



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SZAKDOLGOZAT

A szélenergia felhasználása, onshore és offshore szélerőművek összehasonlítása

OE-AMK

2023

Hallgató neve:

Semjéni József László

Hallgató törzskönyvi száma: T000605/FI12904/A-G



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SAKADOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Semjéni József László

Szakdolgozat száma: [REDACTED]

Törzskönyvi száma: T000605/FI12904/A-G

Neptun kódja: [REDACTED]

Szak: földmérés és földrendező mérnök

Specializáció: Geoinformatika specializáció

A dolgozat címe: Az onshore és offshore szélérőművek összehasonlítása

A dolgozat címe angolul: Comparison between onshore and offshore wind farm

A feladat részletezése:

Szakdolgozatomban bemutatásra kerül a szélérőművek története, fejlődése, működése, kialakításuk összehasonlítása az onshore (szárazföldi) és offshore (vízre telepített) szélérőművek vonatkozásában. Bemutatom a telepítési költségüket és a telepítési sajátosságait, a kapcsolódó európai és hazai jogszabályok közti eltéréseket, és az energiatermelési hatékonyságukat. Végezetül levonom a következtetést az energiatermelés kapcsán betöltött szerepükben.

Intézményi konzulens neve: Dr. Udvardy Péter

Külső konzulens neve: Pál Károly

Munkahelye: Colas Alterra Zrt.

A kiadott téma elévülési határideje: 2026. 02. 10.

Beadási határidő: 2023. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Székesfehérvár, 2023. 10. 25.



[Handwritten signature]

Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2023. 12. 15.

[Handwritten signature]
belső konzulens

külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a dolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült dolgozatban található eredményeket az Óbudai Egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Kelt: Budapest, 2023.12.08.


.....
hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	1
2.	Szélergia hasznosításának története	2
2.1	Bevezető.....	2
2.2	Történelmi áttekintés.....	2
2.3	Energiatermelési bemutatása, célkitűzések.....	3
2.4	Technológia telepítése, szélerőművek szerkezeti felépítése	6
2.5	Telepítés és üzemeltetés költségei	11
2.6	Szélerőmű telepítésének költségei szárazföldön.....	11
2.7	Szélerőmű telepítésének költségei tengeren.....	13
3.	Onshore és offshore szélerőművek	15
3.1	Onshore szélerőművek	15
3.2	Onshore szélerőmű típusai	16
3.3	Offshore szélerőművek	17
3.4	Offshore szélerőművek típusai.....	17
4.	Szélesebesség és annak telepítésre gyakorolt hatása	21
5.	Magyarországi szélerőművek	26
6.	Alkalmazás és jogszabályi háttér.....	27
7.	A szélerőművek hatása környezetünkre	29
7.1	Tájesztétikai szempontok	29
7.2	Zajterhelés	29
7.3	Földtudományi és vízvédelmi szempontok.....	29
7.4	Társadalmi és környezeti kihívások.....	29
7.5	Gazdasági hatások.....	30

8.	Mi lesz a szélerőművekkel (meghibásodás, balesetek, elhasználódás)	32
9.	Egy műszaki hibás torony drónos megközelítése és 3D modellezése	36
10.	Összefoglaló.....	47
11.	Summary.....	48
12.	Köszönetnyilvánítás.....	49
13.	Irodalomjegyzék	50
14.	Ábrajegyzék	52

1. BEVEZETÉS

Szakedolgozatom témájának kiválasztásában nagy szerepet játszott napjaink egyik legaktuálisabb problematikája, az energia egyre növekvő igényeinek kiszolgálása. A népesség növekedése, az ipari termelés fokozódása a jelenlegi energiaforrások alkalmazásával rendkívül drága, mind e mellett elképesztő környezetszennyezéssel jár együtt.

A szélerőművek egy opcionális lehetőséget nyújtanak a megújuló energia kihasználására, környezetünk megóvására, energia függőségünk enyhítésére, és egy zöldebb jövőben élő társadalmi kép megfogalmazására. Az átállás a jelenlegi energiahordozók domináns szerepéről a megújulók irányába fokozatos és hosszan tartó folyamat lesz, hiszen nem csak a gazdaságnak, de az emberek felfogásának is át kell állnia egy felelősségteljes szerepvállalásra a témában. Az energia szektornak fejlesztenie kell magát a speciális megújuló energiák előállításának és szállításának minél költséghatékonyabbá tételére mind az ipari szereplők, mind a magánfogyasztók számára.

A témám kifejtése kapcsán dolgozatomban történelmi kitekintést nyújtok a szélerőművek kialakulásának előzményeire, majd bemutatom a fejlődésüket, az onshore (szárazföldi) és offshore (tengeri) erőművek közti telepítési, műszaki és áram előállítási különbségeket. Kitérek a telepítéshez kapcsolódó környezeti hatásokra, szabályozásokra, az EU és a magyarországi jogszabályi háttér különbözőségére. Bemutatom a magyarországi szélerőművek jelenlegi helyzetét elhelyezkedés, termelés szempontjából.

Fő vizsgálati szempontom a szélerőművek telepítése kapcsán megvizsgálni a szélességeket visszamenőlegesen 5 év távlatában az európai unió területén 10 m, 100 m és 250 m magasságokban és ebből kapott értékek elemzésével meghatározni a potenciálisan kiaknázzható területeket. Valamint egy sérült offshore szélerőmű kapcsán készítettem egy 3D modellt, melynek elemzésével a bekövetkezett hibák utáni helyreállítás menetét mutatom be.

2. SZÉLENERGIA HASZNOSÍTÁSÁNAK TÖRTÉNETE

2.1 Bevezető

Napjainkban egyre nagyobb figyelmet fordítunk a környezet terhelés globális problémáira, a szennyezések következményeire, a kibocsátott üvegházhatások mennyiségére, a fosszilis energiahordozók lecserélésére, megújuló, zöld, tiszta energiaforrások alkalmazására. Ezen folyamatok átalakítására nem csak politikai, de erős társadalmi nyomás is telepszik, hiszen a felgyorsult felmelegedés hatásait egyre többet és több helyen lehet érzékelni. Ennek hatására a hétköznapi ember fejében is elindulnak olyan folyamatok, melyek az emberi faj hosszú fennmaradásának érdekében cselekvésre késztetnek.

Hamar tudatossá vált, hogy a fosszilis energiahordozók kitermelése nem fenntartható folyamat, előbb utóbb szembesülnünk kell végletességükkel, így minél hamarább át kell térnünk egyre növekvő szükségleteink biztosítása érdekében újrahasznosítható, megújuló energiákra. Alternatívaként felhasználható források lehetnek a szélenergia, napenergia, vízenergia, geotermikus energia, biomassa- és a nukleáris energia.

2.2 Történelmi áttekintés

A szélnek mindig is fontos és meghatározó szerepe volt az emberiség történelme során. Elsőnek az egyiptomiak használták vitorlás hajók meghajtására, majd innen véve az ötletet készültek el az első szélmalmok Afganisztánban. A perzsa szélerőművek az állandó egyirányú szélre készültek, ráadásul ezen a területen a széliránnyal szemben felállítva több darabot is telepítettek, úgy, hogy nem voltak egymásra zavaró hatással. Korábban csak öntözésre és a gabona megőrlésére használták őket. Európában a 9. században Angliából terjedt el, de legnépszerűbb a helyzeti adottságai alapján Hollandiában lett. Egyrészt a parti fekvése kapcsán az állandóan érkező nyugati szelek bőségesen ellátták a szélmalmok energiával, másrészt a mélyebben fekvő településeken vízáttemelési funkciókat is elláttak.

A szélenergia a legkisebb környezeti terhelés mellett állít elő nagy mennyiségű villamos energiát, mely kapcsán potenciálisan a leggyorsabban kapacitásbővítésre alkalmas energiatermelés szempontjából.

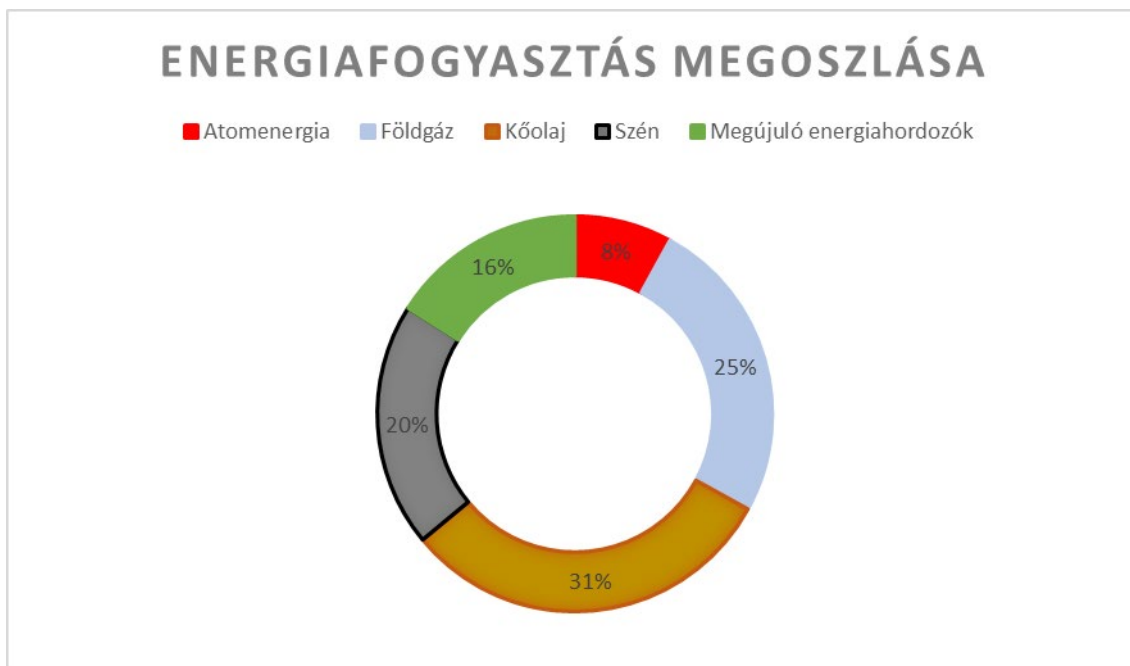
A szélenergia a levegő sűrűségével arányos, tehát magasabban ugyanahhoz a szélsébséghez kevesebb energia társul, vagyis fontos a nagy szélsébségű helyek kiválasztása. Az erőművek a szél erejének max. 60%-át képesek hasznosítani, azonban ez a gyakorlatban 20 - 30% hatásfokot jelent. A turbinák teljesítménye alapvetően függ a szélsébségtől, ezért a szél erőművek helyének optimalizálása a gazdaságosság szempontjából fontos jelentőséggel bír.

2.3 Energiatermelési bemutatása, célkitűzések

Míg Magyarországon $160 - 180 \text{ W/m}^2$ szél potenciállal lehet számolni, addig Észak- és Nyugat Európában $600 - 800 \text{ W/m}^2$ ez az érték. Ennek megfelelően hazánkban a magasabb erőművek építése jelentheti a megoldást, azonban ez nagyobb költségvonzata külső finanszírozási forrásokat vagy jelentős magántőke bevonást igényelne.

A szél energiatermelése ma már a legolcsóbbak közé tartozik a világon. 2019-ben a szél erőművek kapacitása 651 GW volt, ami 1.404 TWh energiát termelt.

Az összes megújuló energiaforrás a 2019-es adatok alapján mintegy 6.700 TWh energiát termelt az atomenergia 2.500 TWh eredményével szemben.



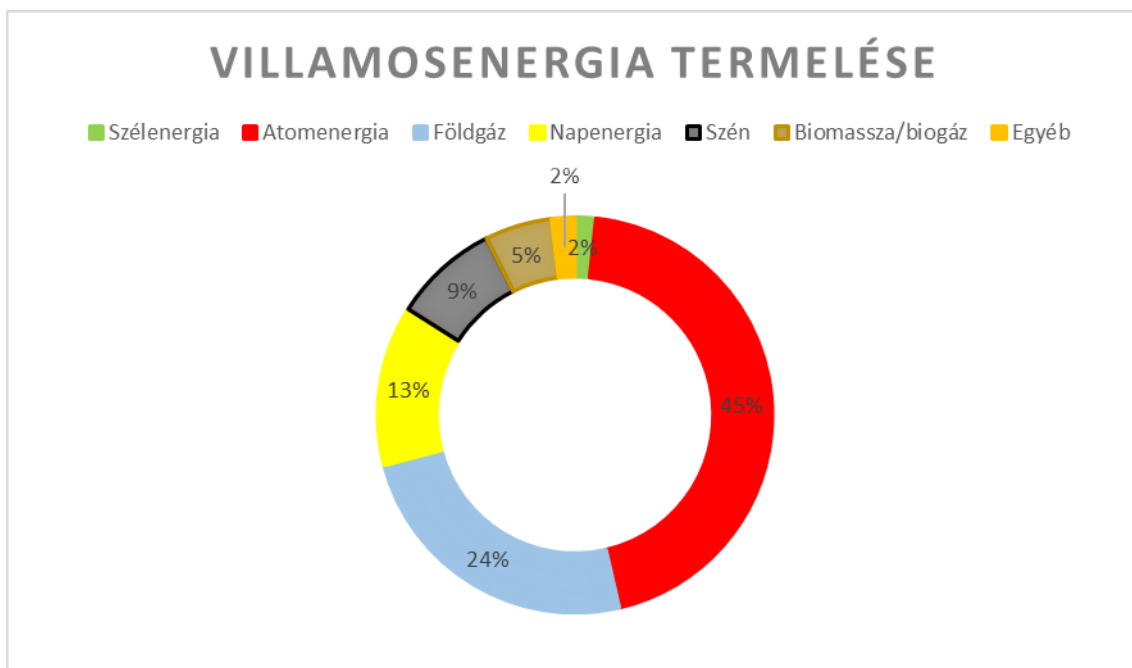
1. ábra: A világ energiafogyasztásának megoszlása [saját ábra]

Ahogy az ábrából is jól látható, energiafogyasztás szempontjából jelenleg még hangsúlyosak a fosszilis energiahordozók több mint 75%-os arányukkal, míg a megújuló energiaforrások és az atomenergia együttesen is csupán alig több mint 20%-os részesedést kap a piacból. [1. ábra]

Az Európai Unió célkitűzései között szerepel, hogy 2030-ra a megújuló energiaforrások felhasználása 32% felett lesz az összes energiafogyasztásban, 2050-re pedig a teljes karbonsemlegesség a cél. Az elhelyezkedést és domborzati viszonyokat figyelembe véve fontos megjegyezni, hogy a 2030-as célok eléréséhez az európai tengerek csupán 3%-ra lenne szükség.

Jelenlegi állapotok tükrében Dánia tart a legközelebb az előirányzott célhoz, ugyanis a villamos energia felhasználásának 48%-át szélerőművekkel állítja elő. Utána következő pár ország, Írország, Németország, Portugália, Egyesült Királyság és Spanyolország melyek esetében a szélenergiára a több mint 20%-al képviselteti magát. A többi országban ez alatti százalékos arányok figyelhetőek meg. Az offshore szélerőművek aránya fokozatosan növekszik az újonnan épülő erőművek között, lassan meghaladja a 25%-ot. Ennek

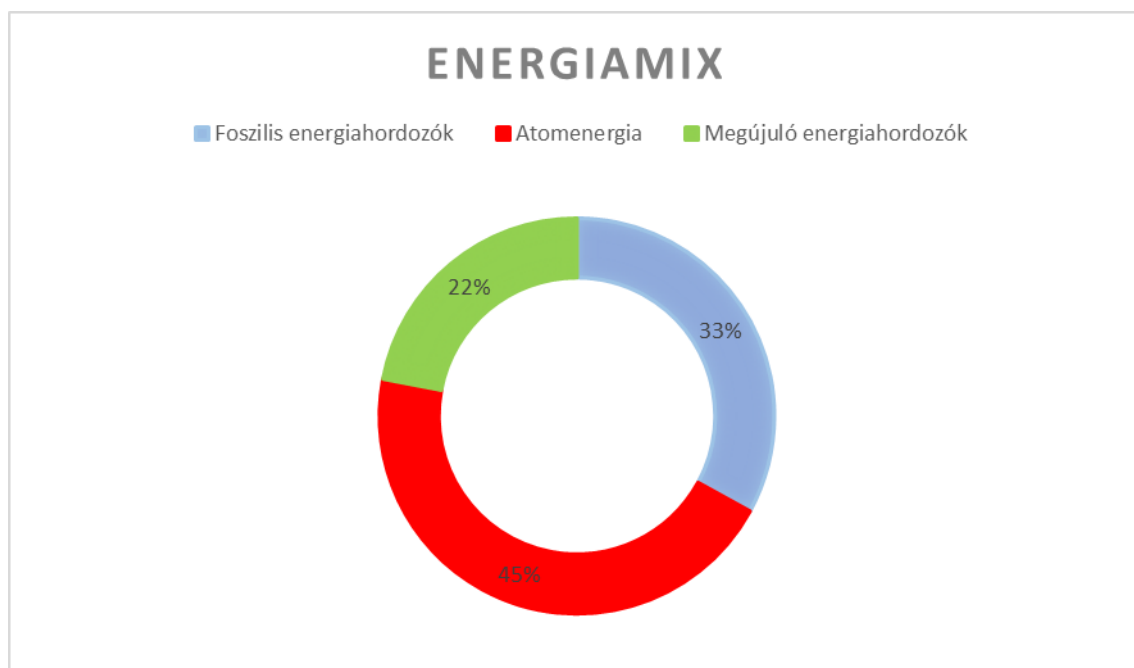
az az oka, hogy a korábban említett technológiai fejlődés lehetővé tette minél nagyobb energiatermelést generáló tornyok megépítését, így nem csak arányában, hanem a megtermelt villamosenergia mennyiségében is jóval felülmúlja a szárazföldi társaikét. Bőven van még kiaknázzható terület és kapacitás mind szárazföldön mind a tengerekben.



2. ábra: Magyarország villamosenergia termelése [saját ábra]

A magyar villamosenergia termelését hét fő terület állítja elő. [2. ábra] Jelentőségüket tekintve legfontosabb az atomenergia, mely szinte az össztermelés felét, 45%-át adja. Ezt követi a földgáz 24%, napenergia 13%, szén 9%, biomassa 5%, szélenergia 2% és egyéb 2% hozzájárulással.

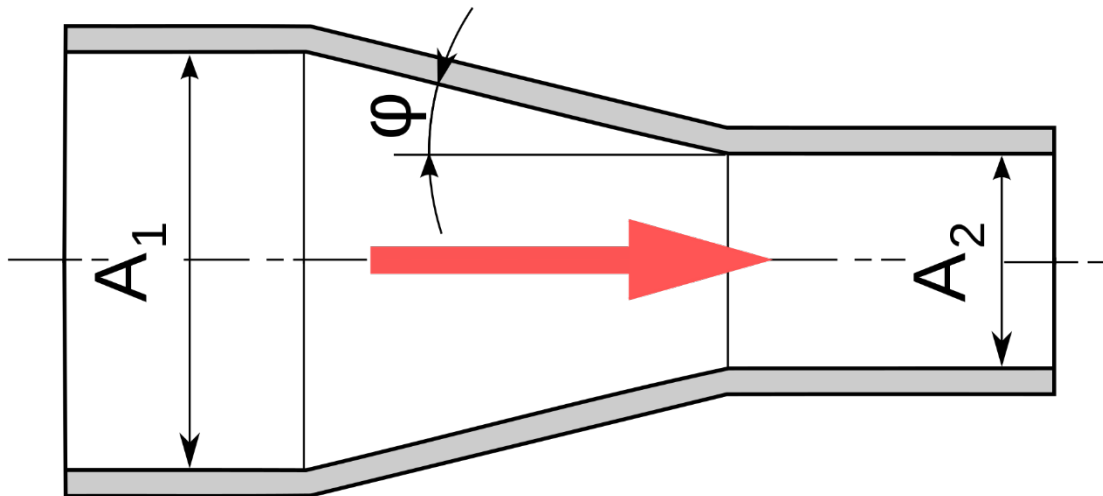
Magyarországon az összes energiatermelés 22%-át a megújuló energiaforrások teszik ki, az atomenergiát is, ha ide számoljuk, mint tiszta energiaforrást akkor az össztermelés 67%-a karbonsemleges forrásból származik. [3. ábra]



3. ábra: Magyarországi energiamix [saját ábra]

2.4 Technológia telepítése, szél erőművek szerkezeti felépítése

A szél mozgási energiáját a szél erőművek villamos energiává alakítják át. A megtermelt áramot ezután vagy akkumulátorokban tárolják vagy a hálózatra közvetlen feltáplálásra kerül. Létezik úgynevezett deflektoros és konfúzoros besűrítéses [4. ábra] eljárás, mely a szélenergiát egy nagy keresztmetszetből egy kisebbre leszűkíti, ezáltal felgyorsítja, és a végén elhelyezett turbina meghajtásával alakítja át energiává. Ennek a rendszernek van egy új, napenergiás változata, mely a napsugárzás hőjét a napkollektor toronyban való vége felé tereli, és az így felmelegedett levegő sebessége indítja be és működteti az ott elhelyezett turbinákat.



4. ábra: Konfúzoros besűrítés ábrája [<http://www.wikipedia.org>]

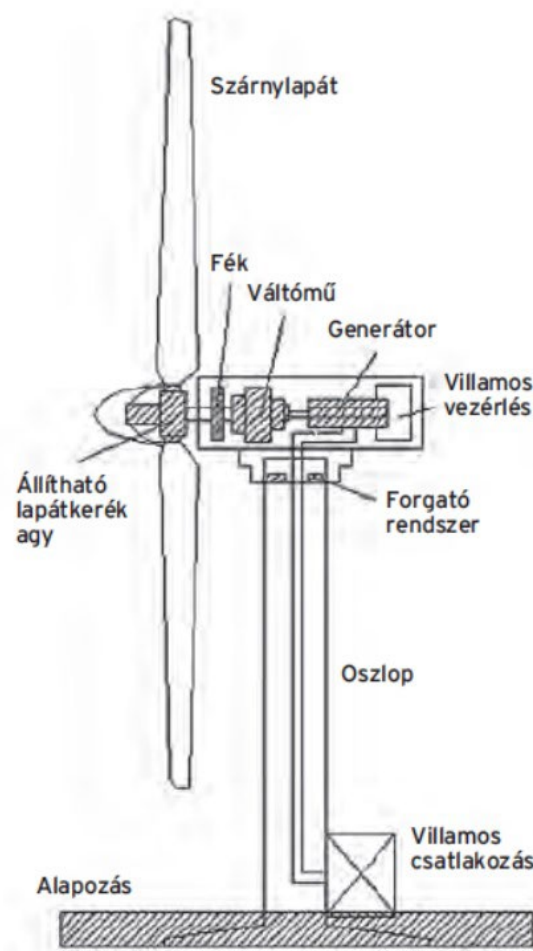
Szélerőművek telepítésének megkezdése előtt, a helyszín kiválasztásakor meteorológiai szélmérési adatsorokat elemeznek. Ezt a helyszíni mérések követik, majd a kapott eredményeket szélrózsán jelenítik meg, ahol szélsébséget, szélsébség átlagot és eloszlást vesznek figyelembe. Ez a folyamat akár több évig is eltarthat és a rotormagasság szintjén történnek mérések.

Hazánk a nyugati, mérsékelt szél övezetben fekszik, ahol 10 méter magasságban mérteknek megfelelően a szélsébség évi átlaga 7 - 15 km/h között mozog. A szél napok száma több mint 100, melyet a magasság növekedésével egyre kevésbé befolyásolják a domborzati és az épített környezeti sajátosságok. A korábbi alacsonyabb 50 - 100 méter magas szélturbinák esetében ennek sokkal nagyobb jelentősége volt, mint a mostani nagyobb 150 – 200 méter magas tornyoknak. A szélturbinák magassága napjainkban azonban már meghaladhatja a 200 méteres magasságot, de előfordulnak extrém magas 250 méterig kúszó tornyok is. Vannak érzékeny és kevésbé szélérzékeny turbinák, az előbbiek már közepes szélsébségnél 70 km/h lekapcsolnak, míg mások akár 120 km/h-ig is képesek üzemelni, de néhány tengerre telepített példány extrém körülmények között, akár 240 km/h tájfunban is üzemelni képes.

Átlagos szélerőmű alapját sokszög alakú vasbeton szerkezet alkotja, mely minimum 250 - 300 m³ vasbetonból készül, átmérője 10 - 15 méter között változik és több mint 3

méter mélyen fekszik a talajban a toronymagasság függvényében. Az alaptól felfelé a gondoláig a torony 5 - 6 elemből áll és átmérője folyamatosan beszűkül. A rotorok a gondolán foglalnak helyet, mely tollainak átmérője manapság 100 méter felett is lehet. A szél-erőművekhez a megközelítést segítő szervízút, valamint egy trafóház tartozik. A szél-erőművek az alábbi nagyobb szerkezeti egységekből állnak: [5. ábra]

- Szélturbina lapátok alapanyaga üvegszál, vagy epoxigyanta, formavilágban viszatükröződik a repülőgépek szárnyainak alakja, mely aerodinamikailag a hatásfok növeléséhez járul hozzá az által, hogy könnyű, üreges, nagy mechanikai ellenálló képességű.
- A generátorház, más néven gondola, a torony tetején található, itt történik a mozgási energia villamos energiává való átalakítása. Itt található a hajtómű, tengelykapcsolók, generátor, irányváltók és az elektronikai-, irányítástechnikai rész. A szél hatására forgó mozgást végző lapátok meghajtják a főtengelyt, melynek lassú mozgását a hajtómű felgyorsítja és így kapcsolódik a generátorhoz. A generátorban történik meg a villamosenergia előállítása.
- Maga a torony rész napjainkra egyre növekvő magasságokba tör. Anyaga rozsdamentes acélszerkezet. Frekvenciájának eltérőnek kell lennie a forgó részek frekvenciájától. [6. ábra]
- Megemlítendő a gyártók által használt SHP (Self Healing Paint) megoldások, amik a kisebb és közepes sérülések megoldására fejlesztettek. Ez egy polimer festék, amely, ha nincs extrém behatásnak kitéve a felület, akkor képes eredeti formáját visszanyerni és ezzel a mikro repedéseket, karcolásokat helyreállítani beavatkozás nélkül.



5. ábra: Szélérőmű metszete [<http://www.agrarium7.hu>]

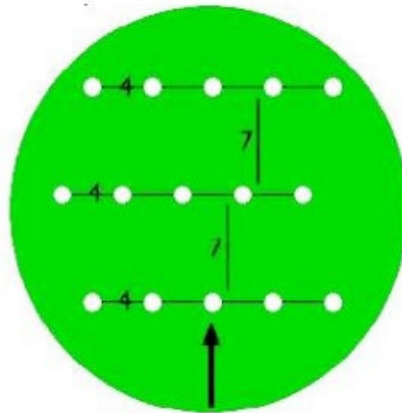
A telepítési lehetőségek viszonylatában Magyarország természeti adottságai eltérnek más európai országokétól, ahol már jelentős számban működnek szélérőművek. Ezek az eltérések azért mutatkoznak meg, mert például energetikai szempontból hazánkban a kontinens belsejében kedvezőtlenebbek a szélviszonyok, valamint hasznosításuk is kevésbé vált jellemzővé szemben a tengerparttal rendelkező országokkal.

Településhálózatunk sűrűsége, természetvédelmi területeink mozaikszerűsége gátló tényező, ugyanis kevés az olyan településektől és közlekedési hálózatoktól távoli, kevésbé lakott terület, ahová szélérőművek telepíthetőek, valamint a megbolygatott természeti környezet regenerálódása is lassabb.



6. ábra: Szélerőmű komplex működési ábrája [http://www.nrgreport.com]

Telepítéskor figyelembe kell venni az úgynevezett „park hatást”. Ez az egyes széltornyok egymásra káros befolyást gyakorló szélárnyékoló hatása, mely esetben vagy kitarthatják a mögöttük lévő torony lapátjainak a szél befogását, vagy turbulenciát keltenek, mely szintén torzítja a szél sebességét és negatívan befolyásolja a termelési értékeket. Ezért akár egy - másfél kilométer távolságot is tartani kell a szélturbínák között a zavaró hatások kiküszöbölésére. Általában a rotorátmérő 4 - 7 szeresével számolnak egymástól való távolság, és az uralkodó szélirány tekintetében. Ahogy az látható, a szélirányra mérőleges, egymás mellett elhelyezkedő szélerőműveket elég négyszeres, a szélirányban lévő egymás mögöttieket pedig hétszeres távolságra telepíteni, mozaikos elosztásban. [7. ábra] [1]



7. ábra: Telepítési rajz a park hatás elkerülése érdekében [<http://www.dromstorre.dk>]

2.5 Telepítés és üzemeltetés költségei

A globálisan telepített szél erőművek átlagárai mintegy 35%-kal csökkentek az elmúlt 10 év során. Mindezek mellett az éves kihasználtsági kapacitás is növekedett, ami annak tudható be, hogy egyre nagyobb és modernebb erőművek jelentek meg a piacon, amelyek kisebb szélességre is képesek reagálni, valamint magasságuk hatására jobb széladottságú régiókat is elérnek, és mintegy 45%-kal több energiát termelnek meg ez által. A technológiai fejlődés modellezését figyelembe véve az üzemeltetési költségek további csökkenése kalkulálható 2030-ig további 35%-kal a kitűzött karbonsemlegességi cél eléréséig 2050-ig 50%-kal.

A magas telepítési költségek miatt a szélenergia felhasználására irányuló projekteket befektetési bankok, államok és kis esetben befektetők finanszírozzák. Üzemeltetésre egyre több speciálisan csak szél erőművekkel foglalkozó cég alakul, ahol speciális szak-tudással rendelkező, nehéz-, extrém körülmények között dolgozni képes emberek végzik a feladatukat. Ezen feladatoknak megfelelően alakulnak a bérezések is. Átlagosan 3000 euro körül keresnek, de speciális esetekben elérheti a 8000 eurot is a fizetésük.

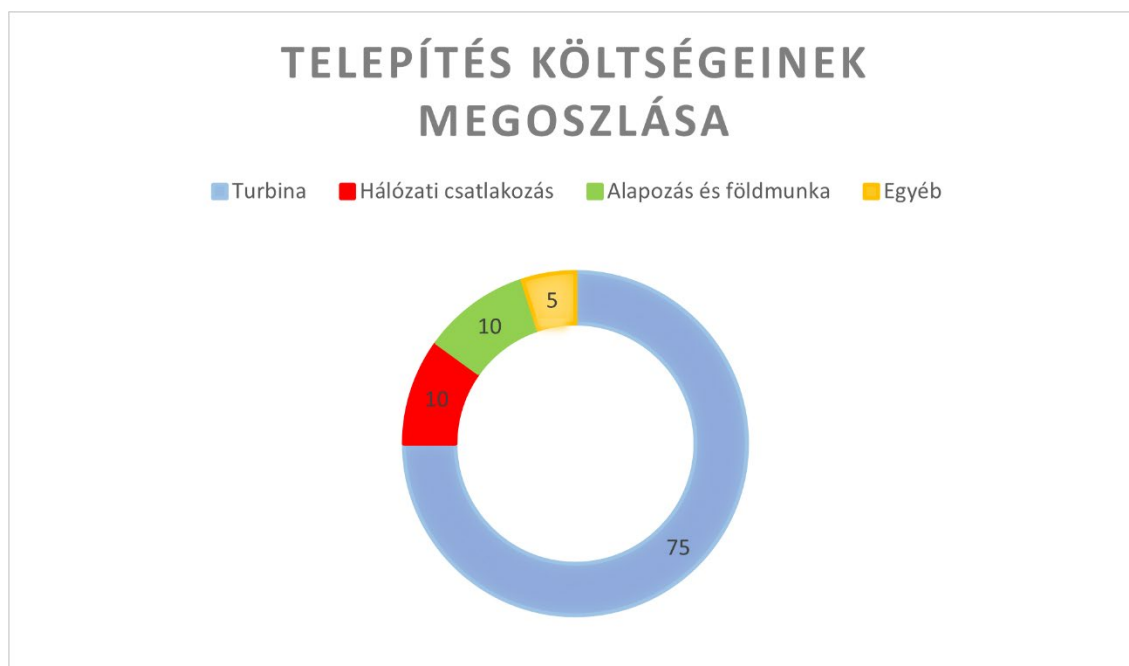
2.6 Szél erőmű telepítésének költségei szárazföldön

A szél erőmű beruházási költségek MW-onként számolva közel 500 millió forintra tehetőek. Ezen belül az alábbiak szerint oszlanak meg a kiadások. Legnagyobb arányban

75%-os részesedéssel maga a turbina veszi ki a szerepét a költségeknek. Ezt követi a hálózati csatlakozás kiépítése és annak díja, közel 10%-kal, majd az alapozás és a földmunka együttesen szintén 10%-kal. Kisebb, egyéb kategóriába tartozó tételek, mint például a villanszerelési költségek 1,5%, a tanácsadás 1%, pénzügyi költségek 1%, kiszolgáló utak 1% és irányítástechnika 0,5% arányban. Azonban a telepítési költségek országonként eltérőek, legalacsonyabb Dániában és legdrágább Hollandiában. [8. ábra]

Az üzemeltetési és karbantartási költségek (biztosítás, rendszer javítás és karbantartás, alkatrészek, adminisztráció) a turbinák éves költségének jelentős részét teszik ki, ez modernebb technológiák esetében 10 - 15%, régebbi és idősebb szerkezetek esetében 20 - 25%-át is kiteheti az életciklus alatt megtermelt áram költségeknek. A költségek megoszlási aránya pedig úgy alakul, hogy biztosításra a költségek 35%-a, szervizelésre 28%-a, javítások és alkatrészek cseréjére 12%-a, adminisztrációra 11%-a, egyéb kiadásokra 14%-a került ráfordításra.

A szélérőművek által termelt energia költségének megoszlása szintén a partszakaszoktól való távolság függvényében írható le.



8. ábra: Telepítés Költségeinek megoszlása [saját ábra]

2.7 Szélerőmű telepítésének költségei tengeren

A tengerbe telepített beruházás költségei MW-onként megközelítőleg 700 millió forintba kerülnek, de nem ritka a több milliárdos bekerülési költség sem. Ez közel minimum 40%-os többletköltség a szárazföldi telepítésekhez viszonyítva. A két típusú beruházás fő különbségei közé tartozik egyrészt a tengeri turbinák alapozási eljárásának drágasága., mely a tenger mélységétől és az építendő alapok típusától függ. Míg szárazföldi turbinák esetében az alapozás 6% részesedést tett ki a projekt összköltségéből, addig ez a vízalatti alapozás kapcsán 20% körülire tehető, tehát lényegesen drágább. Másrészt a kiépítendő tengerparti kábelek és transzformátor állomások megnövelik a költségeket, melyek a teljes projekt költség 20%-át teszik ki. A beruházás költségeinek itt is a csökkenése figyelhető meg, mely az elmúlt évek során 15%-kal lett kevesebb.

Ugyan a beruházási költségek magasabbak, de ezt ellensúlyozandó a turbinák villamosenergia termelési is magasabb a nagyobb tengeri szélesebségek miatt. Míg szárazföldi telepítés esetében az éves teljes terhelés 2000 - 2300 óra, addig offshore telepítés esetén ez meghaladhatja a 3000 órát.

Mindkét esetben a turbina 90%-át kitevő acél lecserélése, és könnyebb, újrahasznosítható szerkezetek bevezetése vihetné el az szélérőmű beruházásokat a költség csökkenő irányba, ráadásul sokkal kisebb környezet terhelés mellett.

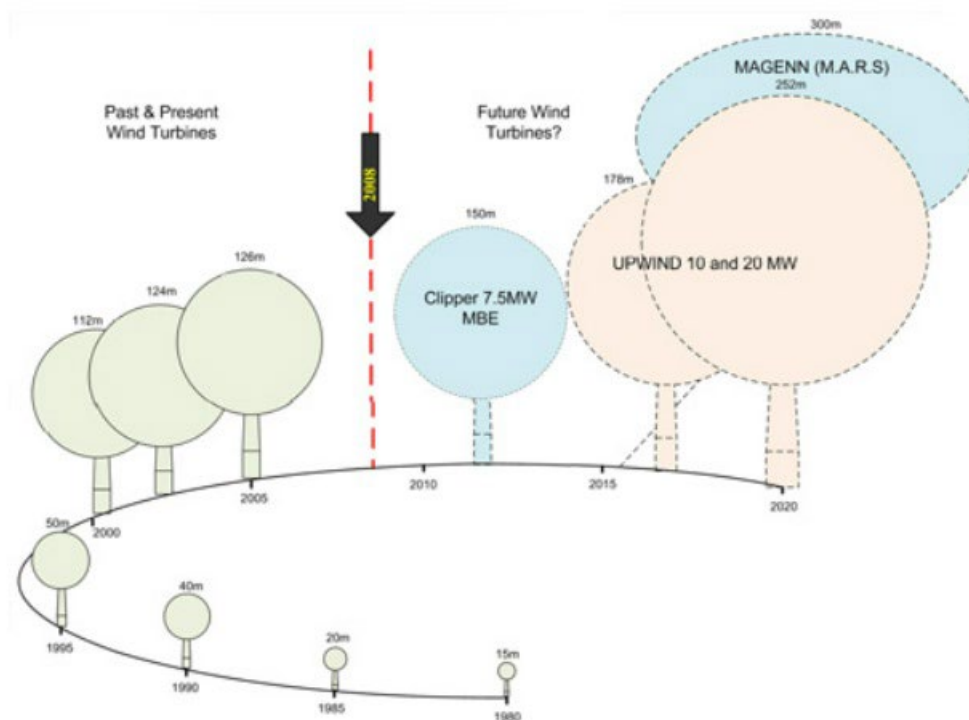
A telepítés folyamata a teherviselő platform tengerfenékre helyezésével indul. Ezeket lefúrják a tengerfenékbe, közepéből kiszivattyúzzák a vizet és betonnal feltöltik a megfelelő stabilitás eléréséhez. A telepítés után érkezik a darus hajó, amely egy hajó és egy úszó sziget is egyben. A saját pilléreit leengedve megtámaszkodik a tengerfenéken, és a hajótestet kiemeli a vízből olyan magasba, hogy a rajta található daru elérje a turbina legmagasabb pontját is. Ez a feladat 2 – 3 napot is igénybe vesz, ezután kezdhetik meg a munkájukat a technikusok, akik összekötik és beüzemelik a rendszereket. A hajó bérlete és a 24 órás munkavégzés borzalmas összegeket emészt fel. [2]

3. ONSHORE ÉS OFFSHORE SZÉLERŐMŰVEK

A szélerőműveknek két típusát különböztetjük meg a szárazföldi és a tengerben elhelyezetteket. Mindkét típusra ugyan az a gyártási technológia és anyagfelhasználás jellemző, a különbséget a telepítés kapcsán való terület kijelölés, előkészítés, helyszínre szállítás, a toronymagasság és a lapátok hossza, valamint a jogi szabályozások jelentik.

3.1 Onshore szélerőművek

A szélerőművek méretnövekedése kapcsán, a korábban leginkább partközeli területeken megfigyelhető, a táji elemek dominanciáját képviselő 100 méter magasságot és 50 – 90 méter lapáthosszakat is elérő erőművek egyre jobban meghódították a szárazföld belsajét is. A gazdaságossági faktort, valamint a tájvédelmi előírásokat figyelembe véve egyre elterjedtebbé váltak a szélfarmok, ahol turbina csoportokkal lehet találkozni. A decentralizáltságot felváltotta a centralizáltság. A kezdetleges 15 méteres toronymagasságok 30 év alatt megtriplázódtak, nem ritka a 150 méteres toronymagasság, napjainkban pedig már ennél is magasra törnek a tengerek gigantikus szélerőművei. A magasság növekedésével hatványozottan nő a megtermelt energia mennyisége. [9. ábra]



9. ábra: Szélérőművek változása 1980 és 2022 között [<http://www.scirp.org>]

3.2 Onshore szélérőmű típusai

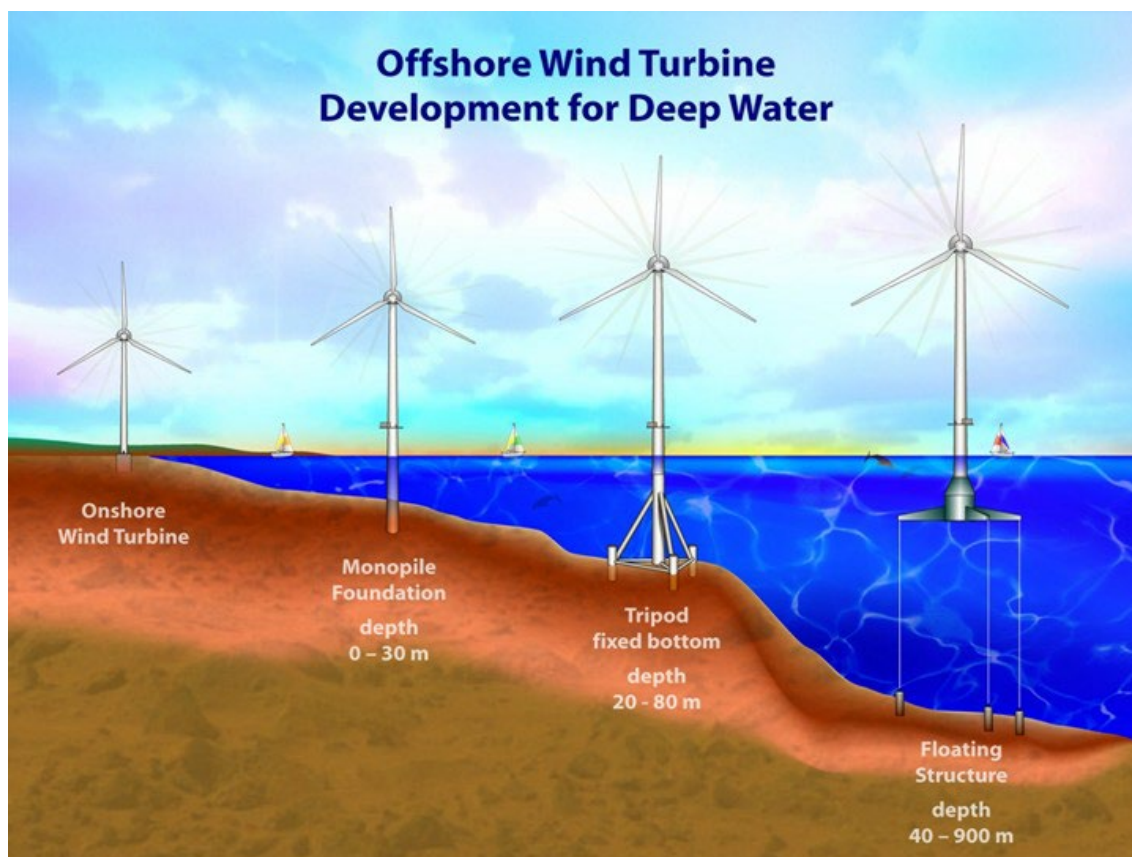
Onshore szélérőművek telepítése kapcsán alapvetően síkföldi és hegyvidéki területek jöhetnek szóba. Értelmszerűen a hegyi telepítés és az infrastruktúra kiépítése sokkal nehezebb feladat és jelentősebb költségekkel is jár, akár 20 százalékkal is megemelheti a telepítés árát. Nagy figyelmet kell fordítani a szélesebbégi mutatók mellett arra, hogy milyen épített és természeti környezet közelébe, milyen szerkezetű fogadó felületre kerül megtervezésre. Milyenek a megközelíthetőségi viszonyok mind a szállítás/építés, mind a későbbi karbantartás szempontjából. A fogadó felületen a talaj minőségének, ez által annak gazdasági szempontból való hasznosítására kell odafigyelni. Jó minőségű termőföldek helyett, mezőgazdasági kultúrák hasznosítására kevésbé, vagy egyáltalán nem alkalmas területek kijelölése a cél. [3]

3.3 Offshore szélérőművek

A tengeri szélérőművek építésének ösztönzése elengedhetetlen a klímasemlegesség felé vezető úton a meghatározott zöld célok elérése érdekében. Ehhez szükség van a tengeri területrendezésekre és a regionális együttműködésekre ugyanis a célkitűzések szerint 2030-ra 60 GW, míg 2050-re 300 GW megújuló energia kapacitás megvalósítását irányozták elő. Az azonos vizeket használó országok között szoros együttműködésre és együtt tervezésre van szükség, a kapacitások optimális kihasználásához. A tengeri potenciálisan használható területek esetében először térben és időben lokalizálják a területeket más célra való hasznosítása tekintetében. Ezután következnek az előzetes értékelések, az optimális hely megtalálására. Kevés olyan terület van, amely más tevékenységgel párhuzamos felhasználást tud biztosítani. Mindezek mellé figyelembe kell venni egy sor környezetvédelmi szabályt, mely a tengervédelemre, madárvédelemre, élőhely védelemre, halászatra és a biodiverzitásra vonatkozik. Németországban áll rendelkezésre a tengeri szélérőmű kapacitás nagy része mintegy 8 GW, melyet 2030-ig 30 GW teljesítményre kíván növelni. Hollandia a dobogó második fokán állva jelenleg 3 GW kapacitását 21 GW-ra, míg Franciaország 40 GW-ra, Spanyolország 3 GW-ra tervezi növelni. Ezek együttesen a tervezett stratégia majdsak 95%-át megvalósítanák. [4]

3.4 Offshore szélérőművek típusai

A tengeri szélérőműveknek két fajtája van a fenéken rögzített és az úszó. [10. ábra]



10. ábra: Offshore szélérőmű típusok [<http://slideplayer.hu>]

A tengerfenéken rögzített szélérőmű a kereskedelemben a legelterjedtebb, leginkább az Északi- tengereken megtalálható telepek összkapacitása az unión belül meghaladta a 15 GW-ot. A világ legnagyobb ilyen parkja a HornSea1-2, közel 1000 km²-en helyezkedik el 100 kilométerre az angol partoktól és mintegy 400 termelő torony kapott helyet benne. A 2 GW megtermelt energia 2 millió angol háztartás áramigényét elégíti ki. Az északi tengeri országok, valamint az Egyesült Királyság Oostendi nyilatkozatban vállalta 2030-ra 120 GW-ra emelését a szélenergia tengeri termelésének. [5]

Az uniós balti-tengeri országok (Dánia, Németország, Észtország, Lettország, Litvánia, Lengyelország, Finnország és Svédország) pedig 19 GW-ra növeli 2030-ra termelését. [6]

Az atlanti térségben valamint a Földközi tengeri területeken lassabb ütemű a fejlődés és az elhatározások mértéke, a nagyobb vízmélység okozta problematika kapcsán.

A partok közelében megvalósult fejlesztések jelentősége nem csak nemzetállamok szintjén jelentős, hanem a későbbi fejlesztések hatására a határokon átnyúló rendszer összekapcsolások szempontjából is stratégiai. Ezek a hibrid erőműparkok országhatárokon átvélve rendszerösszekötő útján kapcsolnak össze hálózati csatlakozásokat. A technológia fejlettsége, rohamos fejlődése és a kiépítés egyre költséghatékonyabb mivolta kapcsán, a vonatkozó kitűzött uniós célok elérhetőnek látszanak a tengerfenéken rögzített szélenergia esetében.

A másik típusú, úszó tengeri szélenergia [11. ábra] a mély vizű tengereknél jelennek meg a szélenergia hasznosítására. Ezzel a technológiával több eddig kiaknázatlan területen, pl. Atlanti-óceán, Földközi-tenger, Fekete-tenger is megvalósíthatóvá válna a villamosenergia termelése. Jelenlegi uniós kapacitás 27 MW, melyet 2030-ig 250 MW teljesítményre szeretnének feltornáztatni. A telepítési arány növekedésével összhangban a telepítési költségek is csökkenni fognak. A technológia legnagyobb fejlesztője Spanyolország.



11. ábra: Úszó tengeri szélenergia [http://www.firstclass.hu]

Annak érdekében, hogy az energetikai célkitűzések megvalósuljanak, a termelés megbízhatóbbá váljon, a termelési költségek csökkenjenek a kapacitások növekedjenek, egyre nagyobb teljesítményű turbinák megépítése a cél. A fejlődés kézzel fogható, kevesebb mint 10 év alatt a turbinák teljesítménye duplájára növekedett, ezzel szemben a költségcsökkenésük 30% volt.

4. SZÉLSEBESSÉG ÉS ANNAK TELEPÍTÉSRE GYAKOROLT HATÁSA

A szélenergia mérések az 1930-as évektől kezdve indultak, fejlődésükkel és pontosságuk növekedésével könnyebben meghatározhatóvá váltak a szélerőművek telepítésének helyszínei. A szélesebségek csoportosítása szempontjából három csoportba sorolhatóak:

- meddő szélesebség, mely maximum 8 km/h-s sebességig terjed
- kihasználható szélesebség, mely 8 km/h órától a helyre jellemző átlagos szélesebségig terjed
- korlátozottan használható szélesebség, mely a 40 km/h-t meghaladó szélesebségre vonatkozik

A szélesebségi mutatók a szélerőművek telepítésének egyetlen meghatározó tényezői. A telepítési területek meghatározása előtt a gazdasági, megtérülési szempontokat szem előtt tartva megméri a szél sebességének területre jellemző mutatóit, (különböző magasságokban mért sebesség, irány, éghajlati tényezők, domborzat befolyásoló szerepe) melyből következtetni lehet arra, hogy az adott területen mekkora elektromos áram termeléssel lehet kalkulálni. Fontos szempont a szél állandósága, hogy nap-, és évszaktól szinte függetlenül hasonló mutatókat produkáljon. E mellett gazdasági szempontból ideális a sík terület, ahol se domborzat, se növénytakaró, se épített akadályozó tényező nem befolyásolja, torzítja vagy gátolja a szél befogását, vagyis nem szükségeltetik égik erő tornyok telepítése. Minél nagyobb területet ölel fel ez az egység annál kifizetődőbb a telepítés, és annál nagyobb szélerőmű rendszer befogadására alkalmas. Annak érdekében, hogy a telepítési helyszínek termelés szempontjából alkalmas területek legyenek kutató munkámmal utána jártam 5 évre visszamenőleg (2019 - 2023) az európai széláramlási és szélerősségi rendszerek működésének. Negyedévente azonos napokon elemeztem a szélerősségeket és szélirányokat 10 méter, 100 méter és 250 méter magasságban, megbontva tengeri, partmenti és szárazföldi övezetekre, valamint évszakokra. Szépen kirajzolódnak azon területek, ahol a legeredményesebb beruházások végrehajthatóak lennének. A ten-

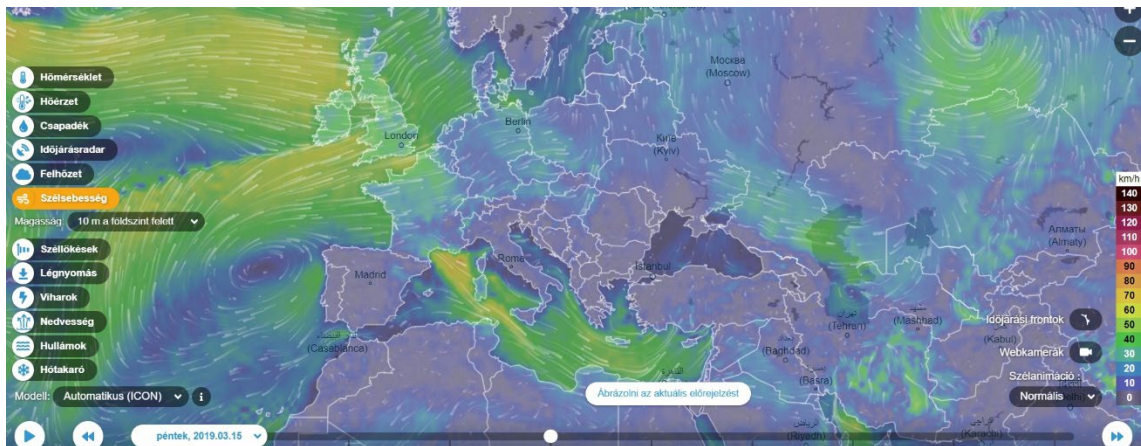
geri adatokat az Atlanti-óceán, a part menti értékeket a francia partok, a szárazföldi mérések eredményeit pedig Magyarország területéről vettem. A Földfelszíni szélsőbesség ugyan kis szerepet játszik a szélörvényművek rendszerében, - legfeljebb a lakossági kis erőművek meghajtásában van szerepe - ennél jóval nagyobb, minimum 40 méter magasságúak a napjainkban épülő tornyok. Azonban összehasonlítás szempontjából érdekes lehet a magasság növekedésével a szélsőbesség növekedésének változása. [7]

		Szélsőbesség									
		10m			100m			250m			
Év	Időszak	Tenger	Part	Szárazföld	Tenger	Part	Szárazföld	Tenger	Part	Szárazföld	Irány
2019	Március	55	46	12	72	59	28	91	80	43	NY
	Június	40	15	3	51	29	11	57	35	20	DNY
	Szeptember	46	9	4	50	8	5	59	12	7	NY
	December	72	39	6	90	61	30	96	78	46	DNY
2020	Március	49	22	4	66	31	10	84	50	48	ÉK
	Június	33	26	6	38	33	4	47	30	6	ÉNY
	Szeptember	50	12	6	70	12	23	87	25	32	D
	December	40	31	12	53	27	22	56	43	40	D
2021	Március	44	24	10	60	45	33	68	58	47	ÉNY
	Június	13	5	3	20	10	6	25	17	10	É
	Szeptember	21	17	10	35	24	12	46	23	23	D
	December	38	26	2	47	24	9	50	32	9	NY
2022	Március	21	13	3	30	25	15	37	35	23	NY
	Június	12	5	4	19	12	4	26	18	15	K
	Szeptember	38	30	13	45	26	26	47	33	30	ÉNY
	December	54	23	4	70	23	3	70	34	2	ÉK
2023	Március	45	15	11	59	20	27	62	35	30	NY
	Június	11	5	3	18	11	4	19	22	13	ÉK
	Szeptember	23	8	2	30	17	10	29	27	20	DK

12. ábra: 5 éves szélörvénymű mérési adatok összehasonlítása [saját ábra]

A 12. ábra adatait elemezve megfigyelhető, hogy a szárazföldi mérések esetében mutatkoznak a legjelentősebb - nem egy esetben több mint tízszeres szélsőbesség béli - különbségek a magasság növekedésével. Ez valószínűsíthetően a természeti és az épített környezet hatásnak, valamint a domborzati viszonyok alakulásának a függvénye. A part menti területek esetében 50% növekedés figyelhető meg az adott magassági szinteken, míg a tengeri területek adataiban 30% növekedés jellemző.

A szélörvénymű évszakos eredményei is jól kimutathatóak. Jellemzően az első és utolsó negyedekben [13. ábra, 14. ábra] a legerősebbek az értékek, ezek a téli és tavaszi nagy szelek nyugatról betörő bőséges csapadékot hozó frontok hatására alakulnak ki.



13. ábra: Széláramlások Európa felett 2019.03.15 [saját ábra]

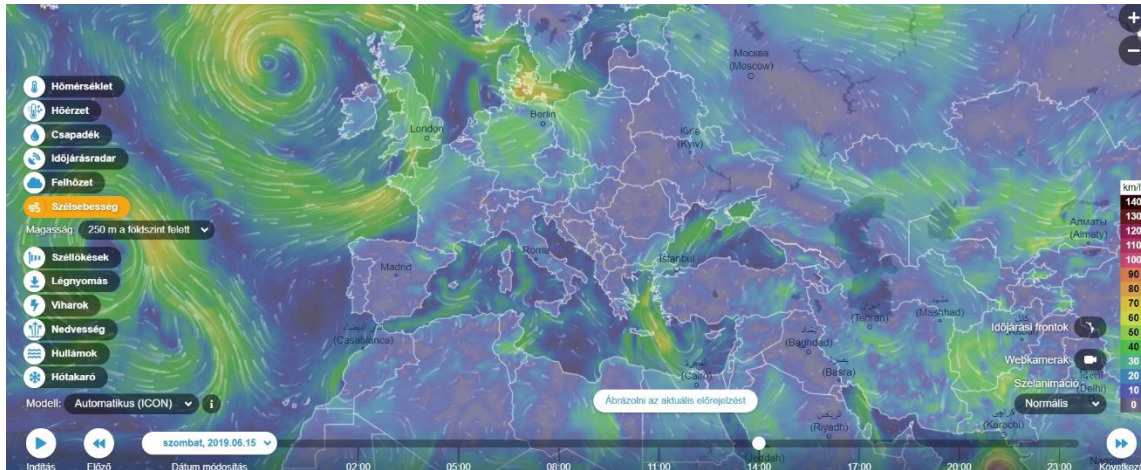
Kivételt ez alól a Vojejkov-tengely kialakulása képez, mely egy speciális légköri tevékenység, a szibériai maximum összekapcsolódik az azori maximummal és egy nagy anticiklont hoz létre, amely blokkolja az Atlanti-óceán felől érkező ciklonokat, ez által száraz, szélcsendes és rendkívül hideg időjárást eredményezve.



14. ábra: Széláramlások Európa felett 2019.12.15 [saját ábra]

A második negyedév, nyár közepe csendesebb ugyan, de erős szélsőségek megfigyelhetők az évek függvényében. A 2019-es év minden évszaka kimagasló eredményeket mutat mind magassági, mind vertikális elhelyezkedésben egyaránt. Erős nyugati, délnyugati áramlás volt megfigyelhető az adott időszakban. Nyári felmelegedés kapcsán érde-

mes megemlíteni a szárazföld és a tengerek eltérő felmelegedéséből adódó, és a nyár közepén az erősebb szárazföldi felmelegedéshez köthetően a kontinens belsejében viszonylagos stabilitás és szélcsendesebb időszakot eredményező állapotot. [15. ábra]



15. ábra: Széláramlások Európa felett 2019.06.15 [saját ábra]

A harmadik negyedévben a nyári időszakot követően ugyan még csendesebb időszak látható a szárazföldek belsejében, de a ciklonhatások egyre jobban fokozódnak, és leginkább déli és nyugati áramlások erősödnek meg. [16. ábra]



16. ábra: Széláramlások Európa felett 2019.09.15 [saját ábra]

Összességében az mondható el, hogy nyár végétől, szeptember tájáktól egészen a tavasz végéig fokozatosan növekszik a szélsébség, majd lecsendesedik. Előfordulhat-

nak azonban mind négy évszakban szélsőséges és extra szeles időjárási jelenségek, azonban ezek leginkább lokálisak és esélyük kicsi. A szélirányokat tekintve leginkább a nyugati szelek a jellemzőek, azonban egyes ciklonok az Földközi-tenger irányából fújnak, szélsőséges esetben pedig Szibériai redetű légtömegek is behatolhatnak a Kárpát-medencébe. A szélsőbesség térképek elemzése alapján arra a következtetésre lehet jutni, hogy a tengeri telepítésekre legalkalmasabb helyszínek az Atlanti-óceán Anglia és Francia ország közötti területei, ugyanis itt az Atlanti-óceánon kialakult ciklonok akadálytalanul közelítenek a szárazföld belseje felé. Másik kiváló tengeri telepítésre alkalmas terület az Északi-tenger. Kiaknázatlan területet jelent még a Földközi-tenger területe, ahol a nagyobb vízmélységek a jelenleg fejlett technológiák korlátozó tényezői. Minél magasabb erőművek építésével, hatványozottan nagyobb áramtermelés érhető el. A partokhoz telepített erőművek már csak kétharmaddal kisebb teljesítménnyel tudnak működni a korábban már felsorolt akadályoztató tényezők hatására. Legmegfelelőbb partszakaszok a Francia, Belga, Holland és Német szakaszok, ahol a csatornahatás felerősíti a ciklonok erejét. A szárazföldi erőművek termelési teljesítménye pedig még alacsonyabb értékeket mutat a partoktól való távolság arányában. [8]

5. MAGYARORSZÁGI SZÉLERŐMŰVEK

Hazánk területe szél erőművekkel kevésbé ellátott, mint a kontinens partokhoz közelebbi területei. Ennek indokai a korábbi elemzésből kiderülnek, ugyan akkor hazánk területén is találunk 37 helyszínen mintegy 170 tornyot, melyek összteljesítménye meghaladja a 300.000 kW teljesítményt. A legtöbb erőmű az ország északnyugati felében, az országhatár körüli jó szélkitettségű helyeken pl. Sopron, Mosonmagyaróvár, Győr található. 2000-es évektől mindössze 2010-ig valósultak meg a hazai beruházások, ugyanis 2016-ban megjelent kormányrendelet kapcsán gyakorlatilag lehetetlenné vált új szélfarmok telepítése. A legelső torony Várpalotán épült meg, akkoriban jónak számító 250kW teljesítménnyel. A következő évek telepítései során fokozatosan nőttek a teljesítmények, 600, 800, 1500 és végül 2000 kW teljesítményig. A 37 településből csupán 10 helyszín rendelkezik 5-nél több erőművel. Leginkább magányosan álló tornyokról beszélhetünk. Jelentős kapacitással rendelkezik még az ország, mintegy ezer szél erőművet lehetne gazdaságosan telepíteni és kiaknázni lehetőségeket. Helyszínek tekintetében a Dunántúl dombjait, a Kisalföldet, valamint a Bakonyt lehetne megemlíteni, de az Északi Középhegység magasabb területein és az Alföld dél-keleti részének bizonyos pontjain is megérné megújuló szélerő energiába fektetni.

A szél erőművek megtérülési költségeinek kalkulálása Magyarországon 23%-os kapacitásfaktorral működő, 3 MW teljesítményű erőmű esetén az alábbiak szerint alakul. A teljes beruházási költség 1,0 - 1,5 milliárd Ft közöttire tehető. Egy 3 MW teljesítményű erőmű évi 6 millió kWh áram előállítására képes, amely 15 - 30 Ft/kWh eladási ár mellett 100 - 200 millió forintos éves bevételt generál. Vagyis 10 év körül mozog a megtérülési idő, amely a 20 – 25 éves élettartammal számolva igencsak jó beruházásnak mondható. A nagyobb teljesítményű turbinák telepítési költsége kW-onként sokkal kedvezőbb, mint a kisebbek esetében, és ugyan ez mondható el az egyturbínás és több turbínás telephelyek esetében is.

6. ALKALMAZÁS ÉS JOGSZABÁLYI HÁTTÉR

A szélenergia alkalmazásának tervezésekor figyelembe kell venni, hogy maga a termelés csakúgy, mint a használat, jelentős ingadozásokat mutat. Napi szinten a késő délutáni, esti órákban jellemzően nagyobb szélesebségek figyelhetők meg. Ugyan ez évszakosan is kimutatható, hogy a késő őszi, téli időszak 30% kapacitáskihasználásával szemben a nyári mindössze 15%. annak érdekében, hogy egy stabilan működő rendszert lehessen kiépíteni, az energia tárolásának megoldására van szükség, vagy a szélenergia kiegészítésére más megújuló energia termelőkkel, mint pl. napelem.

A megújuló energia elterjedésének nem minden esetben a legfőbb akadályozó tényezője a szélenergia léte, vagy a domborzati, társadalmi, természeti és kulturális viszonyok, de nem is a technikai fejlettség, ami útjában van a fejlődésnek. A legfőbb hátráltató tényezőt az egyes nemzetek engedélyezési eljárásai jelentik. Bizonyos országokban nagyon gyors egyablakos engedélyezési folyamatok vannak hatályban, melyek a szélerőművek számában vissza is tükröződnek. Németországban és Hollandiában a komplex pályázati, engedélyeztetési és kivitelezési csomag maximum négy évet vesz igénybe. Ugyan ez a folyamat Franciaországban akár 11 évre is nyúlhat, Spanyolország pedig abszolút nem rendelkezik kereskedelmi célú megújuló energiát hasznosító offshore létesítményekkel. Az unió az ukrajnai válság kiobbanását követően mintegy sürgesendő meghatározta, hogy a tagállamoknak megújuló energia hasznosítására alkalmas szárazföldi és tengeri területeket kell kijelölniük.

Sajnos 2016 óta jogszabály tiltja a szélerőművek telepítését, a vizuális megjelenésükre és élőhelyzavaró mivoltukra hivatkozva, így az EU tagállamai elhúztak mellettünk. A különféle szabályozások miatt hazánk területének 85%-a kiesett a telepíthetőség alól. A magyar szabályozás nem csak európai, de világ szinten is a legszigorúbb, ugyanis a lakott területektől 12 kilométeres védőzóna alkalmazását írja elő, így teljesen ellehetetlenítve a szélerőműveket. Európa más országaiban a pár száz méteres védőzóna jellemző, mely esetet figyelembe véve 1 kilométeres védőzóna esetében Magyarország területének a fele telepíthetőség szempontjából rendelkezésre állna. A korlátozások azonban mint

tudjuk nem csak az épített környezetet, hanem a természetvédelmet is figyelembe veszik, így máris csak 10% terület marad felhasználásra. Ezen túl még megjelenik számos más tényező is, természetvédelem, tájképvédelem, meglévő infrastruktúra hálózat. Míg más országok gazdaságilag támogatják a megújuló energia szektort, ösztönzik az újabb telepítéseket, és igyekeznek jogszabályilag is serkenteni a szektort, addig az előbb felsorolt akadályozó tényezőkön felül itthon a turbinákat magasságukban 100 méterben, lapáthosszukat 50 méterben, teljesítményüket pedig 2 MW-ban is korlátozták, mely a totális ellehetlenítés és gazdasági meg nem térülés irányába vezetett. [9]

7. A SZÉLERŐMŰVEK HATÁSA KÖRNYEZETÜNKRE

7.1 Tájékszétikai szempontok

A szélerőművek nem illeszthetők bele a környezetükbe. Növényekkel nem lehet bo-
rítani, teljesen tájidegenek. Hogy kevésbé legyenek zavaró hatásúak, elhelyezkedésük
szempontjából szerencsésebb a négyzetes alakú telepes telepítés a hosszantibbakkal
szemben. Ugyan ilyen megfontolásból a toronyhoz kapcsolódó kiszolgáló létesítmények-
nek is minél kisebb területen kell elhelyezkedniük, városoktól távol, nem érintve védett
természeti területeket és élőhelyeket, azoktól minimum 1000 – 1500 méter távolságot kell
tartaniuk.

7.2 Zajterhelés

A szél áramlása által generált aerodinamika zaj mely a meghajtott rotorokból száрма-
zik, illetve a szárnyakról leváló áramlatok okozzák. Ezen kívül mechanikai hanghatás
nincs. A tollak széllal szembeni szöge állítható, mely kapcsán a szélzaj változik. Ennek a
kellemetlen hatásnak a kiküszöbölésére a modern lapátokat egy speciális anyagból gyárt-
ják, így az élő környezetre gyakorolt hatása csekély.

7.3 Földtudományi és vízvédelmi szempontok

A megbolygatott felület talaj erózió elleni védelem a legjelentősebb feladat, de ugyan
akkor figyelmet kell fordítani a telepítést megelőzően a talaj szerkezetére, felszíni és fel-
szín alatti vizekre, domborzatra, ivóvízbázisra a telepítési mélység és a tervezett telepítési
szög meghatározásánál.

7.4 Társadalmi és környezeti kihívások

A tengerek alapvető szerepe a hajózásra, halászatra, turizmusra és energiaterme-
lésre való kihasználásának metszetéből kiderül, hogy a különböző céloknak megfelelően
fel kell osztani területeiket, figyelembe véve a környezeti adottságokat, megóvva a ter-
mészeti értékeket. Fel kell mérni minden tagállamban a tervezhetőség szempontjából a
környezeti, társadalmi és gazdasági fenntarthatóságot, biztosítva ezen tevékenységek

egymással párhuzamos zavartalan működését. A megújuló energia szektor fejlődése jelentősen fogja befolyásolni a foglalkoztatás alakulását, az infrastruktúrák kiépítését, bizonyos területek felhasználását, a tájkép jellegét. Korábban a fosszilis energiahordozó területen olaj- és gáziparban dolgozó munkások átképzésére lesz szükség.

7.5 Gazdasági hatások

Fontos szempont a megtérülési idő, mely a többi megújuló energiahordozóval összevetve is jónak titulálható. Ahogy egyre szélesebb körben terjednek a beruházások, úgy növekszik a gyártók száma, csökkennek az árak, növekednek a teljesítmények és fejlődik a technológia. Ezáltal a megtérülési idők is csökkennek. Mind e mellett a megújuló forrásból származó megtermelt villamosenergiát hazánkban kötelező átvenni, mely a beruházások növekedését serkenti elő.

A halászerületek visszaszorulását eredményezi a halászat kizárása a szélérőműparkok területéről, ahol is a halászhajók csak bizonyos feltételekkel, 500 m-es pufferzónát meghagyva léphetnek be a területre, de kitiltva nincsenek onnan. A halsűrűség növekedése megfigyelhető a telepek környékén, a halászat kizárása kapcsán.

A negatív és pozitív következmények sokban függenek az alkalmazott technikától és annak életciklusától. A telepítési helyszín, melyet akár 40 évre is oda ítélnének meghatározza a terület tovább fejlődését, életvilágát. Negatív hatások lehetnek az ütközések hajókkal, szennyező anyagok belekerülése a vízbe, víz alatti zaj elvándorlást eredményezhet bizonyos fajoknál. Élőhelyek elvesztés és pusztulása, valamint elektromágneses tér változás is lehetséges.

Pozitív hatásként a zátonyhatás említhető meg, mely hatására bizonyos fajok betelepülnek, egyesek egyedszáma megnő. élőhely regeneráció is megvalósulhat a csökkenő forgalom és emberi zavaró tényező hatása kapcsán a létesítmények közvetlen közelében.

A káros környezeti hatások csökkentése érdekében projekt szintű intézkedések alkalmazásával csökkenthetőek a környezeti károk, pl. madarak költési és vonulási időszakában leállíthatóak a szélturbinák, madárfolyosók kialakítása már a tervezési fázisban beépíthető igény lehet, illetve szigeteléssel csökkenthető a kibocsátott zaj.

Fontos a szerepe Kínának a szélerőművek nyersanyagainak ellátása során, ugyanis innen szállítják be a szükséglet 90%-át. Az unió a nyersanyag függőségét belső kapacitások fejlesztésével, valamint újra hasznosítással igyekszik megoldani.

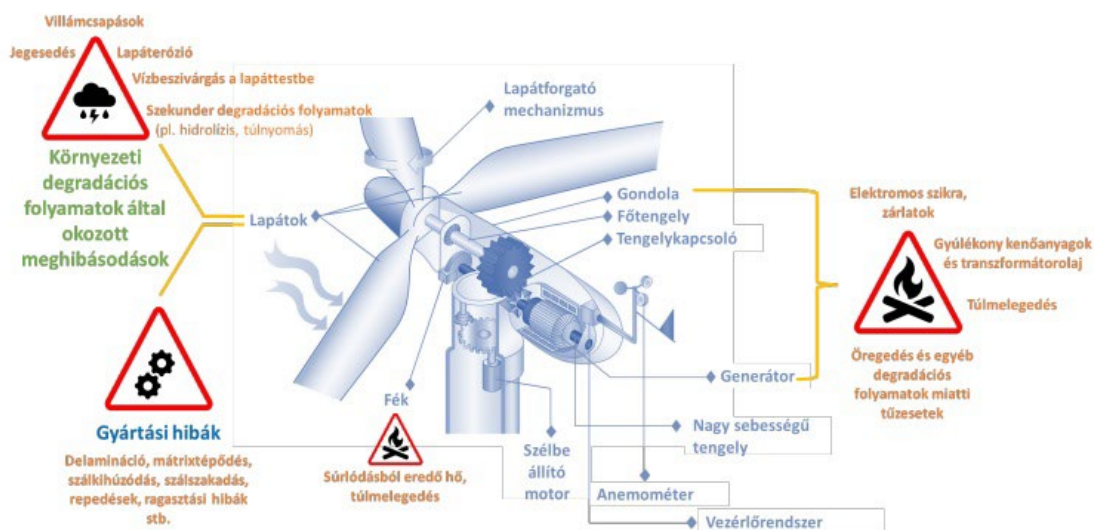
8. MI LESZ A SZÉLERŐMŰVEKKEL (MEGHIBÁSODÁS, BALESETEK, ELHASZNÁLÓDÁS)

A szélérőművek mint technológiai egységek természetesen veszélyforrást jelentenek. A meghibásodásoknak három fő oka lehet: [17. ábra]

1. szélsőséges időjárás okozta károk
2. üzemelés közben fellépő hibák
3. gyártási hibák

A leggyakoribb balesetek három fő oka:

1. torony tartószerkezetének összeomlása
2. gondola kiégése
3. lapátok meghibásodása, leszakadása



17. ábra: Szélturbina felépítése és a leggyakoribb üzemzavarok és balesetek okai [https://www.paks2.hu]

Az üzemzavarok azonban sajnos nem függetlenek egymástól, egy dolog meghibásodása láncreakciót indíthat el.

Az onshore szélérőművek esetében tapasztalt leggyakoribb problémát az elektronikai meghibásodások okozzák. E mellett fő probléma szokott lenni a rotorlapátok, a tengely

károsodása, kisebb rizikófaktorral szoktak a generátorok és a tengelykapcsolók meghibásodni, ezeknek a javítási költsége és javítási ideje magasabb az első kettő okhoz képest.

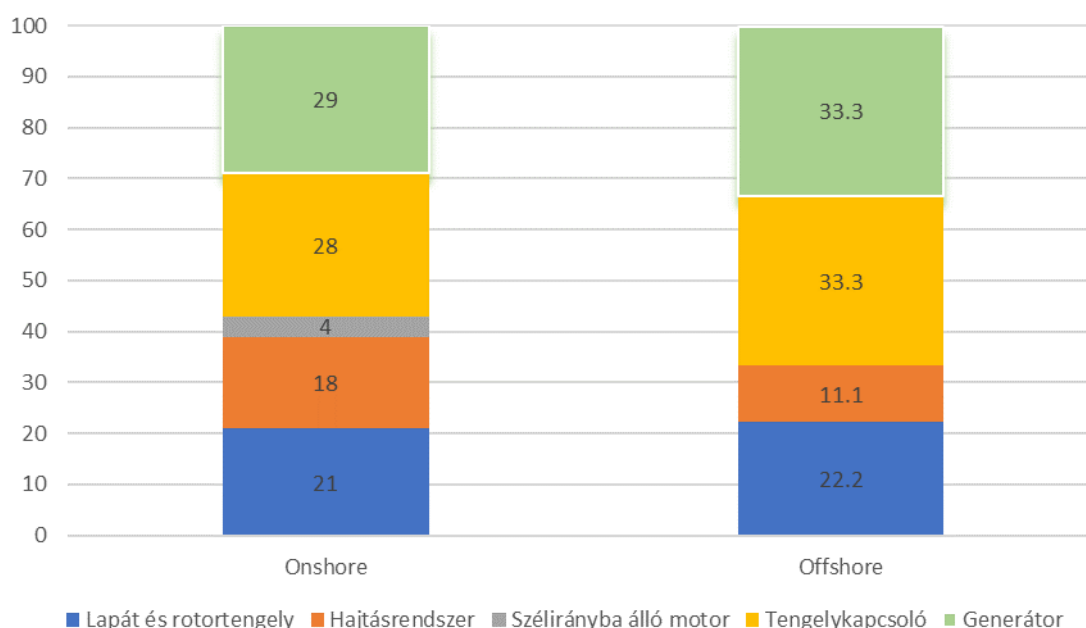
Az offshore szélérőműveknél az előbb felsorolt problémákon felül gyakori az elektromos kábelek meghibásodása, mely oka a tengerfenékre történő fektetésben keresendő. A meghibásodási ráta függ a helyszín földrajzi és időjárási jellemzőitől, a gyakori meghibásodások rontják az termelés biztonságát, a gazdaságos üzemeltetési tényezőket.

Míg az EU -ban a szélérőmű parkok a közforgalmi hajózástól elzárt területek, Angliában az erős halászati szakszervezetek befolyása miatt nem zárhatóak el. Ennek következtében a fenékre telepített energia kábelek meghibásodása nagyobb számban jelenik meg azokon a site-okon ahol fenék halászatot folytatnak.

A turbinalapátok meghibásodásának javítása jelenti az egyik legjelentősebb összeget, ugyanis a teljes beruházás költségének 20%-át teszik ki, mind e mellett időigényes a javításuk is. Mivel szélsőséges körülmények között üzemelnek, így az időjárási tényezőknek jelentős erodáló hatása érződik rajtuk. Legjobban a jeges eső és a jegesedés rongálja a lapátokat. A nem egyenletes eljegesedés által generált differenciált mozgás és rezgés a gondolát is károsíthatja, esetleges leszakadáshoz is vezethet. Ugyan ilyen súlyos rongálódáshoz akár kiégéshez is vezethetnek a villámcsapások. Mind amellet, hogy tűzveszélyt jelentenek, a nagymértékű hőhatás következtében a lapátban található nedvesség hirtelen elpárolog, ez nyomáskülönbséget produkál a lapátban minek hatására leszakadhat. A leszakadó lapát jelentős anyagi károkat okozhat, ezért nagyon fontos a megfelelő telepítés távolság, a közutaktól, lakóházaktól való biztonsági távolság betartása. A keletkezett tüzek, amelyek leginkább a gondola részen alakulnak ki, a tűzoltás szempontjából a nagy magasság, és főleg a tengereken a megközelíthetőség miatt problémásak. Szárazföldön a tűz tovább terjedésére is fel kell készülni, mely a nagy mennyiségű transzformátor- és motorolaj, és a lapátokat alkotó műanyag kapcsán előfordulhat. [18. ábra]

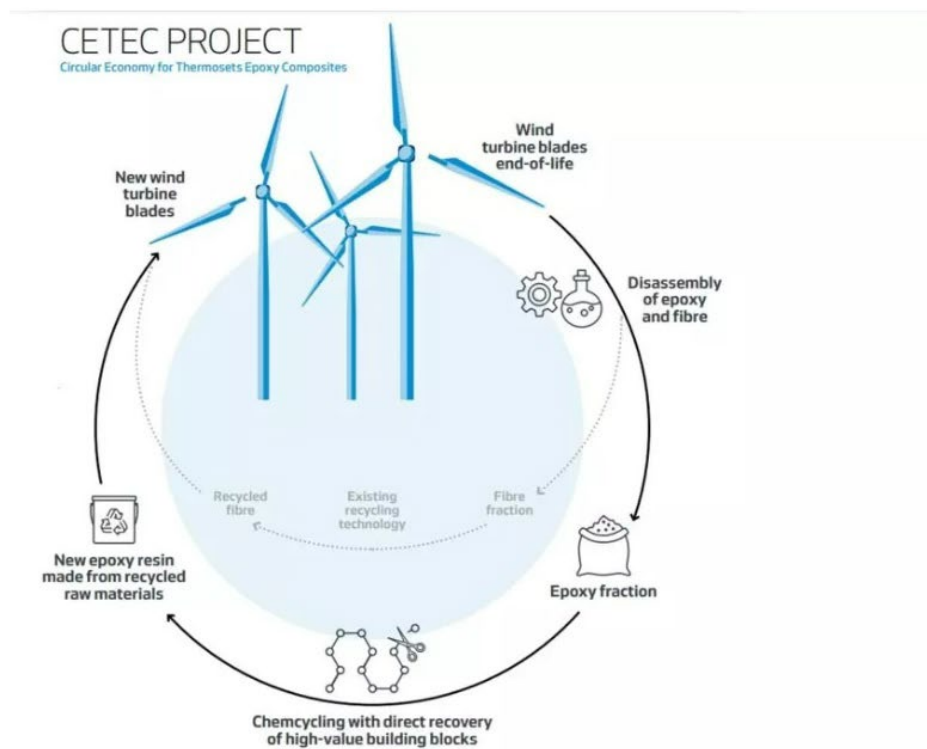
A meghibásodási ráta ugyan 1% alatt marad, de a hatásfok növelése érdekében megnövelt toronymagasságokkal és lapáthosszakkal potenciálisan megnövekedhet.

Mindezek ellenére elmondható, hogy a felelősségteljes tervezéssel, megfelelő kivitelezéssel telepített turbináknál, amelyek karbantartása folyamatos és szakszerű, nagyon kis eséllyel fordulnak elő meghibásodások, működésük teljesen biztonságosnak tekinthető.



18. ábra: A szélérőmű leállásának okai [saját ábra]

A szélturbinák anyagának 85%-a újrahasznosítható volt, a maradék 15%, amelyet a turbinalapátok képeztek jelentett problematikát. Korábban Hollandiában a kiöregedett lapátokat közterületeken hasznosították, mint fedett buszmegálló, kerékpár tároló, játszóterek és parkok díszítő elemei. Egy dán cég által megoldás született arra, hogy a 20 – 30 év működés után ne hagyjon maga után szennyeződést a zöldenergia termelés. [19. ábra] Az új módszer lényege, hogy egy speciális kémiai eljárással a lapátok anyagából az epoxit visszanyerik, vagyis a régi lapátok nyersanyagforrásként szolgálnak. Ez napjainkban 25.000 tonna, 2030-ra pedig közel 50.000 tonna leszerelt szélturbina lapát újra hasznosítását jelenti. [10]

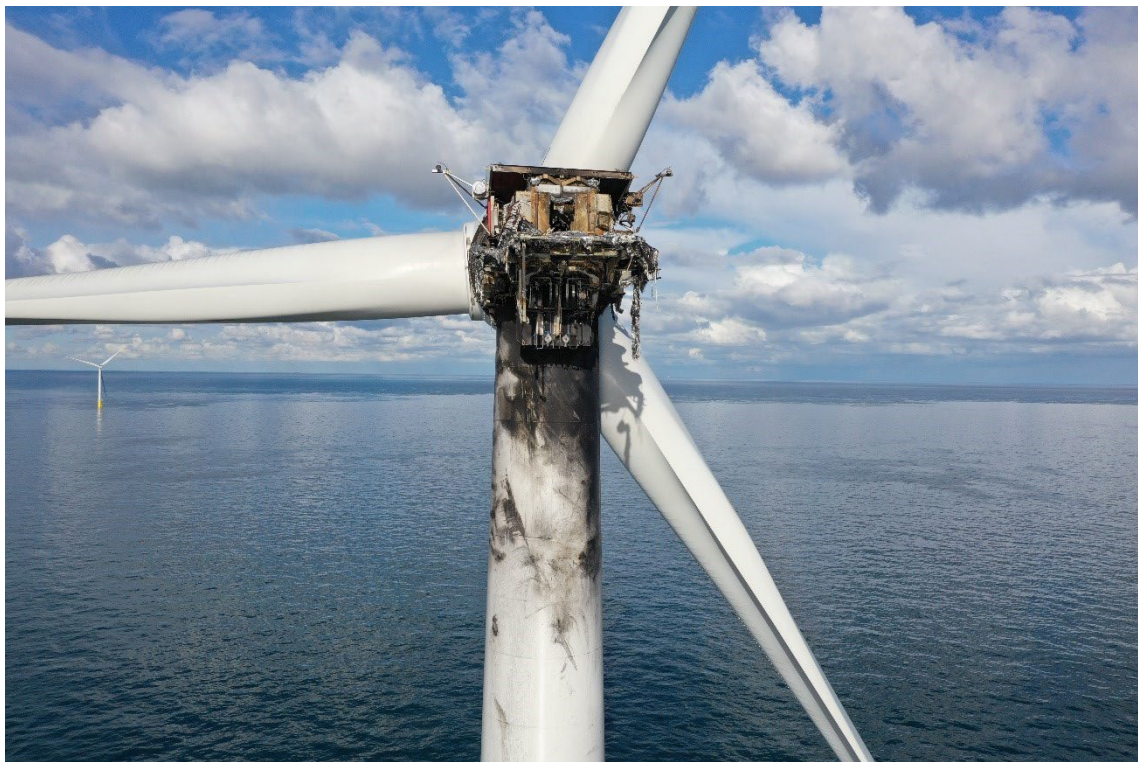


19. ábra: Szélörművek anyagának újrahasznosítási ciklusa [<https://www.project-cetec.dk/uk/about/>]

9. EGY MŰSZAKI HIBÁS TORONY DRÓNOS MEGKÖZELÍTÉSE ÉS 3D MODELLEZÉSE

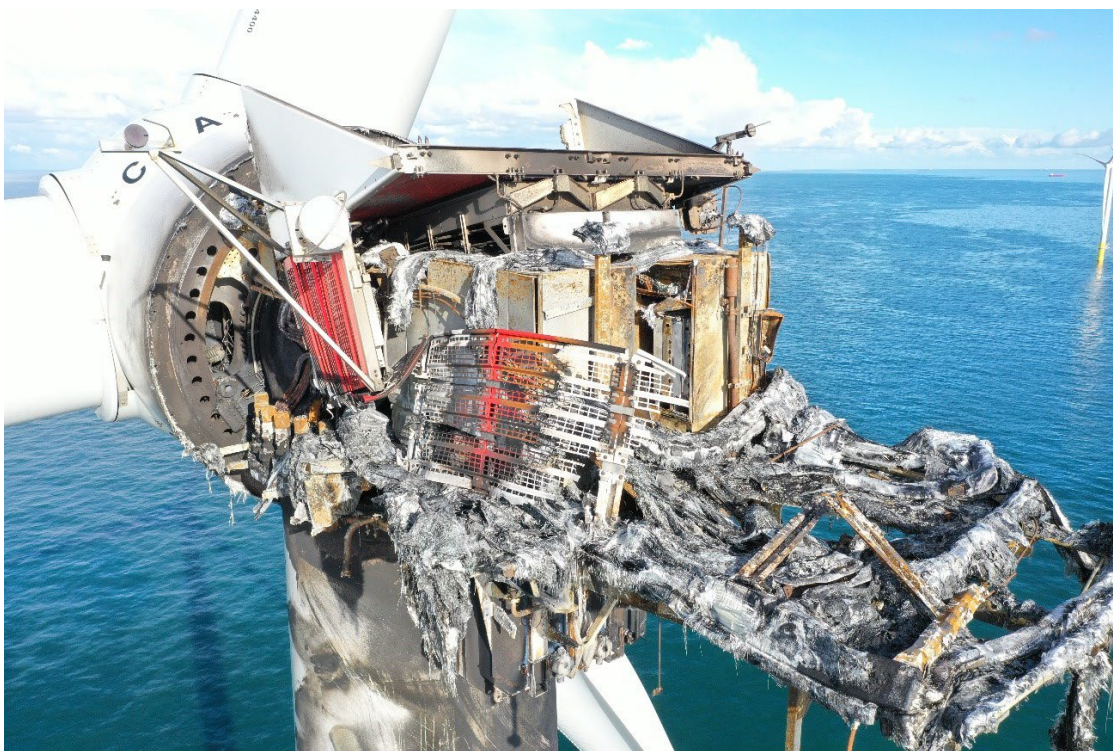
Hogy igazságosak legyünk a szélérőművek megítélése kapcsán, hoztam egy 2021-es esetet, mely bemutatja a szélérőművek használatának hátrányait, az esetlegesen bekövetkező hibák, balesetek által okozott időbeli, pénzületi és termelés biztonsági kimaradásokat, valamint a tetemes javítási, alkatrész pótlási és újraépítési költségeket.

Az alább ábrán látható szélérőmű az Északi tengeren helyezkedik el, viszonylag nagyobb távolságra, 80 km-re a partoktól. [20. ábra] Jelen esetben nem külső tényező, idegen tárgy vagy az időjárás okozta a hibát, hanem úgynevezett „zeroharm” esetről beszélünk.

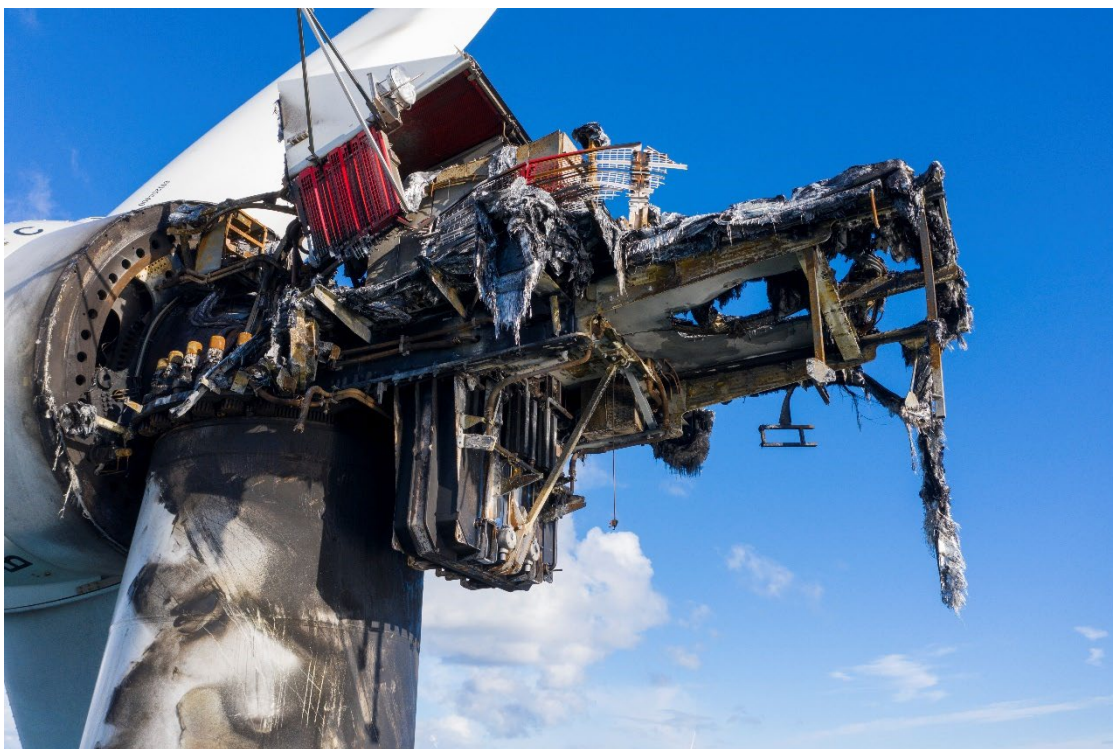


20. ábra: Meghibásodott és kiégett széltorony [Pál Károly]

Ez esetben egy belső hiba, a fékrendszer meghibásodása által bekövetkezett műszaki hiba volt a kiváltó ok. Az eset következtében a szélérőmű gondola részének műanyag és szénszálalás anyagból felépülő egysége, szinte teljes mértékben kiégett.



21. ábra: Drónos felvétel a kiegészítő kupoláról 1. [Pál Károly]



22. ábra: Drónos felvétel a kiegészítő kupoláról 2. [Pál Károly]



23. ábra: Drónos felvétel a kiégett kupoláról 3. [Pál Károly]

Ilyen műszaki hibás, valamint valamilyen formában baleset következtében megrongálódott tornyok esetében, első körben a károk felmérése, és a munka megkezdéséhez nélkülözhetetlen biztonságos megközelítés biztosítása a cél. A megközelíthetőség eldöntéséhez a drón technológia nyújtja a legbiztonságosabb módot, ugyanis nagyobb távolságból felszállva is képesek teljesen közel kerülni a helyszínhez, és kiváló minőségű felvételeket készíteni az aktuális állapotokról. Ez azért nagyon fontos lépés, mert a nagy magasságú megrongálódott tornyokból aláhulló nem stabil alkatrészek veszélyt jelentenek az emberi életre, mind e mellett jelentős károkat is okozhatnak a kiszolgáló járművekben, berendezésekben, eszközparkban. Tehát a gyors reagálású behatoló egység számára a terep biztosítása az elsődleges szempont, ugyan akkor a keletkezett kár nagysága is felmérhető a felvételek segítségével. A felmérés és a kármentesítés szinte azonnal elkezdődik, azonban az adott esetben három héttel az esemény után nyílt csak erre lehetőség, a zord időjárási körülmények miatt. Ez már magában ugye jelentős kiesését generált a termelésből. A felvételek szakemberek által történt elemzése alapján készült el a végső

forгатókönyv a behatolás metodikájáról, kockázat elemzés tartalmáról, valamint a kockázat csökkentő intézkedésekről. [24. ábra]



24. ábra: Kárfelmérés, és a gyorsreagálású egységek behatolásának tervezéséhez elengedhetetlen a többirányú és részletpontos felvételek készítése [Pál Károly]

Figyelembe kellett venni, hogy lehetőség van-e az azonnali munkakezdésre, vagy speciális járművek és eszközpark szükséglet is felmerül. Ha a terület alkalmas munkavégzésre, nincs veszélyforrás, akkor a behatoló egység emberei veszik át a terepet, akik felé haladva minden útjukba kerülő akadály és veszélyforrás elhárításáról gondoskodnak. Ha nagyobb sérülések fedezhetőek fel, az eszköz- és alkatrész igény speciális szállítójárműveket igényel, mint például a Jakob Vessel teherhajó szükségeltetik a munkafolyamatokhoz, akkor annak leszerzése, a bontásból származó anyagok és roncsok eltávolítása és elszállítása, a csere alkatrészek, fődarabok megrendelése, majd az egység részben vagy teljesen való újra telepítése mind-mind jelentős idő és pénzeszköz szükségletet emészt fel. Egy ilyen teherhajó bérleti díja 150.000 Euróra rúg naponta, mely a kihajózástól a kikötőbe való visszaérkezésig felszámolásra kerül, függetlenül attól, hogy a sérült

szélerőmű milyen távolságban helyezkedik el a partoktól és hány napba telik megközelíteni, illetve hány nap a tényleges munkavégzés. Mind e mellett a műszaki stáb bére, valamint ellátása, szállítása és szállása is jelentős költségek és egyedi járműveket igényel. Egy-egy ilyen eset komoly környezetszennyezéssel is jár, és nem csak a levegőbe kerülő káros anyagokra gondolok, hanem a toronyból a tengerbe ömlő több ezer liter olajra is.

A felsorolt összegeket tovább duzzasztja a termelés kimaradás által generált elmaradó bevételekből származó veszteség. Természetesen a szélerőmű parkok rendelkeznek biztosítással, vagyis adott esetben akár a teljes újratervezést is fedezik a biztosítók. [11]

A drónos felvételekből összeállított 3D modell sokat segít abban, hogy teljeskörű rálátással váljon lehetővé a károk részletes elemzése, és meghatározható legyen a helyreállítás időtartama és ütemezhetősége.

A műszaki hibás szélerőműről fényképeket kaptam, mind DNG, mind .JPG kiterjesztésben. A DNG mozaikszó a "Digital Negative Image" kifejezés rövidítése. Ez a formátum nyílt forráskódú, jogdíjmentes és széles körű kompatibilitással rendelkezik, folyamatos fejlődésen megy keresztül. [12] A képek jelentős része túlexponált volt, ezért a modellezés sikeres végrehajtása érdekében egy automatikus képfeldolgozó programon keresztül futtattam a DNG képeket, hogy a túlexponált részeket valamilyen mértékben enyhíteni tudjam. A 25. ábrán egy eredeti képet láthatunk, az 26. ábrán pedig egy javított képet.



25. ábra: Eredeti, túlexponált fotó a műszaki hibás szélérőműről [Pál Károly]



26. ábra: Utófeldolgozott fotó a műszaki hibás szélérőműről [Pál Károly]

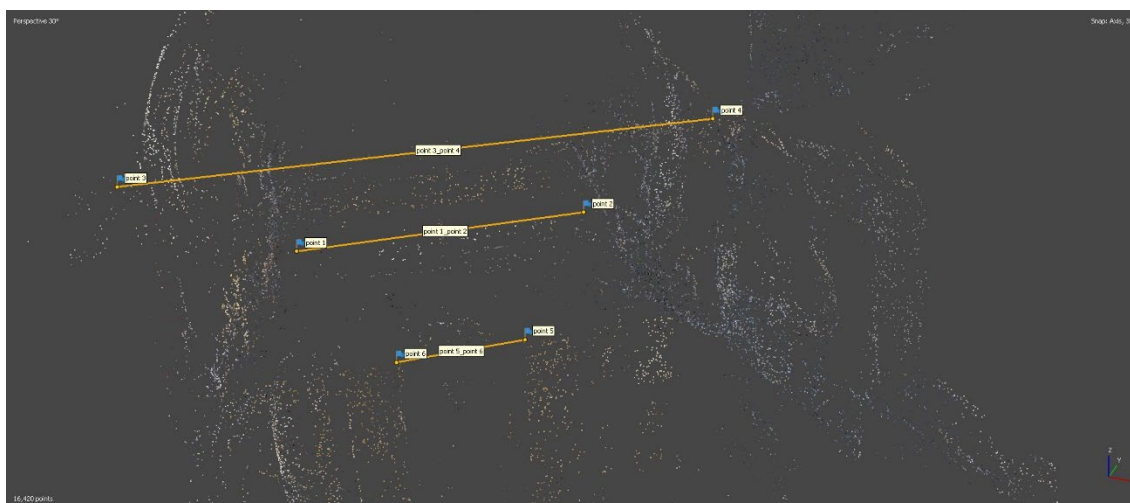
A modellezést az Agisoft Metashape 30 napos ingyenes próbaverziójával végeztem el. Az Agisoft Metashape egy fotogrammetriai szoftver, amely hatékonyan lehetővé teszi a fényképfeldolgozást, digitális ortofotók és háromdimenziós modellek hatékony létrehozását. Az adatok feldolgozására alkalmazott szoftver a Structure from Motion (SfM) technológiát használja. Ennek lényege, hogy mozgó kamerával rögzített képek sorozatából helyreállítja a képen szereplő objektumok háromdimenziós koordinátáit. Minden kulcspont rendelkezik egy számsorozattal álló leírással és a képkoordinátákkal. Ezek segítségével a program azonosítja az egyes képeken szereplő kulcspontokat és összekapcsolja őket, meghatározva a képek egymáshoz viszonyított helyzetét. Ezt a folyamatot háromszögelésnek nevezik, melynek eredményeként létrejön a ritka pontfelhő. [13]

Amennyiben rendelkezésre állnak illesztőpontok, a ritka pontfelhő elkészítése után az illesztőpontok azonosítása következik, melyek segítségével abszolút tájékozást végzünk a képek között. Esetemben nem állnak rendelkezésemre illesztőpontok, ezért a modell optimalizálását a program által kínált "Scale bar based" optimalizálás segítségével végeztem el. [14] A méretvonal alapú optimalizáció során a pontfelhőben olyan könnyen beazonosítható és jól kirajzolódó pontokat kerestem, amelyek távolsága ismert, így a két pont közötti távolságot megadva, azt a modellre kényszerfeltételként definiáltam. A pontok kiválasztása során kihívást jelentett, hogy olyan pontokat találjak a sérült szélérőművön, amelyeket nem érintett a roncsolódás, és méretük adott. A 27. ábrán látható, hogy hol rögzítettem ezeket a könnyen beazonosítható pontokat.



27. ábra: A méretvonal alapú optimalizációhoz választott pontok helyzete - Agisoft Metashape [saját ábra]

A pontok kiválasztása után azokat páronként összeköttem, és létrehoztam közöttük a méretvonalat, ahogyan azt a 28. ábra is bemutatja.



28. ábra: A méretvonal alapú optimalizációhoz választott pontok helyzete, és az azokat összekötő méretvonalak a ritka pontfelhőn - Agisoft Metashape [saját ábra]

A 29. ábrán láthatóak a létrehozott pontok, valamint a méretvonalak paraméterei és hibái. A táblázatból egyértelműen látszik, hogy a méretvonalak elméleti távolsága szinte tökéletesen, minimális eltéréssel illeszkedik a létrehozott pontfelhőhöz.

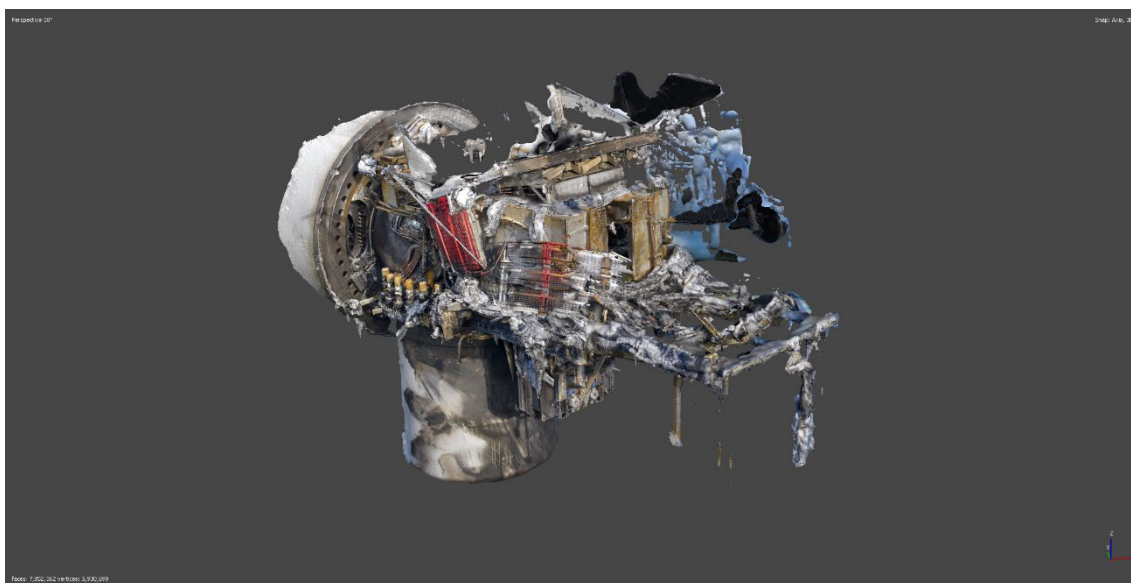
Markers	▲	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)	
✓		point 1	3.011572	51.769253	121.767152	0.005000	0.013711	7	0.660
✓		point 2	3.011599	51.769266	121.753646	0.005000	0.011681	4	0.707
✓		point 3	3.011557	51.769248	122.407207	0.005000	0.007032	10	0.478
✓		point 4	3.011611	51.769273	122.382062	0.005000	0.006492	7	0.386
✓		point 5	3.011599	51.769254	121.340947	0.005000	0.021833	5	1.245
✓		point 6	3.011587	51.769249	121.296741	0.005000	0.027451	6	1.151
Total Error									
Control points						0.016564	0.786		
Check points									

Scale Bars	▲	Distance (m)	Accuracy (m)	Error (m)	
✓		point 1_point 2	2.300000	0.050000	0.000193
✓		point 3_point 4	4.600000	0.050000	0.016359
✓		point 5_point 6	1.000000	0.050000	-0.056515
Total Error					
Control scale bars				0.033969	
Check scale bars					

29. ábra: A létrehozott pontok, valamint a méretvonalak paraméterei és hibái - Agisoft Metashape [saját ábra]

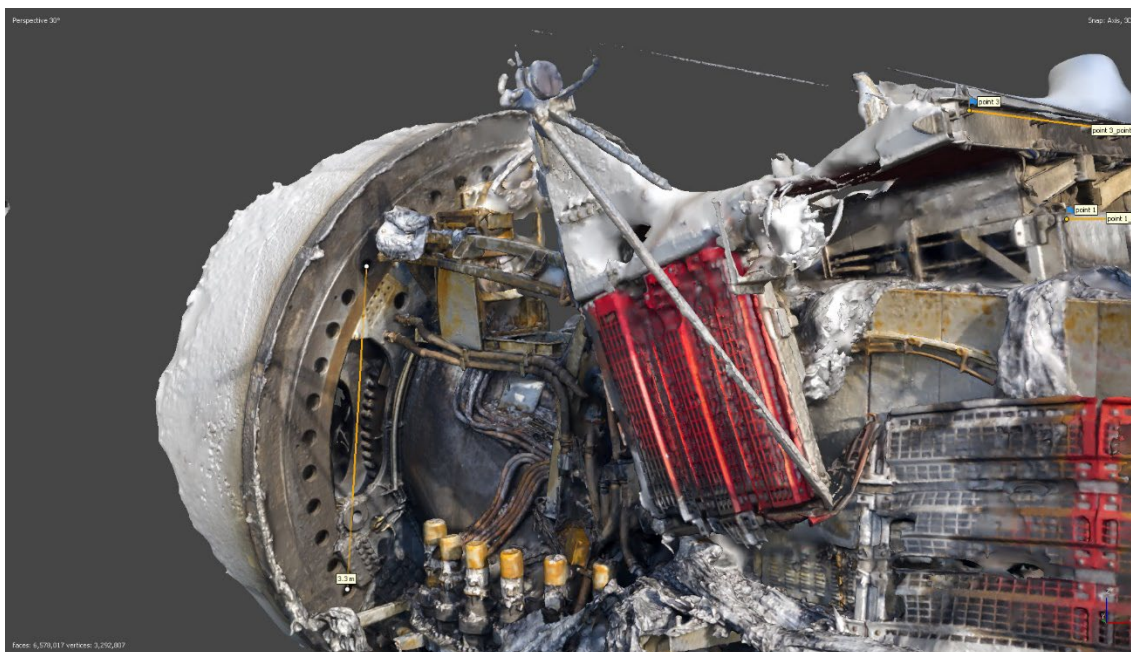
Miután a méretvonalakat azonosítottam és a ritka pontfelhőből eltávolítottam a tévesen létrehozott pontokat, következett a kameraoptimalizálás, majd a sűrű pontfelhő- és a 3D modell létrehozása.

A 30. ábrán látható egy kép a 3D modellről.



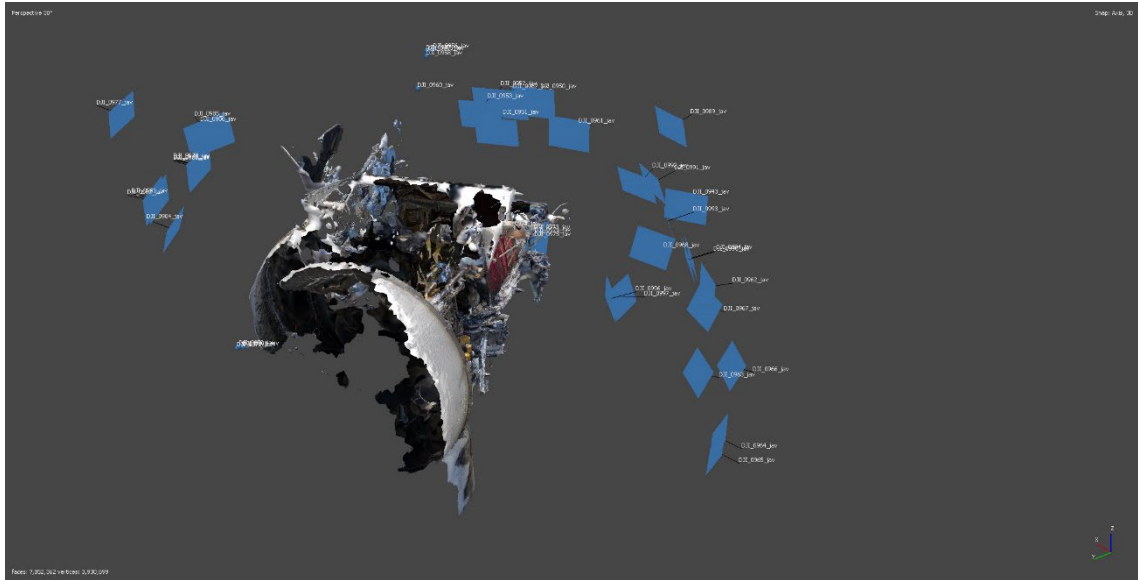
30. ábra: 3D modell a műszaki hibás szélérőműről - Agisoft Metashape [saját ábra]

A létrejött és a méretvonalakkal pontosított 3D modell már készen áll a pontos méretek rögzítésére, exportálásra a szükséges fájlformátumokban, továbbá alkalmas a sérült szélérőmű részletes elemzésére. A 31. ábrán egy ilyen gyors mérés eredménye látható.



31. ábra: Pontos méret levétele a vonalzó eszköz segítségével - Agisoft Metashape [saját ábra]

Összesen csak 44 kép állt rendelkezésemre a modellépítés során, és ebből a program 8 képnél nem találta meg kielégítően a képek helyét. A 32. ábrán látható a 3D modell és a műszaki hibás szélérőmű körül készült képek elhelyezkedése.



32. ábra: 3D modell és a műszaki hibás szélérőmű körül készült képek elhelyezkedése - Agisoft Metashape [saját ábra]

Az Agisoft Metashapeben a „Scale bar based optimization” lehetőségnek köszönhetően az ismert méreteket megadva egy relatív, mérethelyes modellt kaptam, viszont a kevés kép miatt sajnos a modell sok helyen hiányos, de egyértelműen látszik, hogy több fénykép használatával egy tökéletes modell készíthető a sérült szélérőműről. Ezáltal jelentősen csökkenthető lenne a kárfelmérés és beavatkozás tervezési ideje, lehetővé téve a szakemberek számára, hogy gyorsabban és biztonságosabban megkezdjék a helyreállítási munkálatokat.

10. ÖSSZEFOGLALÓ

Az Európai Unió azon törekvése, miszerint 2050-re a teljes karbon semlegesség megvalósíthatóvá váljon a megújuló energiahordozók nagyszámú telepítése és a technológiák fejlesztése nélkül elképzelhetetlen. A fosszilis energiahordozók árának növekedése és az ellátás biztonságának csökkenése generálja a mihamarabbi átállást és függetlenedést az energiahordozók importjától. A tervezet elérése nem tűnik megvalósíthatatlannak, ugyanis szerencsés lokalizációnak köszönhetően Európa szélenergia általi elektromos áram termelésre alkalmas területei mind onshore mind offshore tekintetben kielégítőek. Leginkább az Északi- tengeri területek és a nyugat európai országok part menti szakaszai jelentenek számottevő potenciált, de a nyugati szelek hatására a szárazföld belseje felé sodródó ciklonok, az onshore erőművek meghajtására is bőségesen szolgáltatnak energiát.

Magyarországi helyzetet figyelembe véve ugyan szélerősség-, és ez által energiatermelés tekintetében jóval elmarad a nyugat európai tagállomoktól, de még így is bőségesen rendelkezünk értékes felhasználható kapacitásokkal. Energiatermelésünk zölddebbé tétele, a globális klímapolitikai célok elérése érdekében, valamint gazdaságpolitikai szempontból minél sürgetőbb lenne mind európai, mind nemzetgazdasági szinten a jogi szabályozások egységesítése, az engedélyezési folyamatok meggyorsítása. Olyan ösztönző és kedvezményes politikai lépések megtételére is szükség lenne, mely lehetővé tenné az eddig ellehetetlenített területek betelepítését, támogatást nyújtana a modern technológiák elterjedésének prioritizálva az újrahasznosítás általi szerkezeteket.

A szélerőművek kapcsán megfogalmazott félelmek, környezeti hatások kiküszöbölésével, kontrollált és folyamatos ellenőrzésekkel és karbantartásokkal megelőzhető lenne a balesetek kialakulásának valószínűsége, mely által az egyik legmegbízhatóbb, legköltséghatékonyabb és legzöldebb energiatermelő lehetőségként tekinthetnénk a szélerőművekre.

11.SUMMARY

The European Union's aspiration to achieve complete carbon neutrality by 2050 is unthinkable without the installation of a large number of renewable energy sources and the development of technologies. The increase in the price of fossil energy carriers and the decrease in the security of supply, generate the fastest transition and independence from the import of energy carriers. Achieving the plan does not seem impossible, because thanks to a lucky localization, the areas of Europe suitable for the production of electricity by wind energy are satisfactory both onshore and offshore. Most of all, the coastal areas of the North Sea and Western European countries represent a considerable potential, but cyclons drifting inland due to the westerly winds, also provide plenty of energy to drive onshore power plants.

Considering the situation in Hungary, although it lags far behind the Western European member states in terms of wind strength and thus energy production, we still have plenty of valuable usable capacities. Making our energy production greener, in order to achieve global climate policy goals, and from an economic policy point of view, the unification of legal regulations and the acceleration of licensing processes would be as urgent as possible both at the European and national economic levels. It also would be necessary to take such encouraging and preferential political steps that would enable the settlement of previously impossible areas, and would provide support for the spread of modern technologies by prioritizing structures through recycling.

By eliminating the fears expressed in relation to wind power plants, and the environmental effects, controlled and continuous inspections and maintenance, the likelihood of accidents could be prevented by which we consider wind power plants as one of the most reliable cost effective and green energy producing options.

12.KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek Dr. Udvardy Péter egyetemi docensnek, aki segítségemre volt nemcsak témaválasztásomban, hanem annak kifejtéséhez átfogó képet adott, szaktudásával segítette a nagyobb feladatrészek mellett a finomra hangolást is. Ez által nem csak egy szakdolgozat született, hanem olyan látásmódra is sikerült szert tennem, mely zöld megvilágításban tünteti fel energia előállításunkat, és éltre szólóan formálta szemléletemet.

Köszönöm külső konzulensemnek Pál Károlynak, hogy egyedi tapasztalatait és a témakörben szerzett mélyreható tudását és látásmódját megosztotta velem, és segítséget nyújtott a tiszta és teljes átláthatóság biztosításában ezen a speciális szakterületen.

13.IRODALOMJEGYZÉK

- [1] J. EARNEST és R. STUTHI , WIND POWER TECHNOLOGY, DELHI: PHI LEARNING PRIVATE LIMITED, 2019..
- [2] D. Iuga, „European Wind Energy Association,” European Wind Energy Association, [Online]. Available: <https://www.wind-energy-the-facts.org/development-of-the-cost-of-offshore-wind-power-up-to-2015.html>. [Hozzáférés dátuma: 30. november 2023.].
- [3] W. TONG, WIND POWER GENERATION AND WIND TURBINE DESIGN, USA: WITPRESS, 2010..
- [4] Európai Számvevőszék, „www.eca.europa.eu,” Európai Unió, [Online]. Available: https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-22/SR-2023-22_HU.pdf. [Hozzáférés dátuma: 21. október 2023.].
- [5] R. GASCH és J. TWELE, WIND POWER PLANTS, NEW YORK: SPRINGER, 2012..
- [6] S. M. MUYEEN, WIND POWER, CROATIA: INTECH, 2010..
- [7] F. Tamás, „ADATBÁZISKEZELÉS ALAPJAI 1. RÉSZ,” [Online]. Available: <https://tferi.hu/adatbaziskezeles-1>. [Hozzáférés dátuma: 25. február 2022.].
- [8] G.-M. Hector, D. U. Jeffrey és W. Jennifer, Adatbázisrendszerek megvalósítása, Budapest: Panem, 2001..
- [9] „Net Jogtár,” Wolters Kluwer, [Online]. Available: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A1600277.KOR×hift=20160923&txtr eferer=00000001.txt>. [Hozzáférés dátuma: 2. október 2023.].

- [10] „Epoxy Europe,” Epoxy Europe, [Online]. Available: <https://epoxy-europe.eu/>. [Hozzáférés dátuma: 20. október 2023.].
- [11] Pál Károly, „FEOL - FEJÉR VÁRMEGYEI HÍRPORTÁL,” Double Ring Wings, 11. szeptember 2022.. [Online]. Available: https://www.feol.hu/helyi-gazdasag/2022/09/elet-a-megujulo-energia-vilagaban-egy-fejer-megyei-dronpilota-gondolatai-a-tengeri-szeleromuvek-arnyekaban#google_vignette. [Hozzáférés dátuma: 23. szeptember 2023.].
- [12] „Adobe,” [Online]. Available: <https://www.adobe.com/hu/creativecloud/file-types/image/comparison/dng-vs-raw.html>. [Hozzáférés dátuma: 6. december 2023.].
- [13] A. J. Kesik, „Tervezési alaptérkép készítése "Szakmai útmutató digitális tervezési alaptérképek készítéséhez" c. javaslat alapján,” Székesfehérvár, 2023..
- [14] Agisoft Metashape, „Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0,” 2023. [Online]. Available: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf. [Hozzáférés dátuma: 17. 04. 2023.].
- [15] „European Wind Energy Association,” European Wind Energy Association, [Online]. Available: <https://www.wind-energy-the-facts.org/>. [Hozzáférés dátuma: 24. október 2023.].
- [16] „MET Central Europe,” MET Holding AG, [Online]. Available: <https://hu.met.com/hu/mind-the-fyouture/mindthefyouture/a-szelenergia-hasznositasa-es-a-szeleromu-elonyei-illetve-hatranyai>. [Hozzáférés dátuma: 29. október 2023.].
- [17] „XFOREST,” 26. január 2020.. [Online]. Available: <https://xforest.hu/szeleromu/>. [Hozzáférés dátuma: 16. október 2023.].

14.ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A világ energiafogyasztásának megoszlása [saját ábra]	4
2. ábra: Magyarország villamosenergia termelése [saját ábra]	5
3. ábra: Magyarországi energiamix [saját ábra]	6
4. ábra: Konfúzoros besűrítés ábrája [http://www.wikipedia.org]	7
5. ábra: Szélerőmű metszete [http://www.agrarium7.hu]	9
6. ábra: Szélerőmű komplex működési ábrája [http://www.nrgreport.com]	10
7. ábra: Telepítési rajz a park hatás elkerülése érdekében [http://www.dromstorre.dk].	11
8. ábra: Telepítés Költségeinek megoszlása [saját ábra]	13
9. ábra: Szélerőművek változása 1980 és 2022 között [http://www.scirp.org]	16
10. ábra: Offshore szélerőmű típusok [http://slideplayer.hu]	18
11. ábra: Úszó tengeri szélerőművek [http://www.firstclass.hu]	19
12. ábra: 5 éves szélerősség mérési adatok összehasonlítása [saját ábra]	22
13. ábra: Széláramlások Európa felett 2019.03.15 [saját ábra]	23
14. ábra: Széláramlások Európa felett 2019.12.15 [saját ábra]	23
15. ábra: Széláramlások Európa felett 2019.06.15 [saját ábra]	24
16. ábra: Széláramlások Európa felett 2019.09.15 [saját ábra]	24
17. ábra: Szélturbina felépítése és a leggyakoribb üzemzavarok és balesetek okai [https://www.paks2.hu]	32
18. ábra: A szélerőmű leállásának okai [saját ábra]	34
19. ábra: Szélerőművek anyagának újrahasznosítási ciklusa [https://www.project-cetec.dk/uk/about/]	35
20. ábra: Meghibásodott és kiégett széltorony [Pál Károly]	36
21. ábra: Drónos felvétel a kiégett kupoláról 1. [Pál Károly]	37
22. ábra: Drónos felvétel a kiégett kupoláról 2. [Pál Károly]	37
23. ábra: Drónos felvétel a kiégett kupoláról 3. [Pál Károly]	38
24. ábra: Kárfelmérés, és a gyorsreagálású egységek behatolásának tervezéséhez elengedhetetlen a többirányú és részletpontos felvételek készítése [Pál Károly]	39
25. ábra: Eredeti, túlexponált fotó a műszaki hibás szélerőműről [Pál Károly]	41

26. ábra: Utófeldolgozott fotó a műszaki hibás szélerőműről [Pál Károly]	41
27. ábra: A méretvonal alapú optimalizációhoz választott pontok helyzete - Agisoft Metashape [saját ábra]	43
28. ábra: A méretvonal alapú optimalizációhoz választott pontok helyzete, és az azokat összekötő méretvonalak a ritka pontfelhőn - Agisoft Metashape [saját ábra]	43
29. ábra: A létrehozott pontok, valamint a méretvonalak paraméterei és hibái - Agisoft Metashape [saját ábra]	44
30. ábra: 3D modell a műszaki hibás szélerőműről - Agisoft Metashape [saját ábra] ...	45
31. ábra: Pontos méret levétele a vonalzó eszköz segítségével - Agisoft Metashape [saját ábra]	45
32. ábra: 3D modell és a műszaki hibás szélerőmű körül készült képek elhelyezkedése - Agisoft Metashape [saját ábra]	46