

Bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok, mint a szélerőművek ígéretes anyagai

Tamás Péter^{*,**} tudományos segédmunkatárs, Dr. Czigány Tibor^{*,**} tanszékvezető egyetemi tanár, dékán

Üveg-, szén- és bazaltszövettel erősített, epoxigyanta mátrixú mono- és hibridkompozitok szélerőművek anyagaként történő alkalmazhatóságát vizsgáltuk, a mechanikai tulajdonságaikat alapul véve. Kimutattuk, hogy a hibridkompozitoknál pozitívak a hibrid hatások, amelyeknek köszönhetően a mechanikai tulajdonságaik jobbak, mint a monokompozitoké. Rámutattunk, hogy hibridkompozitok esetében a bazaltszál – előnyös tulajdonságainak köszönhetően – helyettesítheti az üvegszálat.

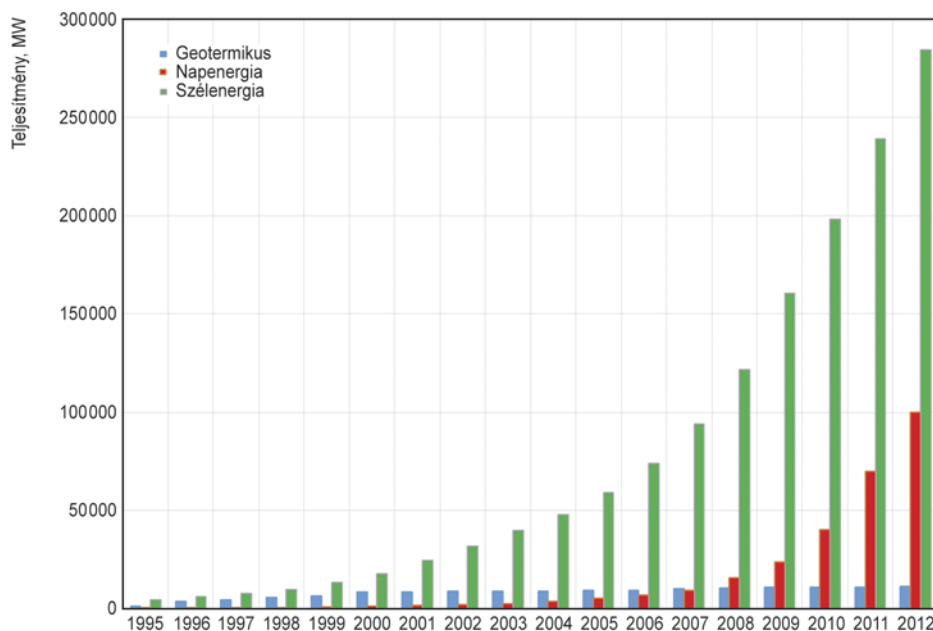
1. Bevezetés

A XXI. század egyik legnagyobb mérnöki kihívása a fejlődő ipar és társadalom által generált „energiaéhség” kielégítése. 2012-ben a Földön több mint 4,1 milliárd tonna kőolajat, továbbá 7,8 milliárd tonna kőszén termeltek ki. Mindezek mellett, a szén-dioxid kibocsátás az elmúlt 10 évben 25%-kal nőtt. A fosszilis energiahordozók csökkenésének, valamint a szigorodó környezetvédelmi előírásoknak köszönhetően, egyre inkább előtérbe kerülnek a megújuló energiaforrások. Ezek közül a legdinamikusabban fejlődő ágazat a szélenergia (1. ábra) [1, 2].

2011-ben egyedül csak az Egyesült Királyságban 487 off-shore (tengeri) szél-turbina működött, amelyek összesen 1524 MW villamos energiát termeltek, és további 937 állt építés vagy tervezés alatt. A szél-turbinák számának elterjedéséhez és teljesítményének növekedéséhez kulcsfontosságú az egyes mozgó elemek tömegének minimalizálása, a szilárdság jelentős romlása

nélkül. A rotor anyagául szolgáló kompozitokat korábban üveg- és szénszállal erősített poliésztergyantából készítették, napjainkban azonban epoxigyantára cserélték a mátrixanyagot. Egy – manapság is használatos – 3 MW teljesítményű szél-turbina rotorjának teljes tömege megközelítőleg 40 tonna, amelyből a szálerősített alkatrészek 20 tonnát tesznek ki [3]. A turbinákat a szélenergia jobb kihasználása érdekében a szárazföldről távolabb, a tengerben helyezik el egymással összekapcsolva, a tengerfenékhez horgonyozva. Az off-shore szélerőművek jelentős környezeti hatásoknak vannak kitéve, ezek a nagy hőmérséklet-ingadozás, az erős szél, a villámcsapás, az erősen korrodáló környezet, valamint az ütésszerű és a fásztó jellegű, ciklikus mechanikai igénybevételek [4–5].

A különböző igénybevételeknek és környezeti hatásoknak a kompozitok egyféle erősítőanyaggal a legritkább esetekben képesek ellenállni, ezért különböző erősítőanyagokat társítanak egymással. A hibridkompozitok egyesíthetik az egyes komponensek előnyös tulajdonságait. A hőre keményedő mátrixú, hibrid szálerősítésű



1. ábra. A megújuló energiaforrások kapacitása [1]

*BME Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

**MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

kompozitok közül a leggyakrabban használt erősítő-anyagpár a szén- és az üvegszál, azonban egyre inkább teret hódítanak a különböző természetes vagy természetes eredetű szálak is. A szénszál üvegszállal való hibridizálása nagymértékben csökkentheti a szénszál kompozitok árát, továbbá javíthatja azok ütésállóságát [6]. Naik és társai [7] szén- és üvegszövetből készített, epoxigyanta mátrixú mono- és hibridkompozitok nyomó igénybevétel hatására bekövetkező viselkedését tanulmányozták különböző irányokban. Méréseik szerint, a nyomószilárdság a deformációval arányosan növekedett. Nagy alakváltozással járó terhelés hatására a hibridkompozit nyomószilárdságára nagyobb értéket kaptak, mint a szénszövettel erősített monokompozitok esetében. A hibridizáció hatására a monokompozitokhoz képest megnövekedett a deformáció. Megállapították, hogy a nyomószilárdság vastagságirányban jelentősen nagyobb, mint lánc- és vetülékirányban. Tsai és Bosze [8] a nedvesség és hőmérséklet hatását vizsgálták rúdszerű, unidirekcionális, szén-üvegszál erősítésű, epoxigyanta mátrixú hibridkompozitok termikus és mechanikai tulajdonságaira. A próbatesteket 32 héten keresztül tartották ioncserélt vízben anyagonként más-más hőmérsékleteken. Magasabb hőmérsékleten az anyag sokkal több nedvességet vett fel, a nedvességtartalom növekedésével jelentősen csökkent az üvegesedési hőmérséklet és a nyírószilárdság is.

A hibridkompozitok gyakorlati felhasználása jelentős [9, 10]. Az üvegszál helyett alkalmazható a bazaltszál is, hiszen a kiváló tulajdonságú bazalt a természetben sok helyütt előforduló, szálhúzásra közvetlenül alkalmas vulkanikus eredetű anyag. Kémiai összetétele és mechanikai tulajdonságai hasonlóak az üvegszáléhoz [11], viszont lúgkorrozóra kevésbé érzékeny. Olvadáspontja 1450°C, mely alkalmassá teszi magas hőmérsékleten való működésre is. Teljes egészében bioinert [12], környezetkárosító hatása nem ismert. A szénszál bazaltszállal történő hibridizációja – csakúgy, mint az üvegszál esetében – nagymértékben csökkentheti a felhasználásukkal készülő kompozitok árát, javíthatja a szénszál kompozitok szívósságát és ütésállóságát, valamint az egyre szigorodó környezetvédelmi előírásoknak is megfelel [13].

Artemenko és Kadykova szén-üveg és szén-bazalt hibridszálakkal erősített, fenol-formaldehid gyanta mátrixú hibrid- és monokompozitok mechanikai tulajdonságait, keménységét és vízfelvételét vizsgálták. A bazaltszállal erősített rendszerek az üvegszállal erősítettekhez képest 58–60%-kal jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkeztek. Az anyagok 2 órán át tartó ioncserélt vízben történő áztatása nem változtatta meg a mechanikai tulajdonságokat. Kimutatták, hogy az üvegszállal történő hibridizáció, a szénszál monokompozithoz ké-

pest, 44–50%-kal rontotta a szilárdságot, míg a bazaltszál mindössze 14%-os szilárdságcsökkenést eredményezett. Wei és társai [14, 15] üveg- és bazaltszállal erősített, epoxigyanta mátrixú kompozitok degradációjával foglalkoztak. Bebizonyították, hogy a bazaltszállal erősített rendszer kevésbé érzékeny a környezeti hatásokra, mint az üvegszállal erősített kompozit. A szakirodalom alapján a bazaltszövet alkalmas lehet az üvegszövet helyettesítésére, ezáltal a szélerőművek optimális alapanyagává válhat.

A cikk célja bazaltszövettel erősített, epoxigyanta mátrixú mono- és hibridkompozitok – mint a szélerőművek lehetséges alapanyagainak – vizsgálata és összehasonlítása.

2. Felhasznált anyagok, előállításuk és vizsgálati módszereik

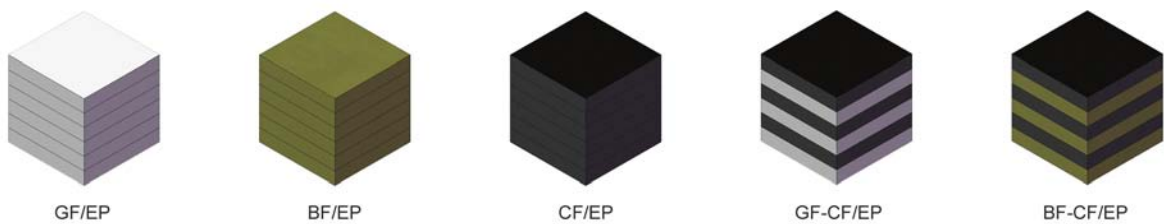
A vizsgálatok során felhasznált anyagok előállításánál a mátrixanyag *IpoX FM-20* epoxigyanta (EP) volt *IpoX MH-3120* katalizátorral (keverési arány 100:20). Az 1. táblázat mutatja a vászonkötésű erősítőanyagokat, amelyek mechanikai tulajdonságai lánc és vetülék irányban megegyeznek.

A kompozit lemezeket kézi laminálással készítettük el 6-6 réteg erősítőszövet egymásra építésével, amelyeket a hibrid rendszerek esetében váltakozó rétegrendben helyeztünk el. A gyanta térhálósodási fokát növelendő, a kikeményedést követően a lapokat 2 órára 60°C hőmérsékletű HERAEUS *T-12* típusú hőkezelő kemencébe helyeztük. A kompozit lemezek szerkezetét a 2. ábra mutatja. A vizsgálatokhoz szükséges próbatesteket a kompozit lemezekből MUTRONIC *Diadisc 4200* gyémánttárcsás vágógéppel munkáltuk ki.

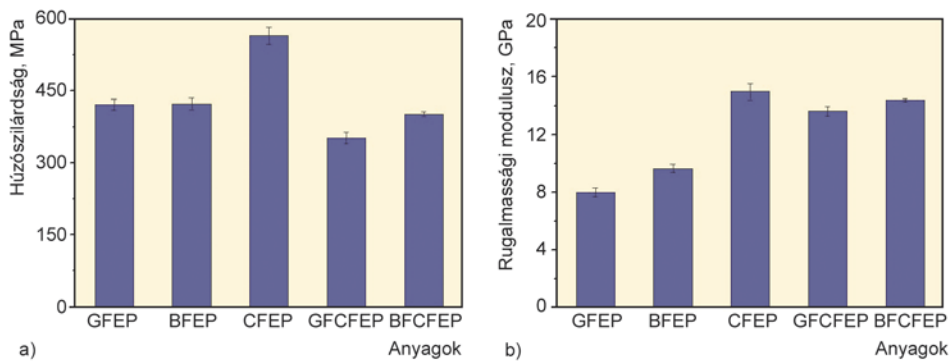
Az erősítőanyagok mechanikai tulajdonságát sávszakító vizsgálatokkal határoztuk meg MSZ EN ISO 13934-1:2000 szabvány szerint, ZWICK *Z020* típusú számítógép-vezérlésű univerzális terhelőgéppel. Szövetenként 10-10 mintát mértünk, majd ezek alapján számítottuk ki az eredmények átlagát és szórását. A szövetek szakítószilárdságát (σ_f) és rugalmassági modulusát (E_f) a sávot felépítő rovingok, valamint a rovingokat alkotó elemi szálak számának és átmérőjének, továbbá az erősítőszövet szakító erejének ismeretében határoztuk meg. A szilárdság kiszámításához szükséges szálátmérőt OLYMPUS *BX-51* típusú szálvizsgáló-képfeldolgozó rendszerrel ál-

1. táblázat.
Felhasznált erősítőanyagok

Szövet típusa	Jelölés	Szövet területi sűrűsége g/m ²	Gyártó
Üvegszövet	GF	220	Saint-Gobain Vetrotex
Bazaltszövet	BF	220	Basaltex
Szénszövet	CF	220	SGL Group



2. ábra. Az elkészített kompozit lemezek felépítése (GF/EP üvegszövettel, BF/EP bazaltszövettel, CF/EP szénszövettel, GF-CF/EP üveg/szénszövettel, BF-CF/EP bazalt/szénszövettel erősített epoxi gyanta mátrixú kompozitok)



3. ábra. A vizsgált mono- és hibridkompozitok húzószilárdsága és rugalmassági modulusza (GFEP – üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP – bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP – szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP – üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP – bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

lapítottuk meg. A mechanikai tulajdonságok meghatározásához húzó- és hárompontos hajlító vizsgálatokat végeztünk. A kompozit próbatestek húzó tulajdonságait az MSZ EN ISO 527 szabvány szerint mértük ZWICK Z020 típusú univerzális szakítógépen. A befogási hossz 150 mm, a vizsgálati sebesség 2 mm/perc volt. A próbatestek nyúlását video-extenzométerrel regisztráltuk. A hárompontos hajlító vizsgálat alapja az MSZ EN ISO 14125 szabvány volt. A mérés során 48 mm alátámasztási távolságot és 2 mm/perc terhelési sebességet alkalmaztunk. A Charpy-féle ütvehajlító vizsgálatot az MSZ EN ISO 179 szabvány alapján végeztük el CEAST Resil Impactor Junior típusú gép alkalmazásával, hornyolatlan 2×10 mm keresztmetszetű próbatesten. Az üténergia 25 J, a becsapódás sebessége 3,3 m/s, az alátámasztási távolság 80 mm volt. A mérés során a próbatest által elnyelt energiát regisztráltuk, és ebből határoztuk meg a Charpy-féle ütőszilárdságot, 5-5 próbatestet vizsgáltunk. A szakirodalom szerint [16] elterjedten alkalmazott hibrid keverékszabályt (RoHM) alapul véve kimutattuk a pozitív hibrid hatások jelenlétét. Az erősítőszálak felületén minden esetben meghagytuk a gyári felületkezelést. A gyártók az erősítőszöveteket szilános kapcsolószerral kezelték. A roncsolt próbatestek töretfelületeit JEOL JSM-6380LA pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgáltuk, a felvételek alapján minősíthető a határfelületi adhézió.

2. táblázat. Erősítőszövetek főbb mechanikai tulajdonságai

Anyag	σ_f MPa	ϵ_f %	E_f GPa
CF	3521±220	10,38±0,14	84±7
GF	2174±105	13,03±1,24	51±5
BF	1897±95	16,59±1,33	53±6

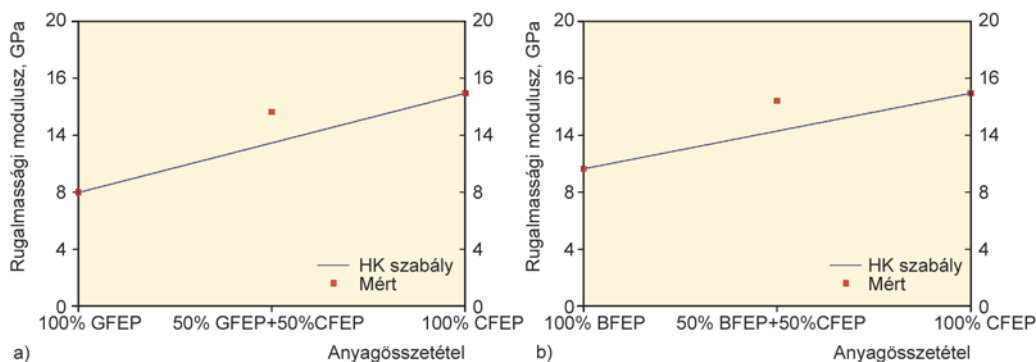
σ_f : szakítószilárdság, ϵ_f : szakadási nyúlás, E_f : rugalmassági modulusz

3. A vizsgálati eredmények és értékelésük

Az erősítőszöveteknél 10-10 mintát vizsgáltunk, amelyet a rendelkezésünkre álló szövetekből preparáltunk. A kapott eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

A bazaltszövet szakadási nyúlása és rugalmassági modulusza kis mértékben nagyobb, mint az üvegszöveté. A várakozásoknak megfelelően, a szénszövet jellemzői felülmúlják mindkét előző szövettípusét. A szénszövet szilárdsága és modulusza majdnem duplája a másik kettő szövetének. A szénszövet ridegsége miatt a szakadási nyúlása azonban kisebb.

A mono- és hibridkompozitok húzóvizsgálati eredményeit a 3. ábra foglalja össze. A monokompozitok közül a szénszövettel erősített kompozitok rendelkeztek a legnagyobb húzószilárdsággal és rugalmassági moduluszsal. A hibridkompozitok közül egyértelműen a bazalt/szén kombinációjú kompozitok húzószilárdsága volt a legnagyobb, hibrid hatást nem tapasztaltunk.



4. ábra. A hibridkompozitok esetében tapasztalt pozitív hibrid hatás a hibrid keverékszabály alapján

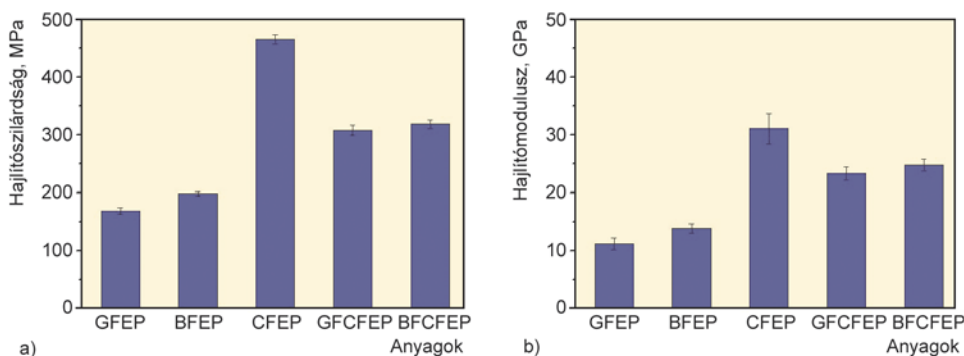
A hibrid rendszereknek az üveg- és bazaltszövettel erősített monokompozitokkal szemben nagyobb a modulusza mind az üveg/szénszövet, mind pedig a bazalt/szénszövettel erősített esetében, a pozitív hibrid hatást a hibrid keverékszabály (HK szabály) alapján készített diagram (4. ábra) is alátámasztja.

A bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok hárompontos hajlító vizsgálata során mért adatokból számított hajlítósílarádságot és hajlító rugalmassági moduluszt az 5. ábra mutatja. A monokompozitok közül a szénszövettel erősítettek mutatták a legnagyobb hajlítósílarádságot és hajlító moduluszt. A hibridek hajlításakor

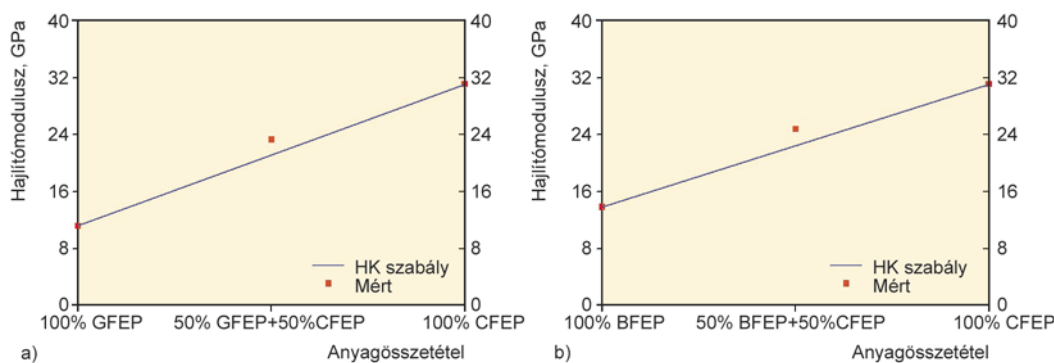
a hajlítósílarádság több mint 30%, a hajlító modulusz pedig 20%-kal kisebb a szénszövettel erősített kompozitokhoz képest. Ennek oka a hibrid rendszereket felépítő rétegek elrendezése.

A szén/üvegszövettel és szén/bazaltszövettel erősített hibridkompozitok hajlítósílarádsága 3%-kal, modulusza pedig mindössze 6%-kal különbözött egymástól. A hajlítósílarádságok tekintetében nem tapasztaltunk hibrid hatást, a modulusz értékeknél azonban már felfedezhető szinergikus hatás (6. ábra).

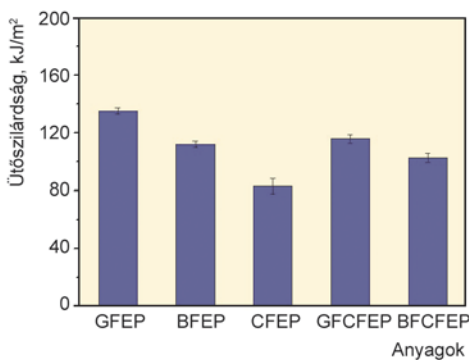
A bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok hárompontos ütvehajlító vizsgálata (Charpy vizsgálat)



5. ábra. A mono- és hibridkompozitok hajlítósílarádsága és hajlító rugalmassági modulusza (GFEP – üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP – bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP – szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP – üvegszénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP – bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)



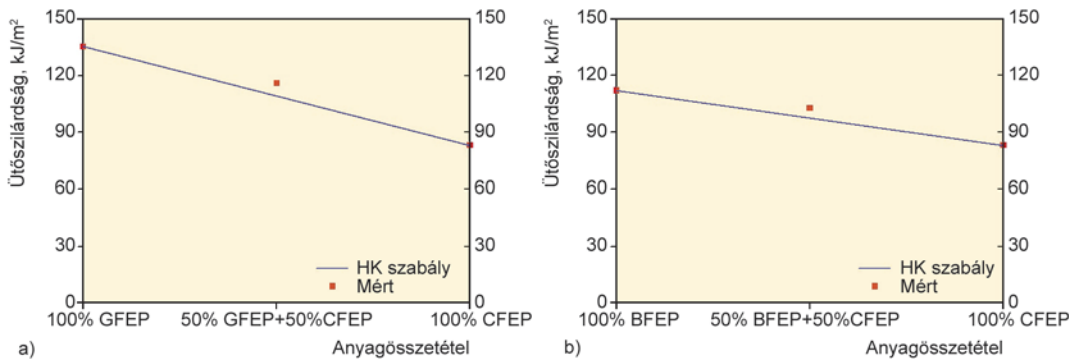
6. ábra. A hibridkompozitok esetében tapasztalt pozitív hibrid hatás a hibrid keverékszabály alapján



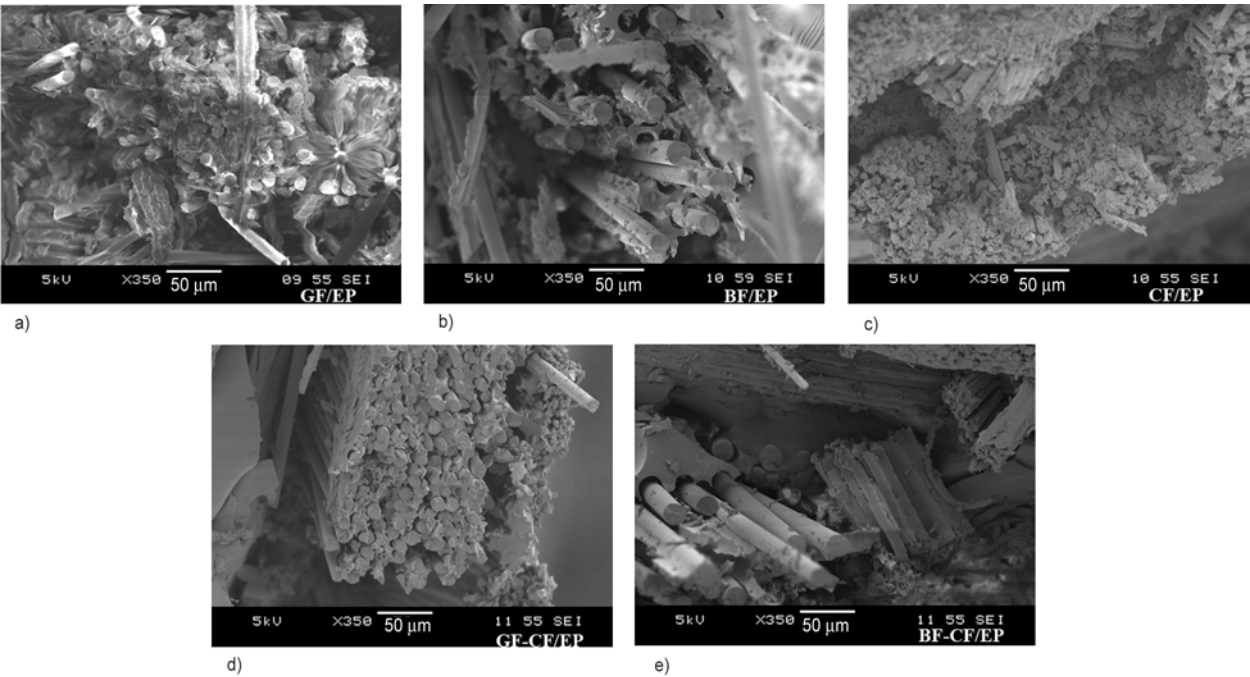
7. ábra. A mono- és hibridkompozitok ütőszilárdsága (GFEP – üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP – bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP – szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP – üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP – bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

során mért adatokból számított ütőszilárdságokat a 7. ábra mutatja. A monokompozitok közül az üvegszálak kompozitok állnak ellen legnagyobb mértékben a dinamikus igénybevételnek. A szénszövettel erősített kompozitok – a szénszövet törekenysége miatt – ridegen törnek, amit a kis ütőszilárdságuk is mutat. A hibrid rendszerek ütőszilárdsága pozitív hibrid hatást mutatott (8. ábra).

A kompozitok töretfelületéről készített pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket a 9. ábra foglalja össze. A hibridkompozitokról készült képek a különböző kompozit rétegek határát mutatják. A szálátmérő nagyságából beazonosíthatók a különböző elemi szálak, a kisebb átmérőjűek a szénszálak, a nagyobbak az üveg-, illetve a bazaltszálak. A felvételek alapján az adhézió minősége tovább javítható, amely célra, a szakirodalom szerint [17, 18], eredményesen használhatóak a nanorészecskék.



8. ábra. A hibridkompozitok esetében tapasztalt pozitív hibrid hatás a hibrid keverékszabály alapján



9. ábra. A különböző mono- és hibridkompozitok töretfelületeiről készített SEM felvételek (GFEP – üvegszövettel erősített epoxi gyanta, BFEP – bazaltszövettel erősített epoxi gyanta, CFEP – szénszövettel erősített epoxi gyanta, GFCFEP – üveg-szénszövettel erősített epoxi gyanta, BFCFEP – bazalt-szénszövettel erősített epoxi gyanta)

Kijelenthető, hogy a bazaltszál eredményesen alkalmazható az üvegszál helyett, amelynek következtében széleskörű elterjedése várható a szélérőművek anyagaként is, főleg hibrid szálerősítésű kompozitokban.

4. Összefoglalás

A fosszilis energiahordozók mennyiségének csökkenésével egyre inkább előtérbe kerül a megújuló energiaforrások használata és az ezekhez szükséges anyagok fejlesztése is. A szálerősítésű polimer kompozitok, kedvező tulajdonságaiknak köszönhetően, mára a műszaki gyakorlatban nélkülözhetetlen anyaggá váltak. A szálerősített kompozitok felhasználásában a legfrekvenciáltabb energiacsoport a szélenergia, amelynek kihasználása folyamatosan emelkedő tendenciát mutat. A turbinákat a szélenergia jobb kihasználása érdekében a szárazföldről távolabb – egymással összekapcsolva – a tengerben helyezik el úgy, hogy az egyes erőművek a tengerfenékhez vannak horgonyozva (off-shore rendszer). Az off-shore szélérőművek jelentős környezeti hatásoknak vannak kitéve, ezek a nagy hőmérséklet-ingadozás, az erős szél, a villámcsapás, az erősen korrodáló környezet, valamint az ütés- és fásasztó jellegű, ciklikus mechanikai igénybevételek. A monokompozitok tulajdonságai azonban nem mindig felelnek meg a velük szemben támasztott összes követelménynek, melyre megoldást jelenthet a mátrix- vagy az erősítőanyag hibridizációja. Gyakorlati szempontból az erősítőszálak társítása egyszerűbben kivitelezhető. A szénszálat általában üvegszállal szokták társítani, mivel ennek hatására jelentősen csökkenthető a szénszálas kompozit ára és javítható az ütésállósága.

Az általunk elkészített kompozit anyagok mechanikai tulajdonságait húzó- és hajlító vizsgálatokkal határoztuk meg. A legjobb mechanikai tulajdonságokkal a szénszálas monokompozitok rendelkeznek. A bazalt- és az üvegszál hasonló mértékben javítja a mechanikai jellemzőket mind a mono-, mind a hibridszálas kompozitok esetében. A hibridizáció eredményesen növelte a kompozitok húzó és hajlító rugalmassági modulusát, az ütőszilárdságát, amelynek köszönhetően jobban ellenáll az ütésszerű igénybevételeknek. A kapott eredmények alapján a hibridszálas kompozitok széleskörű elterjedése várható, mivel hibridizációval könnyebb a különböző követelményeknek megfelelő anyagot készíteni, mint az alapanyag vagy a monokompozit javításával.

A cikkben közölt eredmények megjelenését az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA K105355), valamint a TÉT_12_CN-I-2012-0011 pályázatai támogatták.

Irodalomjegyzék

- [1] British Petrol: BP Statistical Review of World Energy, 2013.

- [2] Half-year report, World Wind Energy Association, Bonn, Germany, 2013.
- [3] Crawford, R. H.: Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2653–2660 (2009).
- [4] Grujicic, M.; Arakere, G.; Subramanian, E.; Sellappan, V.; Vallejo, A.; Ozen, M.: Structural-response analysis, fatigue-life prediction, and material selection for 1 MW horizontal-axis wind-turbine blades, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19, 790–801 (2010).
- [5] Grujicic, M.; Arakere, G.; Pandurangan, B.; Sellappan, V.; Vallejo, A.; Ozen, M.: Multidisciplinary design optimization for glass-fiber epoxy-matrix composite 5 MW horizontal-axis wind-turbine blades, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19, 1116–1127 (2010).
- [6] Kirk, J. N.; Munro, M.; Beaumont, P. W. R.: The fracture energy of hybrid carbon and glass fibre composites, *Journal of Materials Science*, 13, 2197–2204 (1978).
- [7] Naik, N. K.; Veerajulu, Ch.; Kavala, V. R.: Hybrid composites under high strain rate compressive loading, *Materials Science and Engineering: A*, 498, 87–99 (2008).
- [8] Tsai, Y. I.; Bosze, E. J.; Barjasteh, E.; Nutt, S. R.: Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites, *Composites Science and Technology*, 69, 432–437 (2009).
- [9] Peters, S. T.: *Handbook of composites*, Chapman & Hall, London, 1998.
- [10] Miller, B.: Hybrid Process Launches –New wave in boat-building, *Plastics World*, 40–42 (1989).
- [11] Deák, T.; Czigány, T.: Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison, *Textile Research Journal*, 79, 645–651 (2009).
- [12] Pott, F.; Roller, M.; Kamino, K.; Bellmann, B.: Significance of durability of mineral fibers for their toxicity and carcinogenic potency in the abdominal cavity of rats in comparison with the low sensitivity of inhalation studies, *Environmental Health Perspectives*, 102, 145–150 (1994).
- [13] Cao, S.; Wu, Z.; Wang, X.: Tensile properties of CFRP and hybrid FRP composites at elevated temperatures, *Journal of Composite Materials*, 43, 315–330 (2009).
- [14] Wei, B.; Cao, H.; Song, S.: Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment, *Materials & Design*, 31, 4244–4250 (2010).
- [15] Wei, B.; Cao, H.; Song, S.: Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 22–29 (2011).
- [16] Czigány, T.: Hibrid szálerősítésű polimer kompozitok, *Anyagvizsgálók Lapja*, 2, (2004).
- [17] Inam, F.; Bhat, B. R.; Luhyna, N.; Vo, T.: Comparison of structural health assessment capabilities in epoxy – carbon black and epoxy – carbon nanotube nanocomposites, *eXPRESS Polymer Letters*, 8, 55–61 (2014).
- [18] Molnár, K.; Kostáková, E.; Mészáros, L.: The effect of needleless electrospun nanofibrous interleaves on mechanical properties of carbon fabrics/epoxy laminates, *eXPRESS Polymer Letters*, 8, 62–72 (2014).