



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

Sinkovics Bálint

Szélerőművek termelés előrejelzésének vizsgálata

Tudományos Diákköri Konferencia

KONZULENS

Dr. Hartmann Bálint

BUDAPEST, 2016

Összefoglaló

Az utóbbi évszázadot jellemző robbanásszerű energiafelhasználás növekedés hatására az emberiség a hosszútávon is fenntartható, alternatív energiaforrások felhasználását kezdte előtérbe helyezni. Ezen források közé tartozik a szélenergia is, melynek jelentős mértékű hasznosítása az utóbbi évtizedekben kezdődött. A dolgozat áttekinti a szélenergia iparág jelenlegi helyzetét, és képet ad a hazai szabályozási környezet kialakulásáról, illetve annak változásáról napjainkig. Részletesen kitér a hazai szélerőmű kapacitások kiépülésének mintegy egy évtizedes időszakára, illetve annak korlátozását (részben) okozó rendszerirányítói problémákra. Ezen túl a bővítési lehetőségek hiányában a dolgozat a jelenlegi kapacitások minél hatékonyabb kihasználását kívánja segíteni az szél előrejelzési adatok elemzésével. Ennek érdekében a cél egy Levél település melletti szélerőmű park előrejelzési és mérési adatait felhasználva a szélesebesség előrejelzés hibájának leadott teljesítményre vonatkoztatott hatását vizsgálni. A kettő közötti összefüggést a szélturbina szél-teljesítmény jelleggörbéje adja meg. Mivel csak előrejelzett, és mért teljesítmény adatok állnak kezdetben rendelkezésre, ezért szükség van az egyes teljesítmény adatpontokhoz tartozó szélesebesség értékek meghatározására. Ehhez a gyártó által megadott szél-teljesítmény adatpontokra görbeillesztéssel függvényt definiálunk, melynek köszönhetően meghatározzuk a teljesítményekhez tartozó szélesebességeket. Ezt követően mért és előrejelzett szélesebesség közötti eltérés eloszlásának vizsgálata kerül a fókuszba. Ezek különböző széltartományokon való megfigyeléséből az adott szélesebesség- és teljesítményeloszlás sajátosságaira tudunk következtetni. Az összefüggések ismeretében lehetőség nyílik az előrejelzési módszer esetleges hibáinak pontosítására, illetve az előrejelzéshez hibasávok definiálására, melynek köszönhetően a szél várható lehetséges értékét még pontosabban tudjuk definiálni a jövőre nézve.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	i
Tartalomjegyzék	ii
1 Bevezetés.....	1
1.1 Áttekintés – a szélenergia piacának alakulása	1
2 Szélenergia hasznosítás története Magyarországon.....	3
2.1 Jogszabályi környezet kiépülése.....	3
2.1.1 A 2006-os széltermelési kvóta bevezetése és utóélete	3
2.1.2 A 2009-es kapacitásbővítési tender	5
2.1.3 A széltermelési kapacitás bővítésének lehetőségei napjainkban	5
2.1.4 A METÁR rendszer lehetőségei	6
2.2 Konklúzió	7
2.3 A jelenlegi széltermelési kapacitás kvóták a rendszerirányító szempontjából	7
3 Széltermelés fizikai tulajdonságai.....	9
4 Számítás megalapozása.....	12
4.1 Rendelkezésre álló adatok felhasználása	12
4.2 Görbeillesztés katalógus adatpontokra.....	13
5 Szél előrejelzés pontosságának vizsgálata	16
5.1 Szél előrejelzés hiba a teljes szélterületen.....	16
5.2 Szél előrejelzés hiba feltételes sűrűség függvénye	17
5.3 Teljesítmény előrejelzés hiba sűrűség függvényének előállítása	18
5.4 Adott szélesség sűrűség függvényének meghatározása.....	19
5.4.1 Feltételes sűrűség függvény létrehozása	21
5.4.2 Feltételes sűrűség függvény 5 m/s előrejelzett szélnél.....	22
5.4.3 Feltételes sűrűség függvény 7 m/s előrejelzett szélnél.....	23
5.4.4 Feltételes sűrűség függvény 9 m/s előrejelzett szélnél.....	24
5.4.5 Feltételes sűrűség függvény 11 m/s előrejelzett szélnél.....	24

5.5	Összegzés.....	25
6	Összefoglalás.....	28
7	Források.....	29
8	Függelék	32
8.1	VBA program programkód	32
8.2	MATLAB közelítés programkódja	32

1 Bevezetés

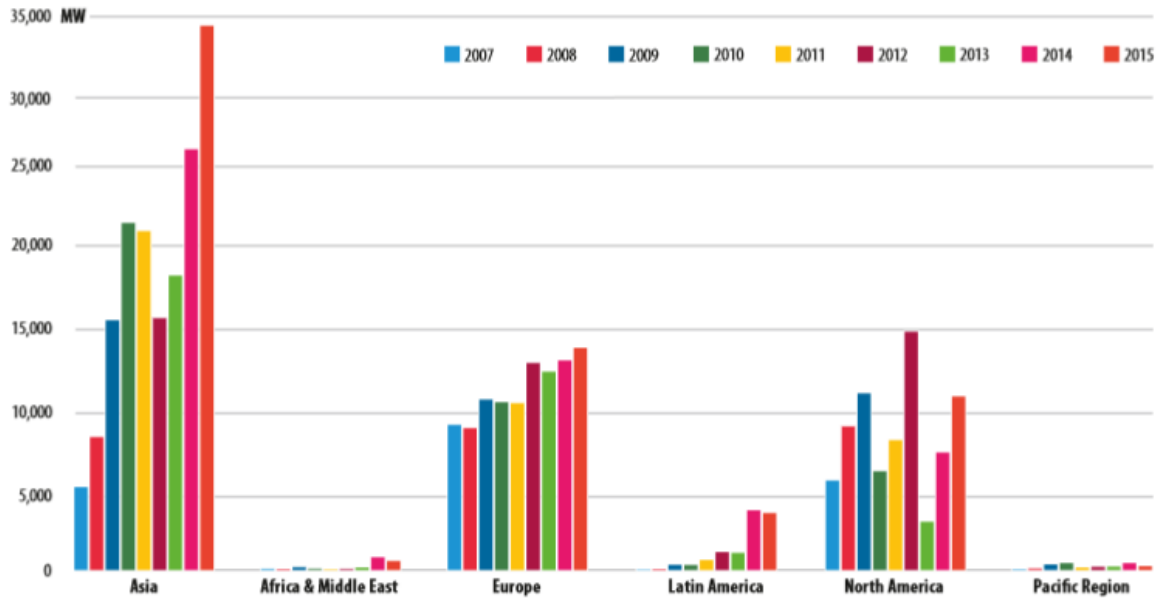
Az utóbbi évszázadban bekövetkezett technológiai fejlődés hatására a primer és szekunder energiahordozók felhasználása robbanásszerű méreteket öltött. Ezen igények jelenlegi fenntarthatatlan kiszolgálásának hatására a XXI. század egyik kulcsszava lett a fenntarthatóság. Az energiafelhasználás oldaláról az energiahatékonyság került a középpontba, azaz a megtermelt energia tudatosabb, minél kevésbé pazarló felhasználása. Az energiatermelésben a technológiai fejlődéssel járó hatékonyság növekedés mellett olyan alternatív megoldások jelentek meg számottevően, melyek karbon semlegesnek tekinthetők a klasszikus fosszilis erőművekhez képest. Ezen kétoldalú tendencia jól megfigyelhető az Európai Unió energiapolitikájában is. Az EU első éghajlat- és energiapolitikai intézkedéscsomagjában 2020-ra az alábbi három fő célkitűzés szerepel:

- az üvegházhatásúgáz-kibocsátások 20%-os csökkentése
- a megújuló energia arányának növelése 20%-ra
- az energiahatékonyság fokozása 20%-kal

Az alternatív energiaforrások közül a vízenergia és biomassza mellett az utóbbi évtizedekben a fotovillamos és szélenergia energiatermelés dinamikus térnyerése figyelhető meg.

1.1 Áttekintés – a szélenergia piacának alakulása

A Global Wind Energy Council által kiadott Global Wind Report [1] 2015-ös jelentése átfogó képet ad a világ szélenergia iparágáról. A tanulmány alapján 2015-be telepített több mint 60 GW beépített teljesítmény nagyjából felét Kína telepítette. Az 1. ábrán jól megfigyelhető, hogy az ázsiai kontinens a felelős az utóbbi évek nagyléptékű beruházásaiért. Ezeknek köszönhetően a világ összes beépített teljesítményének harmada található már itt, ami nagyjából 145 GW. A második helyen az USA, harmadik helyen Németország áll 17 és 10%-os részesedéssel a világon beépített szélkapacitásból. A szélenergia piacon továbbra is erőteljes expanzió figyelhető meg, a 2014-es évhez képest 22%-kal több beépített kapacitást létesítettek a 2015-ös évben. Az egyes évekre megvalósult teljesítmény értéke 2000 és 2015 között 17-szeresére növekedett. Az előző évek impresszív növekedésének ellenére az elkövetkező időszakban jóval mérsékeltebb éves bővülést becsülnek. A 2015-ös 60 GW-os éves teljesítmény bővülés értéke várhatóan stagnálni, vagy legfeljebb 5%-kal fog növekedni 2020-ig éves szinten. Ha a bővülés ilyen mértékű okát vizsgáljuk, akkor látható, hogy az az ázsiai régió dinamikus fejlődésének köszönhető, mely során 8 év alatt az évente telepített beépített teljesítmény értéke meghétszereződött. A második legtöbb erőművet telepítő európai régiót a kiszámítható növekedés jellemzi, az évenkénti telepítések növekedése nem annyira drasztikus, mint Ázsiában, de még így is 64%-os növekedést jelent a 2007-2015 időszakban. Az európai fejlődés a piaci



1. ábra Beépített szélenergia teljesítménybővülés évenkénti változása (2007-2015) [1]

előrejelzések alapján kifulladás látszik a piac telítődésének köszönhetően. A 2015-ös bővülést egy 2 GW-os németországi offshore bővülés és a lengyel piac dinamikus expanziója húzta leginkább. nagy beruházási hajlandósággal rendelkező német, brit, spanyol piacokon várhatóan lényegesen csökkenni fog a további szélenergia telepítések száma. Azonban az elkövetkező években Törökország, másodsorban Lengyelország és Románia jelentős piaca lehet a szélenergia beruházásoknak, aminek köszönhetően a GWEC mintegy 70 GW erőmű telepítését prognosztizálja 2020-ig Európában.

2 Szélenergia hasznosítás története Magyarországon

2.1 Jogszabályi környezet kiépülése

Az első magyarországi szabályozás, mely rendelkezett a megújuló energiaforrások helyzetéről és azok (lehetséges) támogatásáról, előtérbe helyezéséről, a 2001 évi CX. törvény „A megújuló energiaforrásból és a hulladékból nyert energiával termelt villamos energia” [2] fejezete volt. Ez előírnyozott egy jövőben megvalósítandó támogatási rendszert, ugyanis „csökkenteni kell a megújuló vagy a hulladékból nyert energiával termelt villamos energia értékesítése során jelentkező versenyhátrányt.” Ennek megfelelően 2002-ben látott napvilágot az 56/2002 GKM rendelet, mely tételesen rendelkezett az átvételi jogosultak köréről és az átvételi árákról. A rendelet alapján a támogatási árakat a Magyar Nemzeti Bank utolsó éves fogyasztói árindex előrejelzésének figyelembevételével kell meghatározni [3]. A támogatási árak ilyen rugalmas követése nagyon kedvező feltételeket teremtett a megújuló beruházások megvalósulásához. Ehhez tovább ösztönzők is jelentősen hozzájárultak a beruházási kedv megindulásához:

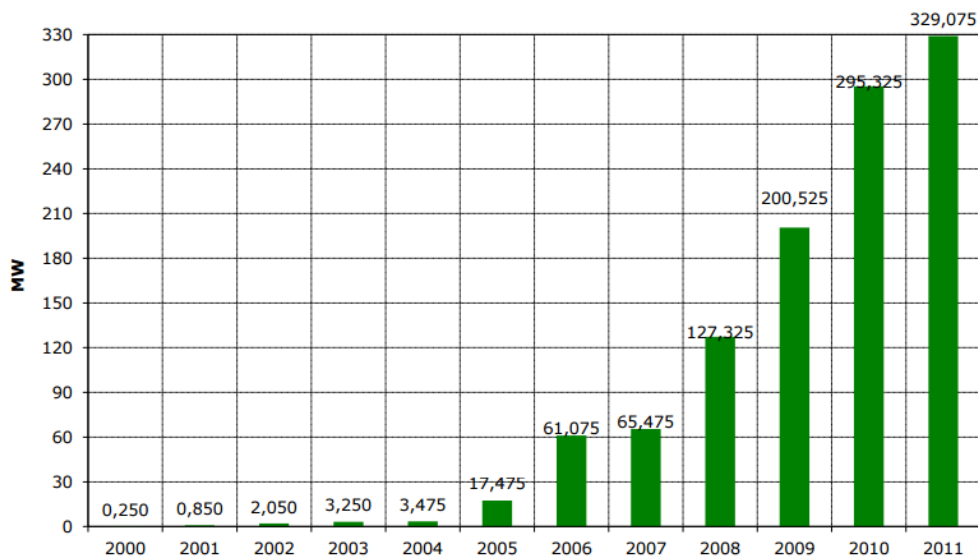
- csatlakozás 2004-ben az Európai Unióhoz, mely hatására a korábbi tagállamok energiapolitikáját is meghatározó zöldenergia-támogatás Magyarországon is bizakodó jövőbeli befektetői kilátásokat teremtett
- A 2000-ben elsőként épített Inotai erőmű [4] tapasztalataira alapozva tanulmányok [5], jogszabályok láttak napvilágot, mely világos, kiszámítható jogi kereteket adtak a befektetői kedv fellendítéséhez
- a 2003-as villamosenergia piacnyitást követően külföldi befektetők számára is lehetőség nyílt beruházni hazánkban

A kialakult helyzetnek további adaléka, hogy a 2001. évi CX. törvény 50. § szerint a Magyar Energia Hivatal köteles erőmű létesítési engedélyt kiadni, amennyiben az a jogszabályi kereteknek megfelelően kerül beadásra.

2.1.1 A 2006-os szélerőművi kvóta bevezetése és utóélete

A fentieknek együttesen köszönhetően robbanásszerűen megindult az szélerőmű telepítési engedélykérelmek beadása. Ennek a folyamatnak végül az vetett véget, hogy a Magyar Energia Hivatal késve ugyan, de realizálta, hogy hazánk villamosenergia-rendszerének szabályozási tartalékait meghaladó engedélykérelmet adtak be, így a folytonos energiaellátás, rendszerbiztonság biztosításához korlátozások bevezetésére volt szükség. 2006-ban kialakult helyzetben a közel 1000 MW elbírálásra váró engedélykérelem mellett a MEH kiadott egy közleményt, melyben 330 MW-ban korlátozták a hazánkban kiadható szélerőműves engedélykérelmek számát. [6] A dokumentum a

beadott engedélykérelmek, németországi tapasztalatok alapján meghatározott kihasználási óraszámok mellett a rendszerirányító együttműködésével hozta meg döntését. Ez a lépés komoly felzúdulást váltott ki beruházói körökben, tekintve a MEH nem jogalkotó szerv, ezáltal nem alkothatott volna a 2001 évi CX. törvényt felülíró döntést. [12] További feszültségeket okozott az addigi kérelmek elbírálásának folyamata, mely során az önálló tornyokat építeni kívánó befektetők kivételével minden pályázó csak az igényelt erőművi kapacitásainak felére kapott engedélyt. Ezt követően az elhúzó, nehézkes engedélyeztetési folyamatoknak köszönhetően egészen 2011-ig kellett várni még arra, hogy a kiadott kapacitás megépüljön hazánkban. (2. ábra)



2. ábra Magyarországon beépített szélenergia teljesítmény változása 2000-2011 között [7]

A 2006-os incidenst követően 2007-ben látott napvilágot az LXXXVI. törvény, mely az új villamosenergia törvényként már törvényi erőre emelkedve kétlépcsős pályázási folyamat mellett 330 MW-os kvótával korlátozta a további kiadható engedélyek számát. [10] Ezen felül rögzítésre került, hogy egy adott termelőre vonatkozó kötelező átvétel szabálya egy megadott időtartam erejére érvényes, mely szabadon meghosszabbítható. A törvény továbbá biztosította az európai joghoz való igazodást. Még ebben az évben kiadásra került a 389/2007 Kormányrendelet [8], mely a kötelező átvétel viszonyait tisztázta a termelők és a rendszerirányító között. Ebben a dokumentumban vezették be hazánkban a KÁT mérlegkörü tagokra is a kötelező menetrendadást. A törvény alapján a menetrendtől való $\pm 30\%$ -os eltérés esetén a termelőnek 5Ft-os kWh-kénti szabályozási pótdíjat kellett fizetni a menetrendi hibasávot meghaladó termelésért. [9] A szélenergia erősen volatilis jellege miatt a szabályozás hatására az erőmű tulajdonosok tiltakozásukat fejezték ki, mivel a nehezen előre jelezhető termelés miatt kétségessé vált a beruházásuk megtérülése. Ennek hatására született meg a 287/2008 Kormányrendelet, mely a

szélerőművi tulajdonosok számára a leadott menetrendtől való $\pm 50\%$ -os „engedélyezett” hibasávot írt elő. A szabályozás pénzügyi hatásai az erőművi üzemeltetőkre, illetve a szélerőművek és a többi KÁT tag erőmű közötti aránytalan támogatási képlet miatt a törvény így is sok elégedetlenséget generált. [9]

2.1.2 A 2009-es kapacitásbővítési tender

A 2007-es Villamos energia törvény alapján támogatott szélerőmű kapacitások létesítésére hazánkban miniszteri rendeletben meghirdetett pályázat útján van lehetőség. Erre napjainkig egyszer került sor 2009 június végén jelent meg Hónig Péter miniszter 410 MW szélerőművi kapacitásbővítésre kiírt tendere. A beadott pályázatok összesen 1117 MW erőmű építésére szóltak, azonban a kormányváltást követően részben szakmai, részben politikai okokból 2010 júliusában a rendeletet visszavonták. [11] A szakma azóta is egy esetleges bővítésre vár.

A kapacitás bővítési tender visszavonását követően a felelős minisztériumok egy újabb tendert előkészítő szakmai munka helyett a Nemzeti Cselekvési Terveket kezdték megfogalmazni, és ebben a magyarországi energetikai célok 2020-as vállalásait. Ennek köszönhetően a piaci várakozások 2012-re jósltak újabb lehetséges tender kiírást. Az időközben megszületett III. Nemzeti Energiahatékonysági Cselekvési Terv, melynek része a Megújuló Energia Hasznosítási Nemzeti Cselekvési Terv. [13] Utóbbiban kerültek megfogalmazásra a 2020-as és vázlatosan kitekintve a 2030-as megújuló energetikai célok. A dokumentum vállalása a 2020-as évre a bruttó primer energiafelhasználásban 14,65%-os megújuló energia részarány elérése. Ennek érdekében konkrét intézkedési tervvel mutatja be az egyes megújulók térnyerésének lehetőségeit. A cselekvési terv korábbi kutatásokra hivatkozva kiemeli hogy hazánk szélpotenciálja jelenleg még beruházási lehetőségeket tartogat magában, melynek a szabályozási korlátok szabnak határt. Ezzel együttvéve a dokumentum 750MW-ban határozza meg a céldátumra elérendő beépített szélerőművi kapacitás mértékét, mely 10MW háztartási törpe erőmű megjelenését is prognosztizálja.

2.1.3 A szélerőművi termelés bővítésének lehetőségei napjainkban

2016 szeptemberében megjelent hírek alapján a kormány nem tervez újabb bővítési hullámot indítani. [14] A szeptember 15-én megjelent 277/2016-os Kormány rendelet értelmében szélerőmű nem telepíthető lakott terület 12 km-es körzetén belülre. Ez alapján az országban nincs olyan terület, ami a rendelet követelményét kielégítené. A bővítés lehetőségének ilyen erőteljes elutasítása számos elméletet felvetett a politikai tényezőkön át a paksi bővítés melletti elköteleződésig. [14] Ezen túl olyan feltételezések is napvilágot láttak, amelyek a háztartási kiserőművek előtérbe helyezését prognosztizálják hazánkban. [15]

Beszédes, hogy a Villamos energia törvény §116 (3) módosítása alapján 2016 januártól 50 kVA-nál kisebb csatlakozási teljesítményű napelemes erőművek esetében nem szükséges az engedélyeztetés eljárás alábbi lépéseinek elvégzése [16]:

- építési engedélyezési eljárás,
- üzemeltetési engedélyezési eljárás,
- használatbavételi engedélyezési eljárás,
- fennmaradási engedélyezési eljárás,
- megszüntetési eljárás

A jelenlegi helyzet ismeretében kijelenthetjük, hogy további szélerőművi beépített teljesítmény megjelenése a magyar piacon nem várható. Azonban a jelenlegi entitások hatékonyabb üzemeltetésében számos lehetőség kínálkozik. A jelenlegi KÁT támogatási rendszerben az erőmű tulajdonos nem érdekelt a minél pontosabb erőművi menetrend megadására, illetve a MAVIR által kötelezően készített napi menetrendek sem alkalmasak a szignifikánsan jobb termelés előrejelzésre. [9]

2.1.4 A METÁR rendszer lehetőségei

A helyzet megoldására 2017 január elején lép életbe a szakmai körökben régóta várt a Megújuló Támogatási Rendszer [METÁR], melytől egy igazságosabb és piaci versenyt hozó támogatási rendszert várnak. A rendszer az erőmű típusa, teljesítménye, és piaci szerepe alapján is diverzifikálja a hazai szereplőket. [17] Külön barnaprémiumos támogatás kerül kialakításra a biogáz és biomassza erőművek számára. A naperőműves és egyéb megújulók (a szélerőművek kivételével) a beépített teljesítményük függvényében a zöldprémium és a kötelező átvételi rendszer támogatásával élhetnek. A szélerőművek teljesítményüktől függetlenül a zöldprémium támogatásra jogosultak, amely az 1 MW-nál kisebb szélerőművi beruházásokat hátrányosan érinti. Ennek köszönhetően egy későbbi kvótabővítési tenderen kevésbé valószínű a nem tőkeerős és nagy kapacitásokkal pályázni kívánó kisebb hazai vállalkozások, önkormányzatok megjelenése. A prémiumos támogatás elnyerésére az erőmű tulajdonosok a támogatott árra tett ajánlataik alapján versenyeznek. Az erőművek a villamos energiát a piacon értékesíthetik, és ezen felül pályázhatnak a kiegészítő támogatásra. Az elnyert támogatási összeget a törvényben meghatározott 31,77 Ft/kWh bázisár és egy számított referencia piaci ár különbségéből számított fajlagos, változó támogatási alap segítségével lehet kiszámítani. A jelenlegi KÁT támogatási rendszer a korábban megkötött támogatási szerződések kifutásáig megmaradhat, de legfeljebb 2045-ig. Az ezt követő támogatási szerződések kizárólag a METÁR szabályai alapján köthetők. Azonban a termelők választhatnak, a most bevezetésre kerülő konstrukcióra való váltást akár a jogszabály érvénybe lépésétől kérhetik. A jogalkotó reményei szerint

a fent vázolt rendszer a jelenlegi KÁT szereplőket piaci versenyhelyzetbe kényszeríti, és érdekeltté teszi őket minél eredményesebb kapacitás kihasználásra és pontosabb menetrendadásra.

2.2 Konklúzió

A 10 évvel ezelőtt meghúzott szélerőművi teljesítménykvóták bővítése az elkövetkező években nem várható. Ugyan a megújuló 2020-as célokat tartalmazó Megújuló Energia Hasznosítási Nemzeti Cselekvési Terv a szélerőművek, mint gyorsan telepíthető megújuló alternatívák több mint kétszeres teljesítménybővülésével számol, a jelenlegi jogszabályi környezet ezt nem valószínűsíti. Ennek köszönhetően a szélerőműves termelőknek a következő években a fókusz a meglévő kapacitásaik minél gazdaságosabb kihasználására kell helyezni, melyben a megújuló támogatási rendszer is ösztönzi őket. A dolgozat célja emiatt a jelenlegi termelés előrejelzési folyamatok vizsgálata és javaslatok megfogalmazása a hatékonyság növeléséhez.

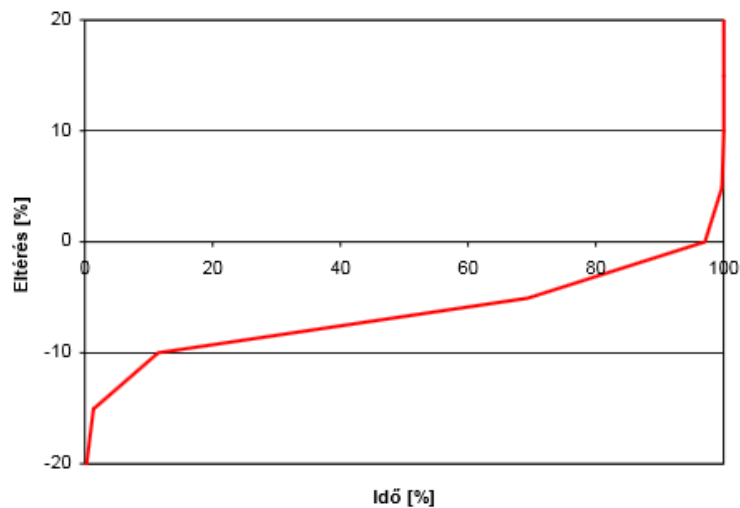
2.3 A jelenlegi szélerőművi kapacitás kvóták a rendszerirányító szemszögéből

A kialakult helyzetnek számos szakmai aspektusa van, mellyel [18] foglalkozik részletesen. A szélerőművek termelésének erősen volatilis jellege miatt szekunder tartalékokra van szükség az esetleges menetrendadási hibából adódó termeléseltérések kiküszöbölésére. A MAVIR, mint hálózati rendszerirányító a kötelező átvételi mérlegkörbe tartozó fogyasztók menetrendtől eltérő többlettermelésének és hiányának kompenzálására fel- és le irányú tartaléki opciókat vásárol a kötelező ajánlatadáson alapuló tenderén keresztül. A piacon a fel irányú tartalékok elegendőek a jelenlegi KÁT-ba tartozó erőművek termelésének kiegyenlítésére. Ezzel szemben a magyar villamosenergia-rendszer le irányú tartalékokkal igen szűkösen rendelkezik. Ez több (feltételezett) okra vezethető vissza, melyek:

- Termelők nem érdekeltek a le irányú szabályozási piacon való megjelenésben
- Piacot jellemző alulmenetrendező magatartás
- A 387/2007-es tarifarendelet ellenérdekeltté teszi a KÁT mérlegköri tagokat a rendszerszintű szolgáltatások piacán való megjelenésben, ezzel is szűkítve a szabályozásra alkalmas erőművek rövid listáját
- Versenyhelyzet hiánya a szekunder és terciér (azaz szabályozói) piacokon

Az alulmenetrendező magatartás kialakulásának több oka van. A termelőknek (KÁT tagok kivételével) eleget kell tenniük a „kiegyenlített menetrend” elvének. „Egy menetrend akkor kiegyenlített, ha a mérlegkör betáplálásainak, vételezéseinek, vásárlásainak és értékesítéseinek minden elszámolási mérési időintervallumra vonatkozó előjelhelyes szaldósított értéke nulla, vagyis: a mérlegkör vételezéseinek és értékesítéseinek összege megegyezik a betáplálásainak és vásárlásainak összegével.” [19]

Ennek köszönhetően a forrástöbbletet illetve fogyasztás többletet a mérlegkörnek a menetrendek manipulálásával kell eltüntetnie. Ez eredményezi azt, hogy csúcsideszakban akár 250-300MW is lehet a menetrendi és valós állapot között a különbség. Ennek kiegyenlítésére a rendszerirányítónak a lekötött tartalékokat kell igénybe venni, ami megnehezíti a KÁT mérlegköri



3. ábra Piaci menetrendek százalékos eltérése a tényadatoktól a negyedórák arányában [18]

termelők menetrendtől való termeléseltérések kiszabályozását. A helyzetet tovább rontja, hogy a mérlegköri korrekciók az esetek döntő többségében alul menetrendező magatartást fednek el. A menetrendi és tényleges rendszerterhelés közötti eltérést a 3. ábra szemlélteti. Jól látható, hogy a piac döntő többségben alulmenetrendező magatartást követ. A kialakult termelői magatartásnak több vélt oka is van. Ezek közül az egyik a kiegyenlítő energia árazásának aszimmetrikus struktúrája, illetve a versenyhelyzet hiánya a szekunder és terciér piacokon. A szélerőművek tényerése mellett az évezred első évtizedében a háztartási méretű kiserőművi egységek is elkezdtek elterjedni. Ezek, a kifesztésű hálózatra csatlakozó - rendszerirányító által szabályozatlan – termelők kiszorítják a szekunder és perces piaci szereplőket, ezzel a rendszer rugalmatlanságát erősítve. A jövőbeli megoldást az ilyen jellegű termelők virtuális erőműbe való tömörítésével a rendszerszintű szolgáltatások piacára való terelés jelentheti.

3 Szélerőművek fizikai tulajdonságai

Szélerőműnek tekintünk minden olyan berendezést, amely a szél mozgási energiájából képes villamos energiát előállítani. A szélturbina lapátjai hasonló profillal rendelkeznek, mint egy repülőgép szárnyai, így felhajtóerőt generálnak. A lapátok aerodinamikai kialakításából adódóan egy, a lapátvégekre érintő irányú F erő jelenik meg a lapátokon, mely forgatni kezdi a rendszert. Igénybevételi illetve zajterhelésbeli okok miatt a lapátok fordulatszámja 9-19 fordulat/perc között mozog. A megfelelő frekvencia eléréséhez a lapátok tengelye egy váltóba fut, ahol fogaskerék áttételek segítségével a generátor szinkron fordulatszámán hajtják meg azt.

A szél mozgási energiáját az alábbi egyenlet alapján határozhatjuk meg:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

Ha a v szélességre merőleges A felületen keresztül t idő alatt ρ sűrűségű szél áramlik át, akkor az alábbi egyenletet írhatjuk fel az áramló közeg m tömegére:

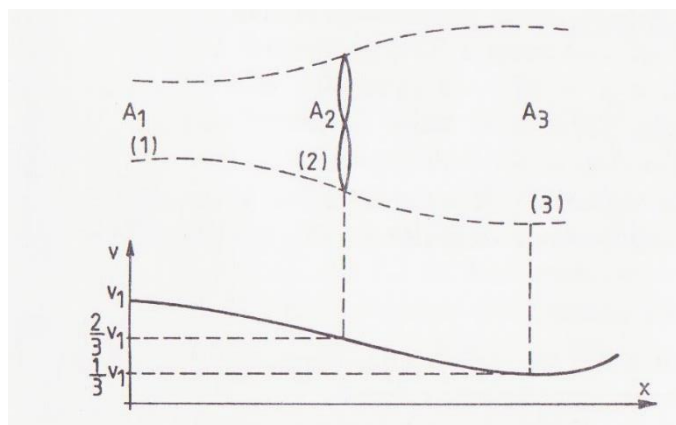
$$m = \rho Avt$$

A fenti két egyenletből megállapíthatjuk az ideális esetben kinyerhető teljesítmény nagyságát:

$$P_0 = \frac{E}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

Már az alábbi összefüggésből is jól látható, hogy a szél kis sűrűségének köszönhetően az átáramló közeg tömegének növelését adott időegység alatt a felület vagy a szélesség növelésével lehet kompenzálni. Ez előrevetíti azt a problémát, hogy az egységnyi felületre jutó teljesítménysűrűsége a szélnek kicsi. Továbbá megfigyelhető a teljesítmény szélességtől való nemlineáris függése, ami a későbbiekben még jelentőséget kap.

A definiált elméleti P_0 szélesség a valóságban nem nyerhető ki. Adott V térfogatú levegőmennyiséget feltételezünk, amely egy A_1 felületen halad át v_1 sebességgel a turbina előtt perdület mentesen. Majd a turbina forgási síkján való áthaladás során (A_2, v_2) sebessége lecsökken és egy – a lapátok forgásával ellentétes irányú – tangenciális eltérítést is kap. A lapátok mögött ez a V levegőmennyiség egy A_3 felületen is áthalad v_3 sebességgel. A folyamat során a sebesség és felületek változását a 4. ábra szemlélteti.



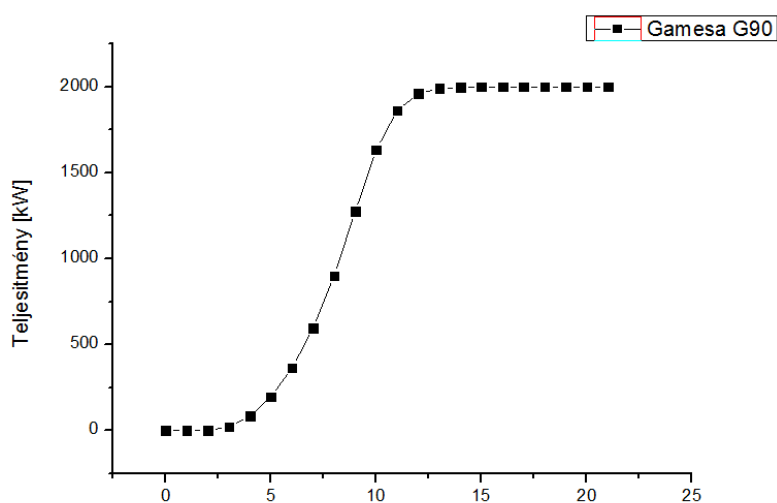
4. ábra Lapátkeréken átáramló levegő ideális modellje és a szélesség változása [20]

Feltételezve, hogy a $v_3 \neq 0$, mert ekkor a szél feltorlódna a turbina mögött a kinyerhető teljesítmény az alábbi összefüggésre vezethető:

$$P_{wmax} = A_2 \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_3^2) v_2 = \frac{16}{27} A_2 \frac{\rho}{2} v_1^3$$

Az egyenletben található $\frac{16}{27} \cong 0,59$ konstans a kezdetben definiált mozgási energia lehető legnagyobb kinyerhető arányát jelenti, melyet Betz-határnak nevezünk. [20]

A fenti képletből látható, hogy a szélesség és a leadott teljesítmény közötti összefüggés nem lineáris. Ugyan számos paraméter (levegő sűrűsége, hőmérséklet) befolyásolja a turbina által kinyerhető energia mértékét, azonban ezek közül a szél sebességének nagysága az, amely a legjelentősebb. Emiatt az egyes szélturbinák jellemzésére a gyártók szélesség-teljesítmény jelleggörbéket adnak meg. Ezek értékei minden géptípusra egyediek, és az üzemeltetési tapasztalatok alapján némileg el is térnek a gyártói adatsortól. Az eltérés mértékével, és annak pontosítási lehetőségeivel részletesen foglalkozik [21]. Ilyen „finomítási” lehetőség lehet a levegő évszakonként



5. ábra Games G90 szélturbina szél-teljesítmény jelleggörbéje (saját ábra [22] alapján)

változó sűrűségének hatása a szél teljesítmény görbére, illetve megfelelő mennyiségű mérési adatpont esetén az outliner pontok kiszűrését követően meghatározni a jelleggörbét. A jelen dolgozatban vizsgált Gamesa G90-es szélerőmű típus jelleggörbéje az 5. ábrán látható. A szélerőmű 3 m/s-os szélesebességnél kezd el termelni villamos energiát, névleges teljesítményét 15 m/s-nál éri el, és egészen 21 m/s-os szélesebesség határig képes termelni. [22]

A szélesebesség előrejelzésére számos statisztikai és numerikus eljárás alapuló módszer, program létezik, melyek közös tulajdonsága, hogy tökéletes rendszert még nem sikerült kifejleszteni, azaz egy adott időtávon nem képesek a szél tökéletes előrejelzésére. Ezért ezen modellek fejlesztése, pontosítása mellett fontos figyelmet fordítani az előrejelzés pontosságbecslésének finomítására is. Annak vizsgálata, hogy az előrejelzett szélesebesség milyen valószínűséggel fog bekövetkezni, és milyen eloszlással várható annak az előrejelzett értéktől való eltérése ugyancsak elősegíti a pontosabb menetrendtervezést. Ez az erőművi tulajdonos számára megtakarítást jelenthet, mivel a pontosabb előrejelzésnek köszönhetően nem kap büntetést a menetrendtől való eltéréseért. Míg a rendszerirányító számára kiszámíthatóbb tervezést, és kevesebb utólagos kiegyenlítő energia vásárlását jelenti, amely hatékonyabb rendszerfenntartást eredményez.

4 Számítás megalapozása

4.1 Rendelkezésre álló adatok felhasználása

A számítások során a szél előrejelzés pontatlanságából adódó teljesítmény eltérést kívánom vizsgálni, majd ebből következtetéseket levonni a menetrend tervezés pontosítása érdekében. Ehhez a MOV-R H1, Levél település mellett található szélerőmű park adatait használom fel. A park 12 db egyenként 2MW-os beépített teljesítményű Gamesa G90 típusú szél turbinából áll. A létesítmény 2006-ban épült, és 2007 elején lett üzembe helyezve. A termelő egységek Levél



6. ábra Levéli MOV-R H1 szél erőmű park műholdas képe

központjától nagyjából délnyugatra található, melyet az 6. ábra szemléltet. A turbinák egy nagyjából 2X2 km-es területen helyezkednek el, melynek közelében nem található domborzati akadály. A parktól minden irányban kb. 2km-re található a két legközelebbi település Levél és Mosonszolnok. A fentiek alapján a számítások elvégzéséhez azzal a feltételezéssel élünk, hogy a 12 erőmű által leadott pillanatnyi teljesítmény közel azonos minden időben. Ez azért fontos, mert a kutatáshoz rendelkezésre álló negyedórás felbontású leadott teljesítmény adatok a teljes erőmű parkra vonatkoznak. Egy turbina vizsgálatához a továbbiakban minden esetben a rendelkezésre álló értékek 1/12-ét vesszük figyelembe. A mért teljesítmény értékek mellett rendelkezésre áll egy egynapos teljesítmény előrejelzés. Ez alapján lehetőség nyílik következtetéseket levonni a termelés előrejelzés hibájáról, illetve ennek tulajdonságairól.

A számítások elvégzéséhez a szélerőműpark negyedórás felbontású 2008. január 1 és szeptember 30 közötti teljesítmény adatai állnak rendelkezésre. Mivel kezdetben a szél előrejelzésből adódó pontatlanságokat szeretném elemezni, így a teljesítmény adatokból a szél lehetséges sebességét szeretném meghatározni. A szél és teljesítményadatok közötti megfeleltetést az 5. ábrán szemléltetett szél-teljesítmény katalógusgörbe adja meg. Azonban a gyártó csak teljesítmény adatpontokat ad meg az 1,2,3...21 m/s-os szélesebességekhez. Ahhoz, hogy a teljes tartományon meg tudjam állapítani a két váltakozó közötti relációt ismernem kell a görbe egyenletét, melyhez a katalógus görbét közelítőleg leíró görbeillesztést kell alkalmaznom.

4.2 Görbeillesztés katalógus adatpontokra

A görbeillesztés célja, hogy egy adott $(x_0, y_0); (x_1; y_1) \dots (x_n; y_n)$ pontsört minél pontosabban analitikusan közelítsen egy $y=g(x)$ alakú függvénnyel. Az illeszkedési kritérium különböző lehet csakúgy, mint a görbe, azaz a függvény típusa. Evidens lenne lineáris interpolációt alkalmazni, azaz az adatpontok közötti szakaszokra felosztani a függvényt, majd ezek egyenletét egyesével meghatározni. Azonban ezen módszerrel nem nyílna – vagy csak nagyon komplexen – lehetőség arra, hogy minden egyes teljesítmény adatpontra automatizáltan megállapíthassuk a hozzárendelt szélesebesség értéket. Ezért olyan illesztést kerestem, mely egyetlen függvénnyel a lehető legpontosabban közelíti az adatsort. A szélturbina teljesítmény-szél függvényének szigmoid alakja leginkább egy periodikus jel felfutó szakaszára emlékeztet. Ezért a periodikus, rezgésstanban és villamos jelfeldolgozásban is használt Fourier sorokat alkalmaztam, mely trigonometrikus polinomokkal közelíti az adott pontsört, vagy egy másik $f(x)$ függvényt.

Ezen módszer segítségével egy adott $g(x)$ függvény az alábbi, trigonometrikus függvénnyel helyettesíthető:

$$s_n(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega x) + a_2 \cos(2\omega x) + \dots + a_n \cos(n\omega x) + \\ b_1 \sin(\omega x) + b_2 \sin(2\omega x) + \dots + b_n \sin(n\omega x)$$

ahol: $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Az $g(x)$ lehető legpontosabb közelítéséhez az a_n és b_n helyére a $f(x)$ Fourier-féle együtthatóit kell beírni. [23] Esetünkben nem periodikus függvényről beszélhetünk, így felmerül a kérdés, hogy a Fourier alapú közelítés miképp alkalmazható?

Minden olyan $g(x)$ függvény, amely egy $0 \leq x \leq l$ intervallumban kielégíti a Dirichlet-féle feltételeket az alábbi sorba fejthető:

$$g_1(x) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right) + a_2 \cos\left(2 \frac{2\pi x}{l}\right) + \dots + a_n \cos\left(n \frac{2\pi x}{l}\right) +$$

$$b_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{l}\right) + b_2 \sin\left(2 \frac{2\pi x}{l}\right) + \dots + b_n \sin\left(n \frac{2\pi x}{l}\right)$$

Ez esetben az $g_1(x)$ függvény $T=l$ szerint periódikus és a $0 \leq x \leq l$ intervallumon egyenlő $g(x)$ -el.
Dirichlet-féle feltétel:

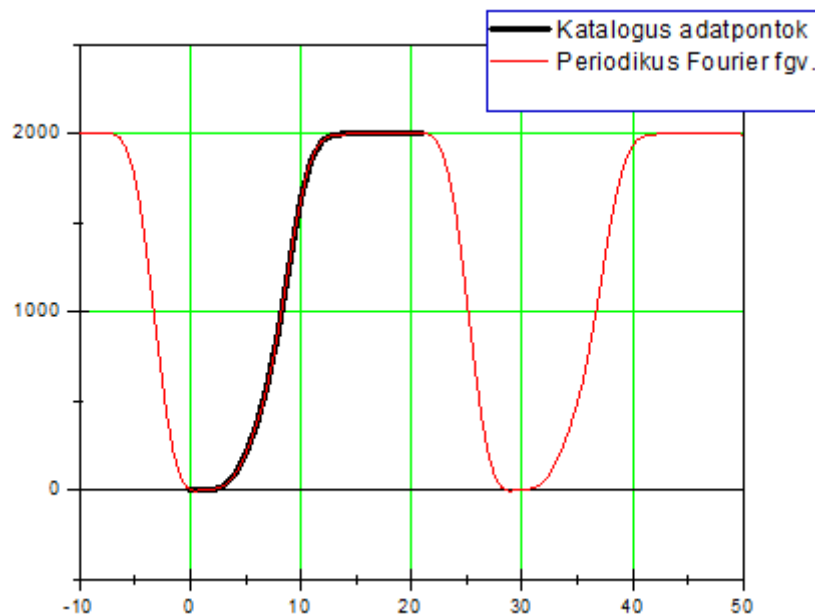
1. $f(x)$ függvény értelmezési intervalluma felbontható véges számú olyan részintervallumra, hogy a függvény ezek mindegyikében folytonos és monoton
2. az $f(x+0)$ és $f(x-0)$ határértékek a függvény minden x szakadási helyén léteznek, akkor az $f(x)$ függvény Fourier sora konvergens, összege a folytonossági helyeken $f(x)$, szakadási helyein $\frac{f(x-0)+f(x+0)}{2}$

Az általunk közelíteni kívánt adatsorra belátható, hogy a Dirichlet feltételek teljesülnek az általunk meghatározni kívánt $0 \leq x \leq 21$ intervallumon. A görbeillesztés elvégzéséhez a Matlab szoftvert használok, melynek ehhez szükséges parancskódját a dolgozat függeléké tartalmazza. Az illesztéshez $n=6$ -ig végeztem el a sorfejtést. A fenti egyenletbe az alábbi változók behelyettesítésével kapható meg a közelítő függvény:

a0	1200
a1	-960
b1	-574,4
a2	-169,3
b2	-208,5
a3	-63,5
b3	134,2
a4	-46,61
b4	68,52
a5	24,84
b5	18,57
a6	14,57
b6	15,04
$2\pi/l$	0,2211

1. táblázat Illesztett Fourier görbe paraméterei

A kapott sort az Origin nevű program segítségével ábrázoltam, mely a 7. ábrán látható. A piros vonal a közelítő függvényt, míg a fekete az eredeti katalógus adatpontokat ábrázolják.



7. ábra Eredeti katalógus és illesztett görbe

A meghatározott függvény segítségével már lehetőség van az egyes teljesítmény adatpontokból szélesség adatokat előállítani. Mivel soktagú trigonometrikus egyenletről van szó, így az x változó kifejezése nem lehetséges. Emiatt egy általam írt VBA alapú Excel program segítségével kerül kiszámításra az adott kimenő teljesítményhez tartozó szélesség (Függelék 8.1).

Ehhez a program az Excel Solver bővítményét futtatja le, melyben az adott y teljesítményhez keresi a legpontosabb x (szél)értéket a korábban meghatározott függvény alapján. A program futtatásához szükséges kódot a [1. függelék] tartalmazza, melyet mind a mért mind az előrejelzett teljesítmény adatokra elvégeztem, melynek köszönhetően kapott mért-előrejelzett szélesség adatok vizsgálatát végeztem.

5 Szélelőrejelzés pontosságának vizsgálata

5.1 Szélelőrejelzés hiba a teljes széltartományon

A mélyebb összefüggések elemzéséhez érdemes megvizsgálni, hogy a szélelőrejelzési hiba milyen eloszlást követ. Ehhez a leginkább szemléletes megoldás a hibaeloszlás vizuális ábrázolása. Az összes előrejelzett és mért szélesebbesség-pár esetében meghatároztam, hogy milyen mértékű eltérés volt közöttük. Ezt az értéket nevezzük pontbeli hibának.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{\text{előrejelz},i} - \varepsilon_{\text{mért},i}$$

Az előrejelzés pontossága függ az időbeli változótól is (általában minél nagyobb az előrejelzési idő, annál pontatlanabb), azonban jelenleg minden adatpont azonos időhorizonton készült. Így az összes adatpontot felhasználva azokat felosztjuk a lent ismertetett módon. Az eltéréseket kategóriákba soroljuk, melyeket az alábbi logika alapján építettem fel:

$$R_{-10} = \{\varepsilon_i, \text{ha } \varepsilon_i \leq -9,5\}$$

$$R_{-9} = \{\varepsilon_i, \text{ha } -9,5 < \varepsilon_i \leq -8,5\}$$

$$R_{-8} = \{\varepsilon_i, \text{ha } -8,5 < \varepsilon_i \leq -7,5\}$$

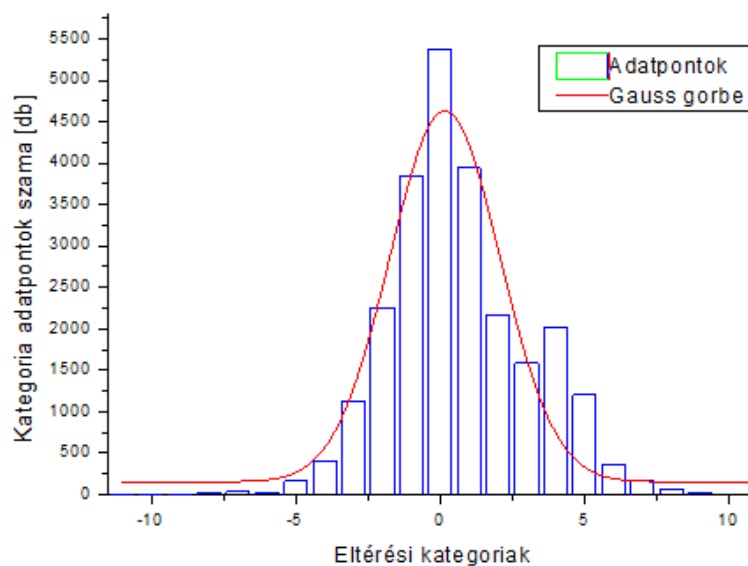
...

$$R_j = \{\varepsilon_i, \text{ha } j - 0,5 < \varepsilon_i \leq j + 0,5\}$$

$$\text{ahol } -9 \leq j \leq 9$$

$$R_{+10} = \{\varepsilon_i, \text{ha } \varepsilon_i > 9,5\}$$

Tehát 1m/s-os kategóriákat hoztam létre és minden pontbeli hibaértéket besoroltam a fenti szabály alapján, például a -0,5 és 0,499 közötti szélesebbesség értékek a „0” osztályba kerültek. A besorolás



8. ábra Mért és előrejelzett szél különbségének sűrűségfüggvénye

eredményét a 2. táblázat, illetve a 8. ábra szemlélteti. A diagram x tengelyén az R_j értékek, míg az y tengelyen az adott osztályba eső pontbeli hibák száma található.

R_{-10}	R_{-9}	R_{-8}	R_{-7}	R_{-6}	R_{-5}	R_{-4}	R_{-3}	R_{-2}	R_{-1}	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8
-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
4	1	13	28	24	155	405	1122	2260	3849	5384	3942	2173	1585	2012	1198	356	163	68

2. táblázat Mért és előrejelzett szél eltérések kategóriákba sorolva

Vizsgálataim során nyilvánvalóvá vált, hogy az általam definiált kategóriákon kívül nincsenek további pontok. Egy Gauss görbét illesztettem a kapott pontsorra, mivel 4m/s-os eltérésnél található kiugró értéket leszámítva ez közelíti leginkább a kapott adatsort. Az így kapott eloszlást valószínűségi sűrűség függvénynek nevezzük (probability density function). Ezen függvényt a szakirodalom a $pdf(\varepsilon)$ formában jelöli, a későbbiekben is így jelenítem meg.

5.2 Szél előrejelzés hiba feltételes sűrűség függvénye

Ahhoz, hogy konkrét, specifikusabb információkat kapjunk a hiba viselkedéséről, annak valószínűségi sűrűség függvényét a teljes tartomány egy rész intervallumán kell megvizsgálni. Ennek érdekében, hogy a függvényt speciális esetekre vonatkoztassuk, és következtetéseket vonhassunk le a mért szélről, az előrejelzett szelet egy konkrét értéken kell definiálnunk. Ez egy ún. feltételes valószínűségi sűrűség függvényhez vezet. A későbbiekben az eltérését a mért szélnek az előrejelzettől ezen függvényekkel tudjuk jellemezni. [24]

Az előrejelzett és mért adatai egy meteorológiai változónak egyszerre egy időben és helyen nem lehetnek függetlenek. Erősen összefüggőnek kell lenniük, mely a legfőbb előfeltétele a pontos előrejelzésnek. Ha definiáljuk az $x_{előrej.}, x_{mért}$ előrejelzett és mért szélesség adatok súlyfüggvényét $f_{mért}(x_{mért}), f_{előrej.}(x_{előrej.})$ -t, akkor azok meghatározott intervallumon vett integráljuk megadja az adott tartományon vett előfordulási valószínűségüket. Ugyanezt a logikát követve egyszerűsített módon is „elvégezhetjük” az integrálást. Ez történt 8. ábrán található szélesség hiba súlyfüggvényével is. A valószínűség meghatározását a kategóriákba való besorolásnak köszönhetően, a meghatározni kívánt tartományba eső kategóriák elemszámának összeadásával is elvégezhetjük. Továbbá a várható és mért szélesség adatpárok egyidejűleg is leírhatók az együttes valószínűségi sűrűségfüggvénnyel $pdf(x_{előrej.}, x_{mért})$ -vel, ami az előrejelzési hibáról is információt adhat. Ez azt jelenti, hogy egy adott $x_{előrej.}$ értékhez a megfelelő $x_{mért}$ előfordulása várhatóan egy intervallumon koncentrálódik $x_{előrej.}$ körül, sokkal inkább, mint hogy bármilyen más lehetséges értéket vegyen fel. Az együttes sűrűség leírást olyan esetekben alkalmazzuk, amikor kettő vagy annál több esemény hatást gyakorol egymásra, és ezek együttes

bekövetkezésének valamilyen kombinációját akarjuk meghatározni. Például ha van A és B eseményem, és meg akarom kapni az $P=(A)$ valószínűséget.

Fontos leszögezni, hogy ahogyan a 5.1 fejezet elején is definiáltam, a szélesebbesség eltérést az előrejelzett értékhez viszonyítjuk, nem pedig fordítva. Ennek az az oka, hogy az előrejelzett értékhez képest szeretném vizsgálni, hogy a valóság mennyiben tér el tőle, azaz a kapott különbség az előrejelzés pontosságát jellemzi. A szélesebbesség feltételes valószínűségi sűrűség függvénye az alábbi képlettel adható meg:

$$pdf(x_{mért}|x_{előrej.}) = \frac{pdf(x_{előrej.}, x_{mért})}{pdf(x_{előrej.})}$$

ahol $pdf(x_{előrej.}, x_{mért})$ a korábban említett együttes valószínűségi sűrűségfüggvény, míg $pdf(x_{előrej.})$ az előrejelzett szél perem sűrűség függvényeként jelenik meg.

A fenti képletben a mért szélesebbesség adatok konkrét $x_{előrej.}$ érték melletti feltételes sűrűségfüggvényét állítom elő. Ez az együttes sűrűségfüggvény és egy konstans hányadosaként adható meg, mely utóbbi maga az $x_{előrej.}$ perem sűrűség függvénye. Ennek köszönhetően tudom a későbbiekben például 5 m/s előrejelzett szélesebbesgnél a mért szél statisztikai tulajdonságait vizsgálni. Természetesen a továbbiakban is a fenti emeleten alapuló már ismertetett szélesebbesség kategóriákba való besorolások módszer alapján fogom ezeket a függvényeket értékelni.

5.3 Teljesítmény előrejelzés hiba sűrűség függvényének előállítás

A szélesebbesség statisztikai tulajdonságainak leírása azért fontos a teljesítmény eloszlása szempontjából, mivel annak elsődleges meghatározó változója. Azonban a teljesítmény oldalon nem várható, hogy a szél eloszlásához hasonló gauss vagy közelítőleg gauss eloszlást kapunk, mivel a két változó közötti összefüggést a nemlineáris szél-teljesítmény görbe adja meg. A következő vizsgálatok a szél-teljesítmény görbére fókuszálnak, vizsgálva azt, hogy milyen módon alakítja át a szél oldali hibát teljesítmény oldali hibává. Definiáljunk egy Δu intervallumot az u szélesebbesség körül, és $\Delta P = P(u+\Delta u)-P(u)$ az általa eredményezett különbség a teljesítmény oldalon. Kis Δu esetén a hozzátartozó ΔP egy u körüli Taylor sorral kifejezhető:

$$\Delta P = \frac{dP}{du}(u)\Delta u$$

Ez az egyenlet általánosan leírja, hogy a szélesebbességben bekövetkező eltérések miként jelennek meg teljesítmény oldalon. Ha a Δu egy kis eltérésnek tekinthető az előrejelzett és mért szélesebbesség között, akkor a Taylor egyenlet alapján a szél-teljesítmény görbe a szélhibát a görbe első

deriváltjának függvényében torzítja a teljesítmény oldalon. Így a szél nagyságától is függ, hogy a szélhiba szórásának nagysága milyen mértékben változik a teljesítmény oldalon.

5.4 Adott szélesség sűrűség függvényének meghatározása

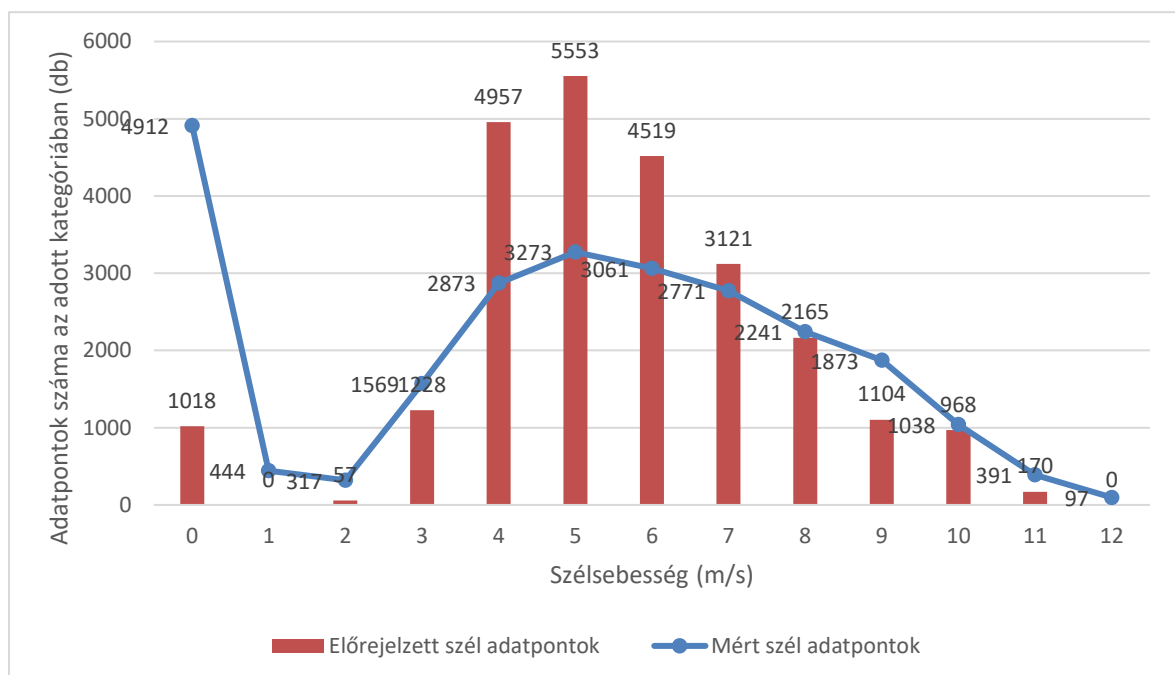
Az előző fejezetben ismertet információk alapján a teljesítmény-szél görbe meredekségétől függ az, hogy a szél oldali hiba milyen mértékű teljesítmény oldali hibát eredményez, ezért ennek vizsgálatára különböző szélességeken is megfigyeltem, hogy milyen teljesítmény eltérési értékeket kapunk. Elsőként a szél oldali eloszlást vizsgáltam, azaz a korábban a 8. ábrán is ábrázolt valószínűségi sűrűség függvényt szélesség-specifikusan határoztam meg, melyet feltételes valószínűségi sűrűség függvénynek nevezünk. Ehhez meg kellett határoznom a vizsgálni kívánt szélességek értékét és számát. Azonban ezt a döntést lényegesen befolyásolja a rendelkezésre álló adatok száma, ugyanis olyan szélességet nincs lehetőségem vizsgálni, amihez értékelhetetlen mennyiségű adat áll rendelkezésre. Ezért a számítások elvégzéséhez rendelkezésre álló 24860 adatként megoszlását a különböző szélességek között a 3. táblázatban és a 8. ábrán szemléltettem. Minden előrejelzett szélesség adat 1m/s-ként definiált intervallumokba lett beosztva, azért, hogy a rendelkezésre álló adatpontok minőségét és mennyiségét a kategóriák segítségével értékelni tudjuk.

Szélesség	Mért szél adatpontok száma	Eloszlás %-os aránya	Előrejelzett szél adatpontok száma	Eloszlás %-os aránya
<0,5	4912	23,9%	1018	4,96%
0,5<x<1,5	444	2,2%	0	0,00%
1,5<x<2,5	317	1,5%	57	0,28%
2,5<x<3,5	1569	7,6%	1228	5,98%
3,5<x<4,5	2873	14,0%	4957	24,13%
4,5<x<5,5	3273	15,9%	5553	27,04%
5,5<x<6,5	3061	14,9%	4519	22,00%
6,5<x<7,5	2771	13,5%	3121	15,19%
7,5<x<8,5	2241	10,9%	2165	10,54%
8,5<x<9,5	1873	9,1%	1104	5,37%
9,5<x<10,5	1038	5,1%	968	4,71%
10,5<x<11,5	391	1,9%	170	0,83%
11,5<x<12,5	97	0,5%	0	0,00%

3. táblázat Mért és előrejelzett szélességek egyes szélesség tartományok szerinti megoszlása

A táblázat az egyes kategóriákban található adatpontok összes adatponthoz képest viszonyított százalékos arányát, míg a diagram a mért és előrejelzett szél közötti viszonyokat szemlélteti érzékletesen.

Jól látható, hogy a teljes szélesség tartományon semmiképpen nem nevezhető egyenletesnek az adatpontok eloszlása, illetve a két pontsor között is jelentős aránybeli különbségek figyelhetők meg. Szembetűnő a mért szélességek esetében a mintegy 24%-os aránnyal rendelkező, 0,5 m/s-nál kisebb szélességű adatpontok száma. Ennek oka lehet karbantartási feladatok elvégzése, üzemzavari problémák, biztonsági leállítás a túl erős szél miatt, illetve maga a szél hiánya. Egy modern szélérőmű esetében [28] alapján az éves karbantartási idő nagyjából 40 óra körül mozog. Ha az előrejelzés készítése során ez nem kerül beépítésre akkor is mindössze 160 adatpontot magyarázna meg a 4912-ből. A 0,5 és 2,5 m/s közötti adatpontok hiánya az adatok előállítási módszerének köszönhető. Mivel a teljesítményekből számoltuk vissza a szélességet, ezért a 0 és 3 m/s közötti szélességet nem lehet megkülönböztetni egymástól, mivel mindegyik értékhez 0 kW teljesítmény rendelhető hozzá. Mindkét szélesség adatsornál a 3,5 és 8,5 m/s közötti szelek leggyakoribb előfordulása dominál, azonban az előrejelzés akár 10%-kal több előforduló kategóriánkénti adatot feltételez, mint amennyi be is következik. Szintén a szélesség adatok számítási folyamatának köszönhető, hogy 12,5 m/s-nál nagyobb szélességekkel nem rendelkezünk. Ennél a sebességnél a leadott teljesítmény majdnem eléri a szélérőmű névleges teljesítményét, ami felett a különböző szélességek meghatározása nem lehetséges.



9. ábra Mért és előrejelzett szélesség adatok megoszlása az egyes „kategóriák” között

Mivel az szélérőmű 3 m/s-os szélesebességtől kezdődően képes teljesítményt leadni, így 5,7,9 és 11 m/s-os szélesebességeket választottam további vizsgálatra. Úgy gondolom ezen szélesebességek esetében elegendő adatpont áll még rendelkezésre következtetések levonásához, illetve a szél-teljesítmény görbe meredek tartományát is teljesen lefedik.

5.4.1 Feltételes sűrűség függvény létrehozása

Nem lehet kizárólag egy konkrét szélesebesség esetében vizsgálni az előrejelzett és mért szél közötti eltérést mivel annyi adatponttal nem rendelkezünk. Például a kizárólag 7 m/s-os szélesebességet felvevő adatpontok száma annyira kevés, hogy abból következtetéseket nem tudunk levonni. Ezért ismételt tartományokat definiálunk, melyek a kiválasztott előrejelzett szélesebességek $\pm 0,5$ m/s-os intervallumát jelenti. A teljesítmény-szél görbe szigmoid alakjának köszönhetően 1 m/s-os eltérés a szél oldalon, a teljesítményben akár 300kW-os differenciát okozhat, ezért a lehető legkisebb, de még elegendő adatponttal rendelkező intervallumok kerültek definiálásra.

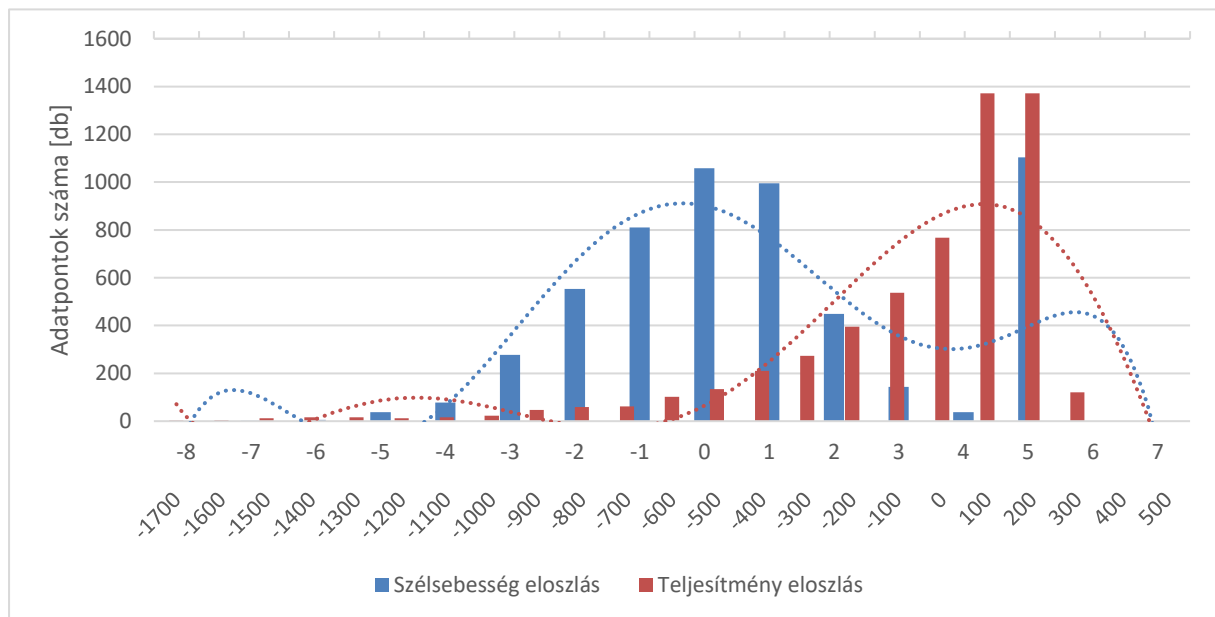
Minden ezen intervallum(ok)ba tartozó mért szélesebesség adatpontok esetében meghatározzuk, hogy mennyi a mért és előrejelzett szélesebesség közötti különbség. Ezáltal egy adott szélesebességre vonatkoztatott feltételes valószínűség eloszlás függvényt kapunk. A különbség képzést a kiválasztott szélesebességekhez tartozó teljesítmények esetében is elvégezzük. Ennek köszönhetően az előrejelzett és mért szél, illetve ezek teljesítményértékeinek különbségeként létrejött adatpárokat kapunk 5,7,9 és 11 m/s körül.

A két eloszlás együttesen 5,7,9 és 11 m/s-on is ábrázolásra került a 8-11 diagramokon.

Minden esetben a kék oszlopdiagram ábrázolja a szélesebesség eloszlását, míg a piros a teljesítmény eloszlást. A kapott oszlopdiagramra 6-od fokú polinomiális illesztéssel trendvonalat is rajzoltam, ezzel a függvény jellegét könnyebben megfigyelhetővé téve. Az x kettős tengelyen a szélesebesség (m/s), illetve alatta a teljesítmény (kW) került ábrázolásra. Az egyes széltartományokba 5553, 3121, 1104 illetve 170 szél-teljesítmény adatpár került besorolásra, amely elégségesnek tekinthető az előrejelzés és a mért szél/teljesítmény közötti eltérések jellegzetességeinek vizsgálatára. A diagramokon mivel az előrejelzett szélesebességhez és teljesítményhez képest vizsgáljuk a mért változókat, ezért a negatív értékek esetében a valóságban az előrejelzett értéktől nagyobb következett be, azaz ez esetben alul lett becsülve az lehetséges érték, míg a pozitív tartományokban felülbecslés történt, a várt érték kisebb mint az előrejelzés.

5.4.2 Feltételes sűrűség függvény 5 m/s előrejelzett szélnél

5m/s-os mért szélesség esetében megfigyelhető, hogy a hibaeloszlás gauss alakot vesz fel 0 m/s-os eltérésnél felvett maximummal. Az itt szemléltetett értékek az előrejelzett és mért szélesség



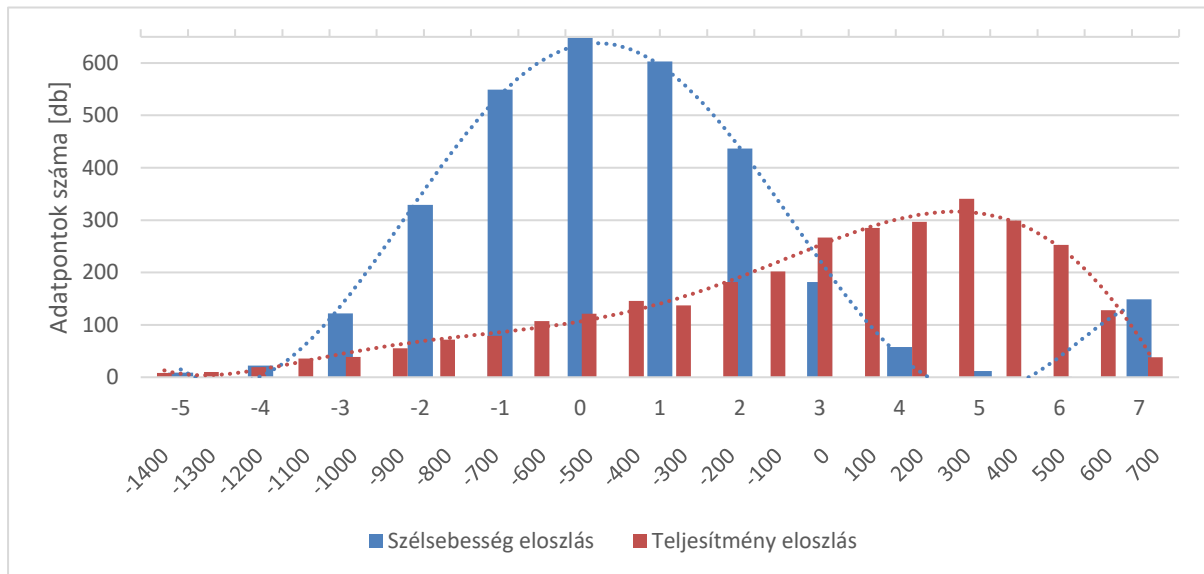
10. ábra Szél- és teljesítmény eltérések eloszlása 5 m/s-nál

különbségeként áll elő, így megállapítható, hogy ebben a széltartományban az előrejelzés közel azonos valószínűséggel becsüli felül illetve alul a lehetséges szél értékét, jellemzően 1-2 m/s-mal eltérve a mért értéktől. Fontos megemlíteni a diagram 5 m/s-nál jelentkezett nagyjából 1100 adatpontot, ami az előrejelzés egy fontos torzító tulajdonságára hívja fel a figyelmet. Az előrejelzés igen gyakran felülbecsüli a szélcsendes időszakokat, ami a további diagramokon is megfigyelhető tendencia lesz. Jelen esetben nagyjából annyiszor volt teljesen pontos az előrejelzés, ahányszor 5 m/s-mal felülbecsülte annak értékét.

A teljesítmény eloszlása közel sem annyira szimmetrikus, mint az eddig megfigyelt diagram. Ennek oka, hogy az 5 m/s-os szélesség környezetében a teljesítmény-szél görbe meredeksége jelentősen változik. Ennek köszönhetően a közel 1100 5 m/s-os felülbecslés adatpont ugyanúgy 200 kW (a teljes beépített teljesítmény 10%-a) előrejelzési hibát eredményez, mint egy mindössze 1 m/s-os alulbecslése a bekövetkezett szélnek. Még jelentősebb mértékű alulbecslés esetén közel exponenciális mértékű teljesítmény hiba jelentkezik. Ennek köszönhető, hogy míg a szélkülönbségek feltételes valószínűségi eloszlása közel szimmetrikus a 0-ra, addig a teljesítmény hiba a 300 kW-os hiány és a 800 kW-os többlettermelés között oszlik el, amely azt jelenti, hogy akár a beépített teljesítmény 30%-ával is többet termelhet egy szélérőmű mindössze a valós szél 3m/s-os alulbecslése miatt.

5.4.3 Feltételes sűrűség függvény 7 m/s előrejelzett szélnél

7m/s-os mért szélességnél a szélesség eloszlásfüggvénye (kék) követi a 8. ábrán a teljes széltartományra meghatározott valószínűségi sűrűség függvényt, azaz szimmetrikus a 0 m/s-os eltérés értékre. Az 5m/s-os eloszlásfüggvényénél is megfigyelt hiba ismételen jelentkezik. Az



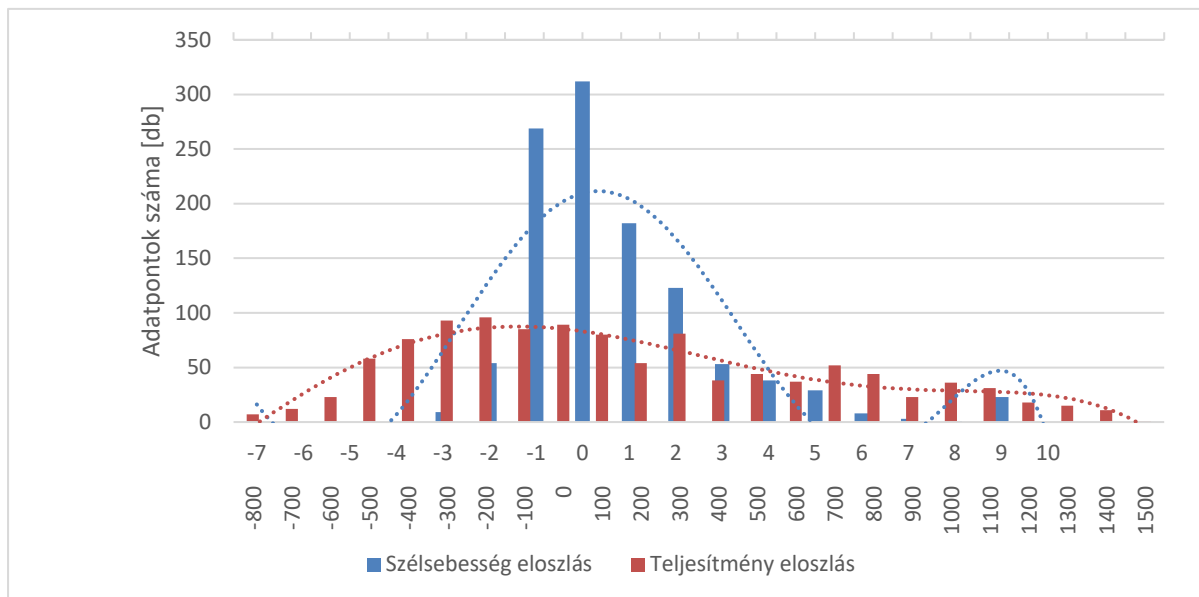
11. ábra Szél- és teljesítmény eltérések eloszlása 7 m/s-nál

előrejelzés a szélcsendes időszakok valószínűségét ilyen várható szélesség esetén is alulbecsüli, aminek köszönhető a kb. 150 adatpont a 7 m/s-os szélesség különbségnél. Ezen folyamat a mért és előrejelzett szélességek gyakoriságát vizsgáló 3. táblázatból is kitűnik. Jól megfigyelhető, hogy míg az előrejelzett szélességek mindössze 4,96%-a esik a 0,5 m/s-nál kisebb tartományba, addig a mért értékek között 23,9%-os ezen tartományban szereplő értékek gyakorisága.

A teljesítmény eltérések eloszlása nagyon hasonlóan viselkedik az 5m/s-nál megfigyelthez. 7m/s-nál a szél-teljesítmény jelleggörbe meredeksége a maximumához közelít, aminek köszönhetően 1m/s-os alulbecslése a várható szélnek mintegy 300 kW-os, 2 m/s-os alulbecslése 700 kW-os eltérést eredményezhet a mért és előrejelzett teljesítményhez képest. Ez annak tekintetében, hogy 7 m/s-nál a turbina nagyjából 600 kW-ot ad le, a 700kW-os eltérés több mint kétszeres leadott teljesítményt jelent! Ezáltal míg felülbecslés esetén a legrosszabb esetben 500-600 kW-os eltérés állhat fent, az ellenkező esetben ez az 1000-1200 kW-ot is elérheti. A szélesség alulbecslésének köszönhetően az esetek 18%-ában 500 kW vagy annál nagyobb volt az eltérés az előrejelzett és a leadott teljesítmény között, többletenergiát betáplálva ezzel a rendszerbe. Ha a több mint 500 kW-tal felülbecsült adatpontokat is hozzáadjuk ehhez az értékhez akkor megállapítható, hogy az esetek 31%-ában az előrejelzés 500 kW-nál nagyobb eltéréssel jelezte előre a várható teljesítmény értékét. Ez a levéli szélpark esetében 6 MW többlettermelést vagy hiányt is jelenthet a rendszerirányító számára.

5.4.4 Feltételes sűrűség függvény 9 m/s előrejelzett szélnél

9 m/s-os előrejelzett szélesség esetén a korábbi két szélességhez képest lényegesen eltérő diagramokat láthatunk. Az előrejelzés inkább felül becsüli a várt szélességet akár 5 m/s-mal is.

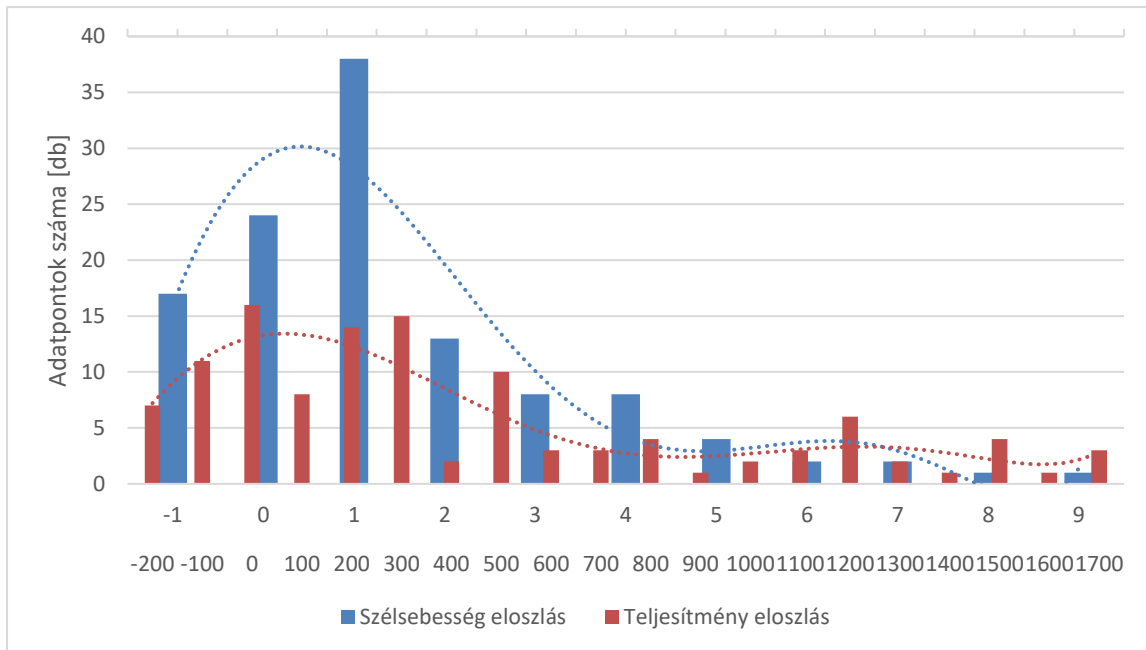


12. ábra Szél- és teljesítmény eltérések eloszlása 9 m/s-nál

Ezzel szemben az esetek 28%-ában teljesen egyezik az előrejelzett és mért szélesség, illetve 28%-os valószínűséggel becsülte alul az előrejelzés 1 m/s-mal a mért. Feltűnő, hogy a korábbi függvényekkel szemben az előrejelzés mintegy 69%-os pontossággal a ± 1 m/s-ot tévedett a mért szélhez képest. Azonban a szél-teljesítmény görbe a 9 m/s-os szél közelében éri el a legnagyobb meredekségét, aminek köszönhetően kis előrejelzési hiba is jelentős teljesítménykülönbséget generál. Emiatt a teljesítmény sűrűség függvény ellaposodott, széles tartományon vesz fel értékeket, aminek köszönhetően akár 600-700 kW teljesítmény többletet vagy 1000-1200 kW hiányt előidézve a villamosenergia-rendszerben. Az 5 és 7 m/s-os sebességekhez hasonlóan továbbra is megfigyelhető – még ha minimálisan is – a szélcsendes időszakok alulbecslése, aminek köszönhetően az esetek 2%-ában a várható 9m/s-os szél helyett nem fúj semmi.

5.4.5 Feltételes sűrűség függvény 11 m/s előrejelzett szélnél

A 11 m/s-os mért szélesség a szél-teljesítmény görbe felső, „telítődő” szakaszán található, azaz a turbina névleges teljesítményéhez közelít a leadott teljesítmény, ezáltal a görbe meredeksége is kisebb. Ez esetben egy nagyságrenddel kevesebb adatpont állt rendelkezésre, mint a 3 korábbi vizsgálati pontban, azonban megállapítható, hogy a mért szélhez képest az előrejelzés inkább felül becsül, többnyire 1 m/s-mal. A diagramot jelentősen torzította 52 db 11 m/s-os eltérés, ami minden bizonnyal mérési hibának, vagy karbantartási folyamatoknak köszönhető. Ezeket a 13. ábrán nem tüntettem fel.



13. ábra Szél- és teljesítmény eltérések eloszlása 11 m/s-nál

Mivel a vizsgált adatpontok közel találhatóak a szélturbina névleges teljesítményéhez, ezért az 1 m/s-os alul becslés 200 kW-os teljesítmény többletet eredményez csak, ahogy a kisebb szélességeknél is megfigyelhettük ezt a tendenciát, a teljesítmény diagram aszimmetrikus. A felül becsült szélesség jellemzően 1-4 m/s-mal volt kisebb a vártnál, azonban ezen a tartományon a szél-teljesítmény görbe meredekségének köszönhetően a teljesítmény diagram gyakorlatilag 100 és 1700 kW között „terül el”. Azonban a teljesítmény eltérések trendjéről nehéz az adatpontok kis száma miatt egyértelmű kijelentéseket megfogalmazni.

5.5 Összegzés

Az 5,7,9 és 11 m/s szélességeknél ábrázolt feltételes sűrűség függvények követik a 8. ábrán is látható jelleget. A teljesítmény hiba függvényét ezzel szemben erősen torzítja a szél-teljesítmény görbe. A korábbi elmélet megalapozásnak megfelelően a görbe kisebb meredekségű szakaszain a szél jelleggörbét követte a teljesítmény jelleggörbe. Azonban a görbe meredek szakaszán a teljesítménygörbe ellaposodik, itt a relatív kis szélesség hiba is jelentős teljesítmény oldali hibát eredményez.

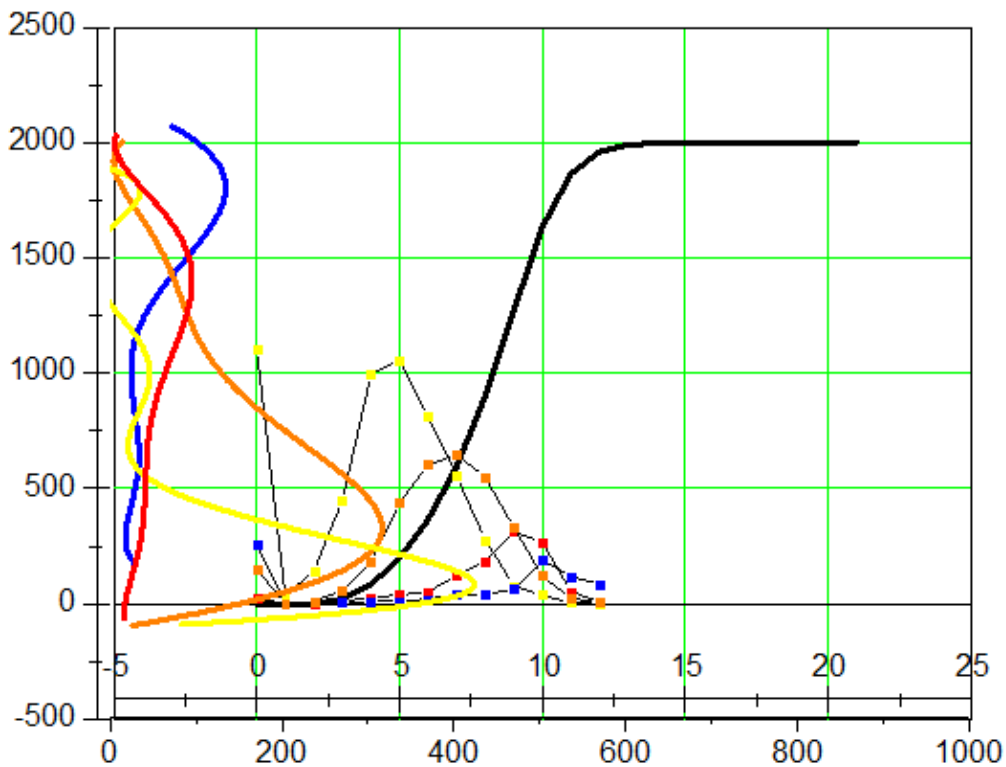
Az eddig elemzett függvények összevetésére a 14. ábrán mind a szél oldali, mind a teljesítmény oldali hibák feltüntetésre kerültek. A diagram ábrázolásához használt Origin program lehetőséget nyújt a különböző típusú függvények eltérő rétegen (layer) való ábrázolására. Az első rétegen a szél-teljesítmény görbe és a szélesség eltérések különböző fix előrejelzett szél körül kerültek ábrázolásra fekete vastag, illetve vékony jelölőnégyzetes vonallal. Ehhez tartozik a belső x-y tengelypár.

A második rétegen a feltételes teljesítmény sűrűségfüggvények figyelhetők meg, melyek $f(y)=x$ alakban kerültek feltüntetésre. Az ábrán egy 6-odfokú polinom közelítést ábrázoltam a függvényeknek, ezzel sokkal inkább átláthatóvá téve a különböző szélességekhez tartozó teljesítménygörbék jellegzetességeit. Az egyes szélességekhez tartozó görbék és színük:

Teljesítmény és szél feltételes sűrűségfüggvény 5 m/s-nál	sárga
Teljesítmény és szél feltételes sűrűségfüggvény 7 m/s-nál	narancssárga
Teljesítmény és szél feltételes sűrűségfüggvény 9 m/s-nál	piros
Teljesítmény és szél feltételes sűrűségfüggvény 11 m/s-nál	kék

4. táblázat Teljesítmény hibamegoszlások színek kódjai

A szélesség görbék az adott vizsgált szélességhez lettek illesztve, így lehetőség van nem csak az adott szélességhez, hanem egymáshoz képest is az eltéréseket megvizsgálni. A teljesítmény



14. ábra Szél- és teljesítmény hibaeloszlások elhelyezkedése a szél-teljesítmény görbe függvényében

függvények szintén a vizsgált szélességhez tartozó katalógus teljesítmény adatponthoz lett illesztve, így a görbék jellege a szél-teljesítmény görbéhez viszonyított elhelyezkedése alapján is vizsgálható. Az illesztett teljesítmény függvények vízszintes tengelyen szereplő értékei nem mérvadók, ugyanis a 11 m/s-os szélhez tartozó görbét felnagyítottam, hogy a jellege még inkább kirajzolódjon. Erre azért volt szükség, mert ebben a pontban egy nagyságrenddel kevesebb adat állt rendelkezésre.

A 14. ábra alapján igazolást nyert az 5. fejezetben megfogalmazott matematikai feltevés. A szél-

teljesítmény görbe 3-5 m/s-os és 10-12 m/s-os szakaszán a teljesítmény is kis tartományon tud csak eltérni az előrejelzettől, míg ugyanez 5 és 9 m/s között gyakorlatilag egy ± 600 kW os tartományon bármit felvehet.

6 Összefoglalás

Dolgozatom során átfogó képet szerettem volna alkotni a szélenergetika iparág jelenlegi helyzetéről, kihívásairól. Úgy gondolom ez sikerült, a hazai szabályozás eseményekben bővelkedő mintegy évtizedes történetének feldolgozásával az olvasó nem csak tényeket ismerhet meg, hanem az azok mögött húzódó szakmai és energiapolitikai érveket.

A dolgozat második harmadában létrehozott teljesítmény adatátalakítási folyamat úgy gondolom segítséget jelenthet bárki számára, aki nem rendelkezik mért és előrejelzett szél és teljesítmény adatokkal, azonban szeretné a kettő közötti összefüggéseket vizsgálni. Ez sok esetben elő is fordulhat, ugyanis a korábban épített szélerőművek esetében sok helyen szélmérő berendezés nem lett kiépítve, így mért széladatok nem mindenhol állnak rendelkezésre.

Az előrejelzett és mért szélességek hibájából adódó teljesítmény eltérések vizsgálatánál úgy gondolom egyértelmű következtetéseket sikerült levonni arra vonatkozóan, hogy a szél-teljesítmény görbe miként ha a két változó viszonyára. Ez alapján a dolgozat további kutatási lehetőségeket rejt magában, amelynek fókuszában olyan hibasávok meghatározása állhat, melynek köszönhetően az előrejelzés pontosabbá válhat. A dolgozatomban megvizsgált szélességek esetében megfigyelhető teljesítmény eltérések tendenciái alapján ezen hibasávok meghatározhatók. Fontos megjegyezni, hogy ehhez a jelenleg vizsgált szélesség tartományok finomítására, illetve további nem valószínűség alapú paraméterek figyelembevételére lenne szükség (pl. szélesség – gondolapozíció közötti összefüggés). Amennyiben a szélerőmű tulajdonos is a jelenleg „megengedett” $\pm 50\%$ -os menetrend eltérés helyett érdekeltté válik a minél pontosabb előrejelzésben, fontossá válhat számára is, hogy egy adott szél előrejelzés mellett tisztában legyen azzal, hogy várhatóan ehhez képest milyen valószínűségű és irányú eltéréssel számolhat. Továbbá a rendszerirányító számára is kiemelten értékes lehet egy leadott menetrend esetében a lehetséges \pm irányú teljesítmény eltérések valószínűségének ismerete. Ez a tartalék opcióinak optimalizálását is elősegítheti, mely költségmegtakarítást eredményezhet.

7 Források

- [1] Global Wind Energy Council: *Global Wind Report 2015* http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf (2016.09.20)
- [2] 2001. évi CX. törvény a villamos energiáról
<http://mkogy.jogtar.hu/?page=show&docid=a0100110.TV> (2016.09.25)
- [3] 56/2002. (XII. 29.) GKM rendelet az átvételi kötelezettség alá eső villamos energia átvételének szabályairól és árainak megállapításáról
http://www.panenerg.hu/webimages/files/56_2002_GKM_rendelet.pdf (2016.09.25)
- [4] Napi.hu internetes hírportál: *Beindult az Inotai szélérőmű*
<http://www.napi.hu/redirectedbyprint/titleunknown.56488.html> (2016.10.10.)
- [5] Fucskó József, Kelemen Ágnes, Bela Györgyi, Kis András: *A forgalmazható zöld bizonyítvány és alternatívái* (Budapest, 2003) http://konyv.uni-corvinus.hu/kti/21_szam.pdf (2016.10.01.)
- [6] Magyar Energia Hivatal Közleménye: *A szélenergiából villamos energiát termelő erőművek engedélyezése* <http://zoldtech.hu/cikkek/20060127meh/dokumentumok/mehkozlemeny.pdf> (2016.09.21.)
- [7] Tar Károly előadása: *A szélenergia magyarországi hasznosításának reális lehetőségei*
http://www.mettars.hu/wp-content/uploads/2012/04/Eloadas120418_Tar.pdf (2016.09.27.)
- [8] 389/2007. Korm. rendelet a megújuló energiaforrásból vagy hulladékból nyert energiával termelt villamos energia, valamint a kapcsoltan termelt villamos energia kötelező átvételéről és átvételi áráról http://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=A0700389.KOR (2016.09.29.)
- [9] Dr. Hartmann Bálint: *Szélérőművek integrálása a villamosenergia-rendszerbe (2012)*
- [10] dr. Tóth Máté, Faludi Wolf Theiss: *Szabályozás szélárnyékban: a hazai szélenergia-szabályozás iránya és tanulságai az új támogatási séma hajnalán* http://www.e-met.hu/files/cikk3191_Toht_Mate_Szabalyozas_szelarnyekban.pdf (2016.10.04.)
- [11] Magyar Narancs online: *Visszavont szélenergia-pályázat – Elfújták*
http://magyarnarancs.hu/belpol/visszavont_szelenergia-palyazat_-_elfujtak-74482 (2016.10.08.)

- [12] Magyar Narancs online: *Energiaipari Változások II. – Bolond szél fúj*
http://magyarnarancs.hu/belpol/energiaipari_valtozasok_ii_-_bolond_szel_fuj-65386 (2016.10.10.)
- [13] Magyarország megújuló energia hasznosítási cselekvési terve 2010-2020 http://2010-2014.kormany.hu/download/2/b9/30000/Megujulo%20Energia_Magyarorszag%20Megujulo%20Energia%20Hasznositasi%20Cselekvesi%20terve%202010_2020%20kiadvany.pdf (2016.10.09.)
- [14] Magyar Narancs online: *Csak ne a szél! – Miért sorvasztja el a kormány a szélerőműveket?*
<http://magyarnarancs.hu/belpol/csak-ne-a-szel-100654> (2016.10.09.)
- [15] Magyar Narancs online: *Az üldözött szél – Miért nem kell a megújuló energia?*
<http://magyarnarancs.hu/bionarancs/az-uldozott-szel-miert-nem-kell-a-megujulo-energia-92723>
(2016.10.10.)
- [16] 2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról
http://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=A0700086.TV (2016.10.15.)
- [17] 165/2016. (VI. 23.) Korm. rendelet a megújuló energiaforrásból termelt villamos energia kötelező átvételi és prémium típusú támogatásáról
http://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=A1600165.KOR×hift=ffffff4&txtreferer=00000001.TXT (2016.10.15.)
- [18] Mavir Zrt.: *A szélerőművi kapacitásbővítés lehetőségei és feltételei a magyar villamosenergia-rendszerben*
- [19] A magyar villamosenergia-rendszer Kereskedelmi Szabályzata (2. számú módosítás)
https://www.eon.hu/download.php?url=download/KerSZab20100701_tiszta.pdf (2016.10.14)
- [20] Hunyár M.- Schmidt I.- Veszprémi K.-Vincze Gyné.: *A megújuló és környezetbarát energetika villamos gépei és szabályozásuk* ISBN 963 420 670 0 Műegyetemi Kiadó Budapest 2001
- [21] Renczes Balázs: *Szélerőművek termelés-előrejelzési módszereinek vizsgálata* (2013)
- [22] Gamesa G90 2MW szélturbina ismertetője <http://www.wind-power-program.com/Library/Turbine%20leaflets/Gamesa/Gamesa%20G90%202mw.pdf> (2016.10.12)
- [23] I.N.Bronstejn, K.A.Szemengyajev: *Matematikai zsebkönyv* ISBN: 963 100 431 7
- [24] Matthias Lange Ulrich Focken: *Physical Approach to Short-Term Wind Power Prediction* (2005)

[25] dr. Ferenczy Miklós: *Valószínűség és alkalmazása*, Nemzeti Tankönyvkiadó Budapest (1998) ISBN 963 18 9065 1

[26] Szabó Zsolt előadása a REKK Energiapolitikai Fórumán: *A megújuló energiatermelés helyzete Magyarországon* http://rekk.hu/downloads/events/Sz.Zs._REKK_20160609_final.pdf (2016.10.17.)

[27] Dr. Hoffmann László előadása: *Szélerőművek közcélú hálózatra csatlakoztatása és üzemeltetése – beruházói tapasztalatok Magyarországon (2002-2009)* http://www.wind-energy-the-facts.org/images/wetfbudapest_12june09_laszlohoffmann.pdf (2016.10.17.)

[28] <http://www.wind-energy-the-facts.org> honlap: *Commissioning, Operation and Maintenance* <http://www.wind-energy-the-facts.org/commissioning-operation-and-maintenance.html> (2016.10.20.)

8 Függelék

8.1 VBA program programkód

```
Sub fuggveny()
```

```
Dim sorszam As Integer  
Dim valtozocella As String  
Dim celcella As String  
Dim inputcella As String
```

```
sorszam = 3
```

```
For sorszam = 1 To 3000 Step 1  
valtozocella = "C" & sorszam  
celcella = "D" & sorszam  
inputcella = Cells(sorszam, 2)
```

```
SolverReset
```

```
SolverOk SetCell:=celcella, MaxMinVal:=3, ValueOf:=inputcella, ByChange:=valtozocella, Engine:=1,  
EngineDesc:="GRG Nonlinear"
```

```
SolverAdd CellRef:=valtozocella, Relation:=3, FormulaText:="0"
```

```
SolverOk SetCell:=celcella, MaxMinVal:=3, ValueOf:=inputcella, ByChange:=valtozocella, Engine:=1,  
EngineDesc:="GRG Nonlinear"
```

```
SolverOk SetCell:=celcella, MaxMinVal:=3, ValueOf:=inputcella, ByChange:=valtozocella, Engine:=1,  
EngineDesc:="GRG Nonlinear"
```

```
SolverSolve Userfinish:=True
```

```
Next
```

```
End Sub
```

8.2 MATLAB közelítés programkódja

```
x=1:1:22
```

```
y=[0 0 0 21.3 84.9 197.3 363.8 594.9 900.8 1274.4 1633 1863 1960.4 1990.4 1997.9 1999.6 2000  
2000 2000 2000 2000 2000]
```

```
f=fit(x(:),y(:),'fourier6')
```

```
f =
```

```
General model Fourier6:
```

```
f(x) =
```

```
a0 + a1*cos(x*w) + b1*sin(x*w) +
```

```
a2*cos(2*x*w) + b2*sin(2*x*w) + a3*cos(3*x*w) + b3*sin(3*x*w) +
```

```
a4*cos(4*x*w) + b4*sin(4*x*w) + a5*cos(5*x*w) + b5*sin(5*x*w) +
```

$$a_6 \cos(6 \cdot x \cdot w) + b_6 \sin(6 \cdot x \cdot w)$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

a0 = 1200 (1146, 1255)
a1 = -960 (-1015, -904.6)
b1 = -574.4 (-668.9, -479.9)
a2 = -169.3 (-226, -112.6)
b2 = -208.5 (-272.9, -144.1)
a3 = -63.05 (-110.6, -15.49)
b3 = 134.2 (106.8, 161.6)
a4 = -46.61 (-74.7, -18.51)
b4 = 68.52 (34.17, 102.9)
a5 = 24.84 (13.65, 36.02)
b5 = 18.57 (2.75, 34.4)
a6 = 14.57 (-1.892, 31.03)
b6 = 15.04 (6.966, 23.11)
w = 0.2211 (0.2026, 0.2397)