

Csató Péter

A repülőipar új korszaka: a grafénban rejlő innováció

A különféle 2D-anyagok közül a grafén az elmúlt 30 évben kiterjedt kutatási figyelmet kapott lenyűgöző tulajdonságai miatt. Felfedezése hatalmas lökést és új dimenziót adott az anyagkutatásnak és a nanotechnológiának. Napjainkban már számtalan, a grafén felhasználási lehetőségeit boncolgató kutatás folyik, ami nagymértékben elősegíti a katonai és polgári repülőipar fejlődését és a technológiai innovációt. Ez a cikk a grafén szerkezetének és főbb tulajdonságainak bemutatása után három szempontból foglalja össze a grafén repülőiparban való alkalmazási lehetőségeit: energetikai berendezések, szenzorok és repülőgép külső felületén használt anyagok területeken.

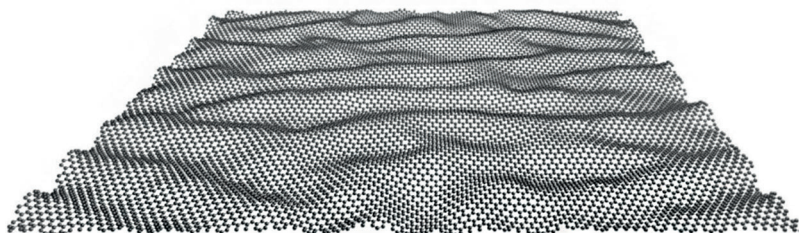
Kulcsszavak: grafén, szenzorika, energetika, külső borítás, nanotechnológia

1. Bevezetés

Az elmúlt években a nanotechnológia folyamatos fejlődésével az anyagok új generációja nyílt meg előttünk. Ezek közül kiemelkedően fontos a grafén, amely kiváló mechanikai, termikus, elektromos, optikai, tribológiai tulajdonságainak, az alacsony légáteresztő képességének és nagy fajlagos felületének¹ köszönhetően széles körben alkalmazható [1].

Philip Wallace kanadai fizikus már 1947-ben tanulmányt írt a grafit elektronikus viselkedéséről, amely jelentős érdeklődést váltott ki [2]. A Nobel-díjas kémikus, Linus Pauling 1960-ban már azt találgatta, hogyan viselkednének a szénatomok kétdimenziós, egyrétegű lapjai [3]. 1962-ben Hanns-Peter Boehm német kémikus elektronmikroszkóp segítségével végzett vizsgálatokat, és ezt az anyagot később „grafén”-nek nevezte el. 2004-ben a Manchesteri Egyetem fizikusainak, Andre Geimnek és Konsztantyin Szergejevics Novoszjolvonak először sikerült grafént izolálni egy grafit-tömb mikromechanikus hántolásával. Az így készült minták jó minőségűek voltak, kevés szemcsehatárral és rácshibával. Az eljárás olcsó, azonban a kapott felületegységre vetítve már drága [4].

¹ A fajlagos felület az anyag felületének és tömegének a hányadosa. A fajlagos felület tehát megadja a tömegegységnyi anyag összes felületét. Jele: A. Mértékegysége: m²/kg.



1. ábra

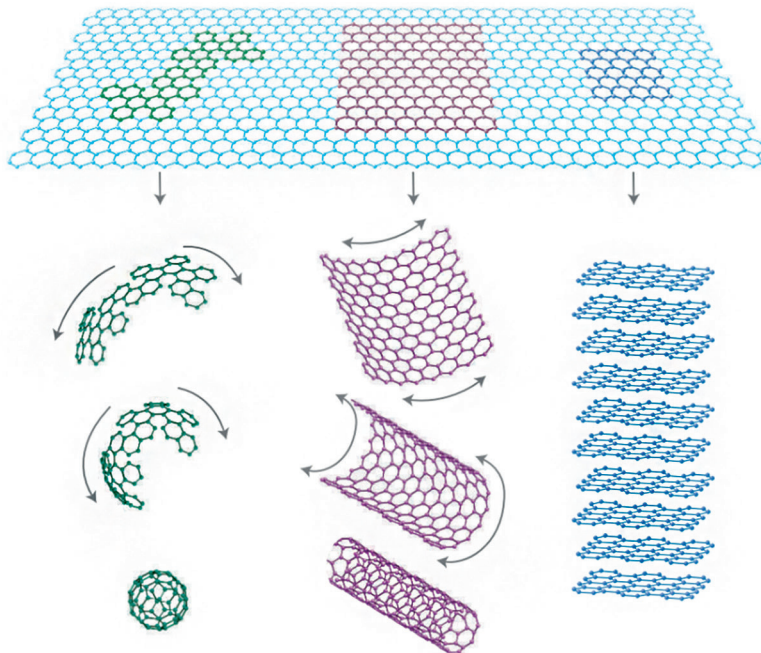
Grafénlemez numerikus szimulációs képe [5]

A grafén a szén egy nanoszerkezetű, allotrop² módosulata, amelyben méhsejtrácsos elrendezésben álló szénatomok egyetlen atom vastagságú grafitréteget alkotnak (1. ábra). A 2D-síkban lévő szénatomok erős elsőrendű kovalens kötással (σ kötással) kapcsolódnak egymáshoz. A 2D-síkra merőleges irányban gyengébb kötési energiájú π kötések jönnek létre, ami lehetővé teszi, hogy a grafén kisebb nyíróerővel, így jó tribológiai tulajdonságokkal rendelkezzen. (A szilárdtestfizikai értelmezése szerint ez valójában nem tökéletesen sík [2D-s], hanem felülete fodrozódik, amely a grafén síkbeli rácsrezgéseivel csatolásba kerülve stabilizálja a szerkezetet.) Ennek a szerkezetnek köszönhetően rendkívül rugalmas, ellenben nagy szilárdságú is, bizonyos értelemben erősebb, mint a gyémánt. Ennélfogva a betölteni kívánt funkciótól függően más szénnanoszerkezetek létrehozása is lehetséges a 2. ábrán látható módon. Emellett kiváló fényáteresztő képességgel és – kis sűrűségének köszönhetően – nagy elektromos és hővezető képességgel, valamint egyéb kiváló tulajdonságokkal is rendelkezik, ezért új lehetőségeket teremthet a légi járművek tervezésében, fejlesztésében, így forradalmasíthatja a repülőipart:

- mechanikai tulajdonságait kihasználva, kötőanyagokhoz és fémekhez adva könnyű, nagy teherbírású kompozit anyagot lehet előállítani;
- a grafén nagy fényáteresztő képessége felhasználható a napelemek területén;
- kiváló súrlódási tulajdonságaiból adódóan új típusú kenőanyag hozható létre;
- nagy fajlagos felületéből adódóan a grafénalapú szenzorok alkalmazásával számos esetben tömeg és helymegtakarítás érhető el [1].

Ezeknek a tulajdonságoknak köszönhetően a grafént „Super Carbon”-nak is nevezik, és már napjainkban is számos helyen használják [6]. Ebben a cikkben röviden bemutatom a grafén alkalmazhatóságának lehetőségeit a repülőeszközök energetikai és elektronikai berendezéseiben, szenzorokban, a sárkányszerkezetben és a külső felületeken.

² Az elemek polimer módosulatait allotrop módosulatoknak, a jelenséget allotrópiának nevezik. Ez a kémiai reakciók olyan speciális fajtája, amikor az elem egyik allotrop módosulata átalakul egy másikká (pl. az oxigén gázból $[O_2]$ elektromos kisülés hatására ózon $[O_3]$ lesz, vagy igen nagy nyomáson a grafit gyémánttá alakul).



2. ábra

Grafénból származtatott szén nanoszerkezetek:
0 dimenziós fullerén, 1 dimenziós szén nanocső és 3 dimenziós grafit [7]

2. Energetika

Az energetikai rendszerek folyamatos fejlesztése a repülőiparban elengedhetetlen a hatékonyság, megbízhatóság és fenntarthatóság magas szinten tartása érdekében. A grafén, különleges fizikai tulajdonságai miatt, új lehetőségeket nyit a repülőeszközök modernizálásában. A légi járművek energetikai rendszereiben a grafént jelenleg főként szuperkondenzátorokban és napelemekben alkalmazzák, de számos egyéb felhasználási lehetőséget is rejt magában.

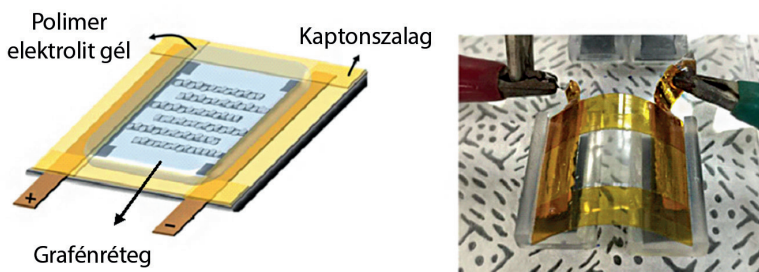
2.1. Szuperkondenzátorok

A szuperkondenzátor olyan energiatároló eszköz, amely nagy teljesítménysűrűséggel és hosszú élettartammal rendelkezik (több mint 10^6 ciklus), környezetterhelése alacsony, hiszen működése elektromos térképződésen alapul, nem pedig kémiai reakciókon, ezáltal nem tartalmaz olyan káros anyagokat, mint a hagyományos akkumulátorokban használt nehézfémek, emellett gyorsan képes energiát felvenni vagy leadni.

A szuperkondenzátorok energiátároló mechanizmusa elektromos kétrétegű kondenzátorokra és pszeudokapacitív kondenzátorokra oszlik. A kettős rétegű villamos kondenzátorok (EDCL³) az elektróda és az elektrolit között kialakított kettős rétegen keresztül tárolják az energiát.

A szuperkondenzátorok fő hátránya az alacsony energiasűrűség (2–10 Wh/kg), ami alacsonyabb, mint a savas ólomakkumulátoroké (20–40 Wh/kg), a nikkél-hidrogén akkumulátoroké (40–100 Wh/kg) és a kereskedelmi forgalomban kapható lítium-ion akkumulátoroké (100–200 Wh/kg). A grafén egyedülálló ultravékony 2D-szerkezete, nagy töltéshordozó mobilitása⁴ ($\mu = 15000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$), ebből adódóan kiváló vezetőképessége (5000 S/cm), nagy fajlagos felülete (2620 m²/g), nagy elméleti fajlagos kapacitása (550 F/g) és a jó mechanikai tulajdonságai révén ideális anyagnak bizonyult szuperkondenzátor-elektrodákhoz. A grafén-elektrodák jelentősen, több mint tízszeresére, növelhetik energiasűrűségüket, és nagymértékben javíthatják teljesítménysűrűségüket [8]. Amennyiben grafént használnak szuperkondenzátor elektrodájaként, a fajlagos kapacitás körülbelül 100 mAh/g lesz. A repülőipar területén a szuperkondenzátorok széles körben használhatók. Például a futóműgondolák ajtajainak nyitásakor, a külső függesztmények leoldásakor vagy az utastér ajtajainak vészhelyzeti nyitásakor, mikor különösen erős, impulzusszerű energiára van szükség, illetve egyéb elektromos vészhelyzeti berendezések és segédrendszerek energiaigényének kiegészítésére alkalmazható.

A fejlesztés következő állomása, a flexibilis szuperkondenzátor nagyon ígéretes energiátároló eszköz, amelynek kulcsfontosságú eleme szintén a jó rugalmasságú és kiváló elektrokémiai teljesítményű grafén elektróda-alapanyagként való felhasználása. Fontos jellemzői a nagy fajlagos felület, a fejlett pórusszerkezet és a nagy szakítószilárdság. A rugalmas energiátárolás kutatása a jövőben az energetikai eszközök fejlesztésének egyik fontos iránya lesz. Bár a kondenzátor teljesítményét tekintve a 2D-anyagokból készült szuperkondenzátoroknak jelenleg nincs abszolút előnyük a háromdimenziós típusokkal szemben, azonban a nagy rugalmasságból, kis méretből és minimális tömegeből adódóan könnyen beágyazhatók akár a légijármű-vezető ruházatába (sisak, kesztyű), akár a szélvédőbe egy új generációs *head-up display*⁵ elemeként [9] (3. ábra).



3. ábra
Illusztráció és fénykép egy grafénalapú mini-szuperkondenzátorról [10]

³ EDCL – Electric Double Layer Capacitor.

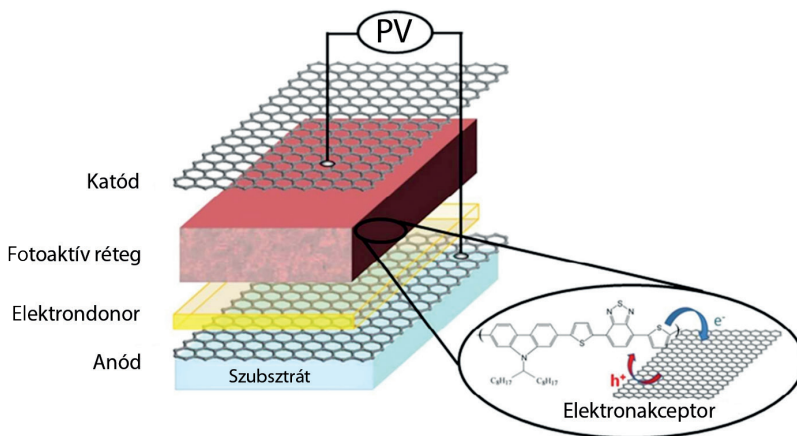
⁴ Az *elektronmobilitás* a szilárdtestfizikában az a jellemző, amellyel az elektronok fémekben vagy félvezetőkben, elektromos mező hatására kialakuló mozgását írjuk le.

⁵ Homloküveg-kijelző.

2.2. Napelemek

A napenergia hatékony tárolásának és felhasználásának kutatása évtizedek óta kulcsfontosságú feladat a fenntartható energiatermelés előmozdítása érdekében. A napsugárzás a fotovoltaikus rendszerek⁶ segítségével gyakorlatilag korlátlan mennyiségben, biztonságosan és közvetlenül átalakítható olcsó és tiszta elektromos energiává a környezet közvetlen terhelése nélkül. Azonban az anyaghibákból, a beesési szögéből és még több tényezőtől adódóan a jelenleg legtöbb helyen alkalmazott szilíciumalapú napelemek hatásfoka 11–18% közötti, bár laboratóriumi körülmények között 23,5% is lehet [12].

A nagy fényáteresztő képesség, nagy töltéshordozó mobilitás és mechanikai szilárdság miatt a grafén felhasználható fotovoltaikus rendszerek alapanyagaként elektródákban, funkcionális, abszorber- vagy félvezető rétegekben is (4. ábra). Mechanikai stabilitása és rugalmassága miatt elektródaként alkalmazva megoldhatja a hagyományos átlátszó vezető oxidok merevségének és ridegségének problémáit. A grafénréteg felvitele jelentősen javíthatja az anyag áttetszőségét és vezetőképességét, ezzel nagymértékben meghosszabbítva a légi jármű repülési idejét [13]. Bár a grafénalapú fotovoltaikus eszközök jelentős fejlődést értek el, a jövőben még mindig sok kihívással kell szembenéznük. Költséghatékony technológiát szükséges kidolgozni a grafénfilmek tömeggyártására, valamint elengedhetetlen figyelembe venni a grafénrétegek számának, az adalékolásnak és a funkcionalitásnak az eszköz általános teljesítményére gyakorolt hatását [14].



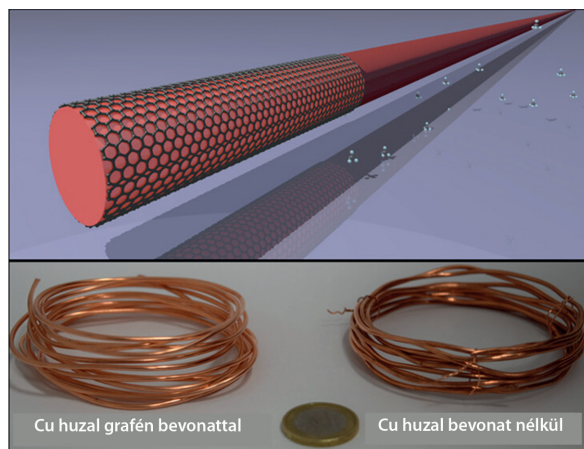
4. ábra

A megfelelően kezelt grafén felhasználható a napelem különböző komponenseiben, beleértve a katód-, anód- vagy fotoaktív rétegeket [15]

⁶ A napelemcellákba beérkező sugárzás találkozik az ott található félvezető szilíciumréteggel, és elnyelődik, ezzel szabad elektronokat generálva. A szilíciumrétegben, illetve az alatta található vezető, közvetítő rétegben az elektronkilépés következtében elektromos tér keletkezik, ami a felszabadult elektronokat mozgásra kényszeríti, elektromos áramot hozva létre. Ez a jelenség bármilyen megfelelő spektrummal rendelkező fényforrás esetén lejátszódik [11].

2.3. Elektromos vezetékek

Az elektromos vezetékek két legelterjedtebb alapanyaga a réz és az alumínium. A réz széles körben használják kiváló elektromos tulajdonságai miatt, de nagy fajlagos tömege ($8,96 \text{ g/cm}^3$) a légi járművekben való alkalmazás esetén hátrányt jelent. Ez a szám önmagában elenyészőnek tűnik, de ha figyelembe vesszük, hogy egy Airbus A380 típusú repülőgépbe összesen megközelítőleg 530 km elektromos vezeték van beépítve, máris megfontolandó más anyagok használata [16]. Ilyen helyettesítő anyag lehet például az alumínium és ötvözetei, amelyek könnyebbek és jobb mechanikai tulajdonságokat biztosítanak, mint a réz, azonban vezetőképességük rosszabb. Az alumíniumalapú vezetékek átmérőjét növelni kell, hogy ugyanolyan elektromos teljesítményt érjünk el, mint a rézből készülnél. Mivel a grafén kiváló elektromos vezető, ráadásul benne az elektronok mozgása rendkívül gyors (106 m/s), így ilyen bevonatot alkalmazva nő az élettartam és a vezetőképesség (1% közvetlenül a bevonat után, és akár 3% 24 hónap után), ami lehetővé teszi a kábelek átmérőjének csökkentését és ezáltal a gyártási költség és tömeg megtakarítását (5. ábra). Csökken továbbá a korrózió kialakulásának esélye is [1], [17].



5. ábra

Grafénbevonat réz vezetéken, digitális modellen és a valóságban [17]

3. Szenzorika

Egy légi járművön körülbelül 2000–4000 érzékelő található, amelyeknek a repülésbiztonságban óriási szerepük van. A grafén sajátos tulajdonságai jelentős szerepet játszhatnak ezen a területen is. Többek között gázérezkelő, nyúlásmérő, elektrokémiai érzékelő, mágneses térérezkelő, illetve fotoelektromos érzékelő is létrehozható grafén felhasználásával, amelyek biztosíthatják a légi jármű üzemszerű és biztonságos működését.

3.1. Gázérzékelő szenzor

A gázérzékelő szenzor olyan elektronikus eszköz, amely egy adott gáz minőségét vagy mennyiségét képes mérni a környezetében. Számos területen alkalmazzák az ipari ellenőrzéstől kezdve a mezőgazdasági termelésen és orvosi diagnosztikán keresztül a közbiztonságig. A hagyományos gázérzékelők alapanyagai félvezető fém-oxidok, vezetőképes polimerek vagy szén nanocsövek lehetnek. Közülük a fém-oxidok terjedtek el leginkább, egyszerű gyártásuk, nagy érzékenyséjük és alacsony költségük miatt. Hiányosságai kiküszöbölése, mint például a magas hőmérsékletű működés és nagy energiafogyasztás, azonban még megoldatlan feladat. A vezetőképes polimerek fő hátránya az alacsony szelektivitás, hosszú távú instabilitás és irreverzibilitás. Idővel a szenzor egyre gyengébb jelet ad, és ez a folyamat visszafordíthatatlan, így a vezető polimereket tartalmazó szenzorok élettartama igen rövid. A szén nanocsövek alkalmazása nagymértékben csökkentheti az érzékelő működési hőmérsékletét, és nagyobb érzékenységet eredményezhet, de hosszú reakció- és helyreállítási ideje, valamint a gyártás összetett folyamata akadályozza a széles körű felhasználást [18].

Jelenleg a legtöbb gázérzékelő rezisztív elv⁷ alapján működik. Ezek az érzékelők általában egy szigetelő hordozó anyagon alapulnak, amely kerámiából vagy szilícium-dioxidból készül, és gázérzékeny anyaggal van bevonva. Amikor a gáz érintkezik a gázra érzékeny felülettel, a gázmolekulák adszorbeálódnak, ami ellenállás-változást eredményez. Ennek mértéke alapján történik a gáz minőségi és mennyiségi mérése.

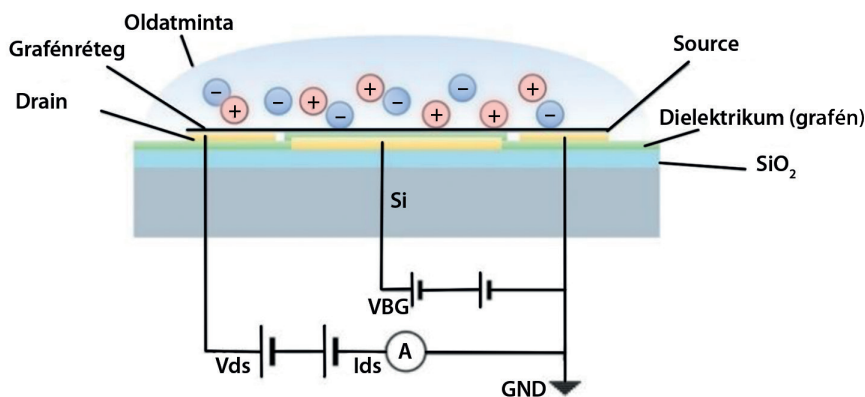
A grafén magas felület/térfogat arányának és kiváló félvezető tulajdonságainak köszönhetően a gázdetektálás terén is rendkívüli potenciált mutat. Nagy fokú érzékenységgel rendelkezik adott gázok jelenlétére, ami azt jelenti, hogy már a nagyon kis gázkoncentrációk is kimutathatók vele. Gyorsan reagál a környezeti változásokra, ami szinte azonnali érzékelést és visszajelzést tesz lehetővé. A repülőiparban ezek a szenzorok üzemanyag-szivárgások észlelésére, az utastér vagy pilótafülke levegőminőségének monitorozására, illetve a veszélyes gázok azonosítására használhatók, ezáltal növelve a biztonságot és a működési hatékonyságot [1], [18].

3.2. pH-szenzor

A korrózió folyamata spontán anyagromlás, amely szinte minden fémet érint. A különböző szerkezeti elemek maximális élettartamának eléréséhez elengedhetetlen a karbantartás részeként az erre utaló jelek kutatása és a folyamat korai észlelése. A repülőeszközök szerkezetében található fémek, mint például az alumínium és a különböző acéltövezetek különösen érzékenyek rá. Előfordulásukat tekintve gyakori az egyenletes, a pontkorrózió, a feszültségkorróziós törés és a korróziós kifáradás. A légi járművek szerkezeti felépítésének tervezésénél, ezen belül a megfelelő fémek, fémötvezetek kiválasztásánál nem azok ellenálló képessége, inkább az egyéb teljesítményjellemzők (tömeg, szilárdság, rugalmasság, elektromos jellemzők) képviselik az elsődleges szempontokat. Ennek következményeként egyre nagyobb hangsúlyt kap az oxidáció korai észlelhetőségének jelentősége. Ebben nagy szerepet kap a pH-mérés, mivel a folyamat során olyan reakciók zajlanak le, amelyek hatására savas vagy lúgos anyagok szabadulnak fel. Ennél fogva pH-érzékelőkkel megállapítható annak jelenléte és előrehaladásának

⁷ A rezisztív elv azon alapul, hogy a gázkörnyezet megváltozása az ohmikus ellenállás arányos változásával jár.

mértéke. A légi járműveknél a pH folyamatos monitorozása elengedhetetlen a szerkezeti biztonságosság és tartósság érdekében. Ebben jelenthet nagy előrelépést olyan grafén-membránok bevonása, amelyek specifikus ionokra, molekulákra és környezeti tényezőkre érzékenyek. Az évek során számos pH-érzékelési módszert fejlesztettek ki. A legelterjedtebbek papírcsíkokon és üvegelektrodákon alapulnak, amelyeknek az alkalmazhatóságát korlátozza törékenységük, alacsony érzékenyséjük és a miniatürizálásra való alkalmatlanságuk [1]. Napjainkban a szenzorika nagyobb hangsúlyt fektet azokra a rendkívül érzékeny, de strapabíró miniatűr eszközökre, amelyek hosszú távon képesek biztosítani a pH-monitorozást, például optikai szálak, potenciálérzékelők és a jelenleg leghatékonyabb alternatíva, az ionszelektív térvezérlésű tranzisztorok (ISFET⁸). Mivel a grafén kiváló elektrokémiai reakcióképességgel rendelkezik, ellenállása a pH-érték növekedésével csökken, így a 6. ábrán látható módon ISFET-be építve egyszerűen kimutatható vele a korrózió mértéke az egyes fémfelületeken [20].



6. ábra
ISFET-alapú pH-szenzor grafén dielektrikummal és érzékelő réteggel [20]

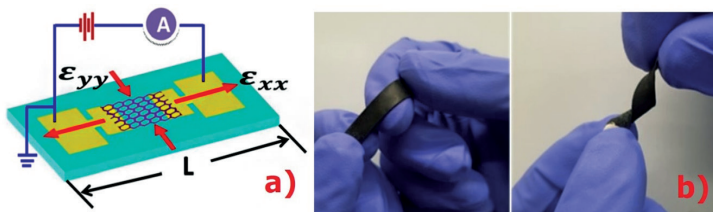
3.3. Nyúlásmérő bélyeg

A nyúlásmérő bélyeg (*strain gauge*) egy olyan érzékelő, amely az anyagokban fellépő mechanikai feszültségeket és deformációkat képes mérni. A légi járműveken ezeket az érzékelőket általában a sárkányszerkezeten a kritikus elemeken, például a szárnybekötéseknél, a függőleges és vízszintes vezérsíkon és a kormányszerveken helyezik el, így monitorozhatók és értékelhetők azok szilárdsági és merevségi paraméterei.

Ezek az érzékelők különösen fontos szerepet töltenek be a többcélú repülőeszközök esetében, ahol akár repülési feladatonként más-más terheléeloszlás figyelhető meg különböző függesztménykonfigurációk, valamint a sebességgel és nagy túlterheléssel (egyes esetekben 9-szeres) járó manőverek széles spektrumú változása miatt fellépő feszültségek következtében. A költségek csökkentésére és az eszközök miniatürizálására irányuló törekvéssel a hagyományos

⁸ ISFET – Ion-Sensitive Field-Effect Transistor: olyan típusú érzékelő, amelyet ionok (kémiai elemek elektromosan töltött részecskéi) koncentrációjának érzékelésére terveztek [20].

szilícium félvezetők az utóbbi években kihívásokkal néztek szembe, és a nyúlásérzékelőkkel kapcsolatos legújabb kutatások a nanoanyagokra összpontosítottak. A grafén kompatibilis a jelenleg alkalmazott félvezetők gyártási technológiájával, illetve alkalmas alacsony frekvenciájú rezgések és a szélsőséges körülmények között fellépő feszültségek érzékelésére. A közelmúltban végzett tanulmányok megmutatták, hogy az ebből készült nyúlásmérő bélyegek pontos, gyors és megbízható méréseket tesznek lehetővé, így nagy szerepük lehet a repülésbiztonság növelésében [21]. Az ilyen nyúlásérzékelő felépítésének sematikus diagrammja a 7/a. ábrán, egy grafén-szilikon polimer nyúlásérzékelő pedig a 7/b ábrán látható.



7. ábra

Nyúlásmérő sematikus ábrája (a) [22] és grafén-PDMS nanokompozit nyúlásérzékelő (b) [23]

4. Külső felületen használt anyagok

A légi járművek tervezése és fejlesztése során kiemelten fontos a megfelelő építőanyag kiválasztása. Számos kutatás középpontjában áll az új anyagok és technológiák keresése, amelyekkel növelhető a repülőgépek hatékonysága, biztonságossága és csökkenthető környezetterhelése. A grafén integrálása a sárkányszerkezetbe forradalmi változásokat hozhat ezen a téren is.

4.1. Kerekek

A repülőipar fejlődésével a gumiabroncsok egyre nagyobb gurulási sebességnek, terhelésnek és egyre magasabb hőmérsékletnek vannak kitéve, ami megköveteli, hogy nagy ellenálló képességűek és hosszú élettartamúak legyenek. Az abroncsok egyik fő alkotóelemeként a futófelület nagymértékben meghatározza annak minőségét. A természetes gumit széles körben alkalmazzák abroncsokban kiváló mechanikai tulajdonságai, jó szakítószilárdsága és rugalmassága miatt. A futófelület használat közbeni károsodása elsősorban a mechanikai és a kifáradásos sérüléseket és a hőkárosodásokat foglalja magában. Mivel a gumi hővezető képessége mindössze 0,18 W/mK, a földet érés pillanatában keletkező hőt a kerekek nem képesek hatékonyan leadni, így gyorsan felforrósodnak, tovább rontva azok mechanikai tulajdonságait. A másik probléma, hogy a léggörrel való kölcsönhatás következtében a légi jármű elektrosztatikusan feltöltődik. A statikus elektromosság elvezetése a földelést követően úgynevezett testkábel alkalmazásával lehetséges.

A gumik földelési funkciójának javítása érdekében szén vagy más vezető anyag hozzáadására került sor. Azonban ez jelentősen csökkentheti azok szilárdságát, szívósságát, hőelvezetési

képességét és egyéb fizikai tulajdonságait. A gumik általános megerősítése érdekében SiO_2 és egyéb adalékok kerültek a gumiba, ami csökkenti a vezetőképességet. Ezen ellentmondásra kínálhat megoldást a nanorészecskék alkalmazása. A grafén-oxid adalékolása a hagyományos megerősítő anyagokkal együtt egy bizonyos szintig növelheti a hő- és elektromos vezetőképességet, javíthatja a tapadást és a kopásállóságot. Csökkenthető a vulkanizációs idő, és mivel nagyszámú oxigéntartalmú funkciós csoportja miatt vízben jól diszpergál, egyenletesen keverhető gumi latexszel [24].

4.2. Villámvédelem

A repülőiparban a lehető legkisebb szerkezeti tömeg igénye nagy teljesítményű, szénszálat és epoxigyantát tartalmazó kompozit anyagok kifejlesztéséhez vezetett. Az elmúlt néhány évben használatuk fokozatosan növekedett, és egyre több helyen vették át a fém alkatrészek szerepét. A hagyományos szerkezeti anyagokhoz, például alumíniumhoz, titánhoz és acélhoz képest a kompozitok könnyebbek, bizonyos esetekben nagyobb szilárdságúak, és korrózióállóak is [1].

Mivel azonban rossz elektromos vezetők, ezért a Faraday-kalitka-elvű villámvédelmet nem biztosítják, így villámcsapás következtében könnyen megsérülnek. Ezt a problémát az anyag rétegei közé alumínium- vagy rézháló beépítésével lehet megoldani, ami jelentős tömeg- és költségnövekedést eredményez (8. ábra).



8. ábra

Apró lyukak, az elektromos kisülések nyomai egy Boeing 787-es törzsen, amelyet villámcsapás ért (2022. 05. 07-én). A külső felület festése alatt villámvédelmi fémháló látható [31]

A villámcsapás hatásainak elkerüléséhez jó vezetőképességű, grafénnal erősített szénszálas kompozit anyagot kell készíteni. A fémhálók eltávolításával a repülőgép nemcsak könnyebb lesz, de a grafénnal megerősített kompozitok fokozott szilárdsága miatt a szerkezeti integritása sem sérül. Így a grafén ígéretes kiegészítő anyaga lehet a repülőiparban alkalmazott kompozitoknak [25].

Kiváló példa erre a Grupo Antolin-Ingenieria és az Airbus által létrehozott Airbus A350 vízszintes vezérsíkjának belépő éle, amely grafénalapú CFRP-⁹ kompozit felhasználásával készült (9. ábra). A fejlesztők szerint az elem jobb mechanikai és termikus tulajdonságokat mutatott grafén hozzáadása után. Ez jelentős üzemanyag-megtakarítást, így kisebb költségeket és károsanyag-kibocsátást eredményez [26].



9. ábra

Airbus A350 vízszintes vezérsík belépőélének grafén CFRP-eleme [26]

4.3. Korrózióvédelem

Bár a korrózió megjelenését elkerülni nem lehet, a folyamat tanulmányozható és megfelelő eszközökkel a sebessége lassítható és a károk csökkenthetők.

A leggyakrabban használt és leghatékonyabb korrózióvédelmi módszer a szerves bevonattal való kezelés, amellyel elkerülhető a fém és a környezetben lévő korrozív közeg közötti közvetlen érintkezés, így csökkentve a fém kémiai vagy elektrokémiai reakciójának lehetőségét. A hagyományos szerves bevonatok jelentős része azonban mérgező nehézfémeket, például kromátot, ólmot és cinket tartalmaz, ami biztonsági és környezetszennyezési kockázatokkal jár. Előállításuk nemcsak nagy mennyiségű energiát fogyaszt, hanem a társadalom és a gazdaság fenntartható fejlődése szempontjából is rendkívül kedvezőtlen.

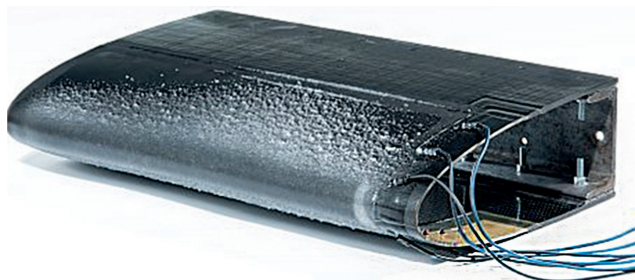
Az egyrétegű grafén, a legvékonyabb ismert korrózióvédő anyag, kiváló védőbevonatot képez, amely megakadályozza, hogy az oxigén- és vízmolekulák elérjék a fémfelületet. Ezen túlmenően a grafén vezetőképes polimerekkel (polianilinnal) alkotott kompozitja tovább javíthatja a fémekkel szembeni korrózióvédelmét, és egyedülálló termikus, elektromos és mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik [27].

⁹ CFRP – Carbon-Fiber Reinforced Polymer: szénszálerősítésű polimer.

4.4. Jégtelenítés

0 °C körüli vagy az alatti külső hőmérséklet esetén a repülőgép jégtelenítése döntő fontosságú. A belépő éleken kezdődő jégképződés megzavarja a lamináris légáramlást és nagymértékben növeli a légellenállást, illetve használhatatlanná teheti a kormány szerkezeteket, megakadályozva azok megfelelő mozgását. A szívócsatornák belépő keresztmetszeténél képződő jég leválásakor pedig a hajtóműbe való bekerülésével súlyos károkat képes okozni. Ez komoly repülésbiztonsági kockázatot jelenthet a repülőgépre, így a pilótákra és az utasokra nézve is. A jelenlegi jégtelenítési és jegesedésgátló megoldások főként kémiai úton (felszállás előtt vegyszerekkel való permetezés) előzik meg a kialakulást, vagy fizikai úton (vibrációs vagy pneumatikus) destabilizálják a jeget. Alternatív megoldásként már az elektrotermikus jégtelenítő rendszereket is használják.

Új, hatékonyabb termikus eljárást dolgoz ki, a már nagy számban alkalmazott, CFRP-anyagból készült szárnyak jégtelenítésére a német DLR.¹⁰



10. ábra

Szén-szál-erősítésű kompozit szárny jégtelenítése a német DLR-módszerrel [32]

Az orrdoboz felületébe már gyártáskor további, nagy ellenállású szén-szálhuzalokat építenek be (10. ábra), amelyek feszültség alá helyezve hőt termelnek. E belső, közvetlen fűtés hatására a szárnyra tapadó jég szinte azonnal elolvad vagy gőzzé válik.

A legkorszerűbb rendszerek fém- vagy kompozit szerkezetből állnak, amelyeket nagy mennyiségű grafit- és koromrészecskéket tartalmazó polimerrel vonnak be, hogy megfelelő elektromos vezetőképességet biztosítsanak a hatékony jégmentesítéshez. A grafén komplex 3D-szerkezetekbe való integrálhatósága, kis tömege, nagyobb hatékonysága alacsonyabb energiafogyasztás mellett kulcsfontosságú előnyöket jelent a repülőgépek jégtelenítésében. Egy erre a célra kifejlesztett rezisztív fűtő grafénfólia felületének hőmérséklete a bemeneti feszültség változtatásával könnyen szabályozható. Figyelembe véve a legnagyobb hőáram-sűrűséget és a -32 °C-os környezeti hőmérsékletet, egy 1 mm vastag jégréteg 7 percnél rövidebb idő alatt megolvasztható. Ennek megvalósíthatóságát kísérletsorozattal igazolták, és az eredmények azt mutatják, hogy a kidolgozott módszer nagyon hatékony termoelektromos stratégia lehet, amely csökkenti a káros környezeti hatásokat [28].

¹⁰ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

4.5. Juno

A Central Lancashire Egyetem repüléstechnikai mérnökei a Manchesteri Egyetem Nemzeti Grafén Intézetével és a Sheffield Advanced Manufacturing Research Centerrel és számos más vállalkozással együttműködve egyedülálló pilóta nélküli légi járművet fejlesztettek ki. Ez a világ első grafénborítású drónja, a „Juno” (11. ábra). A 3D-nyomtatott alkatrészekkel és grafénakkumulátorokkal ellátott, 3,5 méteres szárnyfesztávolságú Juno, grafénalapú vilámvédelemmel és jégtelenítő rendszerrel van felszerelve. A grafénból készült szárny kisebb szerkezeti tömegű, ami 17%-kal könnyebb a hagyományos szén-szálak kompozitnál, így csökkent az üzemanyag-fogyasztás és nöhetett a hasznos teher. A Juno fejlesztése úttörő vívmányt jelent a repülőiparban, hiszen egyszerre mutatja be a grafén gyakorlati alkalmazásának számos aspektusát, megalapozva ezzel a jövőbeli fejlesztéseket és felhasználási lehetőségeket [29].



11. ábra
A „Juno” [30]

5. Összegzés

A repülőipari kutatás-fejlesztésnek mindig kulcsfontosságú területe volt a repülőeszközök szerkezeti optimalizálása és a szerkezeti tömeg csökkentése. Ennek eredményeként a légi járművek szerkezetében egyre nagyobb százalékban vannak jelen különféle kompozit anyagok és nanoarchitektúrák.

Az előzőekben bemutatott sokrétű alkalmazás csupán töredéke a jelenleg is folyó számtalan kutatásnak, amely a grafén felhasználásának lehetőségeivel foglalkozik. Rövid- és középtávon a nagyobb teljesítmény, a jobb mechanikai és elektromos tulajdonságok és a minimális tömeg ígérete indokolja a grafén további kutatását. Hosszú távon pedig ez a szerkezeti anyag forradalmasíthatja a repülőipart, olyan innovációkat és fejlesztéseket kínálva, amelyek meghatározó hatással lehetnek a repülés jövőjére. Ennek megvalósíthatóságához azonban sok kihívást le kell még küzdeni. Az egyik ilyen akadály a jó minőségű grafén megbízható

tömeggyártására szolgáló technológia hiánya. Emellett nem elhanyagolható a repülőipari szabványok által támasztott szigorú követelményeknek való maradéktalan megfelelés és a tanúsítványok megszerzésének hosszú és költséges folyamata. Az új anyagoknak megbízhatóan kell működniük rendkívül alacsony és magas hőmérsékleten egyaránt, illetve ellen kell állniuk nagy mechanikai és vibrációs terhelésnek, valamint széles sugárzási spektrumnak. A repülés során végrehajtott feladatok által támasztott alapvető kockázat és a környezeti feltételek olyan anyagok használatát követelik meg, amelyek megfelelnek ezeknek a szigorú minősítési és tanúsítási szabványoknak. Bár jelenleg még távol vagyunk attól, hogy a grafént a légi járművek alapvető szerkezeti anyagai közé sorolhassuk, további kutatási és fejlesztési munkával mindezek a problémák megoldhatók, nyitva hagyva az utat a grafén szélesebb körű alkalmazása felé a légi közlekedésben.

Felhasznált irodalom

- [1] S. Y. Gao, et al., *Research Status and Prospect of Graphene Materials in Aviation*. Cornell University, 2022.
- [2] P. R. Wallace, „The Band Theory of Graphite,” *Physical Review*, 71. évf. 9. sz. pp. 622–634. 1947. Online: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.71.622>
- [3] L. Pauling, *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals: An Introduction to Modern Structural Chemistry*. New York, Cornell University Press, 1960.
- [4] K. S. Novoselov, et al., „Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films,” *Science*, 306. évf. 5696. sz. pp. 666–669. 2004. Online: <https://doi.org/10.1126/science.1102896>
- [5] Dobrik, G., *Szén alapú nanoarchitektúrák kialakítása és jellemzése pásztázószondás módszerekkel*. Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2015. Online: <https://doi.org/10.15476/ELTE.2014.088>
- [6] H. Boehm, „Graphene – How a Laboratory Curiosity Suddenly Became Extremely Interesting,” *Angewandte Chemie International Edition*, 49. évf. 49. sz. pp. 9332–9335. 2010. Online: <https://doi.org/10.1002/anie.201004096>
- [7] A. Masuk, D. G. Husi, „Aero Graphene in Modern Aircraft & UAV,” *Recent Innovations in Mechatronics*, 9. évf. 1. sz. pp. 1–5. 2022. Online: <https://doi.org/10.17667/riim.2022.1/4>
- [8] S. Zheng, et al., „Graphene-Based Materials for High-Voltage and High-Energy Asymmetric Supercapacitors,” *Energy Storage Materials*, 6. évf. pp. 70–97. 2017. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.10.003>
- [9] M. Soota, „The Quest for Supercarbon in Aviation,” *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 7. évf. 1. sz. pp. 10–13. 2020.
- [10] K. Lee, et al., „Highly Transparent and Flexible Supercapacitors Using Graphene-Graphene Quantum Dots Chelate,” *Nano Energy*, 26. évf. pp. 746–754. 2016. Online: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.06.030>
- [11] Magyar Napelem és Napkollektor Szövetség, *Fotovoltaikus jelentése*. 2020. január 20. Online: www.mnnsz.hu/fotovoltaikus-jelentese/
- [12] J. Dréon, et al., „23.5%-Efficient Silicon Heterojunction Silicon Solar Cell Using Molybdenum Oxide as Hole-Selective Contact,” *Nano Energy*, 70. évf. p. 104495. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104495>

- [13] L. Ponyaev, et al., „Graphene Technology for Design Efficiency of the Solar Hybrid Electrical Cryoplane and Airships,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1226. évf. 2022. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1226/1/012063>
- [14] G. T. Chavan, et al., „A Brief Review of Transparent Conducting Oxides (TCO): The Influence of Different Deposition Techniques on the Efficiency of Solar Cells,” *Nanomaterials*, 13. évf. 7. sz. p. 1226. 2023. Online: <https://doi.org/10.3390/nano13071226>
- [15] K. P. Loh, et al., „Graphene and Graphene-like Molecules: Prospects in Solar Cells,” *Journal of American Chemical Society*, 138. évf. 4. sz. pp. 1095–1102. 2016. Online: <https://doi.org/10.1021/jacs.5b10917>
- [16] M. I. Baranov, „A Choice of Acceptable Sections of Electric Wires and Cables in On-Board Circuits of Aircraft Electrical Equipment,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, 1. évf. pp. 39–46. 2020. Online: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2020.1.06>
- [17] N. Mishra, et al., „Industrial Graphene Coating of Low-Voltage Copper Wires for Power Distribution,” *ACS Applied Engineering Materials*, 1. évf. 7. sz. pp. 1937–1945. 2023. Online: <https://doi.org/10.1021/acsaenm.3c00249>
- [18] K. G. Ong, et al., „A Wireless, Passive Carbon Nanotube-Based Gas Sensor,” *IEEE Sensors Journal*, 2. évf. 2. sz. pp. 82–88. 2002. Online: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2002.1000247>
- [19] S. Z. N. Demon, et al., „Graphene-Based Materials in Gas Sensor Applications: A Review,” *Sensors and Materials*, 32. évf. 2. sz. pp. 759–777. 2020. Online: <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2492>
- [20] L. Li, M. Chakik, R. Prakash, „A Review of Corrosion in Aircraft Structures and Graphene-Based Sensors for Advanced Corrosion Monitoring,” *Sensors*, 21. évf. 9. sz. p. 2908. 2021. Online: <https://doi.org/10.3390/s21092908>
- [21] A. Mehmood, et al., „Graphene Based Nanomaterials for Strain Sensor Application – A Review,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8. évf. 3. sz. p. 103743. 2020. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103743>
- [22] X.-W. Fu, et al., „Strain Dependent Resistance in Chemical Vapor Deposition Grown Graphene,” *Applied Physics Letters*, 99. évf. 21 sz. p. 213107. 2011. Online: <https://doi.org/10.1063/1.3663969>
- [23] M. A. O'Mara, et al., „Ultrasensitive Strain Gauges Enabled by Graphene-Stabilized Silicone Emulsions,” *Advanced Function Materials*, 30. évf. 32. sz. p. 2002433. 2020. Online: <https://doi.org/10.1002/adfm.202002433>
- [24] X. Duan, et al., „Synergistically Enhanced Thermal Control Ability and Mechanical Properties of Natural Rubber for Tires Through a Graphene/Silica with a Dot-Face Structure,” *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 5. évf. 2. sz. pp. 1145–1157. 2022. Online: <https://doi.org/10.1007/s42114-022-00453-y>
- [25] A. Trilok, et al., „Use of Graphene in Aircraft Structures for Enhanced Lightning Strike Protection – An Overview,” *International Journal of Technology and Emerging Sciences*, 2. évf. 2. sz. pp. 6–8. 2022.
- [26] S. A. Hodge, et al., *Trajectory of Graphene-Based Aerospace Applications*. Executive summary, Versairen plc, 2020. Online: www.versairen.com/files/7115/9741/2495/Whitepaper_Aerospace_applications_VRS.pdf
- [27] Z. Duan, „Application of Graphene in Metal Corrosion Protection,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 493. évf. 2019. Online: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/493/1/012020>

- [28] L. Vertuccio, et al., „Effective De-Icing Skin Using Graphene-Based Flexible Heater,” *Composites Part B: Engineering*, 162. évf. pp. 600–610. 2019. Online: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.045>
- [29] B. Vaidya, „Juno: World’s First Graphene Skinned Plane,” *Inceptive Mind*, 2018. augusztus 15. Online: www.inceptivemind.com/juno-worlds-first-graphene-skinned-plane/2710/
- [30] M. Usama, „A Graphene Skinned UAV,” *Droneblow*, 2018. augusztus 16. Online: <https://dronebelow.com/2018/08/16/a-graphene-skinned-uav/>
- [31] S. Georgilidakis, „ACCIDENT: Lightning Strikes Cause 787 Skin Damage,” *Mentour Pilot*, 2022. május 17. Online: <https://mentourpilot.com/accident-lightning-strikes-cause-787-skin-damage/>
- [32] J. Whitney, „German Aerospace Center Developed De-Icing Technology Using Carbon Fiber,” *Military-Aerospace Electronics*, 2019. február 1. Online: www.militaryaerospace.com/commercial-aerospace/article/14229984/german-aerospace-center-developed-de-icing-technology-using-carbon-fiber

The New Era of the Aviation Industry: Innovation in Graphene

Among the multitude of two-dimensional materials, graphene has garnered significant scientific interest over the past three decades due to its remarkable properties. Its discovery has catalysed a profound expansion and diversification within materials research and nanotechnology. Currently, several research projects are dedicated to explore the potential applications of graphene, thereby significantly advancing both the military and civil aviation sectors in addition to technological innovation. After presenting the structure and primary properties of graphene, this paper outlines the expected applications in aviation industry focusing on power systems, sensors and materials used on the outer surface of the aircraft.

Keywords: *graphene, sensors, energetics, external coating, nanotechnology*

Csató Péter, MSc
doktori hallgató
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Katonai Műszaki Doktori Iskola
csato.peter@stud.uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-9515-5376

Péter Csató, MSc
PhD student
Ludovika University of Public Service
Doctoral School of Military Engineering
csato.peter@stud.uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-9515-5376

„A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

