

A közlekedési hálózati érzékenység kutatásának alakulása és a kritikus elemek sérülékenységének vizsgálata – szakirodalmi áttekintés

Gosztola Anett^{1,*} – Horváth Balázs²

¹forgalmi modellező, RelativeGAP Hungary Kft., Ildikó utca 33., 1115 Budapest

²tanszékvezető, Széchenyi István Egyetem, Egyetem tér 1., 9026 Győr

*felelős szerző

e-mail: anett.gosztola@relativegap.com, hbalazs@sze.hu

Absztrakt

A közlekedési hálózatok érzékenysége kulcskérdés a stratégiai tervezés és havariahelyzetek kezelése szempontjából. A tanulmány bibliometriai elemzést végezve tárja fel a kutatási irányokat, módszertani trendeket és azok időbeli változását. A szakirodalom hálózattudományi és egyéb megközelítéseket is bemutat, rávilágítva a részletes, integrált modellek és valóságghű hálózati értékelések szükségességére.

Kulcsszavak: forgalmi modellezés, hálózatérzékenység, hálózattudomány, közlekedési hálózat

DOI:<https://doi.org/10.24228/KTSZ.2025.6.5>

1. BEVEZETÉS

A közlekedési hálózatok érzékenységének vizsgálata napjaink egyik kiemelten fontos kutatási területévé vált, különösen a modern, egyre összetettebb városi rendszerek tervezése során. A hálózatok sérülékenységének ismerete kulcszerepet játszik a stratégiai közlekedésmodellezésben, valamint abban, hogy a későbbiekben elkerülhetők legyenek a súlyos következményekkel járó hálózati zavarok. Akár véletlenszerű meghibásodás, természeti katasztrófa vagy szándékos támadás következik be, a kritikus hálózati elemek működési zavara jelentősen befolyásolhatja a közlekedés biztonságát, az elérhetőséget és a mobilitást.

A kritikus pontok azonosítása ezért elengedhetetlen a robusztus és rugalmas infrastruktúrák kialakításához. A közlekedési hálózatok

érzékenységének elemzésére számos módszertani megközelítés létezik, amelyek különféle paramétereken alapulnak, gyakran egyszerűsített hálózati modellekre építve. Ugyanakkor az iparági és a tudományos igények egyre inkább részletes, integrált modellezési megoldásokat követelnek, amelyek képesek egyidejűleg kezelni a makroszintű (stratégiai) és mikroszintű (részletes) jellemzőket is.

A jelen tanulmány célja, hogy átfogó szakirodalmi áttekintés segítségével rendszerezze a közlekedési hálózati érzékenységgel kapcsolatos eddigi kutatási eredményeket, módszertanokat és megfigyeléseket. Ennek érdekében a publikációk elemzése két fő megközelítés szerint történt: egyrészt a hálózattudományi alapú, másrészt az attól eltérő, alternatív módszertanokat alkalmazó tanulmányok kerültek vizsgálatra. A bibliometriai elemzés eszközeként a

VOSviewer programot használtuk, amely lehetővé tette a társ szerzőségi kapcsolatok, idézési mintázatok és kulcsszókészletek feltérképezését. Ezek az elemzések hozzájárultak a kutatási klaszterek, a meghatározó szerzők és az alulvizsgált tématerületek azonosításához is.

A feltárt eredmények együttesen rámutatnak arra, hogy a közlekedési hálózatok érzékenységének pontosabb, valóságghű értékeléséhez újfajta modellezési keretrendszerekre és útvonalválasztási algoritmusokra van szükség. Ezek a fejlesztések nemcsak a mindennapi forgalmi helyzetekben, hanem vészhelyzeti scenáriók esetén is kulcsfontosságúak lehetnek a gyenge pontok felismerésében és a hatékony beavatkozások tervezésében. A cikk nem tartalmaz emberi döntéseken alapuló cselekményekkel kapcsolatos iratokat. Sokszor a balaseti szituációk az igény megváltozásához vezetnek, azonban a jelenleg feldolgozott irodalmak a kerülőutak megválasztásával és a hálózat elemzésével foglalkoznak. A tudományos publikációk gyűjtése 2024 decemberében zárult le.

2. TEMATIKUS KLASZTEREZÉS

Az utóbbi években jelentős növekedés tapasztalható a közlekedési hálózatok érzékenységével foglalkozó kutatások számában, ami jól jelzi a téma fokozódó szakmai jelentőségét. A meglévő szakirodalom különböző szempontok szerint csoportosítható, például a kutatási célkitűzések vagy az alkalmazott módszertani keretek alapján. Az elmúlt 5-10 év releváns publikációinak áttekintése után azonban egy hasznosabb osztályozás körvonalazódott: az elemzési megközelítés jellege alapján két fő kategória azonosítható:

- hálózattudományi megközelítések,
- nem hálózattudományi megközelítések.

Ez a megkülönböztetés indokoltnak bizonyult, mivel a hálózattudományon alapuló tanulmányok módszertana és alkalmazott paramétereire jellemzően konzisztensebbek és szemléletükben egységesebbek. Ezzel szemben a másik csoportba tartozó kutatásokban a módszerek nagyobb szórást mutatnak, így a paraméterek egységes rendszerezése nehezebb.

Látványos fellendülés történt a témában 2020 és 2021 során. Ezt több tanulmány is a hálózattudomány közlekedési modellezésén belül

tényerésének fordulópontjaként azonosítja. Az alábbi alfejezetek részletesen bemutatják az e felosztás alapján nyert eredményeket (2.1 és 2.2).

A vizsgált publikációkat tovább rendeztük aszerint is, hogy milyen közlekedési mód hálózatát vizsgálták (pl. közúti, vasúti, légi). Az alkalmazott módszereket egymás mellett hasonlítjuk össze az 1. táblázatban. Fontos megjegyezni, hogy az elemzések nem mindig kötődnek konkrét közlekedési módhoz, néhány bemutatott módszertan általánosan is alkalmazható bármely hálózattípusra.

Vizsgált közlekedési mód	Hálózattudományi megközelítés	Nem hálózattudományi megközelítés
Közúti közlekedés	3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20	23, 26, 27, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 38, 41, 43, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52
Légi közlekedés	-	25, 28, 51
Vasúti közlekedés	7, 8	51
Független közlekedés (általánosan)	2	24, 37, 40, 42, 44
Logisztikai hálózat	1	21, 22
Egyéb hálózat	9, 11, 13, 14	33, 39

1. táblázat: A vizsgált szakirodalom összefoglalása és csoportosítása
(forrás: saját szerkesztés)

2. 1. 1-es csoport – Hálózattudományi megközelítések

A hálózattudományi szemléletű kutatások több alcsoportba sorolhatók. Az első tanulmány (Wen et al., 2022) például logisztikai hálózatok sérülékenységét vizsgálta három mutató alkalmazásával: szomszédság-alapú, gravitációs és iteratív finomítású centralitás. A módszert tengeri kikötők hálózatán alkalmazták, és az eredmények alapján jól azonosíthatók voltak a kiemelt szerepű csomópontok. A megközelítés közlekedési alágazat független, mivel kizárólag a hálózati kapcsolatokra épül.

A következő szakirodalmi áttekintés (Sugishita and Asakura, 2021) hat fő megállapítást fogalmazott meg a komplex hálózatok témakörében, kiemelve, hogy a közlekedési hálózatok és a komplex hálózatelmélet közötti kapcsolat még mindig alulreprezentált. Egy másik, rezilienciát

vizsgáló összefoglaló (Serdar et al., 2022) különböző indikátorokat és értékelési módszereket vetett össze.

Több tanulmány a kínai úthálózatokat vizsgálta szándékos támadások esetén (Liu et al., 2020), csomóponti centralitás alapján, és paraméterpárok közötti korrelációkat is feltárva. Megállapították, hogy a biztonsági elemzések továbbra is nagyban a mikrosztintű tényezőkre koncentrálnak (Collins et al., 2018).

A városi közlekedési rendszereket szintén hálózattudományi eszközökkel vizsgálták (Chen and Lu, 2020), korábbi kutatások által bevezetett mutatókat alkalmazva (Sugishita and Asakura, 2021), (Liu et al., 2017), (Zhang et al., 2018), (Wang et al., 2017). Több tanulmány gráfelméleti alapokra építve elemezte a hálózati érzékenységet.

A közösségi közlekedés hálózatainak robusztusságát külön vizsgálták (Auerbach and Kim, 2022). Megállapították, hogy a hagyományos robusztussági mutatók nem megfelelőek olyan hálózatokra, ahol több kapcsolat is fennáll két csomópont között, ezért új robusztussági indexet vezettek be. Korábbi kutatások (Auerbach and Kim, 2021) az optimális hálózati kapcsolódás lehetőségeit vizsgálták, de megjegyezték, hogy a meglévő hálózatok újratervezése általában nehezen kivitelezhető.

A következő tanulmány (Leng et al., 2018) egy általános utazási költségmodellt alkalmazott, amely figyelembe vette az üzemeltetési költségeket, menetidőt és a használói kényelmet is. A hálózat érzékenységet a forgalmi egyensúlyi állapotból számított hatékonysági index alapján értékelték. Továbbá elemezték a csökkentett kapacitás, az útszakasz jellemzők és a térbeli elhelyezkedés hatását.

A hálózattudományi irodalomban gyakran hivatkoznak Barabási Albert (Barabasi and Albert, 1999), (Barabasi, Albert-Laszlo, n. d.) úttörő munkáira, amelyek a hálózatelmélet területén nyújtott hozzájárulásai révén széles körben elterjedté váltak a közlekedési kutatásokban is.

Egy másik tanulmány (Piraveenan and Saripada, 2023) új centralitásmutatót (az „All-Path centrality”-t) vezetett be, amely nemcsak a leg-rövidebb útvonalakat veszi figyelembe, hanem a teljes útvonalstruktúrát is.

Természeti katasztrófák esetén (Mahajan and Kim, 2020) azonosítottak megerősítendő kritikus infrastruktúra-elemeket, többféle jellemző alapján. Hasonló megközelítést alkalmaztak más kutatások is (Wu et al., 2021).

Malajziában az úthálózatot vizsgálták baleseti scenáriók mentén (Redzuan et al., 2022), ahol két indexet alkalmaztak: a sérülékenységi indexet (az alternatív útvonalak elérhetősége alapján) és a „támogató sérülékenységet” (amely egy szakasz terelési fontosságát mutatja). A modell főútvonalakra koncentrált, és Dijkstra-algoritmust, valamint átmeneti centralitást használt a számítások során.

Friss kutatások számítási szempontból hatékonyabb modellezési eljárásokat is javasoltak hálózatok elemzéséhez (Huang et al., 2024), (Liu et al., 2024), amelyek részletesebb eredményeket adnak anélkül, hogy túlzott számítási igényt jelentenének.

A hálózattudományi irodalomban leggyakrabban előforduló mutatók a csomóponti centralitás és az átmeneti (betweenness) centralitás, amelyek kulcsszerepet játszanak a kritikus hálózati elemek azonosításában.

2. 2. 2-es csoport – Nem hálózattudományi megközelítések

A közlekedési hálózatok érzékenységevel kapcsolatos kutatások jelentős része nem épül kifejezetten hálózattudományi keretrendszerre. Ezekben a tanulmányokban általában különböző mutatószámokat alkalmaznak, és esettanulmányokon keresztül próbálják meghatározni, hogy mely tényezők befolyásolják leginkább a hálózatok sérülékenységét.

Egyes kutatások például logisztikai hálózatok sebezhetőségét értékelték (Lu et al., 2021), mezosztintű módszertannal, amely az útszakaszok különböző infrastrukturális jellemzőin alapult. Ezen módszerek azonban nem kapcsolódnak közvetlenül a makrosztintű forgalmi modellezéshez. Egy másik tanulmány saját fejlesztésű mutatót vezetett be a logisztikai hálózatok érzékenységének értékelésére (Wei et al., 2024).

Egy újabb kutatás két rétegű analitikai keretet alkalmazott a hálózati vizsgálatokhoz (Sugiura and Chen, 2021), azonban a mezosztint és a makrosztint között nem volt tényleges kapcsolat.

A tanulmány elsősorban a forgalmi csomópontokra koncentrált, a kisebb utak figyelmen kívül hagyásával. Rávilágított a kapacitás és kereslet közötti arány hálózati hatásaira.

Egy másik tanulmány három fő fogalom (megbízhatóság, sérülékenység, ellenállóképesség) összevetésére vállalkozott (Gu et al., 2020). Megállapításuk szerint ezek a koncepciók nem feltétlenül vezethetők le egymásból, mivel a hálózat teljesítményének eltérő aspektusait ragadják meg.

Zhou (Zhou et al., 2021) a légi közlekedési hálózatok sérülékenységét vizsgálta a COVID-19 járvány példáján keresztül. Bár a járvány már elmúlt, jól mutatja, hogyan képes egy váratlan krízis átalakítani a közlekedési rendszereket. A kutatás új módszert vezetett be a repülőtéri kapcsolatok és kapacitásváltozások hatásainak értékelésére. Érdekesség, hogy bár a hálózattudomány kifejezetten nem szerepel a cikkben, a módszertan Barabási elvein alapul.

Természeti katasztrófákra felkészülve egy döntéstámogató eszközt is kidolgoztak (Ulak et al., 2022), amely a hálózat elemeit területhasználati adatok alapján súlyozza. Ezek az adatok a stratégiai modellekben is fontos szerepet játszanak a kereslet és vonzóképeség becslésénél. A vizsgálat során egyszerűsített hálózati struktúrákat alkalmaztak.

Egy másik kutatás az ismeretlen hibák elleni reziliencia (rugalmasság) növelését, valamint az utazási idő csökkentését tűzte ki célul (Rahdar et al., 2022). Háromlépcsős módszert javasoltak: először az optimális forgalomelosztást határozták meg, ezt követte a reziliencia értékelése, majd egy algoritmus segítségével azonosították a szükséges fejlesztéseket.

Légi közlekedési hálózatok ellenállóképességét négy esettanulmány segítségével elemezték (Malandri et al., 2023). A szerzők hangsúlyozták, hogy minden típusú zavar egyedi kezelést igényel, és nem érdemes általánosítani. A zavar időtartama és a hálózat érzékenysége közötti szoros összefüggést is kimutatták.

Egy városi úthálózat elemzése során az ArcGIS Desktop „Networkkrisk” modulját alkalmazták (Toma-Danila et al., 2020). Bár a modul fejlesztés alatt áll, már most is szabadon használható különféle esetek elemzésére. További kutatások

a hálózat egyes szakaszait a korábban bekövetkezett zavarok alapján rangsorolták (Ansari Esfeh et al., 2022), sok esetben térképes megjelenítéssel (Taylor and Susilawati, 2012), (Engidaw and Terdik, 2024).

A hálózati zavarok gazdasági következményeit Kurth vizsgálta (Kurth et al., 2020). A reziliencia mennyiségi értékelése többféleképpen is történhet, és több tényezőtől függ (Ganin et al., 2017), például az egészségügyi intézményekhez való közelségtől (Melkote and Daskin, 2001). A bal esetek költségeivel és a veszélyes helyzetek súlyosságával több tanulmány is foglalkozott (Ötvös and Török, 2024), (Holló and Sipos, 2020).

Egy újszerű megközelítés GPS-adatok alapján értékelte a közlekedési hálózat rezilienciáját, a New York-i taxik átlagos utazási idejének eltéréseiből kiindulva (Donovan and Work, 2017).

Fontos megjegyezni, hogy a hálózati reziliencia nem csupán a közlekedésben releváns, hanem például az ellátási láncok tervezésében is (Heckmann et al., 2015). Több korábbi kutatás közlekedési modelleket alkalmazott a reziliencia vizsgálatára (Mattsson and Jenelius, 2015), és megállapították, hogy az előrejelző komponensek javítják a modellezés pontosságát (He and Liu, 2012). A PAC-modell hasznos eszköznek bizonyult a kritikus kapcsolatok azonosításában (Timothy C. Matisziw and Alan T. Murray, 2009). További példák találhatóak a robusztusság és reziliencia mérésére szolgáló indikátorok alkalmazására is (Cui et al., 2024), (Zhou et al., 2019).

A hidak és alagutak gyakran szűk keresztmetszetként jelennek meg a vizsgálatokban, de a nyomtáv is kulcsszerepet játszik a hálózat érzékenységének meghatározásában (Sventekova et al., 2021), (Urbanová and Sventeková, 2019). Ezzel szemben azok az urbánus hálózatok, amelyek jól elhelyezett és könnyen elérhető csomópontokkal rendelkeznek, jellemzően kevésbé sérülékenyek (Reggiani, 2022), (Buzna et al., 2006).

Számos tanulmány tér ki a már túlterhelt hálózatok kapacitásproblémáira is (Jiang et al., 2022), amelyekre a kritikus események további nyomást helyeznek. Egyre több kutatás célja, hogy a reziliencia alapú gondolkodást beépítse az infrastruktúra-fejlesztési stratégiákba (Lee et al., 2022).

A csomópontok elhelyezésének optimalizálása szintén a veszteségek mérséklését szolgálhatja (Cui et al., 2022), és a jövőbeni kutatások szempontjából is ígéretes irány. Több esettanulmány is alátámasztja, hogy a rosszul tervezett vagy túlterhelt csomópontok jelentős negatív hatással lehetnek a hálózat egészére (Farooq et al., 2024).

3. ÖSSZEHASONLÍTÁS

A 2. táblázat a feldolgozott szakirodalom egy szűkebb körének összehasonlítását tartalmazza az alábbi szempontok szerint: a vizsgált téma közlekedési szektoron belüli elhelyezkedése, az elemzett eseménytípusok (pl. balesetek, meghibásodások, támadások), valamint a vizsgálatok célkitűzései. A szűkítés a felsorolt szempontok alapján történt, ezeknek az irodalmaknak a tartalma sok információt tartalmaz a kutatáshoz szükséges kérdésekhez.

A kritikus városi útszakaszok azonosításához a következő hálózati jellemzők és azok értelmezése szolgált alapul:

(betweenness) centralitás, amelyek a csomópontok szerepét eltérő szempontból értékelik.

- **Kapacitás–terhelés aránya:** Egy útszakasz maximális áteresztőképességét (ideális körülmények között) veti össze az aktuális vagy becsült forgalmi terheléssel. Ha ez az arány 1-hez közeli vagy annál magasabb, az torlódásra utal.
- **Forgalom nagysága:** Egy adott útszakaszon meghatározott idő alatt áthaladó járművek száma, jellemzően jármű/óra vagy jármű/nap egységben kifejezve.
- **Alternatív útvonalak száma egy lezárt szakasz két végpontja között:** Azt mutatja meg, hogy hány eltérő kerülőút áll rendelkezésre, ha az elsődleges útvonal elérhetlenné válik. Ez a hálózat redundanciájának és rugalmasságának fontos mutatója.

A két megközelítés rövid összefoglalásából is kitűnik, hogy a hálózattudományi szemlélet esetén az alkalmazott jellemzők és hálózati paraméterek jóval egységesebbek, kisebb szórást mutatnak. Ez különösen igaz a csomóponti centralitásra, amely szinte minden vizsgálatban

Hivatkozás száma	Közlekedési mód	Hálózat sérülés típusa	Döntés-támogatás?	Hálózattudomány megemlítése?
1	Független, minden közlekedési módhoz	-	-	Igen
21	Közúti közlekedés	-	-	-
24	Független, minden közlekedési módhoz	-	-	-
2	-	-	-	Igen (összetett hálózat)
4	Közúti közlekedés	Tervezett támadás	Igen	Igen
6	Független, minden közlekedési módhoz	Többféle támadási módszer (természeti katasztrófa, direkt támadás, véletlenszerű meghibásodások)	Igen	Igen (összetett hálózat)
25	Légi közlekedés	Járvány	-	-
23	-	Havária	Igen	-
26	Közúti közlekedés	Természeti katasztrófák	Igen	-
10	Tömegközlekedés	-	Igen	Igen
16	Közúti közlekedés	Természeti katasztrófák (erdőtűzek)	Igen	-
18	Közúti közlekedés (cask főutak)	Balesetek, természeti katasztrófák	Igen	-
27	Közúti közlekedés (cask főutak)	Bizonytalan zavarok elleni ellenálló képesség	Igen	-
28	Légi közlekedés	Zavaró események	Igen	-
29	Közúti közlekedés	Természeti katasztrófák, hazard esetek	Igen	-

2. táblázat: A hálózati tudományon alapuló irodalmak összehasonlítása (forrás: saját szerkesztés)

- **Csomóponti centralitás:** A hálózat egyes csomópontjainak fontosságát méri. Ide tartozik többek között a foksám-centralitás, a közelségi centralitás és az átmeneti kulcsszerepet kapott. Ezzel szemben a nem hálózattudományi megközelítések jóval változatosabb jellemzőket alkalmaznak, sokkal kevésbé egységes módon.

- hálózattudományi alapú megközelítések,
- nem hálózattudományi, alternatív értékelési módszerek.

Az első csoport esetében a tanulmányok jellemzően hasonló elemzési szempontokat alkalmaztak, például csomóponti centralitást, átmeneti centralitást, illetve más hálózati paramétereket. A második csoportba tartozó vizsgálatok ezzel szemben jóval nagyobb változatosságot mutattak a választott mutatók és módszerek terén. A két megközelítés összevetéséből kirajzolódik egy olyan jellemzőkészlet, amely különösen alkalmas lehet városi úthálózatok kritikus elemeinek azonosítására.

Az irodalom alapján két fontos következtetés fogalmazható meg:

- A hálózati érzékenység vizsgálatokor a makroszintű és topológiai jellemzők mellett a mikroszintű tényezők figyelembevétele is elengedhetetlen.
- Részletes és pontos modellezés szükséges ahhoz, hogy egy kritikus hálózati elem meghibásodásának hatása kvantitatív módon is értékelhető legyen.

Ez a két megállapítás szorosan összefügg: a legtöbb tanulmány olyan hálózatokat vizsgált, ahol a részletesség csökkentése érdekében egyszerűsítések történtek, például a lakóutcák kihagyása. Ennek oka elsősorban a városi modellek számítási igénye. Ugyanakkor a közlekedési modellezéssel szembeni elvárások ma már az ellenkező irányba mutatnak: egyre nagyobb az igény arra, hogy a legkisebb zavarok, beavatkozások hatásai is előre jelezhetőek legyenek. Az iparági szereplők részéről egyre fokozottabb az igény olyan modellek iránt, amelyek nagy felbontású adatokra és komplex algoritmusokra épülnek. Ez a tendencia azt indokolja, hogy a mikroszintű jellemzők beemelése elkerülhetetlenné válik.

Emellett kulcsfontosságú, hogy képesek legyünk kvantifikálni egy-egy kritikus elem kiesésének vagy eltávolításának hálózati költségét. Ennek érdekében több tanulmány stratégiai forgalmi modelleket használt a forgalmi viselkedés feltérképezésére, különös tekintettel a terelő útvonalakra, torlódásokra és a hálózat újraegyensúlyozódására. Azonban a jelenlegi modellek nem képesek megfelelő pontossággal kezelni a hirtelen, váratlan eseményeket (például baleseteket, szakaszzárásokat), mivel az

alkalmazott útvonalválasztási (routing) algoritmusok általában statikus vagy leegyszerűsített megközelítéseken alapulnak.

Mindezek alapján szükség van a hálózati érzékenység egy új, komplexebb értelmezésére, amely túlmutat a makroszintű, leegyszerűsített modelleken. A jövő kutatásainak választ kell adnia az alábbi kérdésekre:

- Hogyan lehet egyidejűleg figyelembe venni a mikro- és makroszintű jellemzőket a hálózaterékenység értékelése során?
- Hogyan biztosítható valós idejű visszacsatolás a két szint között anélkül, hogy a hálózat túlságosan leegyszerűsödne?
- Milyen útvonalválasztási algoritmus képes pontosabb, környezetfüggő eredmények nyújtására?

E kérdések megválaszolásához új típusú modellezési keretrendszerek kidolgozása szükséges, amelyek képesek kezelni a zavarok és rendkívüli események negatív hatásait. A váratlan történések valóságghű szimulációja elengedhetetlen ahhoz, hogy a közlekedési rendszerek valóban rugalmasak, tervezhetőek és reagálóképességükben erősebbek legyenek a jövő kihívásaival szemben.

6. ÖSSZEGZÉS

A feldolgozott szakirodalom egyértelműen jelzi, hogy a közlekedési hálózatok érzékenységének vizsgálata további kutatásokat indokol. Mérnöki és modellezési szempontból egyre nagyobb az igény olyan részletes hálózati elemzésekre, amelyek nem támaszkodnak túlzott egyszerűsítésekre. Ennek megvalósításához olyan módszertani keretrendszerre van szükség, amelyben a mikro- és makroszintű jellemzők együttesen jelennek meg.

A kritikus hálózati elemek meghibásodása valós hatásainak értékeléséhez a jelenlegi stratégiai forgalmi modellek továbbfejlesztése szükséges. A kutatás azt is feltárta, hogy a jelenleg alkalmazott ráterhelési eljárások nem alkalmasak rendkívüli helyzetek, például balesetek, háváriaesemények vagy támadások pontos szimulálására. Ezért a jövőbeni kutatások célja egy új ráterhelési módszer kidolgozása, amely kifejezetten az ilyen vészhelyzetekre van optimalizálva. Az eljárás több kutatási szakaszon

alapul, amelyek célja a személygépkocsival közlekedő járművezetők viselkedésmintáinak feltérképezése.

Az új módszert a meglévő PTV Visum szoftverrel és Python programozási környezettel integrálva kívánjuk implementálni, annak érdekében, hogy a kritikus hálózati események hatásait pontosabban és adaptívan lehessen modellezni. Továbbá fontos megemlíteni, hogy az esetleges balesetek az igények megváltozását is jelentik. A ráterhelési eljárás fejlesztésénél ezt is figyelembe kell venni a későbbi lépések folyamán.

Köszönetnyilvánítás: A projekt megvalósítását támogatták segítették. A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium támogatásával valósult meg. A projekt azonosítószáma: 2024-2.1.2.-EKÖP-KDP-2024-00016.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Ansari Esfeh, M., Kattan, L., Lam, W.H.K., Salari, M., Ansari Esfe, R. (2022) Road network vulnerability analysis considering the probability and consequence of disruptive events: A spatiotemporal incident impact approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 136, 103549. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103549>
- [2] Auerbach, J., Kim, H. (2022) Measuring Robustness and Coverage of Transportation Networks with Multiple Routes and Hubs, *Annals of the American Association of Geographers*, 112, pp. 1741–1760. <https://doi.org/10.1080/24694452.2021.2000357>
- [3] Auerbach, J., Kim, H. (2021) Local network connectivity optimization: an evaluation of heuristics applied to complex spatial networks, a transportation case study, and a spatial social network, *PeerJ Computer Science*, 7, e605. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.605>
- [4] Barabasi, A.-L., Albert, R. (1999) Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286, pp. 509–512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- [5] Barabasi, A.-L. (2016) *Network Science*, Libri.
- [6] Buzna, L., Peters, K., Helbing, D. (2006) Modelling the dynamics of disaster spreading in networks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 363, pp. 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.01.059>
- [7] Chen, M., Lu, H. (2020) Analysis of Transportation Network Vulnerability and Resilience within an Urban Agglomeration: Case Study of the Greater Bay Area, China, *Sustainability*, 12, 7410. <https://doi.org/10.3390/su12187410>
- [8] Collins, A. J., Robinson, R. M., Jordan, C. A., Khattak, A. (2018) Development of a traffic incident model involving multiple municipalities for inclusion in large microscopic evacuation simulations, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, pp. 1223–1230. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.12.010>
- [9] Cui, C., Xiao, F., Aihui, P., Tao, L., Junli, Y. (2022) Mitigating the Vulnerability of a High-Speed Railway–Air Network by Optimizing the Location of Integrated Transportation Hubs, *IEEE Access*, 10, pp. 123920–123941. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223709>
- [10] Cui, Y., Liu, Z., Wu, H., Sun, P., Zhou, F. (2024) Evaluation of Urban Transportation Resilience under Extreme Weather Events”, *Applied Sciences*, 14, 4947. <https://doi.org/10.3390/app14114947>
- [11] Donovan, B., Work, D. B. (2017) Empirically quantifying city-scale transportation system resilience to extreme events”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 79, pp. 333–346. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.002>
- [12] Engidaw, G., Terdik, G. (2024) The Processing Spatial Data for Statistical Modeling and Visualization Case study: INLA model for COVID-19 in Alabama, USA, *Acta Technica Jaurinensis* 17, pp. 130–142. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00746>
- [13] Farooq, D., Tufail, R. F., Ali, M., Iqbal, H., Tariq, A. R. (2024) Investigation of Traffic Issues at Unsignalized Taxila Intersection and their Countermeasures, *Period. Polytechnica Transportation Engineering*, 52, pp. 310–316. <https://doi.org/10.3311/PPtr.23326>

- [14] Ganin, A. A., Kitsak, M., Marchese, D., Keisler, J. M., Seager, T., Linkov, I. (2017) Resilience and efficiency in transportation networks, *Science Advances*, 3, e1701079. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701079>
- [15] Gu, Y., Fu, X., Liu, Z., Xu, X., Chen, A. (2020) Performance of transportation network under perturbations: Reliability, vulnerability, and resilience, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 133, 101809. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.11.003>
- [16] He, X., Liu, H. X. (2012) Modeling the day-to-day traffic evolution process after an unexpected network disruption, *Transportation Research Part B: Methodological*, 46, pp. 50–71. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2011.07.012>
- [17] Heckmann, I., Comes, T., Nickel, S. (2015) A critical review on supply chain risk – Definition, measure and modeling, *Omega*, 52, pp. 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.10.004>
- [18] Holló, P., Sipos, T. (2020) Közúti baleseti veszteségek aktualizálása, *Közlekedéstudományi Szemle*, 70(4), pp. 47–52. <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2020.4.4>
- [19] Huang, X., Hu, S., Wang, W., Kaparias, I., Zhong, S., Na, X., Bell, M.G., Lee, D.-H. (2024) Identifying Critical Links in Urban Transportation Networks Based on Spatio-Temporal Dependency Learning, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25, pp. 5583–5597. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3339507>
- [20] Jiang, X., Shan, X., Du, M. (2022) Modeling Network Capacity for Urban Multimodal Transportation Applications, *Journal of Advanced Transportation*, pp. 1–22. <https://doi.org/10.1155/2022/6034369>
- [21] Kurth, M., Kozłowski, W., Ganin, A., Mersky, A., Leung, B., Dykes, J., Kitsak, M., Linkov, I. (2020) Lack of resilience in transportation networks: Economic implications, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102419. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102419>
- [22] Lee, C.-C., Rajput, A. A., Hsu, C.-W., Fan, C., Yuan, F., Dong, S., Esmalian, A., Farahmand, H., Patrascu, F. I., Liu, C.-F., Li, B., Ma, J., Mostafavi, A. (2022) Quantitative measures for integrating resilience into transportation planning practice: Study in Texas, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 113, 103496. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103496>
- [23] Leng, J., Zhai, J., Li, Q., Zhao, L. (2018) Construction of road network vulnerability evaluation index based on general travel cost, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 493, pp. 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.11.018>
- [24] Liu, J., Lu, H., Chen, M., Wang, J., Zhang, Y. (2020) Macro Perspective Research on Transportation Safety: An Empirical Analysis of Network Characteristics and Vulnerability, *Sustainability*, 12, 6267. <https://doi.org/10.3390/su12156267>
- [25] Liu, J., Lu, H., Ma, H., Liu, W. (2017) Network Vulnerability Analysis of Rail Transit Plans in Beijing-Tianjin-Hebei Region Considering Connectivity Reliability, *Sustainability*, 9, 1479. <https://doi.org/10.3390/su9081479>
- [26] Liu, S., He, M., Wu, Z., Lu, P., Gu, W. (2024) Spatial-temporal graph neural network traffic prediction based load balancing with reinforcement learning in cellular networks, *Information Fusion*, 103, 102079. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102079>
- [27] Lu, Q.-C., Xu, P.-C., Zhang, J. (2021) Infrastructure-based transportation network vulnerability modeling and analysis, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 584, 126350. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126350>
- [28] Mahajan, K., Kim, A. M. (2020) Vulnerability assessment of Alberta's provincial highway network, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100171. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100171>
- [29] Malandri, C., Mantecchini, L., Postorino, M. N. (2023) A comprehensive approach to assess transportation system resilience towards disruptive events. Case study on airside airport systems, *Transport Policy*, 139, pp. 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.jtrapol.2023.05.011>

- [30] Mattsson, L.-G., Jenelius, E. (2015) Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 81, pp. 16–34. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.002>
- [31] Melkote, S., Daskin, M. S. (2001) An integrated model of facility location and transportation network design, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35, pp. 515–538. [https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00005-7)
- [32] Ötvös, V., Török, Á. (2024) Measurement of Accident Risk and a Case Study from Hungary, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 52, pp. 159–165. <https://doi.org/10.3311/PPtr.22731>
- [33] Piraveenan, M., Saripada, N. B. (2023) “Transportation Centrality: Quantifying the Relative Importance of Nodes in Transportation Networks Based on Traffic Modeling, *IEEE Access*, 11, pp. 142214–142234. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3339121>
- [34] Rahdar, M., Wang, L., Dong, J., Hu, G. (2022) Resilient Transportation Network Design under Uncertain Link Capacity Using a Trilevel Optimization Model, *Journal of Advanced Transportation*, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1155/2022/5023518>
- [35] Redzuan, A. A. H., Zakaria, R., Anuar, A. N., Aminudin, E., Yusof, N. M. (2022) Road Network Vulnerability Based on Diversion Routes to Reconnect Disrupted Road Segments, *Sustainability*, 14, 2244. <https://doi.org/10.3390/su14042244>
- [36] Reggiani, A. (2022) The Architecture of Connectivity: A Key to Network Vulnerability, Complexity and Resilience, *Networks and Spatial Economics*, 22, pp. 415–437. <https://doi.org/10.1007/s11067-022-09563-y>
- [37] Serdar, M. Z., Koç, M., Al-Ghamdi, S. G. (2022) Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods, *Sustainable Cities and Society*, 76, 103452. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103452>
- [38] Sugishita, K., Asakura, Y. (2021) Vulnerability studies in the fields of transportation and complex networks: a citation network analysis, *Public Transport*, 13, pp. 1–34. <https://doi.org/10.1007/s12469-020-00247-9>
- [39] Sugiura, S., Chen, A. (2021) Vulnerability analysis of cut-capacity structure and OD demand using Gomory-Hu tree method, *Transportation Research Part B: Methodological*, 153, pp. 111–127. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.08.013>
- [40] Sventekova, E., Urbancova, Z., Holla, K. (2021) Assessment of the Vulnerability of Selected Key Elements of Rail Transport, Slovak Case Study, *Applied Sciences*, 11, 6174. <https://doi.org/10.3390/app11136174>
- [41] Taylor, M. A. P., Susilawati (2012) Remoteness and accessibility in the vulnerability analysis of regional road networks, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46, pp. 761–771. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.008>
- [42] Timothy, C., Matisziw, A., Murray T. (2009) Modeling s-t Path Availability to Support Disaster Vulnerability Assessment of Network Infrastructure, *Computers & Operations Research*, 36 (1), pp. 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.09.004>
- [43] Toma-Danila, D., Armas, I., Tiganescu, A. (2020) Network-risk: an open GIS toolbox for estimating the implications of transportation network damage due to natural hazards, tested for Bucharest, Romania, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20, pp. 1421–1439. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-1421-2020>
- [44] Ulak, M. B., Konila Sriram, L. M., Kocatepe, A., Ozguven, E. E., Arghandeh, R. (2022) Resilience Characterization for Multilayer Infrastructure Networks, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 14, pp. 121–132. <https://doi.org/10.1109/IMITS.2021.3049368>
- [45] Urbancová, Z., Sventeková, E. (2019) Assessing vulnerability of key elements of railway infrastructure, *Transportation Research Procedia*, 40, pp. 1597–1603. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.221>
- [46] Wang, S., Zhang, J., Zhao, M., Min, X. (2017) Vulnerability analysis and critical areas identification of the power systems under terrorist attacks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 473, pp. 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.01.003>

- [47] Wei, X., Wang, M., Meng, Q. (2024) Vulnerability Assessment and Reduction for Intermodal Freight Transportation Networks, *Reliability Engineering & System Safety*, 245, 109969. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.109969>
- [48] Wen, T., Gao, Q., Chen, Y., Cheong, K. H. (2022) Exploring the vulnerability of transportation networks by entropy: A case study of Asia–Europe maritime transportation network, *Reliability Engineering & System Safety*, 226, 108578. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108578>
- [49] Wu, Y., Hou, G., Chen, S. (2021) Post-earthquake resilience assessment and long-term restoration prioritization of transportation network, *Reliability Engineering & System Safety*, 211, 107612. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107612>
- [50] Zhang, D., Du, F., Huang, H., Zhang, F., Ayyub, B. M., Beer, M. (2018) Resiliency assessment of urban rail transit networks: Shanghai metro as an example, *Safety Science*, 106, pp. 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.03.023>
- [51] Zhou, Y., Kundu, T., Qin, W., Goh, M., Sheu, J.-B. (2021) Vulnerability of the worldwide air transportation network to global catastrophes such as COVID-19, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 154, 102469. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102469>
- [52] Zhou, Y., Wang, J., Yang, H. (2019) Resilience of Transportation Systems: Concepts and Comprehensive Review, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20, pp. 4262–4276. <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2883766>



The Evolution of Research on Transportation Network Sensitivity and the Examination of the Vulnerability of Critical Elements – a Literature Review

Keywords: traffic modelling, network sensitivity, network science, transportation network

The sensitivity of transportation networks is a key issue in terms of strategic planning and emergency management. The study uses bibliometric analysis to explore research directions, methodological trends, and their temporal changes. The literature review also presents both network science and other approaches, highlighting the need for detailed, integrated models and realistic network assessments.

