

# Kompozitok a szélenergia hasznosításában

Szabó Rudolf

Rejtő Sándor Alapítvány  
ingtex@t-online.hu

Szabó Lóránt

Óbudai Egyetem RKK KMI  
szabo.lorant@rkk.uni-obuda.hu

**Kulcsszavak/Keywords:** Megújuló energia, Szélturbina, Széllapát, Kompozit  
Renewable energy, Wind turbine, Wind blades, Composites

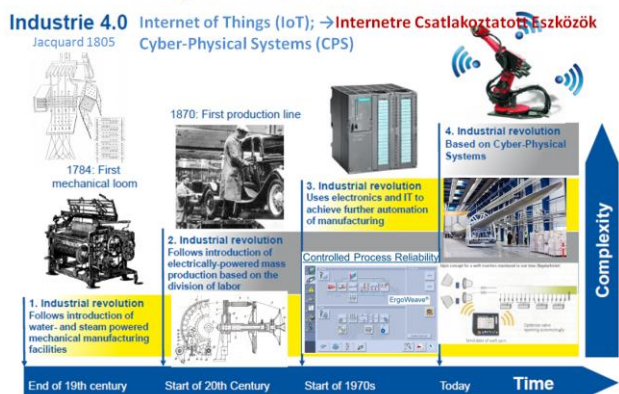
## Összefoglalás

A gyorsan növekvő technikai fejlődéssel együtt az energiaigény is drasztikusan növekedett, az energiaforrások döntő hatásúak a gazdaság egészére, a környezetre, a társadalomra, a politikára. Az első ipari forradalom kezdetétől a rohamosan növekvő energiaigény más-más energiaforrást részesített előnyben. Az utóbbi időkben egyrészt nyilvánvalóvá vált a korlátlanak tűnő fosszilis energiák véges mennyisége, ill. egyre költségesebb kitermelése, másrészt a fosszilis energiák nagy mennyiségű felhasználása a környezetre káros (CO<sub>2</sub> növekedés, légkör melegedése), emiatt a megújuló energiák, ezen belül a szélenergia hasznosítása a fejlesztések előterébe került. A szélturbinák hatékonysága a lapátmérettel növelhető, a lapátokra ható nagy mechanikai igénybevételek kompozitok használatát teszi szükségessé. Mára a szélturbinákkal előállított villamos energia aránya gyorsan növekszik és árban is versenyképes.

## Bevezetés

Az elmúlt 250 évben a technikai fejlődésében, az energiafelhasználás és energiahordozók használatában egyaránt gyökeres, periodikus változások figyelhetők meg (1. ábra). Az ezekben az időszakokban kifejlesztett meghatározó jelentőségű új technológiák minőségi változást hoztak az élet számos területén:

## 4. Ipari forradalom



1. ábra

- Az első ipari forradalomban (1700-as évek vége): a kézi munkát a gépek, gépi hajtások (víz- gőzgép vonat- és hajó közlekedés; széntüzelés) váltják fel.

Mérföldkőnek számító textilipari példák: Cartwright 1785: mechanikai szövőgép szabadalma, Jacquard 1805: lyukkártyás szövőgép vezérlés.

- Második ipari forradalom (1800-as évek vége): autó, repülőgép megjelenése (olajszármazékú hajtás), elektromos áram gyakorlati alkalmazása, automata géppuska.

Textilipari példák: Northrop: automata szövőgépe 1889, regenerált, cellulóz alapú szálak (Chardonnet 1884) (nitrát cellulóz, viszkóz szál), szintetikus szálak.

- Harmadik ipari forradalom (1970 körül): az elektronika dinamikus fejlődése, széleskörű alkalmazása. Az atomenergia felhasználása a villamos áram előállítására, gáz széleskörű használata.

Textilipar területén: az elektronikus mintázás, ellenőrzés, vezérlés jelentős teljesítménynövelést és minőségjavulást eredményezett. Új textílianyagok (pld szénszál), új alkalmazási területek (műszaki textíliák, funkcionális textíliák, kompozitok).

- Negyedik ipari forradalom (Industry 4.0, IoT – Internet of Things –: Internetre Csatlakoztatott Eszközök), termékek elektronikus ellenőrzése, az információk, a gépi paraméterek interneten keresztül továbbítása, visszatérés a megújuló energiaforrások hasznosítására.

Textilipar területén: funkcionális (pl. elektromos vezető) textíliák; nagyteljesítményű szálak (szénszál) erősítésű kompozitok (légi közlekedés, autóipar, robot karok, széllapát) használatának gyors ütemű növekedése.

A különböző időszakokban a meghatározó szerkezeti anyagok, az energiaforrások használata a technikai fejlődéssel változott (biomassza→szén→kőolaj→nukleáris energia→gáz→megújuló energiaforrások) (2. ábra).



2. ábra

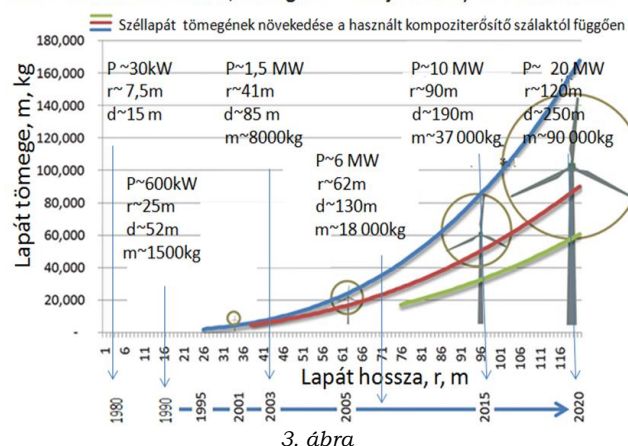
A fosszilis energiahordozók elégetésével a keletkező égéstermékek, különösen a CO<sub>2</sub> egészségkárosító hatású, továbbá a földi atmoszféra melegedését is okozza. Emiatt a megújuló (víz-, szél-, szolár-, geotermikus, biomassza-) energiák hasznosítása a jövő energiaigény biztosítása szempontjából (különösen a villamosenergia területén) kulcsfontosságú.

## A szélturbinák jellemzői

A szélben rejlő energia az emberiség számára évezredek óta ismert, aminek tájba illő bizonyítékai, a szélmalomokkal ma is találkozhatunk.

A szélturbinák használata elektromos energia előállítására a gyakorlatban az 1980-as években kezdődött (3. ábra). Kezdetben a szélturbinákat szolid méretek (7,5–10 m lapáthossz) és kis teljesítmények (kb. 10–15 kW) jellemezték. Az elmúlt közel 40 év fejlesztési eredményeit jól

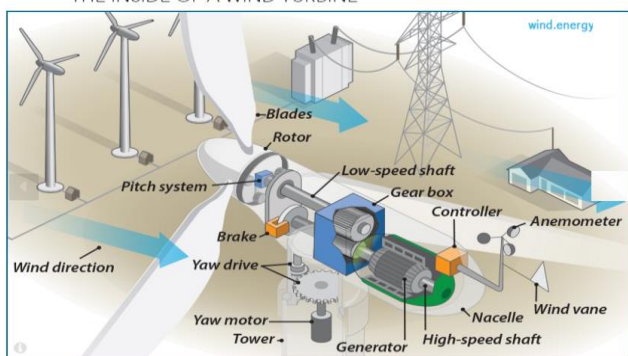
## Szélérőművek méreteinek, tömegének és teljesítményének növekedése



mutatja, hogy ma 88,4 m-es lapátokat, 8,5 MW teljesítményű szélérőműveket is gyártanak, sőt a 107 m-es lapátok (a turbinalapátok átmérője 220 m), 12 MW teljesítményű szélturbinák építése is a gyakorlati megvalósítási fázisba jutott.

A szélturbinákat csoportokban (farm) telepítik, a turbinák által termelt áram feszültségét központi szabályozó közbeiktatásával csatlakoztatják a hálózatra. A szél intenzitása a helytől rövid időn belül is változhat, így a termelt áram feszültség-ingadozása energiatárolókkal, különböző rendszerű energiaforrások egyidejű csatlakoztatásával lehetséges (4. ábra).

## THE INSIDE OF A WIND TURBINE



A szélturbinák főbb építő elemei: alapozás, torony, motolla (generátor, gyorsító hajtás, fék, szabályozó részek), szélalapát, amelyek a felállítással kiegészítve közel azonos költséghányadot jelentenek.

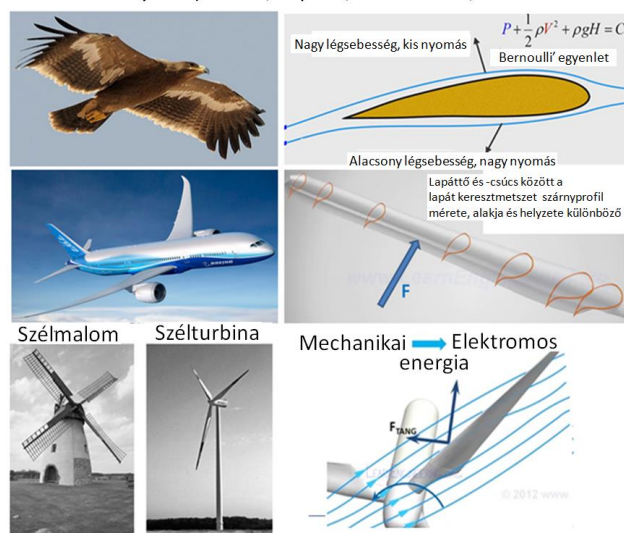
A szél sebessége a talajszinttől távolodva parabolikusan növekszik és egyenletesebb, emiatt a turbinákat lehetőleg magasra (90–120 m), az áramlási zavarást okozó tárgyaktól (hegy, épület) távolabbra (sík terület, hegytető) (onshore, azaz szárazföldi), vagy a legnagyobb szélturbinákat a tengerbe (offshore, azaz a parttól távol fekvő) sekély vízbe (50 m-ig) fixen vagy floating (úszó tartályra, kötéllel rögzítve) célszerű felállítani.

## Különböző energia-forrásokból kinyerhető energia-hatások



Energia forrás	Hatásfok, %
Nagy szélturbina	~ 25-45
Kis szélturbina	~ 10-25
Szén villamos erőmű	~ 35
Földgáz villamos erőmű	~ 35
Benzines motor	~ 25
Dízel motor	~ 35
Víz villamos erőmű	~ 80
Nukleáris villamos erőmű	~ 10-25
Solar PV (Photo Valtic)	~ 20

## Madárszárny elv (madár, repülő, szélmalom, szélturbina)



Az energiaforrások, ezen belül az elektromos áram előállításának hatékonysága eltérő, a szélalapátok mérete, kialakítása, sebessége döntő hatású a szélturbina teljesítményére nézve (5. ábra).

A forgó lapátok söprési területén áthaladó levegő a rotor forgási irányával ellentétes irányú forgásba jön. Nagyobb rotorforgási sebességnél kisebb a rotort elhagyó levegő forgási sebessége, ezáltal a hatásfok javul.

## A szélalapátok működése, jellemzői

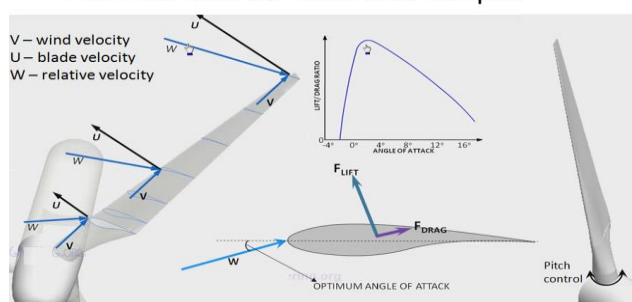
A háromlapátos turbinák a dinamikai kiegyensúlyozás, az áramlási viszonyok, az optimális költség/teljesítmény arány és az esztétika szempontjából is a legkedvezőbbek. A motolla a torony tetején elfordítható, a lapátok forgássíkját a szélre merőlegesen állítják be. A lapátok alakja a madarak, a repülőgépek szárnyához hasonló (airfoil) kialakítású, a Bernoulli-törvény alapján a nyomáskülönbségből adódó, a lapátok síkjába eső erők nyomatéka forgatja a rotort (6. ábra).

A madárszárny alakú lapáton fellépő nyomáskülönbséget a relatív légsebesség határozza meg, amit a szél és a lapát forgásából adódó merőleges sebesség vektori eredője határoz meg. A szélalapát hatékonysága akkor optimális, ha a relatív sebesség iránya a szélalapátra a 7. ábra szerinti 3–4° támadási szögben (attack) hat.

Mivel a relatív sebesség iránya a lapát sugara mentén a változó kerületi sebességből adódóan eltérő, emiatt a lapát szárnyprofilja csavart formájú. A szélső sebesség változása esetén az optimális támadási szöget a lapátokat tengelyük körüli elforgatásával érik el.

A turbinalapát szögsebességét a turbinacsúcs sebessége (70–100 m/s) korlátozza. A hosszabb lapát és a

## Pitch control to maximise output





## Szélturbina söprési területén áthaladó levegő teljesítménye

- Lapát hossza:  $r = 88,4 \text{ m}$   
 - Söprési terület:  $A = \sim 25\,600 \text{ m}^2$   
 - Szélsebesség:  $v = 15 \text{ m/s}$   
 - Levegő sűrűsége:  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$   
 Turbinalapátok söprési területén s-onként áthaladó levegő tömege ( $m'$ , (t) tonna):  
 $m' = \rho A v \approx 380 \text{ t/s}$   
 A turbinalapátok söprési területén áthaladó levegő teljesítménye ( $P_1$ ):  
 $P_1 = m' v^2 / 2 = \rho A v^3 / 2 = \sim 43 \text{ MW}$

Szélerőmű maximális teljesítménye:  $P_2 = 8 \text{ MW}$

$P_2 = M \omega$

$\omega$  – Lapát szögsebessége  $\omega = 0,12/\text{s}$

$M$  – Lapátok forgástengelyén fellépő nyomaték:

$M = P / \omega = 8 \times 10^7 / 0,12 = 7 \times 10^7 \text{ Nm}$

Egy lapátra a forgás síkjában ható szél megosztó terhelésből adódó forgató nyomatéka kb.  $2,3 \times 10^7 \text{ Nm}$ .

8. ábra

lapátsebesség a teljesítmény növelése szempontjából döntő fontosságú.

## A szélturbinák teljesítménye

A szélturbinák teljesítményét a szél sebessége és a lapátméret határozzák meg. A turbina  $4 \text{ m/s}$  szélsősebességnél kapcsol be,  $15 \text{ m/s}$ -nál éri el a maximális teljesítményt. A  $15 \text{ m/s}$ -ot meghaladó szélsősebességnél – a lapátok túlterhelésének megakadályozására – a lapátokat a hossz tengelyük körül elforgatják, a turbínák állandó, maximális teljesítményt adnak le. Biztonsági okok miatt a turbínákat  $25 \text{ m/s}$ -ot meghaladó szélsősebességnél leállítják.

A szélturbina a levegő mozgási energiájának egy részét hasznosítja, amelynek elméleti felső értéke a Betz-limit szerint max.  $59,3\%$ .

A szélben rejlő energia, ill. annak hasznosítása szempontjából döntő fontosságú (8. ábra):

- a szél és a lapát relatív sebessége,
- a lapát hossza ( $r$ ), ill. a forgó lapátok általi söprési felület ( $r^2 \eta$ ),
- a levegő sűrűsége ( $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ) és
- a lapát alakja.

A szélturbina teljesítménye ( $P$ ) a lapátok söprési területén időegység alatt áthaladó levegő tömegétől és a szélsősebesség ( $v$ ) köbével arányos:

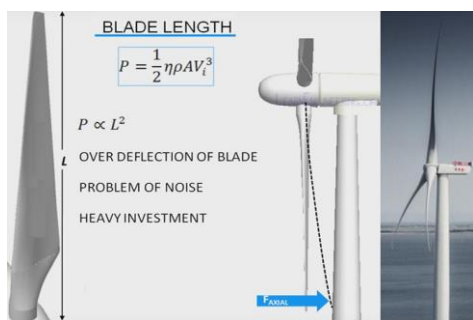
$$P = \eta \rho r^2 \pi v^3 \sim m v^2.$$

A képlet alapján belátható, hogy a nagy szélturbínákból erős szél esetén számottevő energia gazdaságos előállítására nyílik lehetőség.

## A széllapátok szerkezete, igénybevétele

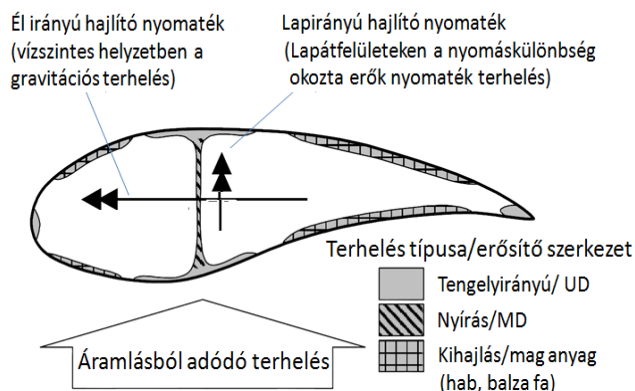
A lapátok mechanikai igénybevétele meghatározó komponensek:

- a lapátokra a légáramlás okozta nyomáskülönbségből adódó, a széllapát lapjára merőlegesen ható erő nyomatéka. A szélsősebességből adódó erő egyik



9. ábra

## Széllapát keresztmetszete, főbb igénybevételek



10. ábra

komponense a lapátok forgási síkjában hat, a turbinalapátok forgatásával az energiatermelés szempontjából meghatározó, míg a másik komponens a lapátok végét a torony irányába görbíti;

- a lapátok vízszintes helyzetében a súlyerőből adódó, változóan fellépő hajlítás okozta húzó-nyomó erők.

A lapátok kellő lapmerektségét és szilárdságát a lapáthéjakon belül kialakított hosszanti irányú szálereősítésű (üveg- vagy szénszál) kompozit gerendák biztosítják.

A szélturbina lapátok lapja közel a forgással párhuzamos, így a turbinalapát lapjára merőleges hatalmas terhelés (több  $100 \text{ t}$ ) – mint a végén befogott konzol – a lapátot a torony felé hajlítja. Emiatt a lapátnak a lap irányú terhelésekkel szemben a hajlítási deformáció csökkentésére nagy merevségűnek kell lenni (9. ábra).

A lapát súlyából és a forgató erőből adódó terhelés egyrészt számottevően kisebb, másrészt a lapát élek távolsága nagyobb, így a lapát él irányú merevítése kevésbé kritikus (10. ábra).

A zajkeltés csökkenthető, ha a lapát végét – hasonlóan az új repülőgép-szárnyvég kialakításhoz – az áramlás irányával szembe meggörbítik.

A szélturbinák másik igénybevétele az ismételt terhelésből adódó fárasztás, ami a  $25$  év alatt sok millió ciklust jelent.

A széllapátoknál a rezonancia, a jegesedés, a villámcsapás elleni védelmet is meg kell oldani, továbbá a keletkező zaj és a radarjel keltésre is tekintettel kell lenni.

A széllapát külső burkának felületét puhábbra készítik a nagy sebességű ütközések (eső, jég, esetleg madarak) okozta károk mérséklésére, továbbá UV állónak kell lenni.

## A széllapátok anyaga, készítése

A gigantikus méretű, nagy terhelésnek kitett (a végén befogott konzol) széllapátokat nagy merevségű alapvetően UD (unidirekcionális) szerkezetű kompozitokból készítik. A lapát két fő része:

- a lapirányú merevítő gerendák és
- a külső héjszerkezet, amit a két fél összeragasztásával állítanak elő.

A szálereősítésű szerkezet a fellépő mechanikai igényeknek megfelelően irányítottan alakítható ki, a mechanikai tulajdonságok is az igényeknek megfelelően széles tartományban tervezhetők.

A szénszál erősítésű kompozitok (CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer) sűrűsége ( $1,2\text{--}1,6 \text{ g/cm}^3$ ) számottevően kisebb az acélnál ( $7,85 \text{ g/cm}^3$ ), emiatt a mechanikai tulajdonságok összehasonlítását a kereszt-

Széllapát gyártására használt szénszál növekedése (kt)

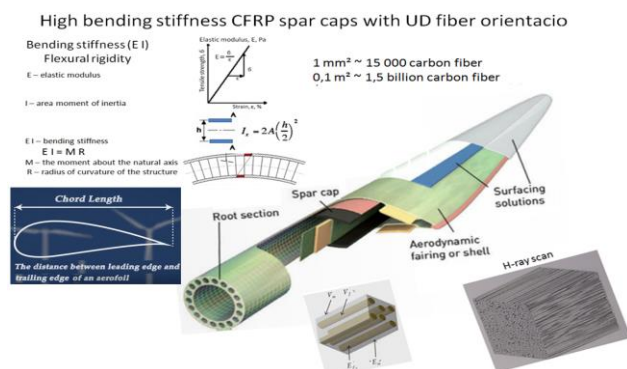


11. ábra

metszetre vonatkoztatás helyett súlyra számítva (specifikus), a mechanikai tulajdonságok reálisabban jellemezhetők.

A szénszál felhasználási igény 2017-ben 63,5 ezer t volt, amelyből 23 ezer tonnát (36%) a szélturbina lapáthoz használták (11. ábra).

A nagy mechanikai igénybevételnek (elsősorban hajlításnak) kitett széllapát kellő merevségét üvegszál erősítéssel, különösen nagy (50 m és nagyobb) lapáthossz esetén szénszál erősítéssel, a merevítő gerendákba a terhelésnek megfelelően hosszirányba (UD - unidirectional) epoxi- (hőre keményedő) gyanta mátrixba ágyazva érik el. A széllapát nagy merevségét a gerendákba beágyazott több milliárd szénszál biztosítja (12. ábra).

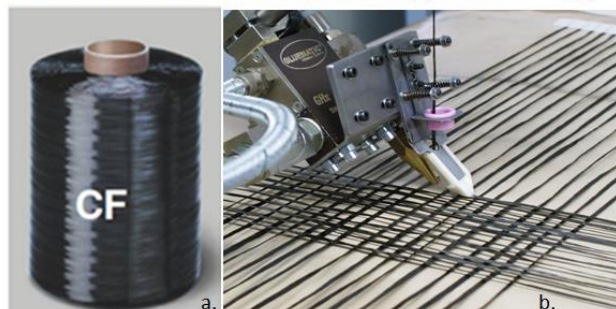


12. ábra

A nagyszámú hosszirányú egyenes elemiszál elrendezés többféleképpen is megvalósítható:

- egyszerre több tucat 50K-s kábelt a csévek (a) belső lefejtésével a robotok (b) az igényeknek megfelelően fektetik (kb. 1 millió elemiszál ciklusonként) (AFP - Automated Fiber Placement → automatikus szálfektetés) (13. ábra),

Szénszál kábel lefejtése keresztcsévéről (a) és fektetése (b)



13. ábra

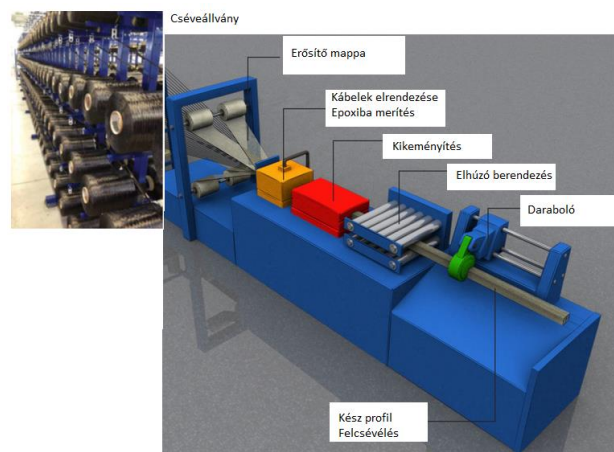
- UD kelméket (kb. 20 millió elemiszál sikonként) egymásra fektetve és az epoxigyantával történő, vákuum



14. ábra

infúzióval végzett átítatás (az UD kelme kelmesíkonként is átítható a mátrixszal, prepreg) (14. ábra),

- pultrudált lapok készítése (kb. 20 millió elemiszál laponként), a merevítő tartót a pultrudált lapok összeragasztásával alakítják ki (15. ábra).



15. ábra

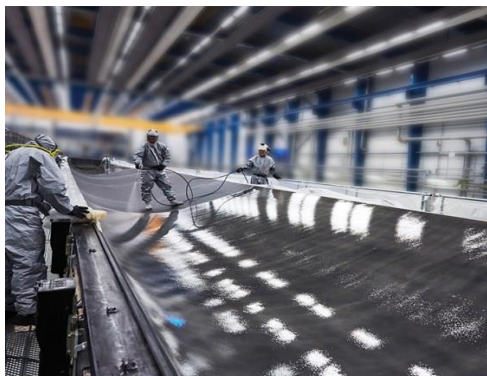
Az első két esetben a párhuzamosan elrendezett szálrendszert a mátrixszal vákuum infúzióval itatják át (16. ábra). Fontos az erősítő szálak egyenes helyzete, egyenes elrendezése. A kompozitban a gyártás során keletkező üregek a kompozit mechanikai tulajdonságait nagymértékben rontják.

A lapát külső profilrészét üvegszál erősítésű kompozit. A merevítő behelyezését követően a külső profilrészt ragasztással rögzítik (17. ábra).



16. ábra



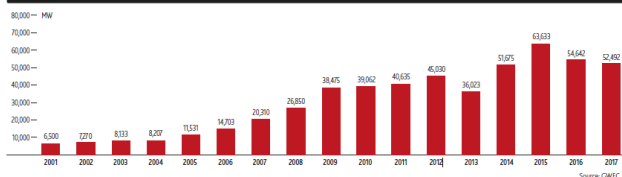


17. ábra

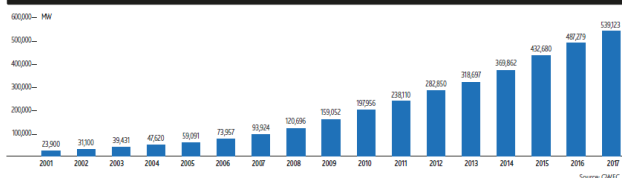
## A szél turbinák elterjedése

A szél a Föld légterében kialakuló áramlás, ami a földrajzi hely és az idő függvényében is változik. A szél térképek alapján kitűnik, hogy a Föld bizonyos területein – különösen a tengerparton vagy a tengeren – a mai energiaárakon, a nagy beruházási költségek ellenére, a 25 évre tervezett működési időben a szél erőmű telepek beruházása gazdaságos, versenyképes a fosszilis energiaforrások által előállítható villamos áram költségével. A szél turbinákkal előállított évenkénti és összesített kapacitásnövekedést a 18. ábra szemlélteti.

GLOBAL ANNUAL INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017



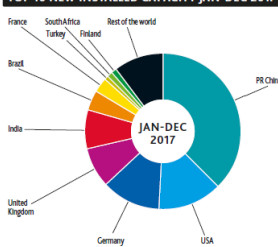
GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017



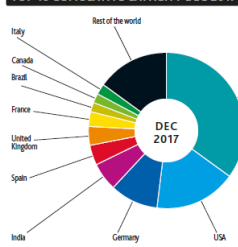
18. ábra

A 19. ábra 2017-ben a 10 legnagyobb kapacitású szél turbinát üzembe helyező ország (összesen 52 492

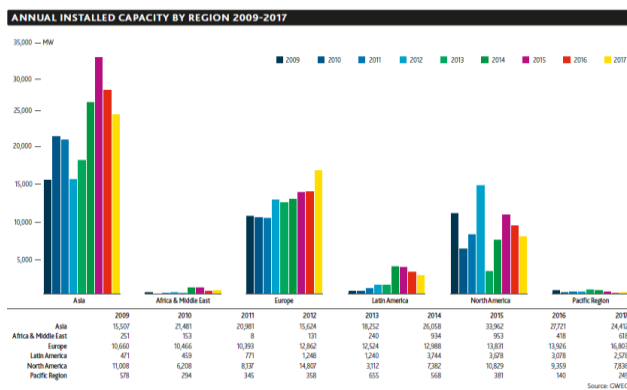
TOP 10 NEW INSTALLED CAPACITY JAN-DEC 2017



TOP 10 CUMULATIVE CAPACITY DEC 2017



19. ábra



20. ábra

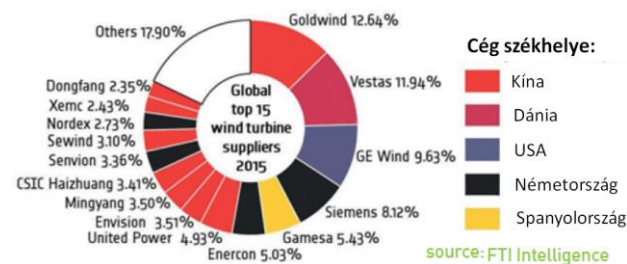
GW), valamint az összesített szél turbinák által előállított villamos energiát (összesen 539 123 GW) előállító országok megoszlását szemlélteti.

A legnagyobb szélenergia hasznosító Kína, ezt követi az USA és Németország.

A kontinensek közül Ázsia a legnagyobb szél turbinák beruházó és dinamikus növekvő, amit Európa követ (20. ábra).

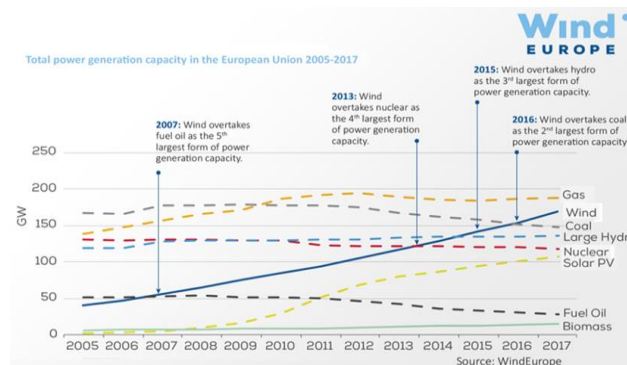
Mára az alkalmazott szél erőmű kapacitást tekintve Kína az első, Európában a villamosenergia-termelést tekintve összességében a szél turbinák a legnagyobb hányadot képviselik, s a szél erőművek gyártásában a német, a dán, a spanyol és a kínai cégek a meghatározók (21. ábra).

## 2015-ben a szél turbinák gyártó cégek ill. országok piaci részaránya



21. ábra

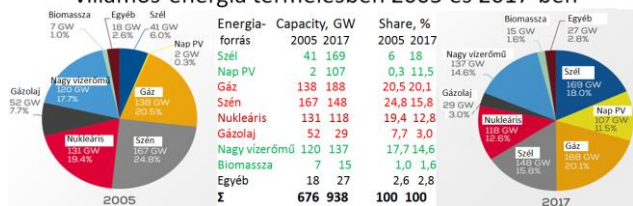
A szél turbinák teljesítménye és az energiatermelő kapacitása az elektromos termelés meghatározó tényezőjévé vált, Európában a villamos energián belül a szélenergia gyorsan növekvő aránya meggyőző (22. ábra).



22. ábra

A szélenergiából termelt villamos energia összevetését és változását a 23. ábra szemlélteti.

### Energia-források arányának változása az európai villamos-energia termelésben 2005 és 2017-ben



23. ábra

Mára a megújuló energiaforrások használata szükségessé vált, a szélenergiából előállított elektromos áram meghatározó arányt képvisel. Az elkövetkező években a szolárcellák árának jelentős csökkenésével az így előállított megújuló energia gyors ütemű növekedése várható.

Európában a szélturbinák által termelt villamos energia aránya gyorsan növekszik, Dániában a 40%-os részarányt ér el. A megújuló villamosenergia-termelésbe a napelemek árának jelentős csökkenésével a napenergia hasznosítása is meredek növekedést mutat, míg a szénből a villamosenergia-termelés volumene csökkent.

2020-ra várhatóan a világ villamosenergia-termelésének 12 %-át a szélturbinák adják. Magyarországon a hazai villamosáram igénynek (kb. 6 GW) csak kis hányada (0,3 GW) származik a szélenergiából (24. ábra).

A világban a szélenergia hasznosítás a legdinamikusabban növekvő iparág. 2017-ben a kb. 50–60 GW-nyi évenkénti kapacitásnövekedés 107 milliárd US\$ évenkénti beruházási összeget jelent, s a világon 1,15 millió ember dolgozik a szélturbina iparral kapcsolatos területeken.

A megújuló energiaforrások súlyának növelésével továbbra is nagy fontosságú a fajlagos energiafogyasztás csökkentése. A fajlagos energiacsökkentéshez elengedhetetlen az energiafogyasztás mérése, elemzése, más hasonló profilú fogyasztókkal való összehasonlítása. Ezt a célkitűzést segíti az EURATEX által a textilipari

vállalatok bevonásával kidolgozott SET ESZKÖZ, ami mindenki számára hozzáférhető (legújabb a 2.5 verzió) ([www.euratex.eu/set](http://www.euratex.eu/set)) az energiafogyasztás elemzésére, a kialakított bázisértékkel való összehasonlításra, támogatja az energiatudatos gondolkodást, ezáltal támogatja az üzemek energiafel-használás csökkentési törekvéseit.

### Felhasznált irodalom

- [1] Steinmann: Carbon fibers: an overview on manufacturing, research and market. ITA/RWTH Aachen University Mitteilungen 2015.
- [2] Szabó L. – Szabó R.: Kompozitok. Magyar Textiltechnika 2014/4. p. 2-7
- [3] T. Gries, B.: Veihelmann: Kombinierte Faserverbundstrukturen zum Aufprallschutz. Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen (ITA)
- [4] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó 2000. 455 p.
- [5] K. Durst: Faserverbunde im Automobilbau: Warum „leicht“ schwer ist Material? 13. 10. 2009, München
- [6] Szabó R.: A könnyű a jövő. XVII. ENELKO 2016. Kolozsvár, 2016. október 6-9. p. 146-151.
- [7] Szabó R., Szabó L.: Composite materials for wind turbine blade. 9. International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources and Efficiency. Szabadka, 2017. 03. 30. pp. 44-50
- [8] [www.google.hu](http://www.google.hu) – The wind resource – Sustainable Energy – TU Delft
- [9] [www.google.hu](http://www.google.hu) – Aerodynamic theory - Sustainable Energy – TU Delft
- [10] [www.google.hu](http://www.google.hu) – Future trends in wind energy - Sustainable Energy – TU Delft
- [11] [www.google.hu](http://www.google.hu) Global wind report annual market update 2015
- [12] [www.google.hu](http://www.google.hu) – Global wind installs dip as China growth slows; Vestas forecasts stable margins
- [13] JEC Composites N°122 July 2018 July Overview of the global carbon composites market p. 14-15.
- [14] Szabó R.: Technikai fejlődés okozta kihívások és válaszok. XXIX. Kandó Kálmán Nyári Egyetem Székesfehérvár/Réti-major Aranypony Zrt. 2018. július 12.