

# Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés



**Big Data módszerek alkalmazása az áramszolgáltatásban**

Pálfi Judith

Témavezető:

Dr. Kádár Péter egyetemi docens, PhD

Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori Iskola

Budapest

2018

### **Szigorlati bizottság:**

Prof. Dr. Pokorádi László egyetemi tanár, PhD, Óbudai Egyetem

Dr. Krómer István, prof. emeritus, DSc, Óbudai Egyetem

dr. Avornicului Mihai, egyetemi adjunktus, PhD, Babes-Bolyai Egyetem

### **Nyilvános védés teljes bizottsága:**

#### **Opponensek:**

belső: Dr. Tóth Zoltán egyetemi docens, PhD, Óbudai Egyetem

külső: RN Dr. Gubó István, PhD, Selye János Egyetem

#### **Elnök:**

Dr. Krómer István, prof. emeritus, DSc, Óbudai Egyetem

#### **Tartalék elnök:**

Prof. Dr. Pokorádi László egyetemi tanár, PhD, Óbudai Egyetem

#### **Titkár:**

Dr. Lovassy Rita, egyetemi docens, PhD, igazgatóhelyettes

#### **Külső tagok:**

Kavasznicka Zoltán főiskolai docens, PhD, PTE

Kovács Ernő egyetemi docens, PhD, ME

Nyilvános védés időpontja

2018

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm az Óbudai Egyetem Villamosenergetikai Intézetének és az Alkalmazott Informatikai és Alkalmazott Matematikai Doktori Iskolának, hogy helyet adott a témámnak és támogatott a doktori munkámban.

Köszönetem fejezem ki Dr. Kádár Péter dékánnak és intézetigazgató úrnak, hogy elvállalta a témavezetésemet, támogatott a kutatásomban.

Köszönöm Dr. Morva Györgynek, hogy hitt bennem és mindvégig támogatott szakmailag és emberileg ezen a nem könnyű úton. Tisztelettel és hálával köszönöm Dr. Novothny Ferencnek a fantasztikus szakmai konzultációkat és a disszertáció szakmai lektorálását. Külön köszönöm kutatótársamnak Holcsik Péternek szakmai támogató együttműködését. Köszönöm Tompa Miklósnak és Soltész Péternek a közös munkát. Köszönöm Dr. Czöndör Katalinnak a disszertáció lektorálását. Köszönöm Dr. György Anna és Dr. Kárász Péternek, hogy segítettek és támogattak, amikor szükségem volt rá. Köszönöm Dr. Rácz Ervinnek a szakmai konzultációkat. Köszönöm Szén Istvánnak a bátorító támogatását. Köszönöm Dr. Kopják Józsefnek, hogy mindvégig lelkesített a munkámban. Köszönöm Benkő Kálmánnak a feledhetetlen találkozást és szakmai konzultációt. Szeretném ezúton is megköszönni Bögel Györgynek a Big Data anyagot, amelyet nagy élvezettel tanulmányoztam. Köszönöm Dr. Denis McNicholnak és Jenynek, hogy velem voltak ezen az úton, hittek bennem és bátorítottak. Köszönöm Bácskai Zsuzsának a rendkívüli segítőkészségét, mindig minden szükséges információt időben megadott. Köszönöm Mitrik Zsoltnak a támogatását. Köszönöm Balogh Viviennnek, Berki Zsuzsának és Laboda Timeának a segítségüket. Köszönetemet fejezem ki Haddad Richárdnak, Berke Lászlónak, Karacsi Márknak, Nagy Lászlónak. Köszönöm minden segítségét Varga Andreának. Köszönöm szüleimnek és testvéreimnek. Köszönöm támogatásukat: Anne Maria Popanak, Faragó Berec Gittának, Horváth Ágnesnek, Józsa Enikőnek, Márcz Andreának, Sala Rékának, Balajthy Boglárkának, Anja Maticnak, Sipos Anikónak, Martina Maticnak, Marijan Krajnovićnak. Köszönöm minden kollégámnak a támogató, jó szavaikat.

Köszönöm a szigorlati bizottsági tagoknak, az opponenseknek, az elnöknek, a tartalék elnöknek, a titkárnak és a külső tagoknak az áldozatkész közreműködésüket a fokozatszerzési eljárásban.

*Hálásan köszönöm megértő támogatását  
Dr. Köpecsiri Andrásnak és drága gyermekeinknek  
Annácskának és Andriskának...*

# TARTALOMJEGYZÉK

<b>KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS</b> .....	<b>3</b>
<b>1. BEVEZETÉS</b> .....	<b>7</b>
<b>2. HIBAKERESÉS A VILLAMOSENERGIA-HÁLÓZATON</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1. A MAGYARORSZÁGI VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ÁTTEKINTÉSE</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2. AZ ELMŰ-ÉMÁSZ ÁRAMSZOLGÁLTATÓ VÁLLALATA</b> .....	<b>15</b>
2.2.1. <i>EÉGIS: az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoport villamos hálózat-nyilvántartás eszköze</i> .....	<b>16</b>
2.2.2. <i>Mirtusz: az ELMŰ-ÉMÁSZ munkairányító rendszere</i> .....	<b>17</b>
2.2.3. <i>Az mWFM rendszer: a mobil munkairányítási rendszer</i> .....	<b>17</b>
<b>2.3. A KISFESZÜLTSGŰ ELOSZTÓHÁLÓZATON KELETKEZETT ÜZEMZAVAROK KEZELÉSÉNEK JELENLEGI FOLYAMATA ÉS FEJLESZTÉSÉNEK SZÜKSÉGSZERŰSÉGE</b> .....	<b>19</b>
<b>2.4. JELENLEGI KUTATÁSI IRÁNYOK A VILLAMOSENERGIA-RENDSZER MINŐSÉGÉNEK FEJLESZTÉSÉRE</b> .....	<b>21</b>
2.4.1. <i>Hibahely behatárolás a nagyfeszültségű és középfeszültségű villamos hálózaton</i> .....	<b>21</b>
2.4.2. <i>Hibahely behatárolás a kisméretű elosztóhálózaton</i> .....	<b>21</b>
2.4.3. <i>Az energetikai villamos hálózat fejlesztésére irányuló nemzetközi törekvések</i> .....	<b>22</b>
<b>3. HIPOTÉZISEK ÉS KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK</b> .....	<b>24</b>
<b>4. A KUTATÁSBAN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1. A DISSZERTÁCIÓBAN FELHASZNÁLT GRÁFELMÉLET IRODALOM FELDOLGOZÁSA</b> .....	<b>25</b>
4.1.1. <i>Gráf meghatározás</i> .....	<b>25</b>
4.1.2. <i>A gráf sajátértékei</i> .....	<b>28</b>
4.1.3. <i>A sajátértékek alaptulajdonságai</i> .....	<b>29</b>
4.1.4. <i>Műveletek gráfokon</i> .....	<b>34</b>
4.1.5. <i>Sajátértékek korlátai</i> .....	<b>37</b>
<b>4.2. BIG DATA A KIF ELOSZTÓHÁLÓZATI ÜZEMIRÁNYÍTÁSBAN</b> .....	<b>39</b>
<b>5. A HIBALOKALIZÁCIÓS ALGORITMUS KIFEJLESZTÉSE: FAULT LOCATION DETERMINATION ALGORITHM (FLDA)</b> .....	<b>41</b>
<b>5.1. A KIF ELOSZTÓHÁLÓZATI TOPOLOGIÁHOZ RENDELTE HIBAVÁLSZÍNŰSÉGI ADATTÁR LÉTREHOZÁSA</b> .....	<b>41</b>
5.1.1. <i>A hibaválszínűségi adattár validálása</i> .....	<b>46</b>
<b>5.2. A FAULT LOCATION DETERMINATION ALGORITHM: AZ FLDA</b> .....	<b>48</b>
5.2.1. <i>Hibahely lokalizáció kiértékelés hálózati hibahely asszociációs logikai szabálya</i> .....	<b>48</b>
5.2.2. <i>Az FLDA pszeudokód</i> .....	<b>49</b>
5.2.3. <i>Az FLDA pszeudokód folyamatábrája</i> .....	<b>51</b>
5.2.4. <i>Az FLDA eljárás folyamatábrája</i> .....	<b>54</b>
5.2.5. <i>Az FLDA eredménye: a hibahely attribútum tábla</i> .....	<b>55</b>
<b>5.3. A 1. TÉZIS ÉS A 2. TÉZIS</b> .....	<b>56</b>
5.3.1. <i>Az 1. Tézis: A kisméretű elosztóhálózati topológiához rendelt új adattár</i> .....	<b>56</b>
5.3.2. <i>Az 2. Tézis: az FLDA</i> .....	<b>57</b>

<b>6. AZ FLDA SZIMULÁCIÓJA .....</b>	<b>58</b>
<b>6.1. A HIBAZÓNA BEHATÁROLÁSA .....</b>	<b>60</b>
6.1.1. 1 Eljárás: a részgráf.....	60
6.1.2. A hibazóna Laplace spektruma .....	61
6.1.3. 2 Eljárás: a hibafa .....	62
<b>6.2. A HIBAHELY LOKALIZÁLÁSA .....</b>	<b>63</b>
6.2.1. Hibahely lokalizáció szimulálása .....	63
<b>7. ÚJ KIF DINAMIKUS HIBACÍM ÜTEMEZŐ RENDSZER MATEMATIKAI MODELLJÉNEK KIDOLGOZÁSA: LOW-VOLTAGE FAULT-SHEET SCHEDULING SYSTEM (LFS) .....</b>	<b>67</b>
<b>7.1. KIF ELOSZTÓHÁLÓZATI DINAMIKUS HIBACÍM ÜTEMEZŐ RENDSZER MATEMATIKAI MODELLJE AZ FLDA EREDMÉNYEKÉNT KAPOTT HIBAHELY ATTRIBÚTUM TÁBLA IMPLEMENTÁLÁSÁVAL .....</b>	<b>67</b>
7.1.1. A kisfeszültségű elosztóhálózati hibaelhárítás folyamata.....	68
7.1.2. Az LFS rendszerelméleti megközelítése.....	70
7.1.3. Az LFS hibacím ütemező rendszer tulajdonságai .....	71
<b>7.2. A <math>k</math> PARAMÉTER BEVEZETÉSE.....</b>	<b>72</b>
<b>7.3. A <math>\beta</math> RANGSOROLÁS SÚLYOZÁSI RENDSZER .....</b>	<b>73</b>
7.3.1. A hibacím rangsorolás jelenlegi szabályrendszere.....	73
7.3.2. A közepfeszültségű elosztóhálózati üzemzavarok priorizálása .....	74
7.3.3. A kisfeszültségű elosztóhálózati hibák által érintett fogyasztószám ignorálás hátrányai	77
7.3.4. A javasolt $\beta$ rangsorolás súlyozási rendszer .....	79
<b>7.4. ÚJ HIBACÍM ÜTEMEZŐ RENDSZER.....</b>	<b>79</b>
<b>7.5. A 3. TÉZIS ÉS A 4. TÉZIS .....</b>	<b>81</b>
7.5.1. A 3. TÉZIS: KISFESZÜLTÉGŰ HIBACÍM ÜTEMEZŐ RENDSZER EGYSZERŰSÍTETT MATEMATIKAI MODELLJE.....	81
7.5.2. A 4. TÉZIS: AZ LFS .....	82
<b>8. AZ LFS EGY SZIMULÁLT PÉLDÁN KERESZTÜL TÖRTÉNŐ BEMUTATÁSA.....</b>	<b>83</b>
<b>9. ÖSSZEGZÉS .....</b>	<b>88</b>
<b>10. TÉZISEK .....</b>	<b>89</b>
<b>11. JAVASLATOK A KUTATÁS FOLYTATÁSÁRA .....</b>	<b>90</b>
<b>IRODALOMJEGYZÉK.....</b>	<b>91</b>
<b>ÁBRAJEGYZÉK .....</b>	<b>104</b>
<b>TÁBLÁZATJEGYZÉK .....</b>	<b>106</b>
<b>PÁLFI JUDITH KÖZLEMÉNYEI .....</b>	<b>107</b>
<b>MELLÉKLETEK .....</b>	<b>110</b>
A DISSZERTÁCIÓ CMAP-JE.....	110
A DISSZERTÁCIÓBAN HASZNÁLT JELÖLÉSEK JEGYZÉKE.....	111

## 1. BEVEZETÉS

A folyamatos villamosenergia-ellátás ma már szinte mindenhol természetesnek számít. A mindennapjainkat behálózó informatikai, telekommunikációs eszközök, a digitalizált munkahelyek, sőt egy egyszerű bevásárlás vagy egy gépjármű tankolása manapság elképzelhetetlen villamos energia nélkül. A modern világban magától értetődő, hogy szinte bárhol, laikus szemmel nézve korlátlan mennyiségű tiszta energiához juthatunk. Csak akkor érzékeljük e rendszer sérülékenységét, és csak akkor gondolkodunk el rajta, hogy milyen hihetetlenül összetett rendszerek gondoskodnak a zavartalan energiafogyasztásunkról, amikor egy-egy nem tervezett áramszünetnek, üzemzavarnak leszünk az elszenvedői [1, 2].

Egy üzemzavar – az általános bosszúságon kívül – igen komoly károkat és vészhelyzeteket tud okozni. Áramszünet alatt nem működnek a forgalomirányító jelző lámpák, megszűnhetnek a banki szolgáltatások, lemerülhetnek a telekommunikációs eszközök és átjátszó állomások akkumulátorai és nem működnek a vízáttemelő szivattyúk sem. Éppen ezért a villamosenergia-szolgáltatás folyamatosságának biztosítása nem csak elvárás, hanem nagy felelősség a szolgáltatás üzemeltetésére engedélyt kapott vállalatok számára [3, 4, 5].

A villamosenergia-szolgáltatás két részre osztható: a villamos energia előállítására (a primer energia villamos energiává alakítása) és ennek a felhasználás helyére történő szállítására [6, 7, 8, 9]. Kutatómunkám ez utóbbi területre fókuszál.

A villamos energiát szállító rendszer pókhálóként szövi át Magyarországot. A rendszer az európai (úgynevezett ENTSO-E) rendszerhez kapcsolódik, az országok, megyék, városok között futó nagyfeszültségű elosztó hálózaton (NAF), vagy más néven átviteli hálózaton keresztül. A városokon belüli, a kisvárosokat és falvakat összekötő hálózat a közép-feszültségű elosztó hálózat (KÖF) [10]. Kutatómunkám során a „pókháló” legsűrűbben szőtt huzalozására fókuszáltam: a házak és épületek közötti kisfeszültségű elosztóhálózatra (KIF) [11]. Ennek az az oka, hogy – ahogy az a későbbiekben részletes bemutatásra kerül – e hálózat működtetése részben a legkevésbé a jelenkori technológiai vívmányok által biztosított előnyökből, miközben, ha nem tervezett áramszünet keletkezik, azért jó eséllyel e hálózat típus meghibásodása a felelős [12, 13, 14].

Értekezésemben bemutatásra kerül a magyarországi villamosenergia-rendszer, kiváltképp az ELMŰ-ÉMÁSZ áramszolgáltató vállalat elosztóhálózata. Kutatómunkám során lehetőséget kaptam az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoporttól arra, hogy adataikat kutatási célra felhasználjam. Ezen adatokból kiindulva tanulmányoztam a meghibásodott berendezések beazonosításának jelenleg alkalmazott folyamatait. A folyamatok leírása után új fejlesztési javaslatokat fogalmaztam meg.

Kutatásom során a KIF hálózaton található meghibásodott berendezések (más néven: hibahelyek) beazonosítási folyamatát vizsgáltam, és javaslatot tettem egy új hibahely beazonosítási eljárásra, mely az úgynevezett okos érzékelők (smart sensors) alkalmazására épül. Ezen okos érzékelők korszerű mérnöki-, matematikai-, informatikai-

és infokommunikációs technológiákon alapuló eszközök, melyek a fogyasztási helyeken érzékelik a feszültség eltűnését és arról on-line üzenetet továbbítanak az áramszolgáltatók irányító központjába [15, 16]. A szporadikusan elhelyezett okos érzékelők jeleire alapozva, az általam kifejlesztett eljárás alkalmazásával a hibahelyek gyors beazonosítása válik lehetségessé [17].

Az új eljáráshoz egy üzenet-feldolgozó algoritmus (FLDa) kifejlesztésére volt szükség, melynek segítségével a smart érzékelők adatait felhasználva hatékonyan megállapítható egy esetleges üzemzavar kiterjedtsége, és annak hálózaton belüli pozíciója [18, 19]. Az FLDa kidolgozásának első lépéseként, az ELMŰ-ÉMÁSZ KIF hálózati nyilvántartási rendszeréből származó adatokból kiindulva, BigData [20, 21, 22] elemzés alkalmazásával létrehoztam egy topológiához rendelt hibaválószerűségi adattárat. Az új adattár az elosztóhálózat azon elemeit tartalmazza, melyek esetlegesen meghibásodhatnak (transzformátorok, elosztószekrények, fogyasztók, kábelek). Ezen adattár a teljes ELMŰ-ÉMÁSZ KIF hálózatának validált mintája.

Az új hibalokalizációs eljárás kidolgozásához gráfelméleti módszerek alkalmazását választottam [23, 24, 25]. A módszer előnye, hogy a gráfelméleti megközelítés alkalmazásával a hálózat villamos paramétereit elhagyva, a hálózat fa struktúrájú gráfként matematikailag modellezhetővé válik. Ez azért kulcsfontosságú, mert a villamos paraméterek elhagyása lehetőséget teremt a kidolgozott eljárás más, nem villamos hálózatokon való alkalmazására [26].

A meghibásodásokat nem csak érzékelni, hanem javítani is szükséges. Ehhez megfelelő szakember, azaz szerelői állományra van szükség, akik számára a hibák (szakzsargonban: hibacímek) kioszthatóak. A hibacímek szerelőknak történő kiosztása egy olyan ütemezési feladat, melyet különböző feltételek teljesülésének vizsgálatával kell megvalósítani. Ilyen feltétel lehet adott szerelők hibajavításra való alkalmassága vagy a rendelkezésére álló eszközök, anyagok listája [27, 28]. Ezen kívül nem elhanyagolható, hogy az adott szerelő milyen fizikai, földrajzi távolságra van a hibahelytől. Mivel rendszerint egynél több szerelő rendelkezik azon képesítéssel, ami egy adott hiba elhárításához szükséges, ezért a hibacímek kiosztása egy új feltételrendszer menti, távolságra optimalizált ütemezési feladatként érdemes kezelni [29, 30].

A KIF hálózatot felügyelő diszpécsernek e feladatot jelenleg okos érzékelők nélkül végzik. Kutatásom során elemeztem, hogy az FLDa üzenetei hogyan integrálhatóak a jelenlegi ütemező rendszerbe és az milyen módon tud pozitív hatást gyakorolni az áramszünetek összegzett idejére, azaz azt csökkenteni.

Jelen disszertációban részletesen bemutatom az általam elvégzett kutatómunkát, melynek célja az áramszünetek hosszának csökkentése és ez által a villamosenergia-szolgáltatás minőségének javítása.



## 2. HIBAKERESÉS A VILLAMOSENERGIA-HÁLÓZATON

A villamos energia elosztó hálózati engedélyesek (áramszolgáltatók) alapvető törekvése, hogy a villamosenergia-szolgáltatás minőségét folyamatosan emeljék és így a fogyasztói elégedettséget növeljék [31, 32, 33].

„Az Országgyűlés a hatékonyan működő villamosenergia-versenypiac kialakítása, az energiahatékonyság, az energiatakarékosság elveinek a fenntartható fejlődés érdekében történő érvényesítése, a felhasználók biztonságos, zavartalan, megfelelő minőségű és átlátható költségszerkezetű villamosenergia-ellátása, a magyar villamosenergia-piacnak az Európai Közösség egységesülő villamos energia piacaiba történő integrációja, az Európai Közösségek jogszabályainak való megfelelés, és mindezek megvalósítását biztosító, az objektív, átlátható és az egyenlő bánásmód követelményének megfelelő szabályozás kialakítása érdekében” hozta létre a villamos energiáról szóló 2007. évi LXXXVI. törvényt (továbbiakban: VET) [34].

„A VET elsődleges feladatának – az önálló szabályozó szervként működő – Magyar Energetikai és Közműszabályozási Hivatal (MEKH) számára a villamosenergia-, a földgáz- a távhőellátás és a víziközmű-szolgáltatás felügyeletét szabta meg. A MEKH által 2003-ban kiadott villamosenergia-elosztói, illetve egyetemes szolgáltatói engedélyesek egyedi felhasználókat érintő minimális minőségi követelményeinek meghatározása tárgyú, ún. Garantált Szolgáltatások (GSZ) határozata tartalmazza.” [35]

„A VET alapján a MEKH számára lehetőség van határozatban megállapítani az engedélyesek tevékenységének minimális minőségi követelményeit és elvárt színvonalát, amelyek – a szélsőséges időjárás hatásának ellensúlyozása érdekében – hároméves átlagok alapján kerültek meghatározásra, lehetőséget hagyva az engedélyesek felelősségén kívül eső kivételek kezelésére. A Hivatal határozatában a villamosenergia-elosztói engedélyesek által nyújtandó szolgáltatási színvonal gazdasági ösztönzésének alapját képező nemzetközileg elfogadott mutatókra meghatározott minimális minőségi követelményekben évenkénti százalékos mértékben meghatározott javulást írt elő.” [35]

A meghatározott minőségi mutatók:

1. *MEH 1 mutató* (nemzetközi környezetben: System Average Interruption Frequency Index, SAIFI): egy fogyasztási helyre hány *darab* nem tervezett áramszünet jut átlagosan az adott időintervallumban (jellemzően adott évben) vagy másképpen „az ellátás nem tervezett megszakadásának gyakorisága egy fogyasztóra vetítve” [36]:

$$SAIFI = \frac{\sum_{x=1}^n N_i}{N_T} \quad (1)$$

ahol,  $N_i$  adott  $i$  üzemzavarban érintett fogyasztók száma és  $N_T$  a  $T$  ellátási területen a fogyasztók összesített darabszáma [37].

2. *MEH 2 mutató* (nemzetközi környezetben: System Average Interruption Duration Index, SAIDI): egy fogyasztóra hány *perc* üzemzavari kiesés jut átlagosan vagy másképpen „az ellátás nem tervezett megszakadásának átlagos időtartama” [36]:

$$\text{SAIDI} = \frac{\sum_{x=1}^n (U_i * N_i)}{N_T} [\text{perc}] \quad (2)$$

ahol,  $U_i$  adott  $i$  meghibásodás okozta szolgáltatás kimaradás összegzett ideje (perc),  $N_i$  az érintett fogyasztók száma és  $N_T$  a  $T$  ellátási területen a fogyasztók összesített darabszáma [37].

A SAIDI és SAIFI hálózatminőségi mutatók egyik befolyásoló tényezője az *i-edik* üzemzavarban érintett fogyasztók darabszáma ( $N_i$ ). Arról, hogy egy adott berendezés meghibásodása hány fogyasztót érint a villamos energia szolgáltató vállalatok nyilvántartást vezetnek. E nyilvántartásnak köszönhetően az áramszolgáltatók képesek – távjelzések és valamennyi érintett fogyasztó jelzése nélkül – pontos elszámolásokat készíteni arról, hogy egy adott hálózati elem meghibásodása esetén hány fogyasztó maradt szolgáltatás nélkül [38].

A minőségi mutatókat jellemzően az adott évre vetítve számítják, így a mutatók számításához használatos ügyfél szám ( $N_T$ ) az adott évre, egy adott áramszolgáltatóra az év elején meghatározott konstans érték (db). Ez a szokásjog elengedhetetlen az év közbeni folyamatos változások hatásának kiszűréséhez és az egységes, transzparens számítások elvégzéséhez [39].

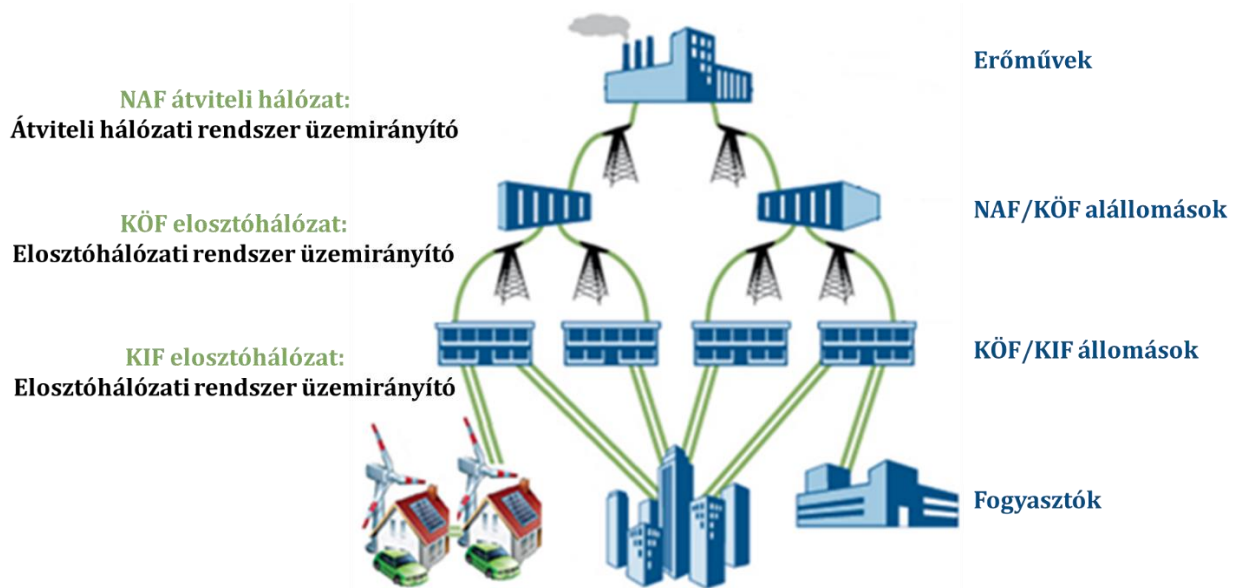
A SAIDI mutató számítási metódusából kiolvasható, hogy a hálózatminőségi mutató egyik fontos tényezője az *i-edik* üzemzavar időintervalluma. Adott *i-edik* üzemzavar időintervallumának kezdete a hiba érzékelésének időpontja az áramszolgáltatónál és a vége a fogyasztói ellátás visszaállításának időpontja. A hibaérzékelés távjelző berendezéseken keresztül valósul meg, melynek hiányában a fogyasztói bejelentések jelentik a szolgáltatás kiesésének kezdeti időpontját [40].

A villamosenergia-rendszer e minőségi mutatóit az egyes üzemirányítási szintek hálózatai eltérő módon befolyásolják [41].

## 2.1. A magyarországi villamosenergia-rendszer áttekintése

Magyarországon a villamosenergia-rendszer hierarchikus felépítésű és három jól körülhatárolt részre tagolható. A 750-, 400-, 220- és 120 kV-os nagyfeszültségű átviteli hálózat (NAF), ez alatt helyezkedik el a 35-, a 20-, és 11 kV-os közepfeszültségű elosztó hálózat (KÖF), majd a lakossági fogyasztókhoz becsatlakozó 0,4 kV-os kisfeszültségű elosztó hálózat (KIF) [42].

A villamosenergia-rendszer háromszintű hierarchikus felépítését az 1. ábra mutatja be.



**1. ábra:** Országos villamosenergia-rendszer felépítése

A villamosenergia-rendszer háromszintű felépítésének megfelelően az üzemirányítási rendszer struktúrája is hierarchikus (1. ábra) [43]. A rendszer csúcsán az országos átviteli hálózati rendszerirányító, a MAVIR áll (nemzetközi gyakorlatban: Transmission System Operator, TSO) [44], amely alatt az elosztóhálózati diszpécseri szolgálatok vannak (Körzeti Diszpécser Szolgálatok, KDSZ vagy Budapesti Villamos Teherelosztó Szolgálat, BVTSZ). A legelső szintet az Üzemirányítási Központ, ÜIK képviselik [45]. A regionális diszpécser szolgálatok a munkairányítási feladatok mellett a kifesztésű üzemirányítási feladatokat is ellátják [46].

Az üzemirányító központok kiemelt feladata annak a folyamatnak az irányítása, melynek célja, hogy a villamosenergia-ellátás előre nem tervezett szüneteltetése minél rövidebb legyen, azaz az áramszolgáltatás minél hamarabb helyreállításra kerüljön [47].

A hálózat hierarchikus felépítéséből adódik, hogy a nagyobb feszültség szinten keletkezett – és így magasabb üzemirányítási szinthez tartozó – fogyasztói kieséssel járó üzemzavar több fogyasztót érint. Éppen ezért a NAF hálózatok kialakítása eltér a KÖF hálózat felépítésétől, az ellátás biztonságosabbá tételének irányába. Ugyanez elmondható a KÖF hálózatok topológiájáról a KIF hálózatok felépítésével szemben [48].

A NAF hálózaton az  $n-1$  elv megvalósítható, mert a hálózati topológia hurkolt kialakítású [49]. Ez azt jelenti, hogy az  $n$  hálózati elem bármely hálózati elemét érintő egyszeres meghibásodás miatt még nem következhet be nem tervezett üzemszünet a fogyasztói szolgáltatásban, azaz az átvitelhez  $n-1$  elem elegendő.

A hurkolt hálózat definíció szerint: „olyan vezetérendszer, amelyben üzemszerűen több zárt kör van, a vezetékek a csomópontokban többszörösen kapcsolódnak egymással és így az áram az egyes csomópontoknál elhelyezett felhasználókhöz több oldalról különféle utakon juthat el. A hurkolt hálózatot egy vagy több táppontból lehet táplálni.” [50] E kiépített hurkolt topológiát jól szemlélteti Magyarország NAF átviteli térképe (lásd. 2 ábra).



2. ábra: Magyarország NAF villamos energia átviteli rendszere [51]

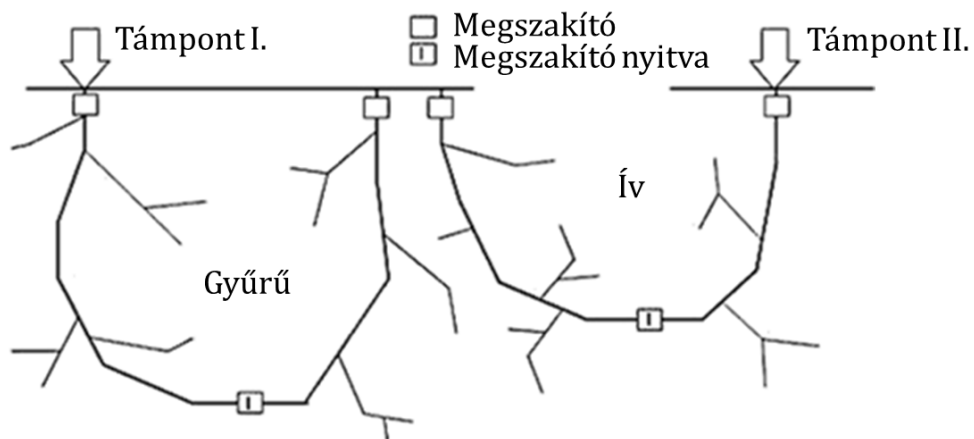
A KÖF hálózaton az üzemeltetés sugaras, ugyanakkor a hálózat felépítését tekinthetjük részben hurkolt kiépítésű topológiának is. Ennek köszönhetően – jellemzően a 10 kV-os városi kábelhálózaton és a 20-, illetve 35 kV-os szabadvezeték hálózat úgynevezett gerinc vezeték szakaszain – a fogyasztók villamosenergia-ellátása az egyszerű hiba kijavítása nélkül is biztosítható [52].

A „részben hurkolt kialakítást” a szakirodalom az adott kialakítástól függően íves vagy gyűrűs hálózatnak nevezi. Az íves hálózat „az a fővezetésekből és ezek szárnyvezetékeiből álló hálózat, melynek fő-vezetékei két különböző táppontba csatlakoznak, egy hosszanti üzemszerű bontási hellyel rendelkeznek, és sugarasan üzemelnek.” [50]

A gyűrűs hálózat „az a fővezetékekből és ezek szárnyvezetékeiből álló hálózat, melynek fővezetékei egy táppontból indulnak ki és ugyanoda futnak vissza. Egy hosszanti üzemszerű bontási helyet tartalmaznak, és sugarasan üzemelnek.” [50]

Szárnyvezetékeknek, vagy másneven leágazásnak nevezzük a „fővezeték az elosztóhálózat terhelését képező közép/kisfeszültségű transzformátor állomásokkal, illetve a közép-feszültségű felhasználókkal összekötő vezeték.” [50]

Az íves vagy gyűrűs hálózatok fővezetékén (3. ábra) egyszeres hiba esetében a fogyasztók csak addig tapasztalnak áramszünetet, amíg a hiba lokalizációja megtörténik. A hiba javítása azonban már a szolgáltatás biztosítása után kezdődik (pl. zárlatos kábel javítása, szabadvezetékre zuhant fa eltávolítása), azaz ezekben az esetekben a javítás ideje már nem számít bele az áramszolgáltatás kiesési idejébe [53].



**3. ábra:** Íves és gyűrűs hálózatok szemléltetése

A KÖF részben hurkolt topológiájával ellentétben a KIF hálózat sugaras vagy más néven fa topológiai tulajdonságai miatt ilyen fajta ideiglenes ellátási megoldásra nincs lehetőség. A sugaras hálózat definíció szerint ugyanis: „egy táppontból táplált fővezetésekből és ezek szárnyvezetékeiből álló olyan hálózat, melynek vezetékai sem egymással, sem más táppontokból ellátott vezetékekkel nincsenek kapcsolatban.” [50]

A KIF hálózaton az üzemzavar által érintett fogyasztók száma kisebb, azonban a meghibásodások gyakorisága nagyobb [38].

Ezt mutatják az 1. táblázatban közölt, az ELMŰ Hálózati Kft. Pesti Régióközpont 2015.01.01 és 2015.08.01. közötti időszakra számolt mutatók.

A 1. táblázat adataiból látható, hogy míg a SAIFI mutatókra lényegesen kisebb a KIF üzemzavarok befolyása (14,51%), addig a SAIDI mutatónak már majdnem a felét a KIF üzemzavarok adják (45,85%) [38].

	MEH1 (SAIFI)	MEH2 (SAIDI)
KIF	0,09	0,72
KÖF	0,53	0,85
KIF és KÖF összege	0,62	1,57
<b>KIF/KÖF arány</b>	<b>14,51% / 85,49%</b>	<b>45,85% / 54,15%</b>

**1. táblázat:** ELMŰ Hálózati Kft, Pesti Régió  
2015. 01. – 08. időtartamra vonatkozó SAIFI és SAIDI adatai

E mutatók javítása érdekében elengedhetetlen a kiefeszültségű elosztóhálózat üzemirányítási rendszerének folyamatos fejlesztése, a mindenkori piaci és technikai körülményeknek és új trendeknek megfelelően. Az üzemirányítás hatékony működése jelentősen befolyásolja a gyors és eredményes hibaelhárítást, és ezzel hozzájárul a minőségi mutatók javításához [54].

A villamos hálózat működésének javítására irányuló fejlesztéseknél ma már nélkülözhetetlen a korszerű mérnöki-, matematikai-, informatikai-, és infokommunikációs technológiákon alapuló eszközök alkalmazása [55]. Ilyen eszközök lehetnek például azok az intelligens eszközök, más néven smart érzékelők, melyek a fogyasztási helyeken érzékelik a betápláló feszültség eltűnését és arról on-line üzenetet továbbítanak a diszpécser központok felé [56]. Az ilyen típusú távjelzések alkalmazása új dimenziókat nyithat meg a KIF üzemirányításban. Ezen eszközök tesztelése, kiterjedt pilot projektek keretében több áramszolgáltatónál is folyamatban van [57, 58, 59]. A smart mérők – melyek smart érzékelővel vannak ellátva – szporadikus elhelyezése a közel jövőben tervezett KIF hálózati fejlesztések részét képezik [60, 61, 62, 63].

Az új eszközök bevezetése mellett fontos annak megvizsgálása is, hogy a jelenlegi kiefeszültségű elosztó hálózat üzemirányítási-üzemviteli rendszerének ma még manuális folyamatai [64, 65], hogyan fejleszthetőek a korszerű technológiák alkalmazásával.

A kiefeszültségű elosztóhálózati üzem azon területei, amelyek hatással vannak a MEKH mutatóira, és ezáltal a fogyasztói elégedettségre, határozzák meg azokat a potenciális pontokat, amelyek fejlesztése a kiefeszültségű elosztó hálózat üzemirányítási-üzemviteli rendszerének szignifikáns javulását eredményezheti [12].

## 2.2. Az ELMŰ-ÉMÁSZ áramszolgáltató vállalata

Magyarországon a MEKH hat hálózati elosztói engedélyt adott ki az alábbi gazdasági társaságok részére: az ELMŰ Hálózati Elosztó Kft., az ÉMÁSZ Hálózati Kft., a DÉMÁSZ Hálózati Elosztó Kft., az E.ON Tiszántúli Áramhálózati Zrt., az E.ON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt. és az E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt. [35].

Ezen vállalatok területi megoszlása a 4. ábrán látható.



**4. ábra:** Magyarországi elosztói engedélyesek részaránya az áramszolgáltatói piacon [35]

Az áramszolgáltatói területi felosztáshoz (4. ábra) tartozó fogyasztói számok, illetve a vállalati, versenypiaci szereplők vállalati felosztását a 2. táblázat foglalja össze.

Szolgáltató/felhasználók száma	Egyetemes Szolgáltatás	Versenypiaci	Összesen	Részesedés (összesen)
E.ON Energiaszolgáltató Kft. E.ON Energiakereskedelmi Kft.	2 374 491	28 528	2 403 018	43,24%
ELMŰ-ÉMÁSZ Energiaszolgáltató Zrt., ELMŰ Nyrt., ÉMÁSZ Nyrt., Magyar áramszolgáltató Kft.	2 094 897	106 161	2 201 058	39,60%
EDF DÉMÁSZ Zrt.	731 710	21 746	753 456	13,56%
Magyar Telekom Távközlési Nyrt.	0	106 564	106 564	1,92%
MVM Partner Energiakereskedelmi Zrt.	0	68 885	68 885	1,24%
Egyéb	0	24 611	24 611	0,44%
<b>Összesen:</b>	<b>5 201 098</b>	<b>356 494</b>	<b>5 557 592</b>	<b>100,00%</b>

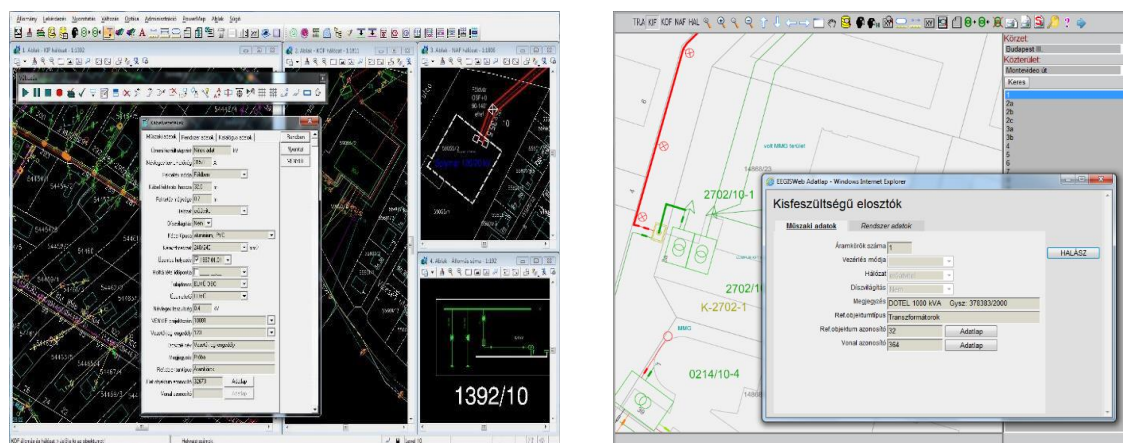
**2. táblázat:** Áramszolgáltatói piaci részesedések a felhasználói helyek száma alapján 2015. decemberében [35]

Jól látható (2. táblázat), hogy a több mint 120 éves történelmi múlttal rendelkező [66] ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoport Magyarország második legnagyobb villamos energia szolgáltatója. Területi lefedettsége Pest megye dél-nyugati részétől Északkelet-Magyarországon át az Ukrán határig terjed.

A több mint kétfélmillió csatlakozási pontot tartalmazó hálózat nyilvántartására az áramszolgáltató GIS (Geographic Information System) alapú térképet (EÉGIS: ELMŰ-ÉMÁSZ Geographic Information System) üzemeltet.

### 2.2.1. EÉGIS: az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoport villamos hálózat-nyilvántartás eszköze

Az áramszolgáltató vállalatok villamos hálózatainak, műszaki paramétereinek nyilvántartására GIS alapú hálózatnyilvántartó rendszert üzemeltetnek. Például az „az EÉGIS rendszer az ELMŰ és az ÉMÁSZ áramszolgáltató vállalatok villamos hálózatainak teljes műszaki hálózat-nyilvántartását valósítja meg. Az EÉGIS magában foglalja az ELMŰ és az ÉMÁSZ kezelésében lévő nagy-, közép- és kisméretű villamos hálózat nyilvántartását az áramszolgáltatók teljes szolgáltatási területén. Az EÉGIS rendszer Oracle 10/11g Spatial technológiára épülő hálózat-nyilvántartást megvalósító műszaki információs rendszer, amely együttműködik a vállalat további informatikai rendszereivel (SAP, munkairányítási, SCADA/DMS stb.)” [67]



a.

b.

5. ábra: EÉGIS rendszer hálózati megjelenítő oldala [67]

Az EÉGIS rendszer egy adott objektum (pl.: kisméretű elosztószekrény) tulajdonságainak, helyrajzi számának és koordinátáinak (5a. ábra), vagy ugyanazon objektum térképi megjelenítését (5b. ábra) teszi lehetővé.

A villamos hálózat üzemeltetését az üzemirányítói feladatkörrel megbízott szakemberek látják el. A hálózaton meghibásodott eszközök (transzformátorok, elosztószekrények, kötések, kábelek, vezetékek, stb.) azonosításához, műszaki paramétereinek naprakész nyomon követéséhez nagymértékű segítséget nyújt az EÉGIS rendszer.



### 2.2.2. Mirtusz: az ELMŰ-ÉMÁSZ munkairányító rendszere

A MIRTUSZ Munkairányító Rendszer a diszpécserek munkáját segíti a kis- és középfeszültségű hálózatokon a tervezet és nem tervezett hibák és üzemzavarok elhárításban.

A munkairányítási rendszerben egyedi azonosító számmal nyilvántartásba kerülnek a KIF és KÖF elosztó hálózatokon felmerülő hibák elhárítási folyamatának minden egyes lépései, a hibák keletkezésétől azok lezárásáig. A munkairányítási rendszer funkciói 9 csoportban [67] határozzák meg a rendszer használatának módját. Ezek a funkció csoportok a következők:

1. „Automatikus (rendszer által indított és időzített) funkciók,
2. Adminisztrációs funkciók,
3. Törzsadatok kezelése,
4. Diszpécseri térkép megjelenítése és kezelése,
5. Hibabejelentés lista megjelenítése és kezelése,
6. Hiba, üzemzavar lista megjelenítése és kezelése,
7. Szerelőcsapat lista megjelenítése és kezelése,
8. Igénybejelentés lista megjelenítése és kezelése,
9. Tervezett munka lista megjelenítése és kezelése” [67].

A Mirtusz rendszer 2012-ben egy mobil munkairányítási rendszerrel (Mobile Work Force Management – mWFM) egészült ki [68].

### 2.2.3. Az mWFM rendszer: a mobil munkairányítási rendszer

A MIRTUSZ rendszer távolból történő eléréséhez a külső helyszínen dolgozó szerelők mobil eszközzel (6. ábra) rendelkeznek.



**6. ábra:** Az mWFM rendszer terepi alkalmazásának felülete [67]

Ezen eszközök GPRS/3G kapcsolaton keresztül kommunikálnak a központi MIRTUSZ rendszerrel.

A szerelők ezen a felületen megkapják az elvégzendő feladatot és rögzítik a munka lezárását. A munka lezárása az ehhez kapcsolódó adatok és információk bevitelével történik (7. ábra). [69]



**7. ábra:** Az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoport által használt ALGIZ típusú terepi eszközök használat közben

A munka feladatok kiosztása az áramszolgáltató hibaelhárítási stratégiájának megfelelően optimalizálva van [70] azok esedékességének, fontosságának, időigényének, földrajzi helyzetének, valamint az elvégzésükhöz szükséges szaktudásnak a figyelembevételével. Az optimalizáció segítségével [71] a feladatok folyamatosan újraütemezésre kerülnek, így azok esetleges elhúzódása, illetve az időközben bekövetkezett, váratlan események, gyors üzemzavar-elhárítások is kezelhetővé válnak.

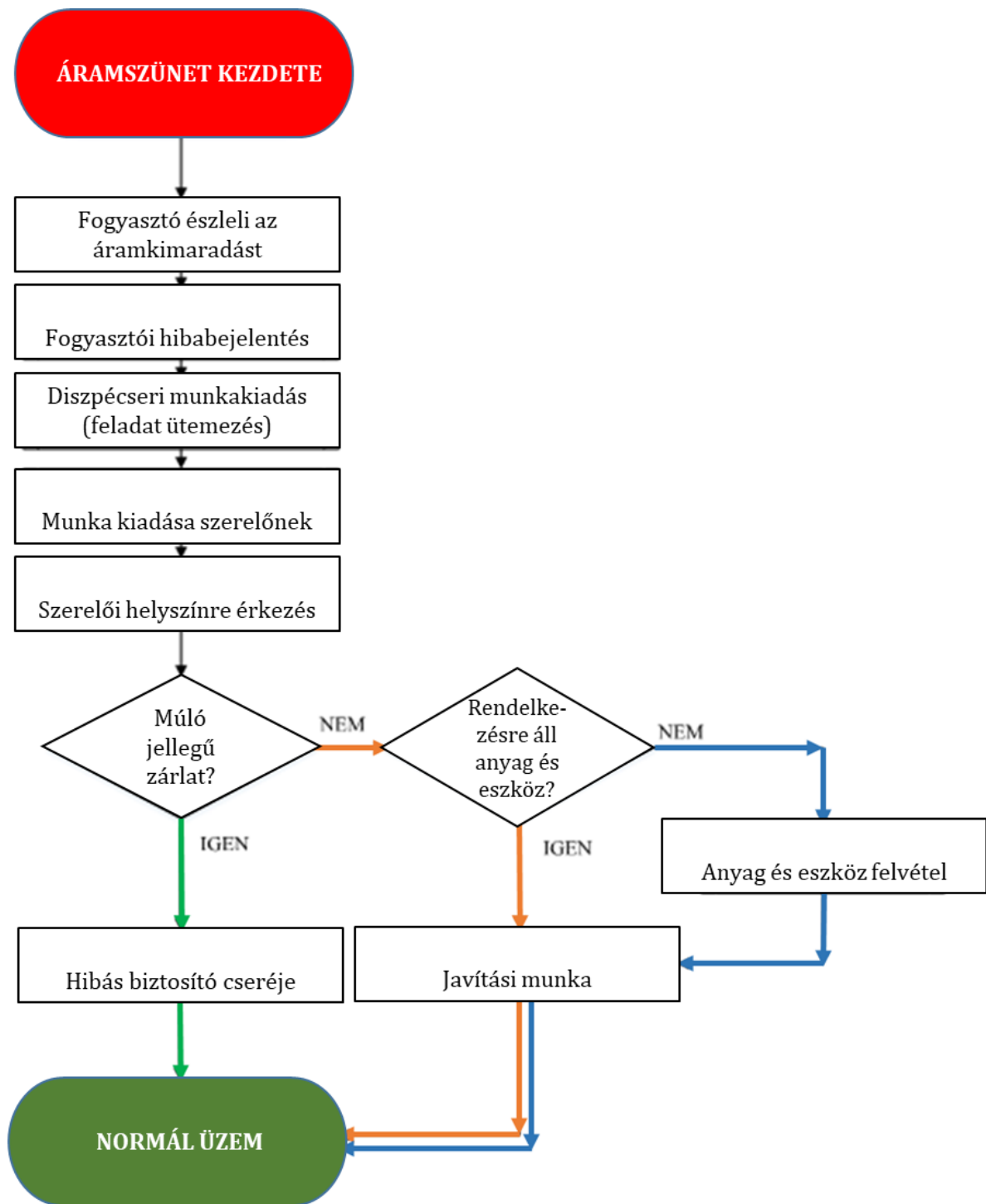
### 2.3. A kiefeszültségű elosztóhálózaton keletkezett üzernzavarok kezelésének jelenlegi folyamata és fejlesztésének szükségességé

A kiefeszültségű elosztóhálózaton keletkezett üzernzavar jelentős veszteségeket okoz az áramszolgáltatónak. A veszteségeket generáló forráspontokat lokalizálni szükséges. A hibalokalizáció után lehet hozzárendelni az adott típusú hibához a legmegfelelőbb eszközt, szakembert a kívánt eredmény elérése érdekében. Az áramszünetekből keletkezett veszteségek minimalizálásának egyik lehetséges módja a munkairányítási folyamat és rendszer továbbfejlesztése. A rendszer magába foglalja a központi telefonos ügyfélszolgálatot és a munkairányító részleget. A központi telefonos ügyfélszolgálatba futnak be az áramszolgáltatással kapcsolatos hibajelzések. A központi munkairányító szolgálatokban rendelik a megfelelő szakembert és eszközt a hibák kijavításához, ellenőrzik a megoldási folyamatot és itt kerülnek elszámolásra a javítással kapcsolatos költségek.

A KIF elosztóhálózaton keletkezett meghibásodott berendezés beazonosítása jelenleg manuális módon történik [59]. Ennek oka, hogy a KIF hálózaton ma még nincsenek erre alkalmas távjelző berendezések és az áramszolgáltatók a hibáról is csak az ügyfelek bejelentésein keresztül értesülnek.

A hiba kezelésétől a normál üzernállapotig tartó folyamat lépéseit a 8. ábra szemlélteti.

A hibával kapcsolatos bejelentéseket a TeleCentrumban (továbbiakban: TC) dolgozó munkatársak a MIRTUSZ [64] adatbázisában rögzítik. A diszpécser a MIRTUSZ rendszerben manuálisan (vagy az automatikus erőforrás allokáló rendszer segítségével) kiütemezi a feladatot a hibahelyhez legoptimálisabb földrajzi helyen lévő, megszakítható tervezett munkát (pl. alacsony prioritású hálózatbejárást) végző szerelő csapatnak. A helyszínre érkező szerelő csapat először behatárolja a hibahelyet, megállapítja a berendezés meghibásodásának okát és felméri, hogy rendelkezésére áll-e minden eszköz a hiba elhárításához. Ha igen, akkor megkezd a hiba elhárítását. Ha nem, akkor (diszpécseri döntés alapján) telephelyre megy a szükséges eszköz(ök)ért és csak a helyszínre való visszatérése után kezdi el a hiba megszüntetését. A szerelő elhárítja a problémát és végül helyreállítja a normál üzernállapotot.



**8. ábra:** Hibaelhárítás lépéseinek folyamatábrája

A jelenleg működő hibaelhárítási gyakorlat számos olyan kevésbé hatékony lépést tartalmaz, amely fejlesztésével a hibaelhárítási idő csökkenthető. Ilyen például a hibabehatárolás, azaz az áramszünet kezdetétől a hibahely behatárolásáig eltelt időintervallum csökkentése, vagy a hibacím ütemezésének optimalizálása.

Annak érdekében, hogy a kiefeszültségű elosztóhálózat hibaelhárítás ideje csökkenthető legyen, új tudományos módszerek és korszerű technológiák kifejlesztésére és alkalmazására van szükség.

Jelen disszertáció célja annak a kutatómunkának a bemutatása, amely a KIF üzemiirányítási rendszer fejlesztésére, a hálózat minőségi mutatóban mérhető (SAIDI) villamosenergia-szolgáltatás minőségjavulására, azaz az áramszünetek időtartamának csökkentésére irányul.

## **2.4. Jelenlegi kutatási irányok a villamosenergia-rendszer minőségének fejlesztésére**

Magyarországon, és nemzetközi szinten egyaránt léteznek a villamosenergia-szolgáltatás minőségének javításáért folytatott kutatások és fejlesztések a különböző feszültség szinteken.

### *2.4.1. Hibahely behatárolás a nagyfeszültségű és közepfeszültségű villamos hálózaton*

Értekezésem szempontjából az optimális hibahely keresési eljárás kifejlesztése a NAF hálózatra vonatkoztatva nem releváns törekvés. Ennek oka a NAF hálózat kiépítésénél figyelembe vett  $n-1$  (vagy akár  $n-2$ ) elv, melynek köszönhetően a hibahely beazonosításának időkénszere megszűnik. Faludi-Szabó megfogalmazásában: „A biztonságos üzem feltétele, hogy teljesüljön az ún.  $(n-1)$  kritérium, azaz a rendszer valamely elemének meghibásodása, kiesése ne okozzon fogyasztói kiesést, nem kiszabályozható áram vagy feszültség határérték túllépést, illetve ne veszélyeztesse a többi berendezés biztonságos üzemét. Léteznek körzetek, ahol fokozott biztonságot követelnek meg az  $(n-2)$  kritérium teljesülésének előírásával. Az  $n$  a mindenkori tervezett és a követelményeket kielégítő rendszer elemszámát jelenti.” [47]

Dán-Hartmann-Kis „Hálózati áramellátás és feszültségminőség” c. tudományos munkájukban bemutatják a közepfeszültségű elosztóhálózaton alkalmazott hibahely behatárolás klasszikus módszereit. Ezen módszerek azonban olyan villamos paraméterek mérésén és elemzésén alapulnak, amelyek a KÖF hálózatba beépített egyéb eszközök alkalmazásával működnek, de ezek a KIF hálózaton nincsenek, nem alkalmazhatók (pl. Petersen tekerics) [72, 52].

### *2.4.2. Hibahely behatárolás a kiefeszültségű elosztóhálózaton*

A kiefeszültségű elosztóhálózat szolgáltatási minőségének növelésére az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaság csoport is tett lépéseket. A Geometria Kft.-vel együttműködve kidolgozták a kiefeszültségű kábelhálózatok kockázatalapú fenntartás-tervet [55].

Ez a rendszerterv nyújt alapot a kábelhálózatok éves szintű fenntartásának tervezéséhez. A rendszerterv egyik kiemelendő aspektusa az az alapkoncepció, hogy a gyakorlati probléma megoldásába bevonják a matematikai módszerek nyújtotta lehetőségeket. A kiefeszültségű kábel hálózatra kidolgozott kockázatalapú fenntartási-terv ugyanis a fuzzy logikára épül. A fuzzy logika bizonytalan, úgynevezett elmosódott

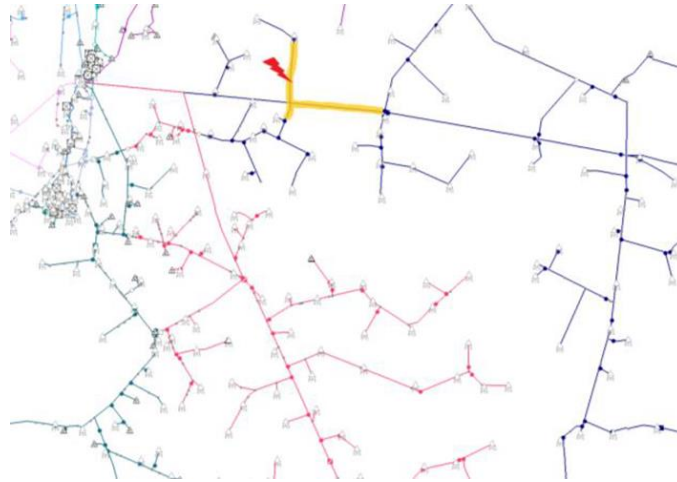
halmazok logikájának leképezésére jött létre [73]. A tanulmányban a fenntartástervezésre fuzzy módszereket alkalmaznak, azonban a rendszertervben maradtak még potenciális fejlesztési területek, mint például a rendszer adattárának paraméterezése vagy az alkalmazott Mamdani rendszer [74] kidolgozottsága és pontossága.

A dokumentum a klasszikus Mamdani-féle irányítási rendszert javasolja [75, 76], amely bár alátámasztottan alkalmas bizonyos következtetések levonására, azonban számos gyenge pontja van. Az egyik ilyen gyenge pont, hogy a munkában javasolt trapéz alakú tagsági függvény lineáris szakaszokat eredményez, ugyanakkor a gyakorlatban a nyelvi változók eredményesebben közelíthetők meg szigmoid típusú tagsági függvénnyel [77].

További problémát jelenthet, hogy a tanulmányban vizsgált hibaterület nagy kapcsolatszámú hálózatot érint, és egy-egy hibaterület kiértékelésére és a hibabehatárolásra vonatkozó redukciós módszerre ez a tanulmány nem ad javaslatot. A fuzzy következtetéshez csak/és műveleteket használ és a minimum operátort. Ezzel nem használja ki a következtetési rendszer és más fuzzy operátor nyújtotta lehetőségeket, ami pontosabb következtetéseket eredményezne. Például a kábelszegmens hosszát [55] két szegmensre osztja, de a pontosabb kiértékeléshez finomabb fuzzyfikálás előnyösebb lenne. Egy másik példa, hogy bár az üzemzavari rátát [55] fuzzyfikálja és súlyozza, miután kellő nagyságú adatmennyiség áll rendelkezésre, a fuzzy súlyok helyett inkább a valós *a priori* valószínűségeket lenne célszerűbb figyelembe venni a következtetés rendszer tervezésekor [22]. A kockázatalapú fenntartás-rendszerterv alapján bevezetett fuzzy logikára épülő módszer további hátránya, hogy csak kábel típusú kifeszültségű elosztóhálózati berendezésre specializálódott, és szabadvezetésekre, elosztószekrényekre stb. nem készült el.

#### *2.4.3. Az energetikai villamos hálózat fejlesztésére irányuló nemzetközi törekvések*

A nemzetközi kutatások közül kiemelendő a portugál EDP Distribuição és QEnergia tagjaiból álló munkacsoport „Getting real-time fault location information from multi-vendor legacy protection systems” című tanulmánya [78]. Munkájuk során bemutatnak egy közép feszültségű elosztóhálózati rendszerre kifejlesztett algoritmust, melynek segítségével a hibahely beazonosítását 10% körüli hiba rátával képesek elvégezni. Az algoritmus szimuláció eredményét a 9. ábra szemlélteti.



**9. ábra:** EDP Distribuição és QEnergia által létrehozott hibahely beazonosító rendszer sikeres hibahely beazonosítása [78]

A 9. ábrán a megjelenített középvezettségű elosztóhálózat hibahelyet tartalmazó része látható. A portugál elosztóhálózaton, pilot projekt keretein belül üzemeltetett rendszer hátránya, hogy villamos paraméterek elemzésével végzi el a hibahely beazonosítását, így – hasonlóan a Magyarországon pilot programként bevezetett módszerekkel – nem alkalmazható a kiefeszűltű elosztóhálózatokra.

A nemzetközi szakirodalomban a hibahely beazonosítása mellett hálózati adatokból építkező adattárház is fellelhető. A University of Sheffield és a Northern Powergrid munkatársai által készített „Smarter Business processes resulting from Smart Data” című munkájukban olyan modellt mutatnak be, amely az intelligens villamos energia fogyasztásmérő [79, 80, 81, 82] különböző periódus idejű és valós idejű adataiból épül fel. A munka a modell felhasználási lehetőségeiként nevezi meg a terheléelosztási [83], hálózattervezési [84] és hibadetektálási feladatokat. A bemutatott hálózat egy leegyszerűsített modell, amelyen korlátozott fogyasztói számra végeznek tesztelést. A realisztikus modellezés érdekében a teszteléshez azonban érdemes az eredeti hálózat valós adataiból készíteni a modellt [85], mivel a valós hálózat részletes információi magas szintű befolyással bírnak a pontos hibahely behatárolásában [86]. Huang, Q. és munkatársai által készített munkában a hibabehatárolás folyamata nem kellő mélységű. A munka a villamosfogyasztás mérők által mért villamos mennyiségek adatainak gyűjtésére, továbbítására és feldolgozására fókuszál. [79, 87, 88]

A „Research of Smart Distribution Network Big Data Model” című munkában amerikai és kínai kutatók által készített, a kínai villamosenergia-rendszer adatain alapuló adattárház kerül bemutatásra [89], amelyet BigData szemléletben [90,91] készítettek a China Electric Power, a Stanford University és az Észak-Amerikai Smart Grid Research Institute munkatársai. A létrehozott adattárház tulajdonságait tekintve elosztott, többretegű és dinamikus. Az adattárház adatait osztályozták és funkcionálisan strukturálták, amely megoldás figyelemre méltó [92,93].

### 3. HIPOTÉZISEK ÉS KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK

Kutató munkám célja egy olyan új módszer kidolgozása, amely a KIF hálózati elemek okozta áramszünetek időtartamának csökkentését és ez által a villamosenergia-szolgáltatás minőségének javulását eredményezi. A KIF elosztóhálózat fejlesztése ma már nem nélkülözheti a korszerű mérnöki-, matematikai-, informatikai-, és infokommunikációs technológiákon alapuló eszközök alkalmazását. Ilyen eszközök lehetnek például a smart érzékelők.

Értekezésemben egy új hibalokalizációs eljárást ismertetek. Az új metódus célja, hogy a KIF hálózaton bekövetkezett üzemzavar esetén az üzemzavar kiterjedtségét – azaz az érintett fogyasztók számát – és a meghibásodott berendezés hálózat topológiájában betöltött pozícióját minél gyorsabban és pontosabban meghatározza. Disszertációm részét képezi az új eljárás jelenlegi hibaütemező rendszerbe való integrálása is. Az így létrejövő új hibaütemező rendszerben vizsgálom azokat a lehetőségeket, amelyek a KIF hálózat minőségi mutatóit pozitív irányba befolyásolják.

A kisfeszültségű villamos elosztóhálózat jelenlegi üzemirányítási rendszerének vizsgálata során az alábbi hipotéziseket állítottam fel:

**Hipotézis 1.** A kisfeszültségű elosztóhálózat üzemirányítás nyilvántartási rendszeréből származó adatokból, Big Data eszközök alkalmazásával létrehozható egy olyan hibavalószínűségi adattár, amelynek felhasználásával kidolgozható egy új, automatikus, a meghibásodott berendezés legvalószínűbb helyének meghatározására irányuló eljárás.

**Hipotézis 2.** Hipotézisem szerint kidolgozható olyan algoritmus, amely a szporadikusan elhelyezett smart érzékelők és a fogyasztói bejelentések adatait felhasználva lehetővé teszi a kisfeszültségű elosztóhálózatban fellépő üzemzavar kiterjedtségének, és hálózaton belüli lokalizálásának gyors és automatikus detektálását.

**Hipotézis 3.** Hipotézisem szerint az üzemzavar lokalizáló algoritmus eredményeit a jelenlegi hibaütemező rendszerbe integrálva létrehozható egy olyan új ütemező rendszer, amely a jelenleginél hatékonyabb hiba kiosztást tesz lehetővé.

**Hipotézis 4.** Hipotézisem szerint létrehozható az új kisfeszültségű elosztóhálózati hibaütemezési rendszerben egy olyan új hiba rangsorolási-, súlyozási rendszer, amely bevezetésével a hibacímek kiosztási hatékonysága javítható.



## 4. A KUTATÁSBAN ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Kutatásom során egy olyan új hibalokalizációs eljárást dolgoztam ki, amelynek a segítségével a KIF hálózatban az üzemzavar kiterjedtsége (azaz az érintett fogyasztók száma) és a meghibásodott berendezés pozíciója gyorsan és pontosan meghatározható.

A feladatot matematikai-informatikai kérdésként kezeltem [94, 95]. A kidolgozott módszer nem csak feszültség szint független, hanem multidiszciplináris is, ezáltal nem csak a villamos elosztóhálózaton, hanem más közmű hálózatok esetében is felhasználható. Az egyes iparágak közötti átjárás biztosítása a hibajelzés (pl. nyomás csökkenés vagy esetemben: a feszültség eltűnése) központi adatfeldolgozásával és speciális kiértékelésével lehetséges [96].

A KIF villamosenergia-rendszert a *gráfelmélet* [1, 97, 98] segítségével modelleztem. A villamos elosztóhálózat egy hierarchikus gráfnak felel meg [99].

Az áramszolgáltatók tervei [100] és az Európai Unió energiatakarékosági törekvései [101] következtében a háztartásokban a közeljövőben várhatóan lecserélik a jelenlegi elavult fogyasztásmérőket smart érzékelővel ellátott fogyasztásmérőkre (ezekkel a smart mérőkkel a fogyasztók jobban tudják monitorozni saját villamosenergia-fogyasztásukat, amelytől a fogyasztás csökkenése várható [102]). Az erre vonatkozó hazai pilot program már nyújtott tapasztalatokat [57]. A gyakorlatban ez úgy működik, hogy a kihelyezett smart érzékelők – az arra alkalmas kommunikációs csatornákon keresztül – hibajelzéseket küldenek az üzemeltető központba. Egy szélsőségesebb időjárás esetén azonban olyan óriási adatmennyiség keletkezik, amelynek a feldolgozásához a Big Data módszerek alkalmazása elengedhetetlen [38].

Az áramszolgáltató által eddig felhalmozott információ további tudományos elemzéssel és feldolgozással beépíthető az általam kifejlesztett új eljárási gyakorlatba. Az új modellben *a priori valószínűség* [103, 104] számítást alkalmaztam.

### 4.1. A disszertációban felhasznált gráfelmélet irodalom feldolgozása

A gráfelmélet a hálózatszámítás topológiai eszköze [105, 106]. Alkalmazásával a KIF hálózat villamos paramétereit elhagyva fa struktúrájú gráfként modellezhető. Ezáltal matematikailag kifejezhető a hibahely lokalizációja a KIF gráfon. A modellben megállapított hibahely megfeleltethető a valós hálózati elemeknek.

#### 4.1.1. Gráf meghatározás

Legyen  $G(V,E)$  egy gráf, ahol  $V=(1,2,\dots,n)$  elemei a gráf pontjai és elemeinek száma  $n$ , továbbá  $E=(1,2,\dots,m)$  elemei a gráf élei, aminek számossága  $m$ . Ha másképp nincs jelölve, akkor az összes gráf irányítatlan és véges. A gráf  $j$  pontjának foka  $d_j$ . A minimum fokszámot  $\delta$  jelöli, a maximum fokszámot pedig  $\Delta$ . A csúcsok szomszédságát  $i \sim j$ ,  $ij \in E(G)$  –vel jelölik és  $A$  jelzi az  $n \times n$   $\{0,1\}$  szomszédsági mátrixot úgy, hogy  $A_{ij}=1$  csak és kizárólag akkor, ha  $ij \in E(G)$ .  $D$  az  $n \times n$  diagonális mátrix, ahol  $D_{jj}=d_j$ .

*Meghatározás:*  $L=D-A$ , mely definiálja a gráfhoz társított Laplace mátrixot, amelynek rendre  $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$  a sajátértékei. Ha nincs másképp jelölve, akkor a sajátvektorok és sajátértékek a Laplace mátrixra vonatkoznak és nem a szokásos szomszédsági mátrixra. Egyszerűsítésként „ $G$  sajátértéke” lesz használva akkor, amikor „ $L(G)$  sajátértéke”-ről lesz szó. Jelölje  $I$  az  $n \times m$  illeszkedési mátrixot, ahol az oszlopokat az élek indexelik, míg a sorokat a csomópontok. Egy tetszőleges irányultság esetén minden élnél és minden oszlopnál +1 kerül abba a sorba, ami a pozitív végeknek felel meg és -1 abba a sorba, ami a negatív végeknek felel meg, minden más bejegyzés 0. Látható, hogy  $L = II^T$ . Ha  $L$  bármely sajátértéke  $\lambda$  és  $x$  a hozzá tartozó sajátvektor, akkor:

$$\lambda \|x\|^2 = (\lambda x, x) = (II^T x, x) = (I^T x, I^T x) = \|I^T x\|^2 \geq 0 \quad (3)$$

és ez alapján  $L$  pozitív szemidefinit. Mivel soronként az  $L$  összege mindig nulla, a csak egyesekből álló vektor egy sajátvektor, aminek a sajátértéke  $\lambda_j = 0$ . Az  $L$  definíciója szerint tehát:

$$(Lx)_j = d_j x_j - \sum_{i \sim j} x_i \quad (4)$$

ami lehetővé teszi a sajátérték feltétel vizsgálatát minden egyes csomópontnál a következő egyenlet szerint:

$$(d_j - \lambda)x_j = \sum_{i \sim j} x_i \quad (5)$$

A Courant-Fischer egyenlőtlenséget alkalmazva, a sajátértékek:

$$\lambda_2 = \min_x \frac{(x, Lx)}{(x, x)} \quad \text{és} \quad \lambda_n = \max_x \frac{(x, Lx)}{(x, x)} \quad (6)$$

ahol  $x$  minden nem-nulla oszlopvektorra kiterjed, aminek mérete  $n$ , és ami ortogonális a csak egyesekből álló vektorra. Így:

$$\lambda_2 \leq \frac{(x, Lx)}{(x, x)} \leq \lambda_n \quad (7)$$

$$(x, Lx) = \sum_{ij \in E(G)} (x_i - x_j)^2 \quad (8)$$

és

$$\lambda_2 = \min_x \frac{\sum_{ij \in E(G)} (x_i - x_j)^2}{\sum_{j \in V(G)} (x_j)^2} \quad (9)$$

és

$$\lambda_n = \max_x \frac{\sum_{ij \in E(G)} (x_i - x_j)^2}{\sum_{j \in V(G)} (x_j)^2} \quad (10)$$

ahol  $x$  ugyancsak ortogonális a csak egyesekből álló vektorokra. Ennek egy alternatív megfogalmazása:

$$\lambda_2 = \min_x \max_{t \in \mathbb{R}} \frac{\sum_{ij \in E(G)} (x_i - x_j)^2}{\sum_{j \in V(G)} (x_j - t)^2} \quad (11)$$

ahol  $x$  minden nem-konstans vektorra terjed ki. Ez megfigyelhető azáltal, hogy egy adott  $x$  vektor  $t$  értéke, ami maximalizálja az arányt  $t = \sum x_j/n$  és hogy ezáltal az  $y_j = x_j - t$  által definiált  $y$  vektor, ortogonális/merőleges a csak egyesekből álló vektorra és  $y_i - y_j = x_i - x_j$ ; továbbá, az összes olyan vektor, amely ortogonális a csak egyesekből álló vektorra ezen a módon megkapható.

Fiedler [107] a következő jellemzést adta:

$$\lambda_2 = \min_x \frac{2n \sum_{ij \in E(G)} (x_i - x_j)^2}{\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (x_i - x_j)^2} \quad (12)$$

A Cauchy átfedések egyenlőtlenségek is használatra kerülnek (lásd pl. [108]). A hermitikus  $B$  mátrix esetében legyen  $B_{[r]}$  mátrix, amely úgy jött létre, hogy kitörlésre kerül az  $r$ -edik sor és az  $r$ -edik oszlop  $B$ -ből. A  $B$  sajátértékei legyenek  $\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_n$ , a  $B_{[r]}$  sajátértékei pedig  $\beta_1 \leq \beta_2 \leq \dots \leq \beta_{n-1}$ , akkor:

$$\alpha_i \leq \beta_i \leq \alpha_{i+1}, \quad 1 \leq i \leq n-1 \quad (13)$$

A reguláris gráfok  $L = dU - A$ , ahol  $dU$  a közös csomóponti fokot jelöli. Az  $A$  sajátértékei  $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_n$  esetén  $\lambda_j = d - \mu_j$ . Az  $L$  használatával a  $G$  egy  $g$ -reguláris gráf lesz, ahol a legmagasabb sajátérték a szomszédsági mátrixban  $d$  lesz. (lásd később, 1.3.4. Tétel).

Legyen az  $I_+$  mátrix irányítatlan illeszkedési mátrix, melynek bemenetei abszolút értékek. Ennek megfelelően a  $I_+ I_+^T$  sajátértékei nem lesznek kisebbek a  $II^T$  sajátértékeinél viszont a  $I_+ I_+^T$  sajátértékei ugyanazok, mint a  $I_+^T I_+$  sajátértékei és  $I_+^T I_+ = 2U + B$ , ahol  $B$  a  $G$  élgráfjának szomszédsági mátrixa. Kapcsolat van egy gráf Laplace sajátértékei és az adott gráf élgráfjának szomszédsági sajátértékei között; a  $I_+^T I_+$  sajátértékei nem

negatívak, és a legkisebb sajátértéke egy élgráfnak legalább -2, ez kapcsolatot biztosít a *gyökrendszerek* teóriájával [109].

Ha  $G$  egy gráf amiből megszerkeszthető a  $G'$  gráf úgy, hogy megfelelően súlyozott ciklus rendelhető mindegyik csomóponthoz, oly módon hogy  $G'$   $d$ -reguláris lesz, így megkapható, hogy  $L(G) = L(G') = dU - A(G')$ . Ezáltal egy gráf Laplace spektruma lecsökkenti a súlyozott gráf szomszédsági spektrumát.

Az  $L$  egy tulajdonsága figyelhető meg: annak ellenére, hogy minden gráfnak egyéni Laplace mátrixa van, ez a mátrix általában nem határozza meg egyedileg a gráfot, a Laplace nem ad információt arról, hogy hány ciklus található az eredeti gráfban.

Adott a következő:  $X \subseteq V_t$  és hozzá definiálva az  $x = (x_j)$  oszlopvektor  $x_j = 1$ -gyel, ha  $x \in X$  és  $x_j = 0$ -val ha  $x \notin X$ . Legyen  $y = Lx$ .  $L$  definíciója szerint látható hogy  $y_j > 0$  azt jelenti, hogy  $j$  csomópont  $X$ -ben van és kapcsolódik azokhoz az  $y_j$  csomópontokhoz, amelyek nincsenek  $X$ -ben, illetve hogy  $y_j < 0$  azt jelenti, hogy  $j$  csomópont nincs  $X$ -ben és  $|y_j|$  csomópontokhoz kapcsolódik  $X$ -ben, és  $y_j = 0$  azt jelenti, hogy  $j$  csomópont  $X$ -ben van [vagy nincs] és kizárólag olyan csomópontokhoz kapcsolódik össze, amelyek  $X$ -ben vannak [vagy nincsenek]. Más szóval,  $Lx$  pontosan megadja, hogy az  $X$  halmaz hogyan függ össze a gráf többi részével. Ha  $X = V$  akkor nincsenek az első két típusba sorolható csomópontok és 0 megint egy sajátérték. Ez az értelmezés az  $A$  következő tulajdonságának analógiájaként is tekinthető: ha adott a csomópontok  $X$  halmaza, ahol  $x$  az  $X$  karakterisztikus vektora, akkor  $Ax$  megfelel az  $X$  szomszédjainak (multi)halmazának. Az  $A^k x$  a  $k$  hosszúságú,  $X$ -ből eredő utak végpontjainak multihalmazának felel meg és így az  $A$  az utat-, míg az  $L$  a határokat modellezi.

Az  $A^*$  súlyozott szomszédsági mátrixot használva az  $A_{ij}^*$  az  $i$  és  $j$  közötti él súlya (nulla súly értelmezése, hogy nincs él) és a csomópont foka a szomszédos élek súlyának összege. Ez a következő egyenlethez vezet:  $L^* = D^* - A^*$ . A nem-súlyozott Laplace egy speciális esete ennek, ahol minden súly vagy 0 vagy 1. Ez a tézis elsődlegesen az  $L$  sajátértékeire összpontosítani (legfőképpen a  $\lambda_2$ -re) és ezek kapcsolataira más gráf tulajdonságokkal. [110] [181]

#### 4.1.2. A gráf sajátértékei

A gráf sajátértékeit a membránok rezgésének tanulmányozásában alkalmazták – ezen elméletet széleskörűen Kac cikkéből megismerhető, – amely szorosan összefügg a Riemann osztókon végzett sajátértékek és sajátfüggvények tanulmányozásával [111]. Van egy membrán az  $xy$  síkban, amelynek vertikális elmozdulása  $z = z(x,y)$ ,  $t$  az idő-változó,  $c$  pedig a hullám sebessége (a hullám sebessége csak a közegtől függ – ami ez esetben a membrán és nem függ a hullám „alakjától”).

A hullám egyenletét (lásd pl. [112]) a következő képlet adja:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \quad (14)$$

Ha azt feltételezzük, hogy a hullám úgy viselkedik, mint egy rugó, abból a szempontból, hogy működik benne egy, az elmozdulással arányos visszaállító erő, akkor Hooke törvénye szerint:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = -kz \quad (15)$$

Ha a membránt közelítjük egy olyan különálló részecskékből álló ráccsal, ahol a részecskék közötti távolság  $w$ , a következő módon jutunk el a részleges derivatívához:

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \approx \frac{z(x, y) - z(x - w, y)}{w} \quad (16)$$

$$\frac{\partial z(x + w, y)}{\partial x} \approx \frac{z(x + w, y) - z(x, y)}{w} \quad (17)$$

Ami a következőt adja:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x^2} &\approx \frac{(17) - (16)}{w} = \\ &= \frac{z(x + w, y) + z(x - w, y) - 2z(x, y)}{w^2}. \end{aligned} \quad (18)$$

Behelyettesítve (18) (és az analóg kifejezést  $\partial^2 z / \partial y^2$  számára) (14)-be és használva (15)-ot, a következőt kapjuk:

$$4z(x, y) - z(x + w, y) - z(x - w, y) - z(x, y + w) - z(x, y - w) \approx \frac{kw^2}{c^2} z(x, y). \quad (19)$$

Ez azt jelenti, hogy  $z$  egy sajátfüggvénye a hálózati gráf Laplace mátrixának, a  $kw^2/c^2$  sajátértékkel. Ez magyarázza meg az  $L$  mátrixra vonatkozó „Laplace” kifejezést, mivel az a folyamatos Laplace operátor diszkrét analógiájaként működik. Hasonló megközelítést használnak a fizikában annak a bemutatására, hogy egy húr vibrálásának stabil módja (azaz sajátfüggvény/sajátérték) precízen szinuszoid görbével írható le (lásd pl. [112]). A hálózati gráf csak egy egyszerű módja annak, hogy diszkrétté lehessen tenni a felszínt. A Laplace-t akármelyik általunk választott gráfból megkaphatjuk. [113, 181]

#### 4.1.3. A sajátértékek alaptulajdonságai

Az egyik legkorábbi használata az  $L$  mátrixnak a Kirchhoff által alkalmazott Mátrix-fa tétel volt ( $L$ -et néha Kirchhoff mátrixnak is nevezik). Ez a tétel azt mondja ki, hogy  $L$  kofaktorai a gráf feszítőfáinak számát adja meg.

Legyen  $L$  szubmátrixa  $L_{[i,j]}$ , ami  $L$   $i$ -edik sorának és  $j$ -edik oszlopának eltávolításával jön létre és legyen  $L$  szubmátrixa  $L_{[A,B]}$ , ami  $L$  az  $A$  számú sorának és  $B$  számú oszlopának eltávolításával jön létre.  $G$  feszítőfáinak számát  $t(G)$  jelöli.

Ekkor kijelenthető, hogy:

$$1.3.1. \text{Tétel. } (-1)^{i+j} \det(L_{[i,j]}) = t(G) \quad (20)$$

Ez úgy bizonyítható, hogy vesszük az  $I$  illeszkedési mátrixot, ahol  $L = II^T$ . Ha  $G$  összefüggő, és nem egy fa, akkor  $G$ -nek legalább  $n$  éle van, azaz  $I$  egy négyzet mátrix.

Figyelembe véve, hogy  $\det(L_{[j,j]})$  azt kapjuk, hogy:

$$\det(L_{[j,j]}) = \det((I_{[j,\emptyset]})(I_{[j,\emptyset]})^T). \quad (21)$$

A Cauchy képletét alkalmazva erre az eredményre, a következőt kapjuk:

$$\det(L_{[j,j]}) = \sum_M \det((I_{[j,M]})(I_{[j,M]})^T) = \sum_M \det(I_{[j,M]}) \det(I_{[j,M]})^T \quad (22)$$

ahol  $M$  azon oszlopok halmazát jelöli, amelyek kitörlése  $I_{[j,\emptyset]}$ -ből egy négyzet mátrixot eredményez és az összes ilyen halmaz összege  $M$ . Az  $M$  egy élekből álló halmaznak tekinthető, ahol  $|M| = |E(G)| - (|V(G)| - 1)$ .  $G'$  jelöli  $G$  szubgráfját, amely  $M$  éleinek kivonásával jön létre;  $G'$ -nek  $n-1$  éle van.

Bármely  $M$  halmaz esetében látható, hogy  $I_{[\emptyset,M]}$  képviseli  $G'$  illeszkedési mátrixát. Mivel  $G'$ -nek  $n$  csomópontja és  $n-1$  éle van, látható, hogy  $G'$  akkor és csakis akkor képvisel egy feszítőfát, ha nem tartalmaz ciklusokat, és akkor és csakis akkor, ha összefüggő. Ezért  $\det(I_{[j,M]}) = 0$  akkor, ha  $G'$  nem egy feszítőfa. Továbbá,  $\det(I_{[j,M]}) = \pm 1$  akkor, ha  $G'$  egy feszítő fa. Mivel  $\det(I_{[j,M]}^T) = \det(I_{[j,M]})$ , az összeg (22)-nél az  $n-1$  éllel rendelkező  $G$  gráf összefüggő, aciklikus szubgráfjainak a számát fogja megadni, azaz a feszítőfák számát. A lineáris koefficiens  $L$  karakterisztikus polinomjában (pl [144]) – a sajátértékek tekintetében – a következőt kapjuk:

$$1.3.2. \text{ Következmény. } \prod_{j=2}^n \lambda_j = n t(G). \quad (23)$$

Megfigyelhető, hogy  $\lambda_2 = 0$  akkor, és csakis akkor, ha  $G$  nem összefüggő.

Legyen  $G$  gráf  $n$  csomóponttal, és legyen  $J \subseteq V(G)$ . A  $G_{[J]}$  gráf úgy definiálható, hogy az az a gráf, amelyet úgy kapunk, hogy lecseréljük  $J$  összes csomópontját egyetlen olyan csomóponttra, ami pontosan szomszédos a  $G/J$  azon csomópontjaival, amelyek szomszédosak ( $G$ -ben)  $J$  néhány csomópontjával. Ez többszörös éleket hozhat létre (ha  $J$  néhány csomópontja osztozik egy közös szomszédon, ami nem  $J$ -ben van) vagy

hurkot/ciklust (ha néhány  $J$ -ben lévő csomópont szomszédos egymással). Jelölje  $t(G)$   $G$  feszítőfáinak a számát.

Ez Kel'mans szerint a következő jellemzéshez vezet [115]:

1.3.3. Tétel. Legyen  $x^n + c_{n-1}x^{n-1} + \dots + c_1x$  az  $L(G)$  karakterisztikus polinomja. Akkor:

$$c_i = (-1)^n \sum_{\substack{J \subset V(G) \\ |J|=i}} t(G_J) \quad (24)$$

Az első eredmények azt sugallták, hogy a  $\lambda$  érték kapcsolódik a gráf „összefüggőségéhez” (Fiedler ezt „algebrai összeköttetésnek” nevezte el). Nagy  $\lambda_2$  értékeket olyan gráfokkal társítanak, amelyeket nehéz szétkapcsolni. Ha úgy rendezzük a csomópontokat, hogy  $L$  blokk formájú, ahol a blokkok  $G$  összefüggő komponenseinek felelnek meg, nem csak azt látjuk, hogy  $\lambda_2 = 0$  akkor és csakis akkor, ha  $G$  nem összefüggő, hanem:

1.3.4. Tétel.  $G$  összefüggő komponenseinek a száma egyenlő 0 többszörösével, mint egy sajátérték.

Az  $A$  mátrix redukálható, ha létezik olyan  $P$  permutációs mátrix, mint:

$$P^T A P = \begin{pmatrix} B & 0 \\ D & C \end{pmatrix} \quad (25)$$

ahol  $B$  és  $C$  négyzetes mátrixok. Más esetekben *felbonthatatlan*. Továbbá, ha  $A$  redukálható, akkor létezik egy olyan  $P$  permutációs mátrix, ahol  $P^T A P$  alakja a következő:

$$\begin{pmatrix} A_{1,1} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & A_{2,2} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & A_{s,s} & 0 & \dots & 0 \\ A_{s+1,1} & A_{s+1,2} & \dots & A_{s+1,s} & A_{s+1,s+1} & \dots & 0 \\ \vdots & & & & & \ddots & \vdots \\ A_{t,1} & A_{t,2} & \dots & A_{t,1} & A_{t,s+1} & \dots & A_{t,t} \end{pmatrix} \quad (26)$$

olyan  $\{A_{k,1}, A_{k,2}, \dots, A_{k,k-1}\}$  mátrixokkal, amelyek az elemei nem mind nullák egyik  $k > s$  fix értékre sem. Ez a mátrix *normális* formája [116]. Ez nem feltétlen egyedi, mivel blokkon belüli és közötti permutációk lehetségesek. Tehát az 1.3.4. Tétel következményeként a következőt kapjuk:

1.3.5. Következmény.  $G$  gráf akkor és csakis akkor összefüggő, ha az  $L(G)$  gráf felbonthatatlan. Továbbá, ha  $G$  nem összefüggő gráf, akkor a (redukálható, felbontható)

*L mátrix normálalakját megkaphatjuk úgy, hogy bármilyen módon a szerint rendezzük a csomópontokat, hogy a komponensek sorrendjének megfelelően legyenek felsorolva.*

Ha  $L$  felbontható, akkor a csomópontok feloszthatók a  $B$  és  $C$  szubmátrixok (25) formája szerint. A 0 blokk e felosztás két része közötti élek hiányára utal, azaz a gráf nem összefüggő. Látható, hogy az összefüggő komponensek szerint listázva a csomópontokat, akkor minden egyes összefüggő komponenshez tartozó blokk szubmátrix felbonthatatlan, és hogy minden diagonálison kívüli blokk 0. Ez nem csak egy normálalak, hanem egy blokkdiagonális forma.

Ha  $L(G)$ -vel  $G$  gráf Laplace-t jelöljük és  $G^c$ -vel jelöljük a  $G$  gráf komplementerét, akkor látható, hogy  $L(G^c) + L(G) = nU - J$ , és ezért  $L(G^c) = nU - J - L(G)$ , ahol  $J$  csak egyesekből álló mátrix. Ha  $x$  az  $L(G)$ -nek sajátvektora, ami ortogonális a csak egyesekből álló vektorra és sajátértéke  $\lambda$ , akkor mivel  $Jx = 0$ , látható, hogy  $x$  az  $L(G^c)$ -nek is sajátvektora és a sajátértéke  $n - \lambda$ . Ezt először Kel'mans figyelte meg [117, 118], a következő eredményben:

$$1.3.6. \text{Tétel. } (n - x)P_{G^c}(x) = (-1)^n xP_G(n - x) \quad (27)$$

ahol  $P_G(x)$  a  $G$  Laplace mátrixának karakterisztikus polinomját jelöli.

$$1.3.7. \text{Következmény. } \lambda_j(G^c) = n - \lambda_{n+2-j}(G), 2 \leq j \leq n \quad (28)$$

esetében a Laplace sajátértékek felső korlátját is megkapjuk [115].

1.3.8. Következmény  $\lambda_n \leq n$  egyenlőség akkor és csakis akkor, ha  $G^c$  nem összefüggő.

Mivel  $\lambda_2(G) = 0 \Leftrightarrow \lambda_n(G^c) = n \Leftrightarrow G$  nem összefüggő. A spektrum tehát, bizonyos értelemben szimmetrikus és egy gráf  $\lambda_2$ -jére vonatkozó kérdések egyenértékűek a komplementjének  $\lambda_n$ -jére vonatkozó kérdésekkel.  $L$  nyomát nézve a következő adódik:

$$\sum_{j=1}^n d_j = \sum_{j=1}^n \lambda_j \text{ és így } \lambda_2 \leq \frac{n}{n-1} \bar{d} \leq \lambda_n. \quad (29)$$

Ugyanakkor Fiedler [119] szerint:

$$1.3.9. \text{Tétel. } \lambda_2 \leq \frac{n}{n-1} \delta \text{ és } \frac{n}{n-1} \Delta \leq \lambda_n. \quad (30)$$

Tehát, az összefüggő gráfhoz tartozó nem-nulla sajátértékek tartománya (hozzávetőlegesen) legalább akkora, mint a csomópont fokszámainak tartománya.



Nyilvánvalóan, az 1.3.4 Tétel és az 1.3.8. Következmény által,  $\lambda_2 \leq n$  is létezik, egyenlőséggel akkor és csakis akkor, ha a gráf teljes.

Fiedler továbbá létrehozta a következő eredményt is [119], ahol  $v(G)$  a gráf csomóponti összefüggőségét képviseli.

$$1.3.10. \text{ Tétel. } \lambda_2 \leq v(G) \quad (31)$$

Ahhoz, hogy ez bizonyításra kerüljön megjegyzendő, hogy ha  $G_1$  és  $G_2$  diszjunkt élekkel rendelkező gráfok ugyanazon a csomópont halmazon, akkor  $L(G_1) + L(G_2) = L(G_1 \cup G_2)$ . Ha  $j$  jelöli a csak egyesekből álló vektorokat, ez a következőt adja:

$$\begin{aligned} \lambda_2(G_1 \cup G_2) &= \min_{x \perp j} \frac{\langle x, L(G_1 \cup G_2)x \rangle}{\langle x, x \rangle} = \\ &= \min_{x \perp j} \left( \frac{\langle x, L(G_1)x \rangle}{\langle x, x \rangle} + \frac{\langle x, L(G_2)x \rangle}{\langle x, x \rangle} \right) \geq \\ &\geq \min_{x \perp j} \frac{\langle x, L(G_1)x \rangle}{\langle x, x \rangle} + \min_{x \perp j} \frac{\langle x, L(G_2)x \rangle}{\langle x, x \rangle} = \\ &= \lambda_2(G_1) + \lambda_2(G_2). \end{aligned} \quad (32)$$

ahol a minimum, mint általában, minden olyan nem-nulla vektor fölött van, amelyek ortogonálisak a csak egyesekből álló vektorokra. Tehát ha éleket távolítunk el, az nem fogja  $\lambda_2$ -t megnövelni.

Ha adott egy  $G$  gráf, és egy csomópont  $j \in V(G)$ , akkor definiáljuk  $H = G \setminus \{j\}$ , és ugyancsak definiáljuk  $G'$ -t úgy, mint aminek a csomópont halmaza  $V(G)$  és az él halmaza  $E(H) \cup \{ij \mid i \in V(G)\}$ . (Tekinthejtük úgy is, hogy  $G' = H \vee j$ ; lsd 1.4.5. Tétel.) Ha  $x$  az  $L(H)$  sajátvektora  $\alpha$  sajátértékkel, akkor  $x'$  vektor, – amely kialakítása úgy történt, hogy az  $x$  elemei mellé egy további 0 került beírásra – úgy tekinthető, mint  $L(G')$  sajátvektora,  $\alpha + 1$  sajátértékkel. Ez a következőhöz vezet:

$$\lambda_2(G) \leq \lambda_2(G') \leq \lambda_2(H) + 1 \quad (33)$$

Indukcióval kapjuk, hogy:

$$\lambda_2(G) \leq \lambda_2(G \setminus \{v_1, v_2, \dots, v_k\}). \quad (34)$$

Tehát ha néhány  $k$  csomópont eltávolítása nem teszi összefüggővé  $G$ -t, akkor  $\lambda_2(G) \leq k$ , ami pontosan megegyezik az eredménnyel.

Mivel az élek összefüggősége  $b(G) \geq v(G)$ , az is következik, hogy  $\lambda_2 \geq b(G)$ .

1.3.11. Tétel.

$$\begin{aligned} \lambda_2 &\geq 2e(1 - \cos(\pi/n)) \\ \lambda_2 &\geq 2[\cos(\pi/n) - \cos(2\pi/n)] - 2\cos(\pi/n)(1 - \cos(\pi/n))\Delta \end{aligned} \quad (35)$$

Bizonyos gráfok esetében  $\lambda_2$  számára értékeket adunk meg:

$$\begin{array}{llll} \text{út} & P_n \lambda_2 & = & 2(1 - \cos(\pi/n)) \\ \text{ciklus} & C_n \lambda_2 & = & 2(1 - \cos(2\pi/n)) \\ \text{kocka} & Q_m \lambda_2 & = & 2 \\ \text{teljes} & K_n \lambda_2 & = & n \\ \text{teljes páros} & K_{m,n} \lambda_2 & = & \min\{m, n\} \\ \text{csillag} & S_n = K_{1,n-1} \lambda_2 & = & 1 \end{array} \quad (36)$$

Azoknak a gráfoknak magasabb a  $\lambda_2$  értékük, amelyek nagyobb mértékben összefüggők. Az élek eltávolítása egy gráfból nem növeli  $\lambda_2$ -t. [181]

#### 4.1.4. Műveletek gráfokon

Legyen két gráf  $G_1$  és  $G_2$  Descartes-szorzata (direkt szorzata), ami a következőképpen van definiálva:  $G_1 \times G_2$ , csomópont halmaza  $V(G_1) \times V(G_2)$ ;  $(i_1, j_1)$  és  $(i_2, j_2)$  össze vannak kötve egy éllel akkor, ha  $i_1 = i_2$  és  $j_1 \sim G_2 j_2$ , vagy  $j_1 = j_2$  és  $i_1 \sim G_1 i_2$ .

$$1.4.1. \text{ Lemma. } \lambda_2(G_1 \times G_2) = \min\{\lambda_2(G_1), \lambda_2(G_2)\}. \quad (37)$$

Hasonló állítás tehető a szomszédsági mátrix sajátértékeivel kapcsolatban is. A bizonyítás attól a ténytől függ csak, hogy  $L(G_1 \times G_2) = L(G_1) \otimes U + U \otimes L(G_2)$ , ahol  $U$  egy megfelelően méretezett egységmátrixot képvisel és  $\otimes$  pedig a Kronecker-szorzatot. Kimutatható, hogy a  $G_1 \times G_2$  sajátérték halmaza:

$$\{\lambda_i(G_1) + \lambda_j(G_2) \mid 1 \leq i \leq n_1, 1 \leq j \leq n_2\}. \quad (38)$$

Továbbá, ha  $L(G_1)$  sajátvektora  $x$ , ami megfelel  $\lambda_i(G_1)$ -nak, és  $L(G_2)$  sajátvektora  $y$ , ami megfelel  $\lambda_j(G_2)$ -nek, akkor  $L(G_1 \times G_2)$  sajátértéke  $x \otimes y$ , ami megfelel  $\lambda_i(G_1) + \lambda_j(G_2)$ -nek. Ha  $G$  saját magával való szorzatát vesszük, akkor  $\lambda_2$  konstans marad. Tehát, bármelyik gráf esetében, fel lehet építeni tetszőlegesen nagy terjedelmű gráfokat, ugyanazzal a  $\lambda_2$  értékkel.

$G$  élgráfja, ami jelölése  $l(G)$ , az a gráf, amelynek csomópontjai  $G$  éleinek felelnek meg úgy, hogy  $l(G)$  két csomópontja akkor és csakis akkor szomszédos, ha  $G$  adott élei közös csomóponton osztoznak.  $G$  felosztott gráffját  $s(G)$  jelöli, amit úgy kapunk meg, hogy  $G$

minden élet lecseréljük  $P_2$  egy másolatára (ezzel „felosztva” minden egyes élet). A  $G$  teljes gráfja, amit  $t(G)$  jelöl, az a gráf, amelynek csomópontjai megfelelnek  $G$  csúcshalmazának és élhalmazának egyesítésének, úgy, hogy  $t(G)$  két csomópontja akkor és csakis akkor szomszédos, ha a megfelelő elemek szomszédosak vagy illeszkedők  $G$ -ben.

Legyen  $G$  egy  $d$ -reguláris gráf,  $n$  csomópontokkal és  $m$  éllel. Látható [115]-ben, hogy:

1.4.2. Tétel.

$$\begin{aligned} P_{l(G)}(x) &= (x - 2d)^{m-n} P_G(x) \\ P_{s(G)}(x) &= (-1)^m (2 - x)^{m-n} P_G(x(d + 2 - x)) \\ P_{t(G)}(x) &= (-1)^m (d + 1 - x)^n (2d + 2 - x)^{m-n} P_G\left(\frac{x(d + 2 - x)}{d + 1 - x}\right) \end{aligned} \quad (39)$$

ahol  $P_G(x)$ ,  $G$  Laplace mátrixának karakterisztikus polinomja. Megfigyelhető, hogy ha  $G$   $d$ -reguláris és  $d > 1$  (azaz nem  $K_2$  másolatainak diszjunkt egyesítése), akkor  $l(G)$  sajátértékei pontosan megegyeznek  $G$  sajátértékeivel kiegészítve a (többszörös) sajátértékkel  $2d$ -vel, ami nem volt  $G$  sajátértéke. Ha  $G$   $1$ -reguláris (azaz  $K_2$  másolatainak diszjunkt egyesítése), akkor  $2d = 2$  lesz a  $G$  sajátértéke, és a vezető kifejezése az  $l(G)$  karakterisztikus polinomjának kifejezésére: „elvesz” ahelyett, hogy hozzátenne a spektrumhoz.

Mivel ez a tétel csak a reguláris gráfokra érvényes, megegyező állítások tehetők a szomszédsági mátrixokkal kapcsolatban is [114].

A páros (biparciális)  $(r,s)$ -félreguláris gráf egy gráf  $V(G) = Z \cup W$  kétosztatúsággal, úgy, hogy  $Z$  minden csomópontja  $r$  fokszámú, és hogy  $W$  minden csomópontja  $s$  fokszámú. Mohar [120] kimutatja, hogy:

1.4.3. Tétel. Legyen  $G$  egy páros  $(r,s)$ -félreguláris gráf, akkor:

$$P_{l(G)}(x) = (-1)^m (r + s - x)^{m-n} P_G(r + s - x) \quad (40)$$

Definiálásra kerül, hogy (diszjunkt) egyesítése két gráfnak,  $G_1, G_2$ , legyen  $V(G_1) \cup V(G_2)$  csúcshalmazzal és  $E(G_1) \cup E(G_2)$  élhalmazzal, és jelöljük  $G_1 + G_2$  -vel. Ez egy nem összefüggő gráf és ezért  $\lambda_2(G_1 + G_2) = 0$ . Bizonyítható, hogy:

1.4.4. Tétel. Adott  $G_1$  és  $G_2$  gráf  $0 = \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_{n_1}$  és  $0 = \beta_1 \leq \beta_2 \leq \dots \leq \beta_{n_2}$  spektrumokkal, akkor a  $G_1 + G_2$  spektruma az  $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n_1}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{n_2}\}$  multihalmaz.

Definiálásra kerül a két gráf,  $G_1, G_2$  összekapcsolását úgy, mint  $G_1 \vee G_2 = (G_1^c + G_2^c)^c$ . Ez a két gráf egyesítése, melynél  $G_1$  minden csomópontja összefüggő  $G_2$  minden csomópontjával. Megjegyzendő, hogy  $G_1 \vee G_2$  mindig összefüggő. A definícióból adódóan  $G_1 \vee G_2$  átmérője legalább 2, és akkor és csakis akkor 1 az átmérő, ha mindkettő ( $G_1$  és  $G_2$ )

teljes gráf. Két gráf összekapcsolására úgy is lehet tekinteni, mintha a két gráfot maximálisan egymáshoz illeszténénk. Mivel  $G_1 \vee G_2$  komplementere nem összefüggő, látható, hogy  $n_1 + n_2$ -nek sajátértéknek kell lennie.

Az  $L(G_1 \vee G_2)$  mátrixnak blokk struktúrája van. A bal-felső blokk a  $L(G_1) + n_2 U$  mátrix, a bal-alsó blokk  $L(G_2) + n_1 U$  és a másik két blokk  $-J$ . Ebből kikövetkeztethető  $G_1 \vee G_2$  spektruma, a sajátértékek teljes halmazának bemutatása által. Ha  $L(G_1)$  sajátvektora  $x$ , ami megfelel  $\lambda_i$ -nek,  $1 \leq i \leq n_1 - 1$ , akkor az  $x'$  vektor, ami  $x'_k = x_k$ ,  $1 \leq k \leq n_1$  által definiált és egyébként  $x'_k = 0$ , úgy tekinthető, mint  $L(G_1 \vee G_2)$  sajátvektora,  $\lambda_i + n_2$  sajátértékkel. Hasonlóan,  $\lambda_j + n_1$  sajátértékeket kapjuk  $1 \leq j \leq n_2 - 1$  esetében. A csak egyesekből álló vektor, mint általában, 0 sajátértéket ad, és az a sajátvektor, amelynek értéke  $-n_1$  a  $G_1$  csomópontjainál, és  $n_2$  a  $G_2$  csomópontjainál,  $n_1 + n_2$  sajátértéket adja.

A következő tételt bizonyítjuk, Merris-en keresztül [121]:

1.4.5. Tétel. Adott  $G_1$  és  $G_2$  gráf  $0 = \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_{n_1}$  és  $0 = \beta_1 \leq \beta_2 \leq \dots \leq \beta_{n_2}$  spektrumokkal, akkor a  $G_1 \vee G_2$  spektruma a  $\{0, \alpha_i + n_2, \beta_j + n_1, n_1 + n_2 \mid 1 \leq i \leq n_1 - 1, 1 \leq j \leq n_2\}$  multihalmaz. Különösképpen,  $\lambda_2(G_1 \vee G_2) = \min\{\lambda_2(G_1), \lambda_2(G_2)\}$ .

Ez a tétel egy egyszerű módot ad egy teljes páros gráf Laplace spektrumának meghatározására, mivel  $K_{m,n} = K_m^c \vee K_n^c$ . Merris [121] hozzátett ehhez egy következményt:

1.4.6. Következmény. Ha  $x$  egy sajátvektor, amely megfelel  $\lambda$ -nak, ahol  $0 < \lambda < n$ , akkor  $x_j = 0$  minden esetben, amikor  $d_j = n - 1$ .

Hogy látható legyen ez az eredmény, legyen  $G$  egy gráf, és  $j$  egy csomópont  $n-1$  fokszámmal. Látható, hogy  $G = (G \setminus \{j\}) \vee \{j\}$ . Így az 1.4.5. Tétel szerint, azt kapjuk, hogy az  $y$  vektor, amely  $n-1$  értéket vesz fel  $j$  csomópontnál, és a többi esetben 1-et, megfelel  $n$  sajátértéknek. A csak egyesekből álló  $e$  vektor 0 sajátértéknek felel meg. Ha  $x$  egy sajátvektor, mely  $\lambda$  sajátértéknek felel meg,  $0 < \lambda < n$ , akkor  $x$  ortogonális mind  $y$ -ra és  $e$ -re, és ezért ortogonális  $x-e$ -re. Ezért  $x_j = 0$ .

Emiatt van az, hogy azon sajátértékek száma, melyek kisebbek, mint  $n$  (többszörösséget belevéve), nem lesz több mint azon csomópontok száma, melyek fokszáma kisebb, mint  $n-1$ , és mert  $n$  többszörössége legalább egyenlő azon csomópontok számával, amelyek fokszáma  $n-1$ . A 0 többszörössége egyenlő az összefüggő komponensek számával.  $n$  többszörössége egyenlő a komplementben levő összefüggő komponensek számával.

Mivel egy gráfban azok a csomópontok, melyek fokszáma  $n-1$ , pontosan a komplement izolált pontjainak felelnek meg, azt kapjuk, hogy a szigorúan 0 és  $n$  közötti sajátértékek teljes száma (a többszörösséget is beleszámolva) pontosan megegyezik azon csomópontok számával, melynek fokszáma bezárólag 1 és  $n-2$  között van.

Az egyesítési és az összekapcsolási műveletek megőrzik az „integralitást” (lényeges hozzátartozást). Azaz, ha  $G_1$  és  $G_2$  -nek csak a spektrumán belül van egész száma (integerje), akkor ugyanez elmondható ezekről is:  $G_1 \vee G_2$  és  $G_1 \cup G_2$ . Merris megfigyelte, hogy bármely gráfnak, amely kifejezhető izolált csomópontok egyesítéseinek és összekapcsolásainak sorozataként, csak integrál sajátértékei lesznek; úgy hivatkozik ezekre, mint *felbontható* gráfokra. A felbontható gráfok számára 1 és  $n-2$  közötti fokszámú csomópontok száma megadja az 1 és  $n-1$  közötti sajátértékek számát. Az összefüggő felbontható gráf esetében  $\lambda_2 \geq 1$ . A gráfok ezen osztályánál  $\lambda_2$  korlátos 0-tól eltérően, mivel az összefüggő felbontható gráfok úgy lettek felépítve, hogy a végső művelet egy összekapcsolás volt, ami azt jelenti, hogy egy erősen összefüggő gráf az eredmény. [181]

#### 4.1.5. Sajátértékek korlátai

Anderson és Morley [122] adta meg  $\lambda_2$  első korlátait:

$$1.5.1. \text{ Tétel. } \lambda_n \leq \max_{i \sim j} (d_i + d_j). \quad (41)$$

Egy gráf Laplace spektruma és annak komplementje közötti kapcsolatot felhasználva, leírható, hogy:

$$\lambda_2 \geq \max_{i \sim j} (d_i + d_j) - (n - 2). \quad (42)$$

Ehhez hasonló szellemben Li és Zhang [123] megmutatta, hogy

$$1.5.2. \text{ Tétel. } \lambda_n \leq 2 + \sqrt{(d_i + d_j - 2)(d'_i + d'_j - 2)}, \quad (43)$$

ahol  $d_i, d_j$  annak az élnek a végpontjainak a fokszáma, amely a legtöbb szomszédos csomóponttal rendelkezik, és  $d'_i, d'_j$  annak az élnek (az előző élt nem beszámítva) a végpontjainak a fokszáma, amely a következő legtöbb szomszédos csomóponttal rendelkezik.

Merris [124] a következő korlátot állította fel:

$$1.5.3. \text{ Tétel. } \lambda_n \leq \max_{i \sim j} (m_i + d_j), \quad (44)$$

ahol  $m_i$  az  $i$  csomópont összes szomszédjának átlagos fokszámát adja meg.

Li és Zhang [125] tovább fejlesztették:

$$1.5.4. \text{Tétel. } \lambda_n \leq \max_{i \sim j} \frac{d_i(d_i+m_i)+d_j(d_j+m_j)}{d_i+d_j}. \quad (45)$$

Az  $L = II^T$ , ahol  $I$  egy irányított csomópont-él illeszkedési mátrix. Az  $II^T$  és  $I^TI$  ugyanazokon a nem-nulla sajátértékeken osztoznak. Tehát  $\lambda_n$  az  $I^TI$  legnagyobb sajátértéke. Mint ismeretes  $I^TI$  legnagyobb sajátértéke nem nagyobb  $I_+^T I_+$  legnagyobb sajátértékénél, ahol  $I_+$  egy irányítatlan csomópont-él illeszkedési mátrix (amelynek bemenetei az  $I^TI$  megfelelő bemeneteinek az abszolút értéke). Kiszámítható, hogy  $I_+^T I_+ = 2U + B$ , ahol  $B$  az eredeti gráf élgráfjának a szomszédsági mátrixa. Vegyük  $y$  vektort  $m$  komponenssel, ahol  $m = |E(G)|$ . Ekkor azt kapjuk, hogy:

$$\lambda_n \leq \max \frac{((2U+B)y)_u}{y_u}. \quad (46)$$

Ha  $x_u = d_i + d_j$ , ahol  $u$  él  $i$  és  $j$  csomópontokat kapcsolja össze, akkor a következőt kapjuk:

$$\begin{aligned} ((2U+B)y)_u &= 2(d_i + d_j) + \sum_{a \sim i} (d_i + d_a) - (d_i + d_j) + \sum_{b \sim j} (d_j + d_b) - (d_j + d_i) \\ &= d_i^2 + \sum_{a \sim i} d_a + d_j^2 + \sum_{b \sim j} d_b \\ &= d_i(d_i + m_i) + d_j(d_j + m_j) \end{aligned} \quad (47)$$

A  $d_i m_i$  mennyiséget a csomópont 2-fok(szám)ának nevezték el, mivel a csomópontból eredő 2 hosszúságú utak számát adja meg. [181]

## 4.2. Big Data a KIF elosztóhálózati üzemirányításban

A disszertációmban a KIF elosztóhálózaton fellépő hiba lokalizálására egy algoritmust fejlesztettem ki korszerű Big Data technológia alkalmazásával. A közeljövőben a jelenlegi fogyasztásmérők smart érzékelővel ellátott fogyasztásmérőkre lesznek kicserélve. Ez megnyitja annak a lehetőségét, hogy meghatározott időközönként (a pilot programban jelenleg negyedóránként) információt küldjön az okos fogyasztásmérő az áramszolgáltatóknak. Ebből megállapítható, hogy még akkor is, ha csak az ELMŰ-ÉMÁSZ fogyasztók számára vetítve számolunk, akkor normál üzemmód mellett – ami nagyságrendileg 2,5 millió fogyasztót jelent – igen nagy mennyiségű adat fog beérkezni az adatfeldolgozó központba. Az előremutató új technológiákat érdemes beépíteni a fejlesztési elképzeléseinkbe.

A Big Data kifejezést azok a tudományok hívták életre, amelyek a 2000-es években elsőként tapasztalták meg az információrobbanást: a csillagászat és a genomika. Napjainkra azonban a fogalom már szinte valamennyi emberi tevékenységre elmondható. A Big Data fogalmának nincs merev definíciója: „a Big Data olyan dolgokra utal, amelyeket csak nagy léptékekben tehetünk meg ahhoz, hogy segítségükkel olyan új felismerésekre jussunk, vagy új értékformákat hozunk létre, amelyek átrendezik a piacokat, a szervezeteket, az állampolgárok és a kormányok viszonyát és még sok minden mást.” [126, 127].

A döntéshozók – legyen szó gazdasági társaságok vezetőiről vagy üzemirányító diszpécseréről – a döntéseiket csak megfelelő információk alapján tudják optimálisan meghozni. Ezen információ-éhség kielégítésében ma már egyre nélkülözhetlenebb segítség a Big Data eszköztára akkor, ha nagy mennyiségű, nagy sebességgel változó és nagyon változatos adatok feldolgozására van szükség (lásd később: V3, V4, és V5) [126, 128].

Habár a KIF üzemirányításban jelenleg még nem beszélhetünk arról, hogy nagy mennyiségű adatokat kellene kezelni [129], az előző fejezetekben ismertetett trendeknek eredményeképpen a közeljövőben a mai állapotnak gyors változása várható. Amennyiben a smart érzékelők megjelennek, úgy milliányi fogyasztási helyről származó on-line információ válik majd elérhetővé. Ezen adattömegegrel kapcsolatos feladatok nem csak a fogyasztási helyeken történő előállítás és a központok felé továbbítást jelentik, hanem az adattömeg átalakítását is, amely által az adatok az üzemirányító diszpécserek számára könnyen és gyorsan értelmezhető üzenetként jelennek meg.

Ez a ma már használatos Big Data módszerek alkalmazásával lehetséges, amit jól példáz az IBM Big Data infrastruktúrára vonatkozó filozófiája, mely szerint „az okos rendszereket megalapozó Big Data infrastruktúrának a következő alapvető tulajdonságokkal kell bírnia:

1. Skálázhatóság: a keletkező és feldolgozandó adatmennyiség minden bizonnyal növekedni fog, a feladatok és az algoritmusok bonyolultsága fokozódik.
2. Párhuzamosság: párhuzamos feldolgozás javítja a rendszerek teljesítményét. Arra is fel kell készülni, hogy az eredményekhez egyszerre többen, több helyről, többféle eszközön akarnak hozzáférni.
3. Gyorsaság: az idő fontos tényező. Nem mindegy, hogy az adatok keletkezése és a beavatkozás között mennyi idő telik el. Az infrastruktúra komponenseit és azok együttesét az elvárt reakcióidőnek megfelelően kell megtervezni.
4. Optimalizálás: a sebesség mellett a költségek és más tényezők is kiemelt fontossággal bírnak. A jó infrastruktúra képes a rajta futó műveleteket ezek figyelembe vételével optimalizálni.” [20]

E tulajdonságokat követik le, a Big Data világában a V3, V4 vagy V5-ként ismert tulajdonság együttesek is, amelyek együttesen a Big Data módszerek jellemzőiként definiálhatóak:

V3: méret (volume), gyorsaság (velocity), változatosság, sokoldalúság (variety),

V4: V3+érték (value),

V5: V4+igazságérték, megbízhatóság (veracity)

Az áramszolgáltatók pilot projektekből már tesztelik a smart érzékelők használhatóságát. Ez méretében igen kiterjedt, on-line adathalmazt fog generálni. Az adathalmaz igen változatos lehet, melynek sokoldalúsága és sokrétű felhasználhatósága közismert [130]. Az adatok értékteremtő, a hálózati minőséghez való hozzájárulását és a vállalati szempontból meghatározó profit termelő képességét a jelen disszertációban bizonyítom. Mindez azonban csak akkor valósul meg, ha olyan smart érzékelőket használunk amelyeknek a mérési- és távjelzési megbízhatósága igen nagy.

A smart mérők, smart érzékelők nagy elterjedtségét tekintve a keletkező adatok feldolgozására jól használható, komplex algoritmus kidolgozására van szükség. Az adatok tulajdonságai miatt ezt (V3/V4/V5) Big Data módszerekkel érdemes megvalósítani [131].



## 5. A HIBALOKALIZÁCIÓS ALGORITMUS KIFEJLESZTÉSE: FAULT LOCATION DETERMINATION ALGORITHM (FLDa)

Az üzemzavar kiterjedtségének és pozíciójának meghatározásához kifejlesztettem egy hibalokalizációs algoritmust: **Fault Location Determination Algorithm (FLDa)**. Az algoritmus bemenő adatként a kisfogyasztói smart érzékelőkből kapott információkat használja fel. Az algoritmus alkalmazásával csökkenthető a hibafeltárási idő hossza, és ezáltal hatékonyabbá tehető a hibaelhárítás folyamata.

Az algoritmus futtatásához létrehoztam a KIF topológiához rendelt hibaválószerűségi adattárat, amelyen az algoritmus működését teszteltem.

A továbbiakban a hibaválószerűségi adattár és az FLDa algoritmust mutatom be.

### 5.1. A KIF elosztóhálózati topológiához rendelt hibaválószerűségi adattár létrehozása

A hibaválószerűségi adattárat az ELMŰ-ÉMÁSZ áramszolgáltató társaság által a rendelkezésemre bocsátott valós hálózati adatokból képeztem. Ez tartalmazza a GIS alapú térképet (EÉGIS) támogató adatbázist [136], illetve mindazon villamos hálózati elemeket, amelyek szükségesek és elégségesek a kiefeszültségű elosztóhálózati hiba lokalizációjához (lásd 3. fejezet). Ebből az adatbázisból a Big Data elemzés alkalmazásával létrehoztam a hiba lokalizációhoz szükséges hibaválószerűségi adattárat. Az adattár az elosztóhálózat topológiájának megfelelően a hálózat azon elemeit tartalmazza, amelyek a potenciálisan meghibásodó eszközöket jelölik: transzformátorok, elosztószekrények, fogyasztók, kábelek és a valós hálózat elemeket reprezentálják.

A továbbiakban a kiefeszültségű villamos elosztóhálózatot – a topológiája alapján – gráfként értelmeztem. A csomópontok a lehetséges hibahelyeket, a kapcsolatok a szabadvezetékeket vagy a kábeleket modellezik. A gráf matematikai leírása az alábbi.

Legyen  $G(V_G, E_G, c_G, l_G)$  egy irányítatlan gráf, ahol

$V_G$ : a  $G$  gráfon értelmezett csomópontok halmazát jelöli,

$E_G$ : a  $G$  gráfon értelmezett élek halmazát adja meg,

$c_G: E_G \rightarrow V_G^*$  egy kapcsolati függvény és

$l_G: E_G \rightarrow \lambda$  címkező függvény az olyan élek esetében, ahol teljesül az

$$l_G(e) = \text{abs}(c_G(e)) \quad (48)$$

minden  $e \in E_G$ -ben.

A  $V$  (Vertex) csomópontok neveket kaptak a valós fizikai rendszer elemeinek megfelelően.  $V_j$  a gráf  $j$ -dik csomópontja, ahol  $j=1, \dots, n$ , ahol  $n$  az élek számát jelöli.

A  $V_G$ -ben lévő  $V$  csomópont izoláltnak tekintendő, ha semmilyen élhez nem kapcsolódik, vagy más él nem kapcsolódik hozzá [19].

Az  $E$  (Edges) a csomópontokat összekötő éleket jelöli.  $E_i$  az élek száma,  $i=1,\dots,m$  mivel fa gráfról van szó és ezért az élek száma  $E=n-1$ .

$I$  jelöli a  $G$  gráf incidencia mátrixát, illetve mivel a csomópontok és az élek illeszkedéséhez viszonyítjuk a problémát, így a kombinatorikus Laplace számítása:  $L=I*I'$ . A Laplace mátrix egy négyzetes valós mátrix, nem pozitív. A diagonálison kívüli bemenetek és a sorok összege nulla. Minden egyes diagonális bemenet,  $L(j,j)$ , a  $j$  csomópont fokszáma által megadott fokszám  $(G,j)$ . Az  $L$  diagonálison kívüli bemenetei a  $G$ -ben lévő éleket mutatják úgy, hogy  $L(i,j) = L(j,i) = -1$  ha  $i$  és  $j$  csomópont között van egy él, különben,  $L(i,j) = L(j,i) = 0$ . [112]

Ha egy mátrix összekapcsolt egy súlyozott irányítatlan gráffal, akkor egy közönséges Laplace gráf mátrix generálódik. A standardizált Laplace mátrix olyan Laplace mátrix, ahol a diagonálison kívüli bemenetek nem haladják meg  $1/n$ -et, ahol  $n$  a mátrix rendje [122].

A gráf csomópontjaihoz rendelt adatokat a 3. táblázat szemlélteti (a megjelenítés az eredeti táblázatnak egy részét mutatja).

A csomóponti tábla (3. táblázat) első oszlopa (Egyedi azonosító ID) az egyes csomópontok egyedi azonosítóját tartalmazza az eszköz hálózatban betöltött funkciója szerinti rövidítését felhasználva (pl. KOF - a középvezettségű elosztóhálózat, TR - transzformátor stb.).

Egyedi azonosító (ID)	Kategória	Bemenő élek száma	Kimenő élek száma	Fokszám	Súly	Smart érzékelő
KOF	Middle Voltage Network	0	3	3	0,9	0
TR1	Transformator 1	1	3	4	0,9	1
TR1E10	Swich Board	1	2	3	0,7	1
TR1E100	Swich Board	1	3	4	0,7	1
TR1E11	Swich Board	1	3	4	0,7	0
TR1E15	Swich Board	1	4	5	0,7	1
TR1E16	Swich Board	1	1	2	0,7	1
TR1E21	Swich Board	1	4	5	0,7	1
TR1E26	Swich Board	1	3	4	0,7	0
TR1E30	Swich Board	1	2	3	0,7	0
TR1E31	Swich Board	1	2	3	0,7	0
TR1E34	Swich Board	1	3	4	0,7	1
TR1E35	Swich Board	1	1	2	0,7	1
TR1E36	Swich Board	1	1	2	0,7	1
TR1E37	Swich Board	1	1	2	0,7	0
TR1E9	Swich Board	1	3	4	0,7	1
TR1H12	House	1	0	1	0,4	1
TR1H13	House	1	0	1	0,4	1
TR1H27	House	1	0	1	0,4	0
TR1H28	House	1	0	1	0,4	0
TR1H29	House	1	0	1	0,4	1
TR1H32	House	1	0	1	0,4	1
TR1H33	House	1	0	1	0,4	1
TR1H38	House	1	0	1	0,4	0
TR1H39	House	1	0	1	0,4	0

### 3. táblázat: A KIF modell csomópont táblázata, ahol:

Middle Voltage Network - KÖF hálózat; Transformator - transzformátor; Swich Board – elosztószekrény; House – ház, Bread Factory – kenyér sütőde; Mayor’s office – polgármesteri iroda; Flat - lakás

Az első oszlop a csomópont egyedi azonosítóját-, a második oszlop a csomópont kategóriáját jeleníti meg. A ki-, ill. bemenő élek számát a harmadik és a negyedik oszlop tartalmazza. Az ötödik oszlopban a csomópontok fokszámai vannak.

A kifeszültségű elosztóhálózaton előforduló lehetséges hibahelyek az adattárban, a hálózati napló alapján, a csomópont meghibásodás pedig a hálózatban betöltött szerepük szerinti súlytényezőként lettek figyelembevételre. A csomópontok *a priori* meghibásodási valószínűség [2, 133] segítségével súlyoztam – ezt tartalmazza az utolsó előtti oszlop. A súlytényezőt a normalizált 0-1 közé képeztem le.

A súlyozás kidolgozásakor az egyes berendezés kategóriáknál meghatároztam, hogy adott berendezés kategória kiesése mekkora SAIDI-ban mérhető veszteséget jelent. Ez alapján az egyes berendezési kategóriákhoz súlyértékeket, azaz *a priori valószínűségeket* ( $n_1, n_2, \dots, n_n$ ) rendeltem. A csomópontok (mint a valós eszközök – transzformátorok, elosztószekrények, fogyasztók – reprezentatív elemei) szükségszerűen további valószínűségi tényezőkkel bővíthetők.

Adott esetben az áramszolgáltatók saját maguk döntenek el és definiálják igény szerint, hogy milyen további tényezőkkel szeretnék bővíteni az adattáblát. Például tovább bővíthető üzemzavari mutatókkal (a múltira visszatekintve, a történelmiséget figyelembe véve, illetve a várható jövőbeli teherváltozást illetően). Azzal is lehet számolni, hogy az adott kifeszültségű elosztóhálózati részgráf hol helyezkedik el (város, külváros). Figyelembe kell venni, hogy érheti-e a hálózatot valamilyen külső behatás, például milyen mélyen van egy adott kábel fektetve, ezáltal ki van-e téve bármilyen behatásnak. Az is számít, hogy a környezetében mennyi automatika található, illetve fás területen van-e az adott hálózatrész (ez utóbbi tényezőt elhanyagolhatónak tekintettem mivel az áramszolgáltatók éves növényzet karbantartást végeztenek [134]). Az utolsó oszlopban a mintahálózat csomópontjaihoz szporadikusan rendelt smart érzékelők láthatók, 1-sel jelölve ott ahol van smart érzékelő és 0-val ahol nincs.

A csomópontok – berendezés típus szerinti – elnevezésével lehetségessé vált az élek azonosítása, illetve súlyozása is. Az élekhez rendelt műszaki paramétereket és a hozzárendelt *a priori* valószínűségeket ( $e_1, e_2, e_n$ ) a 4. táblázat mutatja be (a megjelenítés csak részlet a teljes táblázatból).

Él kezdőpont	Él végpont	Id	Súly	Él hossz (m)	Kötések szám	Meghibásodási valószínűség	Kábel/szabvez miatti kockázati tényező	Él életkor
KOF	TR1	0	1	1	1	0,004926108	0	11
KOF	TR2	1	1	1	1	0,007633588	0	46
KOF	TR3	2	1	1	1	0,004784689	0	21
TR1	TR1V3	3	1	245	4	0,012820513	0,6	25
TR1	TR1V4	4	1	272	5	0,25	0,6	9
TR1	TR1V2	5	1	39	0	0,00621118	0,6	49
TR1E10	TR1E16	6	1	275	5	0,011764706	0,6	38
TR1E10	TR1E15	7	1	191	3	0,003521127	0,6	45
TR1E100	TR1E11	8	1	31	0	0,003663004	0,6	49
TR1E100	TR1E10	9	1	85	1	0,008403361	0,6	4
TR1E100	TR1E9	10	1	165	3	0,111111111	0,6	57
TR1E11	TR1I41	11	2	288	5	0,004950495	0,6	30
TR1E11	TR1E26	12	1	290	5	0,003968254	0,6	46
TR1E11	TR1E30	13	1	49	0	0,003424658	0,6	45
TR1E15	TR1TH17	14	1	292	5	0,052631579	0,6	50
TR1E15	TR1TH18	15	1	288	5	0,007352941	0,6	9
TR1E15	TR1TH19	16	1	147	2	0,005681818	0,6	27
TR1E15	TR1TH20	17	1	241	4	0,004830918	0,6	37
TR1E16	TR1E21	18	1	44	3	0,004608295	0,6	56
TR1E21	TR1TH22	19	1	128	2	0,005102041	0,6	50
TR1E21	TR1TH23	20	1	275	5	0,00456621	0,6	54
TR1E21	TR1TH24	21	1	238	4	0,008849558	0,6	35
TR1E21	TR1TH25	22	1	288	5	0,005714286	0,6	35
TR1E26	TR1H27	23	1	198	3	0,027777778	0,6	52
TR1E26	TR1H28	24	1	12	0	0,052631579	0,6	2
TR1E26	TR1H29	25	1	255	5	0,003401361	0,6	54
TR1E30	TR1E31	26	1	281	5	0,011494253	0,6	24
TR1E30	TR1E34	27	1	204	4	0,005586592	0,6	2

**4. táblázat:** A KIF modell él táblázata

Az éleket tartalmazó táblázat (4. táblázat) – az él kezdő és végpont azonosító oszlopain túl (első és második oszlop) – a harmadik oszlopban az él egyedi sorszámát (ID-ja) is jelzi. Fontos tényező a kábeleket és a vezetékeket reprezentáló él hossz és a kötésszám darab [135]. Az élhosszak, az azokra vonatkozó kötésszámok, illetve az életkori adatok normalizált értékeit súlytényezőként alkalmaztam a kiértékelés során. Ezen információk az ötödik és a hatodik oszlopban látható. A kötésekből adódó meghibásodási valószínűségek pedig a hetedik oszlopban. Kockázati tényező az is, hogy egy kábel a földben fut vagy „szabadvezetéként” funkcionál. Ez a tényező a nyolcadik oszlopban szerepel. Az utolsó oszlop a vezetékek és a kábelek életkorát veszi figyelembe.

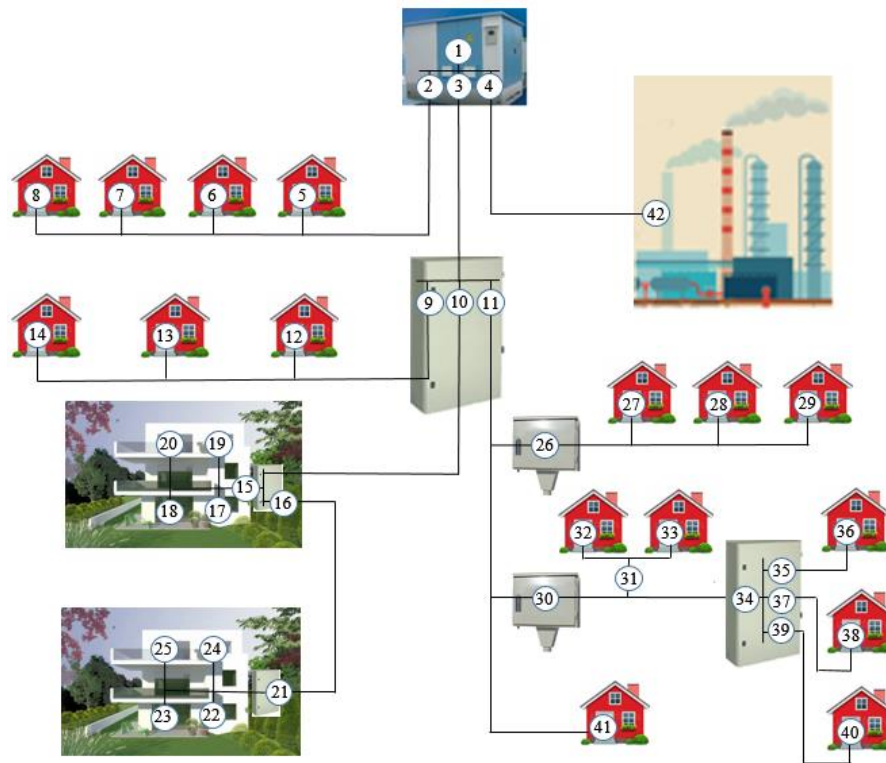
A csomópontok között lévő kapcsolatok hierarchikus (1:N) összefüggéseit szomszédossági mátrix formájában szemlélteti az 5. táblázat (a táblázat csak részmegjelenítés).

			KOF	TR1	TR1E10	TR1E100	TR1E11	TR1E15	TR1E16	TR1E21	TR1E26
MVN	KOF	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
KOF	TR1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
KOF	TR2	2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
KOF	TR3	3	0	0	1	0	1	0	0	0	0
TR1	TR1V3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1
TR1	TR1V4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1	TR1V2	6	0	0	0	0	0	0	0	1	0
TR1E10	TR1E16	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E10	TR1E15	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E100	TR1E11	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E100	TR1E10	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E100	TR1E9	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E11	TR1I41	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E11	TR1E26	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E11	TR1E30	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E15	TR1TH17	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E15	TR1TH18	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E15	TR1TH19	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E15	TR1TH20	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E16	TR1E21	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E21	TR1TH22	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E21	TR1TH23	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E21	TR1TH24	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E21	TR1TH25	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E26	TR1H27	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E26	TR1H28	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E26	TR1H29	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TR1E30	TR1E31	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5. táblázat: Szomszédossági mátrix

A szomszédossági mátrixban (5. táblázat) 1-es jelöli azt az esetet, amelyben létezik kapcsolat két csomópont között, és 0 azt az állapotot, amikor ez a kapcsolat nem adott. Ezen mátrix lehetővé teszi a gráf illetve a valós fizikai KIF rendszer elemeit illusztráló hálózati modell megjelenítését. Az adattár tartalmazza a gráf csomópontjait [132] (transzformátorok, elosztószekrények, biztosító szekrények és fogyasztók), éleit (kábelek, vezetékek).

A valós fizikai elosztóhálózatot reprezentáló KIF hálózati modell megjelenítését a 10. ábra tartalmazza.



**10. ábra:** A valós fizikai KIF rendszer elemeinek illusztrációja

A 10. ábrán a számozással ellátott körök a potenciális hibahelyeket, azaz a gráf csomópontjait (például a kiolvadt biztosítékokat), míg a köztük lévő kábelek és szabadvezetékek a csomópontok közötti kapcsolatot reprezentálják [119].

#### 5.1.1. A hibavalószínűségi adattár validálása

Az ELMŰ-ÉMÁSZ áramszolgáltató társaságtól kapott hálózati alapadatok exportálása és a hálózat újraépítése után lehetővé vált a teljes hálózat topológiai vizsgálata. Mivel a teljes hálózat több mint 2 millió fogyasztót tartalmaz, az algoritmus [137, 138, 18] kifejlesztéséhez egy mintahálózat létrehozására volt szükség. A reprezentatív minta összesíti a teljes hálózat tulajdonságait [110, 139, 140]. A KIF gráf mintahálózat megépítése után statisztikai és hálózattudományi eszközökkel ellenőriztem, hogy a mintahálózat megfelel-e a teljes hálózat tulajdonságainak.

Az ellenőrzéshez az R szabad, nyílt forráskódú adatelemző- és programozási környezetstatisztikai elemző szoftvert használtam [https://www.r-project.org/], amely a gráf tulajdonságait elemzi és jeleníti meg. Ilyen gráf tulajdonság a fogyasztók száma, ami a gráfon csomópontokként jelennek meg, a csomópontok fokszáma, a maximális fokszám, a gráf átmérője, az gráf átlagos legrövidebb távolsága, a klaszterezettségi együttható és a gráf átlagos fokszáma. Az eredményeket a 3. táblázatban foglaltam össze.

	KIF hálózati modell (10. ábra)	ELMŰ-ÉMÁSZ hálózata
Fogyasztók száma	292	2 572 147
Maximum fokszám (db)	62	1 254
Átmérő	9	36
Átlagos legrövidebb távolság	6,92	5,01
Klaszterezettségi együttható	0	0,00001
Átlag fokszám	1,993	2,017

**6. táblázat:** A modell és a valós KIF gráf hálózati tulajdonságai

„A hálózat struktúrájának számos globális mutatója közül a legtöbbször használt és egyben legegyszerűbb mutatónak az *átlagos fokszám* tekinthető. Ez azt mutatja meg, hogy a hálózat egy tagjának átlagosan mennyi kapcsolata van.” [141] A KIF gráfminta fokszáma 1,9931, míg az ELMŰ-ÉMÁSZ hálózatnak 2,017 (3. táblázat). Ez alapján mind a két hálózat klasztermérete exponenciális eloszlású [97], ami azt jelenti, hogy átlagosan egy potenciális hibahely egy vagy másik két potenciális hibahellyel van kapcsolatban.

Mivel a minta és a vizsgált ELMŰ-ÉMÁSZ hálózat átlagos fokszám értékei között – statisztikai hibahatáron belüli – csak 0,024 különbség van (6. táblázat), így kijelenthető, hogy topológiai értelemben a KIF gráfrepresentációs minta validálva van. A továbbiakban ez a minta a KIF villamos elosztóhálózati gráfmodellként alkalmazható [142]. Vannak azonban olyan csomópontok, amelyeknek lényegesen magasabb a fokszáma az átlag fokszámnál és vannak olyanok, amelyeknél ez kisebb [97]. Ahhoz, hogy a hálózatról egy pontosabb képet kapjunk a továbbiakban a *fokszámok eloszlását* használtam. Emiatt az FLDa algoritmusban a gráf Laplace spektrumát alkalmaztam [122].

## 5.2. A Fault Location Determination algorithm: az FLDa

Az FLDa algoritmus esetében, a kutatási módszereknél ismertetett elmélet alapján (lásd 4.1 alfejezet), a gráf Laplace spektrumát használtam a hibazóna behatárolására. Ezáltal meghatároztam azokat a pontokat, amelyek mentén elvágva a gráfot megkaptam a hibazónát.

### 5.2.1. Hibahely lokalizáció kiértékelés hálózati hibahely asszociációs logikai szabálya

A kisfeszültségű elosztóhálózati hibalokalizációs algoritmus működése feltétel alapszabályokon nyugszik. Ezeket *hálózati hibahely asszociációs logikai szabályok* alatt vezettem be:

1. a „szelektív hálózati védelem logika” vagyis a fogyasztótól a tápoldal felé megszakító kioldási logika (a fogyasztótól az elosztószekrényen keresztül a transzformátorig) figyelembe vétele,
2. annak a valószínűsége, hogy egyidejűleg egymástól függetlenül keletkezzen hibahely két csomópontban elhanyagolhatóan kicsi, ezért az algoritmus a két csomópont első közös kapcsolódási csomópontjára ugrik, ahol a hiba forrása található,
3. jelzések érkeznek a hibahelyről/hibahelyekről a smart érzékelőn vagy a TeleCentrumon keresztül,
4. smart érzékelővel ellátott intelligens elosztószekrények vannak a kisfeszültségű elosztóhálózatban.



### 5.2.2. Az FLDA pseudokód

Az FLDA algoritmust a következő pseudokód írja le:

---

#### Algorithm: FLDA

---

#### Procedure1: FAULT ZONE ISOLATION (Bounding Sub-graph)

---

**Input** :  $A, G(V, E, I_n, c_G, V_n, W^{Edges})$

$i=1:n;$

$j=1:n;$

$G \leftarrow$  create graph object and assign labels, weights, etc.

$x \leftarrow$  collect addresses (nodes) of smarts reporting error

$L$ : calculate graph Laplacian ( $\delta_1$ )

*// According to spectra cut edges*

**For**  $i=1:n$

**begin**

**Rule Base1:** **if**  $L(i,j) << \delta_1$  **and**  $\text{avr}(L(i',j')) < \delta_2$  **then** cut

*// delta1 and delta 2 are threshold values, avr( $L(v_i')$ ) denotes the average degree values of the neighboring nodes around  $v_i$  in  $r$  radius (here radius is considered the number of nodes and edges in each direction)*

**End**

$S \leftarrow$  subgraph by further cutting edges according to **Rule Base2** (weighting using the attributes),  $\delta_3$

$O_e$ : outer edges matrix

*// weighting each edge using normalized data*

$W^{Edge} = [ \text{length, knot/km, malfunction probability, age factor} ]$

*// from DB predefined dataset*

$A_t \leftarrow S$  // adjacency matrix for subtree

$T[\text{arrows, levels, nodes, weights, attributes}] \leftarrow$  create hierarchic tree object from subgraph  $S$

*// tree 1xm cell (m=75)*

*// From the network diagnostic point of view, with special elements, the attribute can be expanded.*

---

## Procedure2: FAULT DETECTION

---

**Input:**  $T$

$Q$  //  $Q$  dynamic matrix , assign level vector of each node from to bottom  
 // matrix of level vectors  
 // Level node number as

$l_0$   node <sub>1</sub>		...	$l_0$   node <sub>n</sub>	
$l_0$   $l_1$   node <sub>1</sub>   node <sub>1</sub>		$l_0$   $l_1$   node <sub>1</sub>   node <sub>m</sub>		$l_0$   $l_1$   node <sub>n</sub>   node <sub>1</sub>
.		.		.
.		.		.
.		.		.

//  $l_0$  top level,  $l_1 \dots l_x$  x sublevels

**If** single error **then**

S1 //step1

$Q(e1)_{k,l}$  // start from level vector of smart error signal

get  $g^{k,l} :=$  //place of smart error signal on level  $k$  node  $l$

get  $v:$  // number of error signals on level  $k$

Compare level vector of nodes on level  $k$

**If**  $v=2$  **then**  $error = g^{k-1,l-1}$  **end**

**else**

**Repeat** S1 on level  $k-1$

Out: result= $H(P)\%$

**else** (multiple error)

**repeat** S1 **until** nonvisited level

**if** Out: result= $H(P)\% \ll \delta_3$  **then repeat** S1 on

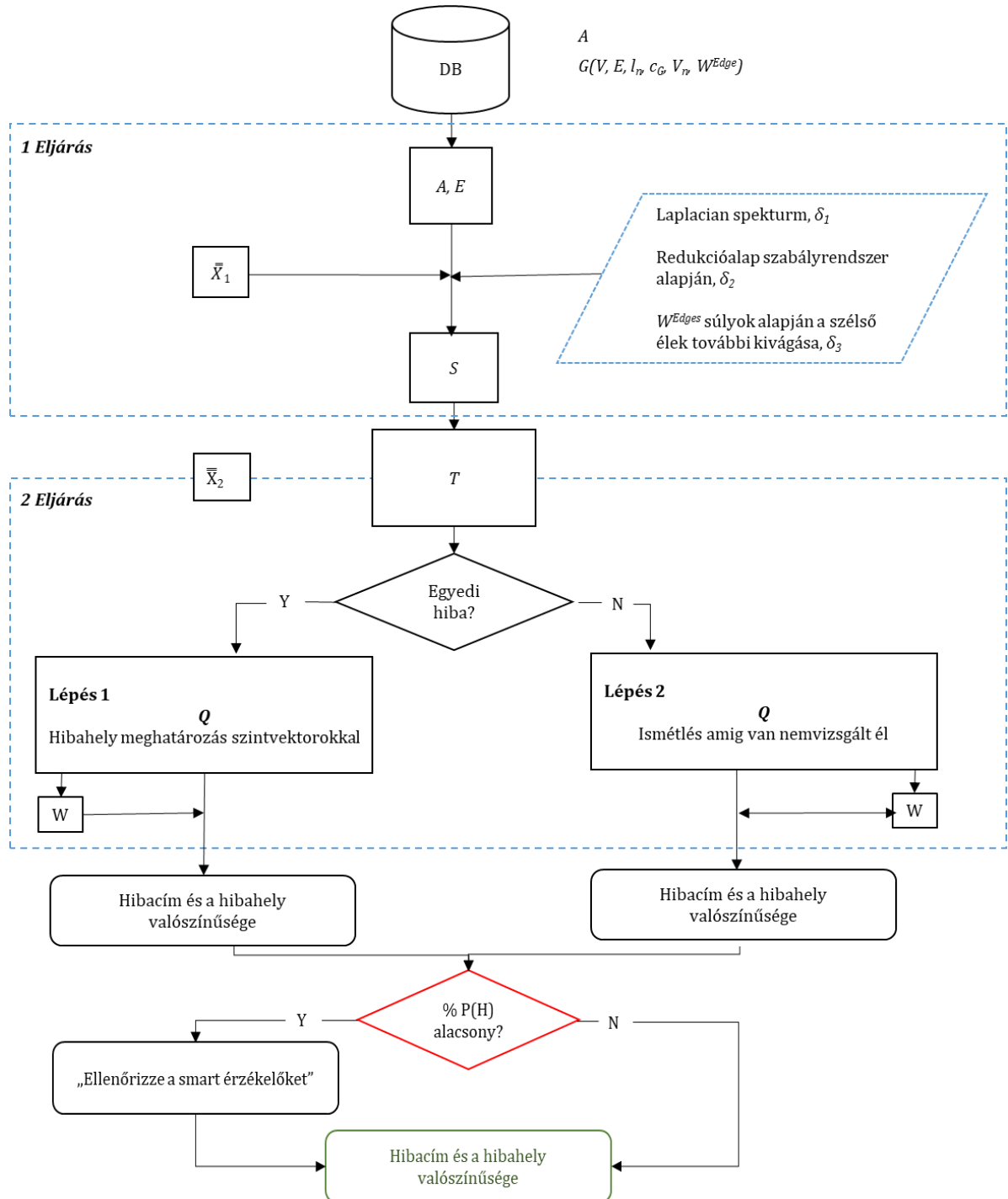
$Q'$ //extended  $Q$

Out\_new: result= $H(P)\%$

**End**

### 5.2.3. Az FLDa pszeudokód folyamatábrája

A pszeudokódban bevezetett algoritmus lépéseit a 11. ábrán bemutatott folyamatábrára teszi áttekinthetővé és szemléletessé.



11. ábra: az FLDa folyamatábra

Az FLDA folyamatábrán (11. ábra) végig követhető az algoritmus működési elve. Az algoritmus az  $A$  szomszédossági mátrixot a  $DB$  adatbázisból tölti be.

## 1. eljárás: Hibazóna behatárolása

Az  $A$  mátrix alapján az algoritmus létre hozza a  $G$  gráfot a következő gráfjellemezők és címkék illetve súlyok szerint, ahol:  $V$  a gráf csomópontok,  $E$  a gráf élek,  $I_n$  az incidencia mátrix,  $c_G$  a  $G$  gráf éleinek halmazán értelmezett kapcsolódási függvény,  $W^{Edges}$  az élek súlyait tartalmazó mátrix. Kigyűjti a smart szenzor jelzéséből a hibában érintett címkézett csomópontokat és azt az  $\bar{X}_1$  hibavektorként értelmezi.

Kiszámolja és létre hozza a hibában érintett gráf Laplace spektrumát ( $\delta_1$ ). Figyelembe veszi a beépített *rule base 1*-es számú alap szabályrendszert. Az 1 számú szabályrendszer a redukciós szabályrendszer ( $\delta_2$ ). E szabályrendszer szerint, ha  $L(i, j) \ll \delta_1$  és  $\text{avr}(L(i', j')) < \delta_2$ , akkor az algoritmus levágja ott, ahol  $\delta_1$  és  $\delta_2$  a küszöbértékek. Az  $\text{avr}(L(v_i))$  a szomszédos csomópontok átlagos fokszámértékét jelenti  $V_i$  csomópont körül  $r$  sugárban (itt a sugár a csomópontok és élek számának tekinthető minden irányban).  $\delta_1, \delta_2$ -nek megfelelően elkészíti az  $\bar{X}_2$  hibavektort.

Az  $S$  algráfon további vágóélekkel a *rule base 2*-es számú alapszabály alapján, amely a  $\delta_3$  súlyozási attribútumokra épít, megtörténik a szélső élek további kivágása. Kialakul az  $O_e$  külső élek mátrixa minden egyes él normalizált adattal. Az élekhez  $W^{Edge}$  hozzárendeli a kábelek vagy vezeték hosszúságát, a kötési darabszámokat az adott hosszokon, az ehhez a műszaki kialakításnak megfelelő meghibásodási valószínűségeket illetve a kábelek vagy a vezetékek életkorát, mint figyelembe veendő faktort. Mindezt a  $DB$  előre definiált adatkészletből használja fel az algoritmus.

Az  $A_t$  az  $S$  hibazóna részgráfjának szomszédossági mátrixa, amelyből az algoritmus létrehozza a szintvektorok megfelelő, súlyozott és attribútumokkal ellátott  $T$  hierarchikus faobjektumot. A részgráf szomszédossági mátrixa hálózatdiagnosztikai szempontból speciális elemekkel, attribútumokkal bővíthető. **1. eljárás befejezése.**

## 2. eljárás: Hibahely lokalizációja a hibazónában:

Az algoritmus betölti a  $T$  hierarchikus faobjektumot, ebből elkészíti az  $\bar{X}_2$  hibavektort tartalmazó mátrixot. Megvizsgálja, hogy egyedi vagy csoportos hiba keletkezett-e a hibafán. Abban az esetben, ha a hibafán egy fogyasztó érintett a hibában, akkor egyedi hibáról beszélünk. Ebben az esetben az algoritmus megadja a hibahelyet. Az egyedi hibahely validálásának érdekében bevezettem a *szintvektor fogalmát és eljárását*, amely által a hiba szintjén és egy szinttel feljebb ellenőriztem, hogy van-e még további egyedi hiba. Ha az algoritmus nem talál másik egyedi hibahelyet, akkor megjelöli az eredeti egyedi hibahelyet, mint hibaforrást. Ha viszont talál, akkor megvizsgálja, hogy van-e összefüggés a két egyedi hiba között vagy nincs. Ha van összefüggés a probléma forrását illetően, akkor a felettük lévő szintvektoron a két hibacím közös összekapcsolódási pontjukon lesz a hibahely és ezt jelöli meg az algoritmus hibacímnek.

Az algoritmus e verifikálási eljárását és kiértékelését az általam bevezetett *hálózati hibahely asszociációs logikai szabály* szerint végzi. Mindezen döntések eredményét a  $\bar{Q}$  dinamikus mátrix tartalmazza, amely a hibafa matematikai leírására szolgál [143, 144, 145, 146, 147] és az egyes csomópontokhoz az intelligens hiba jelszintjeitől kezdve lefelé hozzárendeli a szintvektornak megfelelő mátrixot és a szint csomópont számát. Ezt a mátrixot szemlélteti a 12. ábra.

$l_0   node_1$			$l_0   node_n$			
$l_0   l_1   node_1   node_1$		$l_0   l_1   node_1   node_m$		$l_0   l_1   node_n   node_1$		$l_0   l_1   node_n   node_p$
.		.		.		.
.		.		.		.
.		.		.		.

**12. ábra:** Szintvektor mátrix

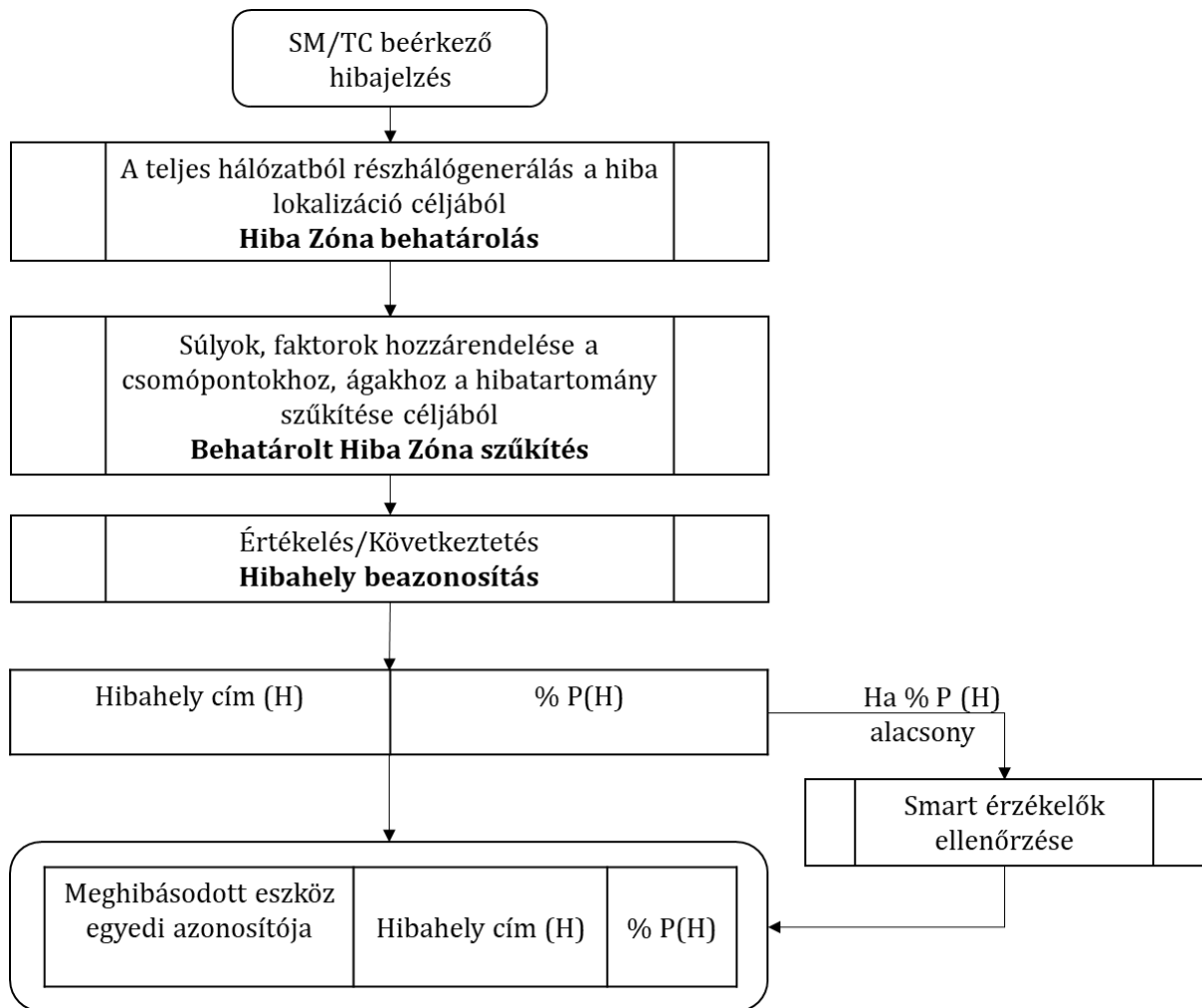
Az *S1* lépés a csomópontok szintvektorának összehasonlítása a *k* szinten lévő hibajelek számával. A kiértékeléshez elegendő az előállított *Qred* redukált szintvektor:

$$\bar{Q}red \longrightarrow l=l_0, \dots, l_{hibaszint}$$

Abban az esetben, ha egy szintvektoron két egyedi hibajelzés van, akkor a hibahely a fölöttük lévő legfelső szintvektor közös kapcsolódási pontjukon lesz a *hálózati hibahely asszociációs logikai szabálynak* megfelelően, és az algoritmus beazonosítja ezt a helyet [148]. Az *S1* összehasonlítás addig fut szintvektoronként, ameddig megtalálja azt a *k-1* szintet, ahol a meghibásodott eszköz van. Itt hozzárendeli az eszköz egyedi azonosítóját, hibacímét és a hibahely valószínűségét. Ha a hibahely valószínűsége alacsony, akkor az algoritmus a valószínűségi érték mellett küld egy üzenetet, hogy „ellenőrizd a smart érzékelőket”. Ha nem egyedi, hanem csoportos hiba van, akkor az algoritmus addig futtatja az *S1* lépést, ameddig átvizsgálja a hibafát és lokalizálja a hibahelyet, illetve az ott található meghibásodott eszközt. Ezek után hozzárendeli az eszköz egyedi azonosítóját, hibacímét és a hibahely valószínűségét. Ha a hibahely valószínűsége alacsony, akkor az algoritmus a valószínűségi érték mellett kiküld egy üzenetet, hogy „ellenőrizd a smart érzékelőket”. **2. eljárás befejezése.** Algoritmus futásának vége.

#### 5.2.4. Az FLDa eljárás folyamatábrája

AZ FLDa eljárás folyamatát a 13. ábra írja le.



**13. ábra:** Az FLDa eljárás folyamatábrája

A 13. ábrának megfelelően a smart érzékelőből beérkező hiba információ alapján az algoritmus felállítja azt a gráfot, ahonnan hibajelzés(ek) érkeztek és egyben a vele kapcsolatban lévő csomópontokat és éleket, amelyek segítségével megadja a hibazónát. Részgráfszűkítéssel további redukciókat végez, nevezetesen olyan szélső éleket vág le, amelyek nem érintettek a hibában. Beépített *szintvektor analízissel* és *hálózati hibahely asszociációs logikai szabály* alkalmazásával megtörténik a hiba lokalizációja. Abban az esetben, ha alacsony a hibacím valószínűségi mutató az algoritmus a valószínűségi érték mellett egy üzenetet küld arról, hogy „ellenőrizd a smart érzékelőket”.

### 5.2.5. Az FLDa eredménye: a hibahely attribútum tábla

Az FLDa-ból kapott eredményt (egyedi és csoportos hiba esetén is) *hibahely attribútum tábla* formájában alakítottam ki és vezettem be a 14. ábrának megfelelően, amely a hibahely jellemzőit tartalmazza.

Meghibásodott eszköz egyedi azonosítója	Hibahely cím (H)	% P(H)
--	------------------	--------

**14. ábra:** Az FLDa eredményeként kapott hibahely attribútum formátuma

A hibahely attribútum tábla (14. ábra) a meghibásodott eszköz egyedi azonosítóját, a hibahely címét ( $H$ ), illetve a hibahely megállapítás pontosságának valószínűségét  $\% P(H)$  tartalmazza. Abban az esetben, ha  $\% P(H)$  alacsony (azt, hogy milyen érték számít alacsonynak azt az áramszolgáltató határozza meg), az algoritmus küld egy hibaüzenetet a döntéshozóknak, hogy „smart érzékelők ellenőrzése”. Az alacsony valószínűségű hibahely meghatározásnak különböző okai lehetnek: nincs elég smart érzékelő a magasabb százaléku hibacím behatároláshoz, kommunikációs smart érzékelő hiba, stb.

A disszertációban bemutatott FLDa algoritmus implementálását, és szimulációs vizsgálatát a MATLAB R2017a for Win programmal valósítottam meg [149]. Ezt a 6. fejezetben ismertetem.

### 5.3. A 1. Tézis és a 2. Tézis

#### 5.3.1. Az 1. Tézis: A kifeszültségű elosztóhálózati topológiához rendelt új adattár

A kifeszültségű villamos elosztóhálózat-nyilvántartási rendszeréből származó adatokból létrehoztam egy topológiához rendelt hibavalószínűségi adattárat, amely lehetővé teszi a hibazóna behatárolását a kifeszültségű villamos elosztóhálózaton. Az adattár paramétereit a priori valószínűségekkel finomítottam, amelyek bevezetése által lehetőségessé vált a meghibásodott berendezés legvalószínűbb helyének meghatározása. [PH04][PHT06][PHTM07][PH12] [PHN15]

#### Az 1. Tézis leírása:

A kifeszültségű villamos elosztóhálózat-nyilvántartási rendszeréből származó adatokból kiindulva, Big Data elemzés alkalmazásával, Magyarországon elsőként létrehoztam egy hibavalószínűségi adattárat. Az új adattár az elosztóhálózat azon elemeit tartalmazza, amelyek a potenciálisan meghibásodó eszközöket jelölik (transzformátorok, elosztószekrények, fogyasztók, kábelek). A következő adatfeltárási- és adattár kialakítási folyamat mentén haladtam: első lépésben az áramszolgáltató nyilvántartási rendszereiben rendelkezésre álló forrás adatokat elemeztem, majd megterveztem és megalkottam az új adattár sémáját, célirányosan a hiba lokalizáció feladatnak megfelelően. Ezt követően a nyilvántartási rendszerből leválogatott és előkészített adatok adattárba való betöltésén keresztül létrehoztam az új adattárat. Az új adattár a következőket tartalmazza:

- a logikai gráf csomópontjait, amelyek a kifeszültségű elosztóhálózati rendszer elemei (transzformátorok, elosztószekrények és fogyasztók)  $LvnGraphVertex(V_i)$ , ahol  $i=1, 2, \dots, n$ , a hálózatban betöltött szerepek szerint súlyozva,
- a csomópontokhoz rendelt  $LvnGraphVertex(n_1, n_2, \dots, n_n)$  a priori meghibásodási valószínűséget,
- a csomópontok között lévő éleket,  $LvnGraphEdges(E_j)$ , ahol  $j=1, 2, \dots, m$ , továbbá
- a kapcsolatok hierarchikus (1:N) összefüggését, és
- az élekhez műszaki paraméterek (él hossz, kötegszám az élhosszon, kábel/szabadvezetés) alapján rendelt meghibásodási valószínűségeket  $LvnGraphEdges(e_1, e_2, e_n)$ .

Az új adattár tükrözi a hálózati struktúra szubsztanciális mutatóit, mint például a legtöbbször használt *átlagos fokszám* mutatót és a fokszám eloszlás reprezentálására a gráf Laplace spektrumot. Az adattár lehetővé tette a hibalokalizációs algoritmus tesztelését.



### 5.3.2. A 2. Tézis: az FLDa

Kidolgoztam egy új kifeszültségű elosztóhálózati hibahely beazonosító algoritmust (FLDa – Fault Location Determination algorithm). Az FLDa a szporadikusan elhelyezett smart érzékelők adataira és a kommunikációs csatornákon beérkező fogyasztói jelzésekre épül. Az algoritmus lehetővé teszi a kifeszültségű elosztóhálózatban fellépő üzemzavar kiterjedtségének és annak hálózaton belüli lokalizálását, automatikus detektálását. A gráfon a  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  pontos behatárolást segítő faktorokon alapuló hibazóna redukcióval, és az abból előállított hibafán szintvektor analízissel és hálózati hibahely asszociációs logikai szabály alapján az algoritmus lokalizálja a hibahelyet, így jelentősen csökkentve a hibacím beazonosítás komplex folyamatának időigényét.

[PH04][PHTM07] [P08][PH09][PHN14]

#### 2. Tézis leírása:

Az új eljárás létrehozásához a kifeszültségű elosztóhálózaton fellépő hibazóna behatárolásához készített adattárat, a logikai gráf *a priori* meghibásodási valószínűséggel felruházott csomópontjait:

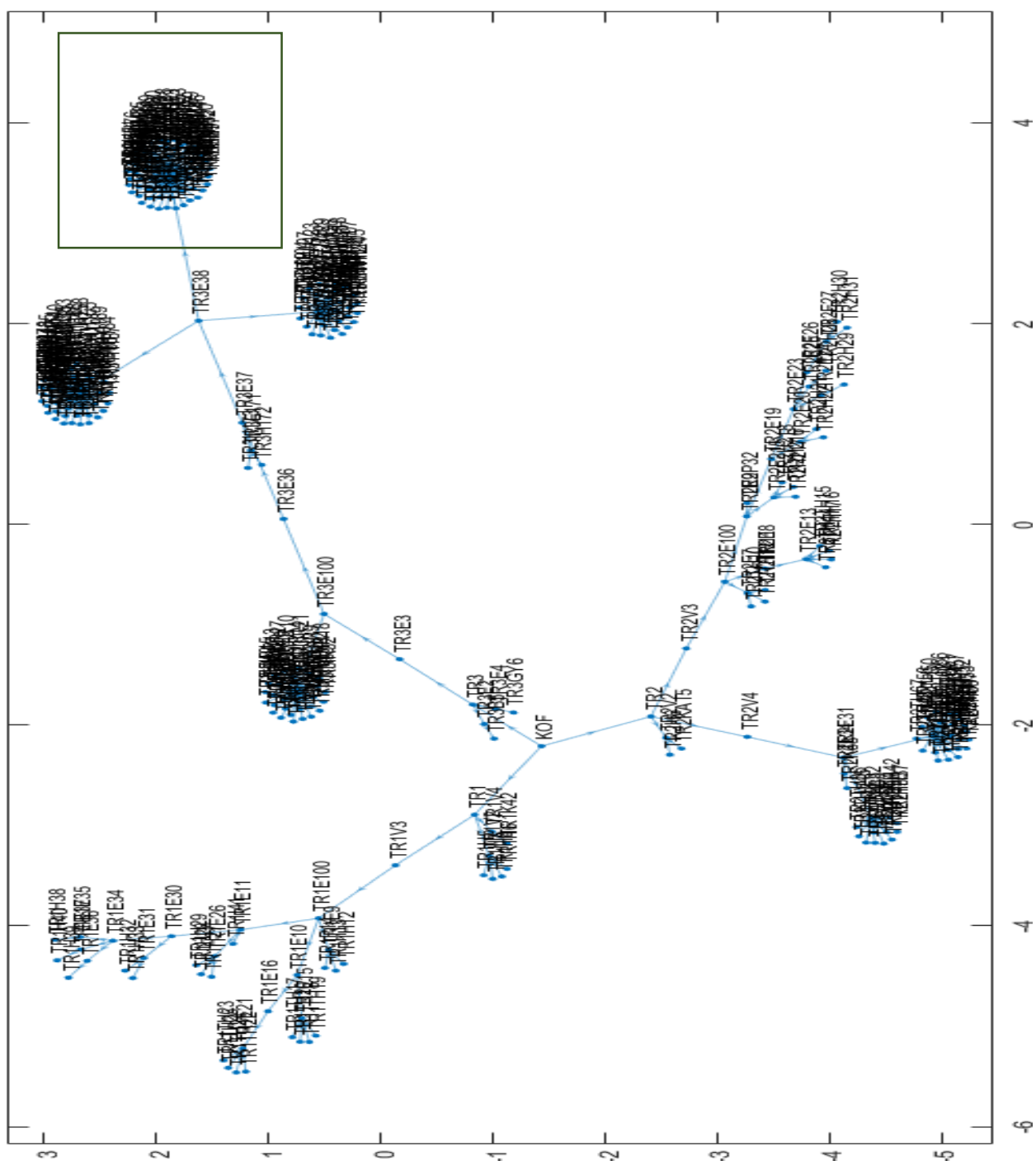
$$P(\text{Vertex}(V_i))=\{P(A), P(B), \dots P(X)\},$$

a csomópontok között lévő éleket és a kapcsolatok összefüggését (is) használtam fel ahhoz, hogy a hibahely behatárolása minél pontosabb legyen. A hálózat vizsgálata során első lépésként redukciós módszerrel leszűkítettem a topológiai mintára vonatkozó izolált enumerációs részalmaz hibateret(ket)  $(P(C,B))$ , amely a hibazóna részgráfot eredményezte. A hibazóna minél pontosabb behatárolására a  $\delta_1$ : Laplace spektrumot és a  $\delta_3$ :  $W^{\text{Edge}}$  él súlyokat használtam azért, hogy meg tudjam határozni azokat a pontokat, amelyek mentén elvágva a gráfot megkapom a hibazónát. Második lépésként szintvektoranalízist és  $\delta_2$ : Redukció alap szabályrendszert vezettem be, amelyek segítségével tovább csökkenthető a hibacím beazonosítás komplex folyamatának időigénye.

Az FLDa-ból kapott eredményt hibahely attribútum tábla formájában alakítottam ki. Ez tartalmazza a meghibásodott eszköz egyedi azonosítóját, a hibahely címét ( $H$ ), illetve a hibahely megállapítás pontosságának valószínűségét %  $p(H)$ . Alacsony hibacím valószínűségi mutató esetén az algoritmus a valószínűségi érték mellett egy üzenetet küld, hogy „ellenőrizd a smart érzékelőket”.

## 6. AZ FLDa SZIMULÁCIÓJA

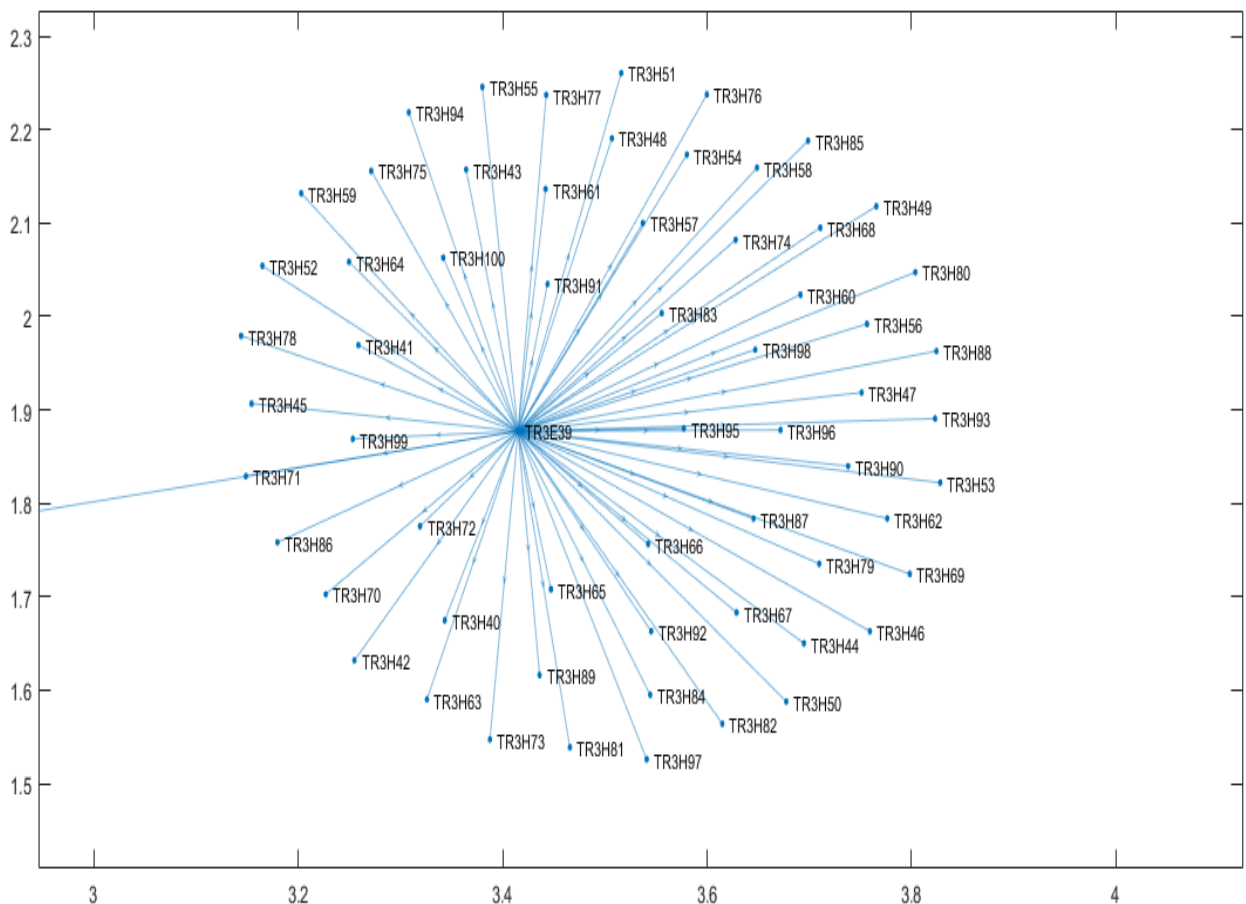
Az FLDa algoritmust a MATLAB R2017a programmal teszteltem. A tesztelésben első lépésként megjelenítettem az  $A$  szomszédossági mátrix alapján a KIF mintagráfot, aminek eredményét a 15. ábra szemlélteti. A MATLAB R2017a program segítségével az  $x$  és  $y$  koordináták léptékei beállítható és nagyságrendje változtatható a kívánt megjelenítésnek megfelelően (lásd 15. ábra, 16. ábra, 17. ábra).



15. ábra: KIF mintagráf reprezentációja MATLAB programmal

A 15. ábrán látható KIF reprezentációs modellben a csomópontok neveket kaptak a valós fizikai rendszer elemeinek megfelelően, ahol  $V_j$  a gráf  $j$ -dik csomópontja, ahol  $j=1, \dots, n$ , és  $n=292$ , ahol  $n$  az élek számát jelöli. A  $V_G$ -ben lévő  $V$  csomópont izoláltnak tekintendő, ha semmilyen élhez nem kapcsolódik, vagy semmilyen él nem kapcsolódik hozzá [19].

Ezen kívül fel van tüntetve a  $DB$  csomóponti táblából meghívott csomóponti ID, azaz a csomópontok egyedi azonosítója. A MATLAB elsődleges funkciója nem a látványos vizuális gráfmegjelenítés. Vannak cél-programok, amelyek funkciója kifejezetten a látványos gráfmegjelenítésre hívatott. Ha a célfeladat az, hogy látványtervet készítsünk egy gráfról, akkor ezek alkalmazhatók. Például a Gephy az egyik leginkább felhasználóbarát program, de van több is. Azt, hogy melyik programot alkalmazzuk, az mindig a célfeladatnak megfelelően kell kiválasztani. Jelen esetben a tudományos tesztelésen van a fő hangsúly, ezért én a MATLAB-ot választottam, amellyel célszerűen lehet rányagítani egy magasabb fokszámú csomópontra. A 15. ábrán bekeretezett csomópontot és kapcsolatainak nagyítását mutatja meg a 16. ábra.



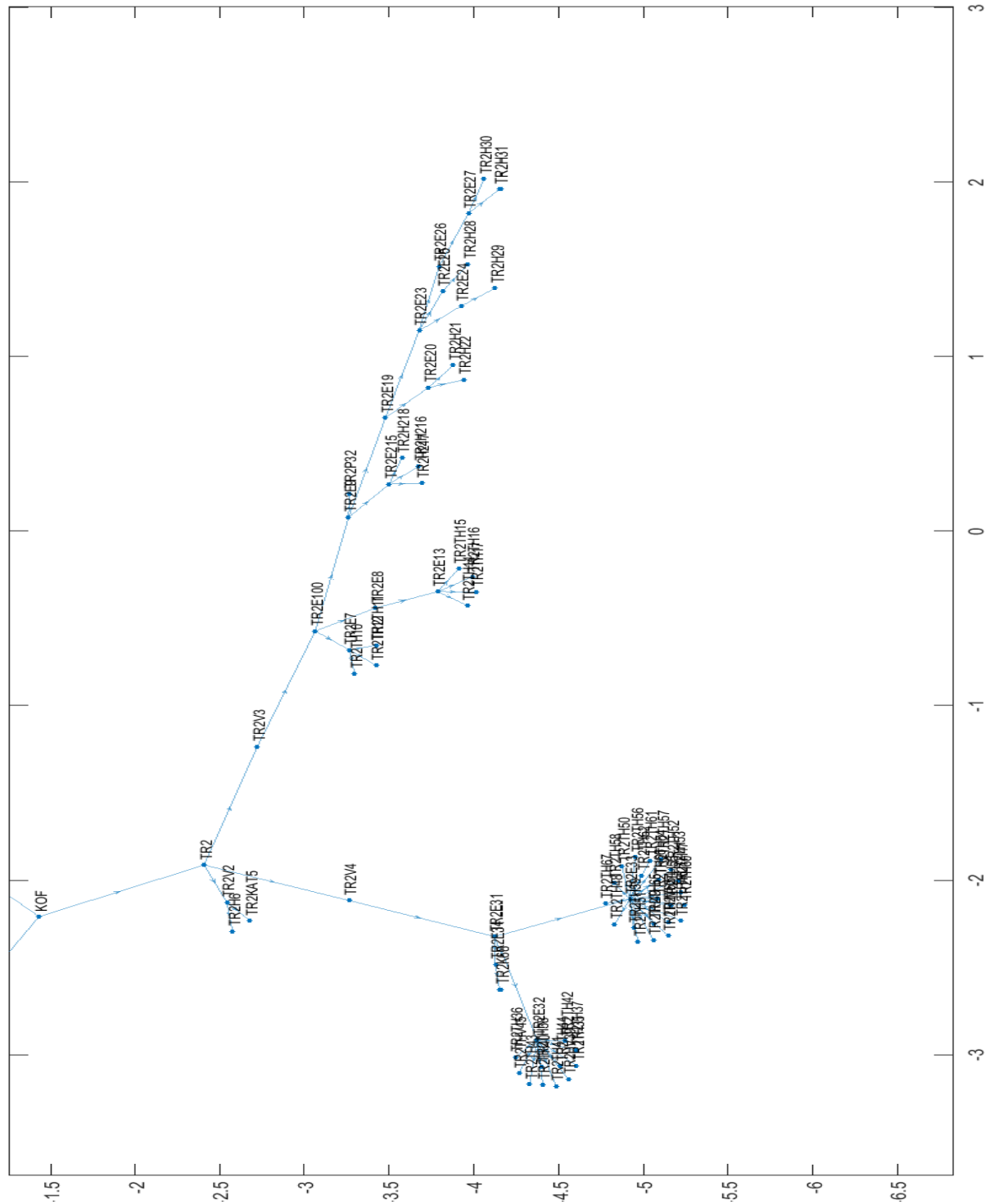
**16. ábra:** A KIF mintahálózat egy csomópontjának kapcsolatai

A példaként bemutatott nagyításban (16. ábra) nagyon szépen látszik, hogy például a TR3-nak (transzformátor3) mint csomópont az E39-en (elosztószekrény39) keresztül mely fogyasztókkal van kapcsolata és hogy ez a vonal mely fogyasztókat táplálja.

## 6.1. A hibazóna behatárolása

### 6.1.1. 1 Eljárás: a részgráf

A 15. ábrán megjelenített mintagráf elemeit szporadikusan elhelyezett smart szenzorokkal ellátva, valamint egy hibahely szimulációt alkalmazva, az 1 Eljárás, - amely a részgráfszűkítést végzi - során kapott részgráf eredményt a 17. ábra mutatja.

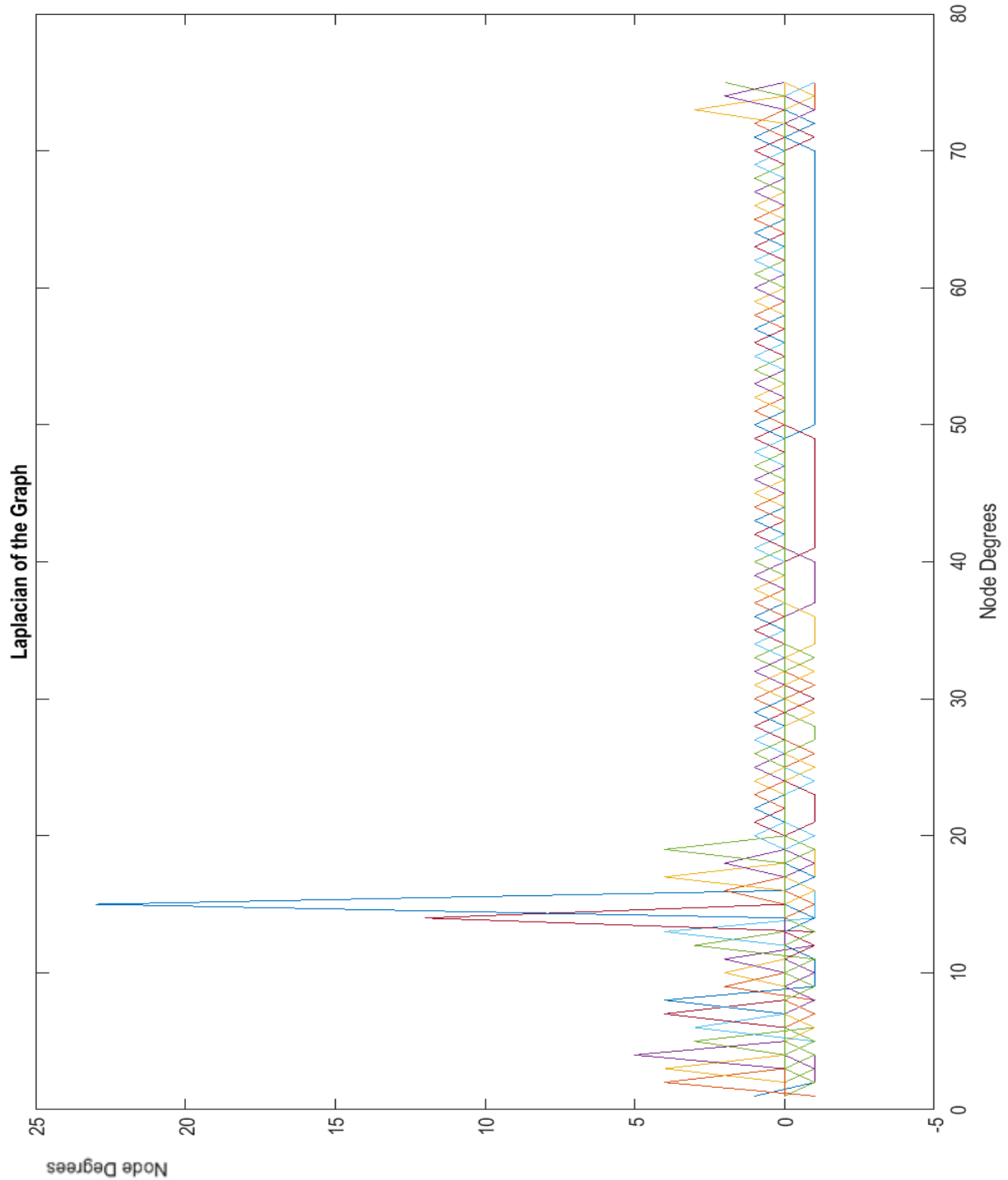


17. ábra: Hibazóna behatárolás eredménye részgráfszűkítéssel

A KIF mintagráfról hibajelzések érkeztek, amely alapján az algoritmus kivágta azon részgráfot, amely a hibában érintett (17. ábra).

### 6.1.2. A hibazóna Laplace spektruma

A szűkített hibazóna (17. ábra) Laplace spektruma [122] megadja a hibazónát és az áramkimaradásban érintett elemek – transzformátorok, elosztószekrények és fogyasztók, mint csomópontok – fokszámát. A hibazóna MATLAB alkalmazásával létrehozott szimuláció Laplace spektrumának eredménye a 18. ábrán látható.

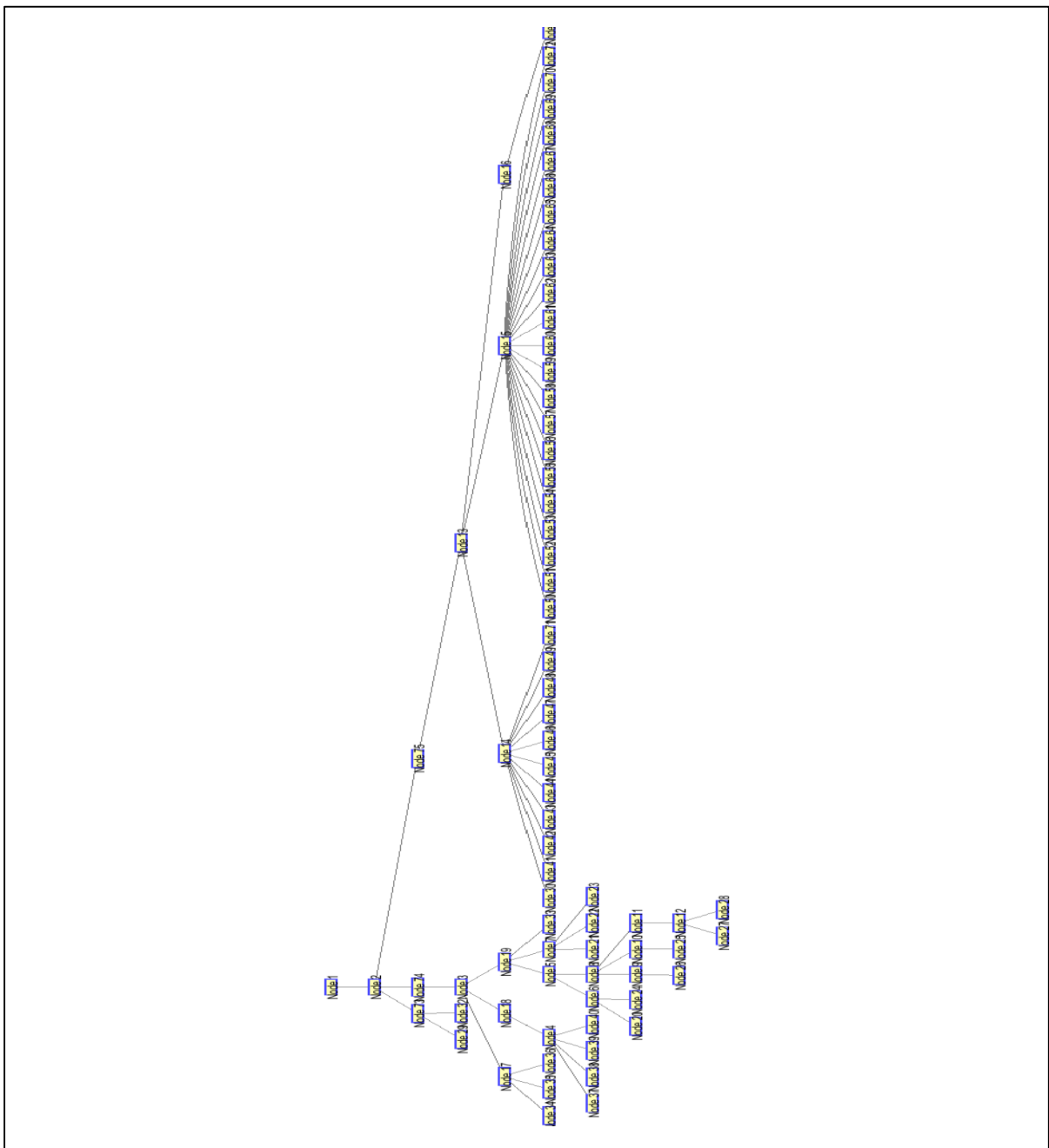


**18. ábra:** A részgráf Laplace spektruma

Az 18. ábra a csomópontok fokszám spektrumát mutatja meg. Látható, hogy a vágás után van 1 olyan érintett csomópont, amelynek 20-nál nagyobb a fokszáma, azaz húsznál több kapcsolata van, 1 olyan csomópont, amely több mint 10 kapcsolattal rendelkezik, a többi csomópontnak 1 és 5 körül mozog a fokszáma.

### 6.1.3. 2 Eljárás: a hibafa

Az FLDa algoritmus 2 Eljárás eredményeként létrehozza a Laplace spektrumnak megfelelő hibafát, amely a MATLAB-bal szimulálva a 19. ábrán látható gráfot eredményezi.



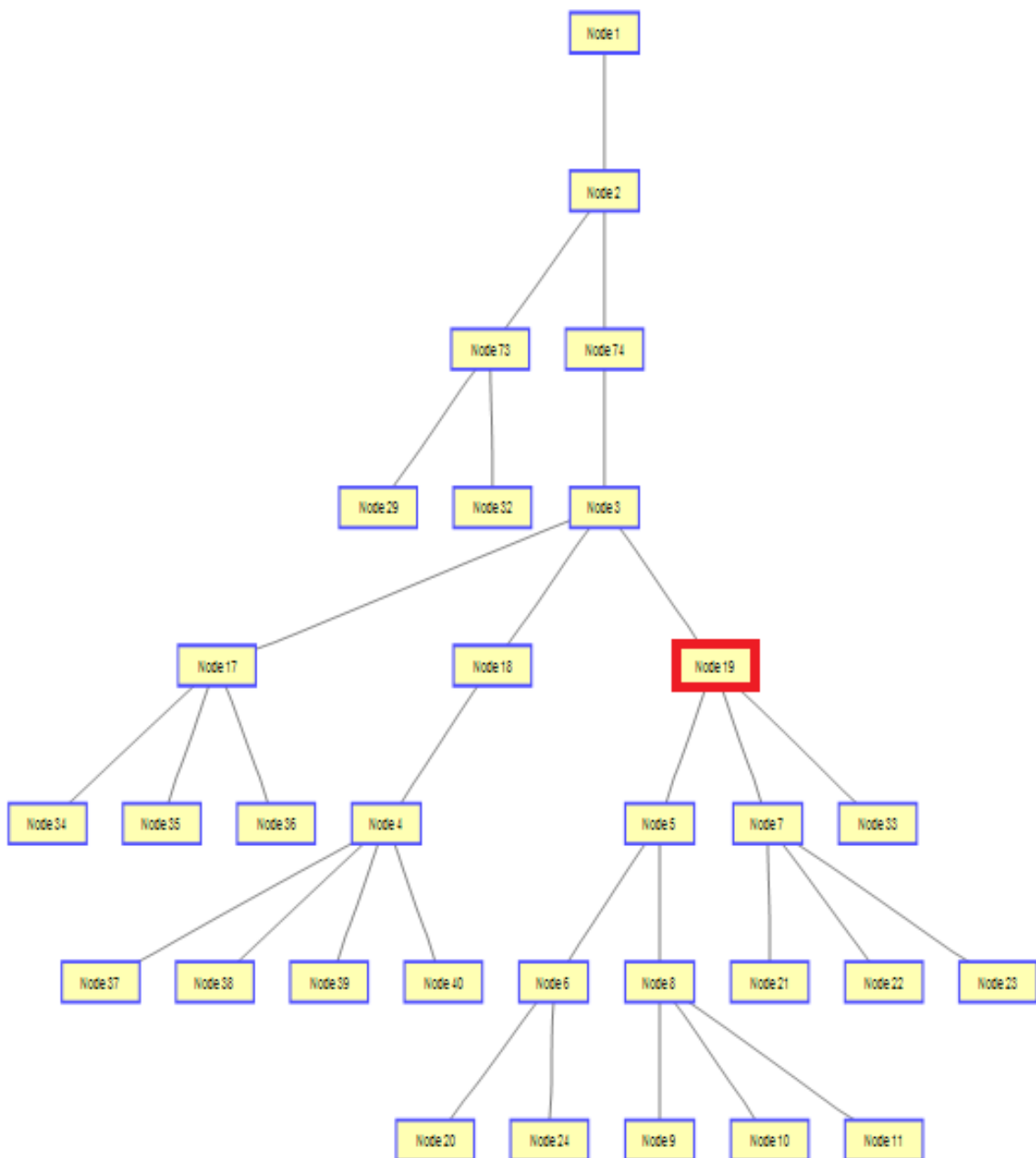
**19. ábra:** A részgráfszűkítés után megjelenített hierarchikus hibafa

A 19. ábrán a hierarchikus hibafa reprezentációja látható, amely lehetővé teszi a hiba lokalizációját.

## 6.2. A hibahely lokalizálása

### 6.2.1. Hibahely lokalizáció szimulálása

**Példa 1:** tegyük fel, hogy *egyedi* hiba van a **Node19**-ben és ezért hibajelzés van, amely az  $\bar{X}_2$  hibavektort tartalmazó mátrixban realizálódik. A  $Q$  mátrix illetve a szintvektorok felhasználásával az algoritmus hibahely meghatározás folyamatát a 20. ábrán bemutatott példa szemlélteti.



20. ábra: Példa egyedi hibalokalizációra

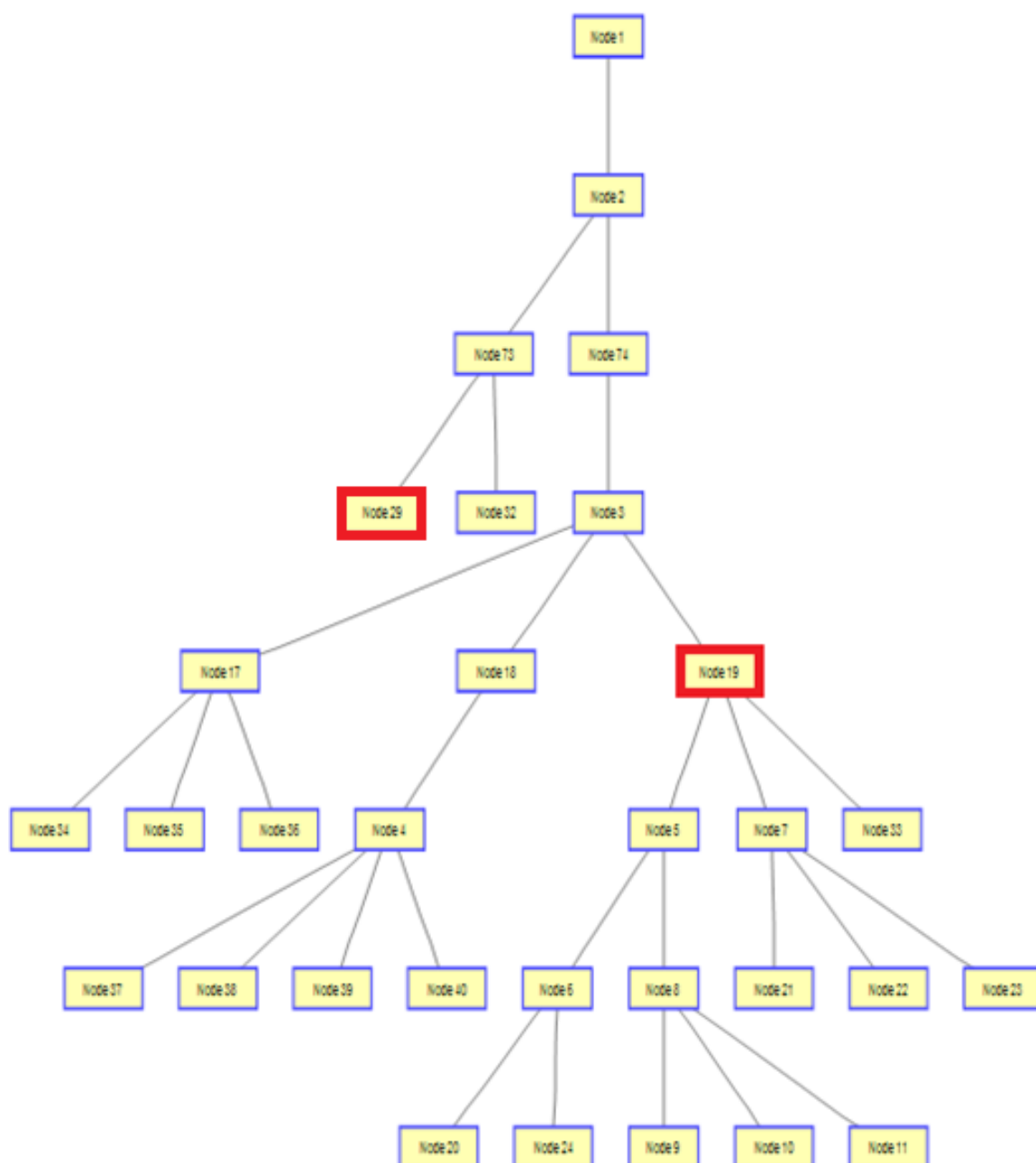
Az N19 hibahely szintvektor  $Q$  mátrixa a következőképpen alakul:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} & & & & l_0 N_1 \\ & & & & l_0 l_1 N_1 N_2 \\ & & & l_0 l_1 l_2 N_1 N_2 N_7 \\ & & l_0 l_1 l_2 N_1 N_2 N_7 \\ l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_7 N_{29} & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_7 N_{32} & & & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_7 N_3 \\ & & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_7 N_{17} & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_7 N_{18} & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_7 N_{19} \end{bmatrix}$$

A 1. példa esetén a kiértékelés az általam bevezetett *hálózati hibahely asszociációs logikai szabály* (5.2.1. alfejezet) alapján: ha csak az N19-es csomóponton lévő smart érzékelőből kapok hibajelzést, akkor egyedi hibáról beszélünk és a hibahely 100%-ban az  $l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_7 N_{19}$  hálózati hibahelynek megfelelően az N19-ben van. A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy az N19-es csomópontban egy elosztószekrény van, ahol nagy valószínűség a késes biztosító szorul cseréje.



**2 Példa:** tételezzük fel, hogy *csoportos* hiba van a **Node29** és a **Node19**-ben és onnan jön a hibajelzés, amely az  $\bar{X}_2$  hibavektort tartalmazó mátrixban realizálódik. A  $Q$  mátrix illetve a szintvektorok segítségével az algoritmus hibahely meghatározásának példáját a 21. ábra szemlélteti.



**21. ábra:** Példa csoportos hibalokalizációra

Az N29 és N19 hibahely szintvektorok  $Q$  mátrixa a következőképpen alakul:

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} & & & & l_0 N_1 \\ & & & & l_0 l_1 N_1 N_2 \\ & & & & l_0 l_1 l_2 N_1 N_2 N_73 \\ & & & & l_0 l_1 l_2 N_1 N_2 N_74 \\ l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_73 N_{29} & & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_73 N_{32} & & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_74 N_3 \\ & & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_74 N_{17} & & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_74 N_3 N_{18} & l_0 l_1 l_2 l_3 N_1 N_2 N_74 N_3 N_{19} \end{bmatrix}$$

A kiértékelés a *hálózati hibahely asszociációs logikai szabály* alapján (5.2.1 alfejezet) a különböző hibahelyek esetén (amikor egy időben az N29-ből és N19-ből is kapok hibajelzést) csoportos hiba esete áll fenn és ekkor a hiba az  $l_1$  szinten az  $l_0 l_1 N_1 N_2$  csomópontban a két hibajelzés legelső közös kapcsolódási pontján lesz.

## **7. ÚJ KIF DINAMIKUS HIBACÍM ÜTEMEZŐ RENDSZER MATEMATIKAI MODELLJÉNEK KIDOLGOZÁSA: LOW-VOLTAGE FAULT-SHEET SCHEDULING SYSTEM (LFS)**

Az új hibalokalizációs algoritmus (FLDa) hibahely attribútum táblából kapott hibahely és annak százalékos valószínűségi üzenete az áramszolgáltató hibacím ütemező rendszer számára bemenő adatként szolgálhat. A jelen technológia lehetőségeinek tudományos módszerekkel való ötvözése új megközelítésbe helyezi a meglévő ütemező rendszereket [150]. E megközelítés alkalmazása az ütemező rendszerek hatékonyságának mérését és ez által az ütemező optimális működését segíti elő [151, 152]. Az áramszolgáltatók a szerelők számára kiosztott KIF hibák javításának ütemezéséhez erre a célra kifejlesztett speciális IT támogatást vesznek igénybe. Az alkalmazott szoftvereken keresztül a mérnökök egy jól meghatározott szabályrendszer szerint osztják ki a feladatokat a szerelőknek.

A hibaütemezés optimalizálására [153] egy matematikai alapokon nyugvó hibacím ütemező rendszert (Low-voltage Fault-sheet Scheduling System, LFS system) dolgoztam ki. Ehhez szükség volt a hibacím kiosztás jelenlegi gyakorlatának feltárására és dokumentálására, valamint annak a vizsgálatára, hogy a hibahely attribútum tábla implementálásával a hibacím kiosztás folyamata miben módosul.

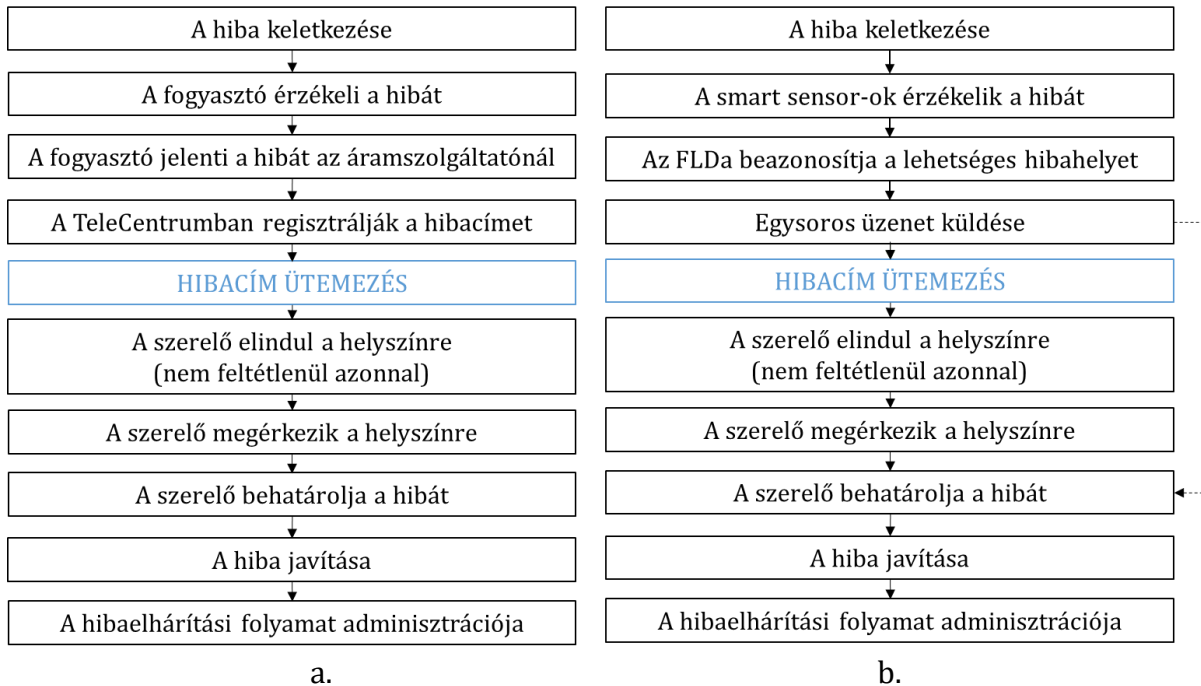
### **7.1. KIF elosztóhálózati dinamikus hibacím ütemező rendszer matematikai modellje az FLDa eredményeként kapott hibahely attribútum tábla implementálásával**

A közép és nagyfeszültségű hálózatot felügyelő üzemirányítók – jellemzően a hálózat csomópontjaiban elhelyezett mérési és távjelzési berendezések segítségével – a földrajzilag igen távoli üzemirányítási központokban is, on-line értesülnek a meghibásodásokról [154] (kivéve egyes kivételes típusú meghibásodások esetét, pl. zárlati áram nélküli háromfázisú szakadás [65]). Az üzemirányítási központokban a hiba érzékelésekor szerelőcsapatot indítanak a meghibásodás okának felkutatására és a hiba megszüntetésére. Hasonló távjelző eszközök azonban a KIF elosztóhálózaton ma még nincsenek rendszeresítve [11]. A KIF hálózaton a hibaelhárító szerelőket irányító diszpécserek csak fogyasztói telefonhívások által kapnak információt arról, hogy a hálózaton egy, vagy esetleg egy időben több áramszünet van [155]. E beérkező telefonhívásokat a telefonközpontban dolgozó munkatársak egy integrált munkairányítási rendszerben rögzítik.

Az FLDa algoritmus bevezetése, és a smart érzékelők implementálása egyes hibaelhárítási lépések manuális gyakorlatának kiváltását teszi lehetővé, ami jelentősen csökkenti a hibaelhárítás folyamatának időtartamát.

### 7.1.1. A kisfeszültségű elosztóhálózati hibaelhárítás folyamata

A kisfeszültségű villamos elosztóhálózaton keletkezett hibák elhárításának jelenleg alkalmazott és az FLDa implementálása által módosult folyamatát a 22. ábra foglalja össze.



**22. ábra:** A jelenlegi (a) és az FLDa hibahely attribútum táblával támogatott (b) KIF villamos elosztóhálózati hibaelhárítás folyamata

A 22. ábrán 1 hiba „elhárítási folyamatát” követhetjük nyomon, annak a keletkezésétől — a javításán át — a folyamat végéig, azaz az adminisztrációig [156].

A mindennapi üzemvitel során térben és időben egymástól függetlenül is keletkezhetnek hibák. Az egyidejűleg előforduló több KIF villamos elosztóhálózati hibák ütemezésének (jelenlegi és az FLDa-val támogatott) folyamatát a 23. ábra szemlélteti.



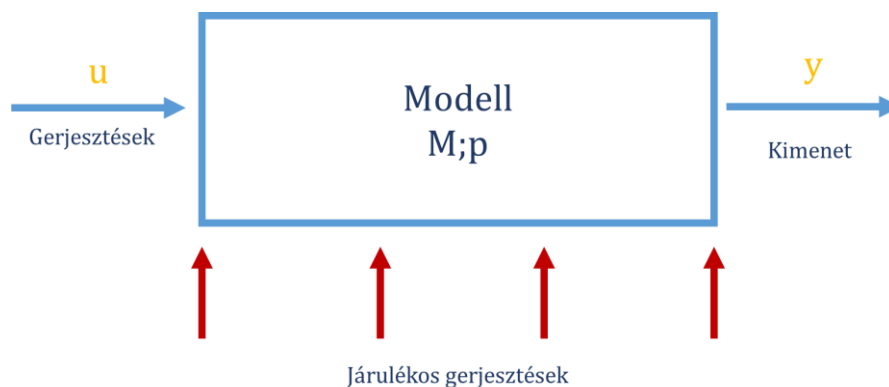
**23. ábra:** A jelenlegi és az FLDa hibalevel attribútum táblával támogatott összevont

KIF villamos elosztóhálózati hibaelhárítás folyamatának  $m$  hibacímre és  $m$  szerelőcsapatra történő kiterjesztése

A 23. ábrán a 22. (a) és (b) ábrán szemléltetett folyamatok összevonása látható. A rendszer azt írja le, hogy  $m$  hiba keletkezhet egyazon kiefeszültségű villamos elosztóhálózati rendszerben egymástól függetlenül és az  $m$  független szerelőcsapat számára kerül kiosztásra. Az azonos számú hiba és szerelő megadása ( $m \times m$ ) szimmetrikus elrendezést eredményez.

### 7.1.2. Az LFS rendszerelméleti megközelítése

A hibaütemező rendszer egy mérnöki rendszer, amely egy egyszerűsített matematikai modellel írható le. A modellre a rendszerelméletet alkalmazom, és ennek segítségével szemléltetem a rendszerben lejátszódó folyamatokat leíró egyenleteket, amely figyelembe veszi a kezdeti- és peremfeltételeket (24. ábra) [29, 157].



**24. ábra:** Egyszerűsített általános matematikai modell egy mérnöki probléma megoldására [29, 158]

$u$  - input gerjesztések,  $M$  - modell,  $p$  - a modell paraméterei,  $y$  - kimenet

Az LFS matematikai modelljét a 25. ábra tartalmazza.



**25. ábra:** A javasolt kiefeszültségű hibacím ütemező rendszer (LFS) egyszerűsített matematikai modellje

A 25. ábrán bemutatott LFS rendszer egyik bemenete a KIF hibacímek paraméterezett mátrixa ( $H$ ) [159]. E mátrix sorai az egyes hibacímeket, míg oszlopai az adott hibához tartozó  $k$  paramétereket tartalmazza (lásd később részletesen: 7.2. fejezet). Ilyen paraméterek lehetnek például a hibacím földrajzi elhelyezkedése, a hiba magas prioritású, esetleg baleset-, vagy életveszélyes jellege, a kiesett berendezés azonosítója vagy a kiesett fogyasztók száma (egy vagy több).

A másik bemenet a szerelőcsapatok paraméterezett mátrixa ( $B$ ) [160]. E mátrix sorai az egyes szerelőcsapatokat, míg oszlopai az adott szerelőcsapat  $k$  paramétereit tartalmazza (lásd később részletesen: 7.2. fejezet). Ilyen  $k$  paraméter lehet a szerelőcsapat földrajzi elhelyezkedése, a szerelőcsapat létszáma [161], a szerelők képesítései és helyismereti vizsgálói [162], továbbá a rendelkezésre álló eszközök [163].

Az LFS rendszermodell kimenete az ütemezés dinamikus eredmény mátrixa ( $E$ ). E mátrix sorai a szerelőcsapatok, oszlopainak elemei pedig a számukra kiosztott hibacímeket tartalmazzák. Az LFS rendszer feladata az egyes hibacímek eredmény mátrixba történő kihelyezése és az optimális hibacím ütemezés kialakítása [164].

### 7.1.3. Az LFS hibacím ütemező rendszer tulajdonságai

Az LFS rendszer tulajdonságait a rendszerelmélet segítségével fogalmaztam meg [29, 165]:

1. Aktív, mivel az ütemezés dinamikus eredmény mátrixát nem csak a bemeneti paraméterek, hanem a belső paraméterek is befolyásolják.
2. MIMO – „Multiple Input, Multiple Output” – azaz többszörös bemenettel és többszörös kimenettel rendelkezik, mivel a rendszer aktív, azaz több gerjesztésű (lásd: 25. ábra) és nem írható le egyetlen skalár kimeneti változóval (a bemenet két, míg a kimenet egy mátrix, lásd: 25. ábra).
3. PRI – „Priority” – elsőbbségi jogot alkalmaz, mivel a beérkező igényeket fontossági sorrendben elégíti ki.
4. Részben NEFO – „Nearest Expiry, First Out”, ugyanis a NEFO rendszerek sajátossága, hogy a leghamarabb lejáró szavatosságú termék elsőként kerül felhasználásra. Jelen esetben ez az áramszolgáltatókra érvényes garantált szolgáltatásokat biztosító szabályok miatt részben igaz: magasabb prioritásba kerülnek azok a címek, ahol a szabályok által megszabott elhárítási határidő vége közeledik, de nem kerül abszolút elsőleges prioritásba [166].
5. Nem lineáris, mert nem érvényesíthető a szuperpozíció elve.
6. Variáns és időfüggő, mert egy gerjesztés időbeli eltolása változó időbeli eltolást okozhat a kifeszültségű elosztóhálózati hibacím ütemező rendszerben.
7. Dinamikus (nem - memóriamentes) mivel nem időfüggetlen.
8. Komplex döntési modell, mert a bemenő paramétereken túl figyelembe veszi a járulékos és egyéb gerjesztéseket is (Munkairányítás, ÜIK, Humán tényezők).

9. Részben öntanuló a humán tényezők miatt. A diszpécserek folyamatosan fognak olyan tapasztalatokat szerezni (p. időszakos forgalmi dugók), melyek hosszabb távon elősegítik az ütemező rendszer hatékonyságát.
10. KIF elosztóhálózati üzemeltetési rendszer.

A rendszertulajdonságok feltárásával és dokumentálásával a rendszer fejlesztése hatékonyabbá tehető [167, 168].

A hibacím ütemező rendszer újszerű megközelítése által, és az optimális működésére irányuló fejlesztések eredményeként egy esetleges nem tervezett áramszünet csökkenthető, amely amellet, hogy a hálózat minőségét javítja, a fogyasztói elégedettséget is növeli.

## 7.2. A $k$ paraméter bevezetése

Egy hibacím szerelőknél történő optimális kiosztásakor számos olyan tényezőt kell szem előtt tartani, melyek a szerelők kompetenciáira, illetve a hiba jellegére vonatkoznak. Az LFS rendszerben e tényezők figyelembevételére ad lehetőséget a  $k$  paraméter bevezetése, amely a hibacím mátrixot és a szerelőegységek mátrixát határozza meg. A  $k$  paraméter kialakítása a jelenlegi ütemező rendszer működésének feltételrendszerén alapul.

A szerelőegység mátrixban szereplő  $k$  a szerelők képesítésére vonatkozik, és ehhez a  $k$  paramétert a következők megfelelően vezetem be:  $k \in [0, 1, 2]$ ,

$k=0$ , akkor, ha nincs a szerelőnek megfelelő végzettsége egy adott munka elvégzéséhez.

$k=1$ , ha az adott munka elvégzéséhez H vizsga (helyismereti vizsga) szükséges,  $k=2$ , ha az adott munka elvégzéséhez oszlopmászási képesítés is szükséges.

A biztonságos üzemeltetés és hibaelhárítás érdekében ugyanis a villamos hálózat üzemeltetésével foglalkozó villanyszerelőnek különböző jogosítványmegszerzésre van szüksége ahhoz, hogy egy adott típusú berendezéscsoport javításához megfelelő tudással rendelkezzen. E jogosítványok harmonizálva vannak a villamosenergia törvénnyel (VET), a hatályos szabványokkal (mint például az MSZ 1585 Villamos berendezések üzemeltetése) és a hatályos munkavédelmi és tűzvédelmi előírásokkal. Mindezek mellett bizonyos feladatok ellátásához speciális tanfolyamok elvégzésére és megfelelő szakmai bizottság előtti vizsgák letétele kötelező [162].

Külön képesítés szükséges például:

- speciális eszközök, kapcsolóberendezések üzemeltetéséhez,
- villanyoszlopra mászáshoz,
- meghibásodott kábel javításához,
- FAM, feszültség alatti munkavégzéshez (feszültség szintenként és technológiánként külön-külön), stb.



A szerelőegységekre vonatkozó további  $k$  paraméter például a szerelőegységek aktuális földrajzi helyzete, illetve a rendelkezésükre álló eszközök listája.

A munkahatékonyság érdekében a hibaelhárításra kiküldött szerelőcsapat kiválasztásnál fontos a hiba jellegére vonatkozó információk figyelembe vétele is. A jelenlegi üzemeltetési rendszerben a TeleCentrum munkatársai a fogyasztói bejelentéskor igyekeznek minél több olyan kérdést feltenni, amely segítségével a hiba jellege pontosan behatárolható. Ezen információk alapján határozhatók meg az adott hiba elhárításához szükséges szerelői képesítések és eszközök (például: „A szomszédjánál is tapasztalható a hiba, vagy csak Önnél?”; vagy „Csak az Önök társasházában van gond, vagy az egész utcában?”; vagy „A kismegszakítót ellenőrizte már?”).

Szempontra az is, hogy elegendő-e a feladat elvégzésére az 1 fő szerelő munkatárs. Például magasban történő munkát (pl. amikor oszlopra kell mászni) munkavédelmi szempontból egy fő szerelő nem végezhet. Így a vidéki, külvárosi egyedi hibacímekre „ilyen jellegű brigád” kiküldése nem optimális [161, 169].

A  $k$  paraméter meghatározása lehetővé teszi az optimális hibacím kiosztást, és ezzel nagymértékben hozzájárul a hibaelhárítási idő csökkentéséhez. Hiszen ha olyan szerelőnek osztják ki a hibacímet, akinél nincs megfelelő eszköz, vagy nem rendelkezik megfelelő képesítéssel, és mindez csak a helyszínen derül ki, akkor új szerelőcsapatot kell a helyszínre indítani. Mindaddig pedig a fogyasztó (vagy fogyasztók) ellátatlanok.

### 7.3. A $\beta$ rangsorolás súlyozási rendszer

Az egyidejűleg előforduló, egymástól függetlenül keletkező KIF villamos elosztóhálózati hibák jellege igen eltérő lehet. Egyes hibákban a használati melegvíz ellátáshoz szükséges áramellátásban keletkezik kimaradás (ami a vezérelt villamosenergia mérők berendezéseinek meghibásodására utal) [170, 171] míg más hibák esetében akár több utcában, esetleg kiemelt épületek, kórházak is áramszolgáltatás nélkül maradhatnak [172]. Emiatt fontos, hogy a hibák a kiosztás előtt rangsorolva legyenek [46].

A jelenlegi rangsorolási rendszert alapul véve meghatározom és bevezetem a hibacímek  $\beta$  rangsorolás súlyozási rendszerét, amelynek célja egy hatékonyabb hibacím kiosztási folyamat létrehozása.

#### 7.3.1. A hibacím rangsorolás jelenlegi szabályrendszere

A diszpécserok a hibacímek rangsorolását kötött szabályok szerint végzik [46]. Jelenleg a prioritizálás az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoporthoz az alábbiak szerint történik:

- I. Élet és balesetveszély (például leszakadt, szikrázó vezeték),
- II. Magas prioritású cím (például kórház),
- III. Magasabb üzemirányítási szintű üzemzavar (például KÖF üzemzavar),
- IV. Csoportos hiba (például egész társasházban tapasztalható fázishiány),
- V. Egyedi hiba (azaz egy fogyasztási helyet érintő szolgáltatás kimaradás).

A jelenlegi gyakorlatban a fenti prioritási sorrendet figyelembe véve a diszpécser manuálisan osztják szét a hibacímeket. Az ütemezés során a költség- és kiesési idő minimalizálásának érdekében a feladatot a hibacímhez földrajzilag legközelebb tartózkodó szerelőpáros számára adják ki, hogy az utazási idő (mely a teljes folyamatot nézve akár igen jelentős is lehet) minél kisebb részét tegye ki a teljes hibaelhárítási folyamatnak. Ez azt jelenti, hogy már ma is feltételrendszerhez kötött (pl. oszlopmászási képesség vagy helyismereti vizsga) és földrajzi távolságra optimalizált [173] hibacím kiadás valósul meg.

A hatékonyabb hibacím ütemezés érdekében az ismertetett, az ELMŰ-ÉMÁSZ által használt rangsorolási rendszer továbbfejlesztése azonban több szempontból is javasolt.

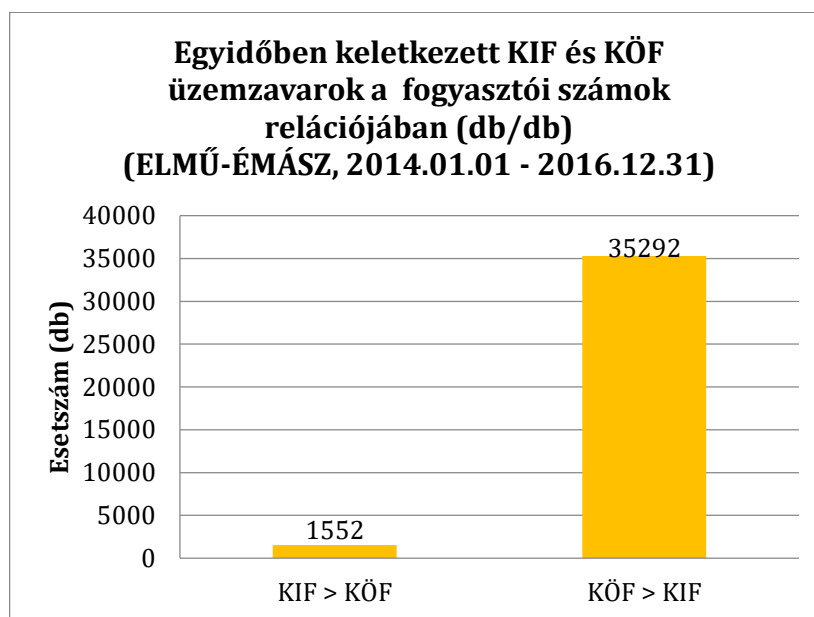
Egyrészt azért, mert egy magasabb üzemirányítási szinten keletkezett (KÖF) üzemzavar előre helyezése nem mindig indokolt, hiszen ez esetenként kevesebb fogyasztó kiesésével járhat, mint egy kiefeszültségű hiba miatti áramszünet. Másrészt, a csoportos, egynél több fogyasztót érintő üzemzavarok további súlyozása is indokolt, mivel jelenleg egy prioritási szinten van például: a.) egy két fogyasztót érintő üzemzavar b.) egy több száz felhasználási helyet érintővel.

### *7.3.2. A középvezettségű elosztóhálózati üzemzavarok prioritizálása*

Az előző alfejezetben (7.3.1) bemutatott szabályrendszer alapján tehát a szerelőket koordináló diszpécser adott területen mindig a legmagasabb üzemirányítási szinten bekövetkezett üzemzavarhoz küldi ki a szerelőket. A topológiai sajátosságok miatt a NAF hálózaton igen ritkán történik olyan esemény, amely fogyasztó kieséssel jár [65]. Így a prioritizálási folyamat felülvizsgálását a KÖF és KIF üzemirányítási szintek között érdemes lefolytatni.

Az ELMŰ-ÉMÁSZ 2014.01.01. és 2016.12.31. közötti KÖF és KIF üzemzavarait elemezve kiszámoltam, hogy 36 844 db (35 292 db +1 552 db) olyan eset fordult elő, amikor az adott üzemirányítási területen (az ELMŰ-ÉMÁSZ 10 üzemirányítási területet különböztet meg, melynek listája később, a 26. ábrán látható) egy időben volt folyamatban KÖF és KIF üzemzavar is.

Az egy időben keletkezett KÖF és KIF üzemzavarok által érintett fogyasztói darabszám adatait vizsgálva (lásd 26. ábra) megérthető, hogy a jelenlegi rendszer miért kezeli magasabb prioritásként a KÖF üzemzavarokat.



**26. ábra:** Az egyidőben keletkezett KIF és KÖF üzemzavarok által érintett fogyasztói számok relációja

A 26. ábrán látható, hogy KIF > KÖF (1552 db): olyan eset, amikor a KIF üzemzavar több fogyasztót érintett, mint az egyidejűleg folyamatban lévő KÖF üzemzavar, továbbá a másik eset, hogy KÖF > KIF (35292 db): olyan eset, amikor a KÖF üzemzavar több fogyasztót érintett, mint az egyidejűleg folyamatban lévő KIF üzemzavar.

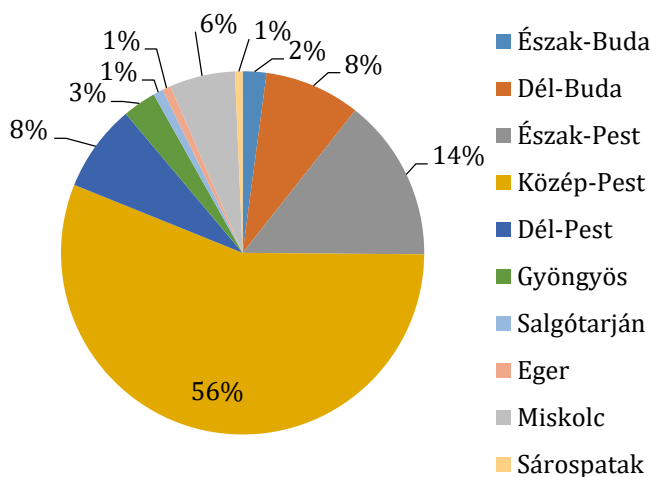
Bár az esetek túlnyomó részében valóban a KÖF üzemzavar érintett több fogyasztót, azok az esetek, ahol a KIF üzemzavar több fogyasztónál okozott áramkimaradást, mint a KÖF hálózat üzemzavara, nem elhanyagolható. Ez utóbbi esetekben, ha a diszpécser a KÖF hiba helyett a KIF hibát helyezte volna előtérbe, akkor a KIF üzemzavar elsődleges helyreállításával az áramkimaradás összeségében kevesebb fogyasztót érintett volna. Ez a megtakarítás a SAIDI mutató viszonylatában a 7. táblázatban látható értékeket adja.

	ÉMÁSZ (perc)	ELMŰ (perc)	Összesen (perc)
A vizsgált 3 évben megtakarítható SAIDI	5,83 perc	22,34 perc	28,17 perc

**7. táblázat:** A különböző szintű üzemi irányítási rendszerben történő üzemzavarok prioritizálásának optimalizálásával elérhető SAIDI javulás

Abban az esetben tehát, ha a rangsorolás során az üzemirányítás figyelembe veszi az érintett fogyasztók számát, és indokolt esetben előrébb helyezi az alacsonyabb üzemirányítási szinten bekövetkező hiba elhárítását, megfigyelhető a SAIDI mutató javulása (7. táblázat).

A megtakarítható SAIDI — területi elosztásban — a 27. ábrának megfelelő képet mutat.



**27. ábra:** A vizsgált időszak (2014.01.01.-2016.12.31.) SAIDI megtakarításának területi eloszlása

Annak a megállapítására, hogy a megtakarítható SAIDI percek milyen nagyságrendű változást jelenthetnek az áramszolgáltatóknál, ahhoz az ELMŰ-ÉMÁSZ belső, általános szabálya szerinti adatokat vehetjük figyelembe. Hálózat rekonstrukcióval, karbantartással 1 perc SAIDI megmentéséhez 150 millió Ft beruházási értéket vehetünk figyelembe [174] (2017-es évre a Társaságcsoport 27 Mrd forint beruházást tűzött ki céljaul). Az egyidejűleg bekövetkező KÖF és KIF üzemzavarok rangsorolás folyamatának módosítására tett javaslat vizsgált időszakra alkalmazásával a 8. táblázatban látható összegeket lehetett volna realizálni.

	ÉMÁSZ	ELMŰ	Összesen
SAIDI (perc)	5,83	22,34	28,17
HUF (Mrd)	0,87	3,35	4,23

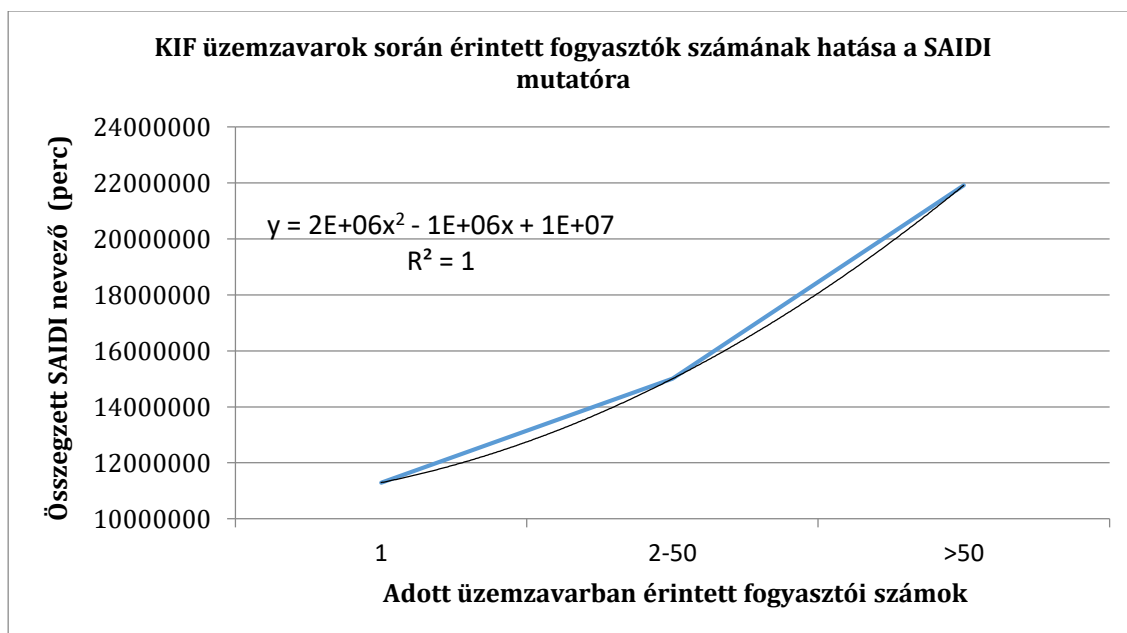
**8. táblázat:** A különböző szintű üzemirányítási rendszerben történő üzemzavarok prioritizálásának optimalizálásával elérhető SAIDI javulás gazdasági előnyei

A 2014.01.01.-2016.12.31. közötti adatok elemzése szerint az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoport számára 4,23 Mrd Ft megtakarítást jelenthetett volna, ha az alkalmazott rangsorolási szabály helyett a javasolt rangsorolási szabály szerint rangsorolták volna a KIF üzemzavarok elhárítását azokban az esetekben, amikor az nagyobb fogyasztói számot érintett, mint a KÖF hálózat zavara (8. táblázat).

A KIF üzemzavarokról az áramszolgáltatók ma még csak fogyasztói bejelentéseken keresztül értesülnek. Azonban ha a hálózaton megtörténik a smart érzékelők telepítése, megvalósulhat az on-line távjelzés. Az FLDA alkalmazásával a meghibásodott berendezés automatikusan beazonosíthatóvá válik. Ennek következtében a KÖF (vagy akár a NAF) üzemzavarokhoz hasonlóan a KIF hálózaton is már az üzemzavar kezdetén ismerté válhat a kieső fogyasztók száma. Ezen információ felhasználásával a diszpécser a feszültség szint helyett az érintett fogyasztók száma alapján is prioritizálhat, ami az üzemzavar elhárítás hatékonyságának nagymértékű növelését eredményezné.

### 7.3.3. A kisméretű elosztóhálózati hibák által érintett fogyasztószám ignorálás hátrányai

Ahogy a KÖF/KIF üzemzavarok üzemirányítási szint alapján történő csoportosításánál (lásd 7.3.1. alfejezet, III. alpont) van optimálisabb prioritizálás (lásd előző alfejezet), úgy az egyedi/csoportos megjelölésnél (lásd 7.3.1. alfejezet, IV. és V. alpont) is létezhet alkalmasabb megoldás. E hipotézist támasztja alá a 2014.01.01. és 2016.12.31. közötti KIF üzemzavarok SAIDI mutatóra való befolyásának elemzése (lásd 28. ábra).



**28. ábra:** Egyedi és csoportos hibacímek SAIDI-ra vonatkozó hatása a KIF üzemzavar során érintett fogyasztói számok alapján

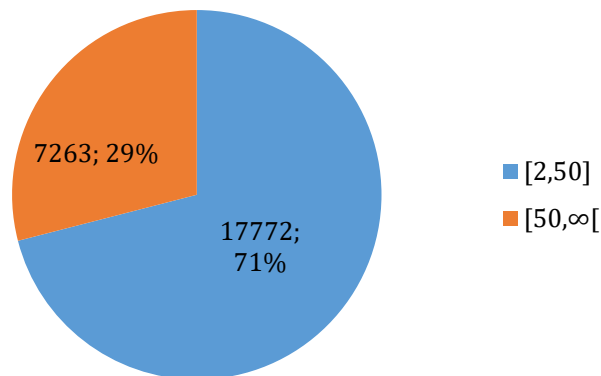
A 28. ábra a SAIDI nevezőjének értékét mutatja az érintett fogyasztói számok intervallumára összegezve:

$$f(N_i^{(\alpha)}) = \sum_{i=1}^n (U_i * N_i^{(\alpha=1)}) + \sum_{i=1}^n U_i * N_i^{(\alpha=2)} + \sum_{i=1}^n U_i * N_i^{(\alpha=3)} \quad (49)$$

ahol  $i = 1 \dots n$ , és ahol  $n$  a meghibásodás egyedi azonosítója,  $U_i$  az adott  $i$  meghibásodás okozta szolgáltatás kimaradás összegzett ideje (perc),  $N_i$  az érintett fogyasztók száma és

$$N_i^{(\alpha)} \left\{ \begin{array}{l} \text{ha } \alpha = 1 \text{ akkor } N \equiv [1] \\ \text{ha } \alpha = 2 \text{ akkor } N \in [2, 50] \\ \text{ha } \alpha = 3 \text{ akkor } N \in [50, \infty[ \end{array} \right\}.$$

Vagyis az  $y$  tengely megmutatja, hogy az egyedi, a 2 és 50, valamint 50 fogyasztó feletti hibák milyen mértékben befolyásolják a SAIDI mutatót. Az  $[1]$ ,  $[2,50]$  és  $[50,\infty[$  intervallumokat empirikus alapon választottam ki. Látható, hogy a nagyobb fogyasztói számmal rendelkező hibacímeket a SAIDI lényegesen jobban befolyásolása. Kiváltképp akkor, ha megvizsgáljuk azt is, hogy az adott SAIDI (lásd a 29. ábra) befolyásolás hány darab KIF üzemzavarból tevődött össze.



**29. ábra:** Az érintett fogyasztói számokra vonatkozó, meghatározott példa intervallumokon belüli számosság

Megállapítható, hogy bár jóval kevesebb az 50 feletti fogyasztót érintő üzemzavar, mégis ezek azok, amelyek a leginkább befolyásolják a SAIDI mutató alakulását (29. ábra).

Ugyanúgy, ahogy az előző alfejezetben ismertetett „A KÖF üzemzavarok prioritizálás” kérdés esetében is, itt is az a probléma áll a háttérben, hogy jelenleg a KIF hiba bejelentésekor még nem áll rendelkezésre az érintett fogyasztói szám, ezért fogyasztószám szerint nem lehet prioritizálni. Azonban, ha ez az információ a közeljövőben a smart érzékelőknek köszönhetően adott lesz, akkor új rangsorolás, és hatékonyabb hibacím kiosztás ütemezési metódus lesz bevezethető.

#### 7.3.4. A javasolt $\beta$ rangsorolás súlyozási rendszer

Az egyidejű KIF/KÖF üzemzavar (7.3.2. alfejezet) és a KIF üzemzavar (7.3.3. alfejezet) fogyasztószám szerinti prioritizálásának alapján az alábbi  $\beta$  rangsorolás súlyozási rendszer bevezetését javaslom:

- $\beta_1$ : Élet és balesetveszély
- $\beta_2$ : Magas prioritású cím (pl. kórház)
- $\beta_3$ : Magas fogyasztói számot érintő üzemzavar
- $\beta_4$ : Kis fogyasztói számot érintő üzemzavar
- $\beta_5$ : Egy fogyasztót érintő üzemzavar

A hibák súlyfüggvénye ez alapján:

$$\sum_{j=1}^n \beta_j * T_j \quad (50)$$

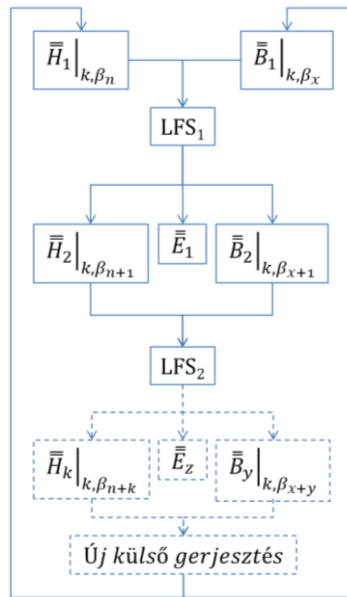
ahol  $\beta_j$  – a hiba rangsorolás súlya,  $T_j$  – a  $j$  hibacím optimális kiosztása esetén a  $j$  hiba elhárítási folyamatának ideje.

Az LFS rendszerben tehát miután minden  $\beta_1$  cím kiosztásra kerül (valamennyi  $k$  paraméter figyelembe vételével) a  $\beta_2$  rangú címeket a szabad kapacitású szerelő egységek fogják megkapni. Miután valamennyi  $\beta_3$  rangú cím kiosztásra került, a  $\beta_4$  rangsorolású hibacím kerül kiosztásra és így tovább. Az ütemezés annyiszor fog lefutni, ahány rangú cím van a rendszerben.

#### 7.4. Új hibacím ütemező rendszer

A smart érzékelők és az FLDa bevezetésével keletkezett új adatok (a meghibásodott berendezés azonosítója és az érintett fogyasztók száma) felhasználásával egy hatékonyabb ütemezési eljárás bevezetése válik lehetővé. Az új ütemezési rendszerre tett javaslatom az LFS rendszer, melynek kimenete, eredménye egy, a hibaelhárítási idők összegére minimalizált,  $k$  paraméterektől függő, dinamikus méretű  $E$  ütemezési mátrix.

A javasolt új hibacím ütemezés lépéseit a 30. ábra mutatja be.



**30. ábra:** Az LFS rendszer folyamatábrája

A javasolt ütemező rendszerben egyrészt az FLDA eredményeként kapott hibacímek, másrészt a TeleCentrumon keresztül a munkairányítási rendszerbe beérkezett hibacímek együttesen alkotják a  $H_k$  mátrixot ( $k=1\dots n$ ), míg az éppen műszakban vagy ügyletben lévő szerelők alkotják a  $B_y$  mátrixot ( $y= 1\dots m$ ). A hibacím ütemezőbe ( $LFS_1$ ) először a rendszerben lévő legmagasabb (numerikusan a legalacsonyabb)  $\beta$  rangsorolású hibacímek fognak bekerülni. Ezután megjelennek az e címekhez tartozó  $k$  paraméter igények, így az LFS lefutásakor  $B_1$  csak azokat a szerelőket fogja tartalmazni, melyek a  $\beta_1$  rangsorolású hibacímek  $k$  paraméter igényeit ki tudják elégíteni.

Az  $LFS_1$  lefutásának eredményeként megjelenik az  $E_1$  mátrix. Ez az eredménymátrix azonban nem feltétlenül fog valamennyi hibát magában foglalni, mert előfordulhat, hogy lesz olyan  $k$  paraméter igény, melyet csak úgy lehet kielégíteni, ha az egyik címen levő hibaelhárítást valamelyik szerelőcsapat már befejezte. Például előfordulhat, hogy 3 olyan cím is van az ütemező rendszerben, ahol oszlopra kell mászni, de csak két olyan szerelő érhető el, akinek ehhez megfelelő jogosultsága van. Ezen címek (ahol a  $k$  paraméter igény nem elégíthető ki azonnal) várakozó státuszúak lesznek (ezek szükség esetén manuális beavatkozással kiütemezhetők).

A várakozó státuszba kényszerülő címeken kívül a címet nem kapó szerelők ( $B_2$ ) és az alacsonyabb  $\beta$  rangsorolású címek ( $H_2$ ) is a rendszerben maradnak. A  $LFS_2$  ezen bemeneti adatokkal fog lefutni.

Ez a ciklikus folyamat addig ismétlődik, míg magasabb  $\beta$  rangsorolású, – azaz alacsonyabb prioritású – cím már nincs a rendszerben. Ekkor a folyamat új külső gerjesztésig várakozó állásponton lesz. Külső gerjesztés jelen esetben a felszabaduló szerelő csapat vagy egy újabb hibabejelentés lehet. Új külső gerjesztés esetén a folyamat újra indul a 30. ábrának megfelelően.



## 7.5. A 3. Tézis és a 4. Tézis

### 7.5.1. A 3. Tézis: Kisfeszültségű hibacím ütemező rendszer egyszerűsített matematikai modellje

Az FLDa eredményeként kapott hibahely attribútum táblát integráltam a kisfeszültségű elosztóhálózati üzemirányítás folyamatába és megalkottam a kisfeszültségű dinamikus hibacím ütemező rendszer (LFS – Low-voltage Fault-sheet Scheduling system) matematikai modelljét. Bizonyítottam, hogy az LFS rendszer bevezetése optimálisabb hibacím kiosztást tesz lehetővé, ezáltal a hibaelhárítási folyamatok teljes rendszerre összegzett időtartama csökken. [PM01][PH02] [PH04][PTH05][PNH11][PH10]

#### A 3. Tézis leírása:

Az FLDa eredményeként kapott lokalizált hibacím attribútumok alkalmasak egyrészt a napi szintű diszpécseri döntéstámogatásra, ugyanakkor az áramszolgáltatói munkairányítási rendszer automata-ütemező moduljának inputjaként is szolgálhatnak.

A kisfeszültségű elosztóhálózati hibacímek ( $H$ ) és a szerelőegységek ( $B$ ) paraméterezett mátrixaiból kiindulva (erre korábbi példa nincs), különböző egyéb paraméterek figyelembevételével lehetővé vált a hatékony és gyors hibacím kiosztás. Ilyen paraméterek a járulékos gerjesztések, amelyek olyan döntést befolyásoló tényezőket jelentenek, mint például az időjárás előrejelzés adatai, a tervezett karbantartási munkákkal járó magas prioritású feladatokkal kapcsolatos információk, a magasabb üzemirányítási szinteken bekövetkezett eseményekre való reagálás (a közép- és kisfeszültségű üzemzavarok elhárítását ugyanazon szerelőcsapatok végzik), egyéb humán tényezők, mint például szerelők, diszpécserok stb. által beérkezett hétköznapi impulzusok (például egy fáradtabb szerelő kritikussabb szituációba való küldése nem előnyös). Ezen tényezők és a hibacímek paraméterei alapján a nem tervezett események fontossági sorrendje meghatározható.

Az újonnan létrehozott hibacím ütemező rendszer modell tulajdonságai: aktív, MIMO („multiple input, multiple output”), nem lineáris, véges, variáns, időfüggő, dinamikus, determinisztikus, komplex, részben öntanuló (a humán rész). Az új rendszer többváltozós bemenetű ( $H, SzE$ ) és sokválaszú a kimenet ( $E$ ) eredménymátrixa.

### 7.5.2. A 4. Tézis: az LFS

Az LFS rendszer kidolgozásánál a hiba-információk alapján bevezettem a  $\beta$  rangsorolás súlyozási rendszert és súlyfüggvényt. A normál üzemmód helyreállításához szükséges hibaegység kompetenciákra  $k$  paraméterezést vezettem be. Ezen rendszer bevezetésével lehetővé válik a hibacímnek egy előnyösebb kiosztása, azaz a hiba elhárításához optimálisabb paraméterekkel rendelkező hibaelhárító egységekhez történő rendelése. Az LFS rendszer kimenete egy, a hibaelhárítási idők összegére minimalizált dinamikus méretű  $E$  ütemezési eredmény mátrix. [PM01][PH02][PH04][PTH05][PNH11][PTH13]

#### A 4. Tézis leírása:

A gyakorlatban, a kifeszültségű elosztóhálózaton földrajzilag elkülönülten és időben egyszerre, egymástól függetlenül több helyen is keletkeznek hibák, így a modellben több hibacím együttes jelenlétét is figyelembe kell venni. Az egyidőben keletkezett hibacímek ütemezésekor a hibaelhárítási feladatok rangsorolása és súlyozása szükséges, mivel legtöbbször egy időben több az ütemezésre váró hibacím, mint a rendelkezésre álló szerelőegység.

A hiba információk alapján bevezetett  $\beta$  rangsorolás súlyozás az alábbi kategóriák szerint történik:

$\beta_1$ : Élet és balesetveszély

$\beta_2$ : Magas prioritású cím (pl. kórház)

$\beta_3$ : Magas fogyasztói számot érintő üzemzavar

$\beta_4$ : Kis fogyasztói számot érintő üzemzavar

$\beta_5$ : Egy fogyasztót érintő üzemzavar

Az új  $\beta$  rangsorolás súlyozás szerint a hibaelhárítás a szükséges képesítéssel rendelkező és az adott hibahely címhez földrajzilag legoptimálisabb helyen tartózkodó szerelőegységnek kerül kiosztásra. A hibák súlyfüggvénye:

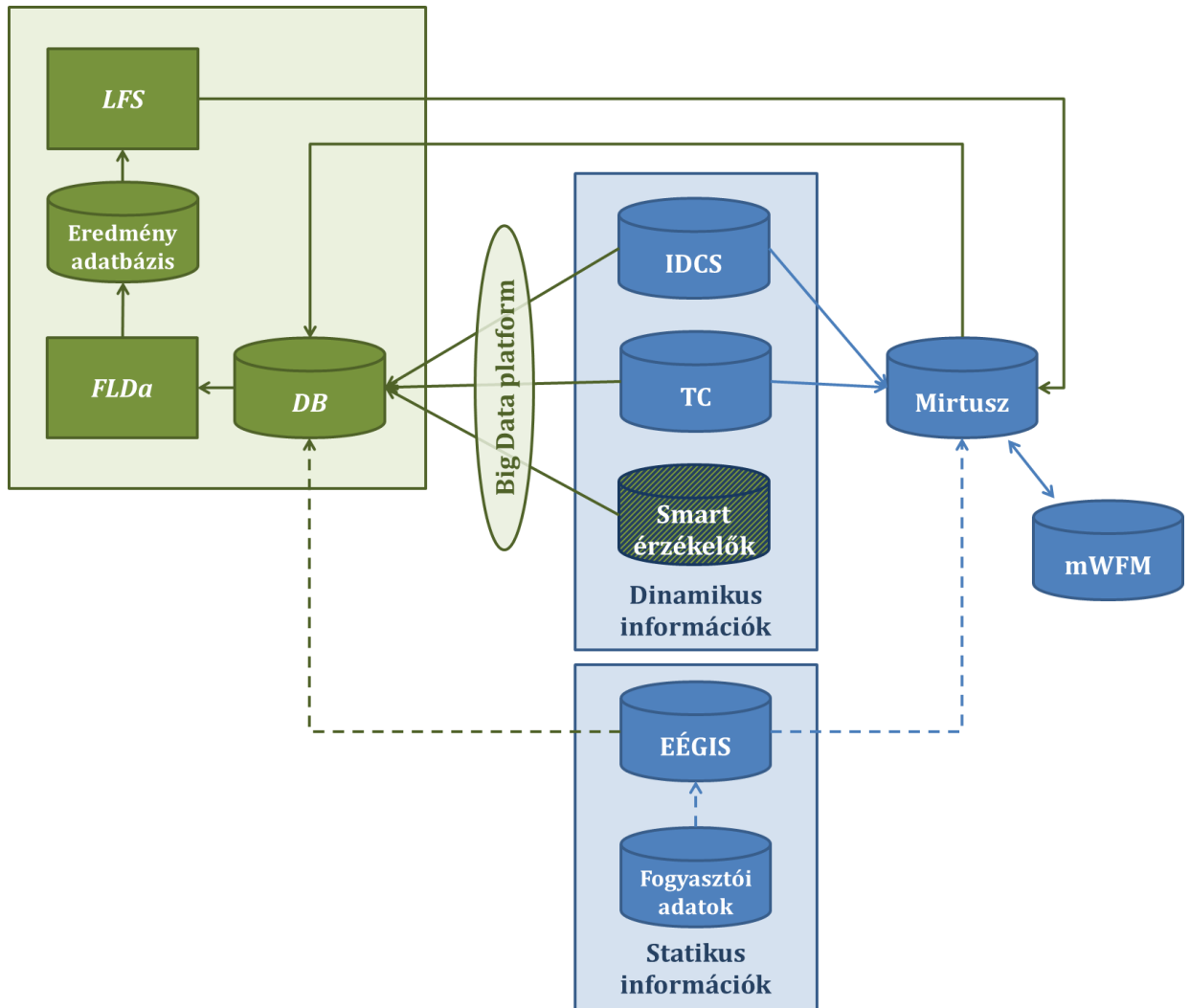
$$\sum_{j=1}^n \beta_j * T_j \quad (51)$$

ahol  $\beta_j$  – a hiba rangsorolás súly,  $T_j$  – a  $j$  hibacím optimális kiosztása esetén a  $j$  hiba elhárítási folyamatának ideje.

Az LFS rendszerben tehát miután minden  $\beta_1$  cím kiosztásra kerül (valamennyi  $k$  paraméter figyelembe vételével) a  $\beta_2$  rangú címeket a szabad kapacitású szerelő egységek fogják megkapni. Miután valamennyi  $\beta_3$  rangú cím kiosztásra került a  $\beta_4$  rangsorolású hibacím kerül kiosztásra és így tovább. Az ütemezés annyiszor fog lefutni, ahány rangú cím van a rendszerben.

## 8. AZ LFS EGY SZIMULÁLT PÉLDÁN KERESZTÜL TÖRTÉNŐ BEMUTATÁSA

A jelenlegi munkairányítási rendszer (kék színnel kiemelve) [53] és a javasolt rendszer (zöld színnel kiemelve) architektúráját a 31. ábra szemlélteti.



**31. ábra:** A javasolt rendszerek (zöld) architektúrája a jelenlegi (kék) rendszerek architektúrájára épülve

Az egyes rendszerek közötti kapcsolatokat a 9. táblázatban foglaltam össze.

		Fogadó rendszerek		
Frissítési gyakoriság	Forrás rendszerek	DB	Mirtusz	mWFM
Esemény vezérelt	IDCS	Az adattárház bemeneti állományai	A hibacímek kiosztásának feltételei	Mirtusz rendszeren keresztül kerül
	TC			
	Smart érzékelők			
Heti rendszerességű	EÉGIS, fogyasztói adatok		A hibacímekhez kapcsolódó hálózati adatok	Hibabehatárolás és javítás során a szerelők által a terepen használt adat

**9. táblázat:** A jelenlegi és a javasolt rendszer közötti kommunikációs csatornák jellemzői

Az új és a jelenlegi rendszernek szoros összefüggésben kell együttműködni. A rendszerek statikus- és dinamikus információkon alapulnak. Statikus információ az EÉGIS villamos hálózat-nyilvántartási rendszer (2.2.1 alfejezet) adatai, amelyek tartalmazzák a fogyasztók adatait is (pl. védett fogyasztó, ipari vagy lakossági fogyasztó stb.). Dinamikus információ az IDCS rendszer adatai, a TC és a Smart érzékelőkből származó adatok. Az IDCS az ELMŰ Hálózati kft. és ÉMÁSZ Hálózati kft. nagy- és középfeszültségű üzemirányítási rendszere. Az IDCS ↔ Mirtusz közötti adatkapcsolat (interface) segítségével értesülnek a KIF diszpécser a magasabb szintű üzemzavarokról. A telefonközpont (TeleCentrum – TC) a Mirtusz rendszerbe viszi fel a hibacímeket. A smart érzékelők adatai a Mirtuszba közvetlenül nem jutnak el, csak az adatfeldolgozás után (DB, FLDa), az LFS-en keresztül, jut el az adat a diszpécserhez.

A 32. ábra egy 3 szerelőcsapatból ( $B_n$ ) és 3 hibacíméből ( $H$ ) álló példával szemlélteti a javasolt LFS rendszer működését.

	Szerelő csapat ID	H vizsga	Oszlopmászás	GPS	H vizsga	Oszlopmászás	GPS	Hiba ID	
					1	1	1	1	= $H$
					1	1	2	2	
					1	0	3	3	
$B_1 =$	1	2	1	1	1	0	0		$= E_1 = (B_1 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_1)} = 0$
	2	1	1	2	0	0	0		
	3	1	0	3	0	0	0		
$B_2 =$	1	2	1	1	1	0	0		$= E_2 = (B_2 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_2)} = 2$
	3	1	0	3	0	-1	1		
	2	1	1	2	0	1	1		
$B_3 =$	2	1	1	2	0	0	1		$= E_3 = (B_3 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_3)} = 2$
	1	2	1	1	1	0	1		
	3	1	0	3	0	0	0		
$B_4 =$	2	1	1	2	0	0	1		$= E_4 = (B_4 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_4)} = 4$
	3	1	0	3	0	-1	1		
	1	2	1	1	1	1	2		
$B_5 =$	3	1	0	3	0	-1	2		$= E_5 = (B_5 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_5)} = 4$
	1	2	1	1	1	0	1		
	2	1	1	2	0	1	1		
$B_6 =$	3	1	0	3	0	-1	2		$= E_6 = (B_6 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_6)} = 4$
	2	1	1	2	0	0	0		
	1	2	1	1	1	1	2		

**32. ábra: 1 Példa:** Egy szimmetrikus 3x3-as hibaütemezési feladat mátrixai

A 32. ábrán a rendelkezésre álló szerelőcsapatok száma és a hibacímek száma megegyezik és valamennyi cím kiadása lehetséges, azaz a példa *szimmetrikus*.

A példában a mátrix oszlopok:

- Szerelő csapat ID: a szerelő csapat egyedi azonosítója,
- Hiba ID: a hibacím egyedi azonosítója,
- H vizsga: helyismereti vizsga, ( $k$  paraméter)
- Oszlopmászás: oszlopra mászás szükségessége, ill. szerelőcsapatok esetén annak képessége, ( $k$  paraméter)
- GPS: GPS koordináta

A példában használt „*H* vizsga”, mint helyismereti vizsga az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoporthál alkalmazott szakmai vizsga [162], melynek három fokozata van: *H0*, *H1* és *H2* (ezek a hibacím ütemezőben 1-sel, 2-sel illetve 3-sal vannak jelölve):

- *H0*: kulcs vizsga, bemehet önállóan mindenhova, de semmihez sem nyúlhat,
- *H1*: KIF vizsga, amivel KIF berendezéseket üzemeltethet illetve KÖF leágazást kapcsolhat,
- *H2*: KÖF és KIF berendezéseket üzemeltethet.

Minden szerelőnek - bizonyos rutin megszerzése után – oszlopmászási vizsgát kell tennie [175]. Ez a szabadvezeték üzemeltetése szempontjából kiemelt jelentőségű. A 32. ábrán látható példán 1-essel jelöltem azt, ha egy szerelőnek van oszlopmászási képesítése és 0-val, ha nincs.

A GPS koordináta a példában egyszerűen, szélességi és hosszúsági fokok helyett [1...3] értékekkel van megadva. A GPS koordináták természetesen nem csak egyszerű kivanással kezelhetők, hanem a korszerű technológiáknak köszönhetően a kiérkezési idő becsléssel finomítható. Így ma már figyelembe vehetőek az út és a környezeti viszonyok (pl. folyók, hidak) - illetve az on-line korszerű navigációs rendszereknek köszönhetően - az aktuális forgalmi adatok is (pl. Google Maps, Waze stb.).

Természetesen előfordulhat az is, hogy nincs elegendő számú megfelelő képesítésű szerelő ahhoz, hogy minden címet ki lehessen osztani. Empirikus adatokat elemezve ez az aszimmetrikus eset gyakrabban fordul elő, mint a 32. ábrán ismertetett példa. Ilyen esetben a 33. ábrán bemutatott feladat ütemezési mátrix állhat elő. A 33. ábra példájánál nem minden hibacím adható ki a rendelkezésre álló szerelőknek, azaz a példa *aszimmetrikus* (a 2 Példa oszlopainak elnevezései megegyeznek a 1 Példa oszlopainak elnevezéseivel).

	Szerelő csapat ID	H vizsga	Oszlopmászás	GPS	H vizsga	Oszlopmászás	GPS	Hiba ID	
		H vizsga	Oszlopmászás	GPS	1	1	1	1	$= H$
					1	1	2	2	
					1	1	3	3	
$B_1 =$	1	2	1	1	1	0	0		$= E_1 = (B_1 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_1)} = 0$
	2	1	1	2	0	0	0		
	3	1	0	3	0	-1	0		
$B_2 =$	1	2	1	1	1	0	0		$= E_2 = (B_2 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_2)} = 2$
	3	1	0	3	0	-1	1		
	2	1	1	2	0	1	1		
$B_2 =$	2	1	1	2	0	0	1		$= E_3 = (B_3 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_3)} = 2$
	1	2	1	1	1	-1	1		
	3	1	0	3	0	0	0		
$B_4 =$	2	1	1	2	0	0	1		$= E_4 = (B_4 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_4)} = 4$
	3	1	0	3	0	-1	1		
	1	2	1	1	1	1	2		
$B_5 =$	3	1	0	3	0	-1	2		$= E_5 = (B_5 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_5)} = 4$
	1	2	1	1	1	0	1		
	2	1	1	2	0	1	1		
$B_6 =$	3	1	0	3	0	-1	2		$= E_6 = (B_6 - H), \sum_{i=1}^n GPS^{(E_6)} = 4$
	2	1	1	2	0	0	0		
	1	2	1	1	1	1	2		

**33. ábra:** 2 Példa: Egy aszimmetrikus 3x3-as hibaütemezési feladat mátrixai

Ebben az esetben annak a mátrixnak a kiválasztása jelenti az optimális döntést, ahol a  $k$  paraméter igények kielégítése a legkevesebb megtett út mellett valósul meg és amely a legkevesebb szerelőcsapat és cím várakoztatását eredményezi. A szerelők esetében a várakoztatás munkaidőben a már kiadott tervezett munkák elvégzését, ügyeleti, készenléti időszakban pedig a szerelőcsapat vagy csapatok otthoni vagy ügyeleti helyiségben történő pihentetését jelentheti [176].

Amikor egy kiosztásra került feladat elkészül (új gerjesztést kap a rendszer) az ütemezési rendszert újra kell futtatni (31. ábra).

Az LFS rendszer bemutatott alkalmazásával, a nem tervezett események és a szerelőcsapatok  $k$  paramétereit figyelembe véve, illetve a smart érzékelők adataira támaszkodva, a hibacímek  $\beta$  rangsorolásával, a jelenleg alkalmazott hiba ütemezési rendszernél — a rendszer egészére nézve — optimálisabb ütemezés érhető el.

## 9. ÖSSZEGZÉS

Disszertációmban megvizsgáltam a kisfeszültségű villamos elosztóhálózat jelenlegi üzemirányítási rendszerét és fejlesztési javaslatokat dolgoztam ki a hálózati szolgáltatás minőségének javítása érdekében.

A javaslatok peremfeltétele a szporadikusan elhelyezett smart érzékelők beépítése a KIF hálózatba. A smart érzékelők – a fa struktúrájú KIF hálózat csomópontjain bekövetkezett hiba esetén – on-line jelzést küldenek az üzemirányítási központokba. Kutatásom során elemeztem e szenzorok hibaüzeneteit és a jelenlegi csatornákon (jellemzően telefonon) beérkező fogyasztói jelzések feldolgozásában rejlő lehetőségeket.

Elemeztem a KIF hálózat topológiáját, amely alapján felállítottam a kisfeszültségű elosztóhálózat gráfelméleti modelljét. Az ELMŰ-ÉMÁSZ teljes hálózat adatainak vizsgálatával bizonyítottam a modell megfelelőségét.

A gráf modell alapján, Big Data eljárást alkalmazva megalkottam egy a topológiához rendelt hibaváltszínűségi adattárat, amely lehetővé teszi a meghibásodott berendezés hibazóna behatárolását a KIF elosztóhálózaton belül. A hibahely meghatározásához *a priori* valószínűségi paramétereket vezettem be.

Az adattár felhasználásával egy olyan új eljárást dolgoztam ki (FLDa - Fault Location Determination algorithm), melynek segítségével a KIF hálózaton a meghibásodott berendezés – a szporadikusan elhelyezett smart érzékelőkből és a fogyasztói bejelentésekből érkező jelzések alapján – gyorsan beazonosítható. Az FLDa kimenete az üzemirányító felé egy olyan hibahely attribútum tábla, amely a meghibásodott berendezés egyedi azonosítóját is tartalmazza.

Az FLDa hibahely attribútum táblát integrálva az üzemirányítási rendszerbe elemeztem a KIF üzemirányítás ütemező rendszerét. A kutatás során azon lehetőségeket vizsgáltam melyek a KIF hálózat minőségi mutatóit pozitív irányba befolyásolják. Felállítottam egy KIF dinamikus hibacím ütemező rendszer (LFS – Low-voltage Fault-sheet Scheduling system) matematikai modelljét. Az LFS bevezetése hatékonyabb hibacím kiosztást tesz lehetővé; ezáltal a hibaelhárítási folyamatok időigénye csökken.

A kutató munkám során kiemelt figyelmet fordítottam arra, hogy a várható eredmények minél szélesebb körben alkalmazhatóak legyenek. Az FLDa előnye, hogy villamos paraméter független. Ennek következtében univerzális, azaz minden olyan fa struktúrájú hálózaton alkalmazható, ahonnan on-line távjelzések érkeznek egy adatfeldolgozó központba.



## 10. Tézisek

### 1. Tézis

A kiefeszültségű villamos elosztóhálózat-nyilvántartási rendszeréből származó adatokból létrehoztam egy topológiához rendelt hibaválószínűségi adattárat, amely lehetővé teszi a hibazóna behatárolását a kiefeszültségű villamos elosztóhálózaton. Az adattár paramétereit a priori valószínűségekkkel finomítottam, amelyek bevezetése által lehetségessé vált a meghibásodott berendezés legvalószínűbb helyének meghatározása. [PH04][PHT06][PHTM07][PH12] [PHN15]

### 2. Tézis

Kidolgoztam egy új kiefeszültségű elosztóhálózati hibahely beazonosító algoritmust (FLDa - Fault Location Determination algorithm). Az FLDa a szporadikusan elhelyezett smart érzékelők adataira és a kommunikációs csatornákon beérkező fogyasztói jelzésekre épül. Az algoritmus lehetővé teszi a kiefeszültségű elosztóhálózatban fellépő üzemmavar kiterjedtségének és annak hálózaton belüli lokalizálását, automatikus detektálását. A gráfon a  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  pontos behatárolást segítő faktorokon alapuló hibazóna redukcióval, és az abból előállított hibafán szintvektor analízissel és hálózati hibahely asszociációs logikai szabály alapján az algoritmus lokalizálja a hibahelyet, így jelentősen csökkentve a hibacím beazonosítás komplex folyamatának időigényét. [PH04][PHTM07] [P08][PH09][PHN14]

### 3. Tézis

Az FLDa eredményeként kapott hibahely attribútum táblát integráltam a kiefeszültségű elosztóhálózati üzemmvarányítás folyamatába és megalkottam a kiefeszültségű dinamikus hibacím ütemező rendszer (LFS – Low-voltage Fault-sheet Scheduling system) matematikai modelljét. Bizonyítottam, hogy az LFS rendszer bevezetése optimálisabb hibacím kiosztást tesz lehetővé, ezáltal a hibaelhárítási folyamatok teljes rendszerre összegzett időtartama csökken. [PM01][PH02] [PH04][PTH05][PNH11][PH10]

### 4. Tézis

Az LFS rendszer kidolgozásánál a hiba-információk alapján bevezettem a  $\beta$  rangsorolás súlyozási rendszert és súlyfüggvényt. A normál üzemmód helyreállításához szükséges hibaegység kompetenciákra  $k$  paraméterezést vezettem be. Ezen rendszer bevezetésével lehetővé válik a hibacímnek egy előnyösebb kiosztása, azaz a hiba elhárításához optimálisabb paraméterekkel rendelkező hibaelhárító egységekhez történő rendelése. Az LFS rendszer kimenete egy, a hibaelhárítási idők összegére minimalizált dinamikus méretű  $E$  ütemezési eredmény mátrix. [PM01][PH02][PH04][PTH05][PNH11][PTH13]

## 11. JAVASLATOK A KUTATÁS FOLYTATÁSÁRA

A kutatómunkám során számos olyan problémára derült fény, amely indokolja a kutatás folytatását. Ezen témák közül a legfontosabbak az alábbiak.

I. Gyakorlati tapasztalatok alapján felállítható az a hipotézis, miszerint bizonyos időjárás tényezők elősegítik az üzemzavarok keletkezését [177]. Azaz az időjárás adatok egyes paraméterei, és az üzemzavarok típusai egyes földrajzi területeken korrelálnak. Ezt a külső gerjesztést szükséges figyelembe venni és az ütemező rendszerrel gyakorolt hatásait vizsgálni. A külső gerjesztéseknek az ütemező rendszerre gyakorolt hatása egy következő kutató munka témája lehet.

II. Ma már adott az a technológiai fejlesztés, amelynek segítségével egy olyan KIF eszközt lehetne előállítani, amely a meghibásodott berendezés beazonosítása után az átmeneti zárlatokat – a szerelő helyszíni jelenléte nélkül – képes kezelni. Például a kiolvadt biztosítók cseréje kiváltható megszakítók és automatikák alkalmazásával [38, 178]. Magyarországon hasonló elven működő eszközöket a NAF és a KÖF hálózatokon már alkalmaznak. Javaslom annak megvizsgálását, hogy vajon e technológiák honosíthatóak-e a KIF elosztó hálózaton is.

Továbbá javaslom olyan technológiai megoldások keresését, illetve eszközök implementálását, amelyekkel további SAIDI és/vagy SAIFI javulás érhető el.

III. Javaslom a hibacím ütemező rendszer (LFS rendszer) genetikus algoritmussal [179] történő megoldását.

IV. Javaslom a dinamikus hibacím ütemező rendszer (LFS rendszer) végtelen memóriájú rendszerré való továbbfejlesztését. Jelenleg a rendszerre igaz az, hogy a  $\tau_i$  időpontbeli,  $y(\tau_i)$  válasz csak az  $u$  gerjesztésnek a  $\tau_i - \Delta\tau < \tau \leq \tau_i$ , illetve  $\tau_{i-L} < \tau \leq \tau_i$  intervallumbeli értékeitől függ, ahol  $\Delta\tau$  és  $L$  véges értékkel bír. Azaz a rendszer véges memóriájú. Jelen rendszer végtelen memóriájúvá tétele után olyan döntést befolyásoló, mért adatokat is fel lehetne használni  $k$  paraméterként, mint például „ $x$  brigád reggelente a belvárosi címeket lassabban végzi” vagy „ $y$  brigád Fót városában az átlagosnál sokkal gyorsabban végzi el a címeket”. A végtelen memóriájú rendszer lehetőséget teremthet arra is, hogy egyfajta öntanuló (MI - Mesterséges Intelligencia), vagy gépi tanuló (ML - Machin Learning) LFS rendszer valósuljon meg.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Novothny, F. (2010). *Villamosenergia-rendszerek I.*, jegyzet, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Budapest
- [2] Dr. Morva, Gy. (2012). *Villamosenergetika*, Digitális Tankönyvtár, Edutus Főiskola
- [3] Molnár, J. (szerk) (1981). *Villamos művek üzemvitele*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [4] Szabó, L. Zs. és Balikó, S. (1997). *Energiagazdálkodás I.* (Alapismeretek), szakjegyzet, MÁV Rt., Budapest
- [5] D\_UU-006/4/2016 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. irányelve a hálózatok, hálózati berendezések üzemeltetéséhez
- [6] Demeter, K. és Dén, G. (2010). *Villamosságtan II., 1. füzet*, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Budapest
- [7] Demeter, K. és Dén, G. (2010). *Villamosságtan II., 2. füzet*, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Budapest
- [8] Demeter, K. és Dén, G. (2010). *Villamosságtan III., Útmutató*, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Budapest
- [9] Demeter, K. és Szekér, K. (2010). *Villamosságtan II., 3. füzet*, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Budapest
- [10] Dr. Kiss, L. (1998). *Villamos hálózatok és alállomások*, Phare Program HU-94.05, Budapest
- [11] Beleon, K. (2015). *Kisfeszültségű hálózat és üzemi irányítás jövőképe*, szakdolgozat, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Elektrotechnikai-Elektronikai Intézeti Tanszék, Villamosmérnöki szak, Villamos energetikai szakirány, Miskolc
- [12] Fazekas, A.I. (2006). *Villamosenergia-rendszerek rendszerszintű tervezése I.*, Akadémiai Kiadó, Budapest, ISBN 978-963-05-8131-8
- [13] Fazekas, O. (szerk) (2010). *A magyar villamosenergia-szektor működése és szabályozása I.*, Complex Kiadó Jogi és Üzleti Tartalomszolgáltató Kft., Budapest
- [14] Demeter, K., Dén, G., Szekér, K. és Varga, A. (2010). *Villamosságtan I.*, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosmérnök és műszaki menedzser szak, Budapest
- [15] Hunter, G.W., Stetter, J.R., Hesketh, P.J. and Liu, C.-C. (2011). Smart sensor systems, *Interface Magazine, Electrochemical Society Inc*, Vol. 20, No. 1, Winter, pp.66-69.

- [16] Chaudhari, M. and Dharavath, S. (2014). Study of Smart Sensors and their Applications, *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp.5031-5034.
- [17] Szadyi, A. (2015). Az „okosmérők” hálózatba integrálása, szakdolgozat, Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet, Budapest
- [18] Iványi, A. (szerk.) (2013). *Informatikai algoritmusok III.*, Mondat Kft, Vác
- [19] Galántai, A. (2015). *Algoritmus elmélet, előadás vázlat (2015/2016 I. félév)*, Óbudai Egyetem, NIK Alkalmazott Informatikai Intézet, Budapest
- [20] Bőgel, Gy. (2015). *A Big Data ökoszisztémája*, 2. kiadás, Typotex Kiadó, Budapest, ISBN 978 963 279 831
- [21] Mayer-Schönberger, V. és Cukier, K. (2014). Big Data (Forradalmi módszer, amely megváltoztatja munkánkat, gondolkodásunkat és egész életünket), HVG Kiadó Zrt., Budapest
- [22] Tan, P.-N., Steinbach, M. és Kumar, V. (2012). *Adatbányászat (Alapvetés)*, Panem Könyvek, Taramix Kft, Budapest
- [23] Vágó, I. és Hollós, E. (1971). *A gráfelmélet alkalmazása villamos hálózatok számítására*, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest
- [24] Vágó, I. (2014). Villamos hálózatok számítása a gráfelmélet alkalmazásával, Akadémiai Kiadó, Budapest
- [25] Andrásfai, B. (1983). *Gráfelmélet (folyamok, mátrixok)*, Akadémiai Kiadó, Budapest
- [26] Kádár, P. (2011). *Korszerű számítási módszerek a villamosenergia-rendszer irányításában*, Tézisek habilitációhoz, Széchenyi István Egyetem, Győr
- [27] Bakos, I. és Balczó, Z. (1994). *Villamosságtan erősáramú üzemmérnököknek*, 3. kiadás, Kandó Kálmán Műszaki Főiskola, Budapest
- [28] Kádár, A. (szerk) (2007). *Elektromosipari kézikönyv*, 4. kiadás, Magyar Mediprint Szakkiadó Kft., Budapest
- [29] Pokorádi, L. (2008). *Rendszerek és folyamatok modellezése*, Campus Kiadó, Debrecen
- [30] Pokorádi, L. (2013). *Rendszerteknika*, TERC Kft., Budapest
- [31] Tari, G. (2017). *Hálózatfejlesztési igények Magyarországon*, tanulmány, BiXPert Kft., Energiaklub Szakpolitikai Intézet Módszertani Központ
- [32] Gerse, K. (2014). *Villamos-energia piacok*, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar, Budapest, ISBN 978 963 8243 52 2

- [33] Brzózka, Á. (2012). A magyar villamosenergia-piac és a liberalizációs folyamat anomáliái. In: Hámori, B., Vajda, B., Tóth, L., Derecskei, A. és Prónay, Sz. (szerk.) *Érzelmek és indulatok a gazdaságban*, Szegedi Tudományegyetem Gazdaságtudományi Kar, Szeged, pp.29-40.
- [34] 2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról, <https://net.jogtar.hu/vet>
- [35] Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási hivatal, (2015). Országgyűlési beszámoló 2015, Elérhetőség: <http://www.parlament.hu/irom40/10190/10190.pdf> [olvasva: 2017.10.10.]
- [36] Závecz, Á. (2015). *Az iparági sajátosságok és szabályozás hatásai a villamosenergia-hálózati szolgáltatás áraira és a beruházási döntésekre*, doktori értekezés, Pénzügy és Számvitel Tanszék, Kaposvári Egyetem, Gazdaságtudományi Kar, Kaposvár
- [37] "1366-2012 - IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices" Revision of IEEE Std 1366-2003 (Revision of IEEE Std 1366-1998), May 31 2012., DOI 10.1109/IEEESTD.2012.6209381
- [38] Pálfi, J., Tompa, M. and Holcsik, P. (2017). Analysis of the Efficiency of the Recloser Function of LV Smart Switchboards, *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA*, Vol. 14, No. 2, pp.131-150.
- [39] Eto, J.H and LaCommare, K. H. (2008). Tracking the Reliability of the U.S. Electric Power System: An Assessment of Publicly Available Information Reported to State Public Utility Commissions, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley CA. Retrieved from: <http://escholarship.org/uc/item/2jq5z0m7>
- [40] Agalgaonkar, Y.P. and Hammerstrom, D. (2017). Evaluation of Smart Grid Technologies Employed for System Reliability Improvement: Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Experience, *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 24-31.
- [41] Brown, R. E., (2002). *Electric Power Distribution Reliability*, Marcel Dekker, ISBN:0-8247-0798-2
- [42] Dr. Oláh, F. és Dr. Rózsa, G. (2009). *Villamosenergia-ellátás*, UNIVERSITAS-GYŐR Nonprofit Kft., Győr, ISBN 978-963-9819-47-4
- [43] Magyar Szabványügyi Testület: MSZ 1:1993 Szabványos villamos feszültségek, ETO 621.311.1:621.3.015,
- [44] Bosznai, G. (2010). *A rendszerirányítás 60 éves története*, MAVIR Zrt., Magánkiadás, ISBN 0669000933741
- [45] D\_U-006-8/2016 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. üzemirányítási szabályzata

- [46] N\_VU-09/2015 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. végrehajtási utasítása a régióközpontokban végzett diszpécseri munkáról
- [47] Faludi, A. és Szabó, L. (2011). *Villamosenergia-rendszer üzeme és irányítása* [online], Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék. Elérhetőség: <https://vet.bme.hu/sites/default/files/tamop/vivem265/out/html/vivem265.html> [olvasva: 2017.08.10]
- [48] Póka, Gy. (szerk) (1988). *Védelmek és automatikák villamosenergia-rendszerekben*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, ISBN963-10-7554-0
- [49] Körmendi, K. és Solymosi, J. (2008). Az európai összekapcsolt villamosenergia-rendszer 2006. november 4-i üzemzavarának áttekintő értékelése, *Hadmérnök*, III. Évf, 3. sz., pp. 49-59.
- [50] E.ON Hungária Zrt., Elosztói szabályzata az elosztó hálózathoz való hozzáférés együttműködési szabályairól, 3. sz. módosítás, 2009. december 4., Budapest
- [51] Nacsa, J., Kovács, G.L. and Kopácsi, S. (1999). Intelligent Application at the 400/120 kV Substation of the Paks Nuclear Power Plant, *IEEE PowerTech Conference*, August 29-September 2, Budapest, CD-ROM Proceedings, ISBN 0-7803-5836-8
- [52] Geszti, P. O. (1983). *Villamosenergia-rendszerek I.*, Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest, ISBN 963-17-6987-9
- [53] Móczár, G. (szerk.) (2013). *ÉMÁSZ rendszerterv*, Prolan Zrt., Magánkiadás, Budapest
- [54] Kaleha, Zs. (2014). Munkairányítási rendszerek alkalmazásának hazai tapasztalatai és jövőbeni fejlődési irányai, *Energetikai Szakkollégium Előadás sorozata: Közmű hálózat üzemeltetés IT támogatásának aktuális trendjei, új technológiái*, 2014. október 30.
- [55] Álmos, A., Cseke, I., Dunay, A., Majszai, J., Szécsy, T. és Csank, A., (2012). *SEPLAND-RBM2 Kisfeszültségű kábelhálózatok kockázatalapú fenntartás-tervezése*, Geometria Kft., Budapest
- [56] Frank, R. (2000). *Understanding Smart Sensors*, 2<sup>nd</sup> ed., Artech House, Norwood
- [57] Stark, I. (2014). E.ON okos mérési pilot projektek 2011-2014, *Okos Jövő Fórum*, 2014, Budapest
- [58] Fodor, L. (2016). Nekünk nyolc? – Hogy állunk az okos méréssel?, *KOZJAVAK.HU, Az MTA – DE Közszolgáltatási Kutatócsoport blogja*, Elérhetőség: <http://kozjavadoc.hu/nekunk-nyolc-hogy-allunk-az-okos-meressel> [olvasva: 2017.10.14]

- [59] Holcsik, P., és Pálfi, J. (2015). SCADA funkciók használata a kiefeszültségű hálózati üzemiirányításban, *10. Jubileumi Óbudai Energetikai Konferencia - Smart Cities.*, Budapest, Magyarország, p. 156, ISBN 978-615-5460-57-9
- [60] Perjési, Zs. és Gombos, G. (2010). Az „okos mérés/smart metering rendszer” hazai energiapiacon történő bevezetése következtében várható hatások a rendszerirányítás szempontjából, *57. MEE Vándorgyűlés*, 2010. 09.16., Siófok
- [61] Dr. Gyurcsek, I. (2015). *Okos hálózatok, okos mérés*, előadás, PTE Műszaki és Informatikai Kar, 2015.09.10.
- [62] Gerwen, R., Jaarsma, S, and Wilhite, R. (2006). Smart metering – Briefing paper, *Distributed Generation, Leonardo Energy*, Arnhem: Gelderland, pp. 1–9.
- [63] Uribe-Perez, N., Hernández, L., de la Vega, D. and Angulo, I. (2016). State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids, *Applied Sciences*, Vol. 6, No. 3, pp.68-91.
- [64] Geometria Kft. (2005.) *MIRTUSZ Munkairányító Rendszer, Funkciók és használatuk*, Geometria Kft., ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft., Magánkiadás, Budapest
- [65] Pálfi, J., Novothny, F., Holcsik, P. (2017). A kiefeszültségű villamos elosztóhálózat hibacím ütemező rendszerelméleti megközelítése, *GRADUS*, Vol. 4, No.1, pp. 219-226.
- [66] TT (2013). 120 éves a fővárosi áramszolgáltatás, Magyar Nemzet online, Elérhetőség: <https://mno.hu/tudomany/120-eves-a-fovarosi-aramszolgáltatás-1189579>, [olvasva: 2017.09.10]
- [67] Geometria Kft. (2017). *Az ELMŰ-ÉMÁSZ GIS rendszerének leírása*, Elérhetőség: <http://www.geometria.hu/?p=1357>, [olvasva: 2017.05.14]
- [68] Kalász, M. és Nagy, L. (2013). Mobilizált munkairányítás, *60. MEE Vándorgyűlés*, 2013. 09.12., Mátraháza
- [69] Geometria kft. (2017). *Az Elmű-Émász GIS rendszerének leírása*, Elérhetőség: <http://www.geometria.hu/?p=2752>, [olvasva: 2017.05.14]
- [70] Adler, Ju.P., Markova, E.V. és Granovszkij, Ju.V. (1977). *Kísérletek tervezése optimális feltételek meghatározására*, Műszaki Könyvkiadó-Mir Könyvkiadó, Budapest-Moszkva
- [71] Brunner, Zs., Kis, M., Kovács, G. és Máté, M. (2002). *Operációkutatás példatár*, Dr. T.O.P. Kft., Budapest
- [72] Dán, A., Hartmann, B. és Kiss, P. (2011). *Hálózati áramellátás és feszültségminőség*, [on-line], Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamos Energetika Tanszék. Elérhetőség:

<https://vet.bme.hu/sites/default/files/tamop/vivem178/out/html/vivem178.html> [olvasva: 2017.10.11.]

- [73] Dombi, J. (2012). *Intelligens rendszerek*, [on-line], Szegedi Tudományegyetem, Természettudományi és Informatikai Kar, Informatikai Tanszékcsoport, Elérhetőség: <http://www.inf.u-szeged.hu/~dombi/lib/downloads/school/resources/ai2/mi2.pdf> [olvasva: 2017.10.14.]
- [74] Iancu, I. (2012). A Mamdani Type Fuzzy Logic Controller, In: Prof. Elmer Dadios (Ed.), *Fuzzy Logic - Controls, Concepts, Theories and Applications*, InTech, ISBN 978-9 53-51-0396-7
- [75] Novák, V., Ramík, J., Mares, M., Cerný, M. and Nekola, J. (1992). *Fuzzy Approach to Reasoning and Decision-Making*, Springer: Science + Business Media, ISBN 978-0792313588
- [76] Pedrycz, W., Ekel, P. and Parreiras, R. (2010). *Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods and Applications*, Wiley, ISBN 978-0470682258
- [77] Johanyák, Zs. Cs. és Dr. Kovács, Sz. (2004). A fuzzy tagsági függvény megválasztásáról, *GAMF Közleményei*, Kecskemét, XIX. évfolyam, pp. 73-84., ISSN 0230-6182
- [78] Louro, M., Fortunato, C., Almeida, B., Veríssiomo, M., Pinto Pereire, L. and Pimenta, F. (2015). Getting real-time fault location information from multi-vendor legacy protection systems, *23rd International Conference on Electricity, Distribution, CIREN*, Lyon, 15-18. 06. 2015.
- [79] Huang, Q., Jing, S., Yi, J., Zhen, W. (2015). *Innovative Testing and Measurement Solutions for Smart Grid*, Wiley-IEEE Press, ISBN 978-1118889923
- [80] Weranga, K.S.K., Kumarawadu, S. and Chandima, D. P. (2013). *Smart Metering Design and Applications*, Springer, ISBN 978-9814451819
- [81] Schafer, C. (2014). *Smart Metering: Evaluation Effizienter Architekturen Und Technologien*, Disserta verlag, Hamburg, ISBN 978-3954254705
- [82] Borlase, S. (Ed.) (2012). *Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions*, CRC Press, ISBN 978-1439829059
- [83] Powell, L. (2004). *Power System Load Flow Analysis*, McGraw-Hill Education Press, ISBN 978-0071447799
- [84] Das, J.C. (2017). *Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics*, 2nd edition, CRC Press, ISBN 978-1138075047
- [85] Brémaud, P. (2017). *Discrete Probability Models and Methods: Probability on Graphs and Trees, Markov Chains and Random Fields, Entropy and Coding*, Springer, ISBN 978-3319434759



- [86] Tleis, N. (2008). *Power Systems Modelling and Fault Analysis: Theory and Practice*, Newnes, Elsevier, Oxford, ISBN 978-0750680745
- [87] Major, L., Bölöni, P. (szerk.), Gellérthegeyi, J., Horváth, E. (szerk.), Mersich, I., Molnár, J. és Nagy J. (2010). *Méréstechnika*, jegyzet, Óbudai Egyetem, Azonosító: 1161
- [88] Poursharif, G., Brint, A., Holliday, J., Black, M. and Marshall, M. (2015). Smarter Business processes resulting from Smart Data, *23rd International Conference on Electricity, Distribution, CIRED*, Lyon, 15-18. 06. 2015.
- [89] Liu, G., Yu, Y., Gao, F., Zhu, W. (2015). Research of Smart Distribution Network Big Data Model, *23rd International Conference on Electricity, Distribution, CIRED*, Lyon, 15-18. 06. 2015.
- [90] Khafa, F., Barolli, L., Barolli, A. and Papajorgji, P. (eds) (2015). *Modeling and Processing for Next-Generation Big-Data Technologies: With Applications and Case Studies*, Series: Modeling and Optimization in Science and Technologies (Book 4), Springer, ISBN 978-3319091761
- [91] Yu, S. and Guo, S. (2016). *Big Data Concepts, Theories, and Applications*, Springer, ISBN 978-3319277615
- [92] Meng, Z.-W., Lu, Z. and Song, J. (2004). Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids, *Automation of Electric Power Systems*, Vol. 28, No. 15, pp.21-29.
- [93] Moser, P. K. (ed.) (1987). *A Priori Knowledge*, Oxford University Press, ISBN 978-0198750833
- [94] Sembery, P. (1987). *Alkalmazott villamosságtan*, Agrártudományi Egyetem, Gödöllő
- [95] Attia, J.O. (1999). *Electronics and circuit analysis using MATLAB*, CRC Press
- [96] Kemény, S. (2004). *Kísérlettervezés*, oktatási segédanyag, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar, Master of Business Administration szakirányú továbbképzés, Budapest
- [97] Barabási, A.-L. (2016). *A hálózatok tudománya*, Libri Kiadó, Budapest
- [98] Chen, W.-K. (1997). *Graph theory and its engineering applications*, Advanced Series in Electrical and Computer Engineering- Vol.5, World Scientific Publishing Company, ISBN 978-9810218591
- [99] Pálfi J., Holcsik P., Tompa M. (2016). Network Science Tools applied to Low Voltage Networks, *11th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics*, SACI, 17-19.11.2016., Timisoara

- [100] ELMŰ (2013). Éves jelentés 2012, ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoport, pp. 45-50, Elérhetőség: [https://bet.hu/newkibdata/113949751/ELMU\\_ZLETI.pdf](https://bet.hu/newkibdata/113949751/ELMU_ZLETI.pdf) [2017.10.14.]
- [101] Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions (2007). Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius – The way ahead for 2020 and beyond, Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0002:FIN:EN:PDF> [2017.10.14.]
- [102] Fábíán, A. és Dr. Morva, Gy. (2014). Mi van veled, okos mérés? [on-line], [www.villanylap.hu](http://www.villanylap.hu), Elérhetőség: <https://www.villanylap.hu/lapszamok/2014/aprilis/2993-2014-04-18-11-20-39> [2017.10.14.]
- [103] Reichenbach, H. (1965). *The Theory of Relativity and a Priori Knowledge*, University of California, Berkeley and Los Angeles, ISBN-13 978-0520010598
- [104] Cseke, V. (1982). A valószínűségszámítás és gyakorlati alkalmazásai, Dacia Könyvkiadó, Kolozsvár-Napoca
- [105] Wilson, R.J. (1996). *Introduction to graph theory*, 4th edition, Longman group Ltd., Essex, ISBN 0-582-24993-7
- [106] Archdeacon, D. (1996). Topological Graph Theory, *A survey. Congressus Numerantium*, Vol. 115, No. 5-54, p.18
- [107] Fiedler, M. (1975). A Property of Eigenvectors of Nonnegative Symmetric Matrices and its Application to Graph Theory, *Czechoslovak Mathematical Journal*, Vol. 25, No. 4, pp. 619-633.
- [108] Marcus, M. and Minc, H. (1964). *A Survey of Matrix Theory and Matrix Inequalities*, Allyn and Bacon, Boston
- [109] Cameron, P.J., Goethals, J.M., Siedel, J.J. and Shult, E.E. (1976). Line Graphs, Root Systems, and Elliptic Geometry, *Journal of Algebra*, Vol. 43, No. 1, pp. 305-327.
- [110] Gerőcs, L. és Vancsó, Ö. (szerk.) (2010). *Matematika*, Akadémiai Kiadó, Budapest
- [111] Kac, M. (1966). Can one hear the shape of a drum, *American Mathematical Monthly*, Vol. 73, No. 4, part II, pp.1-23.
- [112] Fowles, G.R. (1986). *Analytical Mechanics*, 4<sup>th</sup> ed., Saunders College Publishing, Philadelphia
- [113] Rozenblat, A. (2012). Matrix Determinant with Graphs for Laplace's and Expansion Methods, AuthorHouse, ISBN 978-1477293508
- [114] Cvetković, D.M., Doob, M and Sachs, H. (1995). *Spectra of Graphs*, 3<sup>rd</sup> ed., Johann Ambrosius Barth Verlag, Heidelberg

- [115] Kel'Mans, A.K. (1967). Properties of the Characteristic Polynomial of a Graph, *Cybernetics — in the service of Communism*, Izdat. "Energija", Moscow, Vol. 4, pp. 27-41. (orosz nyelven)
- [116] Minc, H. (1988). *Nonnegative Matrices*, Wiley Interscience, New York
- [117] Kel'Mans, A.K. (1965). The Number of Trees in a Graph, I, *Automat. Remote Control*, Vol. 26, No. 12, pp. 2118-2129. (oroszról fordítva)
- [118] Kel'Mans, A.K. (1966). The Number of Trees in a Graph, II, *Automat. Remote Control*, Vol. 27, pp. 233-241. (oroszról lefordítva)
- [119] Fiedler, M. (1973). Algebraic Connectivity of Graphs, *Czechoslovak Mathematical Journal*, Vol. 23, pp. 298-305.
- [120] Mohar, B. (1991). The Laplacian Spectrum of Graphs, In Alavi, Y. et al. (eds) *Graph Theory, Combinatorics, and Applications*, John Wiley & Sons, New York, pp. 871-898.
- [121] Merris, R. (1998). Laplacian Graph Eigenvectors, *Linear Algebra and its Applications*, Vol. 278, No. 1-3, pp. 221-236.
- [122] Anderson, W.N. and Morley, T.D. (1985). Eigenvalues of the Laplacian of a Graph, *Linear and Multilinear Algebra*, Vol. 18, pp. 141-145.
- [123] Li, J.S. and Zhang, X.D. (1997). A New Upper Bound for Eigenvalues of the Laplacian Matrix of a Graph, *Linear Algebra and its Applications*, Vol. 265, pp. 93-100.
- [124] Merris, R. (1998). A note on Laplacian graph eigenvalues, *Linear Algebra and its Applications*, Vol. 285, pp. 33-35.
- [125] Li, J.S. and Zhang, X.D. (1998). On the Laplacian eigenvalues of a graph, *Linear Algebra and its Applications*, Vol. 285, pp.305-307.
- [126] Mayer-Schönberger, V. és Cukier, K. (2014). Big Data (Forradalmi módszer, amely megváltoztatja munkánkat, gondolkodásunkat és egész életünket), HVG Kiadó Zrt., Budapest, ISBN 978 963 304 199 4
- [127] Gandomi, A., and Haider, M. (2015). Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics, *International Journal of Information Management*, Vol. 35, No. 2, pp. 137-144.
- [128] Vereczkei, Z. (szerk) (2017). Másodlagos adatforrások használata a statisztikában (Általános ismeretek és a hazai gyakorlat), Központi Statisztikai Hivatal, Budapest, ISBN 978-963-235-500-9, Elérhetőség: <http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/pdf/muhelytanulmanyok11.pdf>
- [129] Pálfi Judith, Holcsik Péter, "New Database and Theoretical Model for Power Distribution Networks", Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2017 pp.

- 539-544, Kiadás: Technical University of Košice Faculty of Electrical Engineering and Informatics
- [130] Department of Electrical Power Engineering, Published: September 12–14, 2017, Stará Lesná, Slovak Republic, ISBN 978-80-553-3195-9 Simon, K. (2014). ELMŰ-ÉMÁSZ Smart Metering Multi Utility pilot projekt bemutatása, előadás, *Smart Future Forum*, 2014.06.20. Elérhetőség: <http://www.okosjovo.hu/documents/Okos%20J%C3%B6v%C5%91%20konferencia%20Simon%20Kriszti%C3%A1n%2020140424.pdf>
- [131] Okos mérés a magyar villamos elosztóknál, előadás, Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Okos Mérés Szakmai Konzultáció, 2013.06.04., Budapest, Elérhetőség: [http://www.mee.hu/files/images/files2/u9/smart%20metering%20-%20MEEs\\_v31.pdf](http://www.mee.hu/files/images/files2/u9/smart%20metering%20-%20MEEs_v31.pdf)
- [132] Pokorádi, L. (2008). Rendszerek és folyamatok gráf-modellezése, *Szolnoki tudományos Közlemények XII.*
- [133] Solt, Gy. (1973). *Valószínűségszámítás példatár*, 3. kiadás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [134] D\_U-007/1/2010 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. műszaki kockázatkezelésre vonatkozó kiegészítő szabályozása
- [135] Pálfi, J., Holcsik, P., Takács, M. és Mitrik, Zs. (2016). Determination of the fault identification accuracy in LV networks using the Fuzzy method, In: Szakál, A. (szerk.) *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics Conference Proceedings: SMC 2016*. Budapest, 2016.10.09-2016.10.12. ISBN 978-1-5090-1897-0
- [136] Holcsik Peter, Tompa Miklós, "Electrician Forms' Evaluation using Machine Learning Methods", Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering ELEKTROENERGETIKA 2017 pp. 389-394, Publisher: Technical University of Košice Faculty of Electrical Engineering and Informatics Department of Electrical Power Engineering, Kiadás: September 12–14, 2017, Stará Lesná, Slovak Republic, ISBN 978-80-553-3195-
- [137] Iványi, A. (szerk.) (2004). *Informatikai algoritmusok I.*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest
- [138] Iványi, A. (szerk.) (2005). *Informatikai algoritmusok II.*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest
- [139] Farkas, M. (szerk.) (1972). *Matematikai kislexikon*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [140] Meszéna, Gy. és Ziermann, M. (1981). *Valószínűségelmélet és matematikai statisztika*, Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest

- [141] Galambosné Tiszberger, M. (2015). A hálózat kutatás módszertani vizsgálati lehetőségei – szakirodalmi összefoglalás, Pécsi Tudományegyetem, Pécs, ISBN 978-963-642-988-1
- [142] Kemény, S. és Deák, S. (1990). *Mérések tervezése és eredményeik értékelése*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [143] Pokorádi, L. (2015). Hibafa érzékenységi elemzése, *Műszaki Tudományos Közlemények 3.*, XX. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, pp.263–266.
- [144] Stamatelatos, M. and Veseley, W. (2002). *Fault Tree Handbook with Aerospace Applications*, NASA Office of Safety and Mission Assurance, Washington DC
- [145] Rausand, M. and Hoyland, A. (2004). *System Reliability Theory: Models, Statistical methods and Applications*, 2nd Edition, Wiley-Interscience, New Jersey
- [146] Halme, J. and Aikala, A. (2012). Fault tree analysis for maintenance needs, *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd., Vol. 364, 012102
- [147] Pottonen, L. and Oyj, F. (2005). Method for analysing the effect of substation failures on power system reliability, *15th Power Systems Computation Conference*, 22-26 August, Liege
- [148] Rapcsák, T. (2007). Többszemponú döntési problémák, Budapesti Corvinus Egyetem, MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézetébe kihelyezett Gazdasági Döntések Tanszék, MTA Sztaki
- [149] MATLAB: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [150] Jordán, T., Recski, A. és Szeszlér, D. (2011). *Rendszeroptimalizálás*, 2. kiadás, Typotex Kiadó, Budapest
- [151] Sztrik, J. (2011). *Informatikai rendszerek modellezése, analízise*, jegyzet, Debreceni Egyetem, Informatikai Kar, Debrecen
- [152] Bergmann, G., Darvas, D., Molnár, V., Szárnyas, G. és Tóth, T. (2017). *Rendszermodellezés*, jegyzet, Hibatűró Rendszerek Kutatócsoport, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elérhetőség: <http://docs.inf.mit.bme.hu/remo-jegyzet/>
- [153] Kárász, P. és Schmidt, E. (2004). *Operációkutatás*, Budapesti Műszaki Főiskola, Neumann János Informatikai Főiskolai Kar, Budapest
- [154] Pattantyús, Á.G. (1967). *Gépész- és villamosmérnökök kézikönyve 8.*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [155] Holcsik, P., Pálfi, J., Meghibásodott berendezés beazonosítása a kisfeszültségű elosztóhálózaton, In: Erdélyi Magyar Műszaki Társaság (szerk.) *XXVI. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás konferencia*, Kolozsvár, 2016.10.08, Erdélyi Magyar Tudományos Társaság, 2016. pp. 124-128.

- [156] Al-Fedaghi, S., Alloughani, R. and Al Sanousi, M. (2012). A New Methodology for Process Modeling of Workflows, *Journal of Software Engineering and Applications*, Vol. 5, pp.560-567.
- [157] Csiha, Cs. (1989). *Rendszerelméleti fogalmak*, Dacia Könyvkiadó, Cluj-Napoca
- [158] Pokorádi, L. (2016). Modellek a műszaki biztonság tudományban, *GRADUS*, Vol. 3, No.2, pp. 92-100.
- [159] Hiai, F. and Petz, D. (2014). *Introduction to Matrix Analysis and Applications*, Springer, ISBN 9783319041490
- [160] Abdi, H. and Williams, L.J. (2010). Matrix Algebra, In Salkind, N. (Ed.), *Encyclopedia of Research Design*, Sage Publications, Thousand Oaks, California
- [161] N\_VU-038/1/2016 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. végrehajtási utasítása az egyszemélyes munkavégzésről
- [162] N\_VU-037/2013 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. végrehajtási utasítása a helyismereti vizsga követelményekről
- [163] N\_VU-036/2014 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. szerelői gépjárművek felszereltségének, belső rendjének szabályzatáról
- [164] Gallier, J. and Quaintance, J. (2017). *Fundamentals of Linear Algebra and Optimization*, Department of Computer and Information Science, University of Pennsylvania, Philadelphia
- [165] Osmundson, J.S., Gottfried, R., Kum, C.Y., Boon, L.H., Lian, L.W., Patrick, P.S.W. and Thye, T.C. (2004). Process Modeling: A Systems Engineering Tool for Analyzing Complex Systems, *Systems Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp.320-337.
- [166] D\_VU-101/3/2017 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. végrehajtási utasítása a garantált szolgáltatásokról
- [167] Muller, G. (2016). *System Modeling and Analysis: a Practical Approach*, Gaudi Systems Architecting, Available:  
<http://www.gaudisite.nl/SystemModelingAndAnalysisBook.pdf>
- [168] Few, A.A. (1996). *System behavior and system modeling*, University Science Books, Sausalito, California
- [169] N\_VU-003/2015 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. végrehajtási utasítása az mWFM rendszerrel kapcsolatos szerelői tevékenységekről
- [170] Unhauzer, A. (2012). Villamos hálózati fogyasztók zavarhatásainak és teljesítményprofiljainak vizsgálata új mérési és modellezési módszerekkel, doktori értekezés, Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Miskolc

- [171] N\_VU-018/2015 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. végrehajtási utasítása a fogyasztói csatlakozó és mérőhelyi munkák végrehajtásáról
- [172] D\_VU-108/2013 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. végrehajtási utasítása a védendő fogyasztók kezeléséről
- [173] Ábrahám, I. (2013). *Döntésméleti módszerek (Optimalizálás matematikai modellezéssel)*, Typotex Kiadó, Budapest
- [174] Csank, A. (2008). Távműködtetés megvalósítása az ELMŰ-ÉMÁSZ elosztóhálózaton, a MEH mutatók javítása érdekében, előadás, *Magyar Elektrotechnikai Egyesület 55. Vándorgyűlés*, Eger
- [175] N\_VU-25/1/2010 ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. végrehajtási utasítása a magasban végzett munkák esetén a leesés elleni védelem általános szabályairól
- [176] ELMŰ Hálózati Kft. és ÉMÁSZ Hálózati Kft. VU diszpécsereknek
- [177] Holcsik, P. and Pálfi, J. (2016). Emergency Situations Management with the Support of Smart Metering, *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA*, Vol.13, No.3, pp. 195-206.
- [178] Holcsik, P. (2016). Improving Quality of Service Indicators in Distribution Network by Applying Modern LV Network Management System, In: Szakál Anikó (szerk.), *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2016*. 412 p., Timisoara, 2016.05.12-2016.05.14. pp. 431-436., ISBN 978-1-5090-2379-0
- [179] Jelasity, M. (1999). Genetikus algoritmusok. In Futó, I. szerk., *Mesterséges Intelligencia*, Aula Kiadó, Budapest, pp. 549–568.
- [180] Oláh, B. (2011). Flow-shop ütemezési feladatokat megoldó genetikus algoritmus mutáció operátorainak érzékenységvizsgálata, Miskolci Egyetem, *Multidiszciplináris tudományok*, 1. kötet, 1. szám, pp. 95-102.
- [181] Newman W., M. (2000). *The Laplacian Spectrum of Graphs*, University of Manitoba Winnipeg, Canada, 0-612-57564-0

## ÁBRAJEGYZÉK

- 1. ábra:** Országos villamosenergia-rendszer felépítése
- 2. ábra:** Magyarország NAF villamos energia átviteli rendszere
- 3. ábra:** Íves és gyűrűs hálózatok szemléltetése
- 4. ábra:** Magyarországi elosztói engedélyesek részaránya az áramszolgáltatói piacon
- 5. ábra:** EÉGIS rendszer hálózati megjelenítő oldala
- 6. ábra:** Az mWFM rendszer terepi alkalmazásának felülete
- 7. ábra:** Az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoport által használt ALGIZ típusú terepi eszközök használat közben
- 8. ábra:** Hibaelhárítás lépéseinek folyamatábrája
- 9. ábra:** EDP Distribuição és QEnergia által létrehozott hibahely beazonosító rendszerének sikeres hibahely beazonosítása
- 10. ábra:** A valós fizikai KIF rendszer elemeinek illusztrációja
- 11. ábra:** az FLDa folyamatábrája
- 12. ábra:** Szintvektor mátrix
- 13. ábra:** Az FLDa eljárás folyamatábrája
- 14. ábra:** Az FLDa eredményeként kapott hibahely attribútum tábla formátuma
- 15. ábra:** KIF mintagráf reprezentációja MATLAB programmal
- 16. ábra:** A KIF mintahálózat egy csomópontjának kapcsolata
- 17. ábra:** Hibazóna behatárolás eredménye részgráfszűkítéssel
- 18. ábra:** A részgráf Laplace spektruma
- 19. ábra:** A részgráfszűkítés után megjelenített hierarchikus hibafa
- 20. ábra:** Példa egyedi hibalokalizációra
- 21. ábra:** Példa csoportos hibalokalizációra
- 22. ábra:** A jelenlegi (a) és az FLDa hibahely attribútum táblával támogatott (b) KIF villamos elosztóhálózati hibaelhárítás folyamata
- 23. ábra:** A jelenlegi és az FLDa hibahely attribútum táblával támogatott összevont KIF villamos elosztóhálózati hibaelhárítás folyamatának  $m$  hibacímre és  $m$  szerelőcsaptra történő kiterjesztése
- 24. ábra:** Egyszerűsített általános matematikai modell egy mérnöki probléma megoldására



- 25. ábra:** A javasolt kiefeszültségű hibacím ütemező rendszer (LFS) egyszerűsített matematikai modellje
- 26. ábra:** Egy időben keletkezett KIF és KÖF üzemzavarok által érintett fogyasztói számok relációja
- 27. ábra:** A vizsgált időszak (2014.01.01.-2016.12.31.) SAIDI megtakarításának területi eloszlása
- 28. ábra:** Egyedi és csoportos hibacímek SAIDI-ra vonatkozó hatása a KIF üzemzavar során érintett fogyasztói számok alapján
- 29. ábra:** Az érintett fogyasztói számokra vonatkozó, meghatározott példa intervallumokon belüli számosság
- 30. ábra:** A javasolt LFS rendszer folyamatábrája
- 31. ábra:** A javasolt rendszerek (zöld) architektúrája a jelenlegi (kék) rendszerek architektúrájára épülve
- 32. ábra:** 1. Példa Egy szimmetrikus 3x3-as hibaütemezési feladat mátrixai
- 33. ábra:** 2. Példa Egy aszimmetrikus 3x3-as hibaütemezési feladat mátrixai
- 34. ábra:** A disszertáció CMAP-je

## TÁBLÁZATJEGYZÉK

- 1. táblázat:** ELMŰ Hálózati Kft, Pesti Régió 2015. 01. – 08. időtartamra vonatkozó SAIFI és SAIDI adatai
- 2. táblázat:** Áramszolgáltatói piaci részesedések a felhasználói helyek száma alapján 2015. decemberében
- 3. táblázat:** A KIF modell csomópont táblázata
- 4. táblázat:** A KIF modell él táblázata
- 5. táblázat:** Szomszédossági mátrix
- 6. táblázat:** A modell és a valós KIF gráf hálózati tulajdonságai
- 7. táblázat:** A különböző szintű üzemirányítási rendszerben történő üzemzavarok prioritizálásának optimalizálásával elérhető SAIDI javulás
- 8. táblázat:** A különböző szintű üzemirányítási rendszerben történő üzemzavarok prioritizálásának optimalizálásával elérhető SAIDI javulás gazdasági előnyei
- 9. táblázat:** A jelenlegi és a javasolt rendszer közötti kommunikációs csatornák jellemzői

## Pálfi Judith közleményei

### 2018

20. Pálfi Judith: Korszerű hibabehatárolás a kisfeszültségű elosztóhálózaton, *Elektrotechnika*, a MEE hivatalos lapja, 2018/1-2, 11. évfolyam, pp. 9-11., [P20]

### 2017

19. Judith Pálfi, Hajdu Balázs: Egyszerű mérőből okos mérők - egy IoT projekt ismertetése, *XII. Óbudai Energetikai Konferencia 2017*, 2017, pp. 71-79., ISBN:978-963-449-062-3, [PH19]
18. Judith Pálfi, Molnár Tamás, Péter Holcsik: Decentralizált villamosenergia termelés napelem-parkkal közcélú hálózaton, *XII. Óbudai Energetikai Konferencia 2017*, pp. 119-131., ISBN:978-963-449-062-3, [PMH18]
17. [PH17]: Judith Pálfi, Hajdu Balázs: Energiamonoring rendszer építése ESP8266 alapon, *XXXIII. KANDÓ KONFERENCIA 2017*, Paper 4., ISBN: 978-963-7158-08-7
16. Judith Pálfi, Molnár Tamás, Péter Holcsik: Research of a solar panel park's impact connected to a public network in the interest of optimal electricity supply, *XXXIII. KANDÓ KONFERENCIA 2017*, Paper 1., ISBN: 978-963-7158-08-7, [PMH16]
15. Judith Pálfi, Péter Holcsik, Ferenc Novothny: Creating a representative model for low voltage distribution network, *XXXIII. KANDÓ KONFERENCIA 2017*, Paper 2., ISBN: 978-963-7158-08-7, [PHN15]
14. Judith Pálfi, Péter Holcsik, Ferenc Novothny: Development of a new fault-localization algorithm for low voltage networks, *XXXIII. KANDÓ KONFERENCIA 2017*, Paper 3., ISBN: 978-963-7158-08-7, [PHN14]
13. Judith Pálfi, Miklós Tompa, Péter Holcsik: Analysis of the Efficiency of the Recloser Function of LV Smart Switchboards, *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA*, Vol. 14, No. 2, pp. 131-140., [PTH13]
12. Judith Pálfi, Péter Holcsik: New Database and Theoretical Model for Power Distribution Networks, *ELEKTROENERGETIKA* &: pp. 539-541., [PH12]
11. Pálfi Judith, Novothny Ferenc, Holcsik Péter: A kisfeszültségű villamos elosztóhálózat hibacím ütemező rendszerelméleti megközelítése, *GRADUS*, Vol. 4, No.1, pp. 219-226., [PNH11]

10. Péter Holcsik, **Judith Pálfi**: Emergency Situations Management with the Support of Smart Metering, *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA*, Vol. 13, No.3, pp. 195-198., [PH10]
9. Holcsik Péter, **Pálfi Judith**: Meghibásodott berendezés beazonosítása a kifestültségű elosztóhálózaton, In: Erdélyi Magyar Műszaki Társaság (szerk.) *XXVI. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás konferencia*. Konferencia helye, ideje: Kolozsvár, Románia, 2016.10.08 Kolozsvár: Erdélyi Magyar Tudományos Társaság, 2016. pp. 127-129., [PH09]
8. **Judith Pálfi**: Localization of faults in low voltage networks by the graph method, In: Szakál Anikó (szerk.), *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics SACI 2016*. 412 p. Konferencia helye, ideje: Timisoara, Románia, 2016.05.12-2016.05.14. Budapest: IEEE, 2016. pp. 397-400. (ISBN:978-1-5090-2379-0), [P08]
7. **Judith Pálfi**, Péter Holcsik, Márta Takács, Zsolt Mitrik: Determination of the fault identification accuracy in LV networks using the Fuzzy method, In: Szakál A (szerk.) *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics Conference Proceedings: SMC 2016*. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2016.10.09-2016.10.12. Budapest: IEEE, 2016. p. &1-3. (ISBN:978-1-5090-1897-0), [PHTM07]
6. **Judith Pálfi**, Péter Holcsik, Miklós Tompa: Network Science Tools applied to Low Voltage Networks, In: Szakál Anikó (szerk.) *17th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2016)*. 370 p. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2016.11.17-2016.11.19. Budapest: IEEE Hungary Section, 2016. pp. 41-47. (ISBN:978-1-5090-3908-1), [PHT06]
5. **Judith Pálfi**, Miklós Tompa, Péter Holcsik: Intelligens elosztószekrények reclose funkciójának hatása a kifestültségű elosztóhálózat üzemzavari mutatóira, (szerk.) *XXXII. Kandó konferencia: Kandó a tudomány hajóján*. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2016.11.17 Budapest: Óbudai Egyetem, 2016. pp. 57. (ISBN:978-963-7158-07-0), [PTH05]
4. **Judith Pálfi**, Péter Holcsik: Szinergiák az AD&TE kutatócsoportban, *XXXII. Kandó konferencia: Kandó a tudomány hajóján*. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2016.11.17 Budapest: Óbudai Egyetem, 2016. pp. 59., (ISBN:978-963-7158-07-0), [PH04]
3. **Pálfi Judith**, Kádár Péter: Előre vagy hátra?: Lakóépületek energiamérlege két évszázaddal ezelőtt, In: anon (szerk.), *XI. Óbudai Energetikai Konferencia 2016: "Az épület energiája - a fenntartható ház"*. 91 p. Konferencia helye, ideje: Budapest,

Magyarország, 2016.11.08 Budapest: Óbudai Egyetem, 2016. pp. 69-80. (ISBN:978-963-449-004-3), [PK03]

## 2015

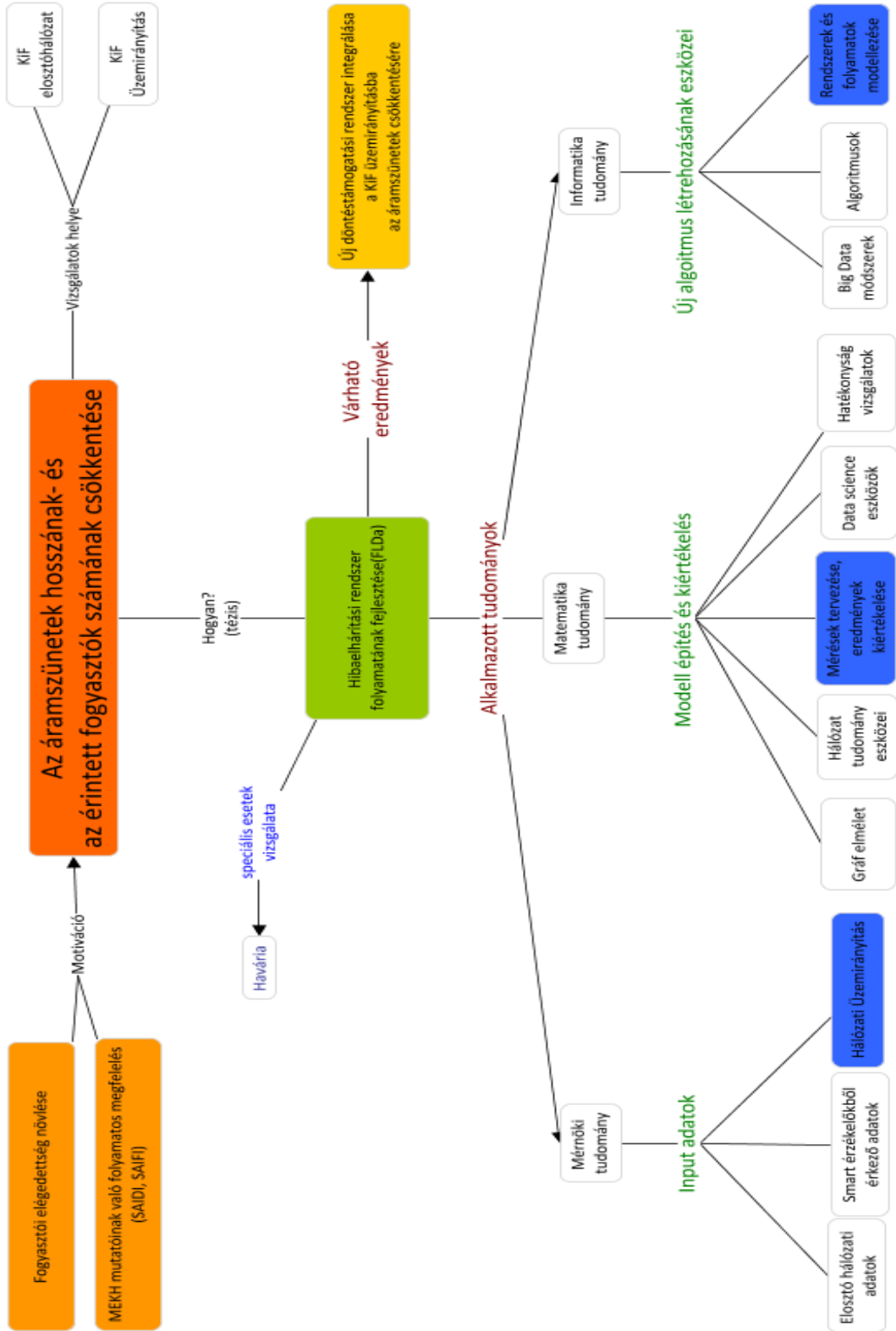
2. Holcsik Péter, **Pálfi Judith**: SCADA funkciók használata a kiefeszültségű hálózati üzemiirányításban, In: Szakál Anikó (szerk.) *10. Jubileumi Óbudai Energetikai Konferencia - Smart Cities*. 156 p. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2015.11.10-2015.11.11. Budapest: Óbudai Egyetem, 2015. p. &1-5. (ISBN:978-615-5460-57-9), [PH02]

## 2014

1. **Judith Pálfi**, György Morva: Optimisation of the work management system of electrical energy providers by coaching, In: Temesvári Zsolt (szerk.) *30. Kandó Konferencia [30th Kandó Conference]*. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2014.11.21 Budapest: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 2014. p. 1. (ISBN:978-615-5460-24-1), [PM01]

# MELLÉKLETEK

## A disszertáció CMAP-je



24. ábra: A disszertáció CMAP-je

## A disszertációban használt jelölések jegyzéke

### Bevezetés:

BVTSZ - Budapesti Villamos Teherelosztó Szolgálat

EÉGIS - Elmű és Émász GIS rendszere

GIS - Geographic Information System

GSZ – garantált szolgáltatás

KDSZ - Körzeti Diszpécser Szolgálat

KIF – kisfeszültségű elosztó hálózat

KÖF – közepfeszültségű elosztó hálózat

MEH – Magyar Energetikai Hivatal

MEH 1 – üzemzavarok során érintett fogyasztók száma / összes fogyasztószám

MEH 2 - fogyasztónkénti üzemzavar kiesési idők összege / összes fogyasztószám

MEKH - Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal

mWFM – mobil Workforce Management Modul

NAF – Nagyfeszültségű átviteli hálózat

$N_i$  - az üzemzavarban érintett fogyasztók száma

$N_T$  - az összes fogyasztói szám, mely az adott évre év elején meghatározott konstans érték

SAIDI - System Average Interruption Duration Index

SAIFI - Average Interruption Frequency Index

SAP – System Applications Products

SCADA/DMS – Supervisory control and data acquisition/ Distribution Management systems

TC - TeleCenter

$U_i$  – kiesési idő elosztóhálózati üzemzavar esetében, ami a hiba bejelentés időpontjától a fogyasztók ellátásának időpontjáig tart.

ÜIK - üzemirányítási központok

VET – villamos energiáról szóló 2007. évi LXXXVI. törvény

### **Célkitűzés:**

DDRM - diszpécseri döntéstámogató rendszer modell

FLDa - Fault Location Determination algorithm

### **Alkalmazott módszerek:**

A – szomszédsági mátrix

$A^*$  - súlyozott szomszédsági mátrix

D – diagonális mátrix

G – gráf

$G'$  – G algráfja

$G^c$  - G gráf komplementere

V – gráf pontjai

E – gráf élei

I – illeszkedési mátrix

$d_j$  – egy gráf  $j$  pontjának foka

$d$  – egy mátrix közös csomóponti foka

$\delta$  – minimum fokszám

$\Delta$  – maximum fokszám

L – Laplace mátrix

$L(G)$  – G gráf Laplace-a

$l(G)$  – G élgráfja

$L_{[i,j]}$  – L szubmátrixa, amely  $L$   $i$ -edik sorának és  $j$ -edik oszlopának eltávolításával jön létre



$\lambda$  – Laplace mátrix sajátértéke

$m_i$  - az  $i$  csomópont összes szomszédjának átlagos fokszáma

$\mu$  -  $A$  szomszédsági mátrix sajátértéke

$P$  – permutációs mátrix

$P_n$  –  $n$  csomópontok útja

$P_G(x)$  -  $G$  Laplace mátrixának karakterisztikus polinomja

$s(G)$  –  $G$  felosztott gráfja

$t(G)$  –  $G$  feszítőfáinak a száma

$v(G)$  –  $G$  gráf csomóponti összefüggősége

$x$  – sajátvektor

### **Az új hibalokalizációs algoritmus kifejlesztése:**

$c_G$  –  $G$  gráf éleinek halmazán értelmezett kapcsolódási függvény

$D$  – dataset

$DB$  – adatbázis (data base)

$E_G$  –  $G$  gráf éleinek halmaza

$G$  – gráf

$g^{k,l}$  - *place of smart error signal on level  $k$  node  $l$*

$I$  –  $G$  gráf illeszkedési mátrixa

$ln$  - címkéző függvény (hozzárendelünk címkéket, súlyokat értünk mi ezalatt a csomópontokhoz amit a  $W$  mártixba tárolunk)

$n_i$  – gráf  $i$ -dik csomópontjának *a priori valószínűsége*

$e_i$  – gráf  $i$ -dik élének *a priori valószínűsége*

$l$  – szintek (levels)

$n$  – mátrix rendje/sorrendje/fokozata

$O_e$  – szélső élek vektora (outer edges)

$Q$  – a szintvektorok dinamikus mátrixa

$S$  – szubgráf

$S1$  – első lépés (step 1)

$A$ - gráf szomszédossági mátrixa

$T$  – [arrows, levels, nodes, weights, attributes ], a fa objektum

$v$  - *number of error signals*

$V_G$  –  $G$  gráf csomópontjainak halmaza

$W$  – súlygráf

$W^{Edge}$  – [ length, knot/km,malfunction probability, age factor], a súlymátrix, amely tartalmazza az élekre vonatkozó normalizált hossz, kötés/kilométer, meghibásodási valószínűség, illetve életkor faktor súly adatokat az ELMŰÉMÁSZ áramszolgáltató vállalat adatbszolgáltatásából származó értékek szerint.

### **Javaslat egy kifeszültségű dinamikus hibacím ütemezőre:**

$p$  – járulékos gerjesztések

$u$  – matematikai modell input

$y$  – matematikai modell output

$k$  – szerelőegységnek ütemezett hibacím

$\beta$  – rangsorolás súlyozási rendszer

$B$  – szerelőegység paraméterezett mátrixa

$H$  – KIF hibacímek paraméterezett mátrixa

$E$  – ütemezés dinamikus eredmény mátrixa

LFS - Low-voltage Fault-sheet Scheduling system