

## Kompozitok szerepe a jövő tömegközlekedésében

*Tárgyszavak: vezető nélküli gépkocsi; mágneses vonat;  
rendkívüli utazósebesség; kompozitok alkalmazása;  
mechanikai szilárdság; éghetőség; különleges anyagok.*

*A tömegközlekedés jelenlegi állapota a világ jelentős részét érintő gond, a szolgáltatások színvonala messze alulmúlja a személyautók kényelméhez és rugalmasságához szokott utazóközönség elvárásait. A jövőben azonban a kompozitok alkalmazásával olyan piacképes megoldások válhatnak elérhetővé a személyszállításban, amelyek forradalmasíthatják a vonatok és autóbuszok szerepéről alkotott fogalmainkat, ez pedig abban nyilvánul meg, hogy egyre többen fogják otthon hagyni az autóikat.*

A modern társadalomban a majdnem minden igényt kielégítő személyautók funkcióival nem könnyű versenyezni. Egy autó amellet, hogy háztól házig szállítja utasait, tökéletes védelmet nyújt az időjárás nem kívánt hatásai ellen; kényelmet és nagyfokú szabadságot biztosít, amelynek egyúttal státuszértéke van; és nem utolsó szempont, hogy használatával nem vagyunk időhöz kötve. Sajnos, ezekhez az előnyökhöz hátrányok is társulnak. A gépkocsik használatának jelentős anyagi vonzata van, a sok autó miatt nagy a torlódás és a légszennyezettség, energiafogyasztásuk nem gazdaságos, és a balesetek száma is növekszik. *A tömegközlekedési eszközöknek szerencsés módon van egy nagy előnyük az autókkal szemben, ami abból adódik, hogy az utazónak nem kell részt vennie a jármű irányításában, az utazás idejét hasznosan töltheti, és akkor is célba ér, ha aludni támad kedve.* A személyautók jelenlegi technikai színvonalát tekintve ez (egyelőre) nem oldható meg. Mindezek ellenére (és annak ellenére, hogy a vonat az egyik legbiztonságosabb közlekedési eszköz), az autóval rendelkezők többsége saját járművét választja még akkor is, ha annak műszaki állapota nem éppen kifogástalan. De miért is tennének másképp? Ha a tömegközlekedést választják, jó néhány kellemetlenséggel kell számolniuk, és egy-egy utazás gyakran negatív élménnyel párosul. A jelenlegi rendszer meglehetősen kötött, meghatározza, hogy mikor, honnan és hova juthatunk el; lassú és drága; kényelmetlen, nem ritka, hogy ülőhely híján állva kell hosszabb utat megtenni, és a várakozási idő sem csekély. A szolgáltatás színvonalának növelése és a népszerűsítésre irányuló törekvések – az autók adóterheinek növelé-

se, valamint a tömegközlekedés anyagi támogatása – nem hozzák meg a kívánt eredményt. *A rendszer életben tartásának egyik lehetőségét olyan kényelmi funkciókkal rendelkező, nagy tömegek mozgatására alkalmas eszközök kifejlesztése jelenti, amelyek az említett problémákat áthidalva versenyképesek a személyautókkal.* A kompozitok jelentős szerepet kaphatnak a hasonló, nagyobb hozzáadott értéket képviselő járművek megépítésében.

## **Vezető nélküli autóbuszok**

*Az alapötlet az lenne, hogy a jelenleg csekély számban üzemelő nagyméretű járműveket a személyautók méretéhez hasonló, nagy létszámú autóbuszparkkal helyettesítenék.* Ez a megoldás szükségessé tenné egy olyan automatikusan működő irányítórendszer alkalmazását, amely elvégzi az adott jármű helyváltogatását. Ennek hiányában a magas munkaerőköltségek miatt az elképzelés nem megvalósítható. A feladat megoldása nem egyszerű, de kézzelfogható bizonyíték van arra, hogy az ötlet a gyakorlatban is megállja a helyét. *Egy holland városban (Capelle aan den IJssel) 1999 óta üzemel a Park Shuttle nevű, emberi irányítást nem igénylő elektromos működésű kisbusz. A jármű a helyi metró egyik megállója és az üzleti negyed között egy speciálisan erre a célra kialakított, forgalomtól elzárt pályán közlekedik. A busz irány- és helyváltogatását automata rendszer irányítja, legnagyobb utazási sebessége 40 km/h.* A Park Shuttle busz nagyobb változata a *Phileas* ([www.phileas.nl](http://www.phileas.nl)), amelynek csúcsebessége eléri az óránkénti 110 km-t, és a tervek szerint 2004 végén Eindhovenben helyezik forgalomba. A Phileas hibrid hajtórendszerrel van felszerelve, és kiválóan tájékozódik a hagyományos buszsávban. A busz mozgása során a beépített szenzorok segítségével az aszfaltburkolat mágneses impulzusait követi.

A sofőr nélkül működő elektromos meghajtású buszok, különösen a kisméretű típusok csak akkor veszik fel a versenyt a hagyományos kivitelű személyszállító eszközökkel, ha üzemi hatékonyságuk megfelelő és alacsony a fogyasztásuk. Ez az a terület, ahol a kompozitok szóba jöhetnek. A járművek kifejlesztésében részt vállaló *FROG Navigation Systems* ([www.frog.nl](http://www.frog.nl)) egyik képviselője szerint a második generációs *Park Shuttle* gépkocsi szendvicsszerkezetű műanyag elemeket tartalmaz. A 6 m hosszú poliészterborítású habosított alkatrészeket elsősorban tömegcsökkentés céljából építették be, ezáltal csökkent a jármű energiafogyasztása. Meg kell jegyezni, hogy a technológia még nem annyira kifinomult, hogy a közeljövőben sofőr nélküli járművek sokasága lepné el az utcákat. A rendszer egyik legnagyobb problémáját az útakadályok felismerése jelenti, de ha figyelembe vesszük az elmúlt évtized eredményeit, látható, hogy a fejlődés számottevően felgyorsult. Két évvel ezelőtt az amerikai kormány úgy vélekedett, hogy 2015-re az összes harci jármű emberi beavatkozás nélkül is közlekedőképes lesz. A mesterséges intelligenciával foglalkozó szakértők szerint az említett célkitűzés 2015–2020 körül megvalósulhat.

## Kötött pályás járművek

Kedvezőbb a helyzet a kötött pályás járműveknél, hiszen az autonóm rendszer műszaki eszközei közel 30 éve rendelkezésre állnak. Mindazok a nehézségek, amelyek gátolják a közúti forgalom ez irányú korszerűsítését – az irányításhoz szükséges érzékelők, szoftverek, speciális útpályák – a kötött pályára jellemzően nem jelentkeznek. *Az USA-ban 1972-ben Nixon elnök kezdeményezésére indították el a PRT (personal rapid transit) programot. A PRT olyan vasúti hálózaton működő, gépjárműméretű közlekedési eszköztakar, amely átszállás nélkül bárhova elszállítja az utazót, és a nap 24 órájában rendelkezésre áll.* Ez azért lehetséges, mert az ilyen típusú megállóknak mellékvágányokon lennének kialakítva, az útvonalat pedig nem a megszokott módon a sínekre szerelt váltók szabják meg, hanem a járműbe épített szerkezet. *Ezek a modellek a már meglévő vasúti hálózaton nem üzemeltethetők, ehhez különleges infrastruktúrát kell kiépíteni, ami egyelőre áthághatatlan akadálynak bizonyult: nem technológiai, sokkal inkább politikai értelemben.* A PRT egy korai változatát 1975-ben Morgantown városában adták át, azóta folyamatosan működik, és a tapasztalatok egyértelműen azt mutatják, hogy a rendszer életképes és megbízható. Jelenleg számos, az említettekhez hasonló projekt áll fejlesztés alatt, ilyen a *Sky Web Express* ([www.skywebexpress.com](http://www.skywebexpress.com)), az *Ultra PRT* ([www.atsltd.co.uk](http://www.atsltd.co.uk)) és a *SkyTran* ([www.skytran.net](http://www.skytran.net)). További példák megtekinthetők a [faculty.washington.edu/~jbs](http://faculty.washington.edu/~jbs) weboldalon.

A jövő személyszállító eszközeivel a földi és a légi közlekedés kombinációjából adódó előnyök elérhető közelségbe kerülnek. Ez azért is előnyös, mert ami a szolgáltatások színvonalát, a rugalmasságot és a kényelmet illeti, a légi és szárazföldi utasszállítás ugyanazon problémákkal küszködik. A repülés egyetlen és vitathatatlan előnye a gyorsaság. Most már csak az a feladat, hogy olyan vonatot építsenek, amely egy repülőgép sebességével vagy azt meghaladva juttatja célba utasait.

A hagyományos vonatok által elérhető maximális sebességet, működési elvükből adódóan, a gördülési ellenállás és a légellenállás határozza meg. Ha ezt a két akadályt sikerül legyőzni, a sebesség felső határa akár a csillagos ég. A vonatok és a repülőgépek között fizikai szempontból alapvetően csak a gördülési ellenállás jelentett különbséget egészen addig, ameddig meg nem építették az *első mágnes vonatot*. Ezt a vonatot a németek fejlesztették ki (*Trans Rapid*), és jelenleg Kínában üzemel. Elektromágneses elven működik, mégpedig úgy, hogy a vonat és a sínszerkezet között egymást taszító mágneses teret hoznak létre, amelynek következtében megszűnik a sín és a kocsik közötti közvetlen érintkezés, azaz nincs súrlódás, illetve gördülési ellenállás. *A vonat mozgását megfelelő váltakozó árammal generált mágneses erőterváltás idézi elő, miközben a vonat lebeg. Az átlagos gyorsvasutak által elérhető 200-300 km/h-val szemben a Trans Rapid utazósebessége 400 km/h. Egy Japánban megépített változattal 600 km/h rekordsebességet regisztráltak.* Látha-

tó, hogy egy mágneses vonat átlagsebessége is csak fele egy utasszállító repülőgép sebességének. A következő lépést a légellenállás legyőzése jelenti, amelyhez „mindössze” annyit kell tenni, hogy egy légmentes csőbe helyezik a vonatot. Ezen a területen a legígéretesebbnek az *ETT* (evacuated tube technology, [www.et3.com](http://www.et3.com)) módszer ígérkezik. Az ötlet tulajdonképpen egyszerű, a megvalósításhoz elérhető technológiai módszereket – *mágneses vonatot és ehhez megfelelő csőrendszert* – alkalmaz, ugyanakkor meglepően újszerű látásmódot képvisel. Az *ETT rövid távú utazósebessége hozzávetőleg 550 km/h, nagy távolságok között azonban elérheti a hihetetlen 6500 km/h-t*, ami egy utasszállító repülőgép sebességének többszöröse. Egy ilyen vonattal 45 perc alatt megtehető a New York és Los Angeles közötti táv, Washingtonból Pekingbe mindössze 2 órát venne igénybe az utazás. *A módszer feltalálói szerint a vonat a jelenlegi közlekedési eszközök által felhasznált energia kevesebb, mint 2%-át használná fel, és az 550 km/h sebességre tervezett hálózat kiépítése fele annyiba kerülne, mint egy államközi autópálya, a karbantartási költségek pedig ötödét tennék ki.* Az *ETT* járművek a föld alatt vagy az felett kiépített vákuumozott csőrendszerben mágneses vasúton közlekednének. A kocsik legfeljebb 8 személy szállítására lennének alkalmasak, amelyek fedélzetén mesterséges nyomásviszonyok mellett 4 órára elegendő levegőtartalék állna rendelkezésre. Az indítást a mágneses vonatokhoz hasonlóan végzik: a kocsit az utazási sebességre gyorsítják, majd a végállomáshoz közeledve ugyancsak a mágneses erőter változtatásával lelassítják, miközben a befektetett energia jelentős részét visszanyerik. A kocsik vagy kapszulák meglehetősen nagy terhelésnek lennének kitéve, mivel egyensúlyt kell tartani a csőben lévő vákuum és a belső atmoszférikus nyomás között. *A nagy mechanikai szilárdság és a könnyű szerkezet alapkövetelmény, figyelembe véve, hogy a rendszerbe fektetett energia mennyisége annak tömegével arányosan nő. Ezen követelményeknek szinte kivétel nélkül csak a speciális műanyagok, illetve kompozitok tudnak megfelelni.* A tervek szerint a kapszulákat egyfajta epoxi/Kevlár keverékből fogják gyártani, amely a jármű össztömegének 40%-át tenné ki, azaz a jelenleg felhasznált Kevlár mennyisége kétszeresére növekedne.

A kompozitok legnagyobb felhasználási területét a tömegközlekedési eszközök között jelenleg a személyszállító repülőgépek képviselik, ugyanakkor számos gyakorlati példa található a műanyagok növekvő mértékű alkalmazására kötött pályás járművek körében is. A vasúti közlekedésen belül elsősorban a kis távolságokon közlekedő helyközi vonatok, földalatti kocsik és villamosok legújabb típusaiba építenek be kompozitból készült szerkezeti elemeket, de kétségtelen, hogy a távolsági vonatok következő generációi még jelentős piacokat jelentenek.

A **Bombardier** cég által megépített vasúti kocsik *Las Vegasban* 6,3 km hosszú pályaszakaszon közlekednek. A karosszéria és a burkolati elemek jelentős része üvegszállal erősített műanyagból készült, megfelel a tűz és füst-

védelmi szabvány (FST) előírásainak, és rendelkezik az előírt mechanikai tulajdonságokkal. A szendvicsszerkezetet *Nomex* aramidvázra rétegzett üvegszál/epoxibevonattal gyártják, a nagy igénybevételnek kitett alkatrészek bizonyos részeit szénszállal erősítik. A padlót, a tetőtéri és oldalfali elemeket hálószerűen, a nyílászárók helyének kihagyásával gyártják.

*Koppenhágában a legutóbb forgalomba helyezett vasúti kocsik karosszériája szénszál- és üvegszál-erősítésű poliészterből készül. Az önhordó szerkezetnek kiváló hang- és hőszigetelő tulajdonságai vannak. Az üzemeltetők szerint a műanyag burkolat 40% tömegcsökkenést eredményezett a hagyományos fémhez képest, ezáltal jelentős energiamegtakarítást értek el. További előny, hogy a kisebb tömeg révén a sínek kevésbé terhelődnek, kisebb a vibráció és ritkább a szükséges karbantartás.*

Az *amszterdami Combino* vonatok kocsijainak elejét is szendvicsszerkezetű erősített műanyagból gyártják, a megfelelő szilárdságot egymáshoz ragasztott alumínium/kompozit alkatrészekkel érik el.

Várakozások szerint a jövőben sokkal több kompozitot használnak majd az utastéri elemek gyártásához is. *Több nagy sebességű vonat „orrát” ugyancsak kompozitból készítik*, mivel a nagy felületű íves elemek gyártása könnyen megoldható, így az optimális forma megválasztásával a légellenállás csökkenthető. Ilyen módon, erősített poliészter- és fenolgyantából gyártották a franciaországi *TGV*, a német *InterCity Express*, valamint az Angliát és Franciaországot összekötő alagútban közlekedő *Eurostar* vonatokat.

## **A kompozitok alkalmazásának szempontjai**

*A kompozitok alkalmazási területeinek bővítésekor a legfőbb szerepet az árak játsszák.* Ehhez hozzájárul az a helytelen szemlélet, hogy túlságosan nagy jelentőséget tulajdonítanak a kezdeti kiadásoknak, ami egyértelmű hátrányt jelent a hagyományos anyagokhoz képest. Rövid távú érdekre vall azonban a lehetőségekhez képest inkább keveset költeni most, mint nagyobb befektetéssel megelőzni a későbbi kiadásokat.

A kompozitból készített alkatrészek gyártásakor az említett megfontolások alapján legtöbbször a legolcsóbb anyagokat használják. *Vezető helyen állnak a poliészter-, a vinilészter-, a fenolgyanták, a különböző módosított akrilátok.* A vastagabb szendvicselemek belső szerkezetét PVC, illetve poli(éter-imid) habokból, esetleg alumínium vagy aramid felhasználásával alakítják ki. A jól fejlett gyártási infrastruktúra révén az anyagok könnyen hozzáférhetők, felhasználásukat pedig a széles körű tapasztalat segíti. *Az alkatrészek gyártásmódja a sorozat nagyságától függően igen eltérő lehet. Kis darabszám esetén kézi rétegzést, közepes mennyiség (<500 db/év) esetén vákuumeljárást alkalmaznak, tízezres nagyságrendű (max: 30 000 db/év) megrendeléskor az elemeket gyanta-transzferöntéssel (RTM, resin transfer molding) állítják elő.* A feldolgozásnál előnyt élveznek az alacsony hőmérsék-

leten kikészíthető anyagok. Az autóbuszok és vonatok beltéri burkolataiban egyre nagyobb teret hódítanak a hőre lágyuló extrudált vagy hőformázott alkatrészek. Az anyagválaszték egyelőre meglehetősen szűkös, hiszen csak a hőálló és csekély éghetőségű típusok jöhetnek számításba. Ezek közé tartozik egy speciálisan erre a célra kifejlesztett, kevésbé mérgező füstöt fejlesztő hőre lágyuló polimer, a *Xantar CCE 407*.

## **Töréstechnikai jellemzők**

Régóta felmerülő kérdés a kompozitok biztonsága ütközések során. 1998-ban a németországi InterCity expressz balesetét követően kemény *kritika érte a kompozitok mechanikai tulajdonságait. Nagy sebességű ütközésnél az anyagok energiaelnyelő képessége alacsonynak bizonyult, és csak csekély védelmet nyújtott az utasok számára.* Nyilvánvalóvá vált, hogy az egyre nagyobb tempóval közlekedő járművekben a balesetek megelőzése döntő fontosságú. Ezt a filozófiát szem előtt tartva építették meg a Trans Rapid vonatot, amely magasított pályán közlekedik, így a kereszteződések ritkításával a tipikus baleseti helyzetek előfordulását minimálisra csökkentették.

A fémek hajlékonyságuk miatt külső erőhatásra plasztikus alakváltozás kíséretében nyelik el az energiát, ezzel szemben a kompozitok merevségükből adódóan repednek vagy törnek. Katonai járműveken és Forma 1-es versenyautókon tesztelve *kimutatták, hogy az üvegszállal erősített műanyagok szerkezetében a szándékosan előidézett merevségi „hibák” eloszlatják az ütközésből származó erőhatást. A műanyagrétegek szétválásakor az üvegszál és a mátrix közötti kölcsönhatás átrendeződésével – a szálak kiszakadnak a mátrixból – a kinetikus energia jelentős része elnyelődik.* A törés pontos helyének előrejelzését nehezíti a mátrix és az erősítőszál eloszlásának nem tökéletes ismerete, az erősítőanyagok és a feldolgozási eljárások különbözősége. Szendvicsszerkezetek deformációit nehezebb meghatározni, mivel a panelek viselkedése nagyban függ az alkatrészt felépítő anyagok közötti kötés erősségétől. Ezek a műanyagok a fémekhez hasonlóan külső erőhatásra elhajlással vagy görbüléssel reagálnak, vizsgálatok alapján azonban arra lehet következtetni, hogy ha a váz és a külső réteg egymáshoz rögzített állapota megszűnik, akkor az energiaelnyelő kapacitás jelentősen lecsökken. Ezt a jelenséget a szerkezet geometriájának átalakításával próbálták megoldani úgy, hogy a két felületi réteget hullám alakú lemezhez rögzítik, majd ennek a hullámpapírhoz hasonló szerkezetnek az üregeit habosított anyaggal töltik ki. A hullámos réteg és a burkolófelületek által kialakított cellák egy adott feszültség szint fölött deformálódnak, miközben nagy mennyiségű energia elnyelésére képesek. A panelek mechanikai tulajdonságai tetszőlegesen beállíthatók a közties fal háromdimenziós struktúrájának változtatásával.

*A kompozitok sikeres alkalmazását segíthetik a szimulációs módszerek. A közlekedési eszközökben felhasznált fém alkatrészek optimális struktúrájának meghatározását többnyire nemlineáris végelelemes analízissel végzik. Ütközé-*

sek bekövetkezésekor a kompozitokban kialakuló erőhatások számítására egyelőre csak kevésbé pontos numerikus eszközök állnak rendelkezésre. Érthető tehát az óvatosság, ami a műanyagok alkalmazását illeti, ugyanis minden egyes kompozittípus tulajdonságai mások, és a felhasználható adatok mennyisége is korlátozott. Az anyagjellemzők nagy száma miatt a kompozitok törésmechanizmusát leíró általános modell felállítása igen költséges és időigényes feladat. A munkát tovább nehezíti, hogy esetenként jelentős különbségek vannak az eltérő járműtípusok elemeinek viselkedése között. A jövőbeli cél mindenképp olyan megbízható analitikai módszerek kifejlesztése, amely áthidalja a szimulációs eljárások és a valós próba eredményei közötti szakadékot.

A biztonsági mutatókon kívül figyelembe kell venni a balesetek során a környezetbe kerülő kompozittörmelések hatásait is. Egyes kutatók szerint a tönkrement alkatrészekből származó szálrészecskék bőrön keresztül vagy légzés útján a szervezetbe kerülve veszélyt jelenthetnek. A legveszélyesebb anyagok elsősorban a légi közlekedésben leginkább alkalmazott szénszáltartalmú kompozitok. Egy ausztráliai légitársaság a következményeket megelőzőve eljárást dolgozott ki, amellyel a repülőgép-balesetek helyszínét tisztítják meg a káros anyagoktól. A növekvő mennyiségű erősített műanyagok miatt hasonló intézkedéseket terveznek bevezetni a vonatközlekedésben is.

## **Tűzbiztonság**

*A tömegközlekedési eszközök tűzbiztonsága a legalapvetőbb követelmények egyike.* Mivel a szokásos kompozitok tűz esetén kevésbé biztonságosak, mint a fémek, ez kizárta annak lehetőségét, hogy vasúti kocsikban nagyobb mennyiségű műanyagot használjanak fel. A tendenciát tovább fokozta, hogy személyszállítás területén a vasúti járművekre vonatkoznak a legszigorúbb tűzvédelmi előírások. A műanyagok tulajdonságainak javítása füst- és égésgátló adalékokkal bizonyos határok között megoldható, ezek felhasználását azonban egyrészt környezetvédelmi, másrészt technológiai szempontok korlátozzák. A túlzott adalékolás gyakran feldolgozási nehézséget okoz, és kedvetlenül befolyásolja a késztermék mechanikai tulajdonságait. Annak ellenére, hogy a halogéntartalmú égésgátlók jó hatásfokúak, az égés során keletkező füst mérgező hatása miatt alkalmazásukat korlátozni igyekeznek. Bizonyos műanyagokban jól alkalmazható éghetőséget csökkentő adalék lehet az alumínium-oxid-trihidrát, amelyet azonban nagy mennyiségben kell a műanyaghoz keverni, ezért fokozottan rontja a feldolgozhatóságot. A tűzvédelmi szabványnak megfelelő poliészterek, vinilészterek és fenolgyanták a legelterjedtebb műanyagok a járműiparban.

*Európában jelenleg mintegy 35 nemzeti füst- és tűzvédelmi szabvány van érvényben, amelyek erősen különböznek egymástól. Az egységes előírások hiányát igyekszik pótolni a vasúti járművek tűzvédelmére vonatkozó és kidolgozás alatt lévő európai szabványtervezet (prEN 45545). Hatályba lépése 2005 végén, esetleg 2006 első felében várható.*

## Kilátások

Nem kétséges, hogy a jövőben a buszok, illetve a vonatok által kínált kényelmi színvonal a személyautókéval azonos lesz. Utazási sebességük a repülőgépekéhez, biztonságuk a vonatokéhoz lesz fogható. Az üzemeltetéshez nagyságrendekkel kisebb energiabefektetésre lesz szükség, és növekedni fog a nagy szilárdságú könnyűszerkezetű műanyagok iránti igény. Hosszú távú előrejelzések szerint, az olajfeldolgozással foglalkozó cégek jelentős része üzemanyag-előállítás mellett műanyaggyártásra fog átállni.

Tömegközlekedési eszközökben felhasználható kompozitot, illetve erősítő anyagot korszerű technológiai eljárással máris piacra gyárt néhány cég. Közülük néhány európai gyártó pl. a **Murata Exportacao** (Portugália), a **Fibricom Ahlstrom Glassfibre Oy** (Finnország), az **APC Composit**, Sicomp (Svédország), az **Ashland Composite Polymers** (Olaszország).

**Huszár Zoltán**

Mathijsen, D.: Futuristic trains and buses need composites. = Reinforced Plastics, 48. k. 7. sz. 2004. p. 22–24.

Marsh, G. : Can composites get firmly on the rails? = Reinforced Plastics, 48. k. 2004. 7. sz. p. 27–30.