

Hálózattudomány alkalmazása a közforgalmú közlekedésben

A témaválasztás nemcsak a kérdés elméleti vonatkozásainak újszerű, hálózattudományi szemléletű megközelítése és megalapozása miatt fontos, hanem a gyakorlatban felmerülő problémák szempontjából is aktuális. A közlekedési rendszer fenntarthatóságának komplex követelményrendszere, vagyis a gazdasági, a társadalmi és a környezeti értelemben vett “hatékonyásra irányuló törekvés” ugyanis a közforgalmú közlekedési hálózat fejlesztése és fenntartása során is egyidejűleg és folyamatosan biztosítandó.

DOI: <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2023.3.1>

Dr. Horváth Balázs

Széchenyi István Egyetem Építész-, Építő- és Közlekedésmérnöki Kar
dékán
e-mail: hbalazs@sze.hu

1. BEVEZETÉS

Életünk minden területén kapcsolatok vesznek körül minket. E kapcsolatok lehetnek társadalmi, műszaki, gazdasági vagy éppen természeti jellegűek. A társadalomtudósok, a fizikusok és a matematikusok lassan 100 éve foglalkoznak e kapcsolati rendszerek, más néven kapcsolati hálók rejtelmeinek feltárásával. A korai kutatók még természetesen nem voltak tisztában azzal, hogy egy új tudományágat, egy új kutatási irányzatot hoztak létre.

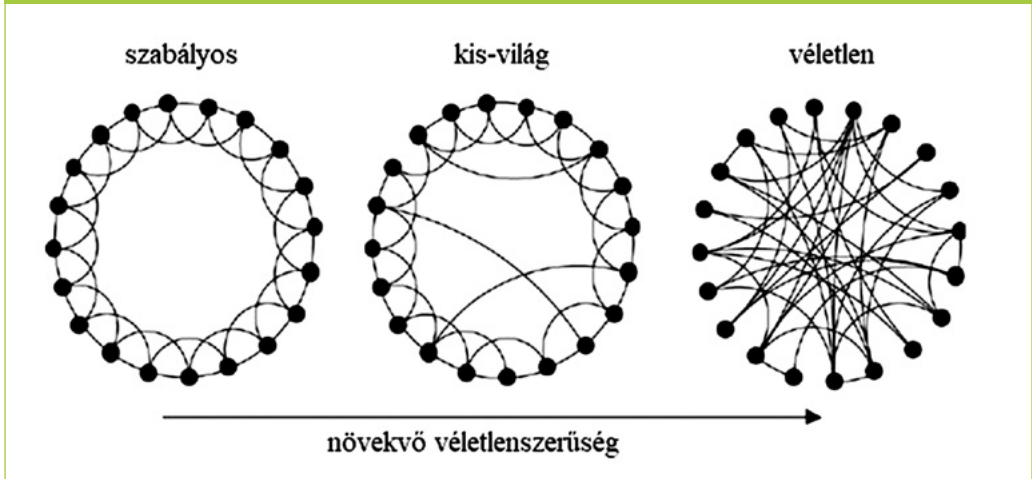
A hálózatkutatás, a kapcsolatok rendszerének feltárása azonban nem egy elvont ismeretkör. Elég csak arra gondolnunk, mikor ismeretlen ismerősökkel találkozzva felkiáltunk, „milyen kicsi a világ!”, bizony ez is a hálózatkutatási kapcsolatkeresés módszereivel megmagyarázható jelenség, amit sokan csak „hat lépés távolság” kérdéseként aposztrofálnak.

Felmerülhet, ha a hálózatkutatás ilyen általános, és a világ ennyi területére kiterjed, akkor vajon nem lenne-e alkalmas közlekedési rendszereink vizsgálatára, a párhuzamosságok kérdésének értékelésére, a hatékonyság becslésére. Így a hálózatok tudományának általános bemutatásától indulva jutunk el oda, hogy mit adhat nekünk e tudományterület a közforgalmú közlekedési rendszerek értékelésében.

2. HÁLÓZATOK, KAPCSOLATOK

Ha napjainkban hálózatokról, hálózatkutatásról esik szó, akkor az első, aki eszünkbe jut, Barabási Albert-László, aki forradalmasította a hálózatkutatás témakörét, tudományterületté emelte az ezirányú kutatások csoportját. De ahhoz, hogy idáig eljussunk, hosszú az út, amint azt maga Barabási is bemutatja [1].

1. ábra: Kapcsolati formák és a véletlenszerűség [5]



A hálózatkutatás sarokköve a hálózatok ábrázolása és számszerűsítése. Ez ma már nem nehéz, hiszen a gráfok és a gráfelmélet ebben nagy segítségünkre van. Ennek megalkotásához azonban kellett a híres matematikus Euler, aki a königsbergi hidak problémáján keresztül vezette be a gráfok fogalmát és a gráfelméletet.

Nagyon érdekes, hogy a Barabási-féle hálózatkutatási eredmények egyik első, tőle természetesen teljesen független felismerője Karinthy Frigyes volt [2], aki 1929-ben írta le, hogy: „...A földön minden ember összekapcsolható legfeljebb hat lépésben...”. Ez a felismerés ma már matematikailag könnyen bizonyítható, amint azt többek között a hálózatelméletről szóló igen részletes leírást adó összefoglaló mű is bemutatja [3].

Ha hálózatokról, gráfokról beszélünk nem kerülhetjük meg a két leghíresebb matematikust Erdős Pált és Rényi Alfrédot. Ők alkották meg a véletlen hálózatok fogalmát [4]. A véletlen hálózatok sok problémára magyarázatot adnak. Azonban, mint azt később sokan felismerték [5] a társadalmi, természeti és műszaki rendszerek alkotta kapcsolati hálók általában nem véletlen hálózatokként épülnek fel. E felismerésből alakult ki a „kis világ” (small-world) kifejezés, ami arra utal, hogy a hálózatokban

vannak olyan, a távoli részeket összekötő hidak, amelyek a hálózat egyes szereplői közötti távolságot lerövidítik, amint azt Karinthy [2] és mi magunk („Milyen kicsi a világ!”) is nap, mint nap felismerjük.

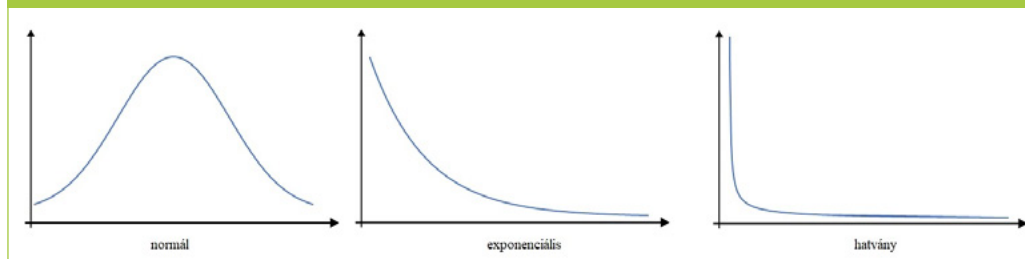
Watts és Strogatz [5] új gondolatokkal bővítették a véletlen hálózatok világképét, és megalkották a kis-világ típusú hálózatok fogalmát (1. ábra). E felismeréssel számtalan valódi rendszer kapcsolati hálója magyarázhatóvá vált, sok azonban továbbra sem magyarázható.

Felmerülhet a kérdés, hogy hogyan lehet e kapcsolati formákat megkülönböztetni. Mai ismereteink szerint (illetve a Barabási által felismert összefüggések alapján) erre a legjobb módszer az elemek kapcsolati rendszerének matematikai statisztikai elemzése.

3. KAPCSOLATI HÁLÓK KAPCSOLATRENDSZERÉNEK STATISZTIKÁI

Egy-egy hálózat résztvevőinek kapcsolatrendszerére leírható az egyes szereplők kapcsolatainak számával. Tekintsünk egy egyszerű példát: Egy körasztalnál 10 fő ül körbe, akik kezdetben nem ismerik egymást. Az asztal mellett azonban megismerkednek, így elő-

2. ábra: Kapcsolatok számának lehetséges eloszlása



ször mindenki pontosan két főt fog ismerni, a jobb- és a baloldali szomszédját. Ezen egyszerű hálózatban a résztvevők kapcsolati rendszere egyszerű lesz, 10 fő fog ismerni 2-2 főt, így mindenkinek két kapcsolata lesz ebben a hálózatban. A valóság ennél jóval összetettebb, ennek megfelelően a valódi hálózatok kapcsolati rendszerét nem tudjuk egy-egy konkrét értékkel leírni. E célra valamely matematikai eloszlás felel meg leginkább. Véletlen hálózatokban a kapcsolatok számának eloszlása normál eloszlásnak megfelelő, vagyis kevesen vannak sok kapcsolattal, kevesen vannak kevés kapcsolattal, sokan vannak azonban átlagos vagy ahhoz közeli kapcsolattal (2. ábra).

A társadalmi, természeti, gazdasági és műszaki rendszerek jellemzően exponenciális vagy hatvány eloszlást követnek. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy sok szereplőnek kevés kapcsolata van, kevés szereplőnek viszont sok. Barabási kimutatta, hogy a rendezett kapcsolati hálók jellemzően hatvány típusúak. E felismerés összefüggésbe hozható a fizikusok által régóta vizsgált víz fagyásának folyamatával. E vizsgálatok során megállapították, hogy a víz és általában a rendezetlennek tekinthető hálózatok inkább exponenciális eloszlás szerint kapcsolódnak, míg a rendezettebbnek tekinthetők, mint például a jég viszont hatvány eloszlást mutatnak [6], [7].

Ebből persze nem szabad levonni azt a következtetést, hogy a hatvány mindig rendezett, az exponenciális mindig rendezetlen. Felmerülhet azonban a kérdés, hogy egyáltalán iránymutatásként fel lehet-e használni a meg-

figyelést. Vagyis érvényes-e, hogy az inkább hatvány eloszlású kapcsolatokkal rendelkező hálózatok rendezettebbek, míg az inkább exponenciális eloszlást mutató hálózatok rendezetlenebbek.

Másképpen feltéve e kérdést, vajon igaz-e, hogy egy exponenciális eloszlással bíró kapcsolati háló kevésbé épül a központokra, az az elosztott (gyenge központokkal), míg egy hatvány típusú eloszlást követő kapcsolati háló pedig inkább központokra épülő rendszert takar.

Mielőtt e kérdést gyakorlati példákon keresztül megvizsgáljuk érdemes ellenőrizni, hogy igazolta vagy megcáfolta-e már bárki e feltevést a közlekedés területén.

4. HÁLÓZATELMÉLETI VIZSGÁLATOK A KÖZLEKEDÉSBEN

Áttekintve a közlekedésben alkalmazott hálózateleméleti kutatásokat, megállapítható, hogy sokan megálltak Watts és Strogatz [5] hosszú kapcsolateleméleti modelljénél (small-world). Egyesek Gladwell [8] modelljével kiegészítve e hosszú kapcsolatokat, mint összekötőket vizsgálták.

Zengwang és Daniel [9] a közlekedési hálózatok általános elemzéséről készített tanulmányt. Gráf-alapú megközelítést végeztek az út- és metróhálózatok értékelésére. Nilanchal [10] az ő művükre építve egy új torlódási indexet javasolt, bár a végleges index nem használta fel eléggé a hálózattudományok tanulságait.

A közlekedéssel kapcsolatos tanulmányok többsége csak a közúti hálózattal vagy esetleg a vasúti hálózattal (de csak mint infrastruktúrával) foglalkozik. Vannak azonban általánosabb, rendszerbe illesztett kutatások is, amelyek sokkal jobban építenek a hálózatzelméleti gondolatok közlekedési alkalmazására, mint Barthelemy [11], aki azt a kérdést vizsgálta általánosabban, hogy hogyan lehetséges a hosszú kapcsolatok elméletének alkalmazása, amennyiben a távolság a szétválasztottság mérőszáma. Gastner és Newmann [12] voltak talán az elsők, akik részletesen leírták a hosszú kapcsolatok elméletén alapuló közlekedési hálózat hálózatzelméletét.

E felsorolt eredmények vagy közúthálózatra, vagy általában a közlekedési rendszerekre vonatkoztak. Közforgalmú közlekedést leíró esetek kevésbé jelennek meg a szakirodalomban, bár ezek között akadnak előremutató vizsgálatok is.

Sienkiewicz és Hołyst [13] meglehetősen alapos tanulmányt készített 22 lengyel közforgalmú közlekedési rendszer elemzéséről. Ők ezeket a hálózatokat hálózatokként és nem szolgáltatásként tanulmányozták, bár vizsgálatuk erős relevanciát mutat a jelen cikk témájával, de nem léptek túl a hálózatok statisztikai elemzésén.

Ferber et.al. [14] 14 különböző hálózattal végzett hasonló vizsgálatot, míg Bercher et.al. [15] a hálózattudományokat használta egy közforgalmú közlekedési hálózat sebezhetőségének elemzésére. Ehhez hasonló Ding et.al. [16] tanulmánya is. Mindezekből jól látszik, hogy vannak már próbálkozások a hálózattudományok bekapcsolására, ezek azonban nem az értékelés irányába indulnak el.

A bemutatott cikkek és tanulmányok is jól mutatják, hogy ma még jellemzően hiányzik a kapcsolat a hálózattudományok és a közforgalmú közlekedési szolgáltatás hatékonyságértékelése között. A következőkben e hiányosság leküzdésére alkalmas modell kerül bemutatásra.

5. HÁLÓZATZELMÉLET ALKALMAZHATÓSÁGA A KÖZFORGALMÚ KÖZLEKEDÉSI RENDSZEREK ÉRTÉKEKÉLÉSÉBEN

Az eddig leírtak alapján talán világos, hogy adott egy általános eszköz, a hálózattudomány (hálózatzelmélet), ami képes arra, hogy objektív módon értékeljen egy kapcsolati hálót. Ehhez három kérdést kell megválaszolnunk:

- Hogyan értelmezhetők ezen értékelési mutatószámok a közlekedési hálózatok kapcsán?
- Szabad-e, lehet-e a közforgalmú közlekedési hálózatokat e mutatószámokkal értékelni?
- Ha az első két kérdésre igen a válaszuk, akkor hogyan és mire lehet még használni e mutatószámokat?

A vizsgálatok során alkalmazott módszertan szerint a nyilvánosan rendelkezésre álló GTFS (General Transit Feed Specification) adathalmaz Python kód segítségével került feldolgozásra, majd a feldolgozott adatok táblázatok és diagramok formájában váltak értékelhetővé. A feldolgozás és értékelés technikai megvalósítása előtt azonban módszertanilag kellett tisztázni a számítási eljárás logikáját.

A közforgalmú közlekedési hálózatok elemeinek kapcsolata alatt e vizsgálat során a közvetlen eljutásokat értjük. A kapcsolatokat háromféleképpen értelmezhetjük:

- hálózati kapcsolat,
- vonali kapcsolat,
- járatok közötti kapcsolat.

Hálózati kapcsolat alatt azt értjük, hogy két megálló között van-e közvetlen (átszállás nélküli) eljutási lehetőség, vagy nincs. Ilyen formán e megközelítés egy igen-nem típusú képet ad két pont közötti kapcsolatról. Mint kapcsolati háló jó ez a megközelítés. Ezzel szemben a közforgalmú közlekedést, mint szolgáltatást nem képezi le, mindemellett első kiinduló vizsgálatnak jónak látszik e megközelítés is.

3. ábra: Hálózati – és járáti kapcsolatok fogalmának értelmezése



A vonali kapcsolat a hálózati kapcsolathoz képest abban nyújt újat, hogy nem csak igen-nem szinten értelmezzük a kapcsolatot két megálló között, hanem azt is vizsgáljuk, hogy hányféle közvetlen eljutási lehetőség adódik két megálló között. E megközelítés azonban hamar elvetésre került, mivel nehéz megindokolni, hogy ezek a vonaltípusok más-más kapcsolatot adnak-e, másfelől (különösen a vasúti közlekedésben) nehéz jól definiálni, mely vonalakat tekintjük eltérőnek. A vasúti közlekedés példáján, eltérő (többlet) kapcsolatnak számít-e, ha két megálló között van EC és RJ vonat is? Jobb-e a kapcsolat két megálló között, ha egyféle személyvonat helyett van gyorsvonat és személyvonat is, amely e felfogás szerint kétféle eljutási lehetőséget jelent. Mindezek miatt a vonali megközelítés elvetésre került.

A közforgalmú közlekedés szolgáltatás jellegének megjelenítése érdekében az előzőektől eltérően definiálhatjuk a kapcsolatot a járatok szintjén. Minden egyes járatot (típusától függetlenül), ami közvetlen eljutást biztosít külön-külön kapcsolatként vesszünk figyelembe. E megközelítés lehetővé teszi, hogy a hálózat struktúrája mellett a szolgáltatás egyik fontos jellemzőjét, a járatgyakoriságot is bevonhassuk a vizsgálatba.

E két megközelítés értelmezéséhez nyújt segítséget a 3. ábra.

A 3. ábrán látható egyszerű hálózatrészleten könnyebben értelmezhetjük az egyes megkö-

zelítések közötti különbséget. Hálózati megközelítés esetén a jelzett megállóból öt másik megálló érhető el, így e megálló esetében a hálózati kapcsolatok száma 5. Ha a járáti kapcsolatokat keressük, akkor e megálló esetén ismét csak 5 megálló érhető el, azonban mindegyik 6-6 alkalommal, így összesen $6 \times 5 = 30$ elérése van e megállónak, így itt a járáti kapcsolatok száma 30.

A következőkben e két megközelítés (hálózati, járáti kapcsolat) elméleti és gyakorlati értékelési eljárása kerül bemutatásra.

Az iménti módszertani megfontolások után, ki kellett alakítani az adatfeldolgozó algoritmusok rendszerét.

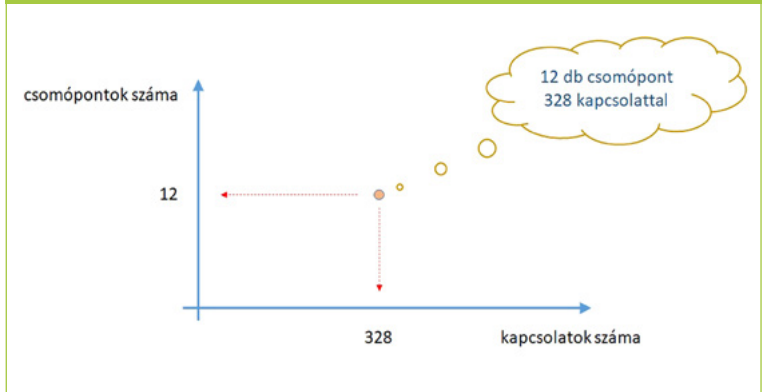
A feldolgozás során a GTFS-ben rendelkezésre álló, megálló, járat és útvonal adatokból létrehozásra került egy kapcsolati mátrix. A kapcsolati mátrix kiszámítása az előzőekben definiáltak szerint kétféleképpen valósult meg:

- hálózati kapcsolatok,
- járáti kapcsolatok.

A kapcsolati mátrix sorai és oszlopai a megállók tartalmazzák, értéke pedig hálózati kapcsolati mátrix esetén 0 vagy 1, attól függően, hogy a két megálló között van-e közvetlen kapcsolat, vagy nincs. A járáti kapcsolati mátrix esetében a mátrixelem értéke 0, ha nincs kapcsolat, amennyiben két megálló között van kapcsolat, akkor a mátrixelem értéke, a két megálló közötti járatok számával egyezik meg,

függetlenül attól, hogy mely viszonylatokon közlekednek az adott járatok. A kapcsolati mátrix irányított, mint a hagyományos célfor-galmi mátrix, vagyis a sorokban az indulások, az oszlopokban pedig az érkezések találhatók. Így előfordulhat, hogy a mátrix nem szimmet-rikus, ha egy-egy járat csak egyirányban vagy oda-vissza eltérő útvo-nalon közlekedik.

4. ábra: Kapcsolati értékek ábrázolása



A mátrix sorainak összegzésével kiszámítható, hogy egy-egy megállónak, az innen való indulások tekintetében, hány hálózati vagy járatok kapcsolata van.

Ezen előkészületek után minden megállóhoz hozzárendelhető e kapcsolati érték, amit egy grafikonon ábrázolhatunk.

A 4. ábra kellően sűrű hálózat esetén ön-magában is értelmezhető, ritkább hálózatok esetén a megállókát osztályközökbe kell rendezni, és hisztogramszerű megjelenítést kell alkalmazni.

Ezen ábrázolás eredményeként létrejön az adott hálózatra jellemző kapcsolatok eloszlása, ami Barabási [1], [3] eredményeit is figyelembe véve társadalmi-gazdasági hálózatok esetén exponenciális vagy hatvány alakot ölt (lásd 2. ábra). Ez utóbbit skálafüggetlen hálózatnak nevezte el Barabási.

Élve a feltételezéssel, hogy a hatvány alakú eloszlás rendezettebb hálózatot takar. Kérdés, hogy a vizsgálatokban e feltételezés visszako-szón-e a hálózatok szubjektív szakmai értéke-lésében?

6. ESETTANULMÁNYOK A HAZAI KÖZLEKEDÉSI HÁLÓZATON

A korábbiakban vázolt elméleti meggondolá-sok ellenőrzésére a hazai vasúti (MÁV), illetve

autóbuszos (Volánbusz) GTFS adathalmazt ke-rült feldolgozásra.

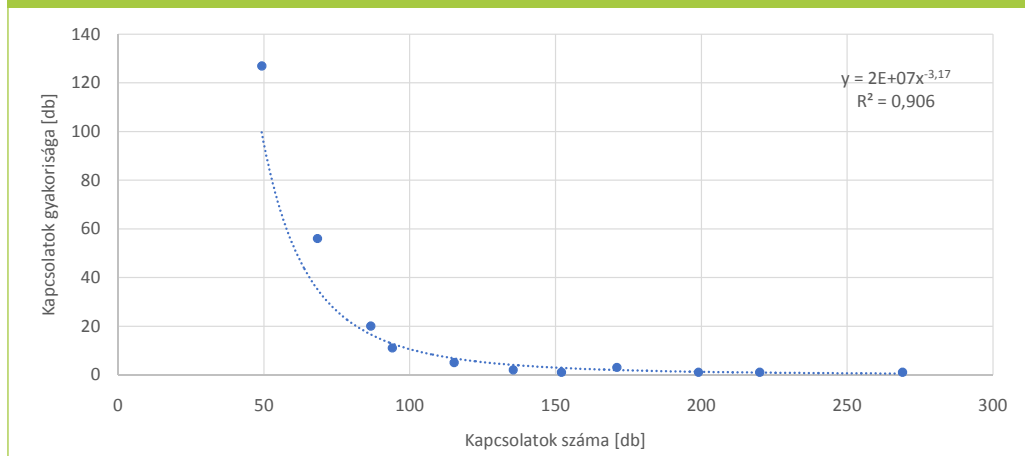
6.1. A vasúti közlekedés vizsgálata

A vasúti adathalmaz feldolgozása viszonylag egyszerűbb, hiszen egy ritkább hálózat rend-szerét kellett megvizsgálni, ahol mindössze 1218 megálló (állomás) – csomópont, és 3362 járat van, igaz e járatok összesen 41493 megál-ló érintést teljesítenek egy átlagos munkanap.

A vasúthálózati adatok feldolgozása az előző-ekben leírt módszertan szerint történt, ahol a GTFS adathalmazból kiválasztásra került egy átlagosnak tekinthető munkanap, és csak e munkanap tervezett járatai kerültek bele a számításba. Ezek alapján a hálózati kapcsola-tok eloszlása az 5. ábra szerint alakult.

A kapcsolatok gyakoriságának eloszlása hat-vány függvény képét mutatja, ami arra utal, hogy a hálózat, mint struktúra rendezett, kü-lönösen akkor, ha a legkevesebb kapcsolattal rendelkező megállókát kihagyjuk a számítás-ból. Minden állomást és megállót figyelembe véve a hatvány függvény korrelációs együttha-tója 0,63; azonban a 35 kapcsolatnál keveseb-bel bíró megállók elhagyásával a korrelációs együttható 0,99-re emelkedik. Nagy kérdés, mi ennek az értelme? A korábbi elméleti meg-fontolásokat alapul véve ez arra enged követ-keztetni, hogy a vasúti hálózat egy rendezett-nek tűnő hálózat, amely erős központokra

5. ábra: Hálózati kapcsolatok a vasúti hálózaton



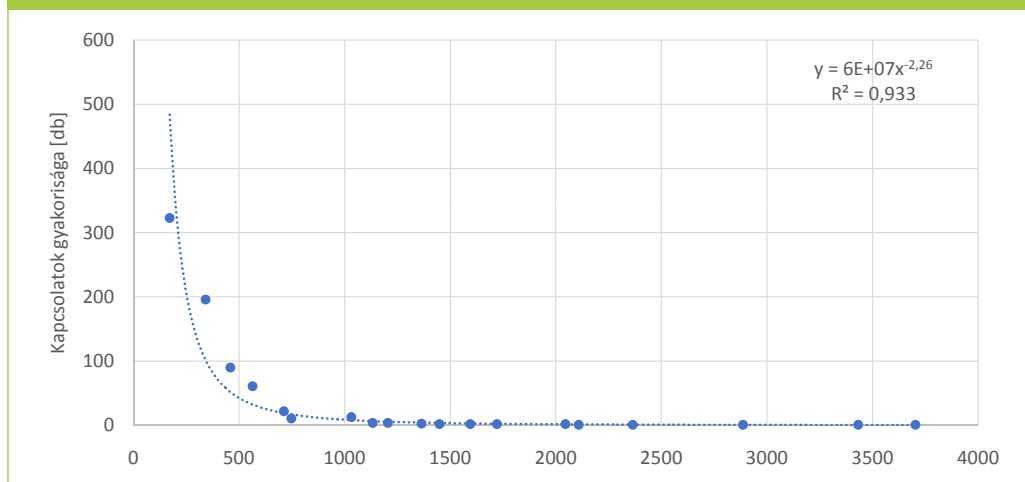
épül. Viszont e rendezettséget kicsit gyengíti az nagyon alacsony kapcsolati számmal bíró megálló csoportja.

Nem szabad azonban elfelejteni, hogy e kép csak a hálózat szerkezetének vizsgálatára volt alkalmas. Ha a szolgáltatást (járatgyakoriság) is szeretnénk bevonni, a járatkapcsolatok alakulását kell megfigyelnünk. (6. ábra)

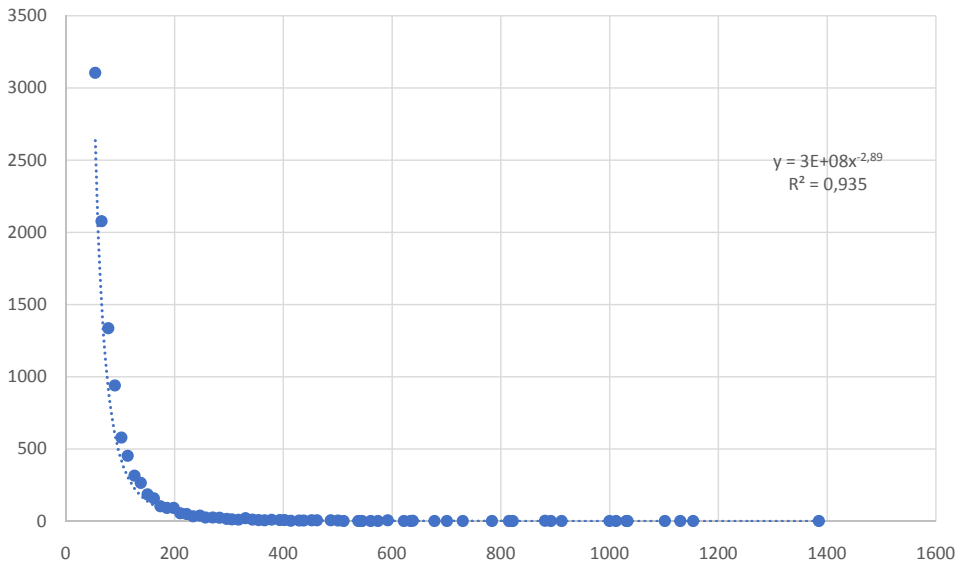
A hálózatihoz hasonló képet ad a járatkapcsolatok eloszlása is, az összes állomás/meg-

álló tekintetében a hatvány függvénnyel való közelítés korrelációs együtthatója ugyan mindössze 0,72. Azonban a leggyengébb (129-nél kevesebb napi járatkapcsolat) megálló kihagyása esetén ez az érték 0,86-ra emelkedik, ami szoros kapcsolatra utal. Vagyis a hatványfüggvény jól leírja a vizsgált pontok halmazát. Mindezek alapján megállapíthatjuk, hogy a vasúti hálózat nemcsak szerkezetében, de a tervezett szolgáltatásában is egy rendezett kapcsolati háló képét mutatja. Ez arra utal, hogy üzemszerű (tervezett) működ-

6. ábra: Járatkapcsolatok a vasúti hálózaton



7. ábra: Hálózati kapcsolatok a teljes hazai menetrendszerinti autóbushálózaton



dés mellett e rendszer, mint hálózat jó. További vizsgálandó kérdés e hálózat és a fellépő utasforgalom kapcsolata, hogy vajon ilyen összehasonlításban is kellően szervezett képet mutatna-e a rendszer?

6.2. Az autóbuszos közlekedés vizsgálata

A vasúti hálózat mellett a hazai autóbuszos (Volánbusz) hálózat is értékelésre került. E feladat kicsit összetettebb, mint a vasúti hálózat vizsgálata, mivel az autóbuszos GTFS adathalmaz egy adatként tartalmazza az összes hazai, Volánbusz által üzemeltetett járatot, a legkisebb helyi vonalon közlekedő járatról, a távolsági járatokig. E hatalmas adathalmaz 41088 megálló adatait tartalmazza, amelyek között 49827 db járat közlekedése volt tervben a vizsgált napon. A bonyolult rendszert többféleképpen is lehet értékelni. Első és legegyszerűbb egy hálózatként kezelni mindent, ami menetrendszerinti autóbuszos közlekedés. Ezt követően lehetőség nyílik régióként vagy más szempontok (Budapest előváros; távolsági; helyi...) szerint is vizsgálni a hálózatot.

A hazai menetrendszerinti közlekedést egy hálózatként vizsgálva a rendszer kapcsolati hálója meglehetősen jó képet ad, amint az a 7. ábrán is látszik.

Talán elsőre meglepő, de a hálózat, mint szerkezet kapcsolati hálója ugyanolyan jó rendezettséget mutat a teljes hazai menetrendszerinti autóbushálózaton, mint a vasúti hálózaton, amely azonban sokkal egyszerűbb szerkezetű.

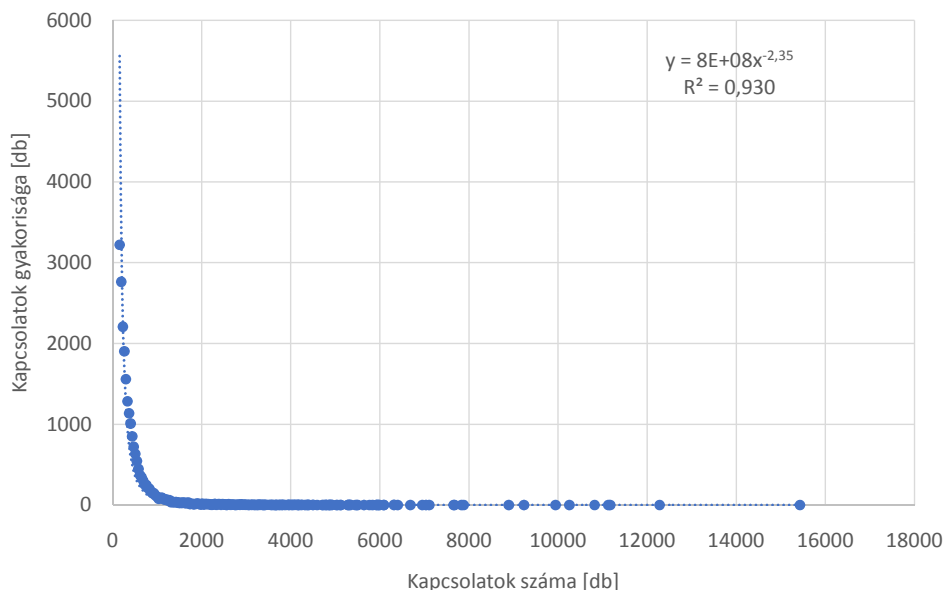
A szolgáltatásokat (járatgyakoriság) is figyelembe vevő járatok kapcsolatok illeszkedése már kicsit rosszabb képet fest (8. ábra).

Hasonlóan a vasúti hálózathoz az autóbuszos hálózaton is rosszabb rendezettséget mutat a járatok rendszere, mint a hálózati.

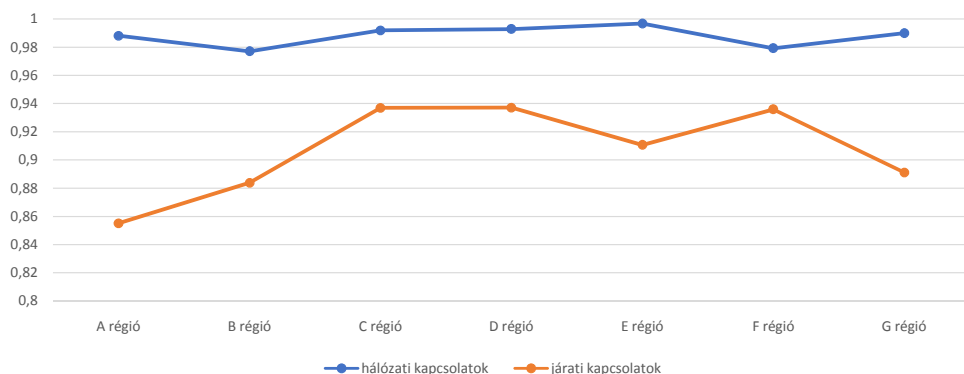
A teljes hálózatot egyben vizsgálva a nagy átlagot kapjuk, megnézve azonban a régiókat kiderülnek az eltérések, az apró különbségek.

Ha jól megfigyeljük, a hálózatszintű kapcsolati háló elemzés értékeit, azok meglehetősen közel esnek egymáshoz (0,977 – 0,997), ebből akár

8. ábra: Járatok kapcsolatok a teljes hazai menetrendszerinti autóbushálózaton



9. ábra: Az egyes régiók helyközi menetrendszerinti autóbushálózataira jellemző korrelációs együtthatók



arra is következtethetünk, hogy a hazai helyközi menetrendszerinti autóbushálózatra jellemző, mint hálózat jól felépített, egységes szerkezetű az egész országban. Kissé más képet ad azonban, ha a járatok szerkezetét vizsgáljuk. Itt az eltérések jóval nagyobbak, amit akár jelentősnek is mondhatunk (0,855 – 0,937).

E jól látható eltérések oka gyökerezhet abban, hogy az egyes régiókban más-más a szolgáltatás színvonala, a járatok sűrűsége. Tekintettel arra, hogy jelenleg országos, objektív mérés nem érhető el e kérdés eldöntésére, a kutatáshoz kapcsolódóan személyes interjúkra került sor, a teljes hazai szolgáltatásra

rálátó szakemberekkel. Véleményük nem volt egyöntetű. Összhang mindössze abban mutatkozott, hogy az A és B régiók alacsonyabb értéke magyarázható. Fontos azonban, hogy megjegyezzük, – minden esetben elhangzott, – hogy a szolgáltatás tisztán hálózat és járat alapon történő értékelése akár félrevezető is lehet, tekintettel az egyes régiók jelentősen eltérő földrajzi és települési szerkezetére. Ezzel szemben meggondolandó, azonos térségek eltérő időpontban működő hálózatainak összehasonlítása, az egyes menetrendi beavatkozások megítélése céljából.

6.3. A teljes (autóbusz-vasút) hálózat vizsgálata

Az előző elemzések alapján logikusnak tűnik, hogy ha helyközi közforgalmú közlekedési hálózatról beszélünk, akkor célszerű lenne egy rendszerként kezelni a vasúti és az autóbuszos hálózatot. Szolgáltatási szempontból is kézenfekvő ez a gondolat, azonban az eredményt erősen befolyásolja az alkalmazott módszertan. Vajon, hogyan lehetne egy hálózatként kezelni e két független rendszert. A megállók elnevezése és kódolása eltérő, ezek alapján nem lehet kapcsolatot létesíteni. További kérdés, egy útmenti (egy utcás) település esetén 2-3-4 autóbuszos megálló kapcsolati rendszerét mennyiben befolyásolja a település szélén futó vasútvonal. E kérdések csak az adott helyszín vizsgálatával, az esetleges gyaloglási lehetőségek feltárásával dönthetők el. Tekintsük egy mintatelepülést, ahol három autóbuszmegálló és egy vasúti megállóhely ad közlekedési kapcsolatot. Külön-külön vizsgálva mindegyik rendszer esetében jól megállapítható a kapcsolatok száma. Komplex rendszer esetén azonban ez nem teljesen egyértelmű, hiszen ha legalább egy autóbuszmegálló közel esik a vasúti megállóhelyhez, akkor e kettő hálózati kapcsolatait tekinthetjük akár együtt is, így

$$Kh_i^k = Kh_j^k = Kh_i^b + Kh_j^v$$

ahol

Kh_i^k az i. megálló komplex hálózati kapcsolatainak száma

Kh_j^k a j. megálló komplex hálózati kapcsolatainak száma

Kh_i^b az i. megálló autóbuszos hálózati kapcsolatainak száma

Kh_j^v az j. megálló vasúti hálózati kapcsolatainak száma

Természetesen abban az esetben, ha egy megállóhely mind a vasúti, mind az autóbuszos adattárban szerepel, akkor a fenti összefüggés egyszerűbb lesz, hiszen az adott megálló esetében csak a saját vasúti és autóbuszos kapcsolatait kell összeadni.

Ezek a helyzetek viszonylag könnyen kezelhetők, de visszatérve a fenti példához, a mintatelepülés további két autóbuszos megállójának a kapcsolati száma nem változott. Ennek eredményeként úgy tűnik, mintha a település azon része szempontjából indifferens lenne a vasút jelenléte.

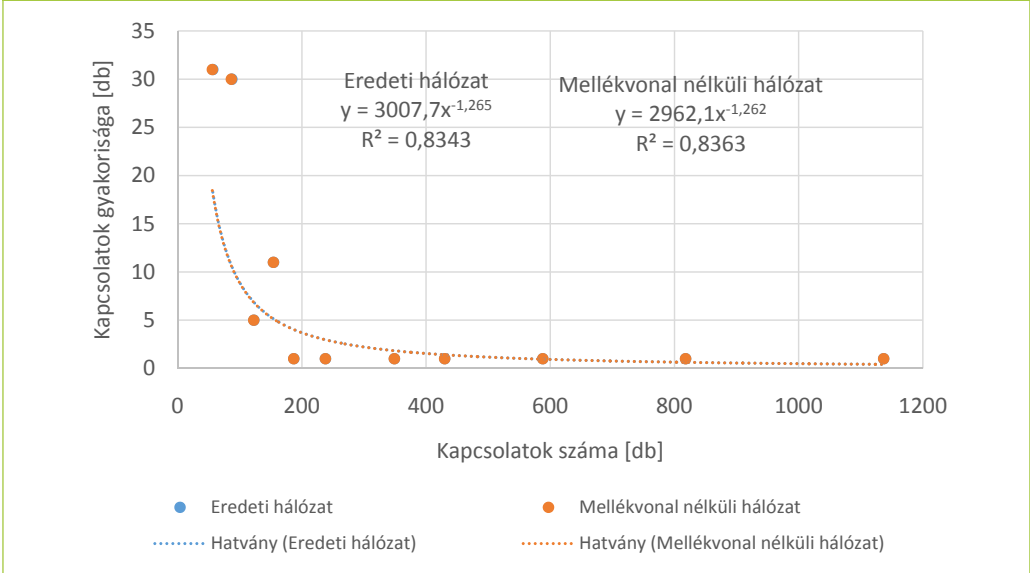
Mindezek miatt a teljes hálózatra vonatkozóan komplex autóbuszos-vasúti rendszer vizsgálathoz kapcsolati eloszlás elemzés még nem készült, hiszen alapvetően két irányból lehet megközelíteni a komplex hálózati értékelést. Egyfelől megállók szintjén, ebben az esetben az előző logika szerint lehet dolgozni, másfelől települési szinten összevont megállócsoportok alkalmazásával.

Jelenleg a komplex vizsgálat inkább csak kisebb, kiválasztott térségben képzelhető el, ahol helyismerettel pótolható az előzőekben felvetett dilemma. E térségben rögtön meg is lehet vizsgálni, milyen hatása van a kapcsolati hálóra, ha az adott térségben futó vasúti mellékvonal megszűnik. Megvizsgálható lesz a kérdés: párhuzamos vagy alternatíva?

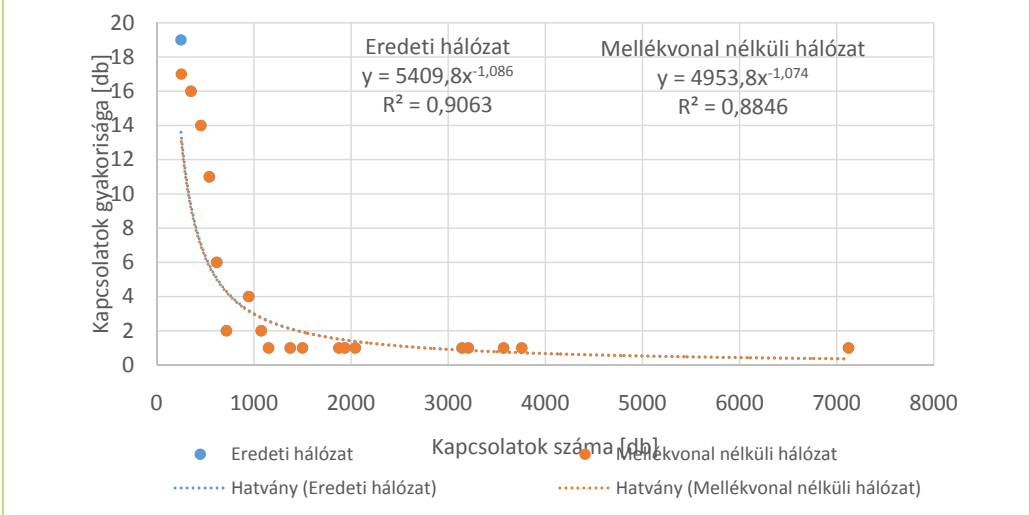
6.4. Párhuzamosságok vizsgálata

Ideális esetben az utazó számára indifferens, hogy vasúton vagy autóbussszal kell-e utaznia, így a menetrendszerinti helyközi közlekedési rendszert egy egészként is kezelhetjük. Másfelől ha az a kérdés, hogy egy vasút- és autóbuszvonal párhuzamos-e, akkor azoknak a komplex hálózaton betöltött szerepét kell vizsgálni. Mindezek alapján érdemes ellenőrizni, hogy vajon egy párhuzamossági kérdés eldöntésében tud-e segíteni a hálózattudomány.

10. ábra: Eredeti és mellékvonal nélküli komplex hálózat, hálózati kapcsolatai



11. ábra: Eredeti és mellékvonal nélküli komplex hálózat, járási kapcsolatai



Tekintsünk egy egyszerű hálózatrészletet, ahol összesen 90 település található, közülük 64 rendelkezik vasúti kiszolgálással, 88 pedig autóbusszal. A 64 vasúttal kiszolgált település között van 8, amelyet egy mellékvonal lát el. Kérdés, hogy mi történik, ha e mellékvonal bezárásra kerül.

Tegyük egymás mellé az eredeti, és a mellékvonal nélküli hálózat komplex (vasút és autóbussz együttesen) kapcsolati hálóját. Először vizsgáljuk meg a hálózati kapcsolatok rendszerét! A 10. ábrán gyakorlatilag csak egy pontsört, és egy görbét látunk, olyan nagymértékű az

átfedés a két helyzet között, ebből akár azt a következtetést is levonhatjuk, hogy a vizsgált beavatkozás hálózati szinten nem jelent mérhető változást, vagyis a komplex közlekedési hálózat morfológiailag érdemben nem változik.

Szinte azonos képet kapunk, ha a szolgáltatást is leíró járatsűrűséget is figyelembe vesszük, vagyis a hálózati helyett a járatok kapcsolatok adják a vizsgálat alapját.

A pontsor és a görbe hasonlóan a hálózati kapcsolati esethez nagymértékben átfedi egymást (11. ábra). Ha azonban a korrelációs együttható értékét nézzük, látható, hogy az 0,9063-ról 0,8846-ra csökkent. Ez alapján mondhatjuk, hogy romlott a korrelációs együttható, tehát a mellékvonal nélkül rosszabb lett a hálózat, másfelől azonban mondhatjuk azt is, hogy alig változott, és mindkét érték kellően nagy (közel van az egyhez), így nem lett rosszabb a hálózat, a szolgáltatás. Harmadik véleményként azt is megfogalmazhatnánk, hogy oly kicsi az eltérés még itt is, hogy ez alapján nem lehet megítélni a beavatkozás hatását.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A hálózattudomány egy dinamikus fejlődő tudományterület, amely alkalmas lehet arra, hogy segítse a közforgalmú közlekedési rendszerek értékelését. A bemutatott módszertan és vizsgálat csak felvillantja, mire lehet képes e gondolkodásmód. Mindemellett a számítások igazolták, hogy a hazai, menetrendszerinti helyközi és távolsági vasúti és autóbuszos közlekedés mutatja a skálafüggetlen hálózatok jellemzőit, vagyis kapcsolati hálójuk mind hálózati, mind járatok szempontból hatványfüggvényre közelíthető.

E vizsgálat is rávilágít, hogy a módszertan pontosításával, adott esetben további vizsgálati tényezők bevonásával, mint lakosság, gazdasági teljesítmény stb. alkalmas lehet közforgalmú közlekedési hálózatok értékelésére, akár a párhuzamosságok vizsgálatára is.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Barabási Albert-László: Behálózva - A hálózatok új tudománya, Helikon Kiadó 2003.
- [2] Karinyth Frigyes: Minden másképpen van (Láncszemek), 1929
- [3] Barabási Albert-László: A hálózatok tudománya, Libri 2017.
- [4] Erdős Pál – Rényi Alfréd: On Random Graphs I, Publicationes Mathematicae vol. 6, 290-297 (1959)
- [5] Watts, D. J. - Strogatz, S. H.: Collective dynamics of 'small-world' networks, Nature 1998. 393 (6684): 440–442. Bibcode:1998Natur.393..440W. DOI: <https://doi.org/bwp37w> PMID 9623998
- [6] Leo P Kadanoff: From Order to Chaos; Essays: Critical, Chaotic and Otherwise World Scientific Series on Nonlinear Science Series A: Volume 1 October 1993, p 576 DOI: <https://doi.org/j9xq>
- [7] Kenneth G. Wilson: Renormalization Group and Critical Phenomena: I. Renormalization Group and the Kadanoff Scaling Picture, Physics Review B, 4 (1971) pp3174-3183
- [8] Malcolm Gladwell: The Tipping Point, 2000, New York, Little, Brown
- [9] Zengwang Xu - Daniel Sui: Small-world characteristics on transportation networks, Journal of Geographical Systems, 2007, DOI: <https://doi.org/bczvdk>
- [10] Nilanchal Patel: Assessment of network traffic congestion through Traffic Congestability Value (TCV): a new index, 2015. DOI: <https://doi.org/j9xr>
- [11] Marc Barthelemy: Crossover from Scale-Free to Spatial Networks 2007 EPL (Europhysics Letters) 63(6):915 DOI: <https://doi.org/dkgdtn>
- [12] Michael T. Gastner - M. E.J. Newman: The spatial structure of networks 2006 Physics of Condensed Matter 49(2):247-252 DOI: <https://doi.org/bsj6nx>
- [13] Julian Sienkiewicz - Janusz A. Hołyst: Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland, Phys. Rev. E 72, 046127 – 2005, DOI: <https://doi.org/b43qnm>
- [14] Ferber, C., Holovatch, T., Holovatch, Y. et al. Public transport networks: empirical analysis and modeling. Eur. Phys. J. B 68,

- 261–275 (2009). DOI: <https://doi.org/dvh3kt>
- [15] Berche, B., von Ferber, C., Holovatch, T. et al. Resilience of public transport networks against attacks. Eur. Phys. J. B 71, 125–137 (2009). DOI: <https://doi.org/d8rksd>
- [16] Rui Ding, Norsidah Ujang, Hussain bin Hamid, Jianjun Wu: Complex Network Theory Applied to the Growth of Kuala Lumpur's Public Urban Rail Transit Network, 2015 Plos One, DOI: <https://doi.org/f762xn>



Application of network science in public transport

Public transport networks, like all networks, consist of a multitude of connections. The system of these connections builds up the transport service in the form of lines, routes and journeys. From time to time the question arises if our transport network is efficient and well organised. This article discusses the application of Barabási's network theory methods to public transport and discusses the further development of the application of these theoretical methods to practical evaluations, using examples of the Hungarian rail and bus transport systems.

The paper addresses questions such as whether these methods can help to assess the goodness of public transport networks, to judge whether a public transport network is sufficiently well organised or not.



Anwendung der Netzwerkwissenschaft im öffentlichen Verkehr

Öffentliche Verkehrsnetze bestehen, wie alle Netze, aus Verbindungen. Das System dieser Verbindungen bildet das Verkehrsangebot in Form von Linien, Strecken und Fahrten. Von Zeit zu Zeit stellt sich die Frage, ob unser Verkehrsnetz effizient und gut organisiert ist. In diesem Artikel wird die Anwendung der netzwerktheoretischen Methoden von Barabási auf den öffentlichen Verkehr erörtert und die Weiterentwicklung der Anwendung dieser theoretischen Methoden auf praktische Bewertungen anhand von Beispielen des ungarischen Eisenbahn- und Busverkehrs erörtert.

Der Artikel befasst sich unter anderem mit der Frage, ob diese Methoden helfen können, die öffentliche Verkehrsnetze zu bewerten und zu beurteilen, ob ein öffentliches Verkehrsnetz ausreichend gut organisiert ist oder nicht.