



Braun Tibor

■ ELTE Kémiai Intézet, MTA Könyvtár és Informatikai Központ | dr.braun.tibor@gmail.com

Űrlifttel a csillagokig

35 000 km-es nanocső kábelre várva

Előszó

A címben szereplő űrlift még nem valósult meg, ezért egyesek még mindig a tudományos fantasztikum, a sci-fi kategóriájába sorolják. Annak igazolására, hogy ez nem teljesen így van, több forráshoz is nyúlhatnánk, hiszen hatalmas információ-háttér áll ehhez rendelkezésre az ismeretterjesztő médiában és a tudományos szakirodalomban egyaránt. De persze azt is meg kell említenünk, hogy ha nem esik túlzásba, a sci-fi néha a tudomány előfutára, mert a gondolkodási folyamatot nem kötik gúzsba a mindenkori tudományos korlátok, így ha egy alkotónál az intuíció és a tudományos szakismeret egyensúlyba kerül, az eredmény működőképes, jövőbe mutató koncepció is lehet. Fentiek tekintetében Arthur C. Clarke (1917–2008) angol író, mérnök, *Az éden szökőkútjai* (*The Fountains of Paradise*) című, 1979-ben publikált könyvére hivatkozunk. [1] Ebben a szerző regényes formában megjövendölte, hogy a 22. században a Földön megépül majd az űrlift. Clarke kételkedőknek szánta a következő mondatot: „Minél valószínűbb egy történet, annál közelebb állhat a valósághoz.”

A csillagok elérésének álma már a civilizáció legkorábbi idejében is foglalkoztatta az emberiséget. A híres orosz tudóst, *Konsztantyin Ciolkovszkijt* tekintik az űrutazás atyjának és az űrrakéta-tudomány megalapítójának. Az 1950-es években, amikor az űrutatás gondolatát kezdték komolyan venni, az egyetlen olyan módszer, ami rendelkezésre állt, a rakéták használata volt. Mai szemmel azonban ez az űrbe jutási/juttatási módszer meglehetősen előnytelen. A rakéták mozgatása ugyanis üzemanyagot igényel, ez utóbbinak a Föld vonzásának legyőzésére együtt kell utaznia a rakétával, ezért az induló rakétatömeg 90%-át

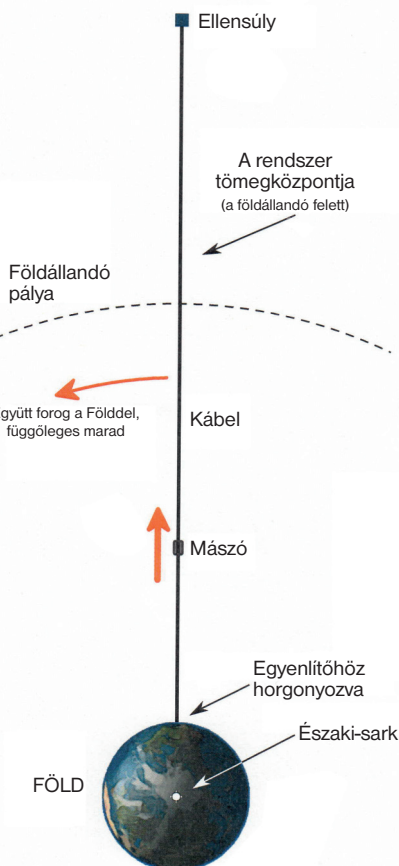
az üzemanyagoknak kell képeznie. A másik hatékonyságvesztés az energiafelhasználási folyamatból ered, mivel a rakétának nagy sebességgel kell haladnia, és a hajtómű nagyon kedvezőtlenül működik ilyen nagy sebességeknél. Végül a villámgyors haladás a légkörben jelentős ellenállási erőket hoz létre és nagy hőmérsékletváltozásokat okoz a rakétán.

A fentiekkel szemben a Földet az űrrel összekötő űrliftek jelentős előnyökkel járhatnak, ezért ez kiemelt témáját képezi a 21. század tudományos kutatásának. Az űrlift építésének legnagyobb kihívása a szállítandó tárgyak továbbítására, kapaszkodására szolgáló, prózaian mondva, az ég és föld között kifeszített kábel (1. ábra) [2]. Nagyon kevés olyan anyag áll rendelkezésre, ami egyáltalán szóba jöhet egy ilyen kábel gyakorlati megvalósítására. Emellett tekintetbe kell venni, hogy az űrlift-kábel működésénél nehézségek merülhetnek fel az időjárás, az atomi oxigénkorrozó, az űrhulladék, az űrhajók, a sugárzás és a politikai szabályozások szempontjából.

Jelen dolgozatban feltételezzük, hogy a kábelt képző anyagokat jelentős hosszúságban és erősségben lehet majd a közeljövőben előállítani, mint amilyeneket rövidebb méretben laboratóriumban jelenleg is létrehozunk.

Bevezetés

Az űrlift alapját képező kábel megépítése után a centrifugális erőnek tulajdoníthatóan az függőleges marad. A valóságban ez egyszerűen a rendszer tehetetlenségére épül. Ugyanis ha egy kábelen felfüggesztett tárgy körkörös forgást végez, sebessége függ annak az objektumnak a gyorsaságától, ami körül forog. Az ilyen mozgástípusban a kábel, ami összeköti a mozgásban lévő tárgyat az általa létrehozott körforgás közepével, kifeszítve marad a mozgó tárgy sebességéből eredő tehetetlensége folytán. Ez képezi lényegében az űrlift alap gondolatát. A Föld Egyenlítőjére horgonyozva a kábelt, az űrlift-kábel kifeszítve marad a nagy tangenciális sebessége folytán. Ezért a földi nehézségi erő húzóerejének ellensúlyozására a centrifugális erőnek nagyobbak kell lennie, mint a liftkábelre gyakorolt gravitációs húzóerőnek. Ez 35 786 km magasságban következik be, és földálló (*geostacionárius*, *GEO-pálya*) néven ismeretes. Működése közben a liftkábel tömegközpontja, mint említettük, 35 786 km-re kell legyen a Föld felületétől. A szükséges kábelennyiség önsúlyának minimalizálására a liftkábel űrbeli végén lennie kell egy ellensúlynak (ami lehet például egy kisbolygó vagy egy űrhajó) annak érdekében, hogy a tömegközpontot a GEO-pálya fölé húzza és megakadályozza a liftkábel földre roszakadását. A kábelnek el kell viselnie az alulról (gravitációs) és felülről (centrifugális) jelentkező erő feszítését. [3–7]



1. ábra. A Földről induló űrlift sémája [18]



Az űrlift-kábel anyagkémiája

Az új nyersanyagok közelmúltbeli felfedezése lehetővé teszi az ilyen erős kábelek létrehozását. Teljesen új és kivételes fizikai tulajdonságok jelenhetnek meg, amikor az anyag mérete a nanoskála felé csökken. A különböző nanoszerkezetek, valamint a sokféle egyszálú hálózat esetében különösképpen a nanocsövek nagyon jelentős helyet szereztek maguknak a legszélesebb körűen tanulmányozott nanoanyagok között.

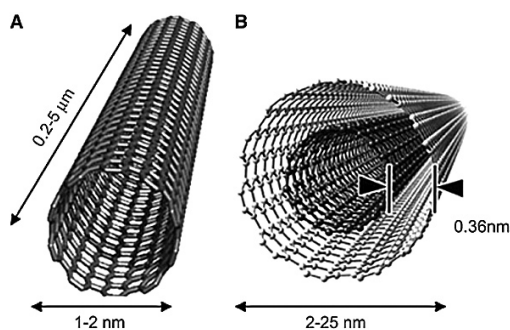
Az űrlift-kábel létrehozására alkalmazott anyagok milyensége, az űrlift a projekt legfontosabb szempontját képezi. Hosszú ideig nem történt meg a fejlődés e területen megfelelő anyagfeleség hiányában. Még az acélt és a kevlárt sem lehetett alkalmazni az űrlift-kábel építésére, mert nem teljesül a szükséges „kúpos arány”, értve itt a geoszinkron pályánál fennálló kábelvastagság és a földi alapponton lévő kábelvastagság arányát. A legtöbb anyagfeleségnél a fajlagos szilárdság, azaz a szilárdság és a súly aránya túl kicsi, mert a kábelvastagság növelése folytán a kábel saját súlya túl nagy lesz. [8]

Szén nanocsövek

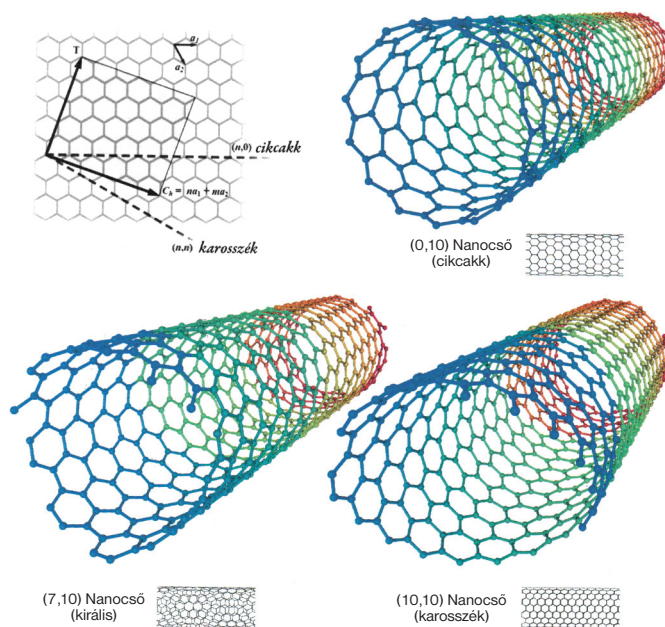
A szén nanocsövek felfedezése és fejlődése reális lehetőséget vetett fel az űrkábel megépítéséhez. Fajlagos erősségük bármilyen más, jelenleg létező anyagfeleségnél jobb, elméletileg képesek például 1,5 értékű kúpos arányt (taper ratio) létrehozni. Összehasonlításként az acél kúpos aránya 10^{32} , ami bőven szélesebb a világegyetemnél. Az anyagnak, amiből az űrkábel készül, ellenállónak kell lennie azokkal a környezeti hatásokkal szemben, amelyeknek a kábel különböző szakaszai használat közben ki lesznek téve, beleértve a komoly légköri, időjárási, sugárzási, valamint űrszennyezési hatást is. A szén nanocsövek megfelelnek azoknak a fizikai követelményeknek, amiket a felsoroltak szükségletnek. Kiegészítőleg epoxigyantát használhatnak a szén nanocső rövid szegmenseinek összeragasztására. Az epoxigyanta időálló és erős kompozitot képez a szén nanocsövekkel. Húzószilárdságnak nevezik azt a legnagyobb feszítést, amit az anyag el tud viselni törés nélkül, értékét pascalban mérik. A szén nanocsövek húzószilárdságát 70–120 GPa értékűnek tartják, ami rendkívül nagy az acéléhoz (0,4 GPa) vagy a kevlárhoz (3,6 GPa) hasonlítva. Ezenfelül a szén nanocsövek fajtsúlya kisebb, mint az acélé vagy a kevlaré, ugyanis 1300 kg/m^3 , míg a vasé 7900 kg/m^3 , illetve a kevlaré 1440 kg/m^3 .

A szén nanocsövek átlagos átmérője körülbelül 10 angström. Az űrlift esetében egyfalú szén nanocsövek jönnek számításba, mert ezek húzószilárdságáról több ismeret áll rendelkezésre, mint a többfalú szén nanocsövek esetében (2. ábra). Az egyfalú szén nanocsövek milyensége szintén befolyásolja a nanocsövek me-

2. ábra. Egyfalú és többfalú szén nanocsövek [19]



chanikai és elektromos tulajdonságait. Az egyfalú szén nanocsövek három konfigurációtípusa (karosszék, cikcakk, királis) közötti különbséget a 3. ábra vázolja. Az űrlift-kábel számára a cik-



3. ábra. Egyfalú szén nanocsövek típusai [20]

cakk egyfalú szén nanocsövek a legmegfelelőbbek, mivel azoknak a legkisebb a torzulása. Hátrányuk viszont, hogy külső hatásokra törékennyé válnak. Ennek ellenére ezeket a szén nanocsöveket tartják jelenleg a legmegfelelőbbnek űrkábel építésére. [9–10]

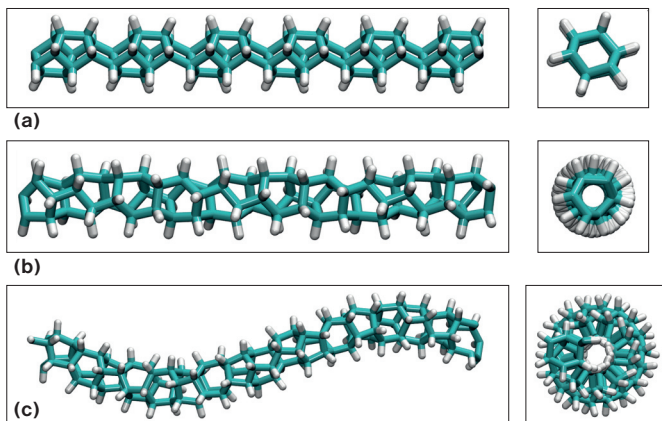
A szén nanocsövek hibahelyei

Bár a szén nanocsövekből előállított űrlift-kábel sokat ígérőnek tűnik, a valóságban egy ilyen kábel szilárdságát jelentősen befolyásolják a nanocsövek hibahelyei. Ezek nanolyukak és nanorepedések formájában jelentkeznek, és kialakulásukkal egy vagy több hatszögű széngyűrű elvesztésével járnak. Ez azért is jelentős lehet, mert egy űrlift-kábel 60% nanocsőből és 40% epoxikompozitból áll, de csak összesen 2% epoxitömeget tartalmaz. Az epoxi-nanocső kompozitszakaszok minimális hossza $100 \mu\text{m}$, és ez elégséges ahhoz, hogy körülbelül 4 mm hosszú szénnanocsőszegmenseket szálakká kösse össze. De mint említettük, egy kis méretű hibahelynek is komoly hatása lehet a szén nanocsövek szilárdságára, így például egyetlen hatszögű széngyűrű elvesztése az [5,5] szén nanocsövek szakítószilárdságának 105 GPa-ról 70 GPa-ra, a [10,10] szén nanocsövek szakítószilárdságának 88 GPa-ról 56 GPa-ra való csökkenéséhez vezet. [11]

A továbbiakban felsorolunk még néhány, nemrég felfedezett szilárd anyagot, vegyületet, amikkel szintén folynak elméleti és gyakorlati kutatások űrkábel előállítására.

Gyémánt nanoszálak

A gyémánt nanoszálakat benzolból magas nyomáson szilárd fázisú reakcióval szintetizálták. Hasonlóan a szén nanocsövekhez a gyémánt nanoszálaknak üres csövekből áll a szerkezetük, amit Stone–Wales (átalakulási) hibahelyek szakítanak meg. Kimutatták, hogy a Stone–Wales-hibahelyeket tartalmazó gyémánt nanoszálaknak kitűnőek a mechanikai tulajdonságaik. Keménységük körülbelül 850 GPa, és hajlítási merevségük kiváló. Töré-



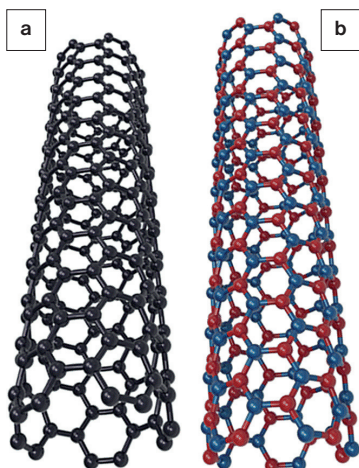
4. ábra. Nanogyémánt szálak és kötegek [21]

kenységük változtatható a Stone–Wales-hibahelyek sűrűségének ellenőrzésével.

Nyomás alatt a benzolmolekulák összetapadnak, meghajlanak és széttörnek. Amint azonban a rájuk gyakorolt nyomást lassan enyhítik, az atomok újra összekötődnek egy új, rendezett szerkezetet alkotva, ami hasonlít a gyémánt tetraédres megjelenéséhez, amiben hidrogénatomok állnak ki minden tetraéderből úgy, hogy másik tetraéderhez kötődnek hosszú, vékony nanoszálak képezve. Amikor a nagy nyomás hatására a benzolmolekulák összetörnek, atomjaik igyekeznek valahogy máshogy elrendeződni, de mozgásra képtelenek, mivel a nyomás eltávolítja a közöttük lévő összes szabad teret. Következésképpen a maradék darabok reaktivitása megnő, így a nyomás enyhe csökkenésére szabályos polimerizációs reakció jön létre, ami létrehozza a gyémánt nanocsőszálakat. A fentiek során létrejött szerkezet képezi az első példáját az új gyémántszerű nanoanyagoknak, ami annak erős tetraédres alapjára épül. A 4. ábra bemutatja a préselés során benzolból létrejött gyémántszálakat, illetve az azokból létrehozható kötegeket. [12–13]

Grafénszálak és nanocsövek

Grafén-oxidból megfelelő kezelés után, majd redukcióval nanocsövekből álló hosszú grafénszálak húzhatók. Ezekből az egyfalú szén nanocsövekkel megfelelő erősségű kötegek állíthatók elő, amik nagy szilárdságú kompozitot képeznek. [14]



5. ábra. Bór-nitrid nanocsövek [22]

Bór-nitrid nanocsövek

A bór-nitrid nanocsövek szerkezete hasonló a szén nanocsövekéhez. Ezekben szénatomok helyett bór- és nitrogénatomok szerepelnek hatszögű rácsokba rendezve (5. ábra). Nem meglepő, hogy e hasonlóság folytán a bór-nitrid nanocsövek és a szén nanocsövek hasonló belső jellemzőket mutatnak, például kiváló mechanikai tulajdonságokat és nagy hővezető képességet. Young-moduluszuk TPa értékűnek

mutatkozik. Bár ez a bór-nitrid nanocsövek esetében alacsonyabb valamivel, mint a szén nanocsöveké, várható mechanikai stabilitásuk magas hőmérsékleten a szén nanocsövekéhez hasonlít. A bór-nitrid nanocsövek oxidációval szembeni ellenállása szintén hasonló a szén nanocsövekéhez. [15]

Az űrlift megvalósításának helyzete

Mint már említettük, űrlift pillanatnyilag még nem működik sehol a világon, de előrehaladott kutatást jelenleg már számos országban végeznek. Japánban például eldöntötték, hogy 2050-ig megépítenek és működésbe helyeznek egy valóban a csillagokig felkapaszkodni képes űrliftet. Ennek előkészítéseként már most kipróbálás alatt van egy miniatürizált változat: ez 10 méteres kifeszített szénnanocső-kábelből áll, aminek végén két, egyenként 10 cm méretű „cupsat” kocka [3] között 3 cm széles minikabin csúszkál (6. ábra). Ezt a miniberendezést a japánok orosz hordozórakétán fellőtték az űrbe, és a minikabin mozgását a Földről irányítják a kifeszített kötélen.



6. ábra. Az űrben működő japán miniatürizált kísérleti űrlift; illusztráció [23]

Nem tudjuk e dolgozatot befejezni anélkül, hogy idéznénk a *New Scientist* című angol ismeretterjesztő folyóirat 2019. januári számában a *Going up? Plans for a space elevator are getting a much-needed lift* című cikk végén leírt mondatot: „In 1903 a piece in the New York Times estimated that it would take anything from 1 million to 10 million years for mathematicians and mechanicians to achieve powered flight. Weeks later, the Wright brothers took to the air.” [16–17]

IRODALOM

- [1] Arthur C. Clarke, *Az éden szökőkútjai*, Totem Plusz Kiadó, Budapest, 1993.
- [2] <https://hu.wikipedia.org/wiki/%C5%B0lift>
- [3] J. Pearson, *Acta Astronautica* (1975) 2, 785.
- [4] <http://www.nss.org/resources/library/spaceelevator/2000/SpaceElevator-NASA-CP210429.pdf>
- [5] <http://www.elevator2010.org/>
- [6] <http://web.archive.org/web/20050206100051/>
- [7] L. Golubovitz, S. Knudsen, *Appl. Phys. Res.* (2017) 9, 56.
- [8] N. M. Pugno, *Acta Astronautica* (2013) 83, 221.
- [9] Z. Bochnicek, *Phys. Teacher* (2013) 51, 462.
- [10] http://www.universetoday.com/publish/liftport_manufacture_nanotubes.html?27442005
- [11] M. Berthelot, *daVinci's Notebook*, 2014, 6.
- [12] A. Zhang, W. B. C. An, Y. Gu, *Nature Comm.* (2017) 8, 14863.
- [13] T. C. Fitzgibbons, M. Guthrie, E. Xu, W. H. Crespi, S. K. Davidowski, G. D. Cody, M. Alen, J. W. Badding, *Nature Mater.* (2015) 14, 43.
- [14] doi: 10.1038/Nature.20m.9549
- [15] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/smt.201700184>
- [16] <https://www.thetimes.co.uk/article/japan-hopes-to-turn-sci-fi-into-reality-with-elevator-to-the-stars-8zqvvsj7sj>
- [17] K. Oakes, *New Scientist* (2019) 12 January, 43.
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Space_elevator
- [19] <http://jnm.snmjournals.org/content/48/7/1039/FLmedium.gif>
- [20] <https://api.intechopen.com/media/chapter/16990/media/image6.png>
- [21] <https://www.scimex.org/newsfeed/diamond-nanohread-why-this-versatile-new-material-could-prove-priceless-for-manufacturing>
- [22] https://media.springernature.com/lw785/springer-static/image/art%3A10.1186%2Fs40580-018-0149-y/MediaObjects/40580_2018_149_Fig1_HTML.png
- [23] <https://www.sciencenews.org/article/japan-has-launched-miniature-space-elevator>