

A magyarországi vasúthálózat kapacitáskorlátainak matematikai modellezése különös tekintettel a Magyar Honvédség szállítási feladataira

A magyarországi vasúthálózat egyes vonalainak átbocsátóképessége erősen változik a vágányszám, a pályasebesség, a térközi közlekedés kiépítettsége, a közlekedtethető vonathossz stb. függvényében. A vizsgálatok arra irányulnak, hogy a hálózat átbocsátóképessége a Magyar Honvédség (MH) szempontjából: különleges jogrendi helyzet idején mekkora a hálózat maximális teljesítőképessége?

Kulcsszavak: vasúthálózat, gráfelmélet, átbocsátóképesség, kapacitás, Magyar Honvédség, villamosítás

DOI: <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2024.4.2>

Ardai István Tamás¹ – Dr. Tóth Bence²

^{1,2} Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
e-mail: aistvan26@gmail.com, toth.bence@uni-nke.hu

1. BEVEZETÉS

Az infrastruktúra-rendszerek állapota alapvetően befolyásolja a funkcionalitásukat. Különösen igaz ez a létfontosságú rendszerelemekre, más néven kritikus infrastruktúrákra, amelyek egyike a vasúti közlekedési hálózat [1]. A pálya, a felsővezeték és a gördülőállomány mennyisége, rendelkezésre állása, biztonsága és helyettesíthetősége meghatározza, hogy egy különleges jogrendi időszakban milyen hatékonysággal mozgósíthatók a rendelkezésre álló személyi és technikai erőforrások.

Az egyes országok vasúthálózatát a villamosítottasági arányával is szokás jellemezni. Ez az érték Magyarországra 40,8%, amivel

az EU-n belül tizenhatodikok vagyunk (Svájc esetében ez a mutató 99,8%, Írország 2,6%) [2],[3]. Megjegyzendő, hogy az áramellátás zavara is súlyosan befolyásolja a vasút szállítási képességeit, ha nem áll rendelkezésre megfelelő számú dízelmozdony.

A Magyar Honvédség (MH) rendelkezik 12 iparvágánnyal, úgynevezett saját célú vasúti pályával (scvp.) [4], amelyek azonban nem villamosítottak, ezért az ezen iparvágányokat érintő szállításoknál elkerülhetetlen dízelvontatójárművek alkalmazása.

A magyarországi vasúthálózat legforgalmasabb vonalai villamosítottak [5], és a villamos vontatás lényegesen olcsóbb, mint a dízel, ezért

a dízelmozdonyok száma a vasútvillamosítás előrehaladtával csökken [6]. Azonban honvédelmi érdek lenne annyinak a rendszerben tartása, amelyekkel a szükséges szállítások a felsővezeték-hálózat nélkül is elvégezhetőek lennének.

Az előzőek alapján megvizsgáljuk a magyarországi vasúthálózat átbocsátóképeségét ezen MH scvp-k között különböző forgatókönyvek esetén. Célunk annak meghatározása matematikai modellezés alapján, hogy mi(k) a vasúti közlekedési rendszer szűk keresztmetszete(i): a pálya és/vagy a gördülőállomány és/vagy a humán erőforrás (rakodási kapacitás)?

2. A MAGYARORSZÁGI VASÚT-HÁLÓZAT TÉRKÖZ SZINTŰ GRÁFMODELLJE

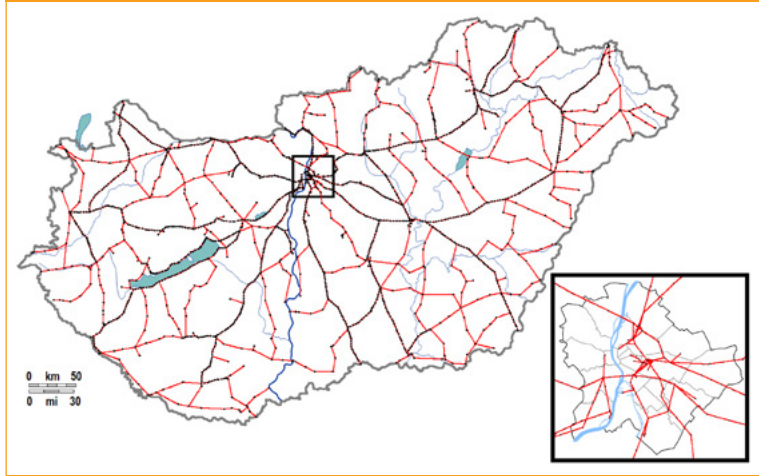
Jelenlegi számítási céljainkhoz a legjobban egy súlyozott, irányított gráf illeszkedik. A modellt egy korábbi publikációban részletesen bemutattuk [7], ezért itt csak a megértéshez elengedhetetlenül szükséges részletességgel ismertetjük.

2.1. Jelzők és vágánykapcsolataik

A modell 5188 csúcsot tartalmaz, amelyekből 1491 állomási kijáratit jelzőt, 1687 bejáratit jelzőt, 1896 térközjelzőt, 114 pedig egyéb vágánykapcsolati pontot (például határátmenet, iparvágány) reprezentál.

A jelzők közti vágánykapcsolatokat 6803 gráfbeli él írja le. Két jelző között a menetidőt a jelzők távolságából és az engedélyezett sebességből számoltuk. Ezen adatok döntő része nyilvánosan elérhető a VPE Kft. weblapján [8],[9]; az itt nem szereplő iparvágányok

1. ábra: A magyarországi vasúthálózat gráfjának diagramja [7]

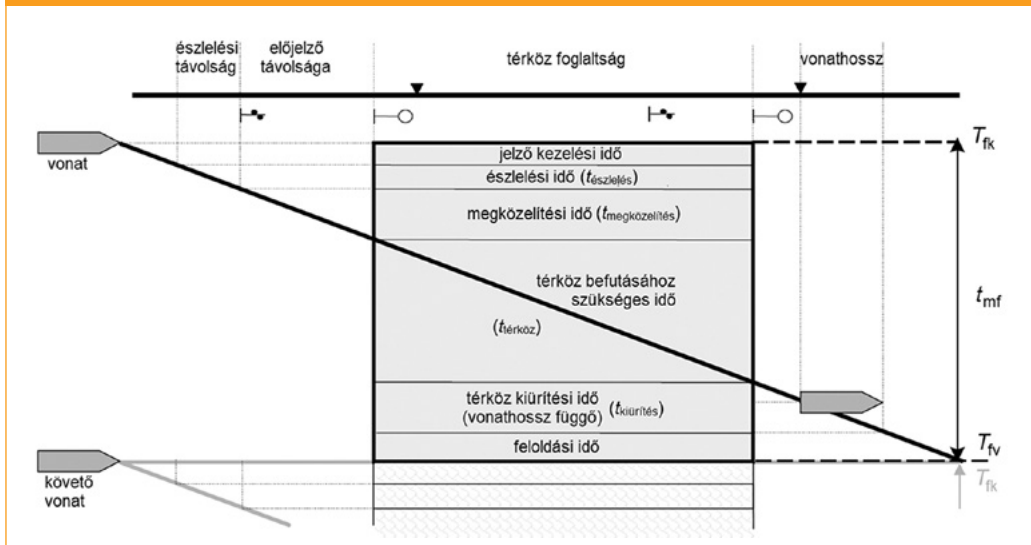


hosszadatait a vonatkozó kormányrendelet [4] alapján, illetve saját távolságmérés alapján [10] építettük be a modellbe.

A távolságok számításánál állomások esetében csak az átmenő fővágányok kijáratit jelzőit vettük figyelembe; ahol több is van, ott mindegyiket. Az scvp-k távolságánál azok hosszadatait a kiágazási váltóktól plusz az állomás átmenő fővágányi kijáratit jelzőjétől való ekvivalens távolságok lettek figyelembe véve. Ez például Győr állomás és a Győr MH scvp. esetében azt jelentette, hogy az scvp. kormányrendeletben rögzített 2325 m-es hosszához hozzáadtuk az scvp. kezdőpontjának távolságát Győr-Rendező állomás Kr15b kijáratit jelzőjétől.

Ezen távolság- és menetidőértékeket rendel-tük hozzá az egyes vasútvonal-szakaszokat reprezentáló gráfbeli élekhez, mint súlyt (természetesen egy számolásnál csak az egyiket). Ez azt is jelenti, hogy míg a menetvonalak számított hosszai néhány méteres pontossággal megegyeznek a valódi értékekkel, a számított menetidőértékek a valós értékeknek egy abszolút alsó korlátját jelentik. Ahol kisebb engedélyezett sebességérték vonatkozott a nagyobb tengelyterhelésű vagy a mozdonyal továbbított szerelvényekre, ott ezt az alacsonyabb sebességértéket vettük alapul a számításokhoz.

3. ábra: A követési távolság meghatározása. [12],[13]



- a jelzők kezeléséhez szükséges idő, hogy a következő vonat behaladhasson a térközbe (önműködő térközök esetében 0 sec.) – a számításokban ezt is 0-nak vettük.

$$t_{mf} = t_{észlelés} + t_{megközelítés} + v_{térköz} + t_{kiürítés} \quad (1)$$

A térközök hossza és az adott vonalszakaszra engedélyezett maximális vonathossz elérhető a VPE Kft. honlapján. Az észlelési távolság meghatározható a MÁV F.1. sz. jelzési utasítása alapján: „a főjelzőket úgy kell elhelyezni, hogy jelzéseik a mozdonyról, vezérlőkocsiról folyamatosan láthatók legyenek a vasúti pályára engedélyezett, km/h-ban kifejezett sebesség tízszerezésének 1/3 részével egyenlő, méterben mért távolságból, de legalább 200 m-től.” [14:16] Szintén a VPE Kft. honlapján érhető el az egyes vonalszakaszokra engedélyezett sebesség, amely értékekkel leosztva ezeket a távolságokat, megkapjuk a megfelelő időket.

A kapacitáskihasználtság az UIC döntvény [12] szerint az alábbi módon számítható:

$$K_k = \frac{t_f \cdot (1 + t_p)}{t_N} \quad (2)$$

ahol K_k a kapacitáskihasználtság (ezt UIC által javasolt 0,7-nek vettük), t_f a foglaltsági idő, t_p az állandó jellegű időfelhasználás a teljes foglaltsághoz viszonyított értéke (ennek értékét 0,18-nak vettük [13]), t_N pedig a naptári időalap, esetünkben 1440 perc.

Az (1) és (2) összefüggésekből meghatározva a t_{mf} és t_f értékeket, az egy vágányon közlekedtethető vonatdarabszám (N) ezek hányadosaként számítható [13]:

$$N = \frac{t_f}{t_{mf}} \quad (3)$$

Mindezek figyelembevételéhez minden egyes főjelzőre meghatároztuk az azt követő összes lehetséges két térköz, és kiválasztottuk azokat, amelyekre az összenetidő a legkisebb. Hasonlóan meghatároztuk a jelzőt megelőző térközre az észlelési távolságot és ennek, illetve a maximális engedélyezett vonathossz figyelembevételével kiszámítottuk az egyes térközökhöz a mértékadó foglaltsági időket, ezekből pedig meghatározható az adott vonalszakasz egy napra vetített átbecsátóképessége.

Nem vettük figyelembe az állomásokon való áthaladás esetleges menetidőtöbbletét, az ál-

lomási főjelzőket és a hozzájuk tartozó követési időket is úgy kezeltük, mintha nyíltvonalai főjelzők lennének. Ez az érték ezért abszolút felső határ az egyes vonalszakaszok átbocsátóképességére.

3. SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREK

3.1. Szoftverkönyezet

A számolások az R programozási nyelv és környezetben [15] történtek a Csárdi Gábor és Nepusz Tamás által kifejlesztett *igraph* csomag [16] segítségével. A menetidő, illetve menetvonalhossz szempontjából legrövidebb utat a csomag `distances()` függvényével határoztuk meg, amely olyan elsúlyozott gráfok esetében, amelyek csak nemnegatív súlyú éleket tartalmaznak (mint esetünkben is), ehhez a Dijkstra-algoritmust [17] használja. Két főjelző között a programcsomag `shortest_paths()` függvénye segítségével meghatározhatók a pontos útvonal által érintett egyes gráfélek (`Seopath`).

3.2. Mozdonyflotta

A Magyar Honvédség tulajdonában vasúti vontatójármű nincs, ezért a katonai szállításokhoz is bérelni kell azokat. Jelen vizsgálatunkban csak a MÁV és a GySEV azon normálnyomtávú (1435 mm) elérhető dízelmozdonyait vizsgáltuk, amikkel bármilyen jellegű kocsitovábbítás lehetséges, összesen 444 darabot [18]. Ezen mozdonyok maximális sebességét minden esetben figyelembe vettük a számításokban.

A villamos mozdonyok figyelmen kívül hagyására két okunk volt. Az első, hogy a „Bevezetés”-ben már említett okok miatt elsősorban különleges jogrend idején kívántuk vizsgálni a szállítási kapacitásokat. Fontos körülmény, hogy egy villamos alállomás meghibásodása vagy célzott rombolása esetén a szerelvények továbbítása csak dízelüzemmel lehetséges. A kérdés, hogy elegendő-e ebben az esetben is a rendelkezésre álló flotta?

A másik ok, hogy az MH saját célú vasúti pályái (scvp.) kivétel nélkül villamosítatlanok,

azaz berakodás után, illetve lerakodás előtt az elegyrendezést dízelmozdonnyal kell végezni legalább az iparvágány és a villamosított vasútállomás között. Emellett a legrövidebb/leggyorsabb útvonalnak villamosítatlan vonal(szakasz)ok is részei lehetnek, ahol legalább dízel előfogatra is szükség van [19].

3.3. A maximális folyam

Ha minden gráfélhez adott annak kapacitása, azaz esetünkben az azon időegység alatt közlekedtethető vonatok maximális száma, akkor bármely két gráfcsúcs között meghatározható az úgynevezett folyam, amely azt mutatja meg, hogy mekkora a két csúcs között egységnyi idő alatt közlekedtethető vonatok maximális száma és mi ezeknek a pontos útvonala. Ez utóbbi azért lényeges, mert lehet, hogy két nagyobb kapacitású vonalszakasz között több kisebb átbocsátóképességű található, amelyek mindegyike igénybe veendő a maximális folyam átbocsátásához. Ilyen például az 1. sz. és a 2. és 4. sz. vasútvonalak Almásfüzitő és Budapest közötti szakasza: az 1. sz. fővonalon Hegyeshalom és Tata között 160 km/h az engedélyezett sebesség, Tata és Budaörs között 140 km/h, Budaörs és Kelenföld között 120 km/h, Kelenföld és Budapest-Keleti között pedig 80 km/h. A főváros felé csökkenő v_{\max} érték korlátozza a magasabb pályasebességű szakaszok átbocsátóképességét. Azonban mivel Almásfüzitő és Budapest között alternatív útvonalon is bonyolítható forgalom a 4. és 2. sz. vonalakon, ez Hegyeshalom és Almásfüzitő között (igaz, csak minimális mértékben, de) megnöveli az 1. sz. fővonal átbocsátóképességét is.

A maximális folyam értéke, azaz hogy két jelzőt reprezentáló gráfcsúcs között mekkora a maximális átvihető kapacitás és ennek a gráf élein való eloszlása az *igraph* csomag `maxflow()` függvényével határozható meg.

A folyamatokat kétféleképpen számítottuk, amelyek a szállítások szélsőséges példáit modellezik. Először a rövid távú szállításokat szimuláltuk úgy, hogy meghatároztuk a két

(időben, illetve távolságban) legközelebbi MH iparvágány távolságát és kiszámítottuk közöttük a maximális folyamatot. Ezzel az értékkel csökkentettük az útvonalra eső pályaszakaszok elérhető szabad kapacitását, majd meghatároztuk a második két legközelebbi MH iparvágány távolságát, és kiszámítottuk közöttük a maximális folyamatot.

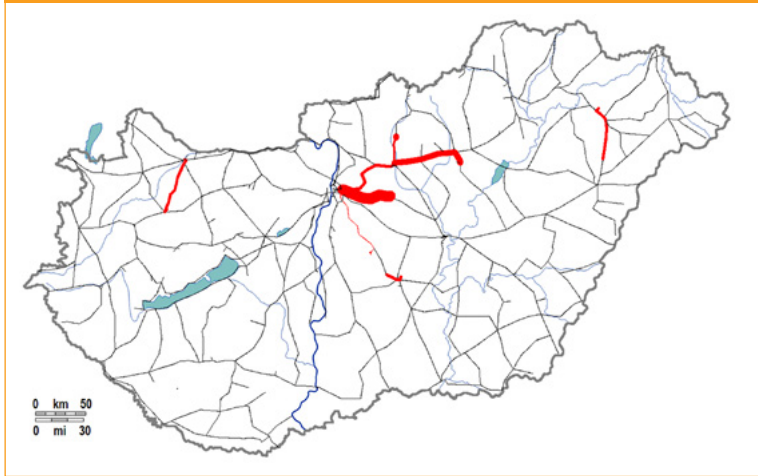
Másodszor a nagy távolságú szállításokat szimuláltuk: most a két legtávolabbi MH iparvágány között számítottuk ki a folyamatot, majd a második két legközelebbi között, stb. Itt tehát az volt a különbség az előző számításhoz képest, hogy mindig a két (időben vagy távolságban) legtávolabbi MH scvp-k között számoltuk a folyamatot. Ez természetesen azt is jelentette, hogy az igénybe vett vasútvonalszakaszok is sokkal hosszabbak voltak, mint az előző számításnál.

4. EREDMÉNYEK

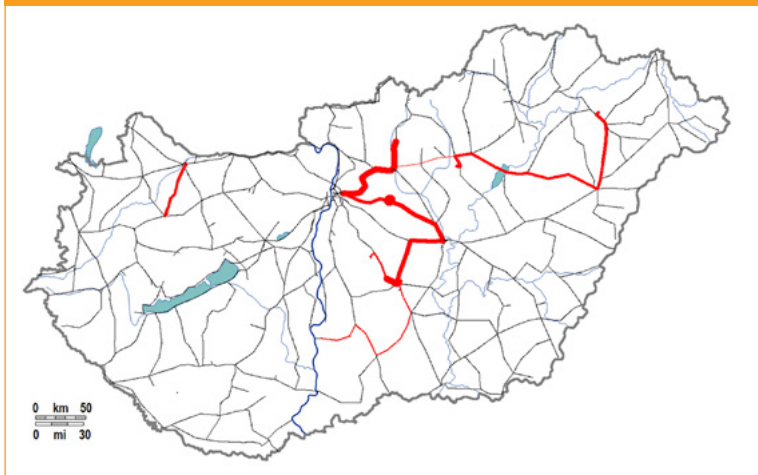
Az imént tárgyalt módon elosztva a mozdonyokat az alábbi eredményeket kapjuk a legközelebbi MH scvp-k közötti közlekedtetés esetén minimális menetvonalhosszakra (4. ábra) és minimális menetidőkre (5. ábra).

A szimuláció alapján a szállítások minimális menetvonalhosszak esetén a legközelebbi közlekedtetett vonatok darabszámának csökkenő sorrendjé-

4. ábra: A menetvonalhossz szerint legközelebbi MH iparvágányok között közlekedtethető dízelvontatású vonatok eloszlása. [saját szerkesztés]



5. ábra: A menetidő szerint legközelebbi MH iparvágányok között közlekedtethető dízelvontatású vonatok eloszlása. [saját szerkesztés]



ben a Rákos-Tápiószecső, Jobbágyi-Erdőtelek, Jobbágyi-Rákos, Kecskemét-Hetényegyháza, Nyírtelek-Hajdúhadház, Győr-Pápa, a táborfalvai iparvágányok között, valamint Táborfalva-Rákos között, minimális menetidők esetén pedig Tápiószecső-Jobbágyi, Tápiószecső-Hetényegyháza, Hetényegyháza-Kecskemét, Jobbágyi-Erdőtelek, Nyírtelek-Hajdúhadház, Győr-Pápa, Rákos-Tá-

6. ábra: A menetvonalhossz szerint legtávolabbi MH iparvágányok között közlekedtethető dízelvontatású vonatok eloszlása. [saját szerkesztés]



7. ábra: A menetidő szerint legtávolabbi MH iparvágányok között közlekedtethető dízelvontatású vonatok eloszlása. [saját szerkesztés]



piószecső, a táborfalvai iparvágányok között, Táborfalva–Hetényegyháza és Tápiószecső–Kecskemét viszonylatokban történnek.

A rövid távú szállítások esetében a hálózat kapacitása megfelelő, ha a legrövidebb úton akarjuk a szállítást lebonyolítani. Ennek legfőbb oka, hogy azon állomáspárok közti útvonalak, amik között a szállítás történik, nem

fednek át. Ebben az esetben tehát, ha elegendő vonatjármű és rakodási kapacitás áll rendelkezésre (amik korlátait ezen számításban nem vettünk figyelembe), a szállítások kivitelezhetők.

Azonban a rövid távú szállítások minimális menetidők esetében nem végezhető el teljes mértékben, csak a vonatok 87%-a közlekedtethető le. Mivel az iparvágányok néhány kivétellel fővonalak mellett helyezkednek el, melyekre magas az engedélyezett sebesség, éppen ez okozza a hálózat telítődését. Ahogy az 5. ábrán látszik is, a szerelvények a fővonalak néhány rövidebb szakaszát annak kapacitáshatáráig veszik igénybe, és ezért további menetvonalak már nem vezethetők arra.

Tovább romlik a kép, ha elvégezzük a számítást az egymástól legmesszebb levő MH scvp-k esetére is, amikor minden lépésben térben és időben legmesszebbi, még nem nulla kapaci-

tású scvp-k között szállítunk. Az eredmények minimális menetvonalhosszakra a 6. ábrán, minimális menetidőkre a 7. ábrán láthatók.

A szimuláció alapján a szállítások maximális menetvonalhosszak esetén a leközlekedtetett vonatok darabszámának csökkenő sorrendjében a Győr–Hajdúhadház, Győr–Erdőtelek, Győr–Nyírtelek, Nyírtelek–Táborfalva,

valamint Győr–Kalocsa között, maximális menetidők esetén pedig Pápa–Hajdúhadház, Nyírtelek–Rákos, Nyírtelek–Pápa, Nyírtelek–Táborfalva, Nyírtelek–Kalocsa, Nyírtelek–Győr, Győr–Hetényegyháza és Hetényegyháza–Pápa viszonylatokban történnek.

A maximális menetvonalhosszok esetében erősen kapacitáshiányosnak bizonyul a hálózat, mindössze a szerelvények 52%-át tudtuk leközlekedtetni: az Összekötő vasúti híd elérte áteresztőképességének határát. Ez azt is jelenti, hogy nagy távolságú szállítások esetén nem elsősorban a vontatójárművek darabszáma jelenti a korlátozó tényezőt, hanem a pályahálózat szűk keresztmetszetei, ahol különböző irányból érkező és különböző irányokba tartó menetvonalak találkoznak. Különösen ilyenek a nagyfolyami hidak [20], amelyek többvágányúvá bővítésük esetén is érzékenyek maradnak a szomszédos állomások forgalmi zavaraira [21]. Emellett meg kell említeni a be- és kirakodási időket, amelyek szintén korlátoz(hat)ják a továbbítható elemek számát. [22]

Maximális menetidők esetében ugyan a szerelvények 70%-a leközlekedtethető, de a Hajdúhadház–Nyíregyháza állomásköz telítődik. Ez hasonló, de a hálózat szerkezetéből adódóan kisebb probléma, mint az előző esetben az Összekötő vasúti híd átbocsátóképességének teljes kihasználása, mivel a 100. sz. fővonalon Debrecenről és a 80. sz. fővonalon még az egyvágányú Mezőzombor–Nyíregyháza szakaszon is marad kapacitás az esetleges további keleti irányú igény átbocsátására. Ebben az esetben azonban a fővonalak kölcsönös helyettesítőképessége romlik az alacsony kapacitású transzverzális vonalak miatt.

5. KONKLÚZIÓ

Tanulmányunkban megvizsgáltuk a magyarországi vasúthálózat teljesítőképességét a rendelkezésre álló dízel-vontatójárművek alkalmazásával. Azt találtuk, hogy minimális távolságú szállítások esetén a pályacapacitás elégséges, a korlátozó tényezőt a gördülőállomány mennyisége jelenti. Bár

minimális menetidejű szállítások esetén már telítődött a hálózat, feltételezhető, hogy hosszabb kerülőutakkal a szállítás még megoldható lenne.

Maximális távolságú és menetidejű szállítások esetén a pályacapacitás bizonyult elegendőnek. Maximális menetvonalhosszok esetén nem lehetett az összes vonatot leközlekedtetni az Összekötő vasúti híd telítődése miatt. Maximális menetidők esetén minden vonat leközlekedett, a Hajdúhadház–Nyíregyháza állomásköz telítődött, azonban itt rendelkezésre álltak szabad kapacitású alternatív útvonalak.

A leközlekedtetett szerelvények darabszáma viszont azt sejteti, hogy ennyi vonat be- és kirakása ennyi idő alatt a rendelkezésre álló honvédségi rakodókon nem megoldható, azonban ennek egzakt igazolása további kutatást igényel.

FELHASZNÁLT IRODALOM

1. Szászi G.: A vasúti közlekedési alágazat, mint kritikus infrastruktúra. In: Horváth A. (szerk.): Fejezetek a kritikus infrastruktúra védelemből, 167-190, Magyar Hadtudományi Társaság, Budapest, 2013, ISBN: 9789630869263
2. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/TTR00003/default/table?lang=en&category=rail.rail_if (2023.05.04.)
3. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail_if_electri/default/table (2023.05.04.)
4. 277/2014. (XI. 14.) Kormányrendelet a vasúti közlekedési hatóság által kiszabható bírság mértékéről és megfizetésének részletes szabályairól
5. Tóth B.: A magyarországi vasúthálózat zavarainak gráfelméleti alapú vizsgálata, In: Horváth, B. – Horváth G. – Gaál B. (szerk.): Közlekedéstudományi Konferencia Győr 2018, 505-519.
6. Szászi G.: A vasúti hálózati infrastruktúrával szemben támasztott újszerű védelmi követelmények kutatása, a továbbfejlesztés feltételrendszerének vizsgálata. Doktori

- értékezés, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest, 103-104, 2013.
7. Tóth B.: A modellek felbontásának hatása az eredmények pontosságára – állomásköz vs. térköz, In: Horváth G. – Horváth B. (szerk.): XX. European Transport Congress / XII. International Conference on Transport Sciences, Győr 2022., 415-423. ISBN 9786156443045
 8. Vasútvonalak http://www.kapella.hu/takt/vonal_lista.php (2023.05.04.)
 9. VPE vasúthálózati térkép <https://takt.kapella2.hu/metronom-server/map> (2023.05.04.)
 10. <https://maps.google.hu>
 11. F. 2. sz. Forgalmi Utasítás; MÁV ZRt. Pályavasúti Üzletág Forgalmi Főosztály
 12. Union International des Chemins de fer: Capacity (UIC Code R 406), Paris, 2013. https://tamannaei.iut.ac.ir/sites/tamannaei.iut.ac.ir/files/files_course/uic406_2013.pdf (2023.05.04.)
 13. Lévai Zs.: A BAVS által javasolt új budapesti vasúthálózat helyettesíthetőségének vizsgálata; In: Horváth G. – Horváth B. (szerk.): XX. European Transport Congress / XII. International Conference on Transport Sciences, Győr 2022. 342-354. ISBN 9786156443045
 14. F. 1. sz. Jelzési Utasítás; MÁV ZRt. Pályavasúti Üzletág Forgalmi Főosztály
 15. 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/>
 16. Csardi G. – Nepusz T.: The igraph software package for complex network research, InterJournal, Complex Systems 1695. 2006. <http://igraph.org>
 17. E.W. Dijkstra.: A Note on Two Problems in Connexion with Graphs; Numerische Mathematik 1 269-271, 1959. DOI: <https://doi.org/dpvk8c>
 18. http://www.vonatosszeallitas.hu/jarmuvek_mav_mozdonyok.html (2023.05.04.)
 19. <https://iho.hu/hirek/valamit-rakodnak-taborfalvan-140614> (2023.05.04.)
 20. Szászi G.: Long-span railway bridges in the transport system of Hungary, Hadmérnök 8:2, 98-107, 2013.
 21. 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, 83-99, Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014, ISBN: 9786155305306
 22. Szászi G.: Katonai vasúti szállítások a Magyar Honvédség missziós feladatainak rendszerében, Szolnoki Tudományos Közlemények 16, 101-118, 2010.



Mathematical Modelling of the Capacity Limits of the Hungarian Railway Network with Special Consideration to the Transportation Tasks of the Hungarian Armed Forces

Keywords: railway network; graph theory; throughput capacity; Hungarian Armed Forces



Mathematische Modellierung der Kapazitätsgrenzen des ungarischen Eisenbahnnetzes unter besonderer Berücksichtigung der Transportaufgaben der ungarischen Streitkräfte

Schlüsselwörter: Schienennetz; Graphentheorie; Durchsatzkapazität; Ungarische Streitkräfte; Elektrifizierung