



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Lipécz Ákos András

**IDŐJÁRÁS-ALAPÚ
KOCKÁZATBECSLÉS A VALÓS
IDEJŰ ÜZEMELTETÉS SORÁN**

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

TANSZÉKI KONZULENS

Dr. Farkas Csaba

BUDAPEST, 2023

Összefoglaló

Minden TSO számára örök feladat marad az, hogy költséghatékonyabb és üzembiztosabb villamosenergia-rendszert fejlesszen, melyhez ma már megkerülhetetlen az, hogy minél okosabbá tegyék a hálózatot. Ezáltal a folyamatosan bővülő mennyiségű és típusú historikus adatok elemzésével egyre jobb képet kaphatunk a jelen villamosenergia-rendszer megbízhatóságáról.

Kezdetben a hazai, illetve nemzetközi villamosenergia-rendszer kiesési eseményeit összefoglaló dokumentumokat ismertettek, illetve az eredményeikből készítettem olyan statisztikákat, melyekkel kimutatható a kontingenciák gyakorisága, súlyossága és okainak megoszlása.

Továbbiakban a villamosenergia-rendszer megbízhatóságát vizsgáltam valószínűség-alapú kockázatbecsléssel (PRA), amit elsősorban a valós idejű üzemeltetésnél használják, de a historikus adatok újraelemzésével képesek vagyunk a hálózati elemek, legfőképpen vezetékek időjárási kitettségét reprezentálni, illetve a múltbéli időjárás-alapú kontingenciák körülményeit is vizsgálni. Ezzel a módszertannal három távvezeték 10 éves időtávlatú időjárás kitettségére vonatkozó megbízhatóságát vizsgáltam, egy-egy üzembiztonságot veszélyeztető időjárási fenyegetettség fókuszában.

Legvégül, pedig 2021. 07. 21-én bekövetkező időjárás-alapú kontingencia előrejelezhetőségét vizsgáltam PRA módszertan megbízhatósági újraelemzésével.

Abstract

It remains an eternal task for all TSOs to develop a more costeffective and reliable electricity system, for which it is now unavoidable to make the network as smart as possible. In this way, by analyzing the constantly expanding amount and type of historical data, we can get a better and better picture of the reliability of the current electricity system.

At the beginning, documents summarizing the outage events of the domestic and international electricity system were presented, and from their results I prepared statistics that show the frequency, severity and distribution of the causes of the contingencies.

In addition, I examined the reliability of the electricity system using probability-based risk assessment (PRA), which is primarily used in real-time operation, but by reanalyzing historical data, we are able to represent the weather exposure of network elements, especially lines, and also examine the circumstances of past weather-based contingencies . Using this methodology, I examined the reliability of three transmission lines with respect to weather exposure over a 10-year time horizon, focusing on one weather threat threatening operational safety.

Finally, I examined the predictability of the weather-based contingency occurring on 07/21/2021 by reanalyzing the reliability of the PRA methodology.

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés	6
1.1 Sztochasztikus szemléletmód előnyei az operatív üzemeltetés területén	7
2 Időjárás-alapú kontingenciák gyakorisága	8
2.1 ICS 2022 Annual Report.....	8
2.2 VédStat.....	10
3 Nemzetközi, összefogások eredmények	12
3.1 GARPUR	12
3.2 Jogszabályi előírás	13
3.3 WG PRA	13
4 Megbízhatósági elemzés	15
4.1 Norvég FASIT rendszer	15
4.2 Bayes-féle aktualizálási séma	16
4.2.1 BUS alkalmazása PRA során.....	16
5 Valós idejű kiesési valószínűség számítás	19
5.1 Időjárási fenyegetettségek hatása az üzembiztonságra	19
5.1.1 Szél befolyásoló hatása	19
5.1.2 Villám befolyásoló hatása.....	20
5.1.3 Jegesedés befolyásoló hatása	21
5.2 Kiesési valószínűség számítás fenyegetettségekre	22
6 Vaffel demo	25
6.1 Eredeti szkript felépítése	25
6.1.1 Egyszerűsítések.....	26
6.2 Kiegészítéseim és módosításaim az eredeti szkripten	26
7 Vaffel alkalmazása a magyar villamosenergia-rendszeren	28
7.1 Input adatok	28
7.1.1 Felhasználói adatok.....	28
7.1.2 Historikus és eseménytípus adatok	29
7.1.3 Távvezeték fizikai adatai	29
7.1.4 Időjárási adatok.....	30
7.2 Elemzések	31
7.2.1 Megbízhatósági elemzések	31

7.2.2 Megtörtént kontingencia újraelemzése	35
8 Végszó	37
Irodalomjegyzék.....	38

1 Bevezetés

A 21. század elejétől leginkább az infokommunikációs technika és a digitalizáció fejlődése, valamint a megújuló energiaforrások iránti igény növekedése miatt szükséges a villamosenergia-rendszer folyamatos fejlesztése. A nagy, központosított rendszerrel szemben felmerült az igény egy decentralizáltabb áramhálózat iránt, aminek kialakításához smart gridekre, avagy okos hálózatokra van szükség. Napjainkban a hálózat nagymértékben szenzorosított, így egyre több állapotbecslő adatot tudunk összegyűjteni a villamosenergia-rendszerről, ami korszerű algoritmikus adatfeldolgozással és modellezéssel párosulva, többek közt javíthatja a diszpécseri szolgálat hatékonyságát és beavatkozó képességét. Az energetika ezen fejlődési irányát röviden talán a 2022-es MEE Vándorgyűlés mottójával tudnám összefoglalni „*Adatból energia*”.

Jelen témám is „*Adatból energia*” struktúrára épül fel. Az időjárás-alapú kontingencia előrejelzés többek közt valós idejű időjárási és historikus adatokon alapszik és a végén egy valós idejű energiaellátási kockázatot kapunk az egyes távvezetési elemekre. A közte lévő folyamatot hívjuk valószínűség-alapú kockázatbecslésnek, angolul Probability Risk Assessmentnek (PRA). Témám leginkább a smart grid, villamosenergia-rendszer reziliencia kutatási szakterületbe sorolható. A villamosenergia-rendszer rezilienciája, avagy ellenállóképessége a változó körülményekhez való alkalmazkodási képessége, valamint a vészhelyzeti üzemállapotban történő megszakításokkal szembeni ellenálló és regeneráló képessége.

Magát a PRA témakört jellemzően kétféle kutatási területre lehet csoportosítani. Az egyik maga a kockázatbecslés módszertan, vagyis az időjárási és historikus adatok alapján történő valós idejű kiesési valószínűség becslés meghatározása. A másik pedig az előbbi gyakorlati alkalmazása, azaz a PRA alapú preventív beavatkozó intézkedések meghatározása gazdasági és üzembiztonsági szempontból, optimalizáló algoritmusok (pl. SCOPF) alkalmazásával. Munkám az első kutatási területtel foglalkozik részletesen.

1.1 Sztochasztikus szemléletmód előnyei az operatív üzemeltetés területén

Lényegében véve a valós idejű időjárási adatok monitorozásával kapott hálózat megbízhatósági valószínűség becslés sokkal rugalmasabbá teszi a villamosenergia-rendszer üzemeltetését, mint a jelenlegi determinisztikus N-1 alapú megközelítés. Előnye mindenképpen abban rejlik, hogy kontingencia előrejelző pontosságától függően képesek lehetünk csökkenteni a szélsőséges időjárási körülmények hatására kialakuló gazdasági veszteséget, illetve megelőzhetjük szélsőséges üzemállapotok létrejöttét. Még a kontingencia bekövetkezése előtt scenáriókat kaphatunk a létrejövő üzemállapotokról, aminek segítségével meghatározhatunk üzembiztonsági és gazdasági szempontból optimalizált preventív beavatkozó intézkedéseket. Emellett pontos információkkal szolgálhatunk a hálózati operátoroknak az oszlopdőlés vagy távvezeték szakadás földrajzi helyzetéről. A determinisztikus és sztochasztikus megbízhatósági megközelítések összehasonlításával részletesebben alapképzésem szakdolgozatának 2. fejezetében foglalkoztam. [1]

2 Időjárás-alapú kontingenciák gyakorisága

A villamosenergia-szolgáltatás minőségének fejlesztésében nagyon nagy szerepük van az energiaellátást korlátozó vagy megszakító események, kontingenciák körülményei dokumentálásának. Nemzetközi együttműködéseknek köszönhetően számos dokumentálási módszertan, osztályozási rendszer került kidolgozásra, melyeket egy korábbi munkám során részletesen bemutattam [1]. Az ENTSO-E rendeleteken keresztül fokozatosan írja elő a tagjainak ezeknek az alkalmazásait és az eredmények közzétételeit. Mindezen ENTSO-E internetes felületén ([System Operations Reports \(entsoe.eu\)](http://entsoe.eu)) publikusan közzétett riportok felhasználásával szeretnék rámutatni arra, hogy mennyi a kontingencia az ENTSO-E hálózaton és ebből mennyi történik szélsőséges időjárási körülmények miatt.

2.1 ICS 2022 Annual Report

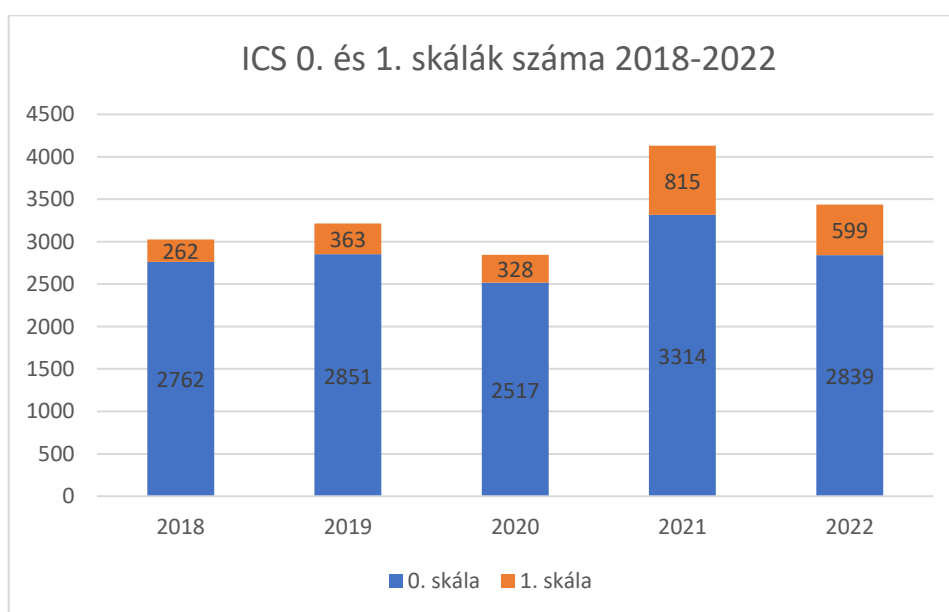
Az Incidens Osztályozási Skáláját, ami röviden a szakirodalomban ICS (az angol Incident Classification Scale rövidítése) a 2009. július 13-i 714/2009/EK európai parlamenti és tanácsi rendelettel összhangban dolgozták ki és az SO GL 15. cikkében kötelezik az egyes európai uniós tagállamok TSO-it az ICS adatszolgáltatásra. Korábbi munkámban már részletesebben bemutattam az ICS-t ([1].forrás 6. fejezetében). Röviden ismertetve az ICS 4 skálából (0, 1, 2 és 3) áll, a skálák súlyossági szintjei a lokális eseményektől a globális eseményekig terjednek. A skálák definíciói:

- Skála alatti események: Az olyan anomáliák, helyi események, ahol a rendszer még normál állapotban marad.
- 0. skála: Figyelemre méltó helyi esemény, de a rendszer még normál állapotban marad.
- 1. skála: Olyan jelentősebb események, melyek megsértik a működési korlátokat, a rendszer veszélyeztetett állapotban van.
- 2. skála: Kiterjedt incidensek, melyeknél nagy a valószínűsége egy kiterjedt területű üzemzavarra. A rendszer veszélyes állapotban van.
- 3. skála: A TSO területén bekövetkezett súlyos esemény, a rendszer blackout állapotban van.

A TSO-k adatszolgáltatásai alapján az ENTSO-E minden évben elkészíti az ICS éves jelentést. Az *ICS 2022 Annual Report* ([2]) című jelentés adatai alapján készítettem az 1. táblázatot és 1. diagramot. A jelentésben legfőképp globális (ENTSO-E), lokális (TSO) és 10 éves időtávlati ICS statisztikai elemzések vannak. A MAVIR 526 és 207 db 0. és 1. skálába sorolható incidenst jelentett 2022-ben.

Szinkronterület	0. skála	1. skála	2. skála	3. skála	Összesen
Baltikum	45	6	-	-	51
Kont. Európa	2276	569	-	-	2845
Nagy-Britannia	179	-	-	-	179
Írország	33	8	-	-	41
Sziget üzemen működő rendszerek	36	3	3	-	42
Skandinávia	163	7	-	-	170
Összesen	2732	593	3	-	3328

1. táblázat ICS skálák száma szinkronterületenként [2]

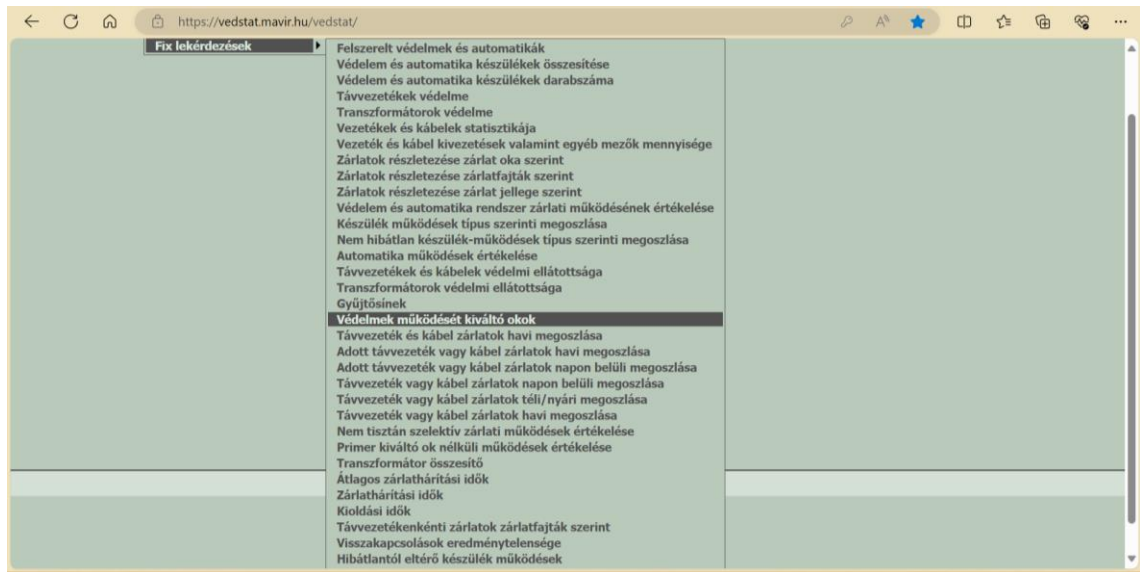


1. diagram ICS 0. és 1. skálák száma 2018-2022 [2]

2.2 VédStat

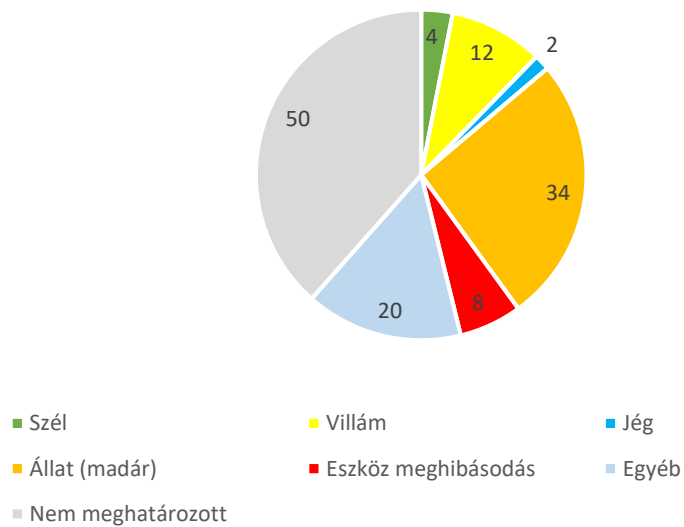
A VédStat rendszer a MAVIR statisztikai adatbázisa, ami a benne leképzett hálózati modellen rögzíti a hálózaton érzékelt eseményeket (zárlatokat), és az annak következtében létrejövő védelmi működéseket, illetve a mért hálózati paramétereket. A VédStat rendszer modellje három alapvető részből tevődik össze, ezek a hálózati-, a készülék-, és az esemény modell. A hálózati modell tartalmazza a szükséges primer és szekunder topológiai alakzatokat. A szekunder rendszer berendezéseit a készülékmodell kezeli. Ez a modell kétszintű hierarchiát követ. A hierarchia felső szintjét maga a berendezés, mint fizikai egység jelenti, alsó szintjén, pedig a logikai eszközök találhatóak, mint például konkrét védelmi vagy automatika funkciók. Az első két modellre épül a statisztika alapját képező esemény modell. Az események rögzítésénél egy automatika-ciklust egy eseményként kezel, így a közben fellépő, esetlegesen különböző eszközökön lévő zárlatokat képes az eseményen belül önállóan kezelni.

Az 1. ábra látható, hogy milyen lekérdezések kérhetőek le a VédStat rendszerből. Én a *Védelmi működéseket kiváltó okok* adatbázisából kértem le a 2022-es naptári évben történő védelmi működéseket összefoglaló dokumentumot, *.xlsx* formátumban. A dokumentum tartalmazza többek közt a védelmi működés földrajzi helyét, idejét (kezdetét és végét), érintett hálózati elemeket, és a számunkra fontos lehetséges kiváltó okokat is. Az utóbbinak a pontos rögzítési módszertana még nem elég kifejtett, így sok esetben hiányos az adatmező. A lehetséges kiváltó okot minden esetben az *ENTSO-E Grid Disturbance Definitions for the Power System above 100 kV* kézikönyvből kell kiválasztani, amit a gyakorlatban előfordulhat, hogy nehéz eldönteni, mert könnyen lehet, hogy nem egyértelmű vagy nincs elegendő információnk róla. Jelen dokumentálási módszertan szerint a kiváltó okokat legtöbbször a hálózati operátorok jelentései vagy az időjárás adatok alapján döntenek el. Például villám hibaokot akkor rögzítenek, ha az OMSZ adatbázisában volt az adott hely közelében rögzített villámlás; a szél vagy jégteher okozta kieséseket elég a kiérkező karbantartók jelentésére alapozni, mivel ekkor a legtöbb esetben súlyosan megrongálódik az adott hálózati elem.



1. ábra A VédStat rendszer lekérdezések típusai

Hibaokok megoszlása



1. diagram A 2022-es VédStat rendszerben regisztrált események hibaok megoszlása

3 Nemzetközi, összefogások eredmények

Globálisan nézve a valószínűség-alapú energetikai módszertanokat évtizedek óta használják és az energetika szinte minden területén jelen vannak. A szakma csak PMAPS-nak (Probabilistic Methods Applied to Power System) nevezi ezeket. 1986 óta két évente tartanak PMAPS konferenciát, melyet a IEEE szervez és az ott elhangzott anyagokat 2004 óta publikálja ([IEEE Xplore - Conference Table of Contents](#)).

Ennél is régebb óta működik az első nemzetközi szervezet, a NERC (North American Electric Reliability Corporation), ami az 1965-ös északkeleti blackout hatására alakult meg 1968-ban. Küldetésük a hálózat megbízhatóságát és biztonságát érintő kockázatok hatékony és eredményes csökkentése az észak-amerikai villamosenergia-rendszeren. ([Everything You Need to Know About NERC | Smartsheet](#))

Ezen terület úttörőjének tekinthető Roy Billinton kanadai tudós és professzor emeritus. Ronald N. Allan-nel közösen 1984-ben megjelenő *Reliability Evaluation of Power Systems* és későbbi kiadásai a PRA matematikai és elméleti alapjait rakják le. [4]

Európában elsőként a skandináv TSO-k kezdtek el foglalkozni PRA-val, mivel a hálózatukat sokkal szélsőségesebb időjárási körülmények közt kell üzemeltetniük. A NORDIC TSO-k kifejlesztettek egy PMAPS szoftvert, amit 2016-ban mutattak be a PMAPS konferencián, és amit Vaffel-nek neveztek el.

3.1 GARPUR

Az elmúlt időszakban a legjelentősebb ENTSO-E szintű összefogás a 2013 és 2017 között működő GARPUR projekt volt. Elsődleges feladata a valószínűség-alapú kockázatelemző módszertanok kutatása a villamosenergia-ipar számára. A projekt célja az volt, hogy egy olyan új, valószínűség-alapú megbízhatósági kritériumrendszert fejlesszen ki, amely maximalizálja a társadalmi jólétet. Egyértelműen összehasonlítja a determinisztikus N-1 és sztochasztikus üzembiztonsági kritériumokat az asset managementtől kezdve a gazdasági hatásokig. Végezetül egyes hálózatrészekben pilot projektek keretében is alkalmazták. ([GARPUR \(sintef.no\)](#))

3.2 Jogszábályi előírás

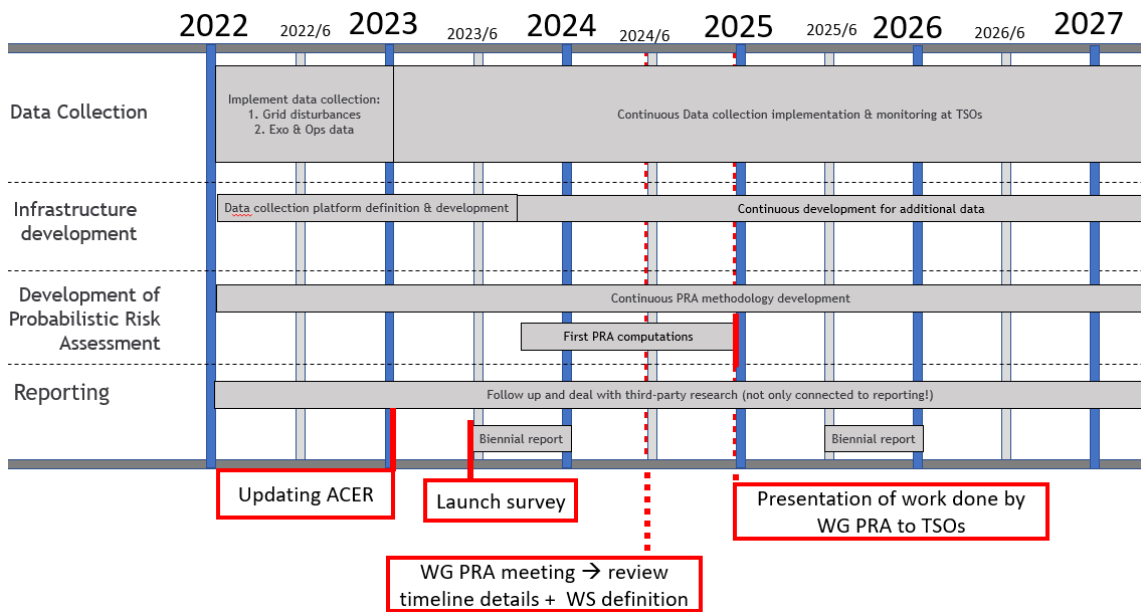
A GARPUR projekt keretében született kutatások világos képet adnak arról, hogy a jövőbeli kihívásoknak egyértelműen a PRA fog jobban megfelelni. Ennek értelmében az ACER CSAm-ra vonatkozó döntése értelmében minden TSO-nak kötelező kidolgoznia egy közös PRA-t 2027-re.

Az ACER CSAm-ra vonatkozó határozatának 44. bekezdése röviden előírja, hogy a TSO-knak az operatív valószínűségi összehangolt biztonsági értékelés és kockázatelemzés terén elért haladásáról jelentést kell tenniük. Az első jelentést 2021-ben, majd ezt követően kétévente, minden alkalommal az adott év december 31-ig kell közzétenni. A jelentésnek tartalmaznia egy tájékoztatást az adatgyűjtésről és közös PRA lehetséges akadályairól, előzetes tervezésről. [5]

3.3 WG PRA

A PRA módszer európai integrálására 2019-től az ENTSO-E ütemezési tervet dolgozott ki. Az adatgyűjtési módszertan elkészítése és implementálása a kezdeti fázisokban megtörtént. Jelenleg a Working Group PRA fázisban van az integrálási folyamat, aminek a tevékenységeit, eredményeit és távlati céljait a 2. ábraán lévő idővonalon tekinthetjük meg.

A következő fejezetekben elsősorban a norvég TSO (Statnett) PRA módszertanát, illetve gyakorlati megvalósítását, eredményeit fogom ismertetni. Ennek legfőbb oka az, hogy évtizedek alatt kiforrott módszertanuk és publikált eredményeik nagyban meghatározza a WG PRA tevékenységét. [6]



2. ábra WG PRA tevékenységeinek idővonalja [6]

4 Megbízhatósági elemzés

Mindenekelőtt szeretném tisztázni a villamosenergia-rendszer üzemeltetés területén értelmezett megbízhatóság (reliability) és kiesési valószínűség (failure probability) fogalmak közötti különbséget. Mindkettő a hálózati elem üzembiztonságát írja le, de különböző időtávon értelmezve. A megbízhatóság az adott hálózati elem hosszútávú működési képességére használt becslés. Elsősorban eszközmenedzsment, hálózatfejlesztés- és tervezés területeken használják, ahol meghibásodási adatok, illetve az elemet érő külső (időjárási) körülmények historikus elemzése fontos stratégiai szempont. Ezzel szemben a kiesési valószínűséget valós időben értelmezzük és bemeneti adataiban szerepelnek a valós időben változó adatok, illetve előrejelzések. Kizárólag a valós idejű üzemirányítási szakterületen érdemes használni. Habár a PRA-nál az utóbbi fogalom a hangsúlyosabb, de fontos megjegyezni, hogy a villamosenergia-rendszerbeli megbízhatósági elemzések és adatok alapját képezik a PRA algoritmusnak és a rezilienciaelemzésnek. Az utóbbi önmagában a meghibásodás valószínűségét és a rendszer regeneráló képességét veszi figyelembe, de magában foglalja az események vagy potenciális események mélyebb elemzését is a jövőbeli események előrejelzése és az azokra való felkészülés érdekében. [7]

4.1 Norvég FASIT rendszer

A MAVIR a 2022-es évtől a 3.2. fejezetben bemutatott jogszabálynak eleget téve a VédStat rendszerben kezdte el a historikus meghibásodási adatok gyűjtését, ami jelenleg a védelmi berendezések megszólalását (nem tervezett kikapcsolási eseményeket) és a lehetséges meghibásodási okokat rögzíti. Azonban a PRA-hoz elengedhetetlen a megbízhatósági adatok gyűjtése, feldolgozása és szolgáltatása. Ezzel a Statnetnél az 1998-ban elindított FASIT (Faulty And Supply Interruption information Tool) foglalkozik. Az IEEE szabványokon alapuló rendszer rögzíti a hálózati elemek kiesését, ellátásbeli kimaradásokat és a helyreállítási időt. Részletesen dokumentálja többek közt a hálózati esemény idejét, érintett hálózati elemeit, okát, illetve következményét. Az utóbbi érdekében hálózatszimulációkat végez, mellyel meghatározza a megszakítási költséget és az ENS (Energy Not Supplied) mutatót. Éves szinten meghatározásra kerülnek a villamosenergia-rendszer szolgáltatást minősítő mutatók (SAIFI, CAIFI,

SAIDI, CTAIDI és CAIDI), valamint a számunkra fontos hálózati elemenkénti meghibásodási ráták is. [7]

4.2 Bayes-féle aktualizálási séma

A hosszútávú éves hibaráták segítségével képesek vagyunk megbízhatóság szempontjából megkülönböztetni a meghibásodásra hajlamosabb hálózati elemeket. A következő lépés, hogy az idősoros hibarátákból kiszámítsuk azt az egyedi hibarátát, mely a legjobban leírja az adott hálózati elem hosszútávú megbízhatóságát. Ehhez a szakirodalom a Bayes-féle aktualizálási sémát, angolul Bayesian updating scheme (továbbiakban BUS) használja. A matematikában a Bayes-féle rekurzív becslés vagy Bayes-szűrő elnevezést használják.

A BUS egy, a Bayes-tételen alapuló valószínűségszámítási modell, ami egy általános probabilisztikus megközelítés egy ismeretlen valószínűségi sűrűségfüggvény megbecslésére, mely rekurzív módon, adott idő alatt beérkező, mért adatokat és egy folyamatmodellt használ fel. Matematikailag arra a koncepcióra épül, hogy előzetes sűrűségfüggvényt (prior) készít a hibarátáról, majd a megfigyelések segítségével felfrissíti (posterior). A valószínűségi sűrűségfüggvény ismeretében képesek vagyunk meghatározni, hogy mennyi a valószínűsége, hogy a megfigyelt paraméter az adott intervallumba esik, melyet egyszerű integrálással kapunk meg. Többek közt a robotikában is használják, melyen keresztül szeretnék bemutatni egy egyszerű példát.

Van egy robot, ami csak rácspontokon közlekedik és szenzorokon keresztül kapott adatokból becsüli a jelenlegi helyzetét. Legyen a kiindulási helye a (0,0) koordináta, és ahogy egyre távolodik az origótól, úgy lesz egyre bizonytalanabb a robot a jelenlegi pozíciójáról. Bayes-szűrőt használva, egy valószínűségi értéket rendelhetünk a robot pillanatnyi helyzetéről való saját elképzeléséről. Ez a valószínűségi változó folyamatosan frissíthető a beérkező adatok alapján. Összeségében egy egyszerű tanuló algoritmusnak feleltethető meg. [7][8]

4.2.1 BUS alkalmazása PRA során

Ebben a fejezetben szeretném röviden lépésenként bemutatni, hogy a Statnet milyen BUS-t használ hosszútávú hibaráta (λ) számításhoz, kizárólag az éves hibaráták felhasználásával. A vizsgált n db évben számított y_i ($i \in [1; n]$) éves hibarátákat egy y

vektorban tárolják ($\mathbf{y} = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$). A modell mélyebb matematikai értelmezését az alábbi irodalom tartalmazza.

1. Kezdetben a keresett λ egy ismeretlen paraméter és a $p(\mathbf{y}|\lambda)$ feltételes valószínűségi sűrűségfüggvényt (azaz a \mathbf{y} valószínűség változók bekövetkezésének a valószínűségi sűrűségfüggvénye feltéve, hogy a λ esemény bekövetkezett) kell meghatározni. Ezt λ paraméterű Poisson-folyamattal szokták modellezni, mivel az esemény bekövetkezésének esélye kicsi, illetve az egyes események bekövetkezése teljesen független egymástól.

$$p(y_i|\lambda) = \frac{\lambda^{y_i} e^{-\lambda}}{y_i!} \quad (1)$$

Az (1). képlet egy y_i hibarátájú prior sűrűségfüggvény meghatározása.

2. Konjugáljuk az összes y_i értékre a prior sűrűségfüggvényeket, mely a definíció értelmében a konjugált prior eloszlásfüggvényhez vezet.

$$p(\mathbf{y}|\lambda) = \prod_{i=1}^n \frac{\lambda^{y_i} e^{-\lambda}}{y_i!} \propto \lambda^{\sum y_i} e^{-n\lambda} \quad (2)$$

A Poisson-folyamat összegzése a [9] tanulmányi segédanyagban levezetett bizonyítás alapján gamma-eloszlást követ konjugált prior, ahogy a (2). egyenlet jobb oldalán látható.

3. A λ paraméter sűrűségfüggvényének közelítéséhez ($p(\lambda)$) gamma-eloszlást használunk.

$$p(\lambda) = \frac{\beta^\alpha \lambda^{\alpha-1} e^{-\lambda\beta}}{\Gamma(\alpha)} \propto \lambda^{\alpha-1} e^{-\beta\lambda} \quad (3)$$

, ahol α és β a gamma-eloszlás paraméterei, míg a $\Gamma(\alpha)$ a gamma-függvény.

4. A posterior eloszlásfüggvényt a Bayes-tétellel határozzuk meg, ami a feltételes valószínűségi sűrűségfüggvény és a fordítottja között állít fel kapcsolatot. A teljes eseményrendszer értelmében a $p(\mathbf{y}) = 1$.

$$\begin{aligned}
p(\mathbf{y}|\lambda) &= \frac{p(\mathbf{y}|\lambda) * p(\lambda)}{p(\mathbf{y})} \propto \lambda^{\sum y_i} e^{-n\lambda} \lambda^{\alpha-1} e^{-\beta\lambda} \\
&= \lambda^{\alpha+\sum y_i-1} e^{-\lambda(\beta+n)}
\end{aligned} \tag{4}$$

5. A (4). egyenlet egy $\alpha^B = \alpha + \sum y_i$ és $\beta^B = \beta + n$ paraméterű gamma-eloszlást eredményez, melynek várható értéke egy véletlen X valószínűségi változó esetén az (5). képlet.

$$E[X] = \frac{\alpha}{\beta} \tag{5}$$

6. A posterior várható hibaráta (λ^B) az alábbi (6). összefüggésre egyszerűsödik.

$$\lambda^B = \frac{\alpha^B}{\beta^B} = \frac{\alpha + \sum y_i}{\beta + n} \tag{6}$$

Mivel a λ paraméter eloszlásához exponenciális-eloszlást használtunk, így a gamma-eloszlás paraméterei: $\alpha = 1$ és $\beta = \frac{1}{\lambda}$

A kezdetben használt λ paraméter egy feszültség szint és sodrony, illetve oszlop alapján definiált érték. A BUS az \mathbf{y} vektor elemeit felhasználva a folyamatosan frissíti λ^B értékét, ami a valós idejű kiesési valószínűség egyik bemenő paramétere. A Bayes hibarátszámítást évenként kell elvégezni a vizsgált hálózati elemekre. [8]

5 Valós idejű kiesési valószínűségszámítás

A 4. fejezetben a Bayes-féle aktualizálási adatfeldolgozó sémára épülő megbízhatósági elemzés kimenetei (a Bayes hibaráták, λ^B) megfelelő kiindulási alapot jelentenek a valós idejű, időben változó időjárás paraméterek alapján becsült kiesési valószínűségszámításnak. Fontos megjegyezni, hogy az évek folyamán fejlődő országos lefedettségű meteorológiai monitoring rendszernek köszönhetően elég kis felbontású (átlagosan 1 km²), jó megbízhatóságú és folytonos adatszolgáltatás érhető el, ami a PRA-hoz alapfeltétel.

A távvezetési elemek kiesési valószínűség meghatározásához a PRA munkacsoport TSO-k körében készített közvélemény kutatás alapján az alábbi három időjárás fenyegetettséget azonosította: szél, villámlás és jegesedés. Az első kettő fenyegettség üzembiztonságra befolyásoló hatását a norvég PRA módszertan részletesen kifejti, míg a harmadik jelen pillanatban is (2023) fejlesztés alatt van, ezért különböző jegesedési modellek felhasználásával fogom számítani.

5.1 Időjárás fenyegetettségek hatása az üzembiztonságra

Ebben a fejezetben a szakirodalomban, illetve az általam megalkotott fenyegetettségek kiesési valószínűséget befolyásoló hatását modellező összefüggéseket fogom ismertetni. A legkisebb vizsgált elem két távvezetési oszlop közötti távvezeték szakasz, azaz egy oszlopköz (továbbiakban szegmens). Legyen egy L hosszúságú, N szegmensből álló távvezeték szakasz i . szegmensének hossza l_i és kiesési valószínűsége t időben $p_{L,i}^t$. Ekkor a teljes távvezeték szakasz kiesési valószínűségét a (7. egyenlettel) lehet kiszámítani. [8]

$$p_L^t = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - p_{L,i}^t) \quad (7)$$

5.1.1 Szél befolyásoló hatása

Az egyes szegmensek szél kitettségének való modellezésére bemeneti adatként mért keleti ($w_{i,k}^t$) és északi szélességet ($w_{i,\epsilon}^t$) használok, melyet Pitagorasz-tétele alapján ((8). egyenlet) eredő szélességgé (w_i^t) alakítok. Ezen túlmenően a PRA-val

sok tekintetben rokon szakterületnek tekinthető DLR-nél (dinamikus távvezetési terhelhetőség) a bemeneti szélességet tovább alakítják egy trigonometriai összefüggéssel, mellyel a sodrony és a szélesség vektor közötti szöveget becsülik, ezáltal jobban modellezhető a sodronyt érő erőhatás.

$$w_i^t = \left(w_{i,k}^{t,2} + w_{i,\acute{e}}^{t,2} \right)^{0,5} \quad (8)$$

A széltől eredő, sodronyban vagy oszlopokra fellépő erőhatások, másnéven szélteher üzembiztonságra befolyásoló hatását a (9). köbös összefüggéssel modellezem. [8]

$$W_i^t = \begin{cases} \alpha l_i (w_i^t - w_{krit})^3, & w_i^t \geq w_{krit} \\ 0, & w_i^t < w_{krit} \end{cases} \quad (9)$$

5.1.2 Villám befolyásoló hatása

A villámlás az elektrosztatikus egyensúlyhiány okozta hirtelen kisülés a légkörben. Ezek a kisülések a felhők között, a felhők belsejében vagy a talaj és a felhők között fordulnak elő. A hálózati elem üzemére ható befolyását villámcsapás által leíró összefüggést, legjobban a vihar előrejelzéshez használt K és TT regressziós indexek monitorozásával lehet megalkotni.

- K index

$$K = (T_{850} - T_{500}) + D_{850} - (T_{700} - D_{700}) \quad (10)$$

, ahol T és D jelöli a hőmérsékletet és a harmatpont hőmérsékletet, az alsó index pedig a nyomásfelület szintjét. A 20 feletti K érték általában a villámlás megnövekedett valószínűségét jelzi.

- TT index

$$TT = (T_{850} - T_{500}) + (D_{850} - T_{500}) \quad (11)$$

A 45 feletti Total Totals avagy TT érték általában nagyobb villámlási valószínűséggel jár.

A regressziós értékeken keresztül egy szegmensre történő villám fenyegetettséget négyzetesen modellezem, (12). képletet szerint.

$$F_i^t = \alpha_K \max(0, K_i^t - K_{krit})^2 + \alpha_{TT} \max(0, TT_i^t - TT_{krit})^2 \quad (12)$$

, ahol α_K és α_{TT} skálázási értékek, K_i^t és TT_i^t az indexek értékei az i mérési helyen t időben, míg a K_{krit} és TT_{krit} a küszöbértékek. [9]

5.1.3 Jegesedés befolyásoló hatása

A jegesedés, vagy pontosabban a sodronyvezetőre esetlegesen lerakódó jégteher üzembiztonságát befolyásoló hatását a jegesedési modellek által becsült lerakódott jégvastagságán alapján számítom. A szakirodalomban kétféle jegesedési modell terjedt el, a Goodwin és a Simple modell. Általánosságban kijelenthető, hogy ezen modellek egyszerűek és kevés a paraméter igényük, de kellő pontossággal képesek leképezni a vihar alatt keletkező, sodronyra lerakódott jégteher hatását.

Mind a Goodwin modellben, mind a Simple modellben azt feltételezzük, hogy minden csepp, amely a huzal felületét éri, lefagy. Ez azt jelenti, hogy nem alakulnak ki jégcsapok, és a növekedési mód száraznak mondható. Ez az egyik gyenge pontjuk ezeknek a modelleknek, de nem feltétlenül becsüli túl a vezetéken felgyülemlt jég mennyiségét. A jégvastagság meghatározásához a Goodwin modellt használtam, melyet röviden bemutatok.

Első körben az adott területre jutó csapadékmennyiségét, vagyis a fajlagos terhet számítjuk az adott idő intervallumra, mind vertikális (m_v) [$mm * \frac{g}{cm^3}$], mind horizontális (m_h) [$mm * \frac{g}{cm^3}$] irányban. Az előbbit kétféle módon is ki lehet számítani, az adott idejű csapadékmennyiség (H_g) [mm/h] és a vízsűrűség (δ) [$\frac{g}{cm^3}$] szorzataként, illetve a vertikális szélesség (V_t) [$\frac{m}{s}$] és a leeső víz mennyiségéből (ω) [$\frac{g}{cm^3}$] (lásd (13). képlet). Majd kifejezzük a leeső víz mennyiségét a (14). képletben. A horizontális fajlagos terhet is a horizontális szélesség (V_w) [$\frac{m}{s}$] és a leeső vízmennyiség szorzataként kapjuk, amibe be lehet helyettesíteni a (15). képletet. Végül a Pitagorasz-tétel szerint meghatározzuk a teljes fajlagos terhet (m_0) [$mm * \frac{g}{cm^3}$] az adott időintervallumra, ami a vezetékét sújtja (lásd (16). képlet). A lerakódott jég sugarát (R) [mm] kör alakú feltételezés mellett a (17). képlet adja meg.

$$m_v = H_g \delta = 3,6V_t \omega \quad (13)$$

$$\omega = \frac{H_g \delta}{3,6V_t m_v} \quad (14)$$

$$m_h = 3,6V_w \omega = H_g \delta \frac{V_w}{V_t} \quad (15)$$

$$m_0 = \sqrt{m_h^2 + m_v^2} = \sqrt{(H_g \delta)^2 + (H_g \delta \frac{V_w}{V_t})^2} = H_g \delta \sqrt{1 + \frac{V_w^2}{V_t^2}} \quad (16)$$

$$R = \frac{m_0}{\pi \delta_i} = \frac{H_g \delta}{\pi \delta_i} \sqrt{1 + \frac{V_w^2}{V_t^2}} \quad (17)$$

A sodronyvezetőre ható jegesedés hálózati elem üzembiztonságára gyakorolt hatását leíró összefüggést a (18). képlet alapján modellezem.

$$I_i^t = 1 + \alpha_R \left(\frac{R_i(t)^2 - R_{sod}^2}{R_{krit}^2} - 1 \right) \quad (18)$$

, ahol $R_i(t)$ a t időben a Goodwin jegesedési modell alapján számított lerakódott jégvastagság sugara, $R_{sodrony}$ a sodrony sugara, míg R_{krit} a vezeték névleges pótteher sugarának tűréshatára. Utóbbi értéket a [10]. forrás kutatásai alapján választottam, ahol értéke 400 kV-os távvezeték esetén 27 mm volt. [10]

5.2 Kiesési valószínűségszámítás fenyegetettségekre

Az időjárás adatok felhasználásával megkapott szegmens üzembiztonságát befolyásoló összefüggések következtében meghatározott W_i^t , F_i^t és I_i^t fenyegetettségi paraméterek számítása módszertanának definiálása után a következő lépés egy valószínűségi modell megalkotása. Az idősorosan meghatározott kiesési valószínűségi értékek ábrázolásával kapjuk meg az adott szegmens sérülékenységi görbét. Ennek a görbének a meghatározásához a [11]. cikk szolgált alapul. A cikk egy olyan

sérülékenységi görbe számítását ír le, ami a földrengések mértékéből becsüli az épületekben keletkezett kár mértékét, mégpedig két paraméteres log-normális eloszlással. Jelen esetben ezt a modellt ismertetem egy X_i^t (továbbiakban x) fenyegetettségi paraméteren keresztül.

A log-normális eloszlás kétparaméteres sűrűségfüggvénye σ alakparaméterrel és μ skálázási paraméterrel ($\sigma, \mu > 0$) a 19. képletben tekinthető meg.

$$f(x, \sigma, \mu) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\ln(x)^2 - \ln(\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (19)$$

A kapott log-normális kumulatív eloszlásfüggvénye (jelölése: $F(x, \sigma, \mu)$) lesz a szegmens t időben számított kiesési valószínűsége.

$$p_{L,i}^t = F(x, \sigma_L, \mu_L) = \int_0^x f(\tau, \sigma_L, \mu_L) d\tau \quad (20)$$

A σ_L és μ_L paraméterek egy távvezeték szakaszt jellemző, évente újrakalkulálható értékek, meghatározásuk egy sokkal összetettebb kérdés, mint amire először számítanánk. Alapelve az, hogy a szakasz várható hibarátajának (λ^L) meg kell egyeznie a BUS által kapott hibarátával (λ^B). A több éves hibaráta alapján képzett várható érték kiszámítását Bernoulli-eloszlással modellezem. Legyen k évi x idősoros adatsor órás időléptéke $[0;T]$ intervallum. Ekkor λ^L értéke p_L^t függvényében a (21). képletben látható.

$$\lambda^L = \frac{1}{k} \sum_{t=0}^T p_L^t \quad (21)$$

Emellett még a σ_L és μ_L paraméterek becslésére figyelembe kell venni azt, hogy a historikus valószínűségek, mennyire egyeznek a ténylegesen érzékelt meghibásodásokkal. Ezt a Brief score (BS) mutatóval tudjuk leginkább kifejezni.

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (f_t - o_t)^2 \quad (22)$$

Az f_t a becsült valószínűség, o_t az érzékelt meghibásodás (1, ha történt meghibásodás, egyébként 0), N az előrejelzések száma. A (21). és (22). képlettel együttesen határozható meg a σ_L és μ_L , a (23). összefüggés alapján, amihez definiálni kell egy $g(p_L^t, \sigma_L, \mu_L)$ függvényt.

$$g(p_L^t, \sigma_L, \mu_L) = \rho_1 \left(\lambda^B - \frac{1}{k} \sum_{t=0}^T p_L^t \right)^2 + \rho_2 \sum_{t=0}^T (p_L^t - y_t)^2 \quad (23)$$

ahol a ρ_1 és ρ_2 relaxációs paraméterek, y_t az érzékelt meghibásodás. Mivel p_L^t -t a (20). egyenlet alapján ki lehet fejezni σ_L és μ_L paraméterekkel, így ez egy két ismeretlenes egyenlet lesz. A két ismeretlent a $g(p_L^t, \sigma_L, \mu_L)$ függvény minimalizálásával kapjuk meg.

$$\sigma_L, \mu_L = \operatorname{argmin}(g(p_L^t, \sigma_L, \mu_L)) \quad (24)$$

Lényegében egy távvezeték szakaszt jellemző értékeket egy szélsőérték hely kereséssel tudjuk meghatározni. Fontos még megjegyezni, hogy a (7). képletből levezethető, hogy a kiesési valószínűség arányosan változik a vezeték hosszával. [8]

6 Vaffel demo

Az 5. fejezetben ismertetésre került a Vaffel projekt által kifejlesztett PRA módszertant részben implementálták Python programozási nyelven. A szkript demo változatát kutatási célokra megkaptam, ami kizárólag a szél befolyásoló hatását tartalmazza. A módszertan mellett, az output idősoros kiesési valószínűségekhez többféle ábrázolási és elemzési módot készítettek, melyeket a szkript magyar távvezetési szakaszokra való alkalmazásakor a 7.2. fejezet ismertettek, példákon keresztül.

6.1 Eredeti szkript felépítése

A demo verzió input adatai és esetleges formátumai a következők:

- Felhasználói által megadott adatok:
 - Vizsgálandó távvezeték neve, feszültség szintje és hossza.
 - Vizsgálandó meghibásodási esemény időtartam jellege (átmeneti vagy állandó), illetve hiba oka. (.csv)
 - Vizsgált időtartomány
- Historikus meghibásodási adatok a FASIT rendszerből (4.1. fejezet), ami tartalmazza a meghibásodás dátumát, hálózati komponens, időtartam jellegét és okát. (.csv)
- Különböző meghibásodási esemény típusok (továbbiakban esetek) kezdő hibaráta. (.csv)
- Vizsgálandó távvezeték szakasz fizikai paraméterei: név, feszültség szint, azonosító, illetve azon belül az összes szegmens: azonosítója, hossza, kezdő és vég távvezetési oszlop koordinátája. (.json)
- Külön kétdimenziós táblázatokban a vizsgálandó távvezeték időjárási adatai, amelyeket a szegmens kezdő távvezetési oszlop koordinátája alapján gyűjtöttek. Minden táblázatban vízszintesen a szegmens azonosítója, függőlegesen az órák felbontású idősor van. (.hdf)
- Kezdő σ_L és μ_L paraméterek, melyeket empirikus módon határoztak meg.

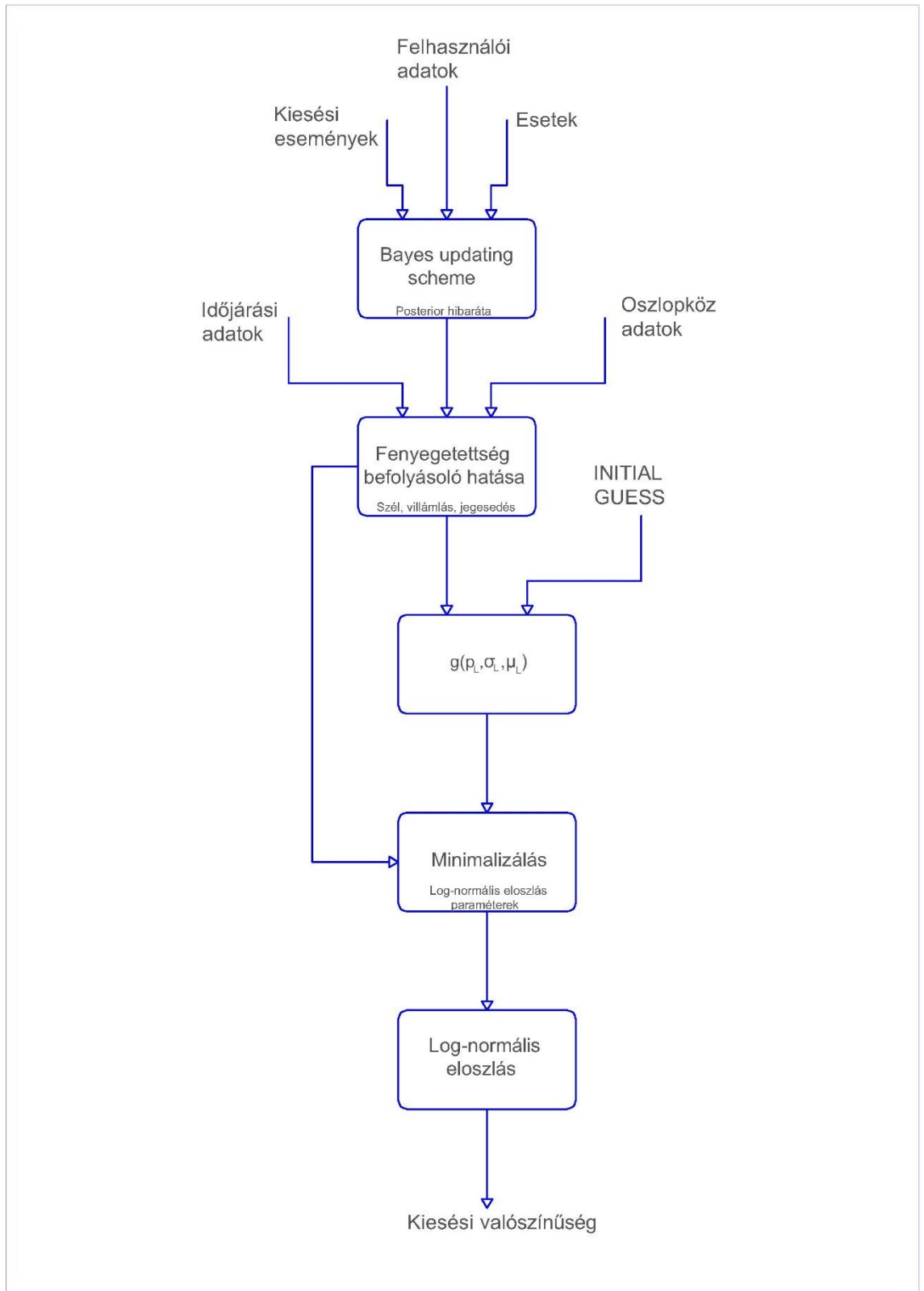
6.1.1 Egyszerűsítések

A szakirodalomban az alábbi egyszerűsítéseket tették a modellben, részben a számítási kapacitás csökkentése végett:

- (22). képletben szereplő BS mutató kiszámításának elhagyása.
- A (19). képletben a log-normális eloszlásból szegmensenként elkészíthető sérülékenységi görbék közül a „*worst case*” görbét definiálja az egész távvezeték sérülékenységi görbéjének. Lényegében kiválasztja a leggyengébb szegmenst, minden időtartományban.

6.2 Kiegészítéseim és módosításaim az eredeti szkripten

Az eredeti szkript kizárólag a szél befolyásoló hatását tartalmazza, így a villámlás és a jegesedés fenyegetettségek befolyásoló hatását a 5.1.2. fejezet, illetve 5.1.3. fejezet alapján nekem kellett implementálni a kódba. Emellett az időjárás adatokat tartalmazó .hdf, helyett .csv adatformátummal dolgoztam. Összeségében a 3. ábra Vaffel algoritmus folyamatábrájaábrán látható a végleges folyamat ábra.



3. ábra Vaffel algoritmus folyamatábrája

7 Vaffel alkalmazása a magyar villamosenergia-rendszeren

Szerencsére a WG PRA által hozzám eljuttatott Vaffel demo szkript struktúrálisan úgy van felépítve, hogy könnyedén változtathatóak a bemeneti inputok. Éppen, ezért kisebb módosításokkal képes voltam vizsgálni a magyar villamosenergia-rendszer néhány távvezetési elemének megbízhatóságát, 10 évvel visszamenő kiesési statisztika alapján. Itt megjegyezném, hogy a teljes magyar átviteli hálózat megbízhatóságát is vizsgálhattam volna, de inkább három múltban időjárási kontingenciát elszenvedett távvezeték elemet keresztül szeretném vizsgálni a Vaffel hatékonyságát, valamint jóval kisebb a számítási igény is.

7.1 Input adatok

7.1.1 Felhasználói adatok

A három kiválasztott távvezetési elemem a múltban egyszer vagy többször is kiesett az üzemből valamelyik általam vizsgált három időjárási fenyegetettség (szél, villámlás és jegesedés) miatt. A kiválasztott távvezetési elemek alapinformációi a 2. táblázat Kiválasztott távvezetékek alapinformációi láthatók. Két darab határmetszéki távvezeték is választottam, amiket kizárólag a magyar határig vizsgáltam. A vizsgált időtartomány: 2013. 01. 01.-től 2022. 12. 01.-ig. A vizsgált események kiesési időbeli jellege: állandó és átmeneti, és kiesési hibaoka: szél, villámlás és jegesedés.

Elnevezés (röviden)	AISA-GÖD (AG)	BÉKO-NADAB (BN)	PÉCS-ERNE1 (PE)
Kezdőpont	Albertirsa	Békéscsaba	Pécs
Végpont	Göd	Nadab	Ernestinovo
Hossz [km]	65,2	38,8	42,3
Feszültség szint [kV]	400	400	400
Fókuszált fenyegetettség	jegesedés	villámlás	szél

2. táblázat Kiválasztott távvezetékek alapinformáció

7.1.2 Historikus és eseménytípus adatok

Mivel a MAVIR csak az utóbbi években hozta létre a norvég FASIT rendszerhez hasonló kiesési eseményeket dokumentáló adatbázisát, így még nem igazán felel meg inputként a vizsgálatomhoz. Ezért az AISA-GÖD távvezetékekhez a Vaffel demo szkriptben teszt jelleggel megadott távvezetékének, valós FASIT adatbázisban szereplő kiesési eseményeit rendelem hozzá. Míg BÉKO-NADAB esetén több kiesési eseményt definiálok, PÉCS-ERNE1-nél, pedig kevesebbet. Az események típusai, azaz esetei: a kiesési idő jelleg (átmeneti, állandó) és kiesési hibaok (szél, villámlás, jegesedés) páronként vett kombinációi (összesen 6 db). Mindezt .csv formátumú fájlban tárolom, melynek fejlécét és elsősorait a 3. táblázatban tekinthető meg.

Datetime	Component	Type	Source
1998.05.16.	BÉKO-NADAB	Temporary	Lighting
1999.02.04.	AISA-GÖD	Permanent	Icing
2000.01.29	PÉCS-ERNE1	Permanent	Wind
2000.06.29	BÉKO-NADAB	Temporary	Lighting

3. táblázat Historikus kiesési események körülményeit tároló fájl felépítése

7.1.3 Távvezeték fizikai adatai

A magyar villamosenergia-rendszer távvezetékeinek oszlopközeinek fizikai adatait a MAVIR térinformatikai rendszeréből töltöttem le .csv formátumban, melyből a szükséges információkat .json formátumú fájlba, egy adatstruktúrába rendeztem. A Hun_TS.json keresztelt fájl tartalmazza az összes magyar távvezeték szakasz, illetve azonbelül lévő oszlopközök alapvető adatait, melynek elejét az alábbi kódsorban tekinthetünk meg.

```
"Lines": {"AISA-GÖD": {"Length": 65216.98207640995, "name": "Line AISA GÖD",  
  "towers":{  
    "AISA-GÖD_1-172_OK122-123": {"gid": 2793, "segment_length": 340.9631113476202,  
  "x": 19.30419, "y": 47.5643282},  
    "AISA-GÖD_1-172_OK125-126": {"gid": 2794, "segment_length": 360.9849798819806,  
  "x": 19.29833444, "y": 47.57308149}, ...
```

7.1.4 Időjárási adatok

A távvezetéki oszlopokon mért 10 évre visszamenő historikus időjárási adatait melyeket a Copernicus, Európai Unió Föld-megfigyelési programjának weboldalán keresztül töltöttem le, azon belül is az *ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present* és a *ERA5 hourly data on pressure levels from 1959 to present* nevű adatbázisokból, egy .netcdf4 többdimenziós fájl formátumba, amit .csv formátummá alakítottam, ahol a szükséges időjárási paraméterek (lásd 4. táblázat) külön munkalapon vannak. A 10 év időtávlatú, órás felbontású adatok nagy mennyisége miatt egyszerre csak havi időtávú adatokat tudtam letölteni, melyeket később egy közös *Weather_datas.csv* fájlba rendeztem.

Időjárási paraméter	Mértékegység
Keleti szél	$\frac{m}{s}$
Északi szél	$\frac{m}{s}$
Csapadék típus	dimenziótlan
Esőintenzitás	$\frac{kg}{m^2 * s}$
Hóintenzitás	$\frac{kg}{m^2 * s}$
Csapadék mennyiség	mm
K index	K
TT index	K

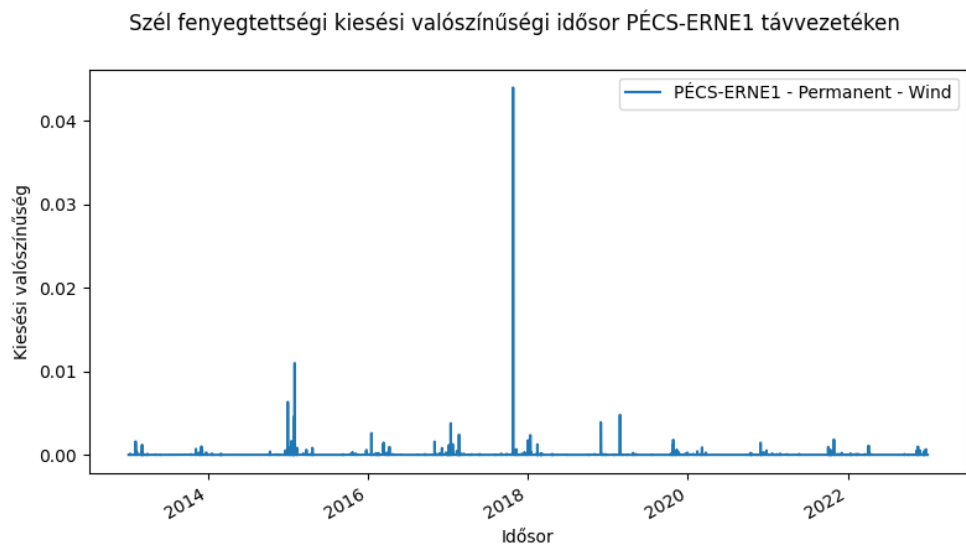
4. táblázat Felhasznált időjárási paraméterek

7.2 Elemzések

7.2.1 Megbízhatósági elemzések

7.2.1.1 Órás kiesési valószínűségek idősoros ábrázolása

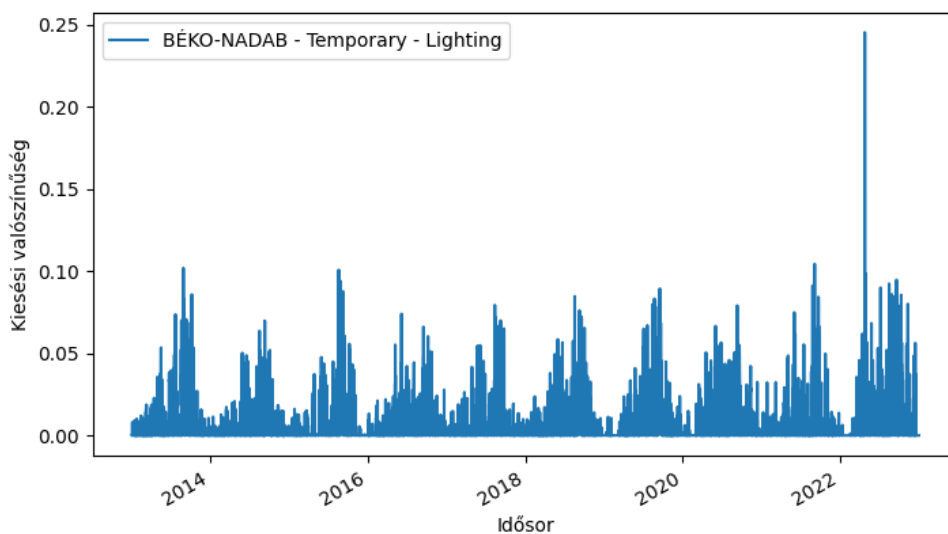
Maga az algoritmus outputja az egyes távvezetéki elemek számított órás kiesési valószínűségei és sérülékenységei (σ_L és μ_L). Az előbbi vizsgált távvezetésekre vonatkozó idősoros kimutatása a 4-6. ábrákon figyelhető meg.



4. ábra Számított kiesési valószínűségek idősora PÉCS-ERNE1 távvezetéken

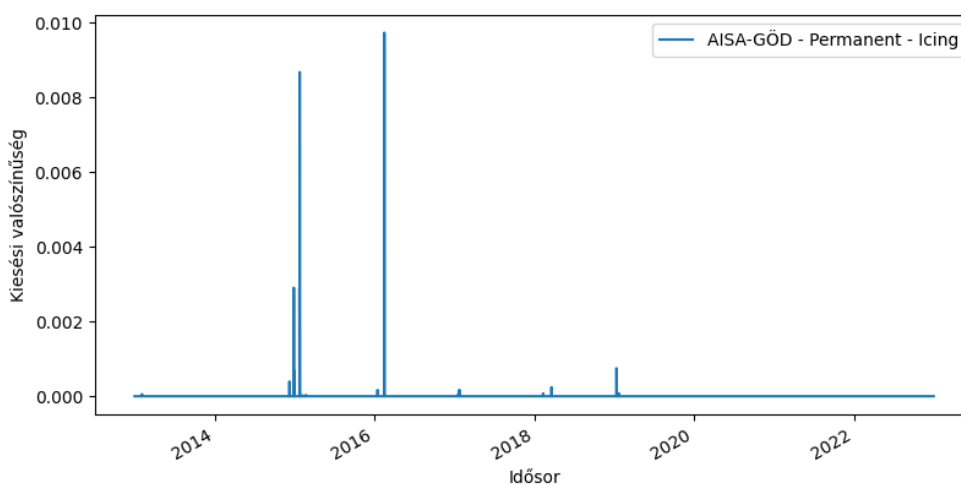
AISA-GÖD jegesedési valószínűségi számítás során viszonylag kevés pozitív érték jött ki, mivel a csapadék típus kevés esetben volt ónos eső, ezáltal a további elemzéseket nem végeztem rajta. Fontos megjegyezni azt is, hogy a 4. ábra jól látszik a villám fenyegetettség periodikussága, mivel a zivatarok nagy többsége májustól júliusig alakul ki, illetve a kimagasló néhány órai valószínűségi értékek idején valóban történt védelmi beavatkozás, melyet a Védstat rögzített.

Villám fenyegettségi kiesési valószínűségi idősor BÉKO-NADAB távvezetéken



5. ábra Számított kiesési valószínűségek idősora BÉKO-NADAB távvezetéken

Jegesedés fenyegettségi kiesési valószínűségi idősor AISA-GÖD távvezetéken

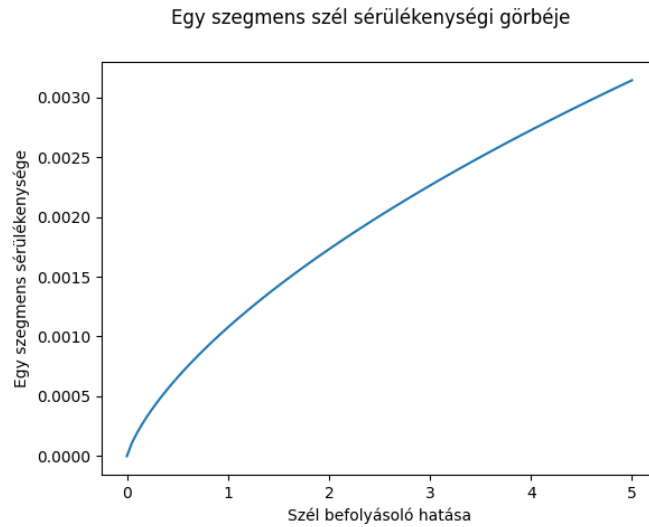


6. ábra Számított kiesési valószínűségek idősora AISA-GÖD távvezetéken

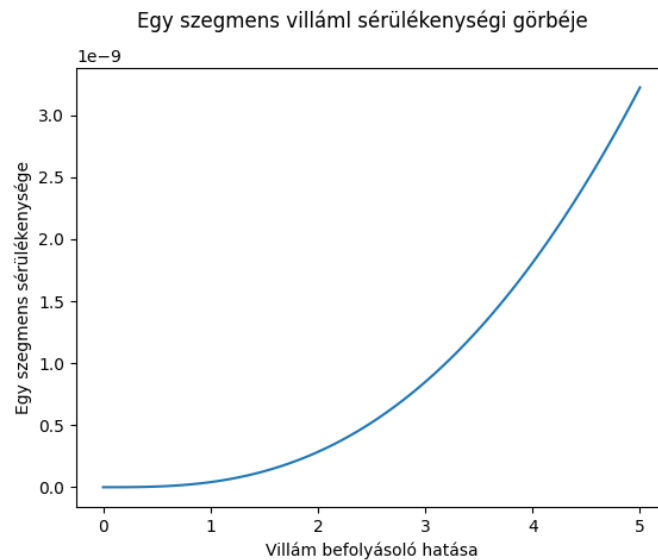
7.2.1.2 Egy szegmens sérülékenységi görbéje

A sérülékenységi görbe a távvezeték egy megbízhatóságát reprezentáló görbe, mely a fenyegettség mértéke és a kiesési valószínűség kapcsolatát ábrázolja. Ehhez a távvezetékhez meghatározott sérülékenységet leíró (23. képlet alapján minimalizált σ_L és μ_L paramétereket, log-normális eloszlással adott x fenyegettség mértékre kiesési valószínűséget kalkulál ((19. összefüggés)). Ezt az x fenyegettségi mértéket sorozatosan 5 léptékkel 0-tól 100-ig növeljük, így monoton növekvő log-normális eloszlás

érzékenységi görbét kapunk. Fontos megemlíteni, hogy kumulatív eloszlást követ a görbe, ezért mindig monoton növekvő a monotonitása.



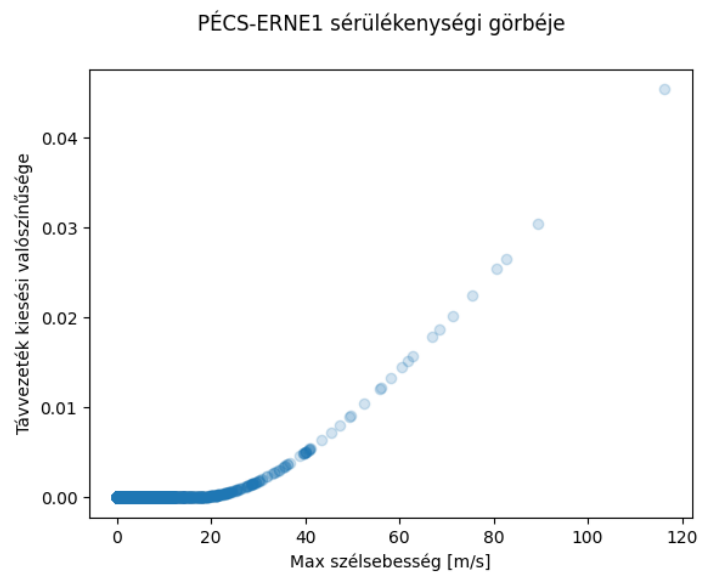
7. ábra PÉCS-ERNE1 egy szegmensre számított sérülékenységi görbéje



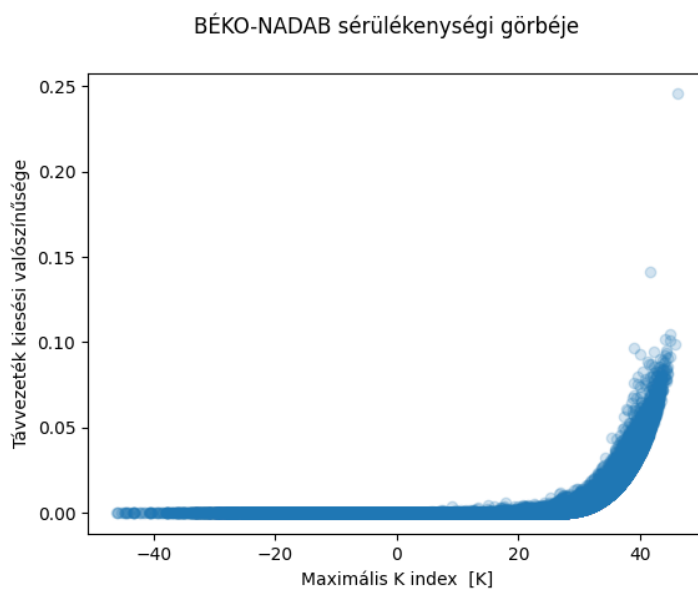
8. ábra BÉKO-NADAB egy szegmensre számított sérülékenységi görbéje

7.2.1.3 Egy vezeték sérülékenységi görbéje

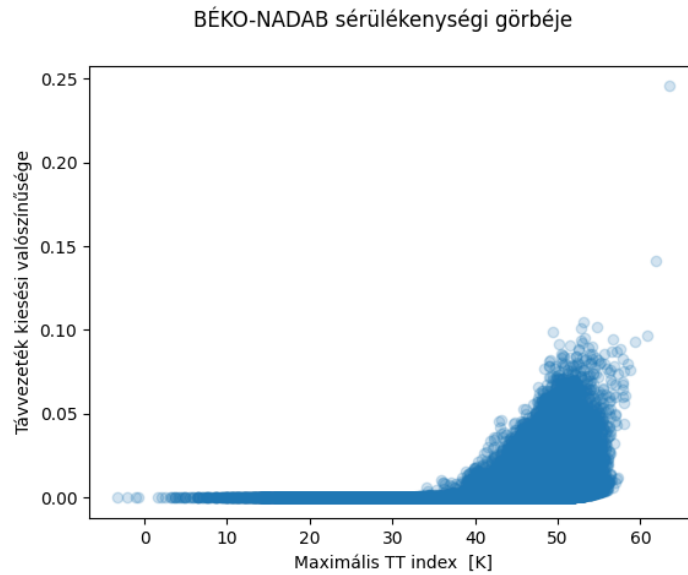
Ez esetben nem egy szegmens megbízhatóságát, hanem az egész távvezeték sérülékenységi görbe egyenletét határozzuk meg. Idősorosan pontokat ábrázol (pontdiagram), ahol egy pont y koordinátája a szakasz kiesési valószínűsége, melyet az algoritmus kalkulál, az x koordinátája a maximálisan mért időjárési adat. Fontos meghatározni, hogy mely fenyegetettségre vizsgáljuk a távvezeték szakaszokat, ezeket a 2. táblázat utolsó sorában feltüntettem.



9. ábra PÉCS-ERNE1 sérülékenységi görbéje



10. ábra BÉKO-NADAB sérülékenységi görbéje K index függésében



11. ábra BÉKO-NADAB sérülékenységi görbéje TT index függésében

7.2.2 Megtörtént kontingencia újraelemzése

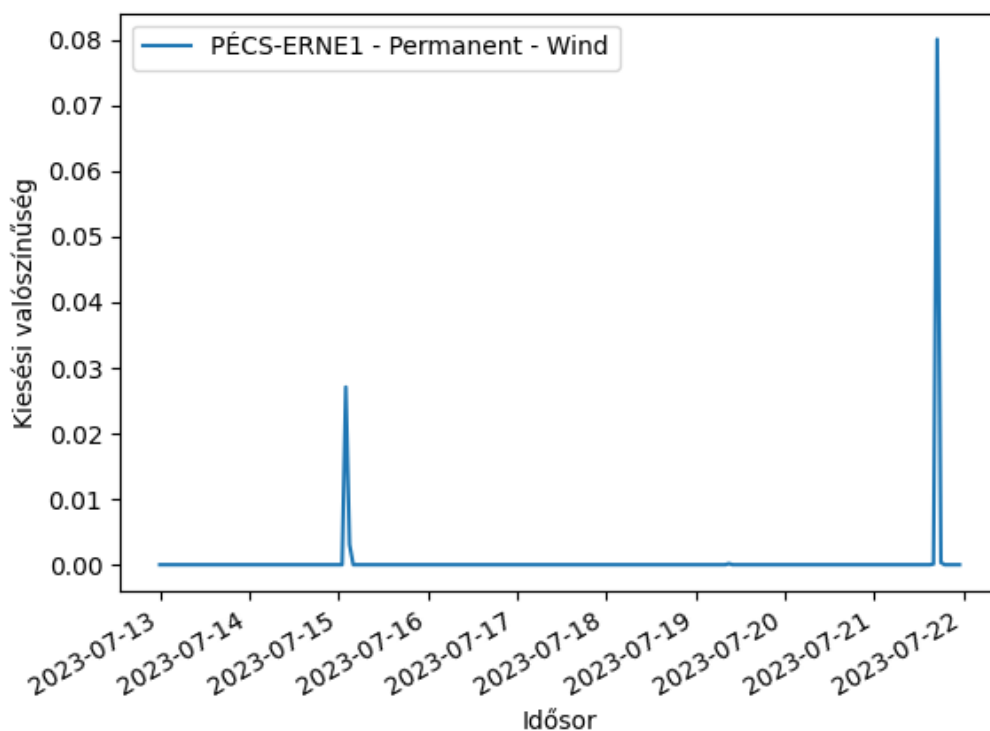
Természetesen a historikus időjárási adatokat nemcsak megbízhatósági vizsgálatokhoz használhatjuk fel, hanem megtörtént időjárás-alapú kontingencia események újraelemzésére. Lényegében a regisztrált kontingencia esemény előtt, rövid időtartományban (kb. 1 hét) vizsgáljuk az adott hálózati elem kiesési valószínűségét. Ez egy remek módszer arra, hogy visszajelzést kapjunk a PRA hatékonyságáról, melyet a (22. képletben bemutatott BS mutatóval jellemezhetünk. Az algoritmus is lehetőség van ilyen elemzés készítésére úgy, hogy megadjuk a PRA lefutása után megadjuk a kontingencia esemény idejét és típusát. Ekkor 168 órával előtti dátumtól kezd el számítani az adott elem kiesési valószínűségét úgy, hogy mindig a következő órai időjárás adat (mint nagyon pontosan előrejelzett időjárási adat) az algoritmus inputja. Végül a kapott kiesési valószínűséget, akár össze tudjuk hasonlítani a megbízhatósági elemzésekkel, ezáltal meg tudjuk állapítani, hogy mennyire kiugróak az előtte szimulált értékeink. Nyilvánvalóan egy hatékony algoritmus esetén olyan 0,3 (30%) feletti értékeknek is kell szerepelniük a 168 db szakasz kiesési valószínűségei között.

Már korábban említettem, hogy a vizsgált három távvezeték üzemében a közel múltban valamelyik fenyegetettség nagy mértéke miatt időjárásalapú kontingencia következett be. Ez esetben csak egy távvezetéken bekövetkező eseményt vizsgálok, melynek adatait a 5. táblázat tartalmazza, az óras számított kiesési valószínűségi idősor, pedig a 12. ábra látható.

Távvezeték	PÉCS-ERNE1
Esemény időpont	2023. 07. 21. H17
Esemény időbeli jellege	állandó
Esemény oka	szél

5. táblázat Újraelemzett kiesési esemény adata

Szél fenyegettségi kiesési valószínűségi idősor PÉCS-ERNE1 távvezetéken



12. ábra PÉCS-ERNE1 távvezeték kontingencia esemény újraelemzése

Jól látható a 12. ábrán, hogy a valós kontingencia idejében történt kiemelkedő kiesési valószínűségi érték számítás, csak nagyon kis érték jött ki (~8%). Ez nagyrészt a nem megfelelő skálázási paraméter választásomnak köszönhető, ezért is jó a múltbéli időjárás-alapú kontingenciák újraelemzése, mert visszajelzést kaphatunk modellünk hatékonyságáról. A mért eredő szélsenesség 35 m/s volt.

8 Végszó

A folyamatosan változó energetikai környezetben (PV integritás, akkumulátoros energiatárolók) egyre nagyobb kihívást jelent a villamosenergia-rendszer üzembiztonságának fenntartása, aminek az alapját képezi a körültekintő, előrelátó hálózat fejlesztési terv. Ezen munkámban igyekeztem rámutatni arra, hogy a hagyományosnak számító eszköz állapotbecslés vagy jövőbeli üzemi terhelésbecslés mellett fontos lehet egyéb külső körülmények figyelembevétele, mint az időjárás.

A valószínűség-alapú kockázatbecslés megbízhatóság elemzési módszertannal képesek vagyunk egy-egy hálózati elem időjárási kitettséget kimutatni, számszerűsíteni, mindegyik időjárási fenyegetettség figyelembevételével. Ennek köszönhetően egyszerűen összehasonlítható bármelyik hálózati elem megbízhatósága, ami szintén fontos stratégiai szempont lehet egy TYNDP esetén. Emellett természetesen az egyes időjárás-alapú kontingencia újraelemzése is hasznos visszajelzés lehet a hálózat üzembiztonságáról.

Az egyértelműen kijelenthető, hogy a magyar villamosenergia-rendszer üzembiztonság fejlesztésében korántsem jelent prioritást a PRA, mivel Magyarország éghajlata nem mondható szélsőségesnek. Egy előnyét azonban mindenképpen figyelembe kell venni, mégpedig a könnyen megvalósíthatóságot. A TSO-k évtizedek alatt számos „*Adatból energia*” jellegű projektet valósítottak meg, így nagy rutinnal rendelkeznek egy-egy új módszertan implementálásában. Másik fontos tényező, hogy a PRA nem igényel jelentős eszköz beruházást, mivel a már meglévő időjárás monitorozó rendszer kellő felbontásban és minőségben képes valós, illetve jövő idejű adatot szolgáltatni. Harmadsorban, pedig a módszertan kiforrottsága, mivel a skandináv TSO-k vagy a NERC már évekóta alkalmazza kellő megbízhatósággal, habár a mesterséges intelligencia még felülírhatja ezt.

Irodalomjegyzék

- [1] Lipécz Ákos András: Valószínűség alapú kockázatbecslés az operatív üzemelőkészítés során - Hallgatói szakdolgozat, 2021
- [2] Incident Classification Scale Group: ICS 2022 Annual Report – ENTSO-E internetes felületén publikált jelentés, 2022
- [3] Regional Group Nordic: 2022 Nordic and Baltic Grid Disturbance Statistics – az ENTSO-E internetes felületén publikált jelentés, 2022
- [4] Ronald N. Allan, Roy Billinton: Reliability of Evaluation of Power Systems, 1986
- [5] EU Bizottság System Operation Guideline (SO GL) (2017/1485) rendeletének 75. cikke: Methodology for coordinating operational security analysis, 2017
- [6] IDCfPRA Project Group: Probabilistic Risk Assessment Methodology, 2021
- [7] Jorn Heggset, Gerd Kjolle, Ketil Sagen: FASIT – A Tool for Collection, Calculation and Reporting of Reliability Data, 2009
- [8] Oystein Rognes Solheim, Gerd Kjolle: Wind dependent failure rates for transmission lines using reanalysis data and a Bayesian updating scheme, 2016
- [9] Oystein Rognes Solheim, Thomas Trötscher: Modelling transmission line failures due to lightning using reanalysis data and a Bayesian updating scheme, 2018
- [10] Jesper Ahlberg: Modelling of Ice Storms and their Impact on part of the Swedish Transmission System, Egyetemi Diplomamunka, 2006
- [11] Mathaios Panteli, Pierluigi Mancarella: Operational Resilience Assessment of Power System under Extreme Weather and Loading Conditions, 2015