

Dr. Hartmann Bálint, Dr. Michelle T. Cirunay,
Dr. Erdei Tímea, Soha Tamás

Univerzális topológiai mintázatok a közép feszültségű elosztóhálózatokban

Elosztóhálózataink tervezését számos regionális tényező befolyásolja, mint például a földrajzi adottságok, az ügyfélsűrűség és a tervezési szabványok. Nyitott kérdés ugyanakkor, hogy a különböző hálózatok fejlődése során milyen mértékben alakulnak ki egységes strukturális jellemzők. Munkánk során öt közép feszültségű elosztóhálózat részletes térbeli és topológiai elemzését végezzük el. A földrajzi elrendezésben és a fogyasztói elosztásban mutatkozó jelentős különbségek ellenére statisztikailag konzisztens mintákat azonosítottunk számos kulcsfontosságú mutató tekintetében. Az eredmények betekintést nyújtanak a valós elosztórendszerek szerveződésébe, és alapot kínálnak a jövőbeli hálózatfejlesztések során a tervezés javításához, a kockázatcsökkentéshez és a rendszer optimalizálásához.

Although the design of distribution systems is influenced by various regional factors, such as geography, customer density, and planning standards, the extent to which consistent structural characteristics emerge across different networks remains an open question. In this study, we perform a detailed spatial and topological analysis of five medium voltage distribution networks. Despite notable differences in geographic layout and consumer distribution, we identify statistically consistent patterns across several key metrics. The results provide insight into the organization of real-world distribution systems and offer a basis for improved planning, risk mitigation, and system optimization in future grid developments.

1. BEVEZETÉS

Ha a valós infrastruktúrákat, például az elektromos hálózatokat, az utakat vagy a vízellátást hálózatoknak tekintjük, csomópontjaik és éleik a síkba vannak beágyazva, ezért a hosszú kapcsolatok nagyobb költségekkel járnak. Általában hasonló optimalizálási elvek alapján tervezik őket, hogy egyensúlyt teremtsenek a költségek, a hatékonyság, a rugalmasság és a térbeli korlátok között, ami konvergens szerkezeti mintázatokhoz vezet a különböző típusú hálózatok között [1].

A gyakorlatban a vezetékös infrastruktúrák tervezésénél általában a költségek (teljes vezeték hossz) minimalizálására töreksenek, a szolgáltatásminőség maximalizálása mellett. Az ilyen feladatokat hagyományosan minimális feszítőfa-problémákkal vagy a hatékonyság maximalizálásával oldják meg a teljes hálózati hossz rögzítése mellett [2],[3]. Ezek az optimalizálási modellek nagyon hasonló megközelítéseken alapulnak, ami magyarázza, hogy az infrastruktúrahálózati tervek többsége miért homogén, rácsszerű gráf. Míg azonban pusztán a teljes hálózati hossz minimalizálása fastruktúrájú hálózatokhoz vezet, a valós infrastruktúrák hurkokat is tartalmaznak robusztusságuk növelése érdekében [4].

Az ún. központisági (angolul centrality) mutatók szempontjából ezek a tervezési elvek kis arányban jelen lévő, szűk keresztmetszetként viselkedő csomópontokhoz és nagyon kevés alternatív útvonalhoz vezetnek. Domináns csomópontokat alkotnak az ilyen villamos hálózatokban a NAF/KÖF-alállomások és a KÖF/KIF-transzformátorok. Az előbbieket domináns csomópontokként viselkednek a saját szolgáltatási területükön, míg utóbbiak kevésbé dominálnak. Ez a közöttség központiság (betweenness centrality – BC) esetében kétféleképpen eloszlást eredményez, ahol lokális maximuma lesz a táppontokhoz közel helyezkedő csomópontoknak, míg az ágakon elhelyezkedő lokális minimumot alkotnak [5]. Ezt a bimodális BC-mintázatot még inkább hangsúlyozza a KÖF-hálózatok térbeli növekedésének történelme. Ahogy azt korábbi munkánkban bemutattuk, a KÖF-hálózatok terjeszkedése kezdetben sok periférián lévő csomópontot eredményezett [6]. A bimodális csúcst valószínűleg az okozta, hogy a vezetékeket korlátozott számú, központi elhelyezkedésű településről kiindulva építették, így viszont a fejlődés későbbi szakaszában ezeknek a lokációknak a jelentősége kisebb lett, BC-értékük pedig csökkent. Ehhez hasonló eredményeket közöltek Kirkley és társai is [7], nevezetesen, hogy ha a hálózat térben sík marad (ún. planar network), a BC-eloszlás jellege még a hálózat nagy növekedése esetén is változatlan – azaz komplex rendszerként értelmezett karakterisztikus tulajdonságai sem változnak.

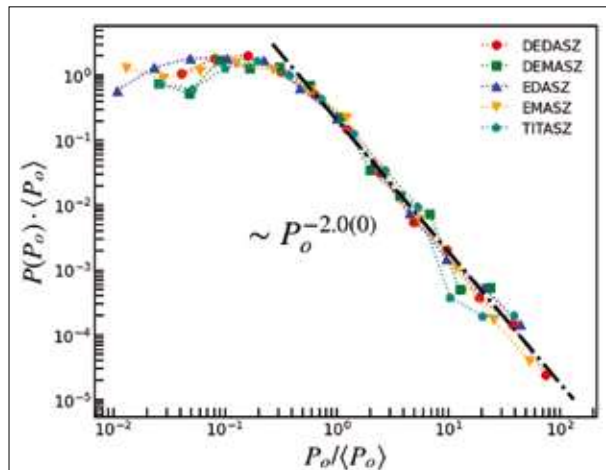
A topológiai elemzésekhez 5 magyarországi elosztóhálózat modelljét rekonstruáltuk. A legenerált vektoradatokon manuális korrekciókat végeztünk annak érdekében, hogy a nagy kiterjedésű hálózatok automatikus elemzését megkönnyítsük. Ez a korrekciós folyamat lezárócsomópontok elhelyezéséből, egymáshoz közel eső csomópontok kismértékű áthelyezéséből és az állomásokon belüli összeköttetések kialakítását foglalta magában.

2. ÖT ELOSZTÓ – UNIVERZÁLIS RECEPT?

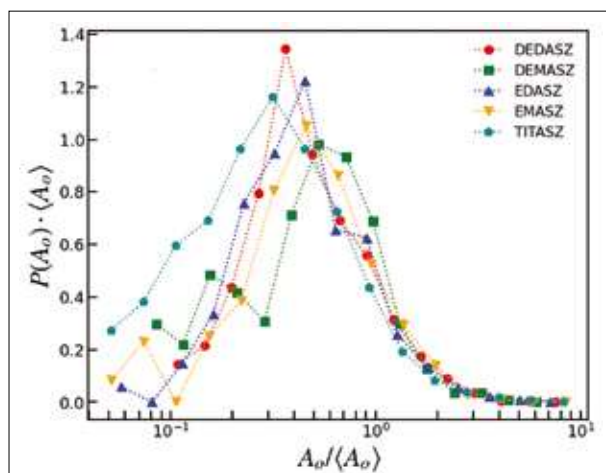
A demográfiai adatok, az infrastrukturális igények, a hálózat jelenlegi állapota és az ellátásminőségi mutatók [8] közötti összefüggések kapcsán rövid áttekintést nyújtunk az elosztói régiókról, melyek között markáns különbségek mutatkoznak. A legsűrűbben lakott az ÉDÁSZ területe (96 fő/km²), ez rendelkezik a leghosszabb vezetékhálózattal (12 731 km) és a legtöbb aprófaluvá (72%), viszont arányaiban magas az egységnyi vezeték hosszra eső hibák száma (7,18/100 km). Településszerkezet szempontjából a skála másik végén a DÉMÁSZ található: aprófalvak nélküli, centralizált struktúra jellemzi, hosszú ellátási útvonalak mellett; részben ennek tudható be a viszonylag lassú helyreállítás. A hegyvidéki területeket lefedő ÉMÁSZ bír a legrövidebb vezetékhálózattal, amihez kedvező SAIFI- (0,58/fogyasztó/év) és SAIDI- (33,6 h/fogyasztó/év) mutatók tartoznak. A DÉDÁSZ erősen tagolt, aprófalvas régiót szolgál ki, erősen moduláris hálózatot alkotva. Utóbbi nem független módon alacsony az egységnyi vezeték hosszra eső hibák száma (5,78/100 km), azok helyreállítása azonban fajlagosan a legtöbb tart a vizsgált területek között. Végül a TITÁSZ hibrid képet mutat: magas SAIFI- és SAIDI-mutatók ellenére gyors hibaelhárítást figyelhetünk meg, mutatva az erősen kevert (városi és vidéki) infrastruktúra kockázatait.

Az elemzés következő szakaszában a vizsgált elosztói területeken található települések népességének és területének valószínűségi eloszlásait vizsgáltuk. A népesség az 1. ábrán látható módon (és a várakozásoknak megfelelően) hatványfüggvény szerint skálázódik, -2,0 kitevővel. Ezzel szemben a területek a 2. ábra szerinti lognormális viselkedést követnek,

szemben a szakirodalomban általánosan elfogadott -1,9 körüli kitevőjű hatványfüggvénnyel. Az eltérés oka abban keresendő, hogy vizsgálatunkban a városokon belüli KÖF-hálózatokat is figyelembe vettük, míg a szakirodalom döntően a városokon kívüli hálózatokat építi be a modellekbe. Jól láthatóan mindkét esetben nagyon hasonlóan viselkedik a vizsgált 5 elosztói terület, igazolva a keresett univerzális mintázatok meglétét.



1. ábra A vizsgált elosztói területeken található települések népességének valószínűségi eloszlásai



2. ábra A vizsgált elosztói területeken található települések területének valószínűségi eloszlásai

Térjünk ki röviden a két eloszlásfüggvény közötti eltérés magyarázatára. Amikor a népességeloszlás hatványfüggvényt, a területi eloszlás pedig lognormális eloszlást követ, akkor a vizsgált hálózatunk térbeli és demográfiai jellemzőiben eltérő mintázatokat mutat. A hatványfüggvény szerinti népességeloszlás azt jelenti, hogy néhány régió vagy település lakossága nagyon magas, míg a legtöbb terület lakossága viszonylag alacsony. Ez a népességméretekből nagyfokú egyenlőtlenséget eredményez: a népesség nagy része csak néhány városban koncentrálódik, míg a fennmaradó rész sok kisebb településen szétszórva él. A területek lognormális eloszlása azt sugallja, hogy a legtöbb település közepes méretű, és csak néhány tér el ettől. Ez egyben azt is jelzi, hogy a legtöbb település területének mérete viszonylag homogén eloszlású, a nagyobb területű települések hosszan lecsengő eloszlásfarkat alkotnak.

Az infrastruktúra kiépítése szempontjából ez a kettősség fontos kihívást jelent: a nagy népességű városi területek kon-

centráltabb és nagy kapacitású infrastruktúrát igényelhetnek, míg a nagyobb kiterjedésű, de ritkán lakott vidéki területek ellátására diszpergáltabb megoldásokkal kell élni.

3. KÖZPONTISÁGI MUTATÓK

A korábban már hivatkozott köztiség központosság mellett két másik központisági mutatót is használtunk a hálózatok elemzéséhez. Hogy ezek eltéréseit megértsük, röviden definiáljuk a három mutatót.

A fokszám központosság (degree centrality – DC) képet adhat a hálózat szerkezetéről azáltal, hogy azonosítja, melyik csomóponton található a legtöbb él. A villamos hálózatok kontextusában az állomások és a transzformátorok azok a csomópontok, amelyek magas fokszámmal rendelkeznek a hálózat többi csomópontjához képest.

$$DC_i = \frac{1}{N-1} \sum_j \alpha_{ij} \quad (1)$$

ahol N a csomópontok száma, α_{ij} pedig a szomszédsági mátrix, melynek értéke 1, ha van él az i és j csomópontok között.

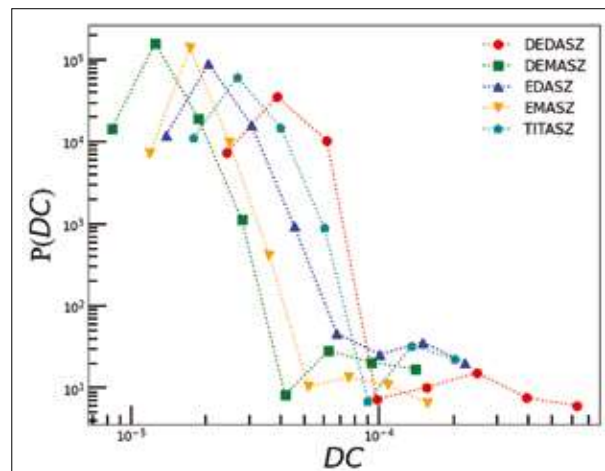
A másik két központisági mutató, a közelségi (closeness centrality – CC) és a köztiségi központosság (BC) a vizsgált rendszer térbeli elrendezéséhez kapcsolódnak. A CC minden csomópontra meghatározza a hálózat strukturális középpontját, mivel a legnagyobb közelségi központissággal rendelkező csomópont rendelkezik a legkisebb legrövidebb úthosszal (d_{ij}) az összes többi csomóponthoz:

$$CC_i = \left[\sum_j d_{ij} \right]^{-1} \Big|_{j \neq i} \quad (2)$$

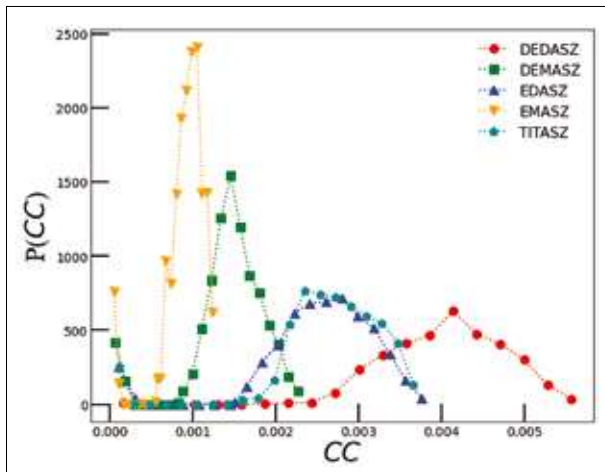
A köztiség központosság azt méri, hogy az i csomópont hányszor jelent meg a hálózat összes legrövidebb útvonalában között. A magas BC-értékű csomópontok ezért olyan „hidaknak” tekinthetők, ahol a perifériás csomópontok közötti kapcsolatok haladnak át.

$$BC_i = \sum_{h \neq j \neq i} \frac{\sigma_{hj}(i)}{\sigma_{hj}} \quad (3)$$

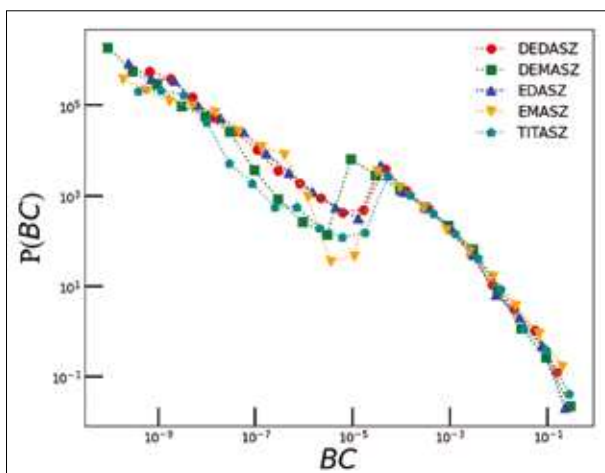
A 3. ábra azt mutatja, hogy a DC-eloszlások lognormális viselkedést követnek, ami azt jelzi, hogy a hálózatban lévő csomópontok többségének fokszáma közel van egy centrális értékhez, néhány csomópontnak pedig nagyon kevés vagy sok kapcsolata van. Ez egy olyan hálózatot eredményez, ahol az összekapcsoltság általában mérsékelt, a csomópontok között



3. ábra A fokszám központosság valószínűségi eloszlása a vizsgált elosztói területeken



4. ábra A közelségi központosság valószínűségi eloszlása a vizsgált elosztói területeken



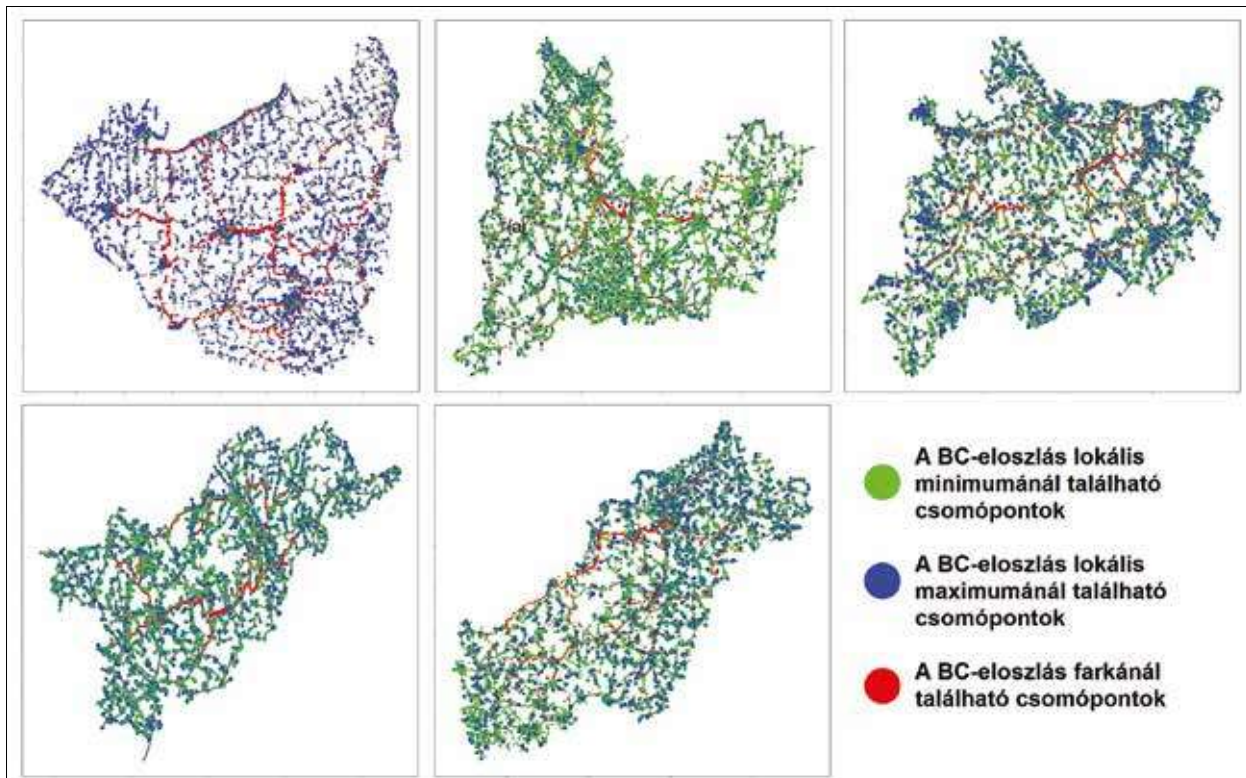
5. ábra A köztiség központosság valószínűségi eloszlása a vizsgált elosztói területeken

egyaránt találhatók jól és ritkán összekapcsoltak. Ezenkívül megfigyelhetjük az eloszlások csúcsainak tolódását a magas DC-értékek felé. Például a magas DC-értékeket legnagyobb valószínűséggel mutató DÉDÁSZ hálózatnak a legnagyobb az átlagos fokszáma, klaszterezési együtthatója és modularitása is, ami kompakt hálózatra utal.

A 4. ábra a CC-eloszlásokat mutatja. A közelségi metrika a hálózat strukturális középpontjára mutat rá. Definíciója szerint, mint a legrövidebb úthossz inverze, a magas közelségi központosságú csomópontokból könnyebben elérhető a hálózat többi csomópontja. Intuitív módon, minél nagyobb a hálózat térbeli kiterjedése, a CC-eloszlások annál kisebb értékek felé tolódnak el. Vegyük például az EMÁSZ és a DÉDÁSZ esetét, amelyek átmérőjüket tekintve a legnagyobb és legkisebb hálózatok. Az EMÁSZ CC-eloszlása az alacsonyabb értékeknél, a DÉDÁSZ pedig a nagyobb értékeknél mutat csúcsokat. Megfigyelhetjük azt is, hogy a közelségi központosság jó közelítéssel normáeloszlású, ami azt jelenti, hogy a legtöbb csomópont hasonló hatékonysággal fér hozzá a hálózat többi részéhez.

Végül, a hálózatok BC-eloszlása az 5. ábrán látható, amely egy csonkolt hatványfüggvényt követ, összhangban a véletlenszerű síkgráfok várható viselkedésével [7], ami egy mérsékelt centralizált és kiegyensúlyozott szerkezetű hálózatra utal. A köztiség központosság által mutatott csonkolt hatványfüggvény a hálózat egy kulcsfontosságú aspektusát emeli ki: néhány csomópont kritikus szerepet játszik a hálózat különböző részeinek összekapcsolásában, de centralitásuk korlátozott.

A villamos elosztóhálózatok kontextusában érdemes azonosítani azoknak a csomópontoknak a helyét, amelyek az 5. ábrán megfigyelhető lokális minimumot és maximumot okozzák az eloszlás lecsengésétől balra található szakaszon. Ehhez a 6. ábrán térképen is ábrázoltuk a BC-eloszlás különböző szakaszain található csomópontokat. Megfigyelhető, hogy a lokális maximumnál található, kékkkel jelölt csomópontok a klaszterek középpontjaiban helyezkednek el. Ezek a csomópontok döntően a KÖF/KIF-transzformátorok elhe-



6. ábra A köztiség központosság területi eloszlása

lyezkedésével esnek egybe, magasabb BC-értékük pedig a sugaras kialakítású KÖF-hálózat miatt alakulhat ki. A BC-eloszlás lokális minimumánál található, zöld színnel jelölt csomópontok ezeknek a klasztereknek a periférikus csomópontjai. Végül az eloszlás farkánál található, legnagyobb BC-értéket felvevő, piros csomópontok egy jól látható láncot alkotnak, összekötve a KÖF-hálózat nagyobb régióit. Ezek a láncok általában a NAF/KÖF-állomások betáplálási pontjai között, illetve a 35 kV-os szakaszok mentén húzódnak. A piros csomópontok tehát kulcsfontosságúak egyrészt az összekapcsoltság miatt, másrészt a hálózat sebezhetősége szempontjából is.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Elemzéseink alapján a hálózati struktúrát a teljes népségnél nagyobb mértékben befolyásolja a népsűrűség és az aprófalvak aránya. A földrajzi elrendezés és az ügyfelek eloszlásában megfigyelhető jelentős különbségek ellenére mégis statisztikailag konzisztens, univerzális mintákat azonosítottunk több kulcsfontosságú mutató esetében. Ezek az eredmények kvantitatív módon is igazolják egyrészt azt, hogy a hálózatok tervezése azonos elvek mentén történik, másrészt pedig, hogy a használt optimalizálási korlátok nagy valószínűséggel eredményeznek univerzális hálózati struktúrát. Ez egyben azt is jelenti, hogy a KÖF-elosztóhálózatok gráfleképezése más infrastruktúrákhoz hasonlóan közel síkgráfként értelmezhető.

A síkgráfként vagy síkhálózatként értelmezés pedig nem pusztán matematikai érdekesség, hiszen számos fizikai, gazdasági és szabályozási korlátot hordoz magában. Számos olyan optimalizációs és megbízhatósági probléma, amely általános gráfokon NP-nehéz, síkbeli problémákra használva P-nehézzé egyszerűsödik, vagy jó közelítéseket enged – ezt használja ki például a teljesítményáramlás-számítás is. Egy másik aspektus a hálózat hibatűrése. Síkhálózatokban a kaskád jellegű hibák kvázi kétdimenziós „frontok” mentén tudnak terjedni. Ez a geometriai korlát azt jelenti, hogy a lokális megerősítések (pl. gyűrűk alkalmazása) nagymértékben korlátozhatják egy üzemzavar térbeli kiterjedését.

A cikkben bemutatott eredmények betekintést nyújtanak a valós elosztórendszerek szerveződésének fontos kérdéseibe, és alapot kínálnak a jövőbeli hálózatfejlesztések során a tervezés szempontjainak bővítéséhez is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Hartmann Bálint köszöni a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíjának (BO/131/23) támogatását.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Barthelemy:** *Spatial networks*, 2022nd Edition, Springer Nature, Cham, Switzerland, 2022.
- [2] **Guillier, Munoz, Rogan, Zarama, Valdivia:** Optimization of spatial complex networks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 467 (2017)
- [3] **Morer, Cardillo, Díaz-Guilera, Prignano, Lozano:** Comparing spatial networks: A one-size-fits-all efficiency-driven approach, *Physical Review E* 101 (4) (2020)
- [4] **Chekuri, Gupta, Kumar, Naor, Raz:** Building edge-failure resilient networks, *Algorithmica* 43 (12) (2005)
- [5] **Louf, Jensen, Barthelemy:** Emergence of hierarchy in cost driven growth of spatial networks, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110 (22) (2013)
- [6] **Hartmann:** Hálózattudományra huzalozva: hogyan tárjuk fel energiarendszereink öröklött gyengeségeit? *ELEKTROTECHNIKA*, 117 (7-8). pp. 5-7. (2024)
- [7] **Kirkley, Barbosa, Barthelemy, Ghoshal:** From the betweenness centrality in street networks to structural invariants in random planar graphs, *Nature communications* 9 (1) (2018)
- [8] **Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal:** A villamosenergia-ellátás megbízhatóságának értékelése a 2023. évi elosztói engedélyesi beszámolók alapján (2024)



Dr. Hartmann Bálint

Tudományos főmunkatárs
HUN-REN Energiatudományi
Kutatóközpont
MEE-tag
hartmann.balint@vik.bme.hu



Dr. Michelle T. Cirunay

Posztdoktor kutató
HUN-REN Energiatudományi
Kutatóközpont
michelle.cirunay@ek.hun-ren.hu



Dr. Erdei Tímea

Tudományos munkatárs
HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont
erdei.timea@ek.hun-ren.hu



Soha Tamás

Tudományos segédmunkatárs
HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont
soha.tamas@ek.hun-ren.hu

HÍREK

Miniszeri elismerés Némethné dr. Vidovszky Ágnesnek

Az Építési és Közlekedési Minisztérium Építők Elismerő Oklevelében részesítette Ágnest a több évtizedes, kiemelkedő szakmai és közösségi munkájáért. Villasmérnöként 1991-ben társalapítója volt a Prolux Világítástechnikai Kft.-nek, melynek 27 éven át meghatározó vezetője volt. Nevéhez fűződik számos nagy jelentőségű világítási projekt megvalósítása, az Országház felsőházi termétől a Millenáris Parkon át az Audi-gyárig.

Évtizedek óta aktív tagja a Magyar Elektrotechnikai Egyesület Világítástechnikai Társaságának, és kezdeményezője több rangos rendezvénynek, köztük a LED Konferenciának és a LUMEN V4 fórumnak. Munkája nyomán a világítástechnika nem csupán műszaki területként, hanem a mindennapi életminőséget formáló, emberközpontú hivatásként is értelmezhető. Szemlélete és elkötelezettsége példaként áll minden mérnök előtt.

