



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

Turóczy Balázs Ágoston

# **Felhőátvonulások hatása az elosztóhálózat feszültségére**

Tudományos diákköri konferencia dolgozat

KONZULENS

**Dr. Hartmann Bálint**

**Kazsoki Attila**

BUDAPEST, 2020

## Összefoglaló

---

Hazánk energiafüggetlenségének sarokpontja a decentralizáltan, megújuló alapon előállított energia. Elsősorban a napelemes rendszerek elterjedésének ösztönzése és segítése áll a támogatási rendszerek fókuszában. A jelenlegi tervek szerint 2030-ig 6000 MW, 2040-ig 12000 MW beépített teljesítmény kerül telepítésre. Ennek eredményeképp 2030-ra a bruttó végső energiafelhasználás legalább 21%-a fedezhető lesz megújuló energiából. Ezen beruházások jelentősen át fogják formálni napjaink középvezetési elosztóhálózatait, és azok feszültség szabályozását.

Az időjárásalapú termelőegységek változó teljesítőképessége nagymértékben megnehezíti a hálózat üzemeltetői számára a megfelelő szolgáltatásminőség biztosítását. Annak érdekében, hogy a tervezett megújuló energiatermelés integrálása megtörténhessen a feszültségminőség romlása nélkül, fontos azok elosztóhálózatra gyakorolt lehetséges hatásait elemezni. Erre a feladatra egy olyan szimulációs keretrendszer lehet a legalkalmasabb, mely segítségével valós hálózatok számítógépes modelljein megvizsgálhatók a különböző időjárásváltozások hatásai jelentős napelempenetráció esetén. Tekintettel arra, hogy a középvezetési hálózat igen kiterjedt, célszerű a vizsgálatokat reprezentatív mintahálózatokon elvégezni, melyek eredményeképp általános megállapítások tehetők a hálózat egészére. Ilyen jellemző hálózatok a hálózatrészek topológiájának vizsgálatával és az alapján történő csoportosításukkal képezhetők. A napelemes rendszerek szempontjából a legjelentősebb időjárási esemény a felhőzet változása, mely felhőárnyék modell segítségével szimulálható. Ezen módszerek felhasználásával egy olyan szimulációs keretrendszert kaphatunk, mely segítségével megadott napelempenetráció esetén, az időjárást az adott földrajzi helyre jellemzően sztochasztikus módon változtatva kvantitatív becslést adhatunk a napelemes termelés feszültségminőségre gyakorolt hatásainak mértékére.

Munkám során a magyarországi középvezetési elosztóhálózat vizsgálatával foglalkoztam. Dolgozatomban ismertetem a középvezetési hálózat jellemzőit, illetve a hálózatok csoportosításának egy módját. Vizsgálom Magyarország jelenleg hatályos energiastratégiáját és annak lehetséges hatásait a hálózatüzemeltetés szempontjából. Ismertetem hazánk jellemző időjárási viszonyait különös tekintettel a jellemző szélirányokra és a felhőborítottságra. Bemutatásra kerül a kifejlesztett szimulációs keretrendszer felépítése. Egy kiválasztott reprezentatív mintahálózaton demonstrálom a keretrendszer működését. Különböző napelem penetrációk és eltérő napelempark elhelyezkedések esetén, hazánkra jellemző időjárási körülmények között vizsgálom a hálózati hatásokat. A szimuláció eredményei alapján megállapíthatók a napelemes termelés várható hálózati hatásai.

## Abstract

---

The basis of Hungary's energy independence is decentralized, renewable based energy producing. The focus of support schemes is encouraging and supporting the deployment of solar systems. According to current plans, 6000 MW of photovoltaic (PV) capacity will be installed by 2030 and 12000 MW by 2040. As a result, at least 21% of gross final energy consumption will be covered by renewable energy by 2030. These investments will significantly transform today's medium-voltage distribution networks and their voltage regulation.

The variable performance of weather-based generation units makes it very difficult for network operators to ensure adequate quality of service. To be able to integrate the planned renewable energy production without degrading the voltage quality, it is important to analyse their possible effects on the distribution network. A simulation framework may be suitable for this task, which can be used to study on models of real networks the effects of different weather changes with high-penetration PV. Given that the medium voltage network is very extensive, it is advisable to perform the tests on representative sample networks, of which general conclusions can be made for the whole network. Such characteristic networks can be formed by clustering network components based on examining their topology. The most significant weather event for photovoltaic power generation is the change in cloud coverage, which can be simulated using a cloud shadow model. Using these methods, we can create a simulation framework that can be used to give a quantitative estimate of the effects of high PV penetration on voltage quality.

In the course of my work, I dealt with the examination of the Hungarian medium voltage distribution network. In my paper I describe the characteristics of a medium voltage network and a way to clustering the networks. In my examination Hungary's current energy strategy and its possible effects on network operation has been presented. I describe the typical weather conditions of our country, with special regard to the typical wind directions and cloud coverage. The structure of the developed simulation framework is presented. The operation of the framework on a selected representative sample network is demonstrated. I present several scenarios with diverse PV penetrations and different location of solar parks, in typical weather conditions of Hungary. Based on the results of the simulation, the expected network effects of distributed power generation can be determined.

# Tartalomjegyzék

---

Összefoglaló .....	i
Abstract .....	ii
Tartalomjegyzék .....	iii
1 Bevezető .....	1
2 Magyarország energiastratégiájának áttekintése .....	2
2.1 Magyarország energiastratégiájának hatása a villamosenergia-termelésre .....	3
3 A magyarországi közép feszültségű elosztóhálózat .....	5
3.1 Általános jellemzők .....	5
3.2 Hálózatok csoportosításának lehetőségei .....	6
3.3 A megújuló alapú energiatermelés hálózati hatásai .....	8
4 Felhőárnyék modellek .....	11
4.1 Magyarország éghajlati jellemzői és felhőborítottsági viszonyai .....	11
4.2 Statisztikai módszereken alapuló felhőárnyék modell .....	14
4.3 Elemi felhő alapú felhőárnyék modell .....	16
5 Szimulációs keretrendszer .....	20
5.1 Alkalmazott felhőárnyék modell .....	20
5.2 Felhőátvonulás szimuláció .....	22
5.3 Hálózati modell .....	26
5.4 Napelemkiosztási stratégia .....	28
5.5 Szimuláció .....	30
5.6 A szimulációs keretrendszer használata .....	33
5.7 Szimulációs keretrendszer tesztelése .....	35
5.7.1 Pen2019 MinBtw .....	36
5.7.2 Pen2019 AvgBtw .....	37
5.7.3 Pen2019 MaxBtw .....	39
5.7.4 Pen2025 MinBtw .....	40

5.7.5	Pen2025 AvgBtw .....	42
5.7.6	Pen2025 MaxBtw .....	43
5.7.7	Pen2030 MinBtw .....	45
5.7.8	Pen2030 AvgBtw .....	46
5.7.9	Pen2030 MaxBtw .....	48
5.7.10	Értékelés .....	49
5.8	Érzékenység vizsgálat .....	50
5.8.1	Érzékenység az felhőátmérőre .....	50
5.8.2	Érzékenység felhőátvonulás sebességére .....	51
6	Összegzés.....	54
7	Irodalomjegyzék .....	55

## 1 Bevezető

---

A villamos energetika egyik fő fejlődési iránya napjainkban a megújuló energiaforrásokat hasznosító erőművek fejlesztése és telepítése. Ennek meghatározó oka a klímaváltozás folyamata, melyet más tényezők mellett, az üvegház-hatású gázok nagymértékű kibocsájtása okozhat. Ezen jelenség megfékezése érdekében több nemzetközi megállapodás is született. Ezek egyike bevezette az úgynevezett CO<sub>2</sub> kvóták rendszerét, mely jelentős gazdasági ösztönző, így a villamosenergia-termelésben nagymértékű dekarbonizációs folyamatok indultak meg.

Magyarországon is megfigyelhető az említett tendencia. Hazánkban az elkövetkezendő évtizedben nagy mennyiségű napenergiát hasznosító erőmű létesítése tervezett, összesen 12000 MW teljesítmény beépítése várható a következő két évtizedben. A jelenlegi magyar villamosenergia-rendszerben ez számottevő teljesítményhányadot jelent. A napenergia azonban rendkívül volatilis energiaforrás, az időjárástól függően egy percen belül is jelentősen változhat a napelemparkok által a hálózatba táplált villamosenergia mennyisége. Mindez igen nehéz feladat elé állítja a hálózati engedélyeseket. Ennek okán nagyon fontos, hogy képesek legyünk egy jól használható, a valóságot elfogadhatóan kis hibával közelítő becslést adni a várható, időjárásváltozásból fakadó termelésingadozásokra, illetve azok hálózati hatásaira. A dekarbonizációs törekvések mellett az is kiemelkedő fontosságú, hogy a villamosenergia-előállítás módjának megváltozása ne okozzon negatív változást a szolgáltatásminőségében. Tehát időjárásfüggő energiatermelés esetén is teljesíteni kell a vonatkozó szabványokban meghatározott előírásokat. Az ehhez szükséges hálózatfejlesztések megtervezéséhez és előkészítéséhez elengedhetetlen számítógépes szimulációk alkalmazása. Dolgozatom egy ezt elősegítő szimulációs keretrendszer tervezésével és fejlesztésével foglalkozik.

## 2 Magyarország energiastratégiájának áttekintése

---

Magyarország jelenlegi energiastratégiájának [1] fókuszában az energiatartalomtól való függetlenedés áll. Ennek eléréséhez felhasználni kívánt öt eszköz: az energiatakarékosság, a lehető legnagyobb mértékű megújuló energia felhasználása, a biztonságos atomenergia és az erre épülő közlekedési elektrifikáció, kétpólusú mezőgazdaság kialakítása, valamint az európai energetikai infrastruktúrához való kapcsolódás megvalósítása.

Az energiatakarékosság jegyében az energiastratégia hosszú távú célként tűzi ki a primerenergia-felhasználás csökkentését a 2010-es 1085 PJ-hoz képest. Illetve, ha a csökkentés nem valósítható meg, az éves primerenergia-felhasználás mértéke akkor sem haladhatja meg 2030-ra az 1150 PJ-t. Ennek megvalósulása mellett kiköti a CO<sub>2</sub> kibocsátás és fosszilis energiatartalom felhasználás csökkentését is. A célok megvalósítása érdekében épületenergetikai fejlesztéseket, energiatartalomhatékonysági beruházásokat, erőmű korszerűsítéseket és tudatos energiatartalomfelhasználásra nevelést szorgalmaz. Az energiastratégia célul tűzi ki 2030-ig a megújuló energia részarányának legalább 20%-ra való növelését a primerenergia-felhasználásban. Ennek elérésére biomassza és biogáz erőművek telepítését, valamint geotermikus energia felhasználását javasolja, főként hőenergia előállítására. A villamosenergia előállításában pedig nap- és szélenergiára helyezi a hangsúlyt. Az energiatermelés CO<sub>2</sub> kibocsátásának csökkentése érdekében az atomerőművi kapacitás bővítése is előírásra kerül. Szintén ennek jegyében az elavult erőművek leállítása, illetve korszerűsítése is fontos szerepet játszik. Az energiatartalomhatékonyság növelése érdekében cél a távhőszolgáltatás decentralizálása és kiterjesztése, valamint megújuló energiaforrások arányának 20%-ra növelése a távhő előállításában. Szintén az energiatartalomhatékonyság növelése érdekében fontos a közlekedés elektrifikációja, illetve annak olajfüggőségének csökkentése. Ennek érdekében 2030-ra hidrogénhajtású közúti járművek arányának 9%-ra, az agroüzemanyag felhasználás arányának 14%-ra növelését tűzi ki célul az energiastratégia. A közösségi közlekedés elektrifikációját az atomerőművi energiatermelés fedezheti.

A jelenlegi mezőgazdasági gyakorlatok nagy mértékű (a teljes kibocsátás 13-15%-a) üvegházhatású gáz kibocsátással járnak. Ennek csökkentése érdekében az energiastratégia a megelőzésre és újrahasznosításra helyezi a hangsúlyt. A jelenlegi nagymennyiségű hulladék kibocsátás csökkentése, megfékezése is fontos cél. A mezőgazdaság által termelt hulladék alapanyagul szolgálhat különböző ipari eljárásokhoz, melyek felhasználásával csökkenthető lenne az ipar CO<sub>2</sub> kibocsátása is. A mezőgazdaság fosszilis energia felhasználása is jelentős, főként az üvegházhatású gázok területén, melyre a jövőben geotermikus energia hasznosítása lehet alternatíva. Az energiastratégia feltárja az energetikai célú hulladékhasznosításban rejlő jelentős potenciált is, mely mind környezetvédelmi, mind energiatartalomhatékonysági szempontból meghatározó lehet. A kommunális hulladék akár 60%-a is

hasznosítható lehet, melynek felhasználása az energetikai célú biomassza-felhasználás 15-20%-át is kiteheti a jövőben.

## 2.1 Magyarország energiastratégiájának hatása a villamosenergia-termelésre

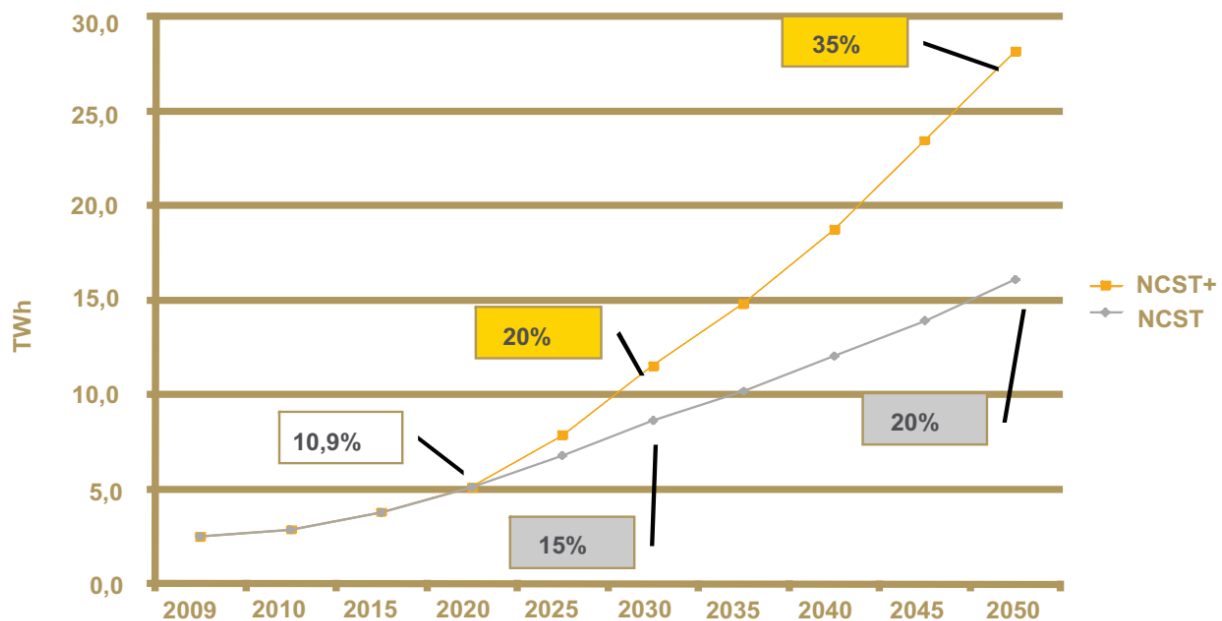
Az energiastratégiában hat különféle energiamix forgatókönyv vizsgálatára kerül sor, melyek eltérő arányban tartalmaznak nukleáris-, megújuló-, illetve fosszilis energiát. Ezek az energiamixek az alábbiak:

1. Atom-Zöld: Új atomerőművi blokkok létesítése a paksi telephelyen és a Magyarország Megújuló Energia Hasznosítási Cselekvési Tervében (NCsT) rögzített megújuló energia felhasználási pálya meghosszabbítása (1. ábra NCST).
2. Anti Atom-Zöld: Nem épülnek új blokkok a paksi telephelyen és az NCsT-ben rögzített megújuló energia felhasználási pálya meghosszabbítása.
3. Atom-Zöld(+): Új atomerőművi blokkok létesítése a paksi telephelyen és az NCsT-ben rögzítettnél ambiciózusabb megújuló energia felhasználási pálya (1. ábra NCST+).
4. Atom(+)-Zöld: Új atomerőművi blokkok létesítése a paksi telephelyen, majd 2030 után új telephelyen is, illetve az NCsT-ben rögzített megújuló energia felhasználási pálya meghosszabbítása.
5. Atom-Szén-Zöld: Új atomerőművi blokkok létesítése a paksi telephelyen és az NCsT-ben rögzített megújuló energia felhasználási pálya meghosszabbítása, valamint egy új szénerőmű létesítése.
6. Anti Atom-Zöld(+): Nem épülnek új blokkok a paksi telephelyen és az NCsT-ben rögzítettnél ambiciózusabb megújuló energia felhasználási pálya.

Az elemzések alapján a legrealisabb jövőképnek a Atom-Szén-Zöld adódott, melynek megvalósítását célként tűzték ki. Ezen forgatókönyv alapján az atomenergia hosszútávon fenntartandó az energiamixben, melynek első lépése az új atomerőművi blokkok telepítése a paksi telephelyen. A nukleáris energia mellett fontos a szén alapú energia szinten tartása is, hogy a hazai szénkészletek hasznosításának lehetősége fennmaradjon és ne vesszen ki a szakmai kultúra. A szén primer energiahordozóként való nagyobb arányú felhasználásának feltétele a jövőben a tiszta szén és CO<sub>2</sub> leválasztási és tárolási (CCS) technológiák alkalmazása. Ezek biztosítására a jelenlegi szénerőműveink nem alkalmasak, így szükséges egy úgy, korszerű szénerőmű létesítése. A megújuló energia részarányát pedig továbbra is növelni kell az NCST-ben meghatározott mértékben. Az NCST 2020-ig határozta meg a megújuló energia részarányának célértékét, így annak lineáris meghosszabbítása szükséges (1. ábra). Ezek mellett a földgáz alapú energiatermelés is meghatározó marad, a hazai áramszektor gázkereslete



folyamatosan növekedni fog. Ezen jelentős földgázimport igény miatt is fontos a szénalapú energiatermelés fenntartása, mivel az biztonsági tartalékot nyújthat egy nem várt áremelkedés esetén.



1. ábra: A megújuló energia aránya a villamosenergia-termelésben [1]

A fenti 1. ábra jól mutatja, hogy a tervek szerint az elkövetkezendő évtizedekben a megújuló energia részaránya jelentős mértékben meg fog nőni az energiamixben. A jelenlegi stratégia szerint (NCST+) tehát 2030-ig 6000 MW, 2040-ig 12000 MW fotovillamos kapacitás kerül telepítésre [14]. Ennek eredményeképp 2030-ra a bruttó végső energiafelhasználás legalább 21%-a fedezhető lesz megújuló energiából.

A tervezett kapacitások beépíthetőségének érdekében előreláthatólag jelentős hálózatfejlesztésre lesz szükség. A fejlesztések nagy hatással lesznek a középfeszültségű elosztóhálózat topológiájára és a feszültségszabályozására is. Ezek jelenlegi állapotát, illetve az üzemeltetés gyakorlatát mutatják be a következő fejezetek.

## 3 A magyarországi közepfeszültségű elosztóhálózat

---

A közepfeszültségű (KÖF) elosztóhálózat feladata, hogy kapcsolatot teremtsen a nagyfeszültségű (NAF) átviteli hálózat és a kiefeszültségű (KIF) elosztóhálózat között.

### 3.1 Általános jellemzők

A KÖF elosztóhálózat elosztja a 120 kV-os főelosztó hálózatból érkező villamosenergiát a kiefeszültségű (KIF) fogyasztói körzetek között, illetve fogadja az adott körzetben levő, növekvő mértékben megújuló energiaforrásokat felhasználó kiserőművek termelését. A Magyarországon előforduló feszültségszintek KÖF hálózatokon: 35 kV, 22 kV, 11 kV és 6 kV. Az azonos feszültségszinten üzemelő hálózatrészek rendelkeznek bontási/összekapcsolási pontokkal, az ellátásbiztonság érdekében. Ezek segítségével változtatható a sugarasan ellátott területek mérete. A 35 kV-os hálózati feszültségszintet egyre kevésbé használják, az ilyen hálózatokat hálózatrekonstrukció során 22 kV-os üzemre alakítják át. A vidéki szabadvezetékes elosztóhálózat jellemző feszültségszintje 22 kV, míg a városi kábelhálózatok nagy része 11 kV névleges feszültségű. Külvárosokban előfordul 22 kV-os szabadvezetékes és kábeles hálózat alkalmazása is. Régebben a 6 kV-os feszültségszintet jellemzően nagy ipartelepek elosztóhálózatán alkalmazták, mára igen kevés maradt fenn belőle. Az ipartelep és kisebb teljesítményű erőművek részben közepfeszültségre kapcsolódnak. [2] A KIF hálózatok feszültségszintje 0,4 kV, feladatuk a villamosenergia eljuttatása közvetlenül a lakossági és általános felhasználókhoz. A napjainkban egyre inkább elterjedő háztartási méretű kiserőművek (HMKE) is jellemzően erre a feszültségszintre csatlakoznak.

Az elosztóhálózat vezetői jellemzően 95 mm<sup>2</sup> átmérőjűek, azonban leágazásokban előfordulnak ennél kisebb keresztmetszetek is (50 mm<sup>2</sup>, 35 mm<sup>2</sup>, 25 mm<sup>2</sup>). Néhány esetben előfordul, hogy a megszokottnál nagyobb (120 mm<sup>2</sup>) keresztmetszetű vezetőket alkalmaznak.

A teljes magyar közepfeszültségű hálózat hossza 161 578 km. [3] A közép- és kiefeszültségű hálózatok topológiai igen sokrétűek lehetnek, melyet különböző vezetőktípusok alkotnak [4]. A közepfeszültségű hálózat táppontjából kiinduló vezetőket gerincvezetéknek (fővezeték) nevezzük, melynek feladata a róla leágazó szárnyvezetékek és fogyasztók közvetlen táplálás. A szárnyvezetékek (leágazások) kötik össze a gerincvezetőket a KIF elosztóhálózatokkal (KÖF/KIF transzformátoron keresztül), illetve ellátják a KÖF fogyasztókat. Alkalmaznak még célvezetőket is, melyek a hálózat táppontjából közvetlenül egy nagyfogyasztót látnak el. Topológiáját tekintve a KÖF hálózat Magyarországon hurkolt kialakítású. A hurkolt kialakítás azt jelenti, hogy az egyes csomópontokban többszörösen csatlakoznak egymással a vezeték és hálózat üzemszerűen több zárt kört is tartalmaz, valamint egy vagy több táppontból is ellátható. Ezen kialakítás mellett a magyar KÖF hálózat sugaras üzemben működik. Ez azt jelenti, hogy

a KÖF hálózatrészek egy táppontból kapnak táplálást és azokat egy gerincvezeték és annak szárnyvezetékei alkotják, melyek nem állnak összeköttetésben sem egymással, sem más táppontból ellátott vezetékekkel. Ez utóbbi a hurkolt kialakításnak köszönhetően megváltoztatható [4].

A villamos hálózatokat topológiájuk és egyéb jellemző paramétereik alapján csoportosítani lehet különböző klaszterezési, matematikai módszerek segítségével.

### 3.2 Hálózatok csoportosításának lehetőségei

Az előző fejezetben leírtak alapján jól látható, hogy a magyar elosztóhálózatot alkotó részhálózatok sokrétűek és a hálózat egésze igen nagy méretű. Ezért nem érdemes a teljes hálózatot vizsgálni, ha az elosztóhálózatot modellezni szeretnénk és az így kialakított modellen szimulációkat kívánunk végrehajtani, mivel ez nagyon időigényes, számításigényes és komplex feladat volna. Jelentősen egyszerűsödik a feladat, ha olyan mintahálózatokat tudunk vizsgálni, melyek jól reprezentálják a hálózat egészét, vizsgálatukkal a teljes hálózatra vonatkozó megállapítások tehetők. Reprezentatív mintahálózatok előállításának egy lehetséges módja, hogy a valós hálózatrészeket csoportosítjuk azok fizikai paramétereik alapján, majd generáljuk az egyes csoportok tulajdonságait hordozó szintetikus hálózatokat vagy kiválasztjuk az ezeknek leginkább megfelelő valós hálózatokat.

A magyarországi közepfeszültségű elosztóhálózat részhálózatainak egy lehetséges csoportosítási módját írja le az [5] cikk. Első sorban olyan hálózatrészeket vizsgáltak az [5] tanulmányban, melyekre napelemes kiserőművek (<500 kVA) csatlakoztatása lehetséges. A szerzők egy adatbányászati módszereken alapuló csoportosítási eljárást dolgoztak ki. Vizsgálták a széleskörűen használt K-közép klaszterezés és hierarchikus összevonó klaszterezés előnyeit és hátrányait a hasonló témájú, korábbi tanulmányok eredményei alapján. Ennek eredményeképp a K-közép klaszterezést találták a legmegfelelőbbnek az adott csoportosítási eljáráshoz.

A K-közép klaszterezés egy iteráción alapuló algoritmus, mely előre meghatározott számú ( $k$  db) középpont köré rendezi a csoportosítani kívánt adatsort. Az algoritmus az előre megadott klaszterszámnak megfelelően első lépésben kiválaszt  $k$  db kezdő középpontot véletlenszerűen, az adatsor intervallumában, majd kiszámítja az egyes adatpontok és a középpontok közti távolságokat. Ez után minden pontot a hozzá legközelebb eső középpont csoportjába sorol. A következő lépésben az algoritmus minden csoportra meghatározza az egy csoportba tartozó pontok és a csoport középpontja közti átlagos távolságot. Az iterációk során az algoritmus addig változtatja a középpontok helyzetét, míg a középpontok és a hozzájuk tartozó adatpontok közötti távolságok átlaga minimális nem lesz, vagy az algoritmus túl nem lépi az iterációk maximális számát. Az algoritmus akkor vezethet hibás

eredményhez, ha a csoporton belüli átlagos távolságok egy lokális minimumát találja meg, ezért érdemes azt egymás után többször lefuttatni [6].

Az [5] cikkben három magyarországi elosztóhálózati engedélyes középvezetési elosztóhálózatának 1769 db részhálózatát (ellátóközvetét) csoportosították. A különböző méretű és topológiájú hálózatrészeket gráfokként kezelték és az alábbi nyolc darab villamos és matematikai paraméterrel jellemezték őket:

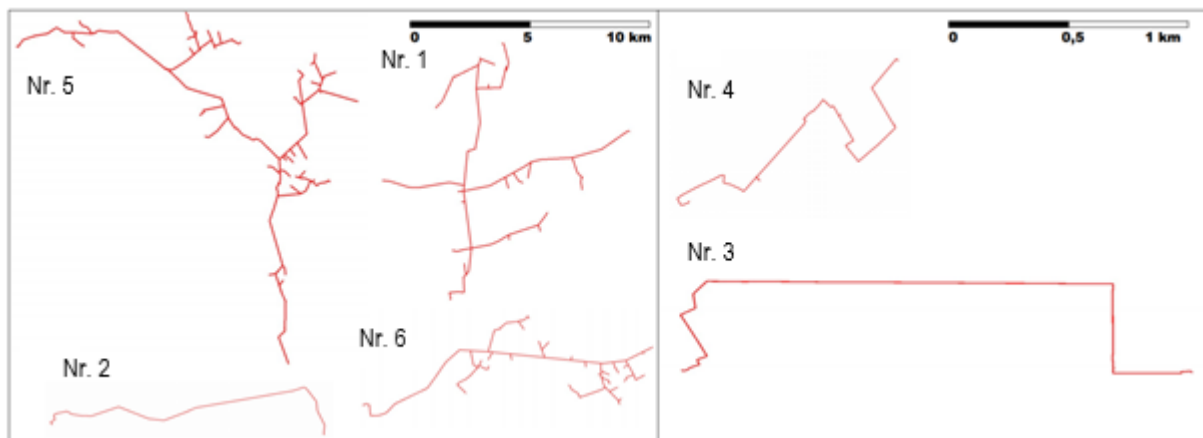
1. Kapcsolók (oszlopkapcsolók) száma (number of switches)
2. Transzformátorok száma (number of transformers)
3. Hálózat átlagos impedanciája (average impedance of feeders [ $\Omega$ ])
4. Csomópontok száma (total node number)
5. Csomópontok átlagos fokszáma (average node degree)
6. Karakterisztikus impedancia (characteristic impedance [ $\Omega$ ])
7. Hálózat átmérője (diameter of the feeders [m])
8. Átlagos köztsiség (average betweenness centrality [ $\Omega$ ])

Mivel ezen paraméterek értékei igen széles értéktartományban helyezkednek el, az [5] cikk szerzői normálták azokat. Ez után korrelációanalízist végeztek, melynek eredményeként azt kapták, hogy a leginkább független paraméter a 3. (Hálózatok átlagos impedanciája). Mivel paraméterek nagy száma a klaszterezési algoritmus futási idejének jelentős növekedésével jár, ezért a szerzők főfaktor analízis (Principal Component Analysis - PCA) segítségével redukálták azok számát. A főfaktor analízis az eredeti paramétereket kevesebb számú, matematikai tényezővel helyettesíti, melyek hordozzák az eredeti információ jelentős részét, azonban fizikai tartalmuk nincs. Ebben az esetben az ezzel járó információvesztés nem haladta meg az 5%-ot három főfaktor alkalmazása esetén. Ennek eredményeként az eredeti nyolc helyett mindössze három paraméterrel sikerült megvalósítani a hálózatok leírását, melyek a főfaktor analízissel kapott sajátértékek és az eredeti változók szorzataként számíthatók. Az új komponensek függetlenségét korreláció analízissel ellenőrizték, majd ezek alkalmazásával végezték el a csoportosítást.

A csoportosítás első lépéseként az [5] cikk szerzői meghatározták az optimális klaszterszámot, amely a K-közép klaszterezés bemenő adataként szolgál. Az optimális klaszterszám meghatározása a Calinski-Harabasz, a Davies-Bouldin, a Silhouette és a Gap validációs kritériumok egyidejű alkalmazásával történt. Ezek alapján a klaszterek számát hatra állították be. A K-közép klaszterezési algoritmust 30 ismétléssel futtatták a korábban említett lokális minimumok elkerülése érdekében. Minden alkalommal ugyan az az eredmény született, így a klaszterezési eljárás konvergensenek tekinthető.

Az eljárás eredményeként kapott hat csoport egymástól mind méretben mind topológiában eltérő, melyet a vizsgált paraméterek elkülönülő eloszlásfüggvényei is alátámasztanak. A legnagyobb csoport a 4. klaszter lett, mely a vizsgált hálózatrészek majdnem 65%-át (882 db) tartalmazza. Ezzel szemben a legkisebb csoport a 2. klaszter, mely mindössze 21 db hálózatot tartalmaz. A többi klaszter mérete közepesnek mondható (150-300 db hálózat).

A fent ismertetett csoportokból az [5] cikk szerzői végül kiválasztották azokat a reprezentatív mintahálózatokat, melyek felhasználhatók a vizsgált hálózat egészére vonatkozatható szimulációkhoz. A kiválasztott mintahálózatok a klaszter középpontjához legközelebb eső adatpontok, melyek valós topológiát reprezentálnak. Ezen hálózatok méretarányos, valós orientációjú topológiai rajzait mutatja az alábbi 2. ábra.



**2. ábra: Reprezentatív mintahálózatok méretarányos topográfiája [5]**

Későbbi munkám során a Klaszter 1 (Nr. 1) mintahálózatának számítógépes modelljét készítettem el (növekvő napelemes penetráció hatásai – a napelemes rendszerek fizikai paramétereit miatt – ezen a hálózaton érdemben vizsgálhatók), melyet a szimulációs keretrendszer fejlesztéséhez és annak teszteléséhez használtam fel. Ennek segítségével vizsgáltam meg a nagy mértékű napelemes penetráció lehetséges hatásait a magyarországi középvezetési elosztóhálózatra.

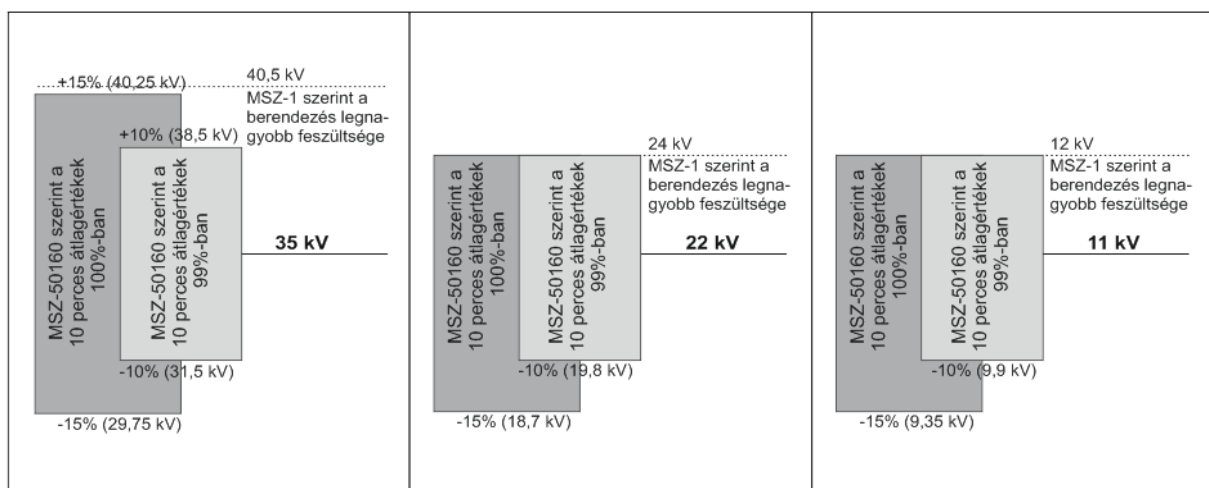
### 3.3 A megújuló alapú energiatermelés hálózati hatásai

A megújuló energiát hasznosító elosztott energiatermelők (kiserőmű - KE) növekvő száma komoly kihívás elé állítja a hálózat üzemeltetőit, mivel a kiserőművek által termelt energia a megújuló penetráció mértékében befolyásolja azon hálózat paramétereit, melyre csatlakozik.

A VER állapotát meghatározó alapvető paraméterek a hálózati frekvencia és a hálózati feszültség. Míg a frekvencia a rendszer egészére jellemző paraméter, közel állandó 50 Hz értékűnek tekinthető, addig a feszültség hálózati szintenként (NAF, KÖF, KIF) eltérő értékű. A feszültség ezen belül lokálisan is eltérő

lehet, értéke folyamatosan váltakozik a névleges feszültség szintek körül az aktuális teljesítményáramlások függvényében. A frekvencia állandóságának feltétele a teljesítmény-egyensúly mindenkor fennállása. A teljesítmény-egyensúlyt fizikai törvények garantálják, azonban a rendszerirányító feladata, hogy ez a névleges hálózati frekvencián alakuljon ki.

Közepesfeszültségű elosztóhálózat esetén mind a hatásos-, mind a meddőteljesítmény áramlás változása hatással van a hálózati feszültségre. Ennek oka, hogy a hálózatot alkotó vezeték impedanciájának ellenállás és reaktancia értéke közel azonos ( $R/X \approx 1$ ). Ebből következik, hogy a kiserőművek, mikor villamos energiát táplálnak a hálózatba, megemelik a feszültséget a hálózati csatlakozási pontjukon a betáplált pillanatnyi teljesítmény mértékével arányosan. A termelés szünetelésekor, napelemes rendszerek esetében pl.: éjszaka vagy kedvezőtlen időjárásnál, ez a hatás természetesen megszűnik. A kiserőművek tehát folyamatos feszültségváltozást okoznak. A hálózati feszültség értéke azonban nem lehet tetszőleges, annak megengedett értékei szabványban rögzítettek. Magyarországon erre vonatkozóan az MSZ EN 50160:2011 szabvány mérvadó. Ennek KÖF hálózatra vonatkozó előírásait szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra: A közepesfeszültségű elosztóhálózat szabványos feszültségtűrése [7]

További előírás, hogy a közcélú hálózatra csatlakozó kiserőművek nem okozhatnak 2%-nál nagyobb mértékű, rövid idejű (1 perces), ún. gyors feszültségváltozást. A kiserőművek nem csak feszültség emelkedést, hanem feszültségcsökkenést is okozhatnak. Ez abban az esetben fordulhat elő, ha a KE csatlakozási pontja egy terhelés alatt állítható transzformátor primer oldalának közvetlen közelében van. Ebben az esetben ugyanis a termelőegység által okozott feszültségemelkedést a transzformátor áttételének állításával (fokozatléptetés) kompenzálják, mely beavatkozás a szekunder oldalra csatlakozó, távoli fogyasztóknál feszültségcsökkenést okozhat. További negatív hatás lehet a KE egységek okozta flicker. Ezt főleg napelemes termelőegységek gyors termelésingadozása (p.: 5 s alatt

100%-ról 30%-ra csökken, majd visszaáll) okozhatja, mely például nagyméretű, gyorsan mozgó, egymástól elkülönülő felhők vonulása esetén következhet be.

A szabványos értékek betartása és a megfelelő energiaminőség biztosítása érdekében az elosztóhálózati engedélyeseknek szabályozniuk kell a hálózati feszültséget, így kompenzálva a kiserőművek hatását.

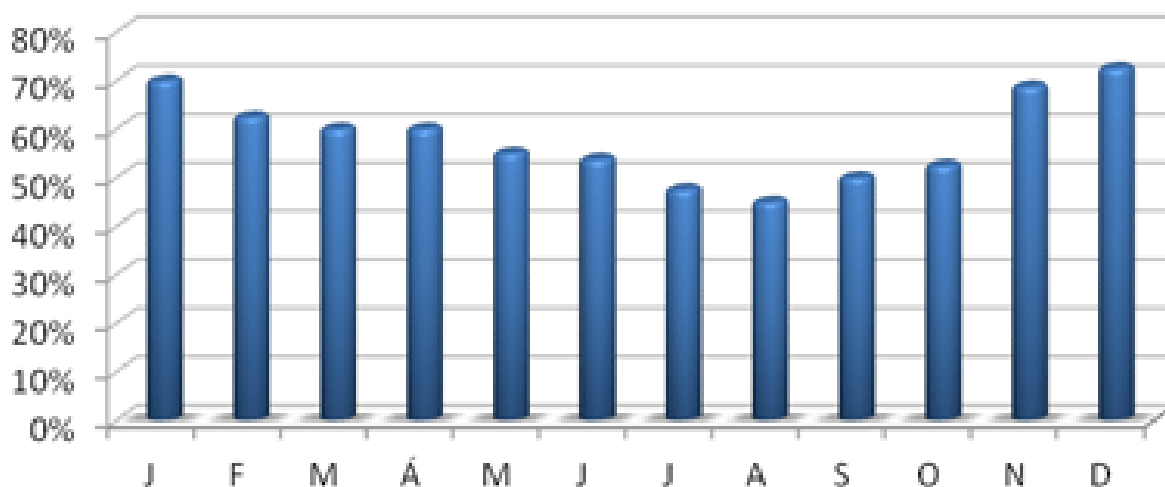
## 4 Felhőárnyék modellek

Magyarország éghajlati adatainak felhasználásával hatékonyan készíthető olyan sztochasztikus időjárás szimuláció, mely segítségével vizsgálni lehet az ország területén telepíteni kívánt időjárásfüggő elosztott energiatermelők hálózatra gyakorolt hatását. Ehhez azonban modellezni szükséges az ilyen típusú termelőegységek teljesítményét leginkább befolyásoló időjárási jelenségeket, a felhőátvonulásokat. A probléma jelentősen egyszerűsíthető, ha nem a felhőket modellezzük, hanem azok árnyékait, melyek a tényleges hatást kifejtik a napelemek által megtermelt energia mennyiségére és időbeliségére.

### 4.1 Magyarország éghajlati jellemzői és felhőborítottsági viszonyai

Magyarország a 45°45' és 48°35' északi szélességek között fekszik, az Egyenlítő és az Északi-sark között nagyjából félúton. Az ország a szoláris éghajlati felosztás szerint a mérsékelt övben helyezkedik el, azonban éghajlata nagyon változékony. Ennek egyik fő oka, hogy éghajlatunkra több különböző klímátípus is hatással van. Ezek a kiegyenlítettebb hőmérsékletjárású, csapadékos óceáni, a szélsőséges hőmérsékletű, kevés csapadékú kontinentális, illetve a nyáron száraz, télen csapadékos mediterrán éghajlat. Ezen klímátípusok közül bármelyik hosszabb-rövidebb időre uralkodóvá válhat. A változékonyság másik oka, hogy Magyarország a Kárpát-medence alján fekszik. A fenti okok miatt az országon belül annak viszonylag kis területe és sík felszíne ellenére jelentős különbségek fordulhatnak elő az időjárásban. [8]

A besugárzás területi eloszlását döntően a földrajzi szélesség és a felhőzet mennyisége befolyásolja. Hazánkban az országon belüli szélességi fok különbség nem jellemző, így inkább utóbbi a döntő szerepű. Magyarország átlagos havi felhőborítottsági értékeit ismerteti a 4. ábra.

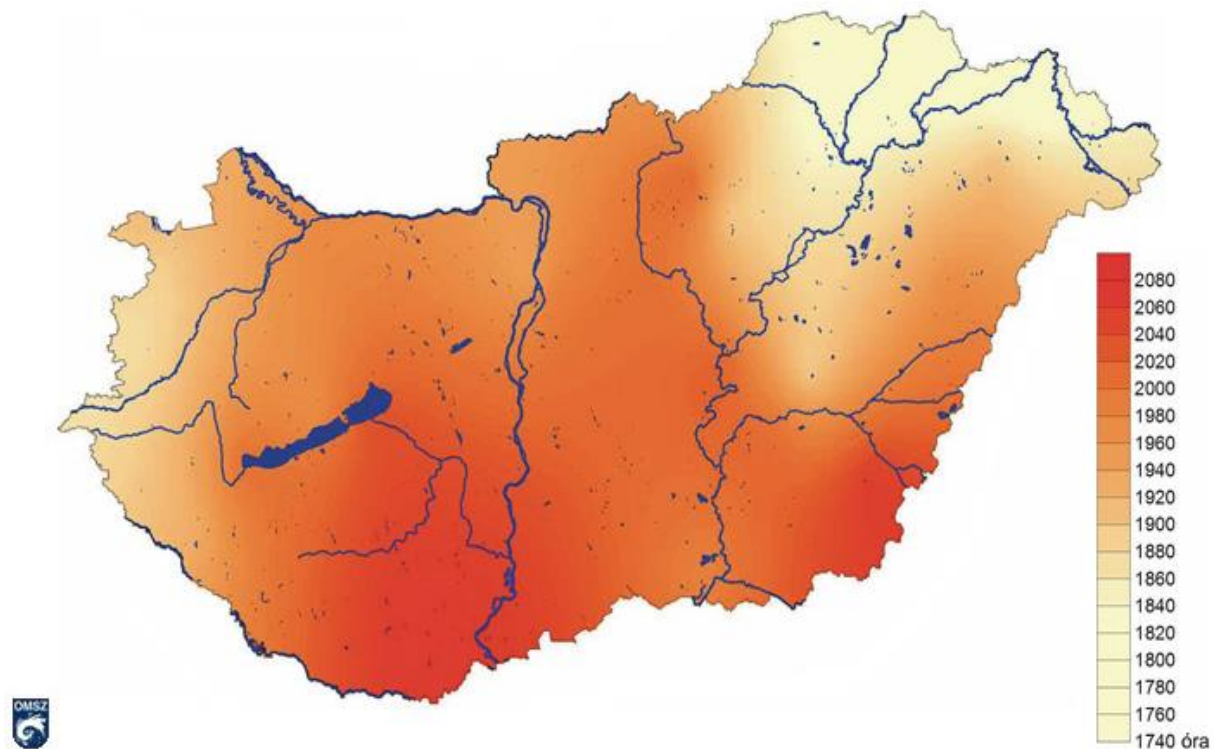


4. ábra: A felhőborítottság átlagos havi értékei Magyarországon az 1971-2000 közötti időszak alapján [8]



A fenti ábra alapján jól látható, hogy Magyarországon a decemberi hónap a legfelhősebb, míg augusztusban van átlagosan a legkisebb felhőborítottság.

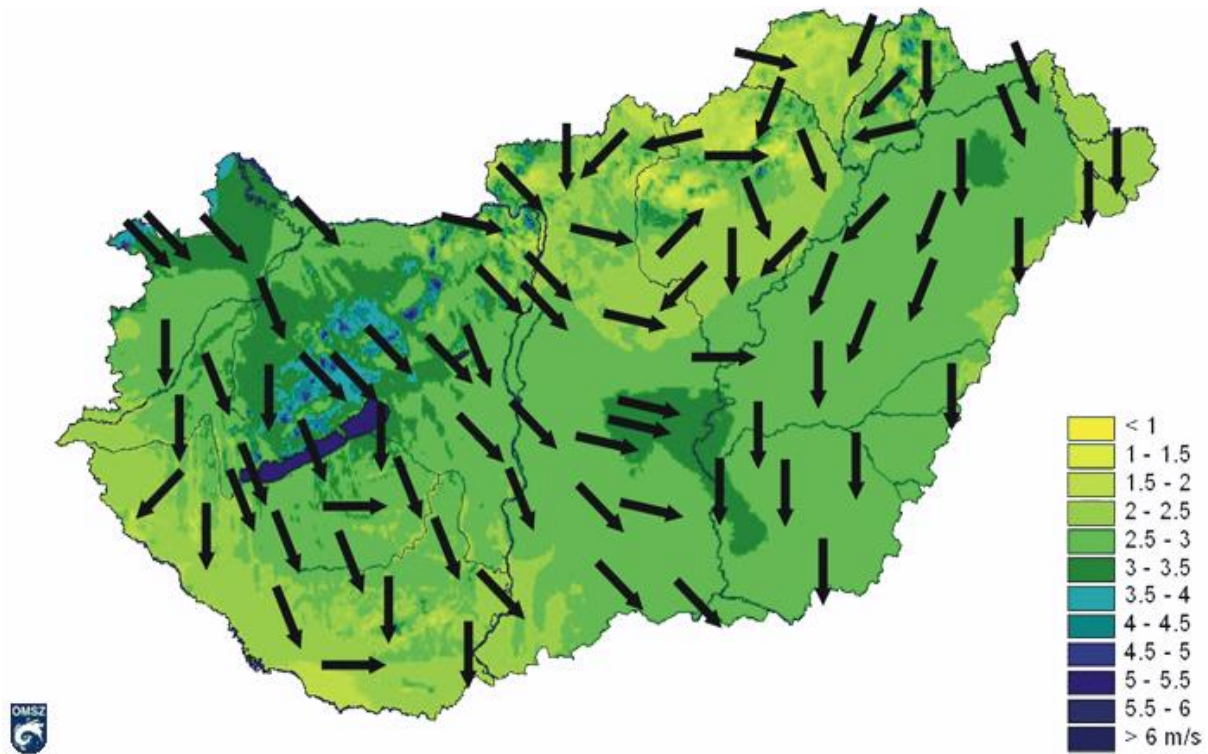
A napfénytartam a felszín érő közvetlen sugárzás időtartama, melyet a csillagászatilag lehetséges napfénytartam, a domborzat és a felhőzet befolyásol. Ennek magyarországi évi átlagos értékét mutatja az 5. ábra.



**5. ábra: Az évi átlagos napfénytartam (óra) Magyarországon az 1971-2000 közötti időszak alapján [8]**

A fenti ábra alapján arra következtésre juthatunk, hogy általában Északkelet-Magyarországon a leginkább felhős az időjárás, illetve itt a legnagyobb a domborzat árnyékoló hatása. A déli országrészben pedig a legkevesebb az felhős napok átlagos száma és napsütést gátló domborzati elemek mértéke.

Magyarország uralkodó széliránya az északnyugati, míg a délies szélnek másodmaximuma van. Ezt mutatja be a 6. ábra. Hazánkban a leggyakoribb szélirány relatív gyakorisága csak 15-35% között ingadozik, tehát az esetek 65-85% százalékában a szél más irányból fúj.



6. ábra: Az évi átlagos szélességek [ $\text{m/s}$ ] és az uralkodó szélirányok Magyarországon (2000-2009) [8]

Magyarország a mérsékelt szeles vidékek közé tartozik. Az évi átlagos szélesség  $2\text{-}4 \text{ m/s}$ , azonban lokálisan jelentősen eltérő értékek lehetnek a szélességet befolyásoló számos tényező miatt. A legszelesebb időszak tavasz elején tapasztalható, míg ősz elején mérhetők a legkisebb szélességek. Hazánkban átlagosan évi 122 szeles nap (a legerősebb szellőkések elérik a  $10 \text{ m/s}$ -ot vagy meghaladják azt) van, melyek közül 35 viharos (szellőkések meghaladják a  $15 \text{ m/s}$ -ot).

A napelemes termelés szempontjából legjelentősebb időjárási változás a felhőzet megváltozása, különösen a nagyméretű, gyorsan haladó felhők átvonulása. Ezen események hatásának vizsgálatához alkalmazunk felhőárnyék modelleket, melyek segítségével a modellezett napelemek termelését tudjuk befolyásolni a hálózati szimulációk során. Fontos kiemelni, hogy nem a felhők modellezése a cél, mivel azok sokrétűsége és a szerkezetüket befolyásoló nagymennyiségű környezeti paraméter igen bonyolulttá tenné a modellezés folyamatát. A felhők árnyékának modellezésével a feladat nagy mértékben leegyszerűsíthető, számos nehezen meghatározható paraméter elhagyható.

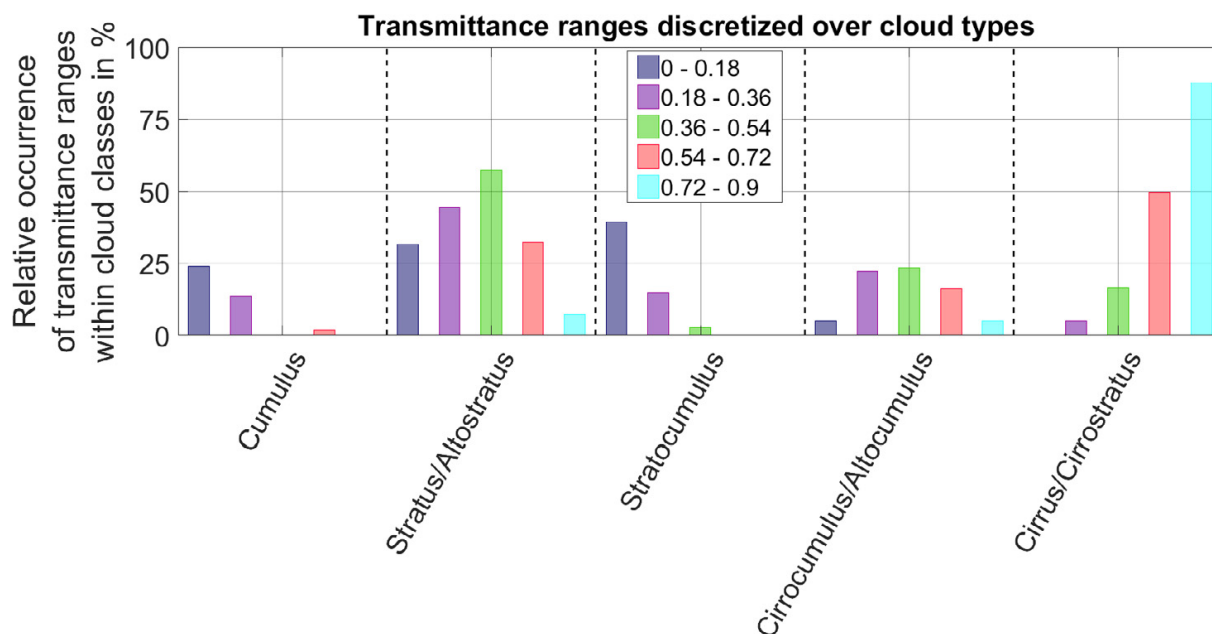
Az elmúlt évtizedekben számos felhőárnyék modell került kidolgozásra és kipróbálásra. A legtöbb tanulmány azonos alapfeltevésekből indul ki, azonban korábbi publikációkban előfordulnak egészen más megközelítések is.

## 4.2 Statisztikai módszereken alapuló felhőárnyék modell

Kutatásaim során először egy statisztikai módszereken alapuló felhőárnyék modellt [9] vizsgáltam meg. A [9] forrás egy olyan szimuláció eredményeit mutatja be, melynek célja a felhőátvonulások hatására bekövetkező maximális napelemes termelésváltozás meghatározása volt adott időintervallumban, különböző méretű hálózatok esetén. A referencia termelési adatok előállításához egy empirikus tiszta ég modellt alkalmaztak. A szerzők a felhőárnyék modellezéséhez a következő felhőparamétereket vették figyelembe:

1. Az egyes felhők mérete (size of individual clouds)
2. Az egyes felhők alakja (shape of individual clouds)
3. Az ég felhőkkel borított részének aránya (percent of sky covered by clouds [%])
4. A felhőmozgások sebessége és iránya (speed and direction of cloud movement)
5. A felhők fényáteresztő képessége (optical transmission of clouds)
6. A felhők optikai tulajdonságainak változása a felhő közepétől a széléig (variations in optical properties from the center to the edge of clouds)

A [9] cikk szerzői megállapították, hogy a kumulusz (cumulus) típusú felhők okozzák a legnagyobb termelésváltozást, ezért csak ezek hatását vizsgálták. Ezt támasztja alá az alábbi 7. ábra is.



7. ábra: Felhőtípusok fényáteresztőképessége [10]

A szerzők kitérnek azonban arra is, hogy megfelelő paraméterezéssel a többi felhőtípusra is alkalmazható a modelljük. A felhők méretének becslésére valós megfigyelések alapján sztochasztikus modellt alkottak. Megfigyeléseket végeztek a kis- és nagyméretű, valamint viharos időben előforduló

kumulusz típusú felhők előfordulási gyakoriságára és azok méretére vonatkozóan. Az így kapott adatok regresszióanalízise után az alábbi eredményre jutottak:

$$p = 16.086 - 16.256 \cdot \ln(A); 0.100 < A < 2.690 \text{ (kisméretű)} \quad (1)$$

$$p = 14.754 - 6.363 \cdot \ln(A); 0.100 < A < 10.163 \text{ (nagy méretű)} \quad (2)$$

$$p = 10.500 - 3.061 \cdot \ln(A); 0.100 < A < 30.884 \text{ (viharfelhő)} \quad (3)$$

ahol:

$p$  Adott méretű felhő előfordulás diszkrét valószínűsége [%]

$A$  Felhő mérete [km<sup>2</sup>]

A fenti egyenletek ((1),(2),(3)) segítségével kiszámítható, annak a valószínűsége, hogy a felhő mérete kisebb vagy egyenlő egy adott 'a' méretnél, tehát meghatározható a megadott méretű kumulusz típusú felhők előfordulásának valószínűségi eloszlásfüggvénye:

$$F(a) = a \cdot (0.880 - 0.442 \cdot \ln(a)) - 0.180; 0.100 < a < 2.690 \text{ (kisméretű)} \quad (4)$$

$$F(a) = a \cdot (0.346 - 0.104 \cdot \ln(a)) - 0.059; 0.100 < a < 10.163 \text{ (nagy méretű)} \quad (5)$$

$$F(a) = a \cdot (0.147 - 0.033 \cdot \ln(a)) - 0.022; 0.100 < a < 30.884 \text{ (viharfelhő)} \quad (6)$$

A szerzők a felhőárnyék alakját minden esetben téglalap alakúnak vették, egy meghatározott aránnyal ( $W = 0.582 \cdot L$ , ahol  $W$  – szélesség,  $L$  – magasság), mivel tapasztalatuk szerint ez a paraméter nem befolyásolja érdemben a napelem termelésében okozott változást. Így a felhőárnyék modell leprogramozása jelentősen leegyszerűsödik. A felhők optikai áteresztőképességét az alábbi módon számították ki:

$$\text{Transmittence} = x(i)' + y(i)' \cdot m \quad (7)$$

$$m = \frac{35}{1224 \cdot (\cos(Z))^2 + 1} \quad (8)$$

ahol:

$x(i)'$  és  $y(i)'$  Cumulus: 0.366 és 0.015

$Z$  Zenith szög

Mivel az optikai áteresztőképesség felhők közepétől széle felé történő változásáról a szerzőknek nem állt rendelkezésükre információ, ezért minden felhőt homogénnek tekintettek. A felhőmintázatot a felhőborítottságból származtatták úgy, hogy megfelelő számú, adott méretű téglalappal fedték le az égbolt meghatározott százalékát.

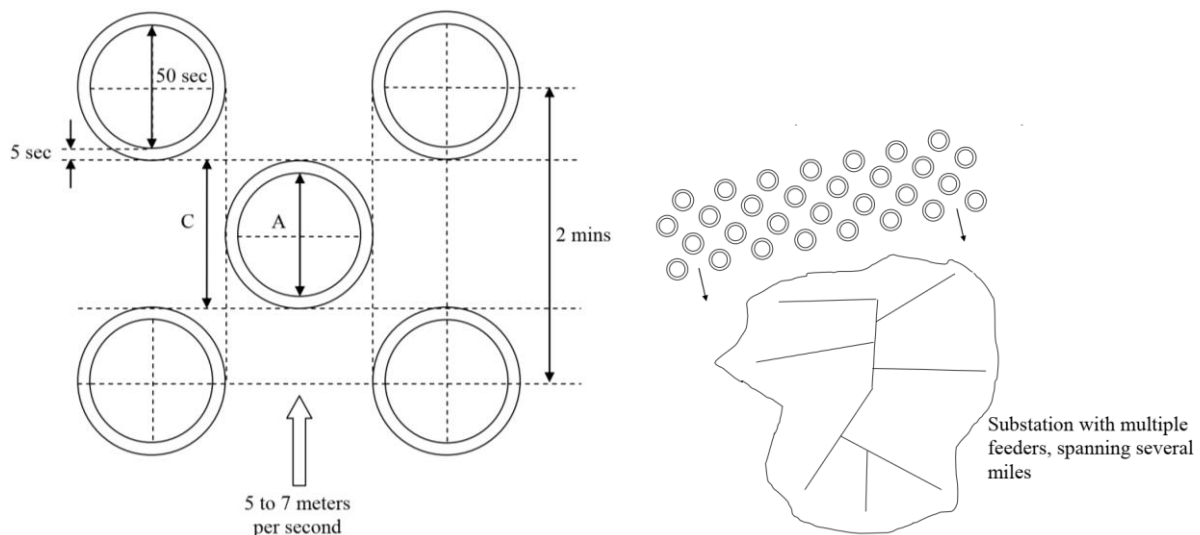
A cikk fő eredménye, hogy összefüggést teremtett a vizsgált terület mérete és a várható maximális termelésváltozás között. Azt is megállapították, hogy a viharfelhők („squall line”) okozta termelés kiesés kisebb problémát okoz, mivel annak hatása egyszeri és jól előre jelezhető. A kumulusz típusú felhők, mivel elszórtan vonulnak át az adott elosztóközvet felett, így nehezen előre jelezhető, kis változásokat okoznak, melyek a felhasználóknál flickerként jelentkezhet.

Ennek a felhőárnyék modellnek nagy előnye, hogy implementálása igen egyszerű és könnyen használható. Hátránya azonban, hogy nagy mennyiségű historikus időjárási adatra van szükség adott földrajzi lokációra való alkalmazásához.

### 4.3 Elemi felhő alapú felhőárnyék modell

A közelmúltban született felhőárnyékokról szóló tanulmányok alap gondolatai jelentősen eltérnek az előző fejezet (4.2) megközelítésétől. A [11] tanulmány bevezet egy felhőmodellt, mely alkalmas az elosztott energiatermelők termelésváltozásainak vizsgálatára, valamint bemutat egy mérési eljárást a felhőárnyékok sebességének és irányának mérésére. A cikk szerzői olyan szélsőséges eseteket vizsgáltak, melyek tapasztalatuk szerint a legnagyobb termelésingadozásokat okozzák. Ilyen események magas napelempenetráció (a csúcspotasztás 50%-a vagy annál nagyobb) mellett olyankor fordulnak elő, mikor a tiszta égbolton nagyméretű, fehér felhők vonulnak, egymástól jelentős távolságban. A jelenség tanulmányozásához a szerzők egy vizsgálati egységet terveztek, mely egy napelem-panel U-I karakterisztikáját képes változtatni a maximális kiadott teljesítmény elérése érdekében. A mérések alapján azt tapasztalták, hogy napos időben, gyors felhőátvonulások hatására 70%-os ingadozások (100%-ról 30%-ra, majd vissza) tapasztalhatók a termelésben igen nagy dinamikával (kb. 5 s alatt).

A [11] tanulmány szerzői a felhőket ismétlődő mintázattal, több kisebb méretű koncentrikus körrel modellezték. Ezt a felhőárnyék modellt szemlélti a 8. ábra.



8. ábra: Felhőzetet alkotó "elemi felhők" (bal) és Felhőfront vonulása egy elosztóközvet felett (jobb) [11]

A koncentrikus körök „elemi felhőket” modelleznek, melyek a napelemek fölé érkezve csökkentik azok termelését. A körön kívül, mikor a felhő nem fedi a napelemet, a termelés természetesen az elméleti maximumot éri el ( $P_{max}$ ). A belső körlap hatására a termelés az egyharmadára ( $P_{max}/3$ ) csökken, míg a belső és külső kör közötti területen az árnyékoló hatás lineárisan csökken belülről kifelé. Ebben a modellben a körök átmérői másodpercben vannak megadva (55 s = 275-385 m), ezzel segítve a termelésre gyakorolt hatás lemodellezését. Az elemi felhők középpontjai „2 perc távolságban” (600-840 m) vannak egymástól és az egyes területek adott ideig fejtik ki hatásukat az árnyékolt napelemre.

Ezt a modellt fejlesztették tovább a [12] cikk szerzői, akik felhőátvonulások magas napelempenetrációjú elosztóhálózati körzetek feszültségminőségére gyakorolt hatását vizsgálták. A felhőárnyékmodellt MATLAB Simulink-ben fejlesztették ki és OpenDSS-ben alkalmazták a vizsgált dél-taiwani hálózat elemzésére. A szerzők egy olyan szimulációs keretrendszert alkottak, melyben a felhasználó megadhatja a napelemek és a felhőárnyékok paramétereit. Ezekből kiszámításra kerül minden napelem termelése. A szerzők a fent említetteken kívül bevezettek még két segédparamétert is: egy besugárzási tényezőt („Irradiation factor”) és egy felhő tényezőt („Cloud factor”).

A besugárzási tényező egy 0 és 1 közötti szám, mely a besugárzás időjárás okozta változását reprezentálja. Ennek bevezetésével olyan esetek is vizsgálhatók, mikor nem a teljesen tiszta égbolton történik felhőátvonulás.

A napelem aktuális maximális teljesítménye (kW) ezzel a tényezővel, egy egyszerű szorzással számítható:

$$P_{max,new} = P \cdot Irradiaton\ factor \quad (9)$$

ahol:

$P_{max,new}$  A napelem aktuális időjárásban lehetséges maximális teljesítménye  
 $P$  A napelem névleges maximális teljesítménye

A felhő tényező („Cloud factor”) egy 0 és 0,3 közötti érték, mely a felhők vastagságát modellezi. Ennek segítségével kiszámítható a napelemek várható minimális teljesítménye (v.e.). Így, ellentétben a korábbi cikkekkel, nem 30% a minimális teljesítmény, hanem akár ennél kisebb is lehet. Ennek számítási módja az alábbi:

$$P_{min,new} = Irradiaton\ factor \cdot (0,3 - Cloud\ factor) \quad (10)$$

ahol:

$P_{min,new}$  A napelem aktuális időjárásban lehetséges minimális teljesítménye

A minimális és maximális teljesítményeken kívül meghatároztak még egy tranziens teljesítményt is, mely a következőképp számítható:

$$P_{tran} = P_{min} + \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} \cdot \frac{d - 20 \cdot v}{(25 - 20) \cdot v} \quad (11)$$

ahol:

$P_{tran}$  Tranziens teljesítmény  
 $P_{min}$  A napelem aktuális időjárásban lehetséges minimális teljesítménye  
 $P_{max}$  A napelem aktuális időjárásban lehetséges maximális teljesítménye  
 $d$  A felhőárnyékok közötti távolság  
 $v$  A felhőárnyékok sebessége

Az így meghatározott mennyiségek segítségével alkotható meg a felhőárnyék modell, melynek alkalmazása a következő:

- Ha a napelem a „20 s sugarú” kör által fedett területen van, akkor  $P_{napelem} = P_{min}$
- Ha a napelem a „20 s sugarú” kör és a „25 s sugarú” kör közötti körgyűrű által fedett területen van, akkor  $P_{napelem} = P_{tran}$
- Ha a napelem egyéb helyen van, akkor  $P_{napelem} = P_{max}$

Ezen paraméterek bevezetésével tovább finomítható a felhőárnyék modell és a valóságnak jobban megfelelő szimulációs eredmények érhetők el.

Ennek a felhőárnyék modellnek a könnyen adaptálhatóság, illetve a valós környezeti események jó közelítése a legnagyobb előnye. Hátrány azonban, hogy a felhőárnyék mozgási irányának és sebességének meghatározásához méréseket kell végezni az adott földrajzi területen.

A fent ismertetett felhőárnyékmodellek valamelyikének problémaspecifikus adaptálásával lehetséges napelemes egységek termelését szimulálni változó időjárási körülmények között. Ezen szimulációs eredmények bemenetként szolgálhatnak egy olyan szimulációs keretrendszerben, mely a napelemek hálózati hatásait képes vizsgálni.



## 5 Szimulációs keretrendszer

---

Az előző fejezetekben ismertetett reprezentatív hálózatok (3.2), jellemző időjárás viszonyok (4.1) és felhőárnyék modellek (4.2, 4.3) ismeretében már közel minden komponens adott egy szimulációs keretrendszer megalkotásához. Mind ezeket azonban megfelelő megfontolások mentén az adott alkalmazáshoz kell igazítani, illetve összhangba kell hozni egymással.

### 5.1 Alkalmazott felhőárnyék modell

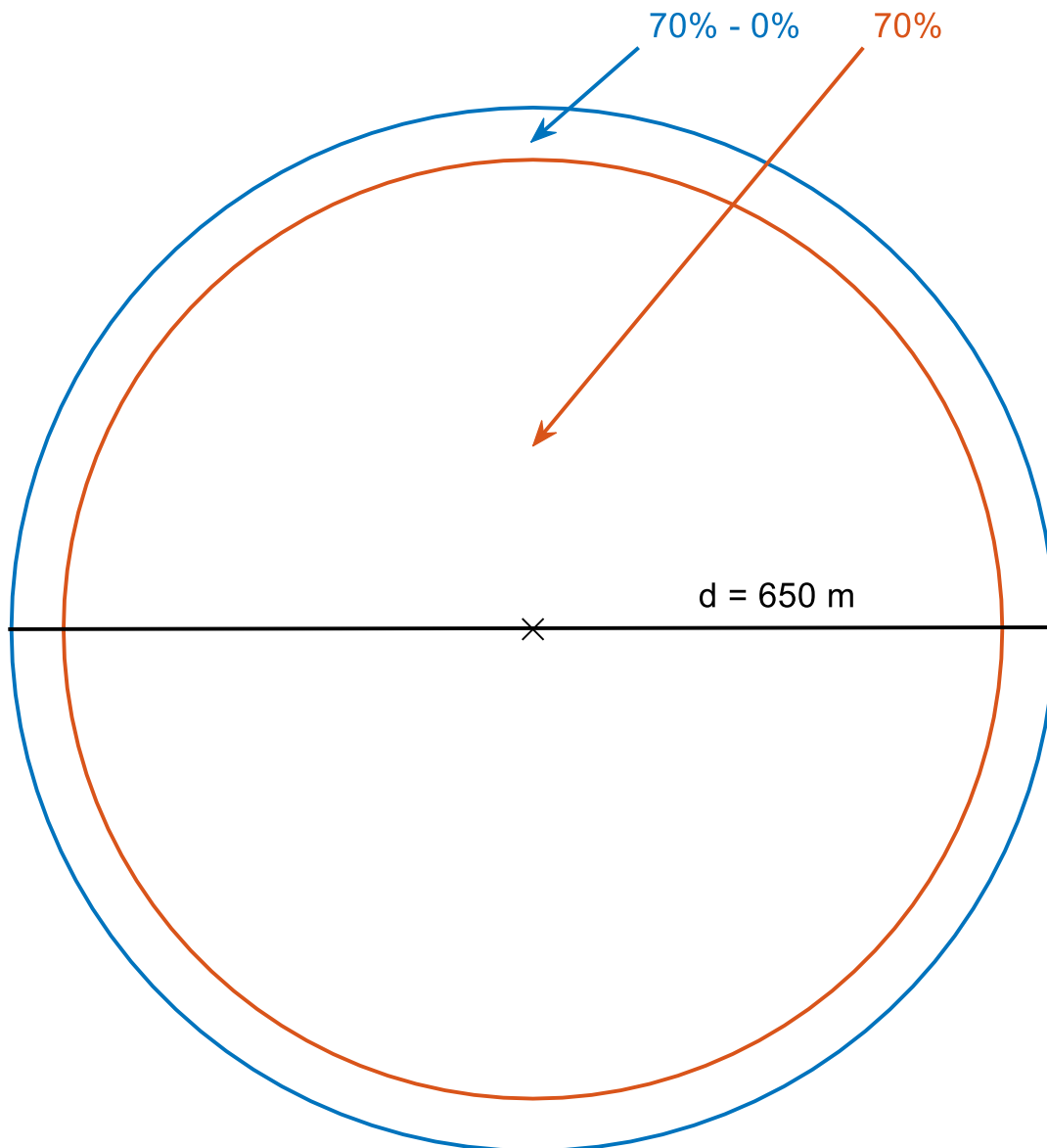
Munkám során egy olyan felhőárnyék modellt alkalmaztam, melynek alapjául a [11] cikk szolgált. Tekintettel arra, hogy nem flicker időtartományba tartozó hálózati jelenségeket szerettem volna vizsgálni, mint a cikk szerzői, a modellt adaptálnom kellett.

Céлом a hálózati feszültség perces nagyságrendű változásainak vizsgálata volt, így a felhőárnyékoknak ilyen eseményeket kellett előidéznie. Meteorológusokkal való konzultációt követően, javaslatukra felhőmegfigyeléseket végeztem. Megfigyeléseim (9. ábra), illetve meteorológiai szakember javaslata alapján arra jutottam, hogy a modell csak inhomogén felhőárnyékok alkalmazásával lehet valóságos.



9. ábra: Felhőmegfigyelés Budapest 2020

A kívánt hatás elérése érdekében az „elemi felhők” átmérőjének megnövelésére volt szükség. Koncentrikus kör struktúrát alkalmaztam. A körök átmérőjét meteorológiai szakértő [13] segítségével határoztam meg. A kumulusz típusú felhők és azok árnyékainak átmérője 300-1000 méter tartományban változik. Ez alapján 650 m átmérőt választottam alapértelmezett értéknek. Modellem szerint a felhőárnyékok belső 90%-a 70%-kal csökkenti a besugárzás mértékét, míg a külső 10%-on belülről kifelé lineárisan változik az árnyékoló hatás 70%-0% között. Ezt szemlélteti a 10. ábra.



10. ábra: Felhőárnyék modell

Ezt a módosított felhőárnyék modellt használtam a továbbiakban a felhőátvonulás szimuláció fejlesztése során. A felhőmintázatot a fenti ábrán látható felhőkből alakítottam ki.

## 5.2 Felhőátvonulás szimuláció

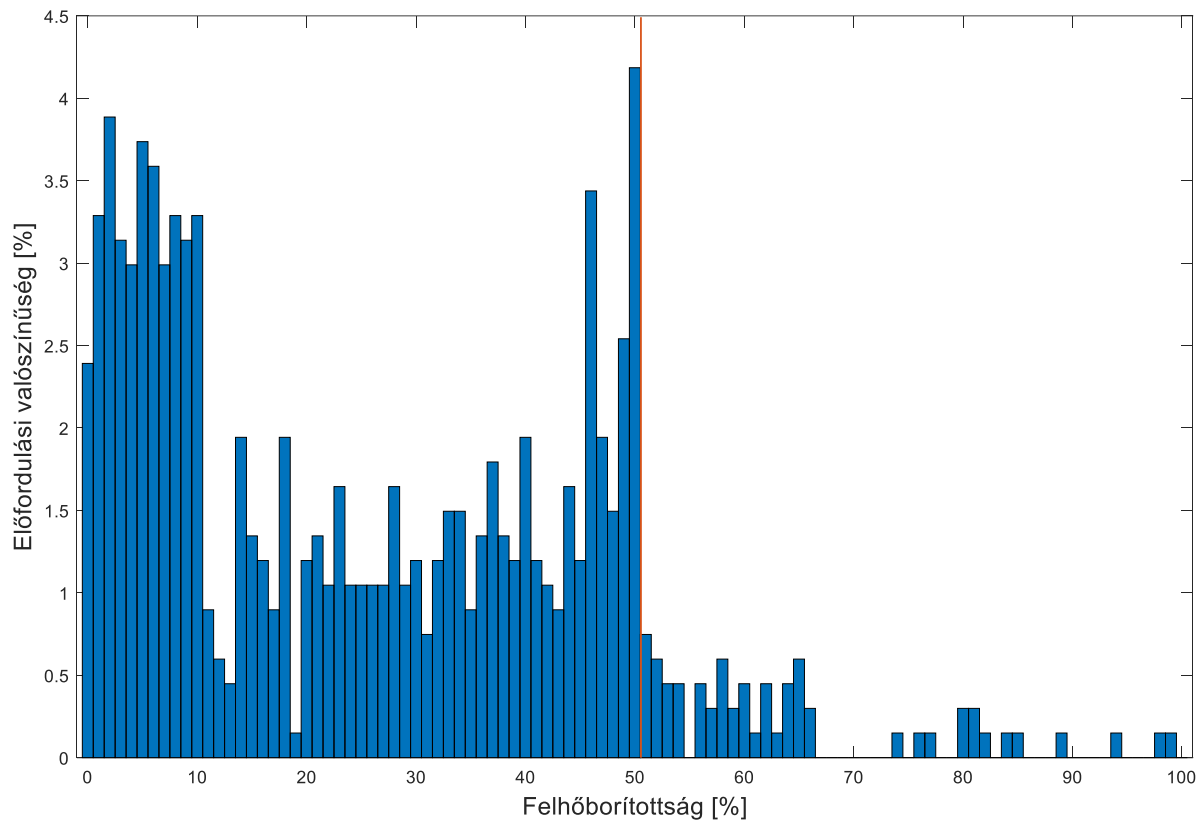
Az általam fejlesztett felhőátvonulás szimuláció feladata, hogy kapcsolatot teremtsen a felhőárnyék modell és a hálózati modell között. Megadott paraméterek alapján kiszámítja a vizsgált hálózat minden csomópontjára a napi besugárzási értékeket a felhőátvonulás hatásának figyelembevételével. Csak kumulusz típusú felhők hatását vizsgáltam, mivel ezen felhőtípus okozza a napelemes termelés legnagyobb mértékű változását [10].

A szimuláció bemenő paraméterei az alábbiak:

- Felhők átmérője
- Felhőborítottság mértéke
- Felhőátvonulás iránya
- Felhőátvonulás sebessége
- Felhőátvonulás kezdetének időpontja
- Tiszta ég adatsor
- Hálózat csomópontjainak koordinátái

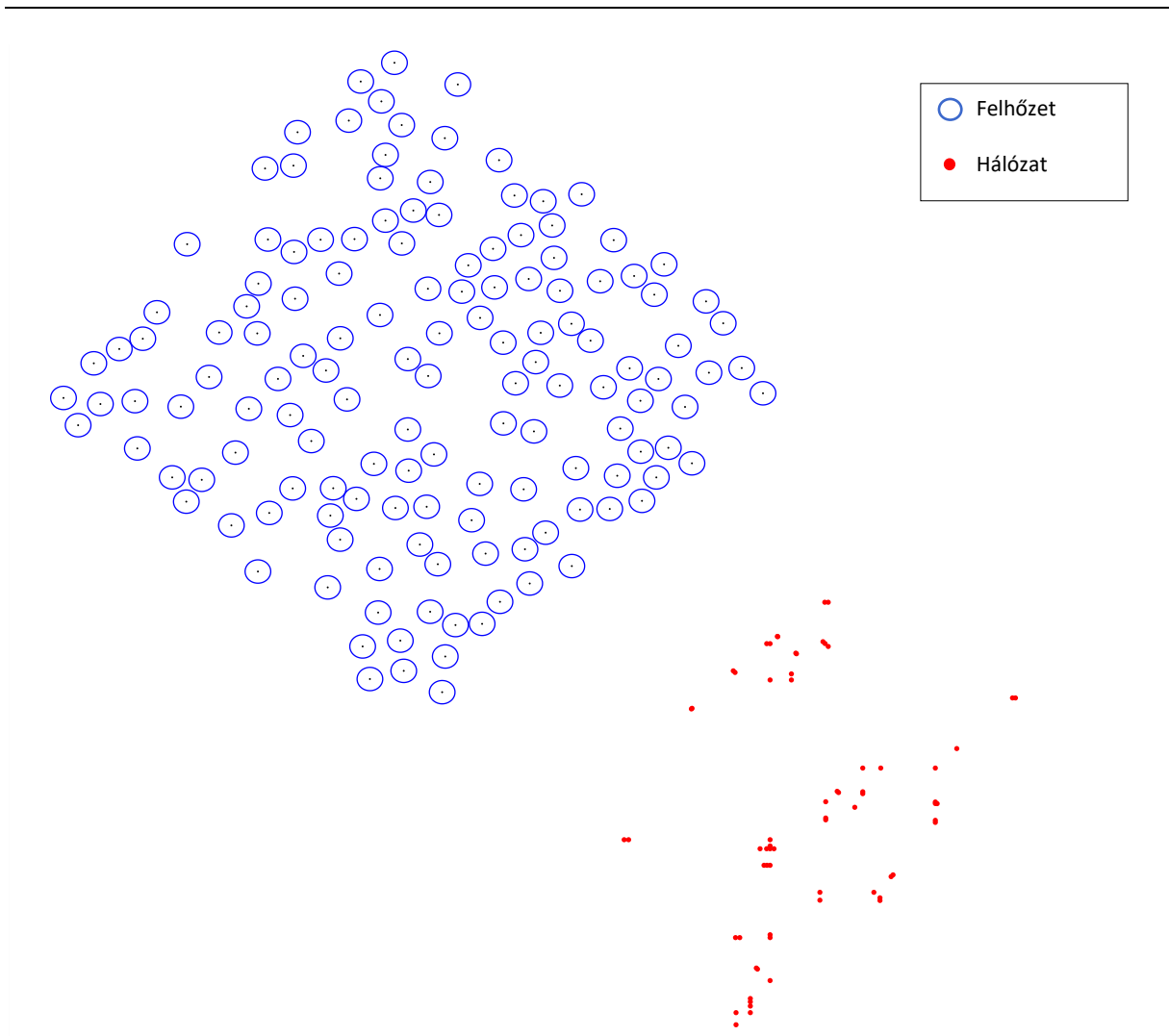
Az felhők átmérői az előző fejezetben (5.1) ismertetett, módosított felhőárnyék modell alapján kerültek meghatározásra.

A felhőborítottság mértékét magyarországi, kumulusz típusú felhőkre vonatkozó historikus adatok [13] alapján határoztam meg. A megfigyelt esetek több, mint 90%-ában a felhőborítottság 0%-50% közötti tartományba esett, ahogy azt a 11. ábra is szemlélteti. Munkám során ezért a felhőborítottság mértékének alapértelmezett értékét 25%-nak állítottam be.



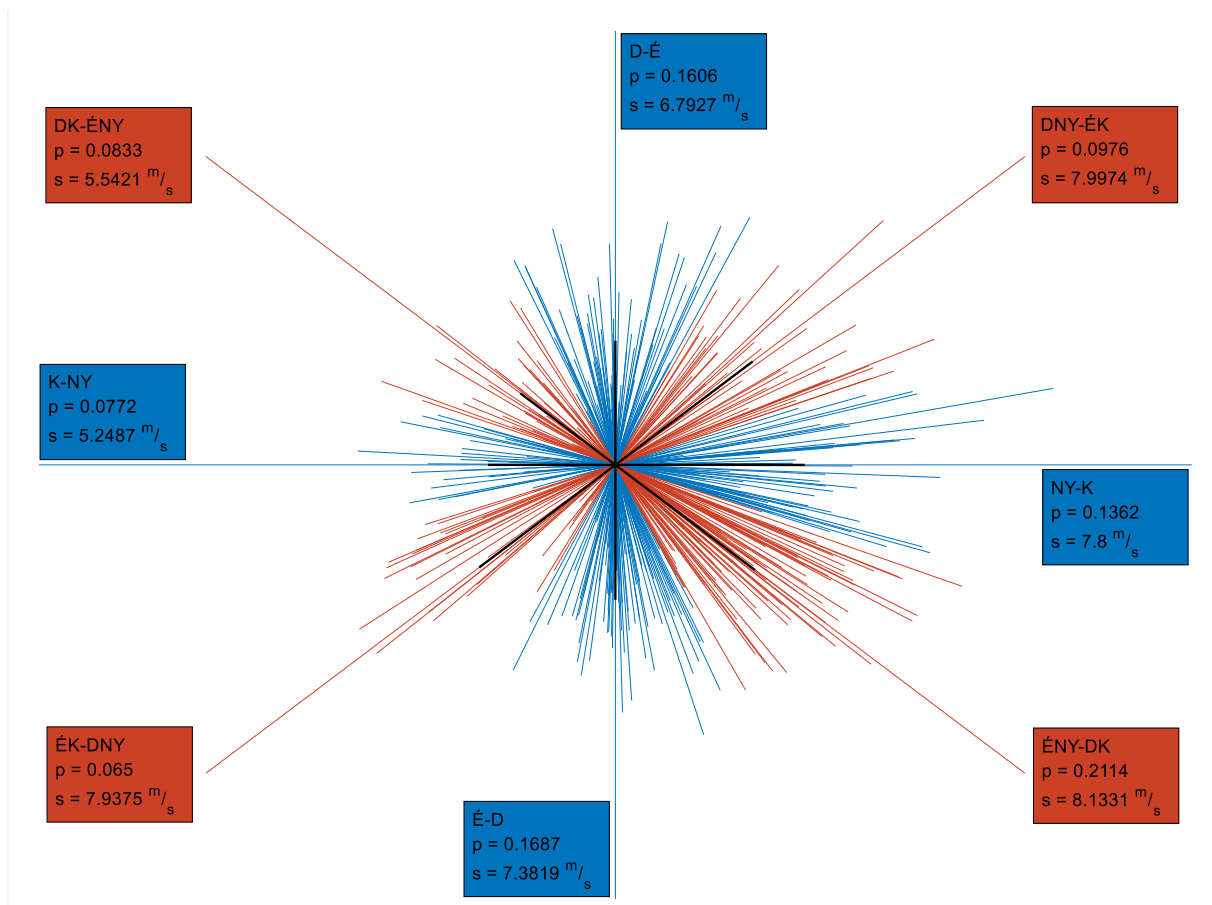
11. ábra: Felhőborítottság előfordulási valószínűsége kumulusz típusú felhők esetén

A felhőmintázat kialakításához a program először kiszámítja a vizsgált hálózatot lefedő négyzet területét. Ez után az felhők átmérője alapján (körök összesített területének kiszámítása) meghatározza, hogy a kívánt felhőborítottság eléréséhez hány darab felhőre van szükség. Végül az így kapott mennyiségű felhőt véletlenszerűen elhelyezi a megadott területen. A program addig generál véletlenszerű felhő középpontokat, míg azokat átfedés nélkül képes elhelyezni. Ennek a mintázatkialakítási módszernek szintén meteorológiai szakvélemény [13], illetve [9] cikk szolgált alapjául. A kialakított mintázatot ezután kiterjesztettem a mintázat megismétlésével a kívánt időtartamú felhőátvonulásnak megfelelően. Egy ily módon kialakított felhőmintázatot mutat az alábbi 12. ábra.



**12. ábra: Felhőmintázat**

Mivel felhőátvonulás sebesség és – irány mérések elvégzésére nem volt módomban, magyarországi historikus adatokra [13] kellett támaszkodnom. Olyan vektoros szélesség mérési adatokat használtam, melyeket 2000 m magasságban mértek. Munkámhoz ez éppen megfelelő volt, mivel a kumulusz típusú felhők az esetek több mint 85%-ában 1000-2500 m magasságban helyezkednek el [13]. Így a 2000 m-es magasság jó közelítéssel átlagosnak mondható az ilyen típusú felhők esetén. A rendelkezésemre álló adatok alapján meghatároztam az egyes szélirányok előfordulásának valószínűségét és a szélesség átlagos értékét. Ezt szemlélteti az alábbi 13. ábra.



13. ábra: A szélrózsa felbontása

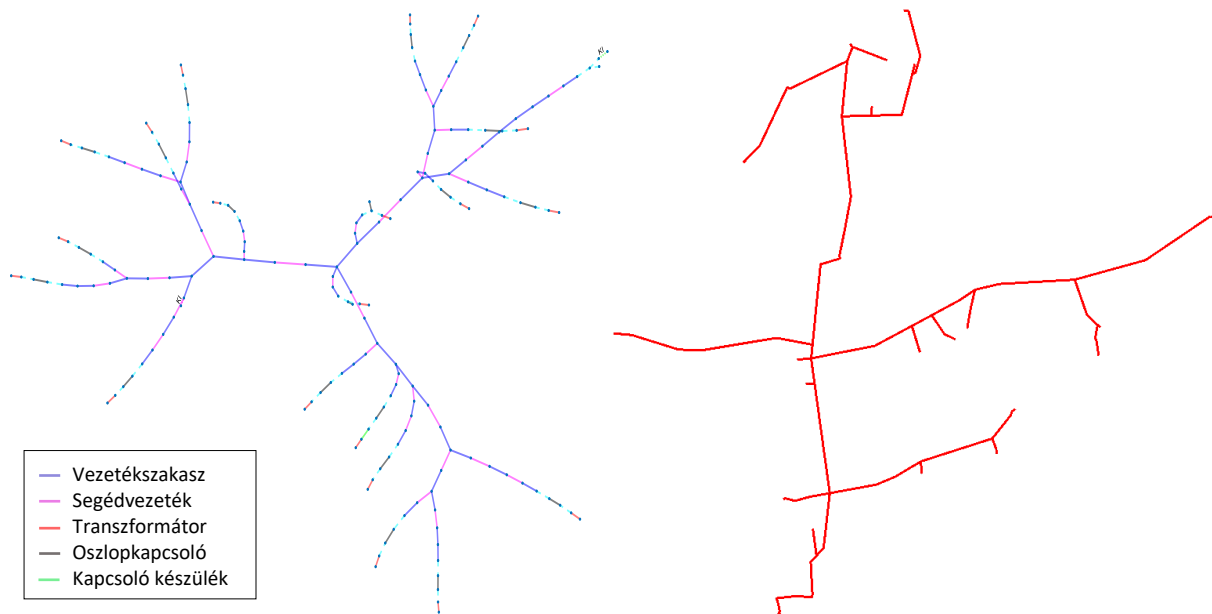
Azzal az egyszerűsítéssel éltem, hogy a szél sebessége és iránya megegyezik a felhőátvonulás sebességével és irányával. A korábban kialakított mintázat elforgatásra és eltolásra kerül a megadott iránynak megfelelően úgy, hogy a felhőzet éppen ne árnyékolja a hálózat egyetlen csomópontját se. Ezt követően kiszámításra kerül a felhőátvonulás időtartama az alapján, hogy mennyi időnek kell eltelnie a felhőzet hálózat fölé érkezése és a fedés ismételt teljes megszűnése között. Majd a kiválasztott indulási időponttól kezdődően a teljes időtartam minden egyes percére megvizsgálja az algoritmus, hogy melyik csomópont van éppen fedésben, illetve az felhő melyik szektora fedi az adott csomópontot. Ezekkel az árnyékolási adatokkal módosítjuk minden csomópont tiszta ég adatsorát.

A tiszta ég adatsor a Bird-féle tiszta ég modell segítségével kerül meghatározásra, egy kiválasztott napra, Magyarország területére (Budapest). A keretrendszer fejlesztése során a nyári napforduló (június 21.) adatsorával dolgoztam, azonban ez a paraméter tetszőlegesen vagy akár véletlenszerűen is megválasztható.

A felhőátvonulás szimuláció elvégzéséhez továbbá szükség van a vizsgálni kívánt hálózat bizonyos paramétereire. Ehhez el kell készíteni a hálózat számítógépes modelljét.

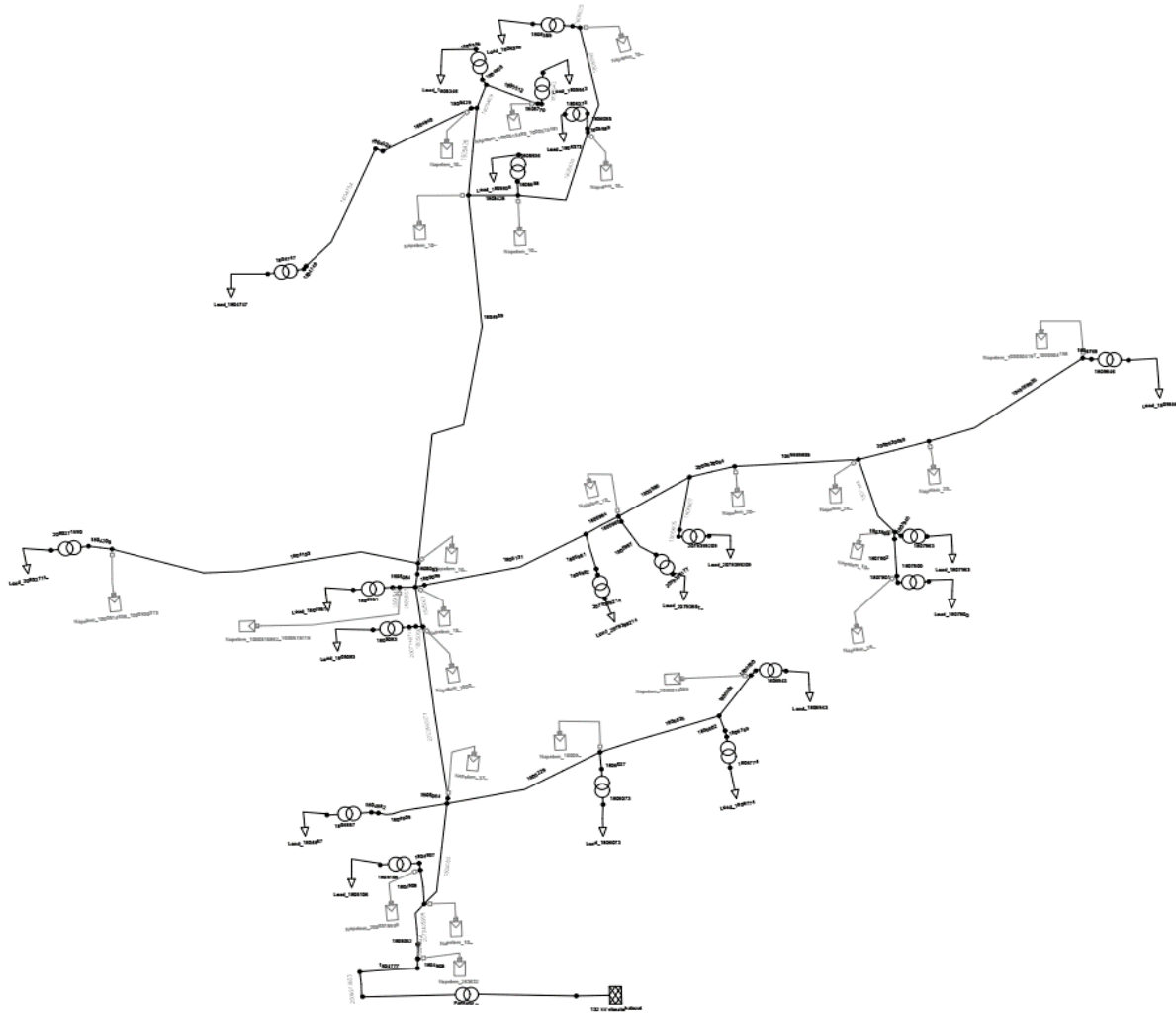
### 5.3 Hálózati modell

A 3.2 fejezetben ismertetett klaszterezés eredményeiből választott reprezentatív mintahálózat [5] számítógépes modellezését DigSILENT Power Factory 2020 programban végeztem. A csoportosítási eljárás során megalkotásra kerültek a hálózatok gráfjai MATLAB programban, melyek tartalmazták az egymással összeköttetésben álló csomópontokra vonatkozó információkat. A Klaszter 1 mintahálózat gráfjának és a hálózat topológiai rajzának (14. ábra) segítségével, valamint vezetékek paramétereit tartalmazó adatbázis felhasználásával alkottam meg a hálózati modellt.



14. ábra: Klaszter 1 mintahálózat topológiája (MATLAB gráf) (bal) és topográfiája (jobb)

A modellépítés megkezdése előtt definiáltam a hálózatban előforduló vezetéktípusokat (Line), valamint a különböző feszültségszintű csomópontokat (Terminal). Létre hoztam a végpontokra csatlakozó KÖF/KIF transzformátorok (2-Winding Transformer) típusait is. A modell felépítése során a hálózat topográfiáját (14. ábra) követtem. Az így elkészült hálózati modellt mutatja be a 15. ábra.



15. ábra: Klaszter 1 mintahálózat DlgSILENT Power Factory modellje

A KIF ellátókörzeteket egyszerű fogyasztóként (Load) modelleztem, melyek fogyasztását a későbbi szimulációkban valószínűségi alapon állítottam be, valós (eltérő körzetekből származó) mérési eredmények alapján. A 120 kV-os főelosztó hálózatot mögöttes hálózattal (External Grid) modelleztem. A későbbi load flow számítások során ez szolgált nyelőként (Slack). A kiserőművek napelemes rendszerként (PV System) kerültek lemodellezésre.

A hálózati modell szimulációs keretrendszerbe illeszthetősége érdekében szükséges a hálózat csomópontjait koordinátákkal ellátni. A feladat megoldására MATLAB scriptet írtam, mely a hálózat mértani középpontjához legközelebb eső csomópontot helyezi az origóba. Innen kiindulva, a hálózatot fokozatosan feltérképezve a már megtalált csomópontok szomszédjainak megkeresésével látja el az összes pontot koordinátákkal. A szomszédok meghatározása a távvezeték-szakaszok kezdő és végpontjának vizsgálatával történik. A koordináták értékének meghatározása a távvezeték iránya és hosszúsága alapján kerül meghatározásra, így mértékegységük méternek adódik. A rendelkezésre álló



adatbázis nem tartalmazta a vezetékszakaszok irányát, így azt a hálózati modell alapján kellett meghatározni és hozzárendelni az adatbázishoz.

Az így kapott, koordinátákkal ellátott hálózati modell már alkalmas arra, hogy egy sztochasztikus szimulációs keretrendszer részét képezze.

## 5.4 Napelemkiosztási stratégia

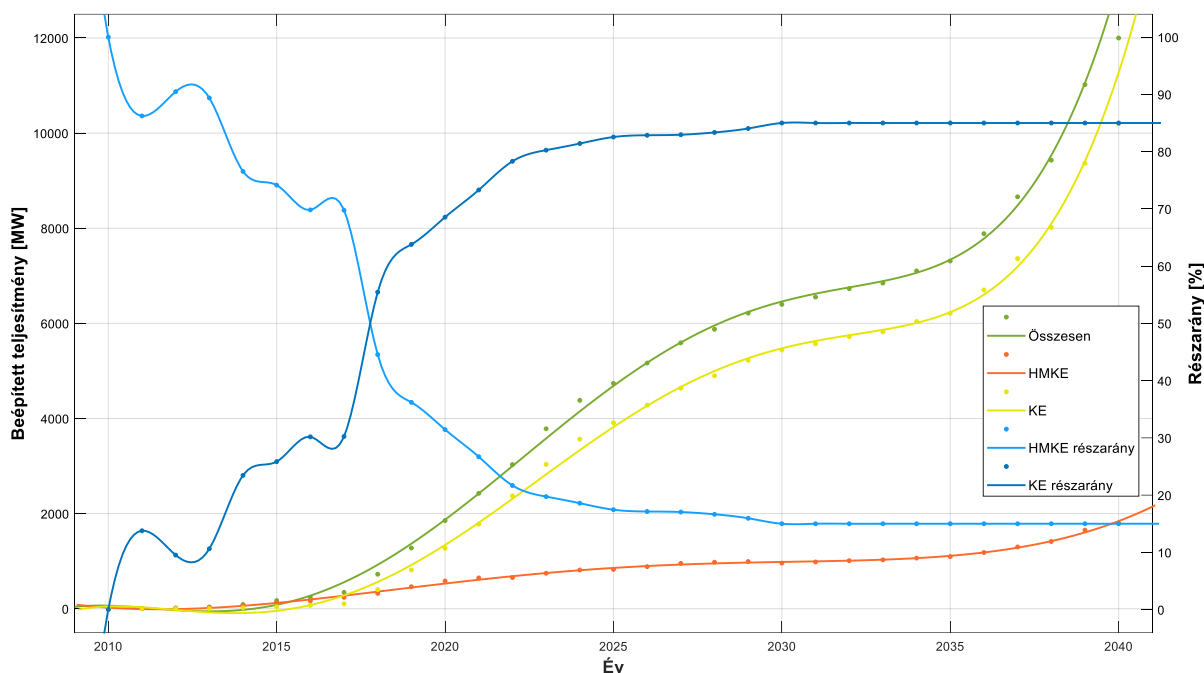
A hálózati modellre napelemes rendszereket kell csatlakoztatni a szimulációk elvégzéséhez. A napelemek elhelyezése különböző szempontok alapján történhet. Az egyes pozíciók meghatározhatók a betáplálási ponttól számított villamos távolság alapján vagy a hálózatot gráfként kezelve, annak jellemzői alapján. A kialakított keretrendszerben ez utóbbi megközelítést alkalmaztuk. Minden csomópontnak kiszámítottuk a köztiség (betweenness) értékét, mely gráfjellelmező megadja, hogy a teljes gráf bejárása során hányszor kell áthaladnunk az adott csúcson. Ez alapján a csomópontokat három csoportba osztottuk. Az első csoportot a legkisebb betweenness értékkel rendelkező csomópontok, a második csoportot a betweenness értékek számtani közepéhez legközelebb eső köztiségi értékkel rendelkező csomópontok, a harmadik csoportot pedig a legnagyobb betweenness értékkel rendelkező csomópontok alkotják. Ezen értékek a Klaszter 1 mintahálózat esetén a következő tartományokba estek:

- Minimális köztiség: 86 vagy 170, a csomópontok 57,35%-a
- Átlagos köztiség: 252 – 720 között, a csomópontok 22,06%-a
- Maximális köztiség: 864 – 2601 között, a csomópontok 20,59%-a

A szimulációk során három különböző napelempenetráció (a hálózati csúcspogasztás és a napelemes csúcstermelés aránya) esetén vizsgáltam a napelemek hálózati hatásait három napelem csatlakoztatási stratégiát alkalmazva (minimális -, átlagos -, és maximális köztiségű csomópontokra csatlakoztatva). A 2030-ig terjedő nemzeti energiastratégia [1], illetve az Innovációs és Technológiai Minisztérium (ITM) által 2020 év elején kiadott dokumentum [14] alapján megállapítható az elosztóhálózatra csatlakozó tervezett fotovillamos kapacitás. Ez 2030-ra 6400 MW, 2040-re 12000 MW. Az International Renewable Energy Agency (IRENA) [15], és a Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal (MEKH) [16] által publikált adatok alapján megállapítottuk a 2010-2019 időszakra beépített HMKE és kiserőmű (KE) kapacitások, valamint a beépített HMKE kapacitás részaránya is.

A napelemes kapacitás növekedésének 2020-2040 közötti időszakára egy lineáris görbe is jól illeszkedne, azonban ilyen tendencia valószínűsége igen kicsi, mivel a kiserőművek telepítése és a hálózatfejlesztés nem azonos ütemben zajlik. A hálózat fejlesztése jellemzően hosszabb időt vesz igénybe, mint a napelemes rendszerek telepítése, a részletes tervezési - és komplikáltabb kivitelezési

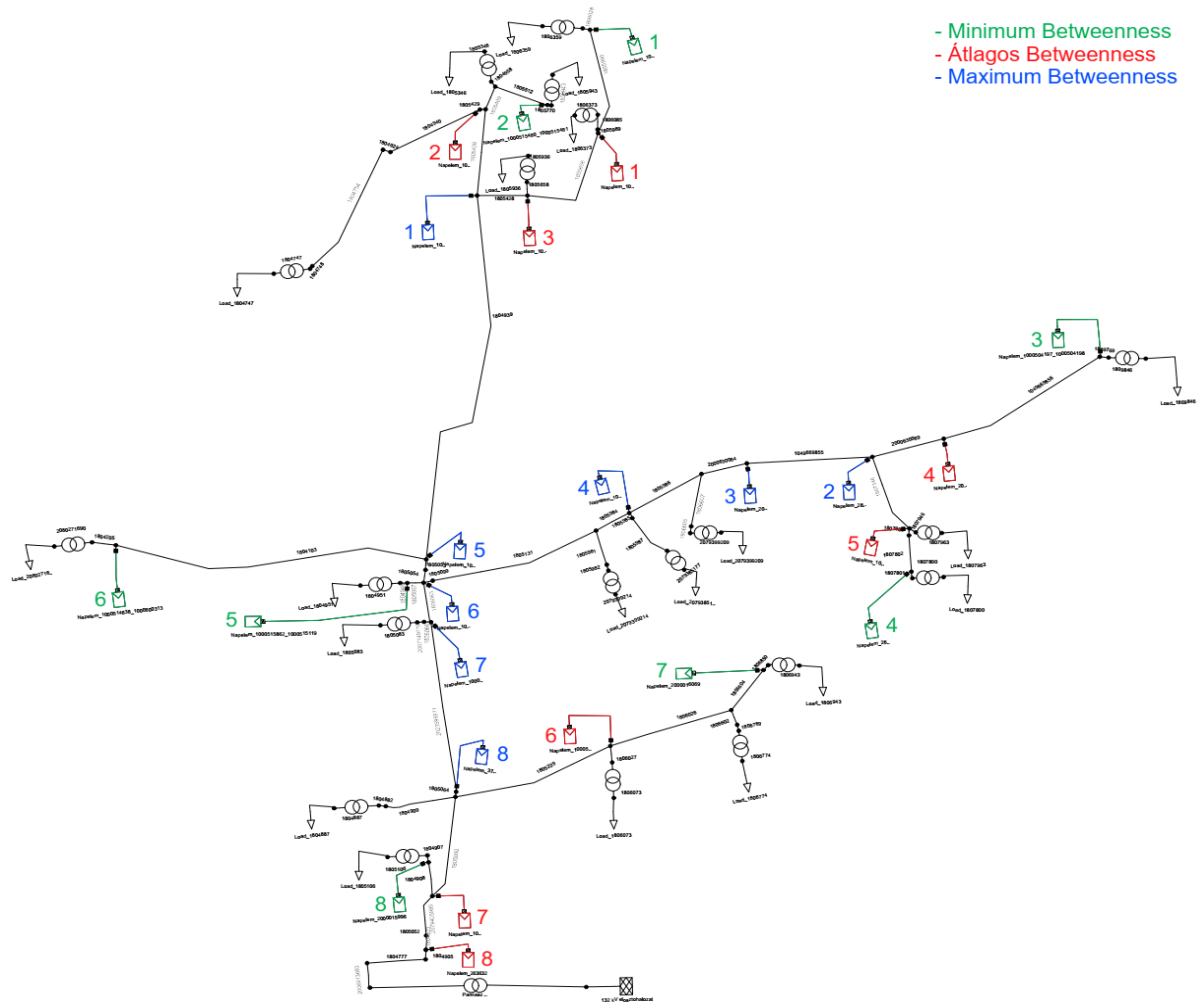
munkák miatt. Ezért a napelemes penetráció növekedését valószínűleg hátráltatni fogja, középtávon abban kisebb megtorpanásra lehet számítani. Ezért a rendelkezésre álló adatpontokat egy 5. rendű polinommal közelítettük. Ennek eredményét mutatja az alábbi 16. ábra.



16. ábra: Elosztóhálózatra csatlakozó fotovillamos penetráció-növekedés előrejelzése

A fenti előrejelzést megvalósító nagy kiterjedésű napelemes rendszerek befogadására a vizsgált KÖF hálózatok közül Klaszter 1, Klaszter 5 és Klaszter 6 mintahálózatai alkalmasak. Szakmai becslés alapján megállapítottuk, hogy ezen típusú ellátóközretekre csatlakozik a beépített KE kapacitás 85%-a. A maradék 15% városi, illetve nagyfogyasztók energiaellátását biztosító hálózatrészekre csatlakozik. A hálózati engedélyesek elosztóközretek adatai alapján kiszámítható, hogy a magyar elosztóhálózaton összesen körülbelül 1300 olyan hálózat van, mely képes fizikailag (terület alapján) is 500 kVA vagy azt meghaladó névleges teljesítményű napelemes KE befogadására. A 2019-es évben üzemelő KE kapacitás (815 MVA) 85%-a 693 MVA volt, ami az említett 1300 hálózaton egyenletesen elosztva 1 db 500 kVA névleges teljesítményű egységnek felel meg. A beépített KE kapacitás 2025-re várhatóan nagyjából 3400 MVA lesz, melyet egyenletesen elosztva a befogadóképes hálózatokon 5 db 500 kVA-es egységet kapunk hálózatonként. Míg 2030-ra kb. 4800 MW napelemes kapacitást kell beépíteni. Ha ez a mennyiség az ellátó közretek között egyenletesen fog eloszlani, akkor az közretekenként nagyjából 4 MW kapacitást jelent, mely 8 db 500 kVA-es egységnek felel meg.

Mind ezek figyelembevételével a választott napelemkiosztási stratégia eredményeképp a Klaszter 1 mintahálózatára az alábbi lehetséges napelemes kiserőmű pozíciók kerültek meghatározásra.



17. ábra: Napelemek elhelyezése

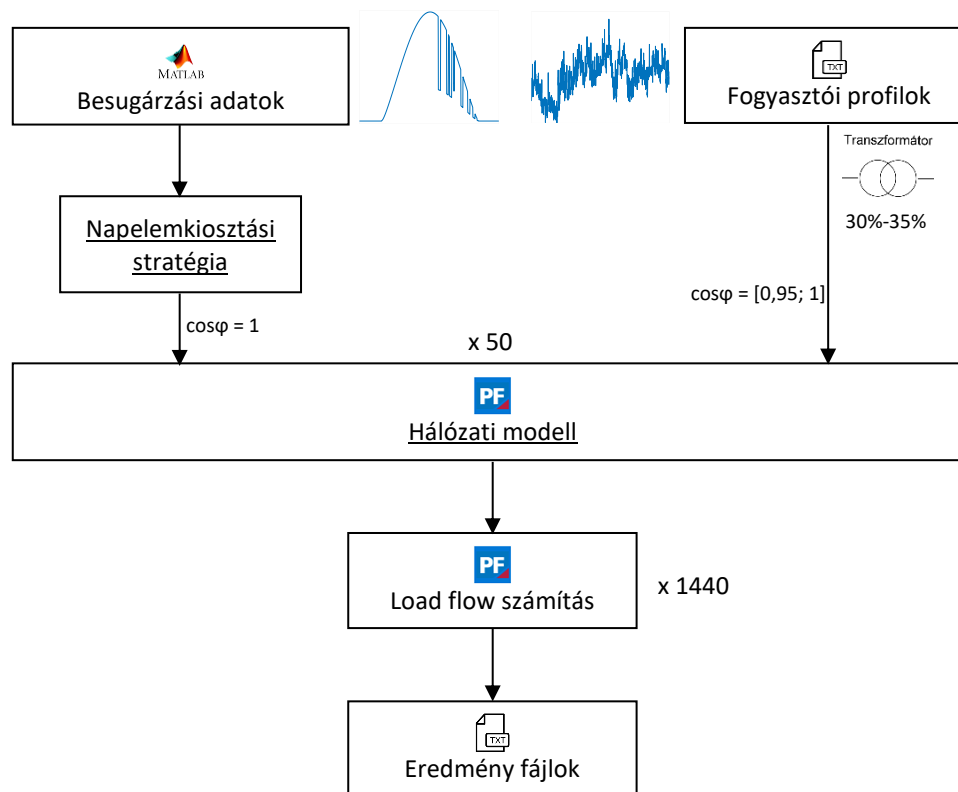
Az fenti 17. ábra jól mutatja a fejezet elején említett három különböző napelem konfigurációt. Az egyes napelempenetrációk különböző csatlakoztatási stratégiákat alkalmazva (Klaszter 1 mintahálózat esetére) a napelem egységek sorrendben történő aktiválásával alakíthatók ki az alábbiak szerint:

- 2019-es állapot: 1 db 500 kVA-es egység (1.), kb. 25%-os napelempenetráció
- 2025-ös állapot: 5 db 500 kVA-es egység (1.-5.), kb. 120%-os napelempenetráció
- 2030-as állapot: 8 db 500 kVA-es egység (1.-8.), kb. 195%-os napelempenetráció

A szimulációk futtatása során az egyes napelem konfigurációk automatikusan kerülnek beállításra a kiválasztott scenáriónak megfelelően.

## 5.5 Szimuláció

A megfelelő besugárzási adatsorok előállításra és az adott esetnek megfelelő konfiguráció beállításra után végre lehet hajtani a szimulációkat. A sztochasztikus szimuláció folyamatát mutatja be az alábbi 18. ábra.



18. ábra: Sztochasztikus szimuláció

A szimuláció végrehajtása során a program először beolvassa a besugárási adatokat, melyek a felhőátvonulás szimuláció eredményeként jöttek létre. Ez után a fogyasztói profilokat olvassa be. Munkám során perces felbontású, valós KIF fogyasztói körzetek egy napos (1440 perc) mérési eredményeivel dolgoztam. A rendelkezésemre álló adatbázis 120 db egynapos normált fogyasztói profilt tartalmazott. Ahhoz, hogy a szimulációs eredményekből valószínűségi eloszlásokat tudjunk képezni, minden esetet többször le kell futtatni különböző paraméterekkel. Ennek érdekében minden egyes scenáriót 50 alkalommal futtattam le.

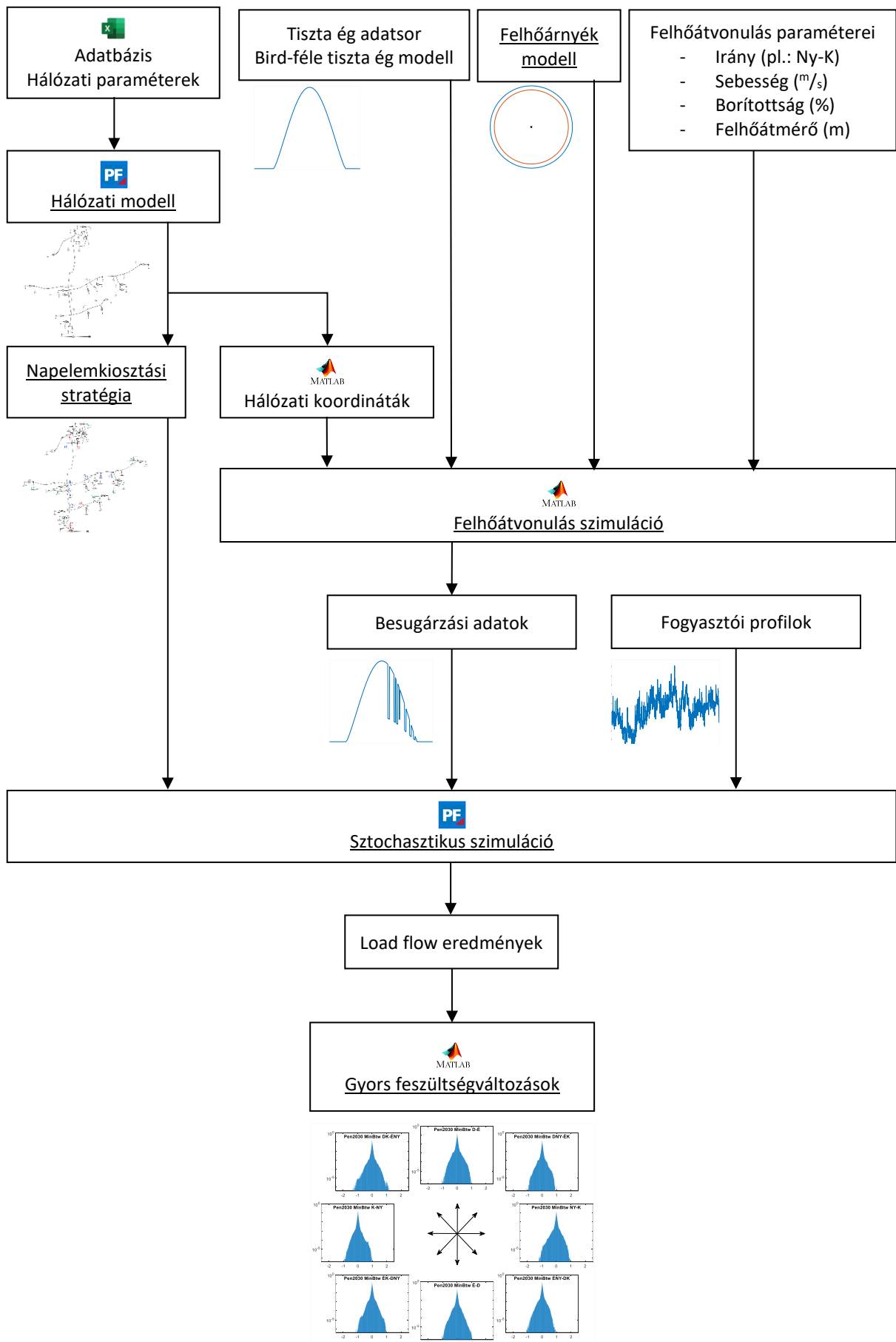
A program az adatok beolvasása után véletlenszerűen választ minden fogyasztóhoz egy fogyasztói profilt és egy teljesítménytényezőt (0,95 – 1 tartományban), valamint meghatározza szintén véletlenszerűen a KÖF/KIF transzformátorok kiterheltségeit. Ez utóbbinak tartománya 30%-35%. Ez az érték megfelelő minden vizsgált évnek (2019-2030), mivel jelenleg Magyarországon a KÖF/KIF transzformátorok jellemzően 30%-os vagy ennél kisebb kiterheltséggel üzemelnek és a jövőben kis mértékű fogyasztásnövekedés várható. A fogyasztók terhelése a fogyasztói profil, a transzformátor névleges teljesítménye, annak kiterheltsége és a teljesítménytényező szorzataként adódik.

A következő lépésben a napelemek termelési profiljai kerülnek átadásra. Minden napelemes egység 500 kVA-es névleges teljesítményű és a jelenlegi magyarországi gyakorlatnak megfelelően 1 értékű teljesítménytényezővel üzemelnek, tehát csak hatásos teljesítményt táplálnak a hálózatba.



## 5.6 A szimulációs keretrendszer használata

A szimulációs keretrendszer használatának menete a következő. Először meg kell építeni a hálózati modellt a rendelkezésre álló adatok alapján. Az adatbázis alapján fel kell paraméterezni a modellt és meg kell adni a vezetékszakaszok irányait. A kiválasztott napelemcsatlakoztatási stratégia szerint a hálózatra kell kapcsolni a napelemeket a kívánt napelempenetrációnak megfelelően. Ez után meg kell határozni a hálózati modell csomópontjainak koordinátáit. Ha ez elkészült, ki kell számítani az egy napos besugárzási görbéket a hálózati modell minden csomópontjára a felhőátvonulás szimuláció segítségével. Ennek bemeneti adatai az átvonulás iránya, annak sebessége, a felhőárnyékok átmérője és a felhőborítottság mértéke. A sztochasztikus szimuláció bemeneteként a kiszámított besugárzási görbék és a fogyasztói profilok szolgálnak. Megadható a végrehajtandó próbák száma és az, hogy a szimulált nap mely szakára (pl.: egész napra, azaz az 1. perctől az 1440. percig.) legyenek elvégezve a számítások. A szimuláció eredményeként megkapjuk a vizsgált időintervallum minden percére a hálózat aktuális állapotát a load flow számításoknak köszönhetően. Az így kapott adatok tetszőleges programmal (pl.: MATLAB) feldolgozhatók, kiértékelhetők. Az itt leírt folyamatot mutatja be a 20. ábra.



20. ábra: Szimulációs keretrendszer használata

## 5.7 Szimulációs keretrendszer tesztelése

A kifejlesztett és előző fejezetekben (5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6) ismertetett szimulációs keretrendszert a Klaszter 1 mintahálózatának segítségével teszteltem. A rendszer működésének ellenőrzésére kilenc scenáriót határoztunk meg, melyek mindegyike további 8 alessel rendelkezik, így összesen 72 szimulációs esetet futtatunk le. A különböző scenáriókat a napelempenetrációk (Pen2019, Pen2025, Pen2030) és a napelemes rendszerek csatlakozási pontjainak (MinBtw, AvgBtw, MaxBtw) kombinációi határozzák meg, melyek a 5.4 fejezetben kerültek részletes bemutatásra. A kilenc fő esetet tartalmazza az alábbi 1. táblázat.

1. táblázat: Szimulációs főesetek

	2019-es napelempenetráció	2025-ös napelempenetráció	2030-as napelempenetráció
Minimális köztiségi értékű csomópontokra csatlakozó napelemek	<a href="#">Pen2019 MinBtw</a>	<a href="#">Pen2025 MinBtw</a>	<a href="#">Pen2030 MinBtw</a>
Átlagos köztiségi értékű csomópontokra csatlakozó napelemek	<a href="#">Pen2019 AvgBtw</a>	<a href="#">Pen2025 AvgBtw</a>	<a href="#">Pen2030 AvgBtw</a>
Maximális köztiségi értékű csomópontokra csatlakozó napelemek	<a href="#">Pen2019 MaxBtw</a>	<a href="#">Pen2025 MaxBtw</a>	<a href="#">Pen2030 MaxBtw</a>

Az a eseteket a szimulált felhőátvonulás irányának változtatásával (NY-K, DNY-ÉK, D-É, DK-ÉNY, K-NY, ÉK-DNY, É-D, ÉNY-DK) határoztuk meg. Ezen a esetek korábban meghatározott (13. ábra) paramétereit tartalmazza az alábbi 2. táblázat.

2. táblázat: Felhőátvonulások paramétereit

Felhőátvonulás		
Irány	Valószínűség	Sebesség [m/s]
NY-K	14%	7,80
DNY-ÉK	10%	8,00
D-É	16%	6,79
DK-ÉNY	8%	5,54
K-NY	8%	5,25
ÉK-DNY	7%	7,94
É-D	17%	7,38
ÉNY-DK	21%	8,13

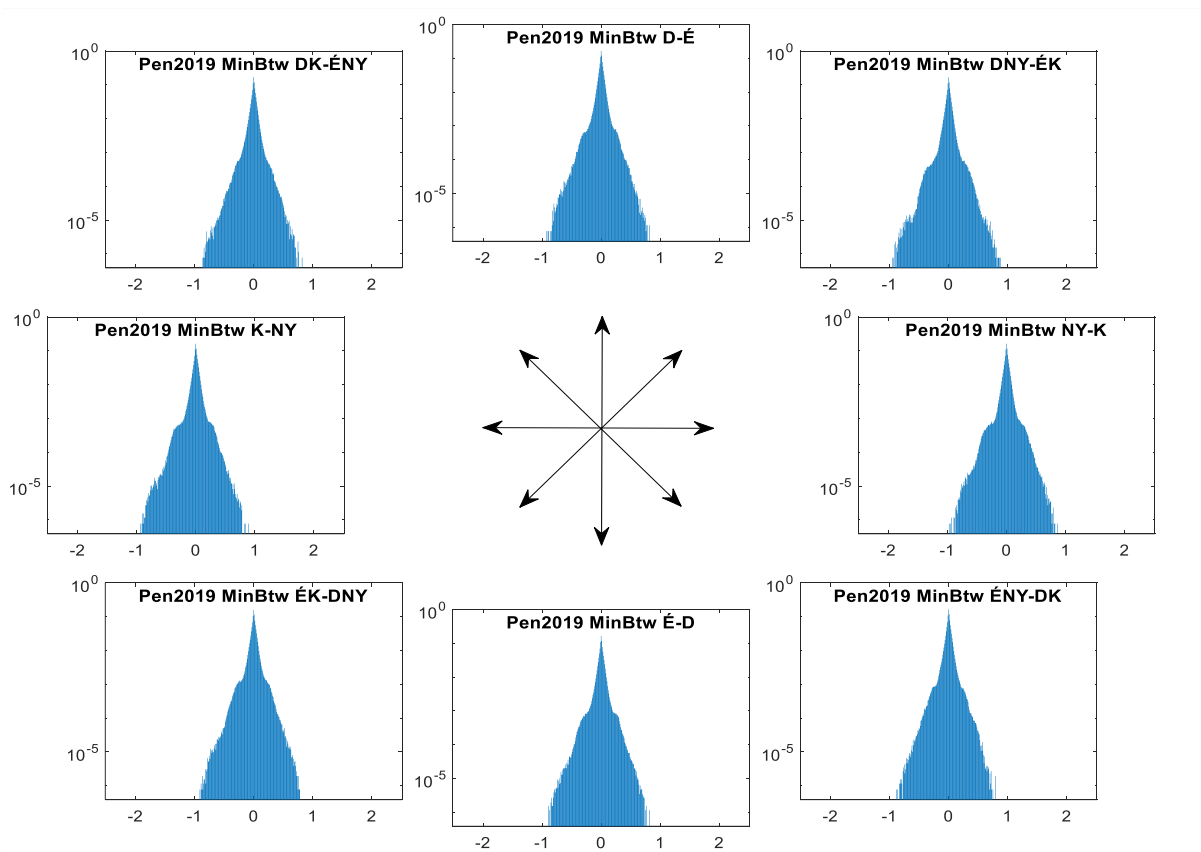


Az a esetek eredményeként kapott maximális gyors feszültségváltozásokat azok előfordulási valószínűségével súlyoztam. Így kaptam meg a főesetekre vonatkozó kumulált értékeket, melyek az MSZ EN 50160:2011 szabvány szerint nem haladhatják meg a 2%-ot (3.3 fejezet). Meghatároztam továbbá a gyors feszültségváltozások eloszlását a különböző irányú felhőátvonulások eseteire.

Minden scenárió futtatásához 650 m-es (az kumulusz típusú felhők esetén előforduló átmérők középértéke) felhőátmérőt és az adott felhőátvonulási iránynak megfelelő átvonulási sebességet állítottam be. A felhőborítottság mértékét alapértelmezett értékűnek, 25%-nak vettem. A továbbiakban ezen szimulációs eredmények kerülnek bemutatásra. Minden scenáriót egész napra (1440 perc) vizsgáltam és 50 alkalommal futtattam le.

### 5.7.1 Pen2019 MinBtw

Az első esetben azt vizsgáltam, mekkora gyors feszültségváltozások alakulnak ki a hálózaton minimális mapelempenetráció (2019-es állapot) esetén a napelemes termelőegység (1 db) minimális köztiségi értékű csomópontra csatlakoztatásával. A szimuláció eredményeit a 21. ábra mutatja be, melyen a különböző irányú és sebességű felhőátvonulások okozta gyors feszültségváltozások láthatók. A vízszintes tengelyek a gyors feszültségváltozások mértékét, a függőleges tengelyek pedig ezek előfordulását (%) mutatják.



21. ábra: Pen2019 MinBtw eset gyors feszültségváltozás eloszlása felhőátvonulás irányonként

A fenti ábra alapján jól megfigyelhető, hogy a gyors feszültségváltozások 1,25%-os értéken belül maradtak minden esetben. Ezek abszolút értékeinek maximumait foglalja össze az alábbi 3. táblázat.

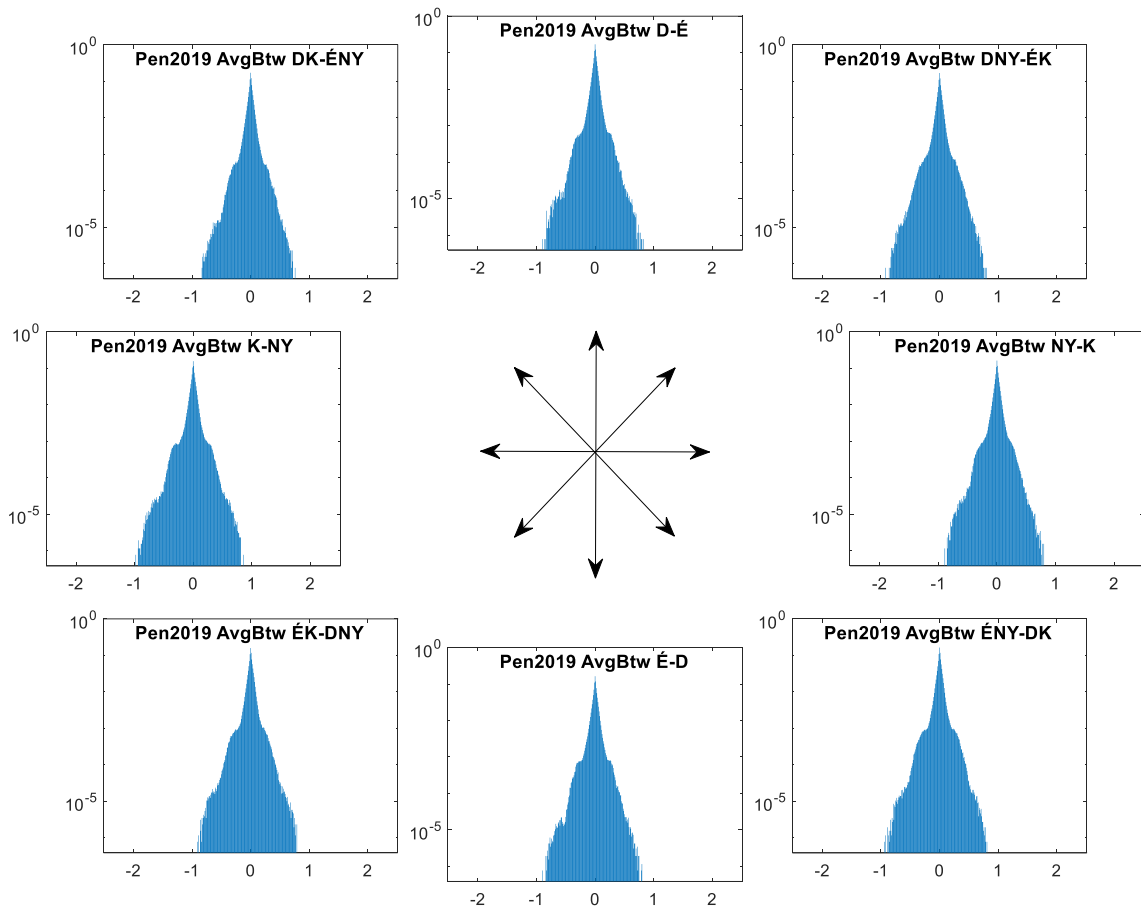
**3. táblázat: Pen2019 MinBtw eset maximális gyors feszültségváltozások**

Pen2019 MinBtw	
Felhőátvonulás iránya	Maximális gyors feszültségváltozás
NY-K	0,97%
DNY-ÉK	0,97%
D-É	1,04%
DK-ÉNY	1,10%
K-NY	1,25%
ÉK-DNY	0,98%
É-D	1,00%
ÉNY-DK	1,07%
<b>Kumulált érték</b>	<b>1,04%</b>

Tehát az első esetben a maximális gyors feszültségváltozás 1,04% értékűnek tekinthető. Ez az érték teljes mértékben megfelel a vonatkozó szabványok előírásainak.

### 5.7.2 Pen2019 AvgBtw

A második esetben azt vizsgáltam, hogy mekkora gyors feszültségváltozások alakulnak ki a hálózaton minimális napelempenetráció esetén a napelemes termelőegység (1 db) átlagos köztiségi értékű csomópontra csatlakoztatásával. A szimuláció eredményeit az alábbi 22. ábra foglalja össze.



22. ábra: Pen2019 AvgBtw eset gyors feszültségváltozás eloszlása felhőátvonulás irányonként

A fenti ábra alapján jól megfigyelhető, hogy a gyors feszültségváltozások minden esetben 1,14%-os értéken belül maradtak. Ezek abszolút értékeinek maximumait foglalja össze az alábbi 4. táblázat.

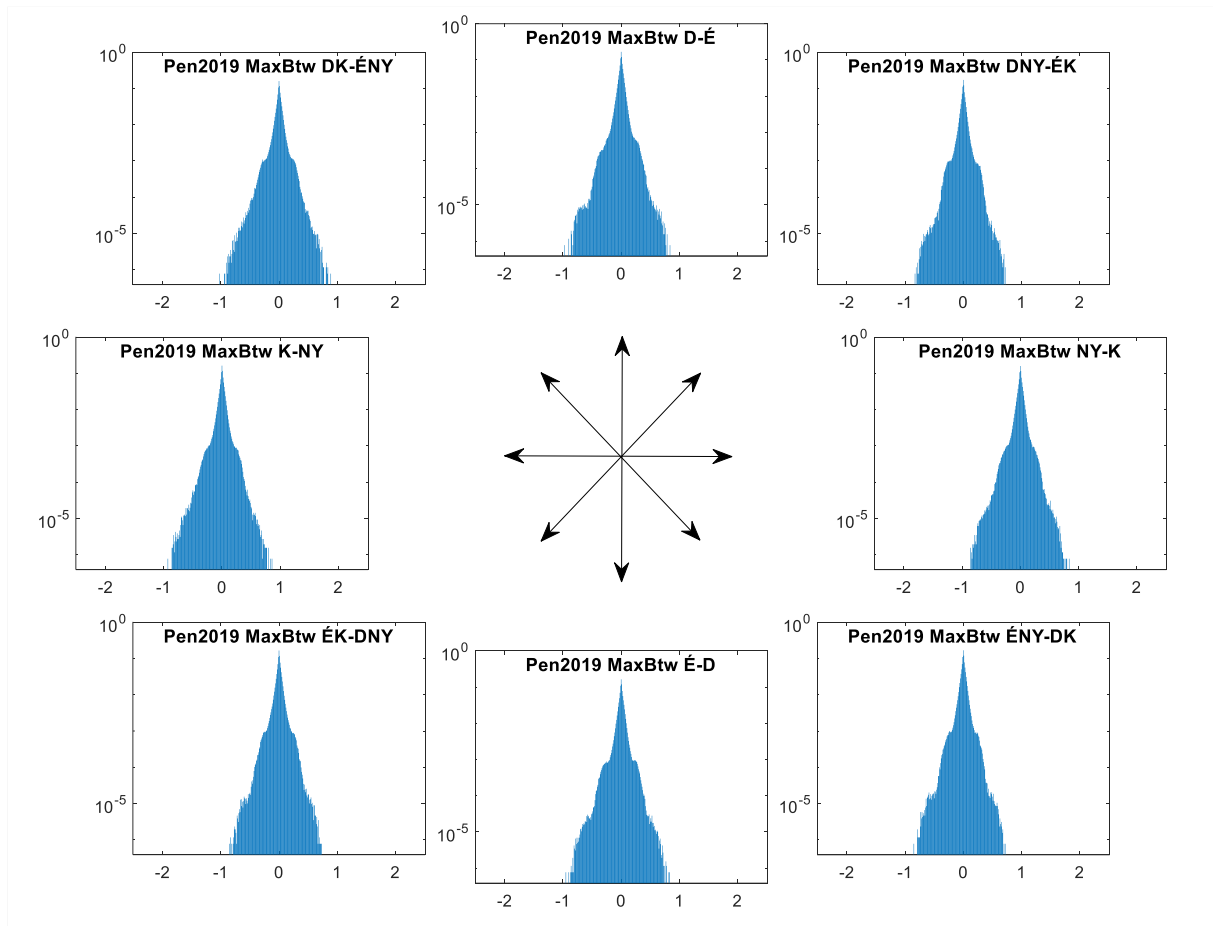
4. táblázat: Pen2019 AvgBtw eset maximális gyors feszültségváltozások

Pen2019 AvgBtw	
Felhőátvonulás iránya	Maximális gyors feszültségváltozás
NY-K	1,14%
DNY-ÉK	0,99%
D-É	0,96%
DK-ÉNY	0,84%
K-NY	0,98%
ÉK-DNY	1,11%
É-D	0,93%
ÉNY-DK	0,96%
<b>Kumulált érték</b>	<b>0,98%</b>

Tehát a második esetben a maximális gyors feszültségváltozás 0,98% volt. Ez az érték szintén teljesen megfelel a vonatkozó szabványok előírásainak.

### 5.7.3 Pen2019 MaxBtw

A harmadik esetben azt vizsgáltam, hogy mekkora gyors feszültségváltozások alakulnak ki a hálózaton minimális napelempenetráció esetén a napelemes termelőegység (1 db) maximális köztiségi értékű csomópontra csatlakoztatásával. Az eredményeket a 23. ábra foglalja össze.



**23. ábra: Pen2019 MaxBtw eset gyors feszültségváltozás eloszlása felhőátvonulás irányonként**

A fenti ábra alapján jól megfigyelhető, hogy a gyors feszültségváltozások 1,15%-os értéken belül maradtak minden esetben. Ezek abszolút értékeinek maximumait foglalja össze az 5. táblázat.

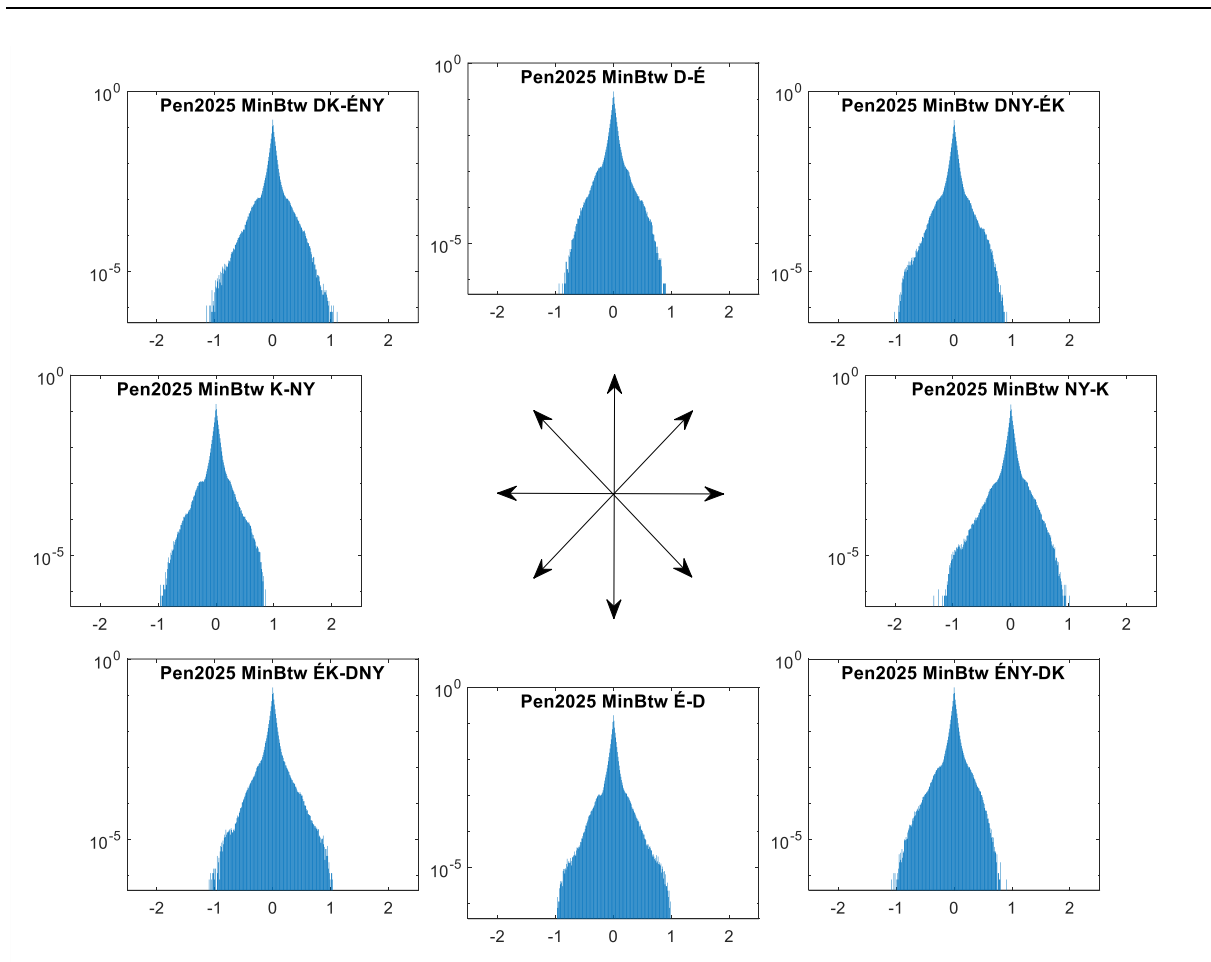
5. táblázat: Pen2019 MaxBtw eset maximális gyors feszültségváltozások

Pen2019 MaxBtw	
Felhőátvonulás iránya	Maximális gyors feszültségváltozás
NY-K	0,98%
DNY-ÉK	0,96%
D-É	1,11%
DK-ÉNY	1,06%
K-NY	0,96%
ÉK-DNY	0,85%
É-D	1,15%
ÉNY-DK	0,98%
<b>Kumulált érték</b>	<b>1,02%</b>

Tehát a harmadik esetben a maximális gyors feszültségváltozás 1,02% volt. Ez az érték szintén megfelel a vonatkozó szabványok előírásainak.

#### 5.7.4 Pen2025 MinBtw

A negyedik esetben azt vizsgáltam, hogy mekkora feszültségugrások alakulnak ki a hálózaton közepes napelempenetráció (2025-ös állapot) esetén a napelemes termelőegységek (5 db) minimális köztiségi értékű csomópontokra csatlakoztatásával. Az eredményeket a 24. ábra foglalja össze.



24. ábra: Pen2025 MinBtw eset gyors feszültségváltozás eloszlása felhőátvonulás irányonként

A fenti ábra alapján jól megfigyelhető, hogy a gyors feszültségváltozások többnyire 1%-os értéken belül maradtak, azonban előfordult olyan eset, melyben a 1,5%-ot is megközelítették. Ezek abszolút értékeinek maximumait foglalja össze az alábbi 6. táblázat.

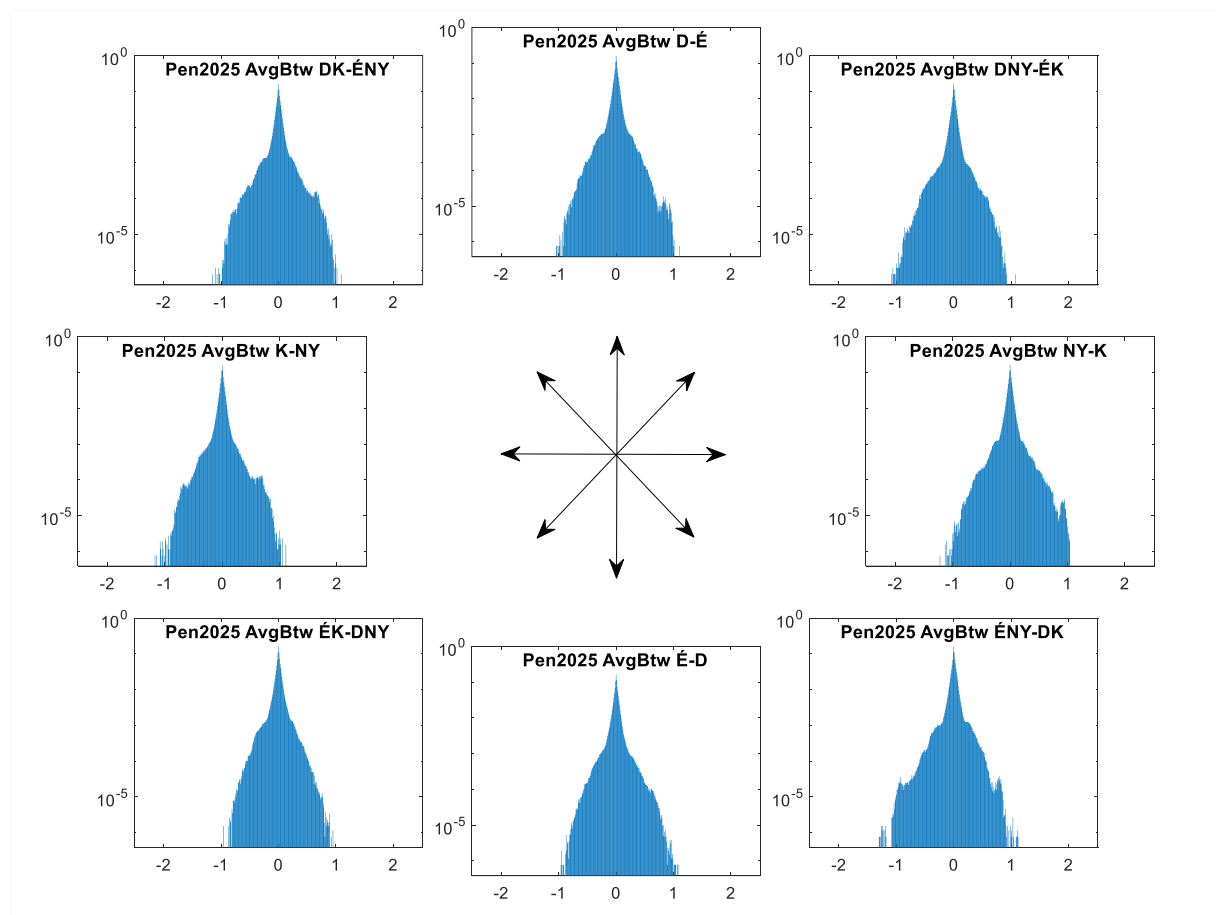
6. táblázat: Pen2025 MinBtw eset maximális gyors feszültségváltozások

Pen2025 MinBtw	
Felhőátvonulás iránya	Maximális gyors feszültségváltozás
NY-K	<b>1,47%</b>
DNY-ÉK	1,16%
D-É	0,95%
DK-ÉNY	1,36%
K-NY	1,08%
ÉK-DNY	1,13%
É-D	1,12%
ÉNY-DK	1,16%
<b>Kumulált érték</b>	<b>1,17%</b>

Tehát a negyedik esetben a maximális gyors feszültségváltozás 1,17% volt. Megfigyelhető azonban a fenti táblázatban, hogy az esetekben tapasztalt legnagyobb érték 1,47% volt, NY-K felhőátvonulás esetén (pirossal jelölve). Ez egyben a vizsgálatok során előforduló legnagyobb maximális gyors feszültségváltozás is. Ezen eset előfordulási valószínűsége azonban mindössze 14%, ezért nem mutatkozik meg érdemben az összesített eredményben. Még az itt tapasztalható legnagyobb érték is teljes mértékben megfelel a vonatkozó szabványok előírásainak.

### 5.7.5 Pen2025 AvgBtw

Az ötödik esetben azt vizsgáltam, hogy mekkora gyors feszültségváltozások alakulnak ki a hálózaton közepes napelempenetráció esetén a napelemes termelőegységek (5 db) átlagos köztiségi értékű csomópontokra csatlakoztatásával. A szimuláció eredményeit az alábbi 25. ábra foglalja össze.



**25. ábra: Pen2025 AvgBtw eset gyors feszültségváltozás eloszlása felhőátvonulás irányonként**

A fenti ábra alapján jól megfigyelhető, hogy a gyors feszültségváltozások minden esetben 1,3%-os értéken belül maradtak. Ezek abszolút értékeinek maximumait foglalja össze az alábbi 7. táblázat.

7. táblázat: Pen2025 AvgBtw eset maximális gyors feszültségváltozások

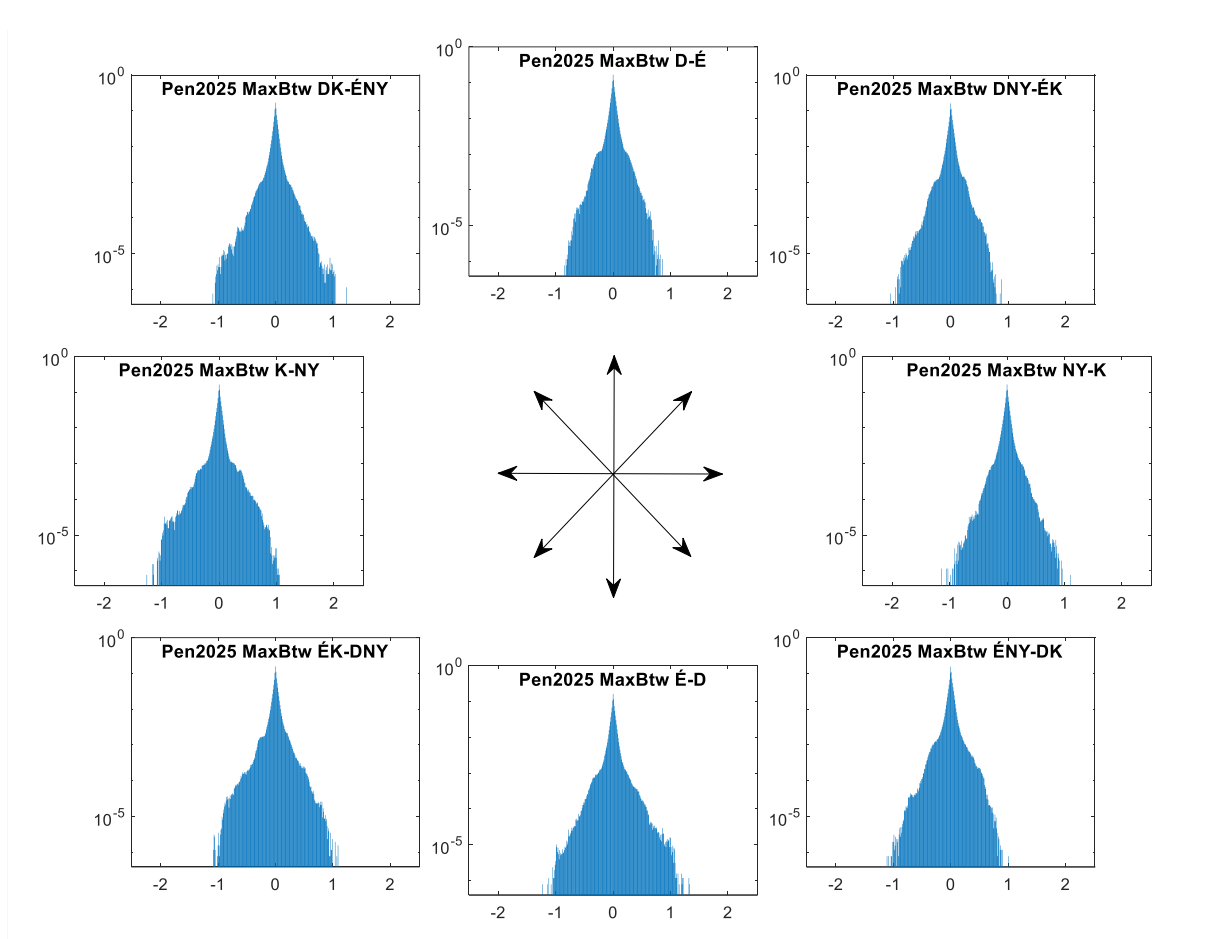
Pen2025 AvgBtw	
Felhőátvonulás iránya	Maximális gyors feszültségváltozás
NY-K	1,22%
DNY-ÉK	1,15%
D-É	1,19%
DK-ÉNY	1,16%
K-NY	1,17%
ÉK-DNY	1,02%
É-D	1,08%
ÉNY-DK	1,30%
<b>Kumulált érték</b>	<b>1,18%</b>

Tehát az ötödik esetben a maximális gyors feszültségváltozás 1,18% volt. Ez az érték szintén teljesen megfelel a vonatkozó szabványok előírásainak.

#### 5.7.6 Pen2025 MaxBtw

A hatodik esetben azt vizsgáltam, hogy mekkora gyors feszültségváltozások alakulnak ki a hálózaton közepes napelempenetráció esetén a napelemes termelőegységek (5 db) maximális köztiségi értékű csomópontokra csatlakoztatásával. A szimuláció eredményeit az alábbi 26. ábra foglalja össze.





26. ábra: Pen2025 MaxBtw eset gyors feszültségváltozás eloszlása felhőátvonulás irányonként

A fenti ábra alapján jól megfigyelhető, hogy a gyors feszültségváltozások 1,33%-os értéken belül maradtak minden esetben. Ezek abszolút értékeinek maximumait foglalja össze az alábbi 8. táblázat.

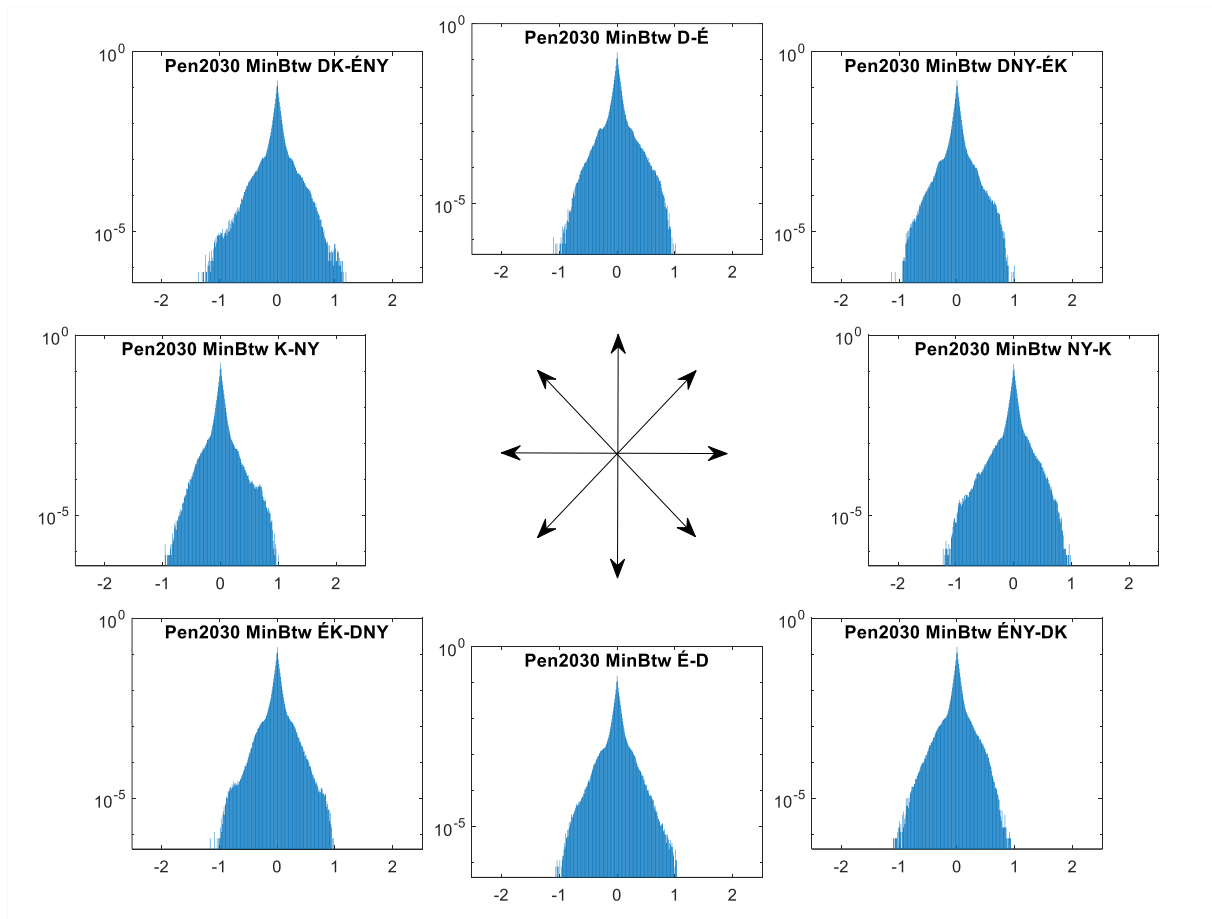
8. táblázat: Pen2025 MaxBtw eset maximális gyors feszültségváltozások

Pen2025 MaxBtw	
Felhőátvonulás iránya	Maximális gyors feszültségváltozás
NY-K	1,14%
DNY-ÉK	1,06%
D-É	0,94%
DK-ÉNY	1,24%
K-NY	1,26%
ÉK-DNY	1,09%
É-D	1,33%
ÉNY-DK	1,25%
<b>Kumulált érték</b>	<b>1,17%</b>

Tehát a hatodik esetben a maximális gyors feszültségváltozás 1,17% volt. Ez az érték szintén megfelel a vonatkozó szabványok előírásainak.

### 5.7.7 Pen2030 MinBtw

A hetedik esetben azt vizsgáltam, hogy mekkora gyors feszültségváltozások alakulnak ki a hálózaton maximális napelempenetráció (2030-as állapot) esetén a napelemes termelőegységek (8 db) minimális köztiségi értékű csomópontokra csatlakoztatásával. Az eredményeket a 27. ábra foglalja össze.



**27. ábra: Pen2030 MinBtw eset gyors feszültségváltozás eloszlása felhőátvonulás irányonként**

A fenti ábra alapján jól megfigyelhető, hogy a gyors feszültségváltozások minden esetben 1,36%-os értéken belül maradtak. Ezek abszolút értékeinek maximumait foglalja össze az alábbi 9. táblázat.

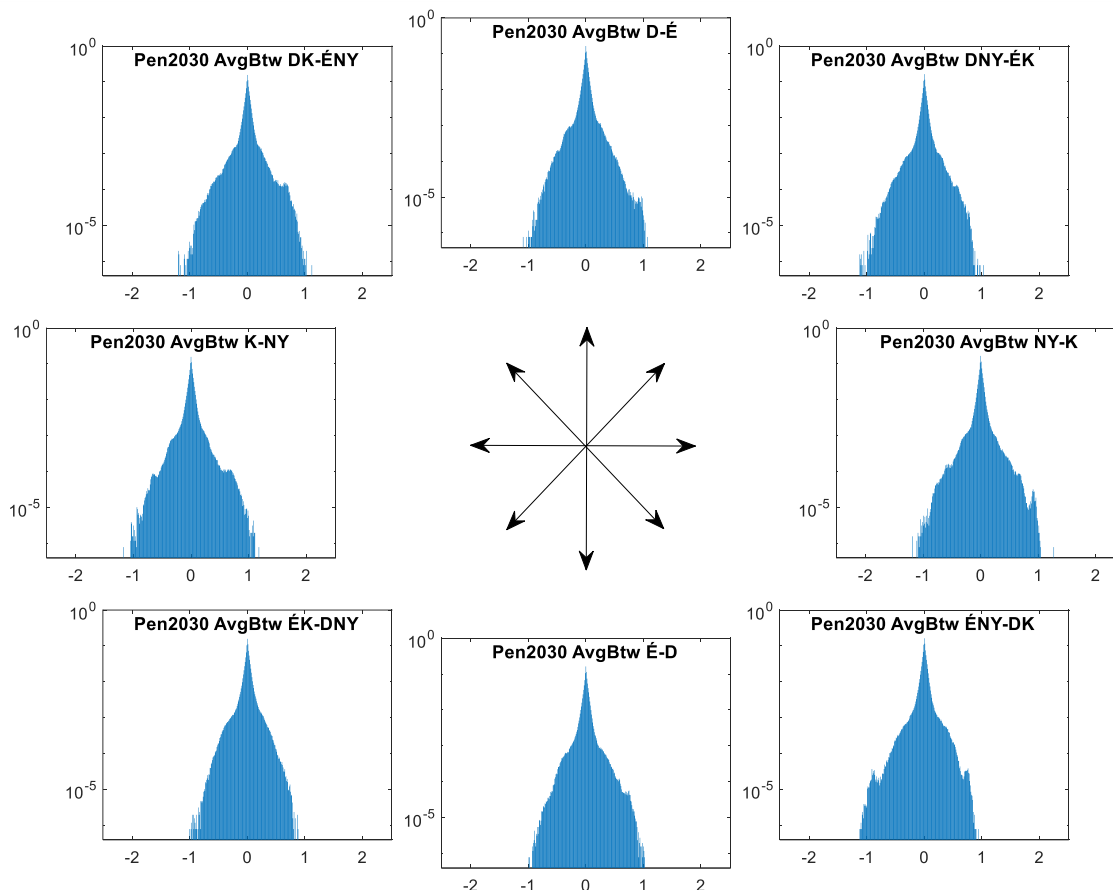
9. táblázat: Pen2030 MinBtw eset maximális gyors feszültségváltozások

Pen2030 MinBtw	
Felhőátvonulás iránya	Maximális gyors feszültségváltozás
NY-K	1,28%
DNY-ÉK	1,25%
D-É	1,17%
DK-ÉNY	1,36%
K-NY	1,22%
ÉK-DNY	1,19%
É-D	1,22%
ÉNY-DK	1,33%
<b>Kumulált érték</b>	<b>1,26%</b>

Tehát a hetedik esetben a maximális gyors feszültségváltozás 1,26% volt. Vizsgálataim során ez volt a legnagyobb kumulált érték, amit tapasztaltam, ezért jelöltem piros színnel a fenti táblázatban. Még ez az érték is teljes mértékben megfelel a vonatkozó szabványok előírásainak.

#### 5.7.8 Pen2030 AvgBtw

A nyolcadik esetben azt vizsgáltam, hogy mekkora gyors feszültségváltozások alakulnak ki a hálózaton maximális napelempenetráció esetén a napelemes termelőegységek (8 db) átlagos köztiségi értékű csomópontokra csatlakoztatásával. Az eredményeket a 28. ábra foglalja össze.



28. ábra: Pen2030 AvgBtw eset gyors feszültségváltozás eloszlása felhőátvonulás irányonként

A fenti ábra alapján jól megfigyelhető, hogy a gyors feszültségváltozások 1,27%-os értéken belül maradtak minden esetben. Ezek abszolút értékeinek maximumait foglalja össze az alábbi 10. táblázat.

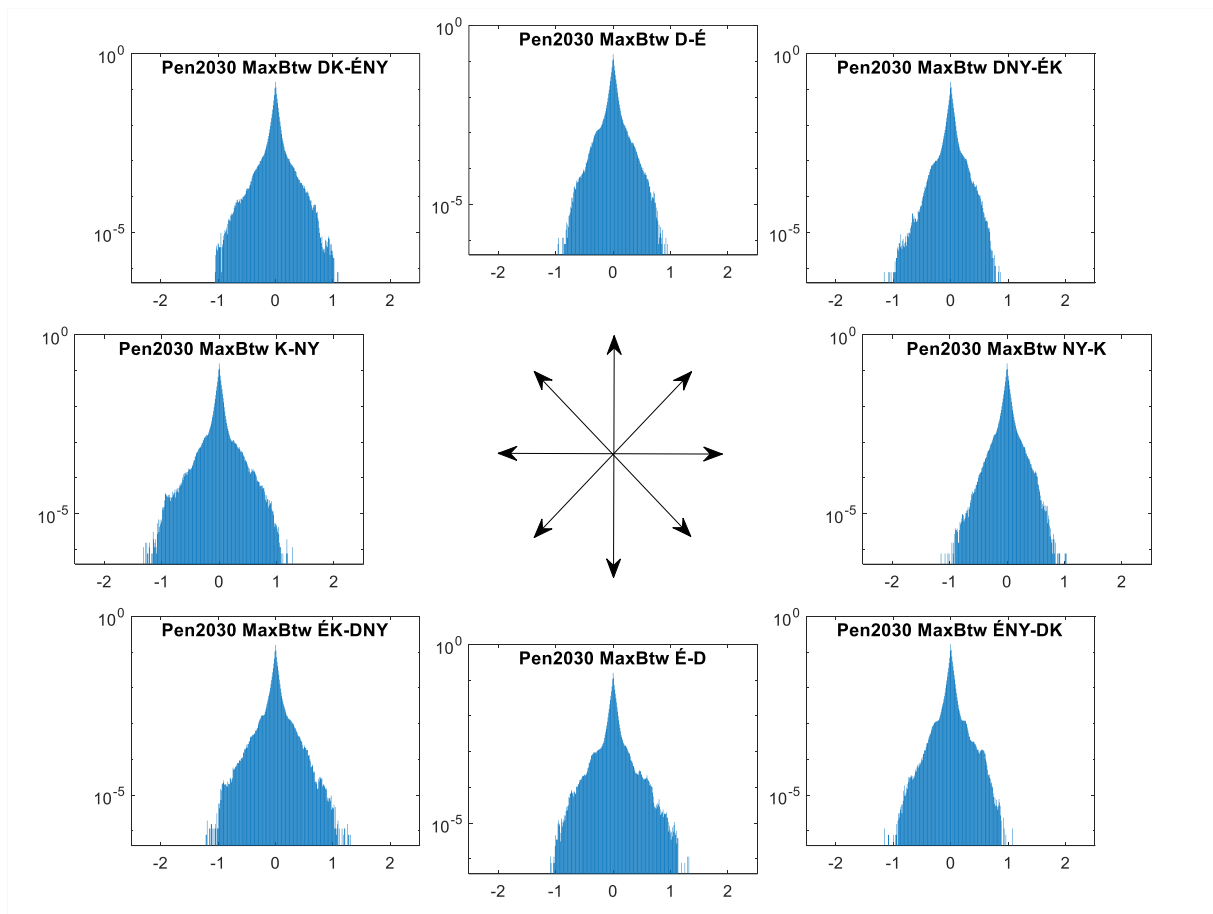
10. táblázat: Pen2030 AvgBtw eset maximális gyors feszültségváltozások

Pen2030 AvgBtw	
Felhőátvonulás iránya	Maximális gyors feszültségváltozás
NY-K	1,27%
DNY-ÉK	1,16%
D-É	1,09%
DK-ÉNY	1,20%
K-NY	1,22%
ÉK-DNY	1,10%
É-D	1,11%
ÉNY-DK	1,13%
<b>Kumulált érték</b>	<b>1,15%</b>

Tehát a nyolcadik esetben a maximális gyors feszültségváltozás 1,15% volt. Ez az érték szintén teljesen megfelel a vonatkozó szabványok előírásainak.

### 5.7.9 Pen2030 MaxBtw

Az utolsó, kilencedik esetben azt vizsgáltam, hogy mekkora gyors feszültségváltozások alakulnak ki a hálózaton maximális napelempenetráció esetén a napelemes termelőegységek (8 db) maximális köztiségi értékű csomópontokra csatlakoztatásával. Az eredményeket a 29. ábra foglalja össze.



**29. ábra: Pen2030 MaxBtw eset gyors feszültségváltozás eloszlása felhőátvonulás irányonként**

A fenti ábra alapján jól megfigyelhető, hogy a gyors feszültségváltozások minden esetben 1,33%-os értéken belül maradtak. Ezek abszolút értékeinek maximumait foglalja össze az alábbi 11. táblázat.

**11. táblázat: Pen2030 MaxBtw eset maximális gyors feszültségváltozások**

Pen2030 MaxBtw	
Felhőátvonulás iránya	Maximális gyors feszültségváltozás
NY-K	1,15%
DNY-ÉK	1,17%
D-É	1,03%
DK-ÉNY	1,11%
K-NY	1,32%
ÉK-DNY	1,33%
É-D	1,32%
ÉNY-DK	1,15%
<b>Kumulált érték</b>	<b>1,18%</b>

Tehát a kilencedik estben a maximális gyors feszültségváltozás 1,18% volt. Ez az érték szintén megfelel a vonatkozó szabványok előírásainak.

A fent ismertetett szimulációs esetek egyikében sem történt 2%-nál nagyobb gyors feszültségváltozás, tehát a Klaszter 1 mintahálózat és ahhoz hasonló hálózatok képesek ilyen mértékű napelem penetráció befogadására és mindemellett a vonatkozó szabványoknak megfelelő üzemre.

#### 5.7.10 Értékelés

A fenti eredmények tükrében elmondható, hogy a szimulációs keretrendszer megfelelően működik, annak segítségével érdemi vizsgálatok végezhetőek. Az vizsgált esetekben előforduló maximális gyors feszültségváltozások értékeit tartalmazza a 12. táblázat.

**12. táblázat: Maximális gyors feszültségváltozások**

Szenárió	Maximális gyors feszültségváltozás
Pen2019 MinBtw	1.04%
Pen2019 AvgBtw	0.98%
Pen2019 MaxBtw	1.02%
Pen2025 MinBtw	1.17%
Pen2025 AvgBtw	1.18%
Pen2025 MaxBtw	1.17%
Pen2030 MinBtw	<b>1.26%</b>
Pen2030 AvgBtw	1.15%
Pen2030 MaxBtw	1.18%

A szimuláció eredmények kiértékelése alapján megállapítható a kiválasztott hálózat esetén az adott napelempenetráció megvalósíthatósága, a vonatkozó szabványok betartása mellett. Ezt támasztja alá

a fenti táblázat, mely alapján látható, hogy egyik vizsgált esetben sem tapasztaltam 2%-nál nagyobb mértékű gyors feszültségváltozást. Összességében tehát a kifejlesztett szimulációs keretrendszer működőképes és jól alkalmazható.

## 5.8 Érzékenység vizsgálat

A sikeres tesztelés után megvizsgáltam, hogy hogyan reagál a szimulációs keretrendszer a felhőátvonulás paramétereinek változtatására. A fent ismertetett főesetek közül az választottam, amelynél a napelempenetráció maximális és a napelemes rendszerek a hálózat minimális köztiségi értékekkel rendelkező csomópontjaira csatlakoznak (Pen2030 MinBtw). Azért ezt választottam, mert ebben az esetben volt megfigyelhető a legnagyobb gyors feszültségváltozás. Ennek az esetnek azzal az a esetével foglalkoztam, mely során a hálózat felett északnyugatról délkelet felé halad a felhőzet, mivel a felhőátvonulások közül ennek a legnagyobb a valószínűsége (a rendelkezésemre álló statisztikai adatok alapján). A kiválasztott esetben (Pen2030 MinBtw ÉNY-DK) a felhőátmérő és a felhőátvonulás-sebesség változtatásának hatását vizsgáltam. Minden más paramétert a korábbi szimulációs esetek beállításával megegyezően hagytam. Az különböző eseteket tízszer futtattam le. Ezek eredményei kerülnek ismertetésre az alábbiakban.

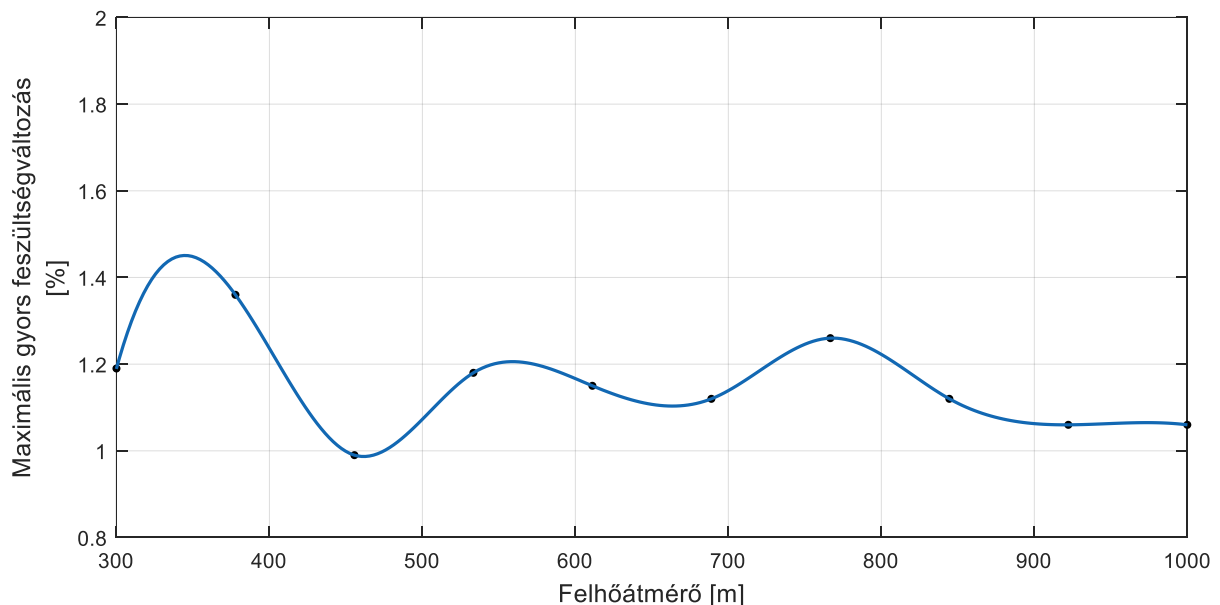
### 5.8.1 Érzékenység az felhőátmérőre

Statisztikai adatok alapján [13] kumulusz típusú felhők átmérője 300 m és 1000 m közötti tartományban váltakozik. Vizsgálataim során ezt a tartományt tíz egyenlő részre osztottam fel és minden értékkel elvégeztem a szimulációt változatlan felhőátvonulás-sebesség mellett. Ennek eredményét tartalmazza az alábbi 13. táblázat

13. táblázat: Érzékenység az felhőátmérőre maximális gyors feszültségváltozások

Pen2030 MinBtw ÉNY-DK		
Felhőátmérő [m]	Sebesség [m/s]	Maximális gyors feszültségváltozás
300	8,13	1,19%
377,8	8,13	<b>1,36%</b>
455,6	8,13	0,99%
533,3	8,13	1,18%
611,1	8,13	1,15%
688,9	8,13	1,12%
766,7	8,13	<b>1,26%</b>
844,4	8,13	1,12%
922,2	8,13	1,06%
1000	8,13	1,06%

A szimuláció eredményei alapján nem fedezhető fel egyértelmű összefüggés a felhőátmérő mérete és a maximális gyors feszültségváltozás maximális mértéke között. A táblázatban pirossal jelöltem azokat az értékeket, melyek az alapbeállítások esetén, ennél a scenáriónál (Pen2030 MinBtw) tapasztalt maximális gyors feszültségváltozással megegyező vagy azt meghaladó mértékűek. Ez két esetben fordult elő, 377,8 méteres és 766.7 méteres felhőátmérő alkalmazásakor. Az eredményként kapott adatpontokat MATLAB program segítségével interpoláltam. Kétszeres interpoláció alkalmazásával született a 30. ábra.



**30. ábra: Érzékenység az felhőátmérőre: maximális gyors feszültségváltozások**

A fenti ábra alapján a gyors feszültségváltozás és a felhőátmérő közötti összefüggés két határérték közötti váltakozó jelleget mutat. Ez kissé eltér az elvártaktól. Azt feltételeztük, hogy állandó haladási sebesség mellett a felhőátmérő növekedése a maximális gyors feszültségváltozás növekedését fogja okozni, mivel egyszerre több napelem árnyékoltsága változhat meg a nagyobb területű árnyékok hatására. Az előfeltevés és az eredmények közötti eltérés a napelemes rendszerek elhelyezkedése okozhatja, mivel azok viszonylag decentralizáltan oszlanak el a hálózaton, nem pedig centralizáltak.

### 5.8.2 Érzékenység felhőátvonulás sebességére

A rendelkezésemre álló historikus szélesség adatok alapján megállapítható, hogy a mérés magasságában (2000 m) a szélesség  $0,5 \text{ m/s}$  és  $18,5 \text{ m/s}$  közötti értékeket vesz fel. Ez a tartományt tíz egyenlő részre osztottam fel és a felhőméret, valamint a többi paraméter változatlansága mellett elvégeztem a szimulációkat. Az eredményekben a többihez képest kiugróan magas érték mutatkozott  $10,5 \text{ m/s}$  esetén, ezért szükségét éreztük a kérdéses tartomány részletesebb vizsgálatának. Így a  $8,5 \text{ m/s}$  és  $12,5 \text{ m/s}$  közötti tartományt  $0,5 \text{ m/s}$  felbontással ismét megvizsgáltam. Ezeket az eredményeket

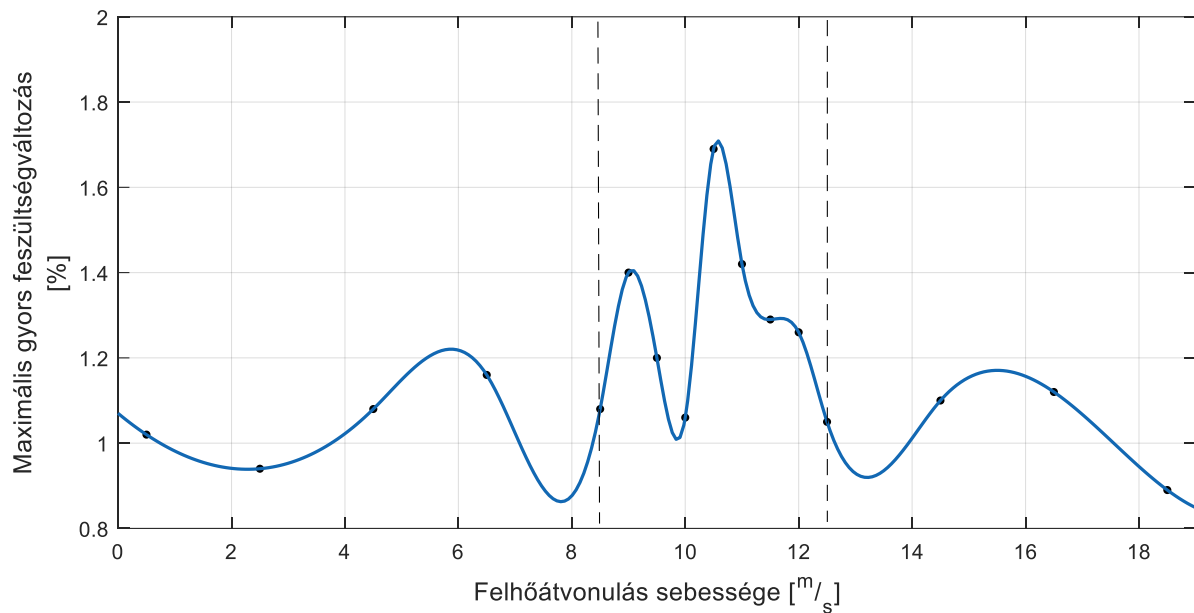


tartalmazza az alábbi 14. táblázat, melyben a részletesebb felbontással végzett vizsgálatok eredményeit szaggatott vonallal jeleztem.

**14. táblázat: Érzékenység felhőzet felhőátvonulás sebességre maximális gyors feszültségváltozások**

Pen2030 MinBtw ÉNY-DK		
Sebesség [m/s]	Felhőátmérő [m]	Maximális gyors feszültségváltozás
0,5	650	1,02%
2,5	650	0,94%
4,5	650	1,08%
6,5	650	1,16%
8,5	650	1,08%
9	650	<b>1,40%</b>
9,5	650	1,20%
10	650	1,06%
10,5	650	<b>1,69%</b>
11	650	<b>1,42%</b>
11,5	650	<b>1,29%</b>
12	650	<b>1,26%</b>
12,5	650	1,05%
14,5	650	1,10%
16,5	650	1,12%
18,5	650	0,89%

A szimuláció eredményei alapján ez esetben sem fedezhető fel egyértelmű összefüggés a felhőátvonulás sebessége és a gyors feszültségváltozások maximális értékei között. A táblázatban pirossal jelöltem azokat az értékeket, melyek az alapbeállítások esetén, ennél a scenáriónál (Pen2030 MinBtw) tapasztalt maximális gyors feszültségváltozással megegyező vagy azt meghaladó mértékűek. A felhőátvonulás sebességének változtatása során öt ilyen eset fordult elő, mind a részletesebben vizsgált tartományban (8,5 m/s - 12,5 m/s). Az eredményeket az előző esethez hasonló módon interpolálva adódik az alábbi 31. ábra.



**31. ábra: Érzékenység felhőátvonulás sebességre: maximális gyors feszültségváltozások**

A fenti ábra alapján megállapítható, hogy a görbe jellege a szélső tartományokban ( $0 \text{ m/s}$  -  $8,5 \text{ m/s}$ , valamint  $12,5 \text{ m/s}$  -  $18 \text{ m/s}$  között) hasonló tendenciát mutat a felhőátvonulás-sebesség és a gyors feszültségváltozás mértékének összefüggésére vonatkozóan. Ahogy az előző esetben, ez is kismértékben eltér az előzetes elvárásainktól. Arra számítottunk, hogy a felhőátmérő változatlansága mellett a sebesség növekedésével a perces nagyságrendű gyors feszültségváltozások mértéke csökkenni fog, mivel azok inkább a másodperces tartományba fognak esni, illetve egyszerre kevesebb napelem árnyékoltsága fog megváltozni. Ezen eltérés oka szintén a napelemek elhelyezkedésében keresendő. Az ábra alapján arra következtethetünk, hogy a hálózatnak van egy a napelemelhelyezkedéstől függő „sajátfrekvenciája”, azaz egy adott tartományban egyes felhőátvonulás-sebességek, illetve azok többszöröse esetén nagyobb gyors feszültségváltozások alakulnak ki. Ha ez valóban így van, kialakítható olyan napelemkonfiguráció egy adott területen, a lokális időjárási viszonyok ismeretében, mellyel a gyors feszültségváltozások mértéke minimalizálható.

## 6 Összegzés

---

Fenti munkám során először áttekintettem a jelenleg hatályos nemzeti energiastratégiát, ismertettem annak lehetséges hálózati hatásait. Bemutattam a magyar középvezettségű elosztóhálózatot és a megújuló energiaforrásokon alapuló elosztott energiatermelés hálózatra gyakorolt hatását. Ismertettem a középvezettségű részhálózatok csoportosításának egy lehetséges módját, reprezentatív mintahálózatok kiválasztásának lehetőségét. Ez után Magyarország éghajlati jellemzőit vettem górcső alá. Bemutattam olyan felhőárnyék modelleket, melyek alkalmasak az időjárásváltozás szimulálására.

Mind ezeket felhasználva kifejlesztettem egy szimulációs keretrendszert, melynek célja a napelemes energiatermelés középvezettségű elosztóhálózatra gyakorolt hatásának vizsgálata. Bemutattam a keretrendszer egyes elemeit. Kiválasztott szimulációs esetek mentén ismertettem a keretrendszer használatát, megvizsgáltam működésének helyességét.

Összességében tehát elmondható, hogy az általam kifejlesztett szimulációs keretrendszer működőképes és annak használatával kvalitatív becslés adható a napelempenetráció előírt növelésének megvalósíthatóságára.

## 7 Irodalomjegyzék

---

- [1] [Nemzeti Energiastratégia 2030](#)
- [2] Faludi Andor, Szabó László: [Villamosenergia-rendszer üzeme és irányítása](#), 2012
- [3] MAVIR: [A magyar villamosenergia-rendszer \(VER\) 2019. évi adatai](#), 2019
- [4] Dr. Hartmann Bálint: [Villamosenergia-átvitel](#), 2017
- [5] Attila Sándor Kazsoki, Bálint Hartmann: *Formulation of reference network models for the Hungarian medium voltage distribution level*, 2019
- [6] MathWorks: <https://www.mathworks.com/help/stats/kmeans.html#bueq7aj-5>
- [7] E.ON Tiszántúli Áramhálózati Zrt.: *ETI-SZ-222-v01, Hálózattervezés - Szabályzat*, 2016
- [8] Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ): [Magyarország éghajlata](#)
- [9] Ward Jewell, R. Ramakumar: *The effects of moving clouds on electric utilities with dispersed photovoltaic generation*, 1987
- [10] B. Nouri, S. Wilbert, L. Segura, P. Kuhn, N. Hanrieder, A. Kazantzidis, T. Schmidt, L. Zarzalejo, P. Blanc, R. Pitz-Paal: *Determination of cloud transmittance for all sky imager based solar nowcasting*, 2019
- [11] W. Mack Grady, Leslie Libby: *A cloud shadow model and tracker suitable for studying the impact of high-penetration PV on power systems*, 2012
- [12] G. W. Chang, Y. H. Chen, L. Y. Hsu, Y. Y. Chen, Y. R. Chang, Y. D. Lee: *Study of Impact on High PV-Penetrated Feeder Voltage Due to Moving Cloud Shadows*, 2016
- [13] Dr. Oláhné Groma Veronika meteorológus szakértő által nyújtott adatszolgáltatás alapján
- [14] Innovációs és Technológiai Minisztérium: [Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig, 2020](#)
- [15] International Renewable Energy Agency: [Renewable Energy Statistics 2020](#), 2020
- [16] Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal: [Nem engedélyköteles kiserőművek és háztartási méretű kiserőművek adatai \(2019\)](#), 2019