez hasonló extrémításoktól, általánosan is kijelenthető, hogy hiába van két MH scvp. között villamosított fővonalú út, annak sérülése esetén csak jelentős idő- és/vagy távolságnövekedéssel kivitelezhető a vasúti szállítás.

Ezen probléma kétféle módon lenne kezelhető. Egyrésztől szükséges lenne a fent bemutatott módon azonosítani az ország védelmi felkészítése szempontjából legszükségesebb vasútvonalakat, és elvégezni ezek villamosítását. Azonban az elektromos hálózat önmagában is kritikus infrastruktúra, és ezért sérülése szintén jelentős zavart tud okozni. Ezért célszerű lenne megfelelő számú dízelmozdony (esetleg

42 Lakatos P. – Szászi G. – Taksás B: A logisztikai infrastruktúra szerepe a regionális versenyképesség alakításában, in: Csath M. (szerk.): Regionális versenyképességi tanulmányok, 181-288, NKE Szolgáltató Nonprofit Kft., Budapest, 2016.

dízel segédhajtású villanymozdony) beszerzése is, hogy a szükséges szállítások elvégezhetőek legyenek a jelenlegi vasúti infrastruktúra igénybevételével is.

Ugyanakkor szükséges felmérni az ilyen jellegű fejlesztések és beszerzések gazdasági vonatkozásait is, de ezen szempontok analízise nem témája a jelen cikknek. Az mindenesetre nem elhanyagolható körülmény, hogy jelenleg „a polgári oldalról közelítve szinte lehetetlen pontosan meghatározni azoknak a számát, akik a közlekedési rendszerhez kapcsolódóan érintettek gazdasági és anyagi szolgáltatási kötelezettség teljesítésében. Ezért a pontos nyilvántartások nélkül a védelmi felkészítés és – bármilyen szektorban – a honvédelmi érdek érvényesítése eleve kudarcra van ítélve.”⁴³

Összefoglalás, javaslatok

A bemutatott példa és az említésre került problémák alapján megállapíthatjuk, hogy bár a Magyar Honvédség alakulatai vasúti kapcsolatainak mennyisége jónak mondható, ezen kapcsolatok minősége már kevésbé. Villamosított fővonalai kapcsolattal rendelkező bázisok elérhetősége is csak (időben és térben) hosszabb kerülővel valósítható meg a közvetlen eljutást biztosító vasútvonal sérülése esetén.

Mivel a vasúthálózat kritikus infrastruktúra, ezért az ország védelmi felkészítésében kiemelt szerepet kell játszania a megfelelő számú és minőségű kapcsolat biztosításának az MH bázisaihoz. Ez megvalósítható a vasútvonalak fejlesztésével (villamosítás, pályasebesség-emelés), megfelelő számú dízelmozdony rendszerbe állításával, esetleg dízel-villamos mozdonyok beszerzésével.

Ugyanakkor a fizikailag sérült vasúti pálya vagy elektromos hálózat helyreállításához jelenleg nincsenek meg az MH képességei. Szükséges lenne ezért olyan vasútépítő szakcsapatok képzése is, melyek rendkívüli esetekben képesek a lehető legrövidebb időn belül járhatóvá tenni a sérült pályaszakaszokat.

43 Horváth A.: Szempontok a katonai közlekedési védelemigazgatási és nemzetgazdasági kapcsolatrendszeréről, *Katonai Logisztika* 2016/különszám, 245-266, 2016.

Felhasznált irodalom

- 1) 2005. évi CLXXXIII. törvény a vasúti közlekedésről,
<https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0500183.tv>
- 2) 277/2014. (XI. 14.) Kormányrendelet a vasúti közlekedési hatóság által kiszabható bírság mértékéről és megfizetésének részletes szabályairól; <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1400277.kor>
- 3) Csardi G. – Nepusz T.: The igraph software package for complex network research, InterJournal, Complex Systems 1695. 2006.
<http://igraph.org>
- 4) Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs, Numerische Mathematik 1/1, 269-271, 1959, DOI: 10.1007/BF01386390
- 5) Ercsey Z. – Kisteleki M. – Vincze T.: *Lassújelek hatásai a vasúti közlekedés költségeire 2. rész*; Vasútgépészet 2012/3. 16-19. o.
- 6) Horváth A. – Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat támadásokkal szembeni ellenállósága, Hadtudomány XXIX. (E), pp. 93-104. (2019) DOI: 10.17047/HADTUD.2019.29.E.93
- 7) Horváth A.: A közúti, vasúti és vízi közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői, in: Tóth P. (szerk.): A politikai marketing fogásában, Mágustúdió, Budapest, 321-336, 2006.
- 8) Horváth A.: A vasúti közlekedés terrorfenyegetettségének jellemzői a városokban, Hadmérnök IV. (3), 180-189. (2009)
- 9) Horváth A.: Szempontok a katonai közlekedési védelemigazgatási és nemzetgazdasági kapcsolatrendszeréről, Katonai Logisztika 2016/különszám, 245-266, 2016.
- 10) http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_odmv004.html
- 11) http://www.vpe.hu/takt/vonal_lista.php
- 12) <https://2010-2014.kormany.hu/hu/honvedelmi-miniszterium/honved-vezerkar/hirek/vasuti-rakodast-gyakoroltak-a-katonak-szentesen>
- 13) <https://honvedelem.hu/alakulatok/mh-37-ii-rakoczi-ferenc-muszaki-ezred/>
- 14) <https://w3.unece.org/PXWeb/en/CountryRanking?Indicator-Code=47>
- 15) <https://www2.vpe.hu/dijszamitasi-dokumentum-dd>

- 16) Lakatos P. – Szászi G. – Taksás B: A logisztikai infrastruktúra szerepe a regionális versenyképesség alakításában, in: Csath M. (szerk.): Regionális versenyképességi tanulmányok, 181-288, NKE Szolgáltató Nonprofit Kft., Budapest, 2016.
- 17) Lévai Zs: A vasút lehetséges válaszai a legújabbkori biztonsági kockázati kihívásokra, in: Horváth B. – Horváth G. – Gaál B. (szerk.): Közlekedéstudományi Konferencia, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr, 2019, 21/1-18, ISBN: 9789638121868
- 18) Lévai Zs: A vasúti szektor védelmi lehetőségei terrorakciók ellen, Közlekedéstudományi Szemle 69/5, 50-71, 2019.
- 19) R Core Team: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2012. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>
- 20) 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)
- 21) Szászi G.: A vasúti közlekedési alágazat, mint kritikus infrastruktúra, in: Horváth A. (szerk.): Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből, 167-190, Magyar Hadtudományi Társaság, Budapest, 2013, ISBN: 9789630869263
- 22) Szászi G.: A védelmi szempontból meghatározó repülőterek vasúti kapcsolatának helyzete Magyarországon, Repüléstudományi Közlemények (1997-től) 21/Különszám, 1-22, 2009.
- 23) Szászi G.: Katonai vasúti szállítások a Magyar Honvédség misziós feladatainak rendszerében, Szolnoki Tudományos Közlemények 16, 101-118, 2010.
- 24) Szászi G.: Magyarország közlekedési infrastruktúrájának fejlesztése napjainkban: Közút vagy vasút? Katonai Logisztika 15/2, 32-59, 2007.
- 25) Szászi G.: Nagyfolyami vasúti hidak, mint közlekedési létfontosságú szerelemek, in: Horváth A. – Bányász P. – Orbók Á. (szerk.): Fejezetek a létfontosságú közlekedési szerelemek védelmének aktuális kérdéseiről, 83-99, Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014, ISBN: 9786155305306

- 26) Szászi G.: Transz Európai Közlekedési Hálózat (TEN-T) tervezett fejlesztési iránya, várható hatása Magyarország vasúthálózatának fejlesztésére, Szolnoki Tudományos Közlemények, 16, 402-425, 2012.
- 27) Szily I. – Szabó L.: *Vasúti üzemtan II.*; Széchenyi István Egyetem - Universitas-Győr Kht. (Győr), 2006.
- 28) Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat „gyenge láncszemei”, In: Horváth Balázs, Horváth Gábor, Gaál Bertalan (szerk.): Közlekedéstudományi Konferencia Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr, 2020
- 29) Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat redundanciáját biztosító vonalszakaszok, *Hadmérnök* 14/2, 74-86, 2019.
- 30) Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat zavarainak gráfelméleti alapú vizsgálata, in: Horváth B. – Horváth G. – Gaál B. (szerk.): Közlekedéstudományi Konferencia, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr, 2018, 505-519, ISBN: 9786155776137
- 31) Tóth B.: Állomások és állomásközpontok zavarának gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton, *Hadmérnök* 12/4, 52-66, 2017.
- 32) Tóth B.: Forgalmatlan, de nélkülözhetetlen - A magyarországi vasúthálózat redundanciavizsgálata, in: Horváth B. – Horváth G. – Gaál B. (szerk.): Közlekedéstudományi Konferencia, Széchenyi István Egyetem Közlekedési Tanszék, Győr, 2019, 37/1-9, ISBN: 9789638121868
- 33) Tóth B.: Menetidő- és menetvonalhossz növekedés gráfelméleti alapú vizsgálata a magyarországi vasúthálózaton állomások és állomásközpontok zavara esetén, *Hadmérnök* 13/1, 118-132, 2018.
- 34) Tóth, B.G. – Horváth, I.: How the Planned V0 Railway Line Would Increase the Resilience of the Railway Network of Hungary Against Attacks, *Academic and Applied Research in Military and Public Management Science* 18 (3), pp. 109-129. (2019); DOI: 10.32565/aarms.2019.3.6
- 35) Zentai D.: *Gráfelméleti módszerek a kritikus infrastruktúra védelmében*; *Hadmérnök* XII. 2. (2017) 341-347. o.