



Energiatudományi Kutatóközpont

Ellátásbiztonság az átalakuló villamosenergia-rendszerekben

Dr. Hartmann Bálint
ELKH EK

ESZK 20 jubileum
2022. november 3.

A kiindulási probléma

- A létfontosságú infrastruktúra hálózatok (villamos energia-, telekommunikációs-, földgáz-, víz- és közlekedési hálózatok illetve a sürgősségi ellátás) mindennapi életünkhöz és gazdasági jólétünkhöz elengedhetetlen szolgáltatásokat nyújtanak
- Ezek a hálózatok egymással szorosan összefüggő, dinamikus rendszerek, ami javítja hatékonyságukat de egyben sérülékenyebbé is teszi őket
- Az elemi csapások, a technológiai hibák vagy a külső támadások katasztrofális méretű zavarokká fejlődhetnek.

A kiindulási probléma

- A villamosenergia-szolgáltatás minősége
- Üzemzavarok, haváriák, részleges vagy teljes rendszerösszeomlások (blackout)

Most of Bangladesh left without power after national grid failure

Huge blackout leaves millions in Central Asia without power

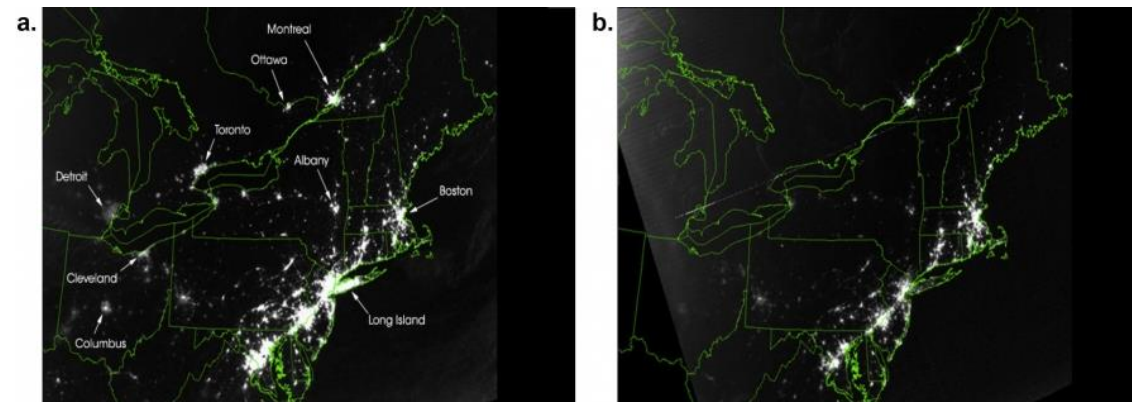
The capitals of Kyrgyzstan, Uzbekistan as well as Kazakhstan's Almaty suffered power cuts

At least two people dead, more than 300,000 without power after storm hits Ontario



Miért hasznos számunkra a hálózattudomány?

- A rendszerösszeomlások kaszkád jelenségek
- A kaszkádok prediktálhatók, elkerülhetők...
 - ... ha értjük a kaszkád terjedését kijelölő hálózat struktúráját
 - ... ha képesek vagyunk modellezni a hálózatok dinamikus folyamatait
 - ... ha le tudjuk írni, hogy a rendszer sérülékenységére hogyan hat az előző kettő kapcsolata



2003 North American Blackout
Barabási: Network Science



Energiatudományi Kutatóközpont

Hálózattudomány



Mi a hálózattudomány?

Physicists

Computer Scientists

Applied Mathematicians

Statisticians

Biologists

Ecologists

Sociologists

Political Scientists

phase transitions, universality

data / algorithm oriented, predictions

dynamical systems, diff. eq.

inference, consistency, covariates

experiments, causality, molecules

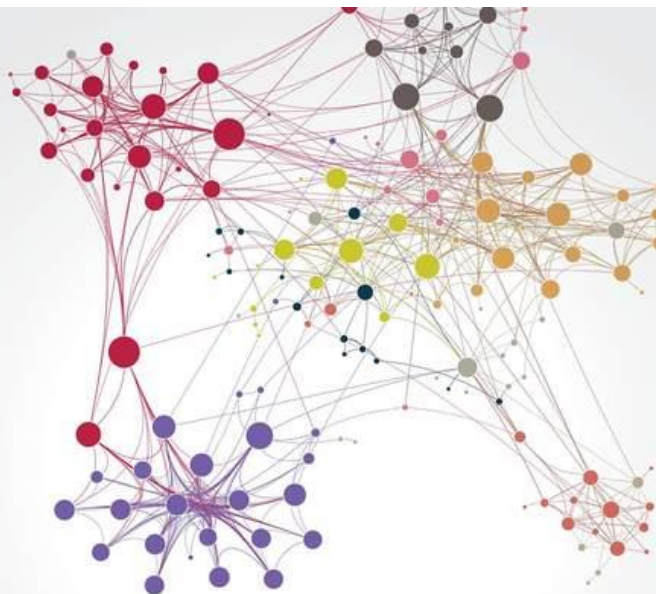
observation, experiments, species

individuals, differences, causality

rationality, influence, conflict

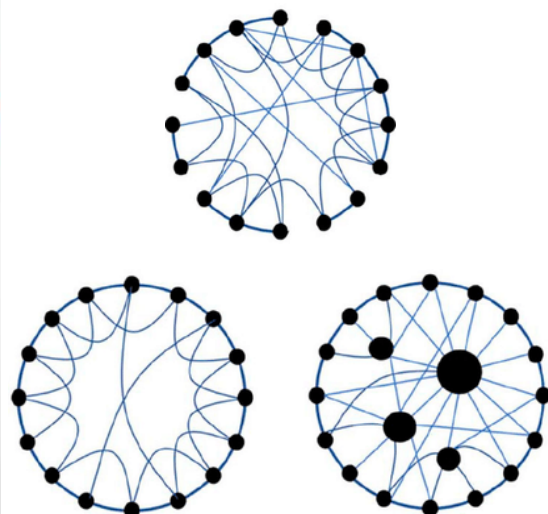
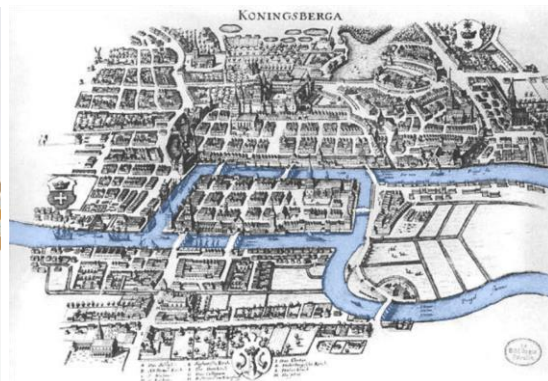
Aaron Clauset

Mi a hálózattudomány?



Albert-László Barabási

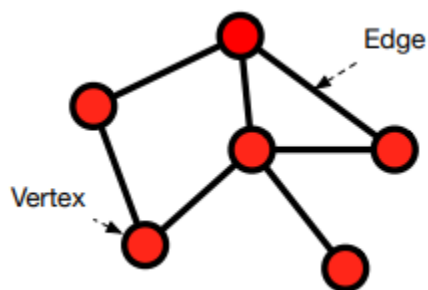
**NETWORK
SCIENCE**



- Königsbergi hidak problémája (Euler, 1736)
- Véletlen gráf (Erdős-Rényi, 1959)
- Kisvilág tulajdonság (Watts-Strogatz, 1998)
- Skálafüggetlen gráf (Barabási-Albert, 1999)

Gráfelmélet

- Súlyozott?
- Irányított?



$$G = (V, E)$$

$$A_{\text{simple}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- Fokszám eloszlás, átlagos fokszám

- Átmérő

- Modularitás $Q = \frac{1}{N\langle k \rangle} \sum_{ij} \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{N\langle k \rangle} \right) \delta(g_i, g_j)$

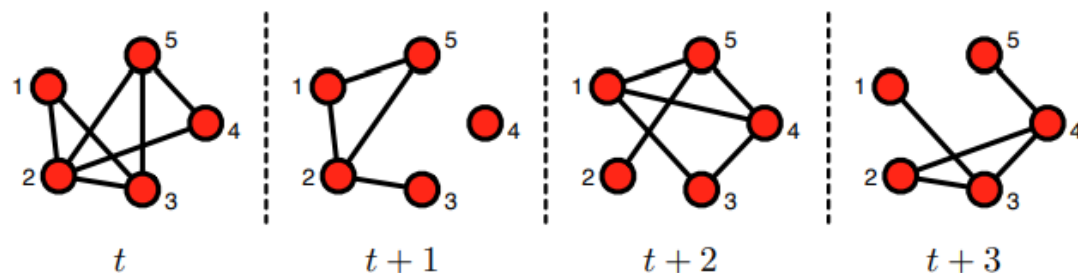
- Átlagos úthossz $L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j \neq i} d(i, j)$

- Klaszterezési együttható $C = \frac{1}{N} \sum_i \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)}$

- Kisvilág mutató $\sigma = \frac{C/C_r}{L/L_r}$

Fejlődő hálózatok

- Dinamikus hálózatok
- Statikus \rightarrow változó élsúlyú \rightarrow diszkrét \rightarrow folytonos



$$V = \{(v, t_s, t_e)\}$$

$$E = \{(u, v, t_s, t_e)\}$$

- Időállóak

- A hálózaton lejátszódó folyamatok dinamikája hasonló a hálózat fejlődésének dinamikájához
- A hálózaton lejátszódó folyamatok dinamikája lassabb a hálózat fejlődésének dinamikájánál



Energiatudományi Kutatóközpont


Villamosenergia-hálózatok mint komplex rendszerek



A kutatások háttere

- *'To test this idea, we have computed L and C for [...] the electrical power grid of the western United States'*

Collective dynamics of 'small-world' networks

[Duncan J. Watts](#)  & [Steven H. Strogatz](#)

[Nature](#) **393**, 440–442 (1998) | [Cite this article](#)

- *'Because of the relatively modest size of the network [power grid of the western United States],[...] the scaling region is less prominent but is nevertheless approximated by a power law'*

Emergence of Scaling in Random Networks

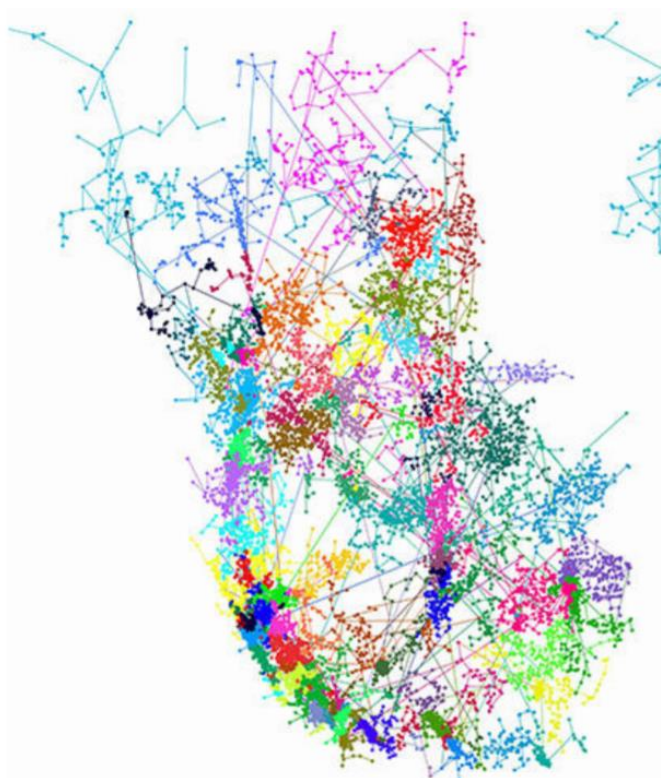
[ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI AND RÉKA ALBERT](#)

[SCIENCE](#) • 15 Oct 1999 • Vol 286, Issue 5439 • pp. 509-512 • [DOI: 10.1126/science.286.5439.509](#)

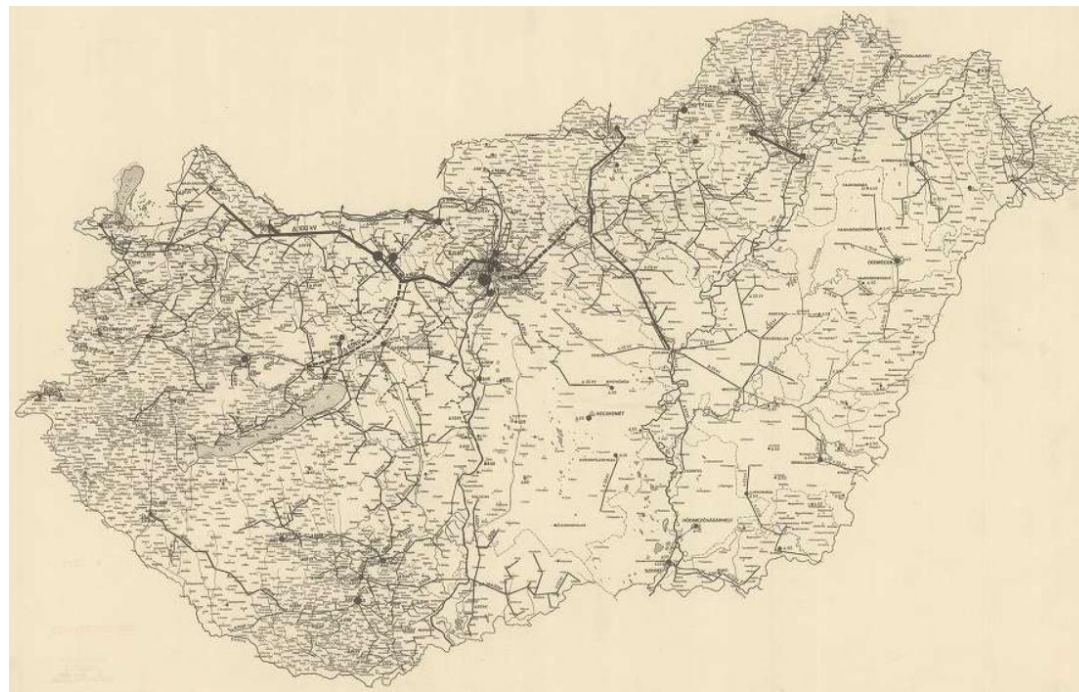
- *'Power grids show small-world and scale-free properties'*
 - NN, 2000 – napjainkig

A kutatások háttere

WECC, ~2000



Magyarország, 1947



Adatbázis összeállítás

1968. IV. 14. GYŐR

SZOLNOK

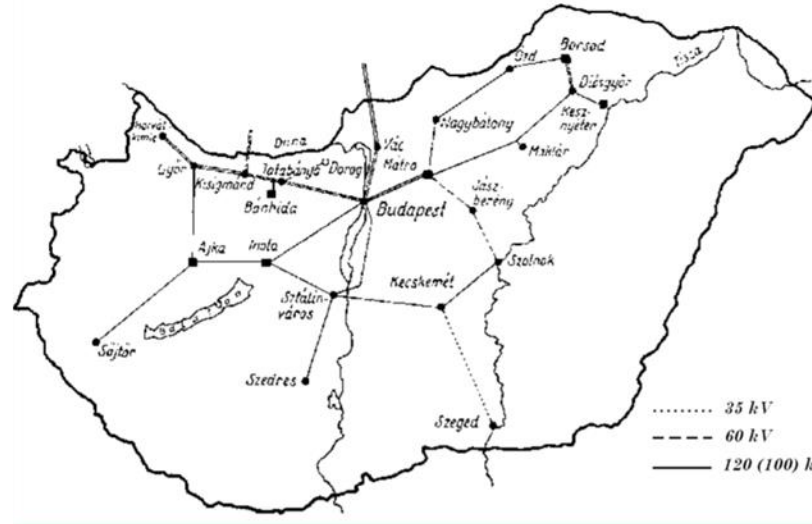
Sajószabod - Szolnok 22. 10. 11. ük.

Békéscsaba - Orosháza 11. 10. 11. ük.

BÁZA

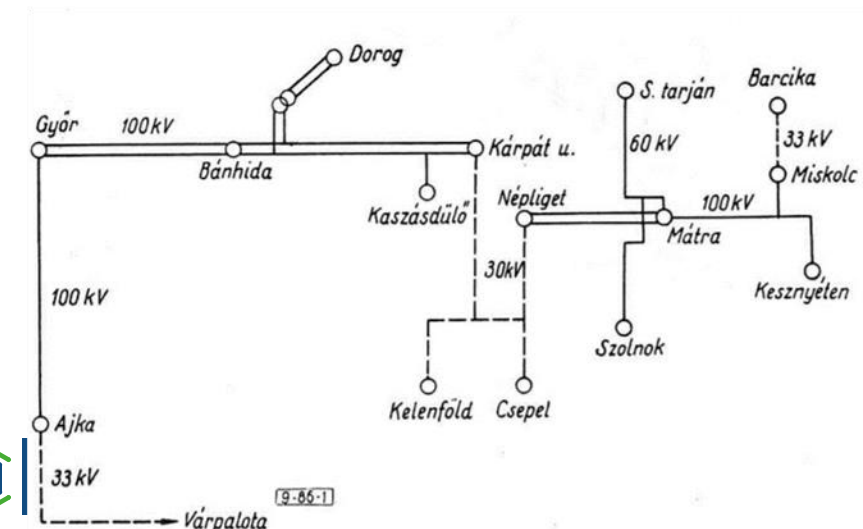
Mohács - Baja 11. 10. 11. ük.

Baja - Szeged 11. 10. 11. ük.



31 Nove-Székely
32 Vác
33 Bystřiceany
34 Kecskemét
35 Pécs
36 Békéscsaba
37 Kesznyéten
38 Debrecen
39 Jászberény (Állomás /1967 VI.11)
40 Szeged
41 Borsod
42 Borsodnádudvar
43 Hatvani MÁV
44 Tiszalök
45 Tatbánya XIV.akna
46 Albertfalva
47 Mezőtúr /1962.XI.11 felhas./
48 Karcag
49 Tiszapalkonya
50 Soroksár
51 Várasd
52 Kaposvár
53 Zugló
54 Pécs
55 Dorogi Alállomás (120 kV)
56 Ajka alállomás

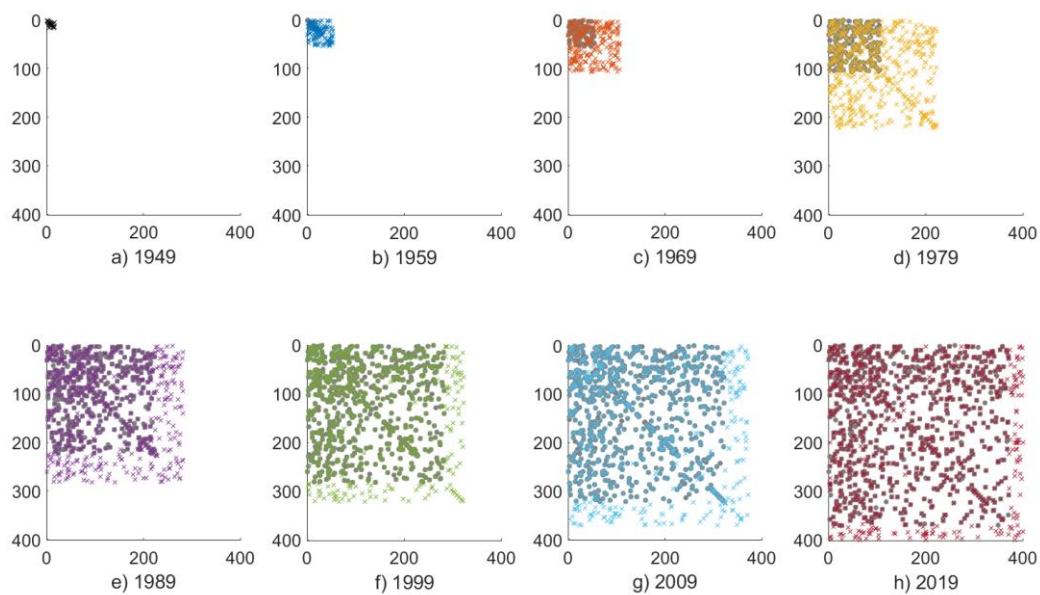
88 Siófok /1967.V.29/
89 Pécs /1967.VII.15./
90 Nyíregyháza MÁV/1967.
91 Székesfehérvár (120 kV)
92 Székesfehérvár (120 kV)
93 Ózdi Állomás 1962. II. 22.
94 Baja 1962. II. 6.
95 Békéscsaba 1962. V. 11.
96 Kaposvár 1962. V. 22.
97 BÉN 1962. VI. 26.
98 Kiszántó 1962. X. 1.
99 Miskolc 1962. X. 26. 1962. 1962.
100 Győr /1967. XI. 1967. XI.
101 Győr (120 kV) 1962. X. 10.
102 Győr (120 kV) 1962. X. 10.
103 Székesfehérvár 1962. XI. 13.
104 Pécs 1962. X. 12. (120 kV)
105 Székesfehérvár 1962. XI. 13.
106 Csepel 1962. XI. 13.
107 Alkalmazottak 1962. XI. 13.



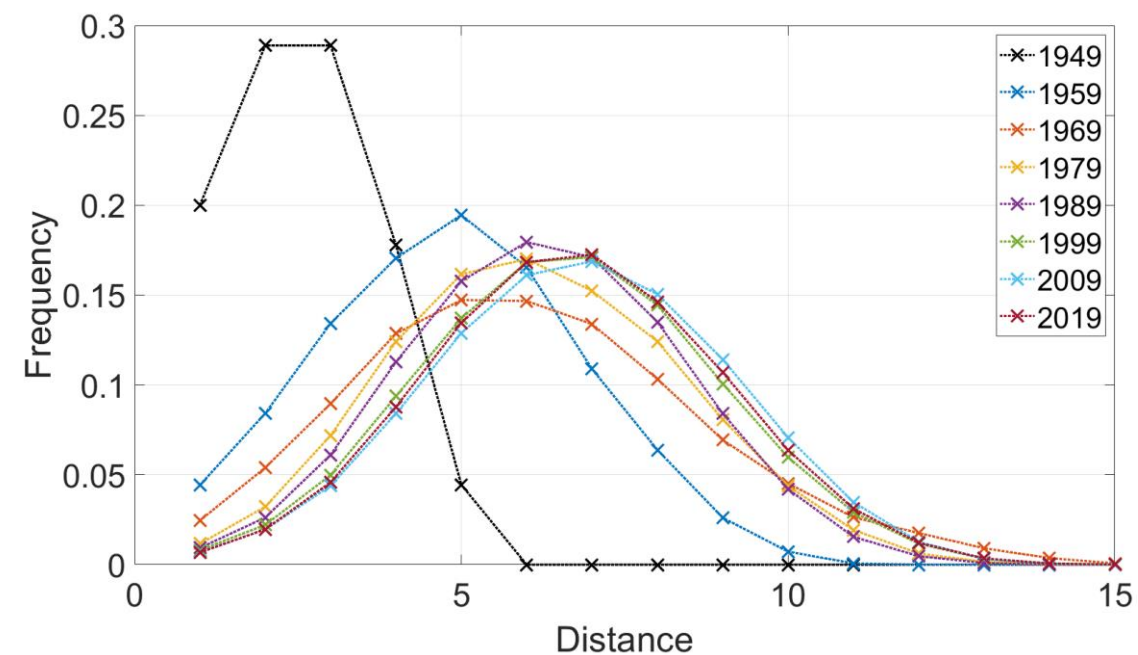
TARTALOM JEGYZÉK			
Dátum	Hely	Mű	Documentum
1992.07.23	TAMÁSI 120/20	II. SZ. 120/20 KV-OS TRF. ÜH.	ÜZEMBEHELYEZÉSI PROGRAM (Fax)
1992.07.23	TAMÁSI 120/20	II. SZ. 120/20 KV-OS TRF. ÜH.	ÜZEMBEHELYEZÉSI PROGRAM
1992.08.10-11	MÁTRA 120/20	II. SZ. TRF. ÜH.	ÜZEMBEHELYEZÉSI PROGRAM
1992.09.01	GYÖNGYÖS	120 KV-OS SINESÍTÉS I. ÜTEM	ÜZEMBEHELYEZÉSI PROGRAM
1992.09.01-04	ALBERTIRSA-ZAPAD TV.	RÖVIDZÁRLATI PRÓBA	LEÍRÁS
1992.09.07-11	GYŐR OVIT 400/220/120/20 KV	40 400 KV-OS MEZŐSELET ÉS BECS I. (4KV) VONALI KAPCS. BER.	ÜZEMBEHELYEZÉSI PROGRAM
1992.09.22	SIKLÓS	II. SZ. 120/20 KV-OS TRF. ÜH.	ÜZEMBEHELYEZÉSI PROGRAM
1992.09.29	SZÉKESFEHÉRVÁR ÉSZAK 120/10 KV	ALÁLLOMÁS ÉS TV. ÜH.	ÜZEMBEHELYEZÉSI PROGRAM
1992.09.29	SZÉKESFEHÉRVÁR ÉSZAK 120/10 KV	ALÁLLOMÁS ÉS TV. ÜH.	ÜZEMBEHELYEZÉSI PROGRAM (FAX)
1992.10.02	DEBRECEN 220/120/35/20/10	9 SZ. BALMAZUJVÁROS TV. MEZŐ ÜH.	ÜZEMBEHELYEZÉSI PROGRAM
1992.09.15	GYŐR-KISIGMÁND TV.	ERŐSÁRAMÚ BEFOLYÁSOLÁSI MÉRÉS	MÉRÉSI PROGRA
1992.09.04	SZÉKESFEHÉRVÁR ÉSZAK	ERŐSÁRAMÚ BEFOLYÁSOLÁSI ÉS POTENCIÁL MÉRÉS	MÉRÉSI PROGR
1992.10.21	GYŐR-KISIGMÁND TV.	400 KV TV. ÁLTAL BEFOLYÁSOLÁSI ÉS HÍRKÖZLŐ ÖSSZEKÖTTETÉSEK	MÉRÉSI PROGI

Eredmények – gráfjellelmezők

Szomszédsági mátrix

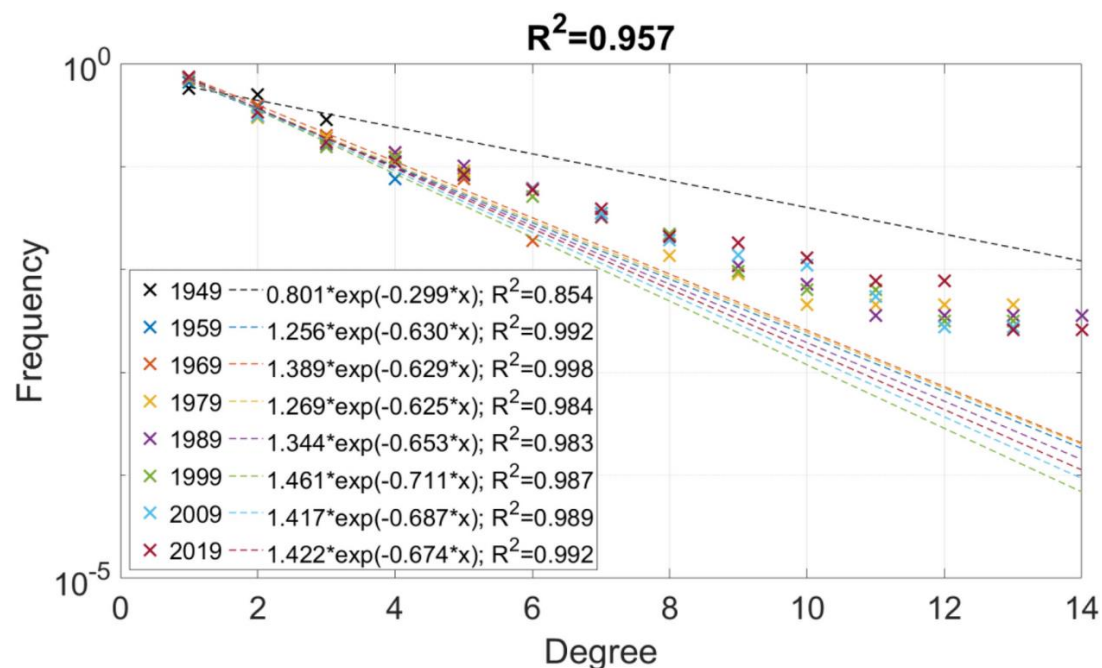


Átlagos úthossz

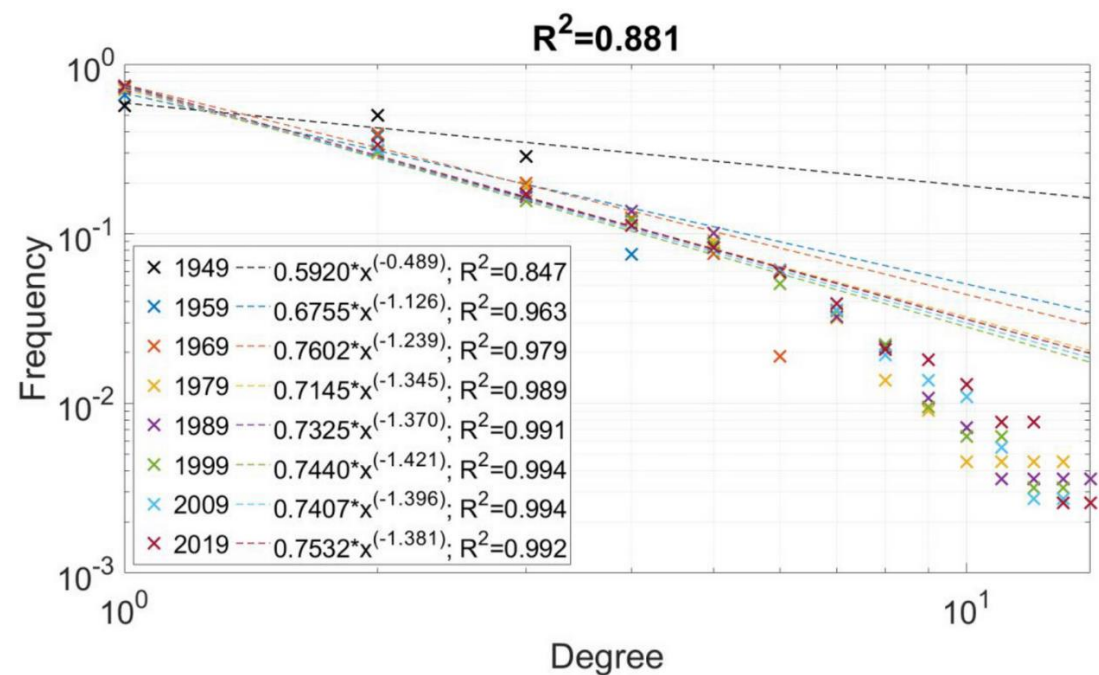


Eredmények – gráfjellemzők

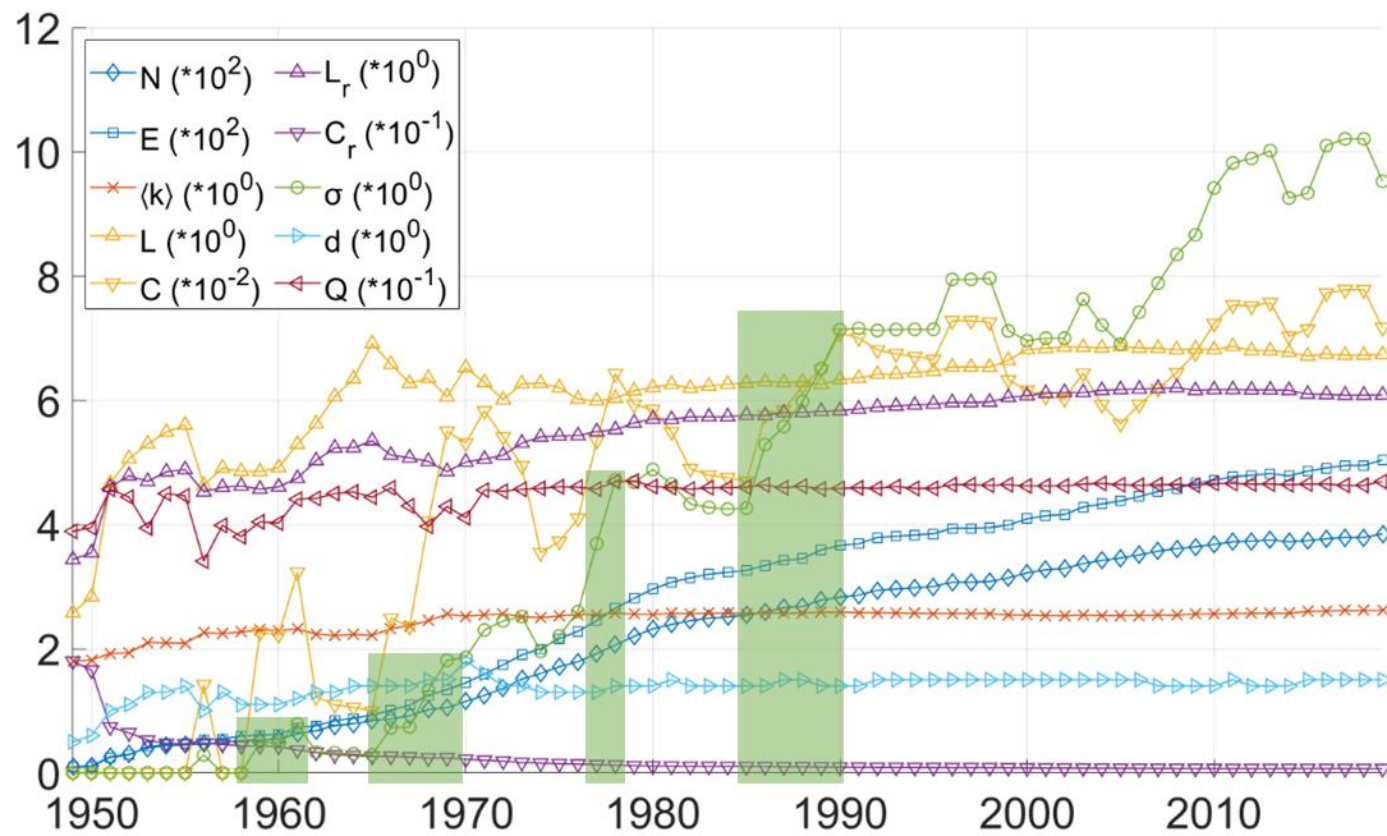
Exponenciális fokszámeloszlás



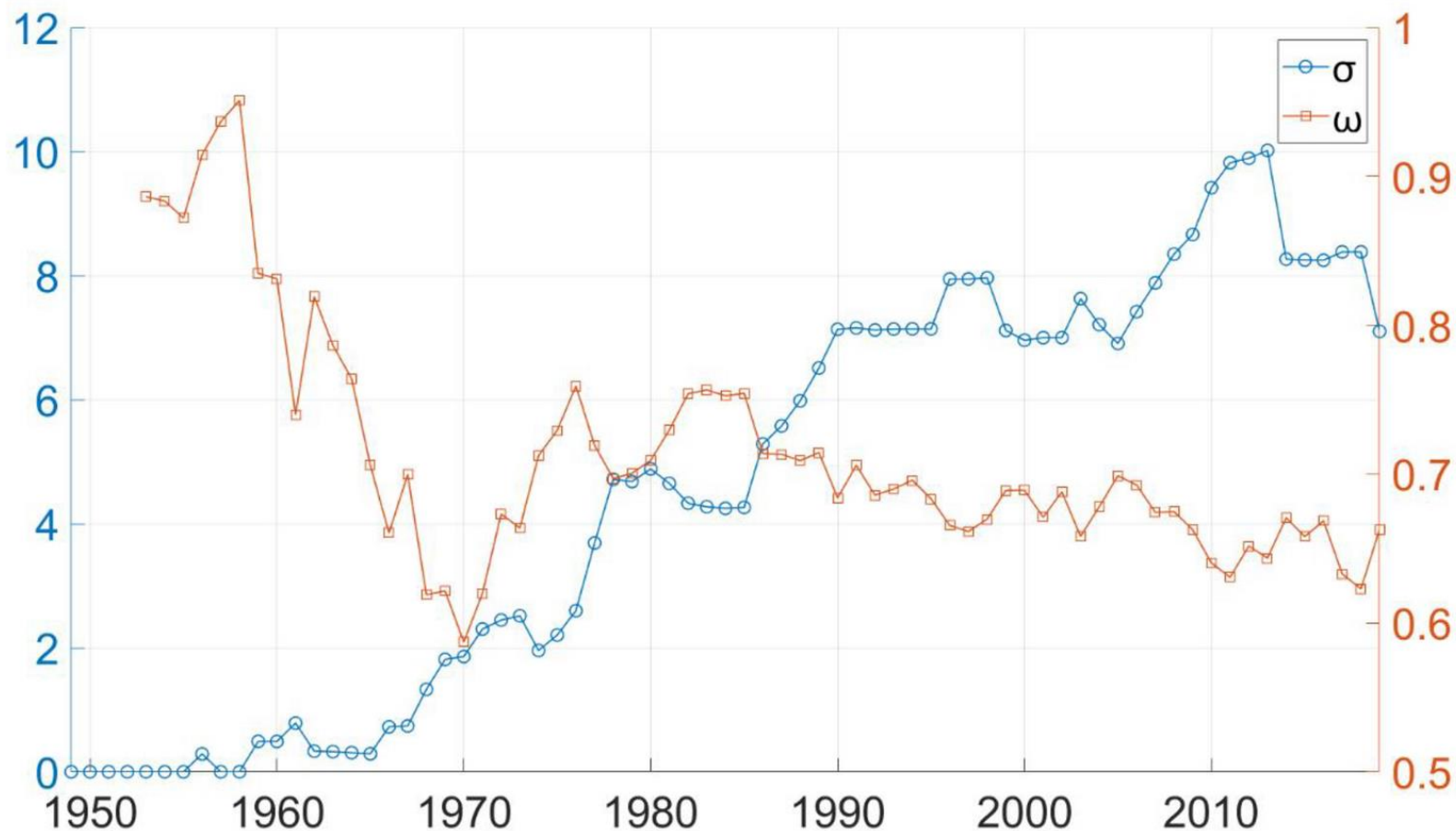
Hatványfüggvény fokszámeloszlás



Eredmények – mérőszámok

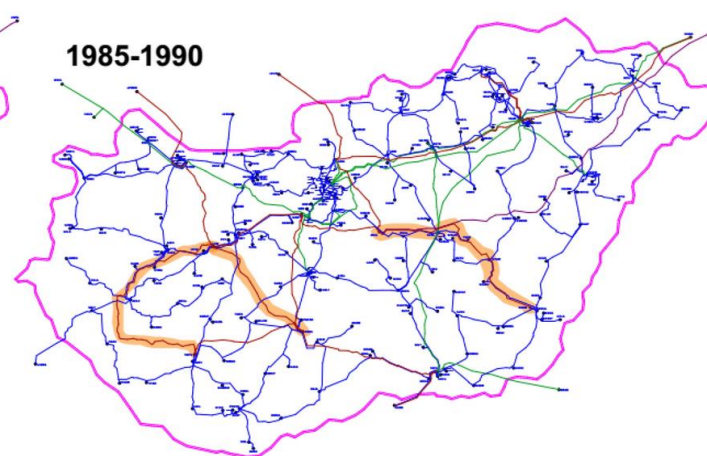
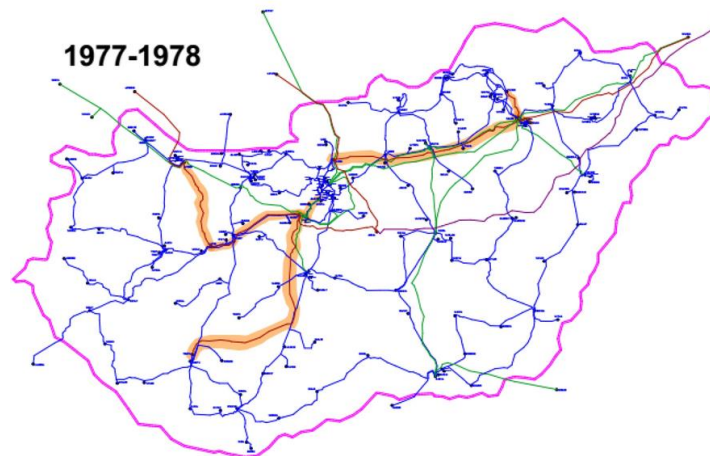
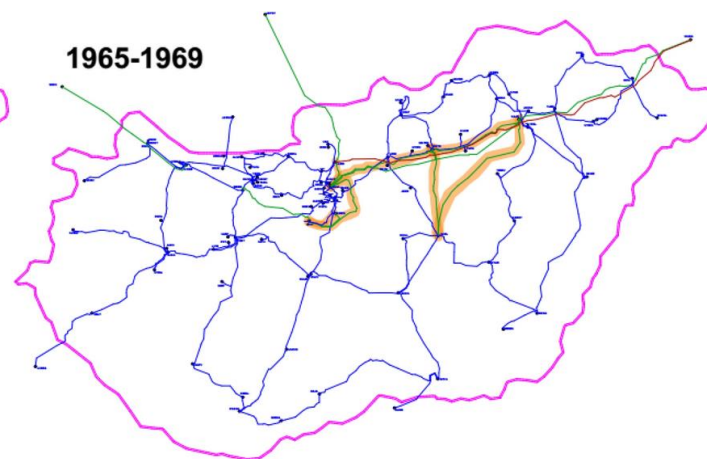
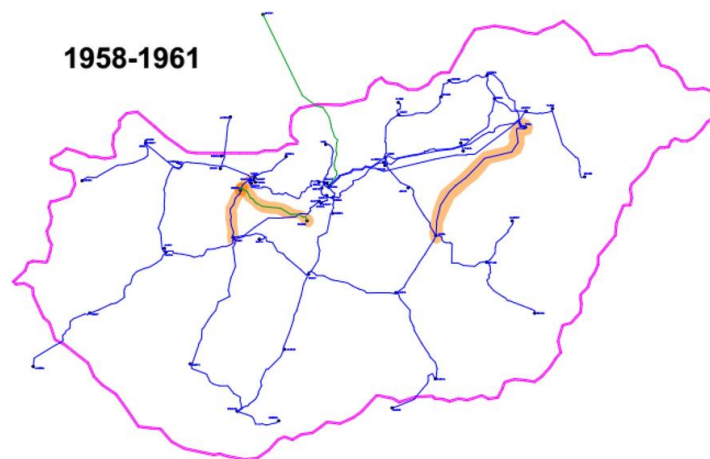


Eredmények – kisvilág mutató növekménye



Eredmények – kisvilág mutató növekménye

- 1958-1961
 - 1 x 220 kV
 - 3 x 120 kV
- 1965-1969
 - 7 x 220 kV
- 1977-1978
 - 9 x 400 kV
- 1985-1990
 - 3 x 400 kV



Eredmények

- A kisvilág-tulajdonságot leginkább befolyásoló klaszterezési együttható növekedése egyértelműen összeköthető olyan hálózatfejlesztési eseményekkel, melyek új feszültség szint bevezetésével hurkolt, hálós alakzatokat hoztak létre.
- A villamosenergia-rendszerek kisvilág-tulajdonságának kialakulásában a fő hajtóerőt nem a hálózat méretének a növekedése jelenti, hanem az eltérő technológiákkal kialakított rendszerek együttes vizsgálata.



Energiatudományi Kutatóközpont

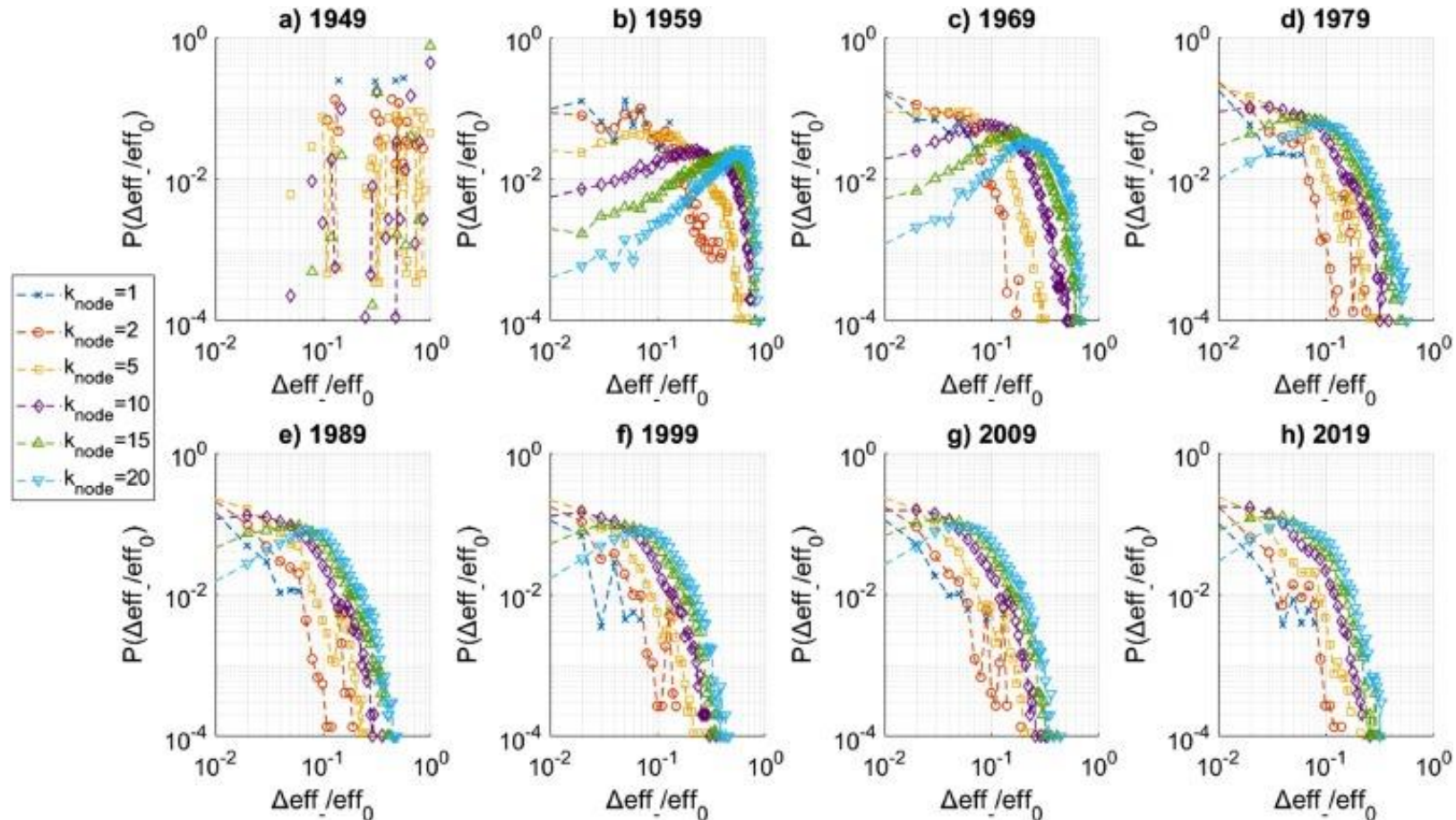
Villamosenergia-hálózatok sérülékenysége



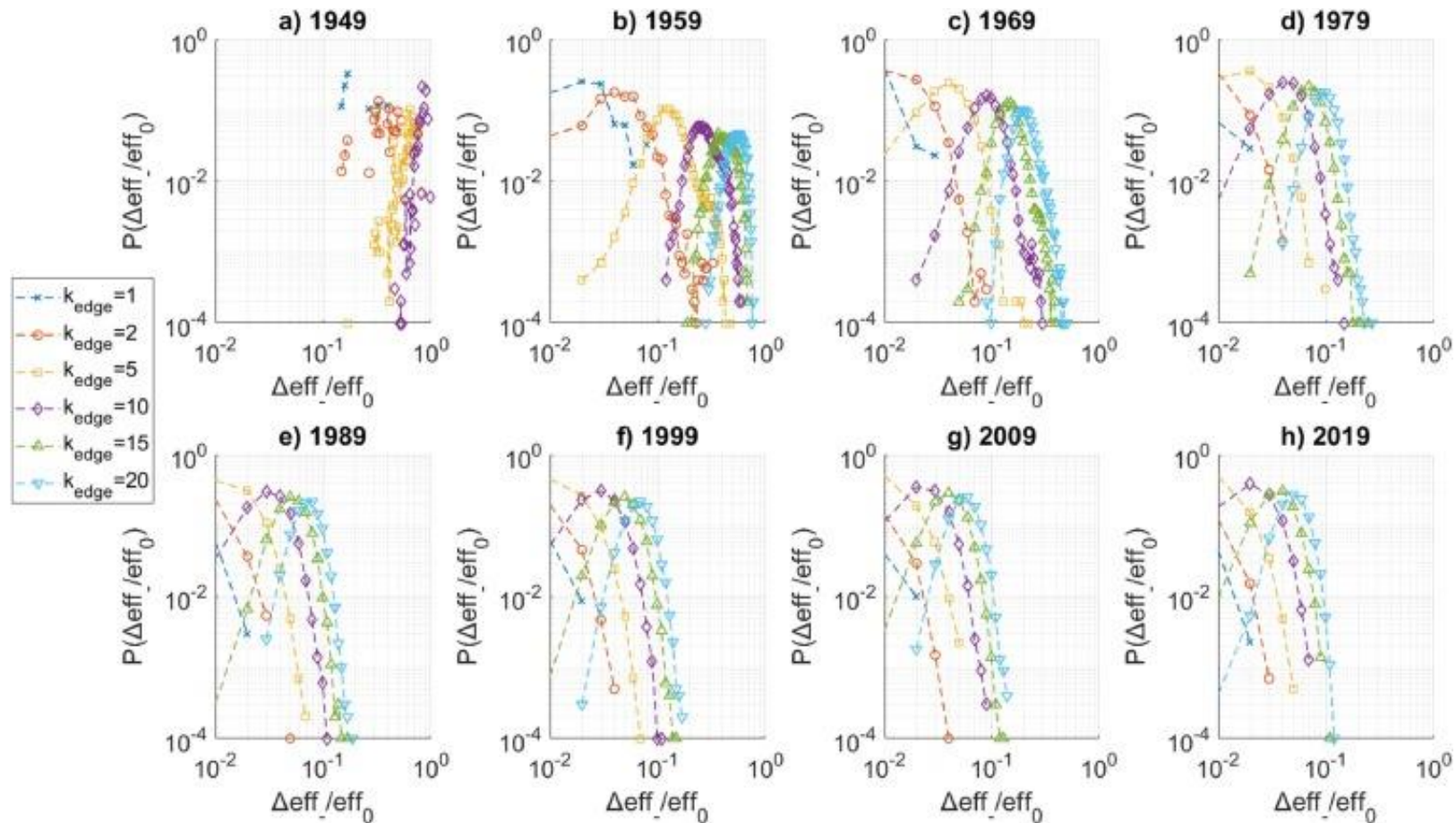
Villamosenergia-hálózatok sérülékenysége

- Sérülés
 - Csomópont eltávolítása
 - Él eltávolítása
 - Kombinált sérülések
- Skálafüggetlenség ellenőrzése
 - Ellenállóak véletlenszerűen kiválasztott csomópontok eltávolításával szemben
 - Sérülékenyebbek a célzott beavatkozások esetén
- Mérőszám
 - Topológiai hatékonyság (csökkenése) $eff = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j \neq i} \frac{1}{d(i,j)}$
 - Súlyozott gráfra kiterjesztve

Eredmények – k számú csomópont eltávolítására csökkenő hatékonyság

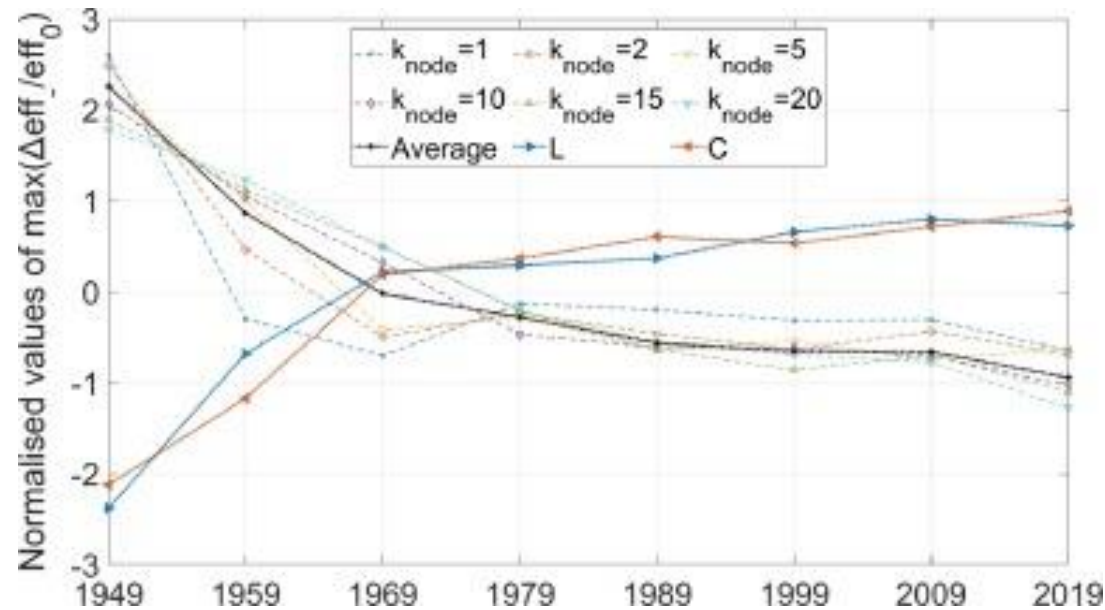


Eredmények – k számú él eltávolítására csökkenő hatékonyság

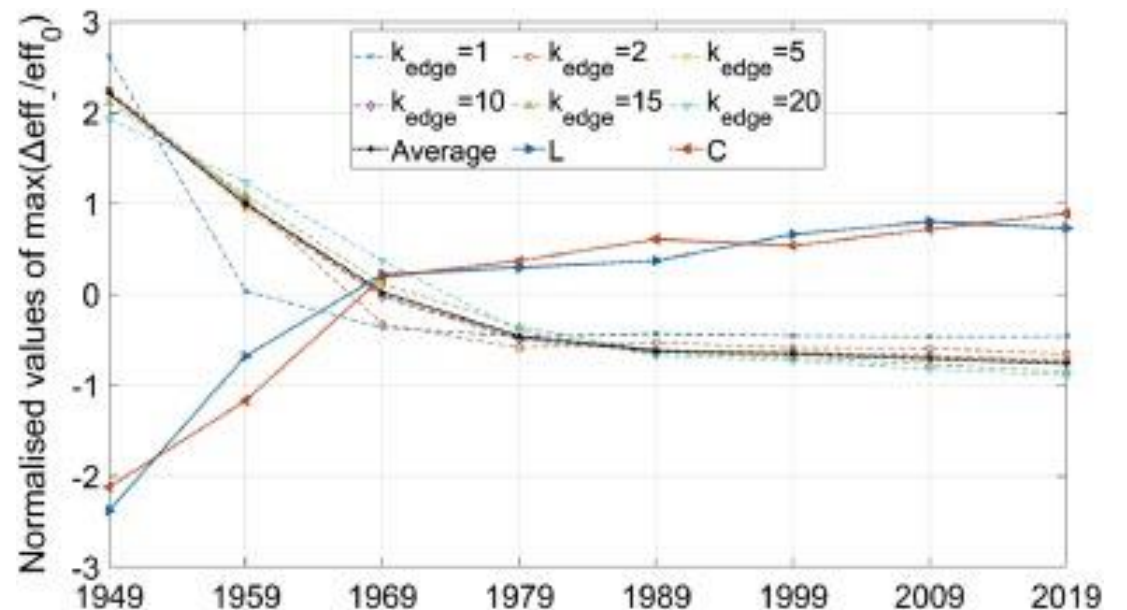


Eredmények – erős korreláció a komplex hálózati mérőszámokkal

Csomópont eltávolítás



Él eltávolítás

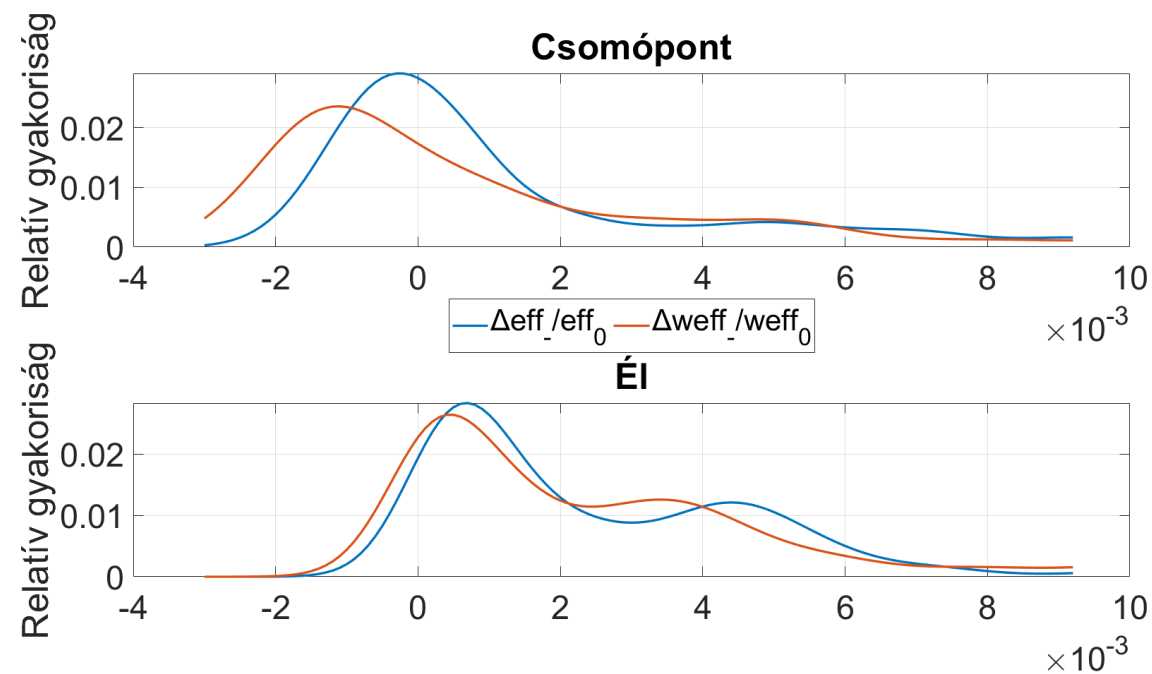
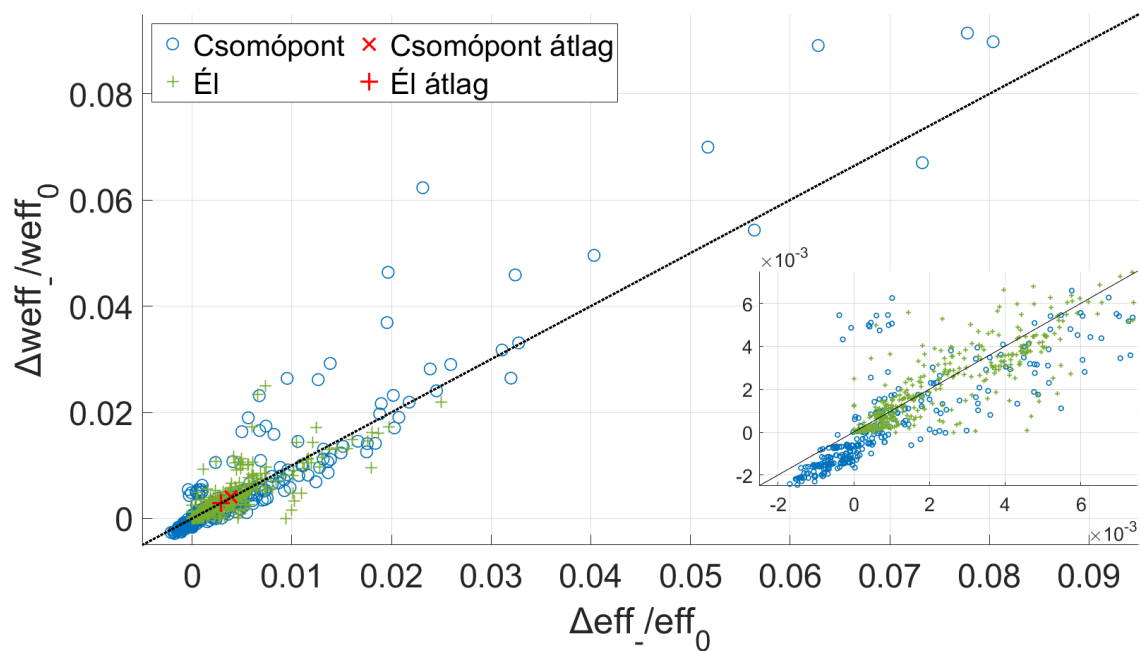


Eredmények – súlyozott gráf

$$eff = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j \neq i} \frac{1}{d(i,j)}$$



$$weff = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j \neq i} \frac{1}{wd(i,j)}$$



Eredmények

- A villamosenergia-ellátás szempontjából topológiailag hatékony kialakítás és a sérülésekkel szembeni tolerancia részben ellentmondó követelményeket támaszt
- A hálózatra számított átlagos úthossz és klaszterezési együttható a sérülések típusától és nagyságától függetlenül erős korrelációt mutat a hálózat által elszenvedhető legnagyobb sérülés nagyságával

Támadás típusa	Egyszeres csomópont		Egyszeres él	
	$\Delta\text{eff}_./\text{eff}_0$	$\Delta\text{weff}_./\text{eff}_0$	$\Delta\text{eff}_./\text{eff}_0$	$\Delta\text{weff}_./\text{eff}_0$
Kár				
Véletlen támadás	0,39%	0,41%	0,29%	0,28%
Célzott támadás	8,04%	8,98%	1,21%	1,44%
Maximális kár	8,04%	9,15%	2,50%	2,49%

Részletesen...

- **B. Hartmann, V. Sugár**, Searching for small-world and scale-free behaviour in long-term historical data of a real-world power grid, *Scientific Reports*, **11**, Paper: 6575 (2021)
- **B. Hartmann**, How does the vulnerability of an evolving power grid change?, *Electric Power Systems Research*, **200**, Paper: 107478 (2021)
- **Hartmann B.**, Hogyan befolyásolja a villamosenergia-hálózatról rendelkezésre álló információ a fizikai támadások által okozott sérülékenységről alkotott képet?: A hazai energiaszolgáltatás túlélőképessége, *Scientia et Securitas*, **2**, pp. 155-163 (2021)



Energiatudományi Kutatóközpont

Mire jó mindez?



Mire jó mindez?



- Tervek
 - 64 GW cross-border capacity increases needed by 2030
 - 164 transmission and storage projects assessed in TYNDP 2022
- Hasznok
 - 1.6 Million jobs could be ensured
 - close to 240,000 M€ could be mobilised in production
 - the European Union GDP could increase by close to 100,000 M€
 - public administration revenues through taxes collection could reach about 45,000 M€



Energiatudományi Kutatóközpont



hartmann.balint@ek-cer.hu

