



A sós víz hatása a bazaltszál erősítésű kompozit tulajdonságaira

The Effect of Salt Water on the Properties of Basalt Fibre Reinforced Composites

Tamás-Bényei Péter^{1,2}

¹ HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország, tamasp@pt.bme.hu

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, Magyarország, tamasp@pt.bme.hu

Abstract

The use of natural or naturally derived reinforcing materials in polymer composites is increasing, thanks to the growing importance of sustainable economy and environmental consciousness. The most promising natural reinforcing material is basalt fibre, which has a very similar chemical structure to glass fibre, which is widely used. However, due to the difference in chemical structure, basalt fibre may be more resistant to more aggressive environments, such as seawater. In this research, the effect of salt water on basalt fibre and its composites was analysed. Unimpregnated basalt, glass and carbon fibre as well as impregnated composites with different concentrations of saltwater solutions were treated for different durations. The effect of salt water was studied by mechanical and morphological tests.

Keywords: *basalt fibre, salt water, ageing, polymer composite.*

Összefoglalás

A fenntartható gazdasági szemlélet és a környezettudatos gondolkodásmód folyamatos térhódításának köszönhetően a polimer kompozitokban is egyre nagyobb teret nyer a természetes vagy természetes eredetű erősítőanyagok alkalmazása. A természetes eredetű erősítőanyagok közül a bazaltszál tűnik a legígéretesebbnek, amely kémiai szerkezetét tekintve nagyon hasonló a nagy mennyiségben használt üvegszálhoz. A kémiai felépítés különbségének köszönhetően azonban a bazaltszál jobban ellenáll az agresszívabb környezetnek, mint például a tengervizes környezetnek. Kutatásom során elemeztem a sós víz bazaltszálra és belőle készülő kompozitokra gyakorolt hatását. Különböző koncentrációjú oldatokkal eltérő ideig kezeltem impregnálatlan bazalt-, üveg- és szénszálat, valamint impregnált kompozitokat is. A sós víz hatását mechanikai és morfológiai vizsgálatokkal tanulmányoztam.

Kulcsszavak: *bazaltszál, sós víz, öregítés, polimer kompozit.*

1. Bevezetés

A nagy igénybevételnek kitett alkatrészek megalkotására a korszerű anyagtudomány kiváló anyagkombinációkat kínál. A szerkezeti anyagokat alapvetően három csoportra lehet bontani, amelyek közül az egyik a polimerek családja. Az anyagok egy különleges csoportja a polimer kompozitoké, amelyeket nagy fajlagos szilárdság és tervezhető anizotrópia jellemez. A polimer

kompozitok erősítőanyagból és mátrixanyagból állnak, amelyek közül az erősítőanyag felelős a teherviselés megvalósításáért.

Az erősítőanyag jellemzően szál formájú, anyagát tekintve pedig az üvegszál és a szénszál a leggyakrabban alkalmazottak. Napjainkban a környezettudatos gondolkodásmód és a fenntartható gazdasági szemlélet terjedése következtében egyre inkább előtérbe kerül a természetes vagy a természetes eredetű erősítőanyagok felhasználása is.

A polimer kompozitok egyik legigéretesebb természetes eredetű erősítőanyaga a bazaltszál.

A bazalt egy, a természetben sok helyütt megtalálható vulkanikus kőzet, amelynek kémiai összetétele nagyon hasonló az üvegszáléhoz, legfontosabb alkotóelemei a SiO_2 , az Al_2O_3 , a CaO , az MgO , a FeO és a Fe_2O_3 [1].

A bazaltszál mechanikai tulajdonságai szintén az üvegszáléhoz hasonlóak, emellett nagy előnye, hogy természetes anyag, bioinert, nem okoz irritációt és környezetbarát is [2], emellett ellenáll az UV- és a nagy energiájú elektromágneses sugárzásnak is [3]. A bazaltszál kivételes ellenálló képessége kiterjed a kémiai ellenálló képességre is [4].

A jobb mechanikai jellemzőjű folytonos bazaltszál kétlépcsős szálhúzással állítható elő [5]. A bazaltszálak szakítószilárdságát a gyártástechnológia mellett számos további tényező befolyásolja, mint például a kémiai összetétel, a szálátmérő, a szálszerkezeti inhomogenitások is. A bazaltszál kevésbé érzékeny a szálöregedésre, mert a benne lévő vas-oxidok göcképzőként viselkedve finom és viszonylag homogén kristályos szerkezet kialakulását segítik elő [6].

A bazaltszál előnyös tulajdonságainak köszönhetően egyre szélesebb körű elterjedése várható különböző területeken, ahol agresszívabb környezeti igénybevétel érheti. A környezeti igénybevételek az alkalmazási területek szerint igen eltérőek lehetnek [3].

Több kutató már foglalkozott a tengervíz bazaltszálak kompozitok tulajdonságaira gyakorolt hatásának értékelésével [7], azonban az elemzések korántsem voltak teljes körűek.

Wei és társai [8] a tengervíz hatását vizsgálták az üveg- és bazaltszálak kompozitok tulajdonságaira. Kimutatták, hogy a bazaltszálak kompozit jobban ellenáll a tengervíznek, mint az üvegszálak kompozitok. Bonsu és társai monokompozit [9] és hibrid kompozit [10] formában elemezték az üveg- és a bazaltszál jellemzőinek változását rögzített oldatkonzentráció és eltérő tartási idő mellett. Kimutatták, hogy a mechanikai tulajdonságok csökkenését elsősorban a szál-mátrix adhézió jelentős romlása, valamint a víz lágyító hatása okozza.

Emellett Fourier-transzformációs, infravörös spektroszkópiával (FTIR-spektroszkópia) megvizsgálták a beágyazott szálak felületét kezelés előtt és 305 nap öregítés után. A vizsgálatok eredményei szerint a tengervíz kezelés megváltoztatja a szálak felületének kémiai összetételét.

Davies és társai [11] a bazaltszálak kompozitok különböző hőmérsékletű, sós vízben történő áztatás hatására létrejövő tulajdonságváltozását ele-

mezték statikus és ciklikus vizsgálatokkal. Kimutatták, hogy a bazaltszálak kompozitok hasonlóan viselkedtek, mint az üvegszálak. A rétegek közötti nyírószilárdság csökkenése mindkét esetben 20% körüli volt, amit a degradáció és a 1,5% körüli nedvességfelvétel okozott.

Kaybal és társai [12] a sós víz hatására létrejövő rétegelválást halloysit nanocső (HNT) hozzáadásával próbálták kompenzálni. Elemezték a kompozitokban az igénybevételek hatására létrejövő károsodási mechanizmusokat. Kimutatták, hogy a HNT korlátozta a nedvességfelvételt, ezáltal nagyobb maradó szilárdságot eredményezett a kompozitokban. Több kutató vizsgálta a tartási idő [13], a közeg hőmérsékletének hatását [14] a morfológiai és mechanikai jellemzőkre [15, 16], azonban nem elemezték a koncentráció hatását, továbbá nem foglalkoztak a mátrixanyag nélküli erősítőanyagok tulajdonságváltozásával.

Kutatásom során laboratóriumi körülmények között elemeztem a sós víz hatását a bazaltszálra és a bazaltszál szövet felhasználásával készülő, epoxigyanta mátrixú kompozitok tulajdonságaira. Referenciaként a leggyakrabban alkalmazott erősítőanyagokat (üvegszál, szénszál) és az ezek szöveteivel készült kompozitjait tekintettem, és ezek kezelését is végrehajtottam.

2. Felhasznált anyagok, módszerek és berendezések

Ebben a fejezetben foglaltam össze a kutatás során felhasznált anyagokat, a minták előállítására szolgáló eljárást, valamint a próbatestek vizsgálatához felhasznált vizsgálati módszereket és berendezéseket.

2.1. Felhasznált anyagok

A kutatásom során a vizsgálatokhoz a bazaltszál szövet mellett a két leggyakrabban alkalmazott erősítőanyagot, üvegszál- és szénszál szövetet használtam fel (1. táblázat). Az erősítőszövetek vaszonkötésűek voltak, és mindegyiket epoxigyantához felületkezelték.

A polimer kompozitok előállításához IpoX Chemicals Kft. által készített MR3009 típusú bisfenol-a típusú, általános célú lamináló epoxigyantát („A” komponens) alkalmaztam MH3120 típusú, aminos térhálósítóval („B” komponens). A mátrixanyag alapvető jellemzőit a 2. táblázat foglalja össze.

A kompozitlemezeket kézi laminálással készítettem el. A mátrixanyag komponenseinek tökéletes elegyedését kétlépcsős keveréssel biztosítottam. Az első lépésben a komponenseket 5000 1/perc

1. táblázat. A kísérleti minták erősítőanyagai

Anyag	Gyártó	Típus	Területi sűrűség
Bazalt-szál szövet	Basaltex (Belgium)	BAS 220 P	220 g/m ²
Üvegszál szövet	UNIQUE textiles (Csehország)	UTE 220 P	220 g/m ²
Szénszál szövet	SGL Group (Németország)	SIGRATEx C W200-PL1/1	200 g/m ²

2. táblázat. A vizsgálatokhoz felhasznált erősítőanyagok

„A” komponens	„B” komponens	Keverék	
Dinamikai viszkozitás		Tömegrány	Gélesedési idő
2000 mPas	300 mPas	100 : 20	45 min

fordulatszámú, IKA RW 16 Basic típusú, száras keverővel 3 percig kevertem szobahőmérsékleten. Ezután a keveréket 2 percig pihentettem, majd megismételtem az első lépést. A laminálás során minden egyes réteg átimpregnálása után görgővel távolítottam el a szövetből a légbuborékokat és a felesleges gyantát is. A kompozitlemezek felépítését 6 réteg erősítőanyag felhasználásával állítottam elő. A gyártás során minden esetben a gyártó által javasolt 4 órás, 60 °C-on történő utótérhálósító hőkezelést alkalmaztam Heraeus UT20 típusú szárítószekrényben.

Az elkészített anyagokat a könnyebb azonosíthatóság érdekében rövidített elnevezéssel láttam el, ahol a GFEP az üveg-, a BFEP a bazalt-, a CFEP a szénszállal erősített, epoxigyanta alapú kompozitot jelenti.

2.2. Vizsgálati módszerek és berendezések

Az erősítőszövetek viselkedését MSZ EN ISO 13934-1:2013 szabvány szerinti sávszakító vizsgálatokkal elemeztem, Zwick Z020 típusú szakítógéppel. A vizsgálathoz használt sávok hossza 250 mm, szélessége 50 mm volt. A szövetek szakítószilárdságát és rugalmassági modulusát a sávot felépítő rovingok, valamint a rovingokat alkotó elemi szálak számának és átmérőjének, továbbá az erősítőszövet szakítóerejének ismeretében számítottam ki.

Szövetenként 10-10 mintát vizsgáltam szobahőmérsékleten. A kompozitok húzóvizsgálatát az MSZ EN ISO 527-4:2023 szabvány alapján, ZWICK Z020 típusú szakítógépen hajtottam végre 250

mm hosszú és 2×25 mm keresztmetszetű próbatetek felhasználásával. A szakításkor felvett erő-elmozdulás görbéből húzószilárdságot, szakadási nyúlást és húzó rugalmassági modulusot határoztam meg. A húzóvizsgálat során a befogási hossz 150 mm, a szakítási sebesség 2 mm/min volt. Az eredmények pontosabbá tételéhez a mérés során a nyúlás méréséhez videoextenzométert is használtam. Kompozitonként 5-5 próbatestet vizsgáltam szobahőmérsékleten.

A kompozitok szobahőmérsékletű, hárompontos hajlítóvizsgálatát az MSZ EN ISO 14125:1999 szabvány szerint, ZWICK Z020 típusú szakítógépen végeztem el. A mérésekhez alkalmazott, 2×10 mm keresztmetszetű próbatetek vizsgálata során 64 mm alátámasztási távolságot és 5 mm/min terhelési sebességet alkalmaztam. A próbateteket maximálisan 6,4 mm határlehlajlásig terheltem. Az erő-lehlajlás görbéből hajlítófeszültséget és hajlító rugalmassági modulusot számítottam. Kompozitonként 5-5 próbatestet vizsgáltam.

A kompozitok Charpy-féle ütővizsgálatát az MSZ EN ISO 179-2:2020 szabvány alapján végeztem el, CEAST Resil Impactor Junior típusú gép alkalmazásával, bemetszés nélküli, 2×10 mm keresztmetszetű próbatesten. Az alkalmazott ütési energia 25 J, a becsapódás sebessége 3,3 m/s, az alátámasztási távolság 80 mm volt. A mérés során a próbatest által elnyelt energiát regisztráltam, és ebből határoztam meg a Charpy-féle ütőszilárdságot. A méréseket kompozitmintánként legalább 5-5 próbatesten végeztem el szobahőmérsékleten.

A Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiai (FTIR) méréseket Perkin Elmer Spectrum 400 típusú berendezésen hajtottam végre, reflexiós üzemmódban. A berendezésben található fényforrás a középtéri és a távöltéri IR-tartományban sugárzó, hosszú életű fényforrás, amely lehetővé teszi a vizsgálatokat a 4000–6500 cm⁻¹, illetve 2500–15385 nm hullámhossztartományban.

Az ultraibolya (UV) spektroszkópiai vizsgálatokat Hewlett Packard 8452A típusú, diódasoros detektorral ellátott spektrométerrel végeztem abszorpciós üzemmódban. A berendezés 190–820 nm hullámhossztartományban üzemelő, látható UV-fényforrást használ, 2 nm-es felbontással.

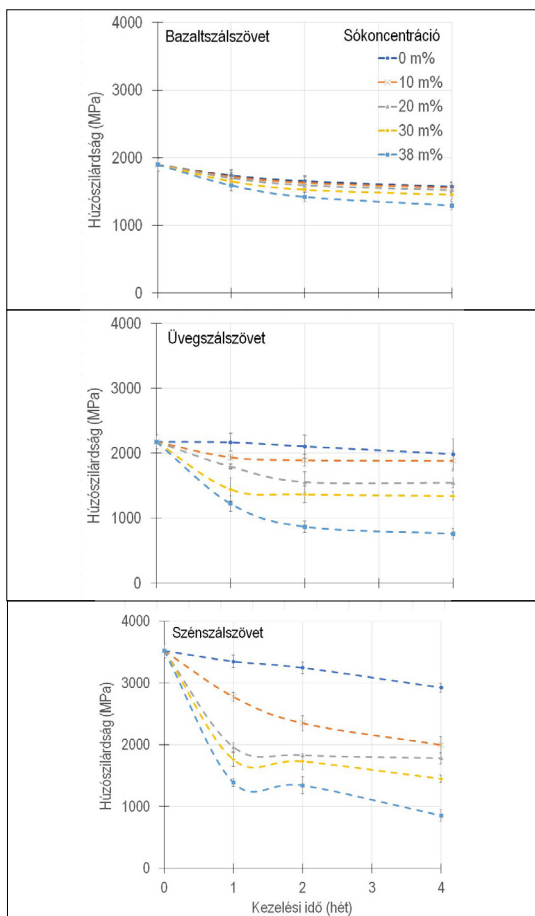
A minták mikroszerkezet-vizsgálatát JEOL JSM-6380LA pásztázó elektronmikroszkóppal hajtottam végre. A vizsgálatok során a roncsoló próbatetek töretfelületéről készítettem felvételeket, amelyek alapján megállapítható a határfelületi adhézió minősége. A vizsgált felületeket a mérés előtt vezetőképes réteggel vontam be az elektrosztatikus feltöltődés elkerülése érdekében.

3. Kísérleti rész

Ebben a fejezetben foglaltam össze a kutatás kísérleti részében végrehajtott mérések eredményeit és következtetéseim.

3.1. A sós víz hatása az erősítőanyagok jellemzőire

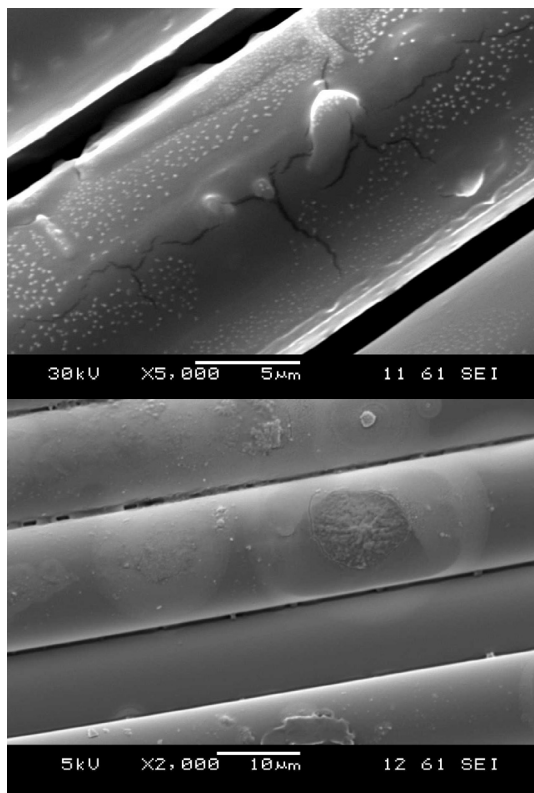
A sós víz okozta korrózió az off-shore szél-erőművek lapátjait is felépítő polimer kompozitok szempontjából is reális veszélyt jelent. A nedvesség már feltárt lágyító és adhéziót károsító hatása mellett egy esetleges sérülés esetén az erősítőszövet is érintkezhet a tenger vizével, ami így károsíthatja közvetlenül az erősítőszövetet is. Ennek a hatásnak a vizsgálatához tengervíz szimuláló, különböző koncentrációjú (0, 10, 20, 30, 38%) kezelőoldatokat készítettem, majd eltérő időtartamokig (1, 2, 4 hét) behelyeztem abba az erősítőszöveteket, valamint a kompozitokat.



1. ábra. A sós víz hatása az erősítőszövetek húzószilárdságára

A koncentráció állandó értéken tartása érdekében a kezelést zárt tartályban, fénytől elzárva végeztem. A telítési oldatkonzentrációjú oldattal (38%) történő kezelést az indokolta, hogy a szél-erőművek lapátjain lokálisan megnövekedhet a koncentráció. Minden vizsgálat előtt desztillált vízzel öblítettem le a minták felületét. A kezelés erősítőszövetekre gyakorolt hatását sávszakító vizsgálatokkal elemeztem, amelyek eredményét az 1. ábra foglalja össze. A sávszakító vizsgálat eredményei szerint minden egyes erősítőszövet húzószilárdsága folyamatosan csökkent az oldatkonzentráció és a kezelési idő növelésével. Ez a csökkenés a szénszál szövet esetén volt a legnagyobb (76%), amit az üvegszál szövet követett (65%), a legellenállóbbnak pedig a bazaltszál szövet bizonyult (32%).

A bazaltszál szövet esetében tapasztalható szilárdságromlást a sós víz és a bazaltszál szövet elemi szálai közötti kölcsönhatás okozza, amelynek bizonyítására készített pásztázó elektronmikroszkópi felvételeket a 2. ábra mutatja.



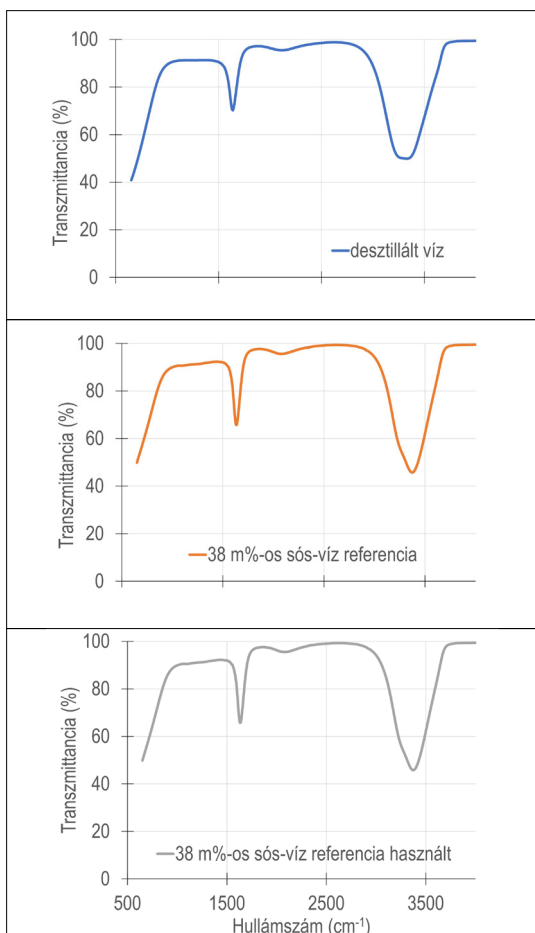
2. ábra. Az elemi bazaltszálak károsodása a sós viz-es kezelés hatására; 38% koncentráció 4 hét (felső), 30% koncentráció 4 hét (alsó)

A felvételek tanúsága szerint a bazaltszál szövetet alkotó elemi szálak károsodnak, felületükön repedések, bemaródások figyelhetők meg.

A kezelés hatására valószínűsíthetően valamely összetevő kivált, kioldódott az elemi szálakból, aminek bizonyítására mintát vettem az oldatok készítéséhez használt desztillált vízből, valamint az elkészített, 38% koncentrációjú oldatból, amiben nem voltak erősítőanyagok, továbbá abból az oldatból is, amiben a bazaltszálak 4 hetet töltöttek.

A folyadékokat Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiai vizsgálatnak vettem alá. Mintánként 3-3 mérést hajtottam végre, és az egyedi spektrumgörbék átlaggörbéit ábrázoltam (3. ábra).

Az eredmények alapján a különbség kizárólag a referenciaként használt desztillált víz és a 38% koncentrációjú sós vizes oldat között figyelhető



3. ábra. A Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiai vizsgálatok eredménye

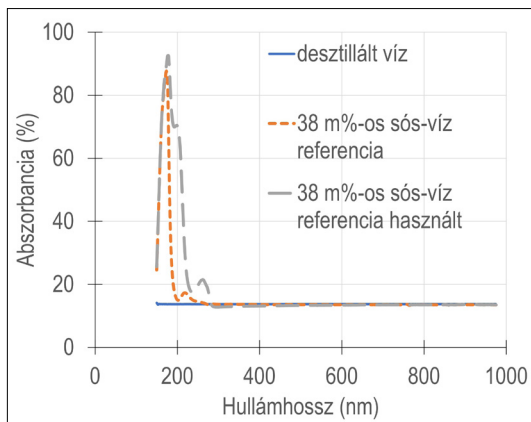
meg. A detektálható eltérés mindössze transzmittancia-változásban és nem hullámhossz-eltérésben nyilvánul meg. A két jellegzetes csúcs a vizes oldatokat jellemző karakterisztikus jel. Vélhetően a hullámhossztartomány korlátozza a kioldódó elemek azonosítását, ezért UV-spektroszkópiát alkalmaztam, amely kisebb hullámhossztartományban üzemel. Mintánként itt is 3-3 egyedi spektrumgörbe átlagát ábrázoltam (4. ábra).

A referenciaként vizsgált desztillált víz abszorbanciája elhanyagolható a 38%-os sós vizes oldathoz képest. A sós vizes oldatok esetében meghatározott jellemző hullámhosszokat a 3. táblázat foglalja össze. A szakirodalom alapján [17–19] a használt sós vizes oldat esetében látható 190–220 nm közötti értékek (199,76; 218,10) a nátrium és a kálium, míg a nagyobb csúcserték (262,62 nm) a vas és a vas-oxidra jellemző karakterisztikus csúcs tartományába esnek.

A spektroszkópiai vizsgálatok igazolták, hogy a bazaltszál szövet mechanikai tulajdonságai a sós vizes kezelés hatására történő kioldódás miatt csökkentek, amit a bazaltot felépítő vas, illetve vas-oxid sós vízzel történő kölcsönhatása okozott.

3. táblázat. A rögzített UV-spektrumok karakterisztikus csúcsai

Anyag	Hullámhossz-csúcserték (nm)		
	1.	2.	3.
38%-os sós víz, referencia	173,57	218,1	–
38%-os sós víz, használt	178,81	199,76	262,62



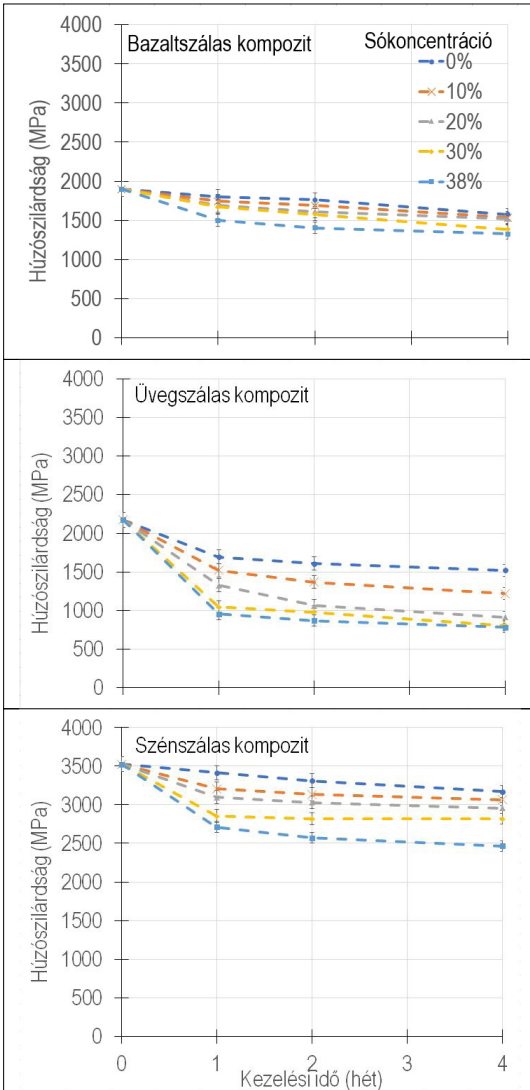
4. ábra. Az ultraviola spektroszkópiai vizsgálatok eredménye

3.2. A sós víz hatása a kompozitok jellemzőire

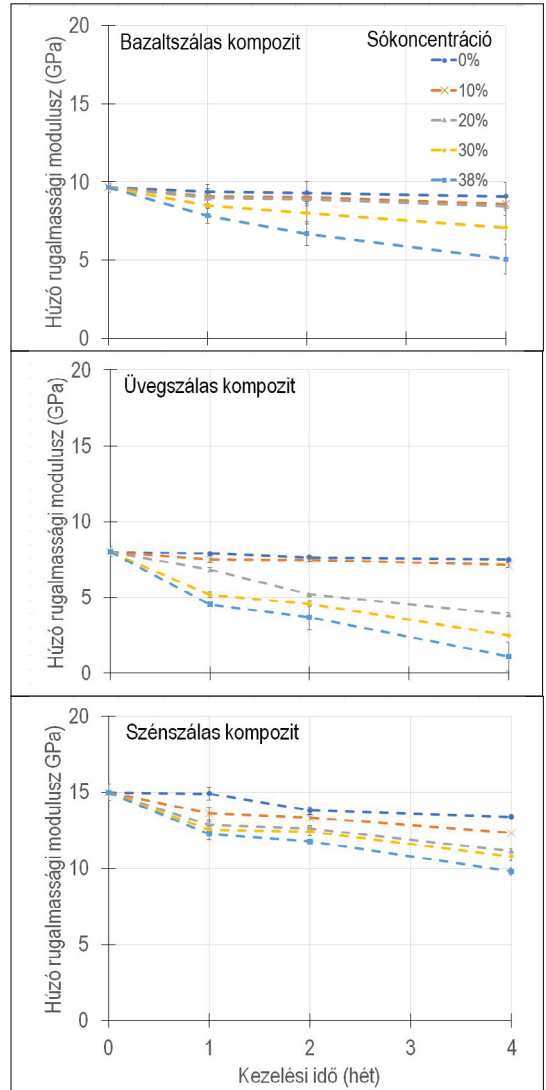
Az erősítőszövetek után húzó-, hárompontos hajlító és Charpy-vizsgálatokkal elemeztem a sós víz hatását a bazaltszál mono- és hibridkompozitok mechanikai tulajdonságaira. A vágással kialakított próbatestek széleit viasszal zártam le, elkerülendő a sós víz közvetlen bejutását a kompozit anyagba. A húzóvizsgálatok eredményeit az **5. ábra** és a **6. ábra** mutatja.

A húzóvizsgálatok eredményei alapján a sós víz legkevésbé a bazaltszál szövettel erősített kompozitot károsította, ami annak köszönhető, hogy

a bazaltszál szövet jobban ellenáll a mátrixanyag mikropórusain és mikrorepedésein keresztül áthatoló sós víznek, ami a bazaltot felépítő fémes elemeknek a következménye. Az üvegszál szövettel összehasonlítva a bazaltszál szövet hozzávetőlegesen 30%-kal ellenállóbb. A bazalt- és a szén- szál szövet eredményei szerint a referenciához képest nincs jelentős eltérés. A vizsgálatok alapján az üvegszál szövet bazaltszál szövettel történő helyettesítése sós vizes környezetben jelentős élettartam-növekedést, egyben költségcsökkenést is okozhat, tehát a bazaltszál szövet felhasználása tengeri szélerőművekben pozitív hatással lehet a



5. ábra. A kompozitok szakítóvizsgálat során meghatározott húzószilárdsági értékei



6. ábra. A kompozitok szakítóvizsgálat során meghatározott húzó rugalmassági modulusz értékei

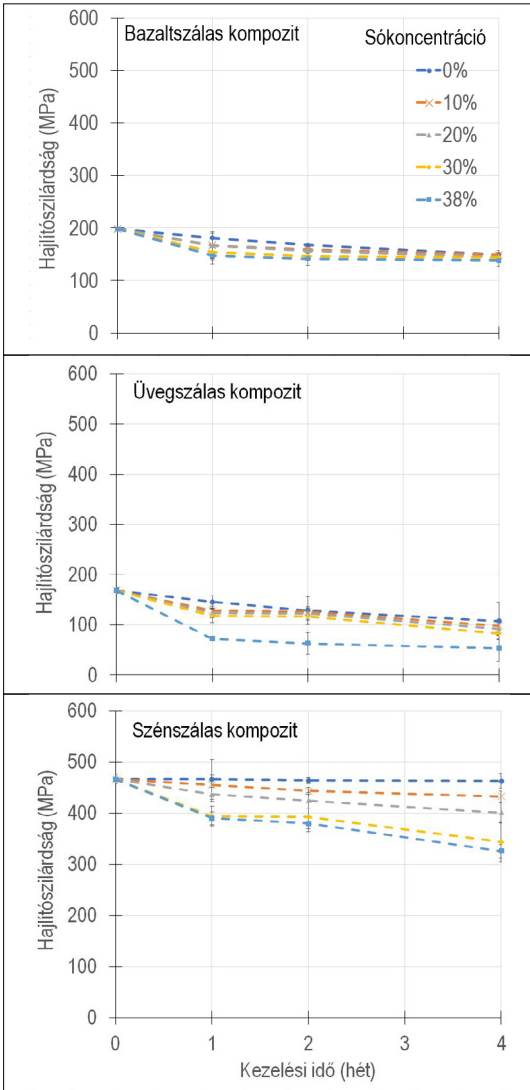
turbinalapátok élettartamára. A kompozitok hajlítóvizsgálat során meghatározott hajlítózilárdsági és hajlító rugalmassági modulusz értékeit a **7. ábra** és a **8. ábra** foglalja össze.

A húzóvizsgálat alapján meghatározott trend összhangban áll a hajlítóvizsgálat eredményeivel, a bazaltszál szövetrel erősített kompozitok – az üvegszál szövetrel erősítettekkel ellentétben – kevésbé bizonyultak érzékenynek a sós vizes kezeléssel szemben.

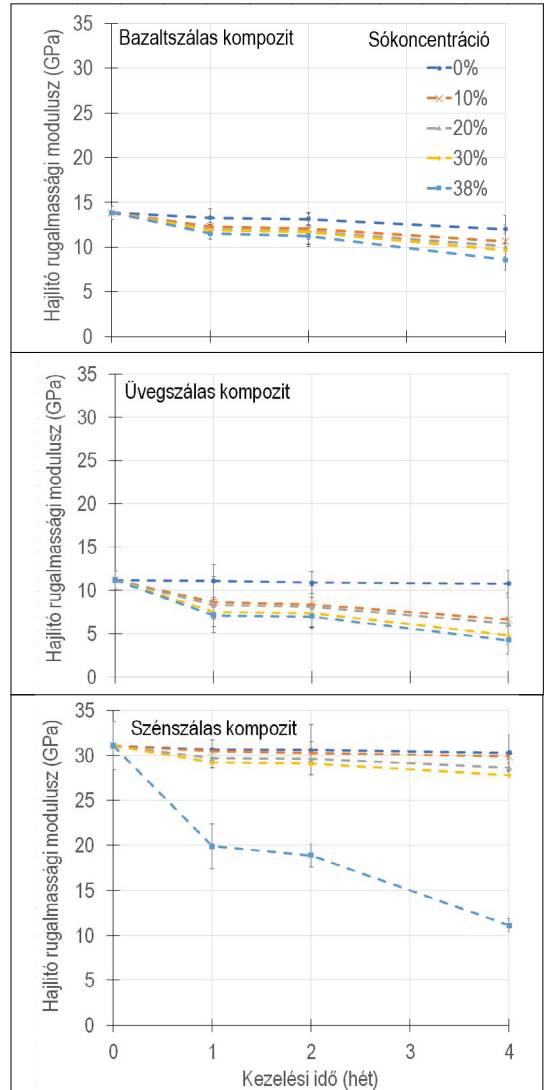
A bazaltszál szövet – az üvegszál szövethez képest – 36%-kal ellenállóbbnak bizonyult, a hajlítózilárdság és 26%-kal a hajlító rugalmassági

modulusz tekintetében, 4 hét kitéti idő elteltével. A hajlítóvizsgálatok eredményei alapján a bazaltszál szövet eredményesen alkalmazható, abban az esetben is, amikor a szerkezeti elemek hajlító igénybevételnek vannak kitéve.

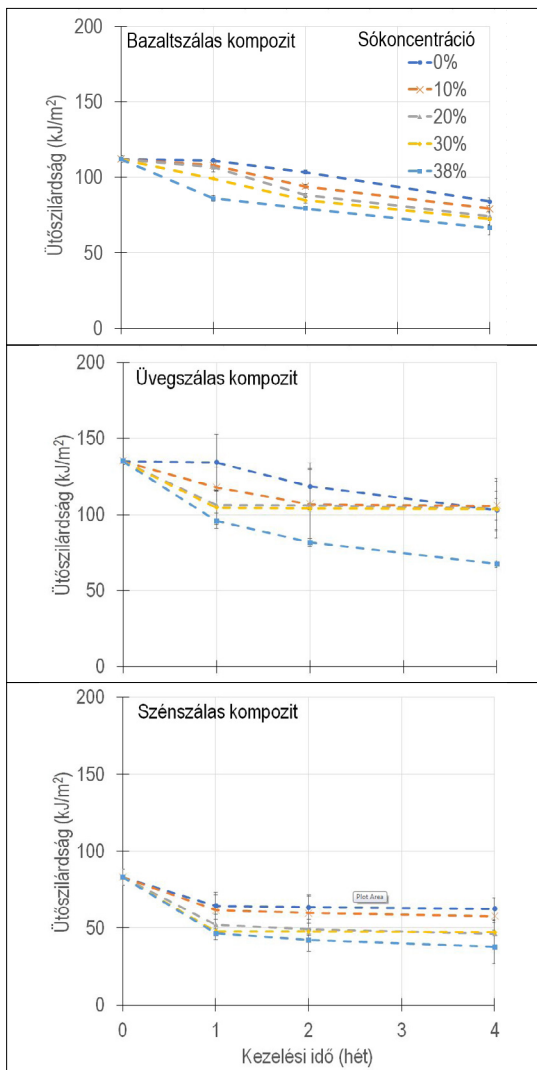
Összegezve, az üvegszál szövet alkalmazása kiváltható bazaltszál szövetrel, mert vizsgálati eredményeim szerint jobban ellenáll a sós vizes környezetnek. A Charpy-féle ütővizsgálat eredményeit a **9. ábra** mutatja. A Charpy-vizsgálat eredményei is alátámasztják a szakító- és a hajlítóvizsgálatok eredményeit. A sós vizes kezelés hatására a mátrixanyag is degradálódott, vala-



7. ábra. A kompozitok hajlítóvizsgálat során meghatározott hajlítózilárdsági értékei



8. ábra. A kompozitok hajlítóvizsgálat során meghatározott hajlító rugalmassági modulusz értékei



9. ábra. A kompozitok ütvizsgálat során meghatározott ütőszilárdsági értékei

mint az erősítőanyagokat felépítő elemi szálak is, amit az üvegszál szövettel erősített kompozit 4 hétig, 38%-os oldatban történő, 50%-os ütőszilárdság-csökkenése is bizonyít.

4. Következtetések

A végrehajtott vizsgálatok eredményei alapján kijelenthető, hogy a sós vízzel történő kezelés hatására mind az erősítőszövetek, mind pedig a kompozitok jelentős mértékben degradálódnak, függetlenül az előállításukhoz felhasznált erősítőanyagtól. Látható azonban, hogy a károsodás mértékét már jelentősen befolyásolják az erősítőanyagot felépítő összetevők.

A húzó-, hajlító- és Charpy-mérések eredményei alapján a bazaltszál szövettel erősített minták a legellenállóbbak a vizsgáltak közül, amit a bazaltszál felépítő fémes elemek és azok oxidjai okoznak. Ennek a viselkedésnek és ellenálló képességnek köszönhetően a bazaltszál szövet különböző tengervizes környezetben üzemelő kompozitszerkezetek, például off-shore szélerőművek egyes alkatrészei alapanyagává válhat, ezáltal további elterjedése prognosztizálható.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Haldar S. K., Tišljár J.: *Igneous Rocks*. In: *Introduction to Mineralogy and Petrology*. (Szerk.: Haldar S. K., Tišljár J.) Elsevier, Waltham, 2014. 93–120. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-408133-8.00004-3>
- [2] Kogan F. M., Nikitina O. V.: *Solubility of chrysotile asbestos and basalt fibers in relation to their fibrogenic and carcinogenic action*. *Environmental Health Perspectives*, 102. (1994) 205–206. <https://doi.org/10.1289/ehp.94102s5205>
- [3] Jamshaid H., Mishra R.: *A green material from rock: basalt fiber – a review*. *The Journal of The Textile Institute*, 107/7. (2015) 923–937. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1071940>
- [4] Wei B., Cao H., Song, S.: *Tensile behavior contrast of basalt and glass fibers after chemical treatment*. *Materials & Design*, 31/9. (2010) 4244–4250. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.04.009>
- [5] Širok B., Bizjan B., Orbanic A., Bajcar T.: *Mineral wool melt fiberization on a spinner wheel*. *Chemical Engineering Research and Design*, 13. (2013) 1–48. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.06.014>
- [6] Wojnárovits I., Rendessy E.: *A szilikátszálak mechanikai tulajdonságait befolyásoló tényezők*. *Építőanyag*, 45. (1993) 50–55.
- [7] Hussain S. M., Shah S. Z. H., Megat-Yusoff P. S. M., Hussain M. Z.: *Degradation and mechanical performance of fibre-reinforced polymer composites under marine environments: A review of recent advancements*. *Polymer Degradation and Stability*, 215. (2023) 110452. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110452>
- [8] Wei B., Cao H., Song, S.: *Degradation of basalt fibre and glass fibre/epoxy resin composites in seawater*. *Corrosion Science*, 53/1. (2011) 426–431. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.09.053>
- [9] Bonsu A. O., Liang W., Mensah C., Yang B.: *Assessing the mechanical behavior of glass and basalt reinforced vinyl ester composite under artificial seawater environment*. *Structures*, 38. (2022) 961–978. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.053>
- [10] Bonsu A. O., Mensah C., Liang W., Yang B., Ma Y.: *Mechanical Degradation and Failure Analysis*

- of Different Glass/Basalt Hybrid Composite Configuration in Simulated Marine Condition.* *Polymers*, 14. (2022) 3480.
<https://doi.org/10.3390/polym14173480>
- [11] Davies P., Verbouwe W.: *Evaluation of Basalt Fibre Composites for Marine Applications.* *Applied Composite Materials*, 25/2. (2017) 299–308.
<https://doi.org/10.1007/s10443-017-9619-3>
- [12] Kaybal H. B., Ulus H., Avci A.: *Seawater Aged Basalt/Epoxy Composites: Improved Bearing Performance with Halloysite Nanotube Reinforcement.* *Fibers and Polymers*, 22. (2021) 1643–1652.
<https://doi.org/10.1007/s12221-021-0671-0>
- [13] Sukur E. F., Onal G.: *Long-term salt-water durability of GNPs reinforced basalt-epoxy multiscale composites for marine applications.* *Tribology International*, 158. (2021) 106910.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.106910>
- [14] Shi J., Wang X., Wu Z., Zhu, Z.: *Fatigue behavior of basalt fiber-reinforced polymer tendons under a marine environment.* *Construction and Building Materials*, 137. (2017) 46–54.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.063>
- [15] Chowdhury I. R., O'Dowd N. P., Comer, A. J.: *Experimental study of hygrothermal ageing effects on failure modes of non-crimp basalt fibre-reinforced epoxy composite.* *Composite Structures*, 275. (2021). 114415.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114415>
- [16] Fiore V., Scalici T., Di Bella G., Valenza, A.: *A review on basalt fibre and its composites.* *Composites Part B: Engineering*, 74. (2015) 74–94.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.034>
- [17] Machado L. C., Marins A. A. L., Muri E. J. B., Biondo A., Matos J. do R., Mazali I. O.: *Complexation of the Fe(III) and Fe(II) sulphates with diphenyl-4-amine barium sulphonate (DAS) Synthesis, thermogravimetric and spectroscopic studies.* *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 97/289. (2009) 289–296.
<https://doi.org/10.1007/s10973-009-0259-1>
- [18] Mielczarski J. A., Atenas G. M., Mielczarski E.: *Role of iron surface oxidation layers in decomposition of azo-dye water pollutants in weak acidic solutions.* *Applied Catalysis B: Environmental*, 56/4. (2005) 289–303.
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2004.09.017>
- [19] Diallo H., Rabiller-Baudry M., Khaless K., Chaufer B.: *On the electrostatic interactions in the transfer mechanisms of iron during nanofiltration in high concentrated phosphoric acid.* *Journal of Membrane Science*, 427. (2013) 37–47.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.08.047>