

Terítéken a tudomány

Természettudományt
mindenkinek!

Terítéken a tudomány - Természettudományt mindenkinék!

M
D Momentum
Doctorandus



Terítéken a tudomány

Természettudományt
mindenkinek!



MD-könyvek

Ungvár - 2021

Főszerkesztő:

Fazekas Andrea

Szerkesztő:

Kosztur András

Linc Annamária



A kötet a Magyar Tudományos Akadémia
Domus intézményi konferencia- és kiadvány-támogatása
révén valósult meg.

Випуск видання здійснений завдяки
підтримці Академії наук Угорщини.

A Terítéken a tudomány. Természettudományt mindenkinek! című kötetben a természettudományok területén már fiatalon is kimagasló eredményeket felmutató kárpátaljai magyar kutatók írásait közöljük, ilyen módon segítve a földrajzi és tudományterületi távolságok áthidalását és a kárpátaljai magyar tudományosságon belüli kommunikációt. Olyan, tudományos igényességű tanulmányokat közlünk, amelyek röviden mutatják be a kutatások helyszínéül szolgáló egyetemet, az intézetben végzett munka tapasztalatait is, inspirációt nyújtva a fiatalabb, egyetemi tanulóiraikat jelenleg folytató leendő kutatók, valamint doktoranduszok számára.

У збірнику під назвою «*Наука. Природничі науки для всіх!*» ми публікуємо роботи угорських дослідників природничих наук Закарпаття, які вже в юному віці показали видатні результати в галузі природничих наук, допомагаючи таким чином подолати географічні, наукові відстані та комунікацію в рамках угорської науки на Закарпатті. Ми публікуємо наукові дослідження, в яких автори представляють свої роботи, дають уявлення про свою наукову кар'єру, надихаючи молодих майбутніх дослідників та докторантів, які зараз навчаються в університеті.

ELŐSZÓ

A Momentum Doctorandus kárpátaljai magyar doktorandusz szervezet 2011-ben azzal a céllal jött létre, hogy összefogja a kárpátaljai magyar tudományos élet talán leginkább töredezett, jelentős földrajzi távolságokkal tagolt csoportját: a PhD-hallgatókat, doktorjelölteket és fiatal kutatókat. Tagjaink Ukrajna, a Kárpát-medence és az egész világ számos pontján kutatnak, dolgoznak. Kötetünk mintegy bizonyítéka a fenti állításnak, és egyben szimbóluma is a Momentum Doctorandus egyik elsőszámú céljának: annak, hogy a kárpátaljai magyar doktoranduszokat és fiatal kutatókat a földrajzi és tudományterületi távolságok ellenére összekösse, közösséggé formálja.

2021-ben a *Kutatás a Föld körül. Kárpátaljai fiatal magyar kutatók a nagyvilágban* című kötetben olyan, a szakmájukban már fiatalon is kimagasló eredményeket felmutató kárpátaljai magyar kutatók írásait közöltük, akik a közelmúltban vagy jelenleg legalább fél éves szakmai kutatómunkában, vagy gyakorlaton vettek részt Ukrajna és Magyarország határain kívül nívós kutatóhelyeken, szerte a világban. Idén a *Terítéken a tudomány. Természettudományt mindenkinek!* című kötettel nem titkolt célunk a természettudományokat, a tudományos tevékenységet és a kutatói pálya népszerűsítése, hiszen e kiadvány szerzőinek útja is bizonyíték az ebben rejlő számtalan lehetőségre. Bár jelen válogatásunk korántsem teljes, mégis rámutat a kárpátaljai magyar természettudományosság fogalmának széles perspektíváira, valamint lehetőséget teremt arra, hogy a tisztelt Olvasó megismerhesse eme tehetséges, fiatal magyar természettudósok tevékenységét.

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani a kötet szerzőinek a kiváló tanulmányaikért, valamint a Magyar Tudományos Akadémiának a Domus intézményi kiadvány-támogatási program keretein belül nyújtott támogatásért, amely nélkül e kiadvány nem valósulhatott volna meg.

*Fazekas Andrea,
a Momentum Doctorandus elnöke*

Dr. Hadnagy István

*Kutatás helyszíne: II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola,
Biológia és Kémia Tanszék; Debreceni Egyetem, Természettudományi és
Technológiai Kar, Meteorológiai Tanszék*

Hasznosítható-e a szélenergia Kárpátalján a felszín közeli szélmező energetikai tulajdonságai alapján?

Bemutakozás és a kutatás előzményei

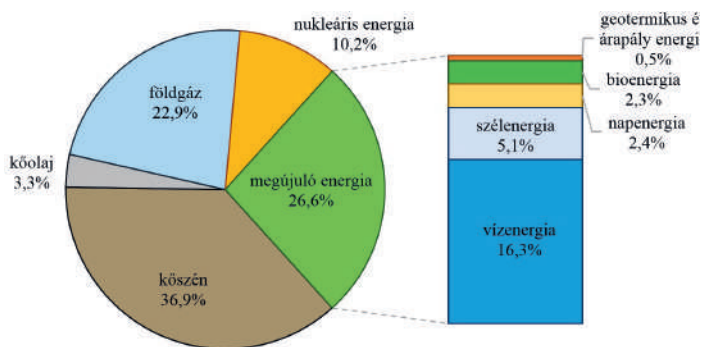
Kárpátalján, Makkosjánosiban születtem, a helyi középiskola befejezése után felvételt nyertem földrajz szakra a II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskolán. Mindig is nagy érdeklődéssel voltam a természettudományok iránt, a főiskolán töltött évek alatt még jobban megszerettem, különösen a hidrológia, a meteorológia és a klimatológia szakterületét. Földrajz irányvonalon a Ternopili Nemzeti Pedagógiai Egyetemen folytattam tanulmányaimat. Később ismét a beregszászi főiskola hallgatója és végzőse lettem biológia szakon. A földrajzi és biológiai tanulmányaim során a Kárpátalja-alföld felszíni és felszín alatti vizeinek minőségének vizsgálatával foglalkoztam, különösen az antropogén eredetű nitrát-ion szennyezés térképezésével. A doktori képzést ugyan a földtudományok terén választottam, bár akkor is és most is igyekeztem, a szívemhez közel álló két tudományterület – a földrajz és a biológia – érintkezési területén, főként a környezetvédelem, természetvédelem, tájvédelem és természetesen az éghajlat haza táján tovább kutatni és fejlődni. Emiatt is döntöttem a Debreceni Egyetem, Földtudományok Doktori Iskolájának tájvédelem és éghajlat doktori programja mellett. Témavezetőmnek pedig felkértem a Földtudományi Intézet vezetőjét, dr. habil. Tar Károlyt, aki abban az időben a Meteorológia Tanszéken a légköri megújuló energiaforrások, a szél- és napenergia, valamint az energetikai célú biomassza hasznosításának éghajlati és társadalmi-gazdasági kérdéseivel foglalkozott. Nagyon örültem,

hogy készségesen fogadott és általa bekapcsolódhattam a tanszéken folyó munkába. Az akkor mintegy 60 éves Debreceni Meteorológiai Tanszék egyik fő kutatási irányvonalának elsődleges célja a szélklímával, a szélenergiaával kapcsolatos olyan statisztikai módszerek, modellek kidolgozása volt, amelyek növelik a szélenergia felhasználásának hatékonyságát. A legtöbb ott született tanulmány (ezt részletesen összefoglalta: *Tar et al.*, 2016) a magyarországi szélenergia hasznosítás klimatológiai aspektusait érinti, elemezve általában a szél irányának, sebességének és energiájának statisztikai tulajdonságait és a köztük lévő kapcsolatot. Később ez kibővült nagytérségű vizsgálatokkal és a térbeli, szélmező modellek bevonásával, vizsgálva a hasznosítás fontos társadalmi tényezőit is. A megújuló energiaforrások és azon belül a nap- és szélenergia kutatásának irányvonala, bár az addigi vízminőség-kutatás terén végzett munkámtól kissé eltért, de felkeltette az érdeklődésemet, főként a szélmező statisztikai és térinformatikai elemzésének kérdésköre. Végeredményben megszületett és megvédtem: *A felszín közeli szélmező energetikai jellemzése* című doktori értekezésemet.

A megújuló energiaforrások sajátosságai és a szélenergia

A megújuló energiaforrás megnevezés olyan elsődleges energiahordozókat (közeget, anyagot vagy természeti jelenséget) takar, amelynek hasznosítása közben a forrás nem csökken, hanem újratermelődik, megújul, vagy hosszútávon lehetőség van egy adott területről ugyanolyan jellegű energiát ugyanolyan mennyiségben kinyerni (*Sembery, Tóth*, 2004). Főbb típusai a következők: a Napból származó napenergia, amelynek közvetett felhasználása közé tartozik a bioenergia, a vízenergia, a szélenergia és a hullámenergia, továbbá a Föld belső hőjéből származó geotermikus energia, illetve a Nap és a Hold gravitációs ereje révén előidézett árapály-energia. A megújuló energia előnye a fosszilis energiaforrásokkal szemben, hogy nem fenyeget a készletek kimerülésének veszélye, mivel a források hosszabb-rövidebb ciklus alatt képesek újratermelődni. A megújuló energiafelhasználás önmagában nem jelenti a teljes emissziómentes és környezetbarát működést. Alkalmazásuk, a természetes környezetbe való beavatkozás, az élőhelyek zavarása (hidrológiai viszonyok megváltoztatása, nagy területek leárnyékolása, vonulási útvonalak

A világ számos országában az ingyen rendelkezésre álló szélerő-potenciál hasznosításának növelése elsődleges prioritást élvez, hiszen a napjainkra igen időszerűvé vált klímaváltozás elleni küzdelemben tett vállalásaik teljesítésének egyik eszközeként tekintenek a szélerőre. A világ összes primer energiatermeléséből (2. ábra) a megújuló energiaforrások 26,3%-kal részesednek, ezen belül a szélerő 5,1%-kal rendelkezik.



2. ábra: **Az összes primer energiatermelés megoszlása (%-ban) energiaforrások szerint 2018-ban** (IEA, IRENA, 2019 adatai alapján)

Csak a megújuló energiaforrásokat figyelembe véve a vízenergia után a szélerő a második helyen van, részaránya a megújulók között 19,2%. A szélerő, különösen az offshore alkalmazásai révén még hatalmas lehetőségeket rejt. A GWEC (2019) jelentése alapján a világszerte telepített teljes szélerőmű kapacitás 96%-a (568,4 GW) volt onshore (szárazföldi) és 4%-a (23,1 GW) offshore (tengeri). Európai viszonylatban ez az arány 90% (171,4 GW) és 10% (18,3 GW) volt 2018-ban. A legnagyobb szélerőmű offshore kapacitással rendelkező országok a világon: Egyesült Királyság 7,9 GW-al (a teljes offshore kapacitás 34%-a), Németország 6,4 GW (28%), Kína 4,6 GW (20%) és más országok összesen 4,2 GW (18%).

Az Európai Unióban a megújuló energiafelhasználás között a szélerő (EWEA, 2019) első helyen áll (11,0%), a második helyen a vízenergia (10,0%), ezt követi a bioenergia (6,4%), a napenergia (3,5%), végül a geotermikus energia és egyéb (hullám-, árapály-) megújuló energiaforrások felhasználása (0,5%). Ukrajnában a megújuló energiaforrásokból termelt energia az

energiafogyasztás 9,3%-át elégíti ki, ebből a szélenergia 0,9%-al részesedik (UWEA, 2019). Az ország a 38. a világ nemzetei között a szélenergiát előállító országok ranglistáján (GWEC, 2019), európai viszonylatban a 21. helyen áll (EWEA, 2019).

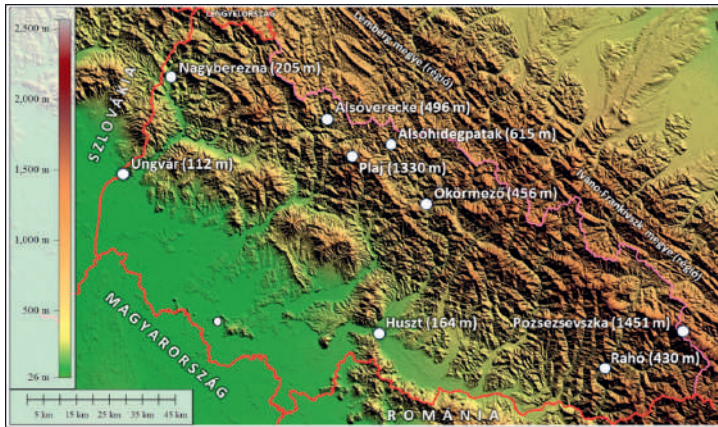
A szélenergia jövőbeli fejlődéséhez szükség van a szél energiájának térbeli és időbeli eloszlásának, a felszín közeli szélmező azon tulajdonságainak ismeretére, amelyek a szélerőművek villamosenergia-rendszerbe történő illesztését segíthetik anélkül, hogy a folyamatos ellátást veszélyeztetnék.

A kárpátaljai felszín közeli szélmező energetikai jellemzői

Ukrajna megújuló és nem hagyományos energiaforrásai energetikai potenciáljának atlaszában (Kudrya et al., 2001) vagy az ország 2030-ig tartó időszakra vonatkozó *Energetikai Stratégiájában* (2013) a szélenergia felhasználás és kapacitás bővítés tekintetében, a tengerparti területek mellett, a hegyvidéki zónákra kerül a fő hangsúly, elsősorban a Kárpátok régiójára. Annak ellenére, hogy Ukrajnában a szélenergia ipar intenzíven fejlődik (UWEA, 2019), Kárpátalján napjainkban még egyetlen ipari szélpark sem működik.

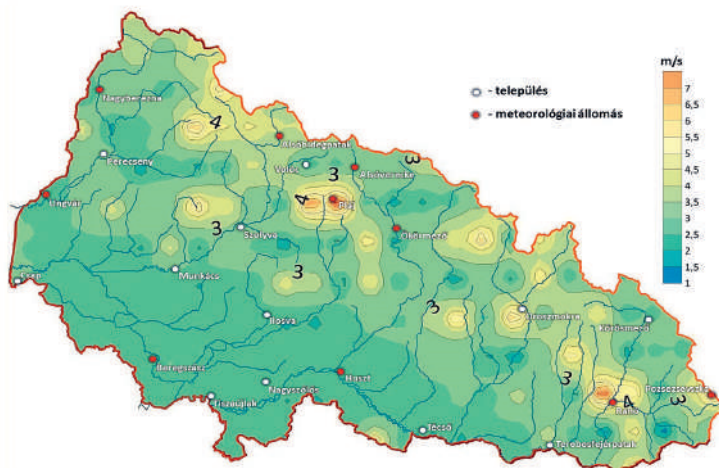
Ahhoz, hogy megkapjuk a címben feltett kérdésre a választ, el kellett végezni a kárpátaljai felszín közeli szélmező vizsgálatát, amely során számos olyan ismerethez és széklíma jellemzőhöz jutottunk, amelyek a helyi szélenergia felhasználás tervezését, a szélerőművek telepítési helyszíneinek kiválasztását és a szélerőművek villamosenergia-rendszerbe történő illesztését segíthetik anélkül, hogy a folyamatos ellátást veszélyeztetnék. Az elért eredmények további széleenergetikai vizsgálatok alapját képezhetik.

A kutatáshoz 9 meteorológiai mérőállomás 3 óránként regisztrált szélsébség és szélirány adatsorait használtuk fel. Az állomások különböző orográfiai környezetben és tengerszint feletti magasságon helyezkednek el (3. ábra), ez egyben nehezítette az elemzést, azonban így jobban kirajzolódtak a területre jellemző szélsőségek. Az átlagos szélsébség területi eloszlásának bemutatására felhasználtuk a CarpatClim (OMSZ, 2017) digitális éghajlati adatbázist is (4. ábra).



3. ábra: Az adatbázist alkotó meteorológiai megfigyelőállomások földrajzi elhelyezkedése és tengerszint feletti magassága

A klimatológiai szél-adatsor statisztikai vizsgálata során megállapítottuk, hogy az átlagos szélesebesség a teljes időszakra vonatkozóan 0,8 m/s (Huszt) és 4,9 m/s (Pláj) között változik. A szélesebességek variációs együtthatója alapján a legkevésbé változékony széljárású Ungvár és Pláj. A napi átlagsebességek módusza a Plájon kívül (2,1 m/s) sehol sem éri el a 2,0 m/s-ot. Az átlagos szélesebesség térbeli eloszlásában a felszín inhomogenitása, főleg a domborzat áramlásmódosító hatása erősen megnyilvánul. A napi átlagsebességek éves menetében a két alföldi (Ungvár és Huszt) és három folyóvölgyi mérőponton (Nagyberezna, Rahó és Ökörmező) tavaszi szélmaximum, míg további két folyóvölgyi (Alsóverecke és Alsóhidegpatak) és a két hegységi állomáson (Pláj és Pozsezszevszka) téli szélmaximum jelentkezik. Kárpátalján átlagban évente 86 szeles nap fordul elő, amikor a szél legerősebb lökésének sebessége eléri, vagy meghaladja a 10 m/s-t, ezek közül 15 nap viharos, ennyi alkalommal nagyobb a széllökés 15 m/s-nál is. Ennek ismerete igen fontos a szélturbinák üzembiztonsága szempontjából.



4. ábra: Az átlagos szélesség területi eloszlása Kárpátalján a CarpatClim éghajlati adatbázis alapján 1961–2010 között (IDW IDP=2 interpolációs módszerrel)

A szélesebbesség napi meneteiben a minimum (éjjel, Plájon nappal) és maximum (nappal, a Plájon éjszaka) szélesebbesség értékek közötti különbség nyáron a legnagyobb, tavasszal és ősszel kisebb és télen a legkisebb. Ezért tehát főleg télen és ősszel elég nagy biztonsággal számíthatunk arra, hogy a szélesebbesség és ezzel együtt a széleenergia napon belüli változása is az irányítás számára kedvezőbb módon, azaz egyenletesebben jelentkezik. Júliusban sokkal nagyobb a nappal és éjjel mért szélesebbesség értékek közötti különbség, mint januárban, ez a hőmérséklettel való szoros kapcsolatot jelzi.

A szél energetikai felhasználása szempontjából lényeges tudni azt, hogy az egyes szélesebeségek – főleg azok, amelyek energiatermelésre alkalmasak – milyen gyakorisággal fordulnak elő. A kitermelhető energia becslése, előrejelzése, illetve számos statisztikai és energetikai mutató előállítása szempontjából pedig szükséges elvégezni a szélmegfigyelések empirikus gyakorisági eloszlásának „közelítését” is a megfelelően megválasztott elméleti eloszlással, eloszlásokkal. Eredményeink azt mutatták, hogy a kilencből nyolc kárpátaljai mérőponton a napi átlagos szélesebeségek empirikus gyakorisági eloszlása leírható a Weibull-eloszlással. Az eloszlás paramétereinek meghatározására alkalmazott módszerek közül a „legmegfelelőbb” a

momentum-becslésre vezethető vissza, amelyhez ismernünk kell a szélesebbesség átlagát, szórását és a gamma-függvény tulajdonságait. A Weibull-eloszlás a teljes időszakra, az orográfiai környezettől függetlenül, Husztot kivéve mindenhol, a χ^2 -próba alapján 10%, 5% és 1% szignifikancia szinten elfogadható illeszkedést adott. Az eloszlás c paraméterének évszakos értékei a mérőpontokon követik a szélesebbesség átlagértékeit. A skálaparaméter és az állomások tengerszint feletti magassága között 5%-os szignifikancia szinten lineáris kapcsolat van ($r=0,84$). A skálaparaméter összvarianciájának 70%-a a tengerszint feletti magassággal való lineáris kapcsolattal magyarázható. Mindez azért fontos, mert a gyakorlatban nem elég csak a szél mérés magasságában, azaz felszínhez közel ismernünk a szélviszonyokat, hanem a különböző típusú szélturbinák tengely- illetve rotormagasságában is, ami napjainkban a 100 m-t is meghaladja. Így a Weibull-eloszlás k és c paramétereinek segítségével előállítottuk a szélesebbesség gyakorisági eloszlását $z=20, 40, 60, 80$ és 100 m-en is. A vizsgálat közben bebizonyosodott a Weibull-eloszlás egyik paramétere (n) és a Hellmann-féle kitevő (α) közötti kapcsolat. Ez igen hasznos eredmény, hiszen a Hellmann-féle kitevőt a vertikális szélprofilok előállítására használják és a meghatározásához legalább két magassági szintben kell szélesebbességet mérni és ezt gyakran még a meteorológiai állomásokon sem végzik, de általunk sikerült az α -kitevőt közelíteni az eloszlásvizsgálat során nyert egyik paraméterrel, ez azonban további vizsgálatra szorul. Az α ugyanis a felszíni érdesség és számos légköri tényező függvénye, míg az n csak a mérési szint skálafaktorának és magasságának.

Bebizonyosodott, hogy a szélesebbesség a magassággal együtt növekszik, így 100 m-en területileg $2,2$ m/s (Huszt) és $7,7$ m/s (Pláj) között változik. Az összes állomást együttvéve Kárpátalja területén az átlagos szélesebbesség a felszíntől 100 m-en eléri a $4,0$ m/s-ot. Kárpátaljai viszonylatban a szélenergia felhasználásra, a módusz tekintetében is kedvező telephelynek bizonyul Ungvár és Pláj, ahol a legvalószínűbb szélesebbesség 100 m-en eléri a $3,6$ m/s-ot, illetve a $6,4$ m/s-ot. A másik hegységi állomás, a Pozsegysevszka is viszonylag magas átlagos szélesebbességgel (100 m-en $5,9$ m/s) rendelkezik, azonban a magas variációs együttható (100 m-en $0,7$) és az alacsony módusz (100 m-en $2,8$ m/s) miatt a szélturbinák folyamatos, kiegyenlített működése

nem lehetséges. A legnagyobb energiát hordozó szélesebesség (v_{maxE}) tekintetében a vártak megfelelően minden magassági szinten Huszton kaptuk a legalacsonyabb értékeket (20 m-en 1,6 m/s, 100 m-en 2,9 m/s) és Pozsezevszán a legmagasabbakat (20 m-en 9,6 m/s, 100 m-en 12,0 m/s). Az összes állomás közül a Pozsezevszán jelentkeznek a legerősebb és egyben a legnagyobb energiát hordozó szelek, de ezek időbeli eloszlása nem egyenletes.

A szélenergia hasznosítás és tervezés szempontjából az adott földrajzi helyen fontos ismernünk az energetikailag hasznosítható szélesebességek ($3 \leq v < 25$ m/s) időtartamát. Ennek legmagasabb értékei a két hegységi állomáson, a Plájon és a Pozsezevszán jelentkeznek. A Plájon 10 m-en átlagosan az év 62,7%-ban (100 m-en 90%-ban) üzemelne egy 3 m/s-os indító sebességgel és 25 m/s-os legnagyobb megengedett szélesebességgel definiálható szélturbina. Ungváron, az alföldi részen ez az érték csupán 20% körül van (100 m-en 68,6%). A folyóvölgyi állomásokon pedig 6,8% (34,0%) Ökörmező és 30,2% (58,7%) Alsóverecke között változik. Az alföldi és folyóvölgyi állomásokon az átlagos folyamatos üzemidő 10 óra alatt van, míg a hegységeken átlagosan 10 óra felett. Ennek variációs együtthatója az összes állomáson magas értékeket mutat. A legváltozékonyabb e tekintetben Pozsezevszka (1,54), Pláj (1,40) és Alsóverecke (1,23). A maximum üzemóraszám a két hegységi állomáson elérheti a 250 órát, ez több mint 10 nap folyamatos generátorműködést jelent. A folyamatos üzemidőtartamok maximumainak bekövetkezése az alföld és folyóvölgyek állomásain átlagosan tavaszra vagy a tél végére esnek, míg a hegységeken az ősz végére és télre.

A kárpátaljai szélenergia felhasználás szempontjából további gyakorlati jelentőséggel bíró eredményeink között említhetjük, hogy a Weibull-eloszlás k és c paraméterének ismeretében a gamma-függvény ($\Gamma(x)$) segítségével meghatároztuk a mérőpontokon az év és az egyes hónapok átlagos fajlagos szélteljesítményét és mindezt elvégeztük a $z = 20, 40, 60, 80, 100$ m-es szintekre is. Kárpátalján a fajlagos szélteljesítmény 100 m-en $9,3 \text{ W/m}^2$ (Huszt) és $506,8 \text{ W/m}^2$ (Pláj) között változik, ami igen nagy különbségnek mondható. Az alföld és a folyóvölgyek állomásaira a jellemző átlagos mennyiségek még 100 m-en is csupán $30\text{--}70 \text{ W/m}^2$ körül vannak, melyek viszonylag nagyon alacsonyak. Az állomások közül a fajlagos szélteljesítmény alapján ki kell

emelnünk Ungvárt (100 m-en $76,0 \text{ W/m}^2$), Pozsezevszkat ($368,7 \text{ W/m}^2$) és Plájt ($506,8 \text{ W/m}^2$), ahol ebben a magasságban, kárpátaljai viszonylatban, a legkedvezőbbek az energiahasznosítás feltételei. Az alföldi és folyóvölgyi állomásokon a 10 és 100 m-es magasságban a téli és a tavaszi hónapokra jut a legnagyobb és nyár végére a legkisebb fajlagos szélteljesítmény. Megállapítottuk, hogy az alföldön kb. $7-8 \text{ W/m}^2/10 \text{ m-es}$, a szűk völgyekben $3-5 \text{ W/m}^2/10 \text{ m-es}$, a hegygerinceken $30-35 \text{ W/m}^2/10 \text{ m-es}$ növekedés jelentkezik a fajlagos szélteljesítményben.

Elvégeztük a havi átlagos fajlagos szélteljesítmény becslését közelítő függvény alapján, amelyet a szélesebbség köbök mérési időpontonkénti (3 órás terminus idő) átlagainak napi menetére illesztettünk. Megvizsgáltuk a szélesebbség napi menetében az egynapos (A_1/E) és a félnapos ($A_{1/2}/E$) hullám realitásának arányait a $p=0,17$ és $p=0,05$ szignifikancia szinten. A 9 állomást együtt kezelve megállapítható, hogy az egynapos hullám realitása főként a tavasz elejétől az ősz elejéig érvényesül legjobban, ősszel és télen a véletlenszerűsége növekszik. A szélesebbség köbök 3 órás átlagára havonként illesztett trigonometrikus polinom félnapos periódusú hulláma tehát leginkább a késő tavaszi és nyári hónapokban mutat véletlenszerűséget a $0,17$ szignifikancia szinten, a téli, kora tavaszi és őszi hónapokban realitásának gyakorisága megnövekszik. Ezekben az utóbbi hónapokban tehát számítani kell a szélenergia napon belüli markáns változásaira: két minimális és két maximális értékre.

A szélklimatológiai, szélenergetikai vizsgálatok egy szintén fontos szegmense a szélirányokra vonatkozó jellemzők és összefüggések feltárása. Általánosan elmondható, hogy az állomások empirikus szélirányeloszlásai erősen tükrözik az orográfiai viszonyokat, különösen a szűk folyóvölgyekben. A jellemző irányok száma állomásonként 1 és 5 között mozog, az összes gyakoriságuk pedig $34,4\%$ (Pláj) és $85,0\%$ (Alsóhidegpatak) között. Az alföldi állomásokon és egy-egy szélesebb folyóvölgyben egyenletesebb eloszlást és több jellemző szélirányt láthatunk (3-5 között). A magasabb tengerszint feletti területeken, a felszínbe mélyen bevágódó folyóvölgyek állomásain viszont legfeljebb 1-3 meridionális jellemző irányt találunk. Az 1000 m feletti légrétegben elhelyezkedő két hegységi mérőpontban a DNY-i irány rendelkezik a legnagyobb átlagsebességgel, átlagosan $6,0 \text{ m/s}$ -al. Az

alföldön és a hegyvidéki folyóvölgyekben pedig az ÉNY, É és ÉK irányok a legselesebbek, mintegy 2,5 m/s átlagsebességgel. A hegységi állomások jellemző szélirányainak átlagsebessége átlagosan 2,5-szer nagyobbak, mint az alföldi és folyóvölgyi állomásoké, a nem jellemző irányok esetében pedig ez az arány 2,0.

A jellemző szélirányok összes relatív energiatartalma éves viszonylatban 47,4% (Pláj) és 94,6% (Rahó) között változik. Egy jellemző szélirány éves szinten átlagosan 8,0-szor több energiát szállít, mint egy nem jellemző irány, bár ennek értéke az állomások között erősen változik. A szélirányok gyakorisága és sebessége, illetve relatív energiatartalma közötti kapcsolatot lineáris korrelációval és regresszióval vizsgáltuk. Megállapítottuk, hogy a szélirányok energiatartalmát nem a sebesség, hanem az előfordulás gyakorisága határozza meg elsősorban.

Összefoglalás

Tehát, hasznosítható-e a szélenergia Kárpátalján? Igen, de e téren főleg a hegyvidéki régióra lehet támaszkodni. Főként a Havasi-vonulat (Róna-, Borzsa-, Kuk-, Kraszna-havas) gerincein akár a hálózatra termelő ipari szélerőművek működésére is van reális esély az ottani szélmező tulajdonságai révén. A hálózatra termelő egységek mellett a kis- és közepes szigetüzemű rendszerek kiépítése is perspektivikus lenne, főleg a hegyvidék azon részein, ahol központilag nincs kiépített elektromos és telekommunikációs hálózat, így a mindennapi életben csak az ilyen alternatív energiaforrások jelentik az esélyt többek között a külvilággal történő kommunikáció vagy egészségügyi ellátás kérésének módjára.

Kárpátalja alföldi részén viszont még a szélklíma szempontjából „legmegfelelőbb” területeken (pl. az Ungi-sík) sem lenne célszerű ipari, több megawattos szélerőművek telepítése, mivel itt, az ezek folyamatos, kiegyensúlyozott működéséhez nincs elegendő szélesebesség és szélerő.

Kárpátalja változatos domborzattal rendelkezik, emiatt belátható az is, hogy az ún. alapáramlás sebességét és valószínűleg irányát az orográfia igen nagymértékben módosít(hat)ja. A klimatológiaiailag optimálisnak mutatkozó helyeken is elengedhetetlen a kifejezetten energetikai célú helyszíni

szélmérés a szélérőmű telepítése előtt, hiszen akár kis területen belül is rövid idő alatt változhat meg a szélenergia mennyisége és járása, amely a szélérőművek villamosenergia-rendszerbe történő illesztését és a folyamatos ellátást veszélyeztethetik.

Felhasznált szakirodalom jegyzéke

- EWEA (European Wind Energy Association) (2019): Wind energy in Europe in 2018. Trend and Statistic (February 2019). 26 p. URL: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf>
- GWEC (Global Wind Energy Council) (2019): Global Wind Report 2018 (Brussels: April 2019). 61 p. URL: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>
- IEA (International Energy Agency) 2005: Variability of Wind Power and others Renewables: Management Options and Strategies. IEA/OECD, Paris, 57 p. URL: <http://www.iea.org/textbase/papers/2005/variability.pdf>
- IEA (International Energy Agency) 2019: Electricity Statistics. <https://www.iea.org/statistics/electricity/>
- IPCC 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-31.
- IRENA 2019: Renewable Energy Statistics 2019. The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 398 p. URL: https://www.irena.org//media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2019.pdf
- Kudrya S.O., Yatsenko L.V., Dushyna H.P., Shynkarenko L.Ya., Dovha V.T., Vasko P.F., Bryl A.O., Shurchkov A.V., Zabarnyi H.M., Zhovmir M.M., Vikharyev Yu.A. 2001: *Atlas of Energy Potential of Renewable and Unconventional Energy Sources in Ukraine: Wind Energy* [Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України: Енергія вітру]. НАНУ, Інститут електродинаміки. Київ, 42 с.
- OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) 2017: CarpatClim - A Kárpát-régió éghajlata. URL: http://www.met.hu/omsz/palyazatok_projektek/carpatclim/bevezeto/
- Sembery P., Tóth L. (szerk.) 2004: *Hagyományos és megújuló energiák*. Szaktudás Kiadó

Ház, Budapest, 530 p.

Spellman F.R. 2014: *Environmental impacts of renewable energy*. CRC Press, 490 p.

Tar K., Bíróné Kircsi A., Tóth T.: A szélenergia kutatása a Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszékén (1980-2014). *Légkör*, 61 (2), pp. 48-63.

Ukrajna Energetikai Stratégiája [Енергетична стратегія України] 2013: Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013, № 1071, 166 с. <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>

UWEA (Ukrainian Wind Energy Association, Українська вітроенергетична асоціація, УВЕА), 2019: Вітроенергетичний сектор України – 2018 [Ukrainian wind power sector – 2018]. (February 2019), 76 p. URL: <http://www.uwea.com.ua/>

WEC (World Energy Council) 2018: World energy. Issues Monitor 2018, 128 p. URL: www.worldenergy.org/assets/downloads/Issues-Monitor-2018-HQ-Final.pdf

Dr. Himics László

Kutatás helyszíne: Alkalmazott és Nemlineáris Optika Osztály, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Wigner Fizikai Kutatóközpont; Nanoszerkezeti Technológiák és Vizsgálatok Intézet, Kasseli Egyetem, Németország; Kémia Kar, Birminghami Egyetem, Egyesült Királyság

Gyémánt: csillogó drágakő a jövő technológiáiban, avagy egy kristály élete az ékszeriparon kívül

Bevezetés

Életünket egyre inkább behálózzák az olyan elektronikai eszközök és berendezések, melyek különböző fizikai, kémiai, mérnöki vagy informatikai kutatásoknak és fejlesztéseknek az eredményei. A legtöbb esetben a hasznosulás és a felfedezés között rengeteg idő telik el, sőt, az is előfordul, hogy az adott felfedezés egy célirányos kutatás mellékterméke, melyről a felfedező(k) nem is sejtik, hogy eredményeik később mekkora jelentőséggel bírnak majd. Vegyük például a röntgensugárzás, mikrohullámú sütő, teflon, tépőzár, penicillin, vagy a különböző műanyagok stb. esetét [1]. Bár ezeket a felfedezéseket „véletlennek” tituláljuk, azonban valójában olyan briliáns elmék munkájára és komplex látásmódjára volt hozzá szükség, akik képesek voltak észlelni és megérteni az adott jelenséget, vagy folyamatot, majd később hasznosítani azt, ráadásul jellemzően igen széles körben, mint ahogy azt a felsorolt példák is láthattuk. Talán némileg párhuzamot vonhatunk ezek között a kiváló tudósok, mérnökök és feltalálók, valamint a portugál művész, Artur Bordalo, között, aki olyan hétköznapi kidobott tárgyakból és szemétből készít műalkotásokat, melyek mellett a legtöbb ember egyszerűen csak észrevétlenül elsétálna.



1. ábra: **Artur Bordalo „Fox” nevű alkotása Forth Smith (USA) városában [2]**

Az ilyen jellegű alkotómunkához vagy a korábban említett, nagy jelentőséggel bíró felfedezésekhez rendkívül egyedi szemlélettel és átlagon felüli kreativitással rendelkező egyénekre van szükség, bár abban közel sem vagyok biztos, hogy már ennyi is elég a sikerhez, főleg, ami a felfedező kutatásnak a műszaki és természettudományi ágát illeti. Véleményem szerint utóbbiak művelése talán az egyik legkomplexebb alkotói folyamat, mely egyszerre igényel lexikális tudást és absztrakt képzelőerőt, kitartást és eltökéltséget, valamint nem kevés kreativitást, bár tény, hogy fizikusként az ezzel kapcsolatos meglátásaim közel sem tekinthetők objektívnek. Viszont, amiben teljesen biztos vagyok, hogy tehetséges emberek közel azonos valószínűséggel születnek a világ minden pontján, legyen szó akár az amerikai Beverly Hillshez hasonló luxuskörnyékről, vagy az indiai Mumbai melletti nyomornegyedről, esetleg a szívemnek még mindig oly kedves Kárpátaljáról. Az itt született tehetségek csak egyetlen dologban különböznek egymástól, mégpedig abban, hogy a kárpátaljai, vagy mumbai gyerekeknek némileg rögzesebb és több akadályt rejt a sikerhez vezető út. Azonban, ha minderre úgy tekintünk, mint egy maratoni futásra, ahol a kitartás és az elszántság vezet el a célhoz, szemben egy rövid sprinttel, amelynél főleg a gyorsaság a meghatározó, akkor máris sokat javítottunk a célba érési esélyeinken. Személy szerint én minden ifjú, pályaválasztás előtt álló olvasót arra szeretnék biztatni,

hogy induljon el ezen a maratnon és merjen nagyot álmodni, legyen bátor és elszánt, határozzon meg ambiciózus célokat és amikor versenypályát választ, akkor válassza a természettudományokat, ezen belül is a fizikát. Hogy miért? Mert, ahogy az egyik tanárom mondta: „fizikusként még bármi lehet belőled, de bárkiként már nem lehetsz fizikus, ha időközben mégis meggondolnád magad”. Ennek a mondatnak a mondanivalója, hogy a fizikusok jellemzően olyan széles spektrumú tudást kapnak a képzés során, illetve az elsajátítható gondolkodás- és látásmód is olyan, amellyel az élet nagyon sok területén tudnak érvényesülni, ha esetleg végül mégsem a szakmájukban kívánnak elhelyezkedni. Erre talán a két legismertebb és legszélsőségesebb példa Angela Merkel, aki 2005–2021 között volt Németország kancellárja, illetve Brian May, a legendás Queen együttes gitárosa.

Azonban a szakmában maradvá is rengeteg érdekes és kihívásokkal teli lehetőség közül választhatnak az ifjú fizikusok, hiszen a jelenkor, amiben élünk, az emberiség szempontjából komoly változások időszaka, amely igen jelentős technológiai feladatok elé állít bennünket. Az elektromos autózás és önvezető technológiák elterjedése, a virtuális valóság és mesterséges intelligencia térnyerése, az egymással kommunikálni képes okos ipari és háztartási eszközök elterjedése, vagy a nanotechnológia begyűrzése az orvoslásba és az orvosdiagnosztikába, illetve a klímaváltozás és annak következményei olyan új problémák elé állítják az emberiséget, amelyek megoldására a közeljövőben óriási erőforrásokat kell majd fordítanunk. Bár a problémák felismerése és a célok meghatározása társadalmi feladat, a megoldásokat azonban elsősorban fizikusoktól, vegyészekről, biológusoktól, informatikusoktól és mérnököktől várjuk majd. Szinte borítékolható, hogy ezekből a szakemberekből a közeljövőben még a jelenleginél is nagyobb hiány lesz majd, emiatt társadalmi szerepük még inkább felértékelődik, ami kitörési pontot jelenthet a nehezebb anyagi körülmények között élő, de a természettudományok iránt érdeklődő és fogékony fiatalok számára. Hogy mire alapozom mindezt? Elsősorban a különböző szakmai és egyéb folyóiratokban megjelenő publikációkra, a hazai és külföldi kollégákkal folytatott eszmecserékre és a saját tapasztalataimra, amelyeket az elmúlt 10 évben gyűjtöttem a nanotechnológiai kutatásaim során. Ezen kutatások egyik fókuszában a gyémánt, pontosabban a gyémánt alapú

nanoszerkezetek, még pontosabban a mesterségesen előállított gyémánt alapú nanoszerkezetek álltak és jelen tanulmányban az elért eredmények egy kisebb részét szeretném bemutatni, a természettudományok iránt érdeklődő olvasók számára, azonban a száraz szakmai részleteket mellőzve, könnyed és áttekinthető formában.

Optikailag aktív hibahelyek kialakítása és tanulmányozása nanogyémánt szerkezetekben

A gyémánt a legtöbb olvasó számára talán arról ismert leginkább, hogy a menyasszonyok többsége előszeretettel hordja a belőle készült jegygyűrűt. Az ékszerészeti felhasználáson kívül azonban vannak más, kevésbé ismert alkalmazási területei is ennek az egyedülálló és a természetben igen ritkának számító kristálynak. Gyémánttal borított fúrófejeket és vágóeszközöket használnak a nagy szilárdságú és keménységű anyagok vágására és megmunkálására, illetve csiszolására is, de emellett ezt a kristályt széleskörűen használják a nagyenergiájú fizikában, például girotronok ablakaként. A gyémánt elterjedt az elektronikában is, ahol a jó hővezetési tulajdonságainak köszönhetően, mind hűtőbordaként, mind pedig nyomtatott áramköri hordozóként alkalmazzák [3]. Az elmúlt 1-2 évtizedben pedig egyre több kutatás jelenik meg, melyben a gyémántot, mint a kvantuminformatika és a kvantumszámítógépek egyik legperspektivikusabb építőköveként, illetve az orvosi és biológiai jellegű nanotechnológiai kutatások igen ígéretes elemeként mutatják be [4, 5]. Mindkét kutatási terület közös pontja az optikailag aktív hibahelyek, vagy másnéven színcentrumok, melyek a gyémántban alakíthatók ki megfelelő szennyezők bevitelével. Ötvözve ezen egyedi kvantumrendszerek tulajdonságait a gyémántszerkezet különleges fizikai és optikai tulajdonságaival, lehetőségünk nyílik olyan újszerű nanoobjektumok létrehozására, melyek előnyeit az alábbiakban ismertetem.

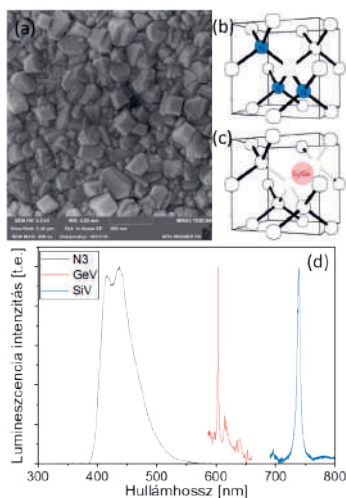
A nanoskálájú orvosbiológia és gyógyászat területén történő alkalmazások a színcentrumokat tartalmazó gyémánt kristályok parányi méretén és biokompatibilitásán alapulnak, így ellentétben például a nanocsövekkel, vagy festékmolekulákkal nem vezetnek rákos sejtek kialakulásához. Ezen

alkalmazások lényege, hogy a különböző színcentrumokat tartalmazó nanogyémánt kristályok különböző sejtekbe, vagy sejszervecskébe való bejuttatása lehetővé teszi ezen egységek háromdimenziós „in vivo” optikai elvű nyomon követését, illetve megfelelő hatóanyagot kapcsolva az említett nanogyémánt struktúrára, célzottan juttathatunk el gyógyszert akár az élő szervezet különböző részeihez, például közvetlenül rákos sejtekhez is, ezáltal csökkentve az egészséges sejtek károsodását és a szervezet gyógyszerterhelését. Mindezek mellett azonban talán a legjelentősebbek – a nanogyémánt színcentrumok alkalmazási lehetőségeit tekintve – azon egyedülálló tulajdonságok, amelyek a kvantuminformatikához és a kvantumtitkosításhoz kapcsolódnak, és amelyek nélkül a XXI. század egyik legnagyobb tudományos kihívása – a kvantum számítógép – megvalósítása nehezen képzelhető el. Ennek egyik alapköve az úgynevezett kvantumos információfeldolgozás (QIP – Quantum Information Processing), mely a kvantummechanika alapjaira épül és több gyakorlati alkalmazást foglal magába. A kvantumeszközök kialakításának alapfeltétele az egyedi kvantumállapotok precíz kialakítása és manipulálása nanométeres skálán. Mivel a fény kvantumállapota, azaz a foton eleget tesz ezen feltételeknek, emellett lehetővé teszi az információ fénysebességgel történő továbbítását alacsony zaj mellett és koherencia veszteség nélkül, így a foton a QIP rendszerek lehetséges építőeleme lehet a jövőben. Azonban a megfelelő kvantum fényforrások kialakítása, melyek képesek egyedi és a QIP rendszerek elvárásainak megfelelő fotonok előállítására, emellett szobahőmérsékleten is megbízhatóan működnek, a jelenleg elérhető technológiákkal és anyagokból igen komoly kihívást jelent [5].

Számos javaslat és koncepció született az ideális kvantumos fényforrás megvalósítását illetően, azonban ezek közül a gyémánt színcentrumok, mint egyedülálló fizikai tulajdonságokkal rendelkező kvantumrendszerek, tűnnek jelenleg a legígéretesebbnek. Ennek oka, hogy a gyémántot alkotó szénatomok egymáshoz kompakt módon és erős kovalens kötéssel kapcsolódnak, ami kémiaiilag ellenállóvá teszi a szerkezetet, valamint kitűnő hővezetési tulajdonságot biztosít, továbbá elég széles tilos sávot képez ahhoz, hogy optikailag aktív hibahelyek kialakításával széles emissziós tartományt fedhessünk le. Az ilyen speciális hibahelyeket

tartalmazó gyémánt szerkezetek által kibocsájtott fotonok polarizációjának változtatásával a továbbított, vagy tárolt információ a sokszorosára növelhető, azaz a színcentrum által kibocsájtott foton kvantumbiteként (qubit) alkalmazható, mivel az információ az egyes qubitek polarizációs állapotába kódolható. A gyémánt színcentrumok további előnye más kvantumrendszerekhez képest, hogy példa nélküli fotostabilitással bírnak, így például a kvantumpöttyöknél, vagy szerves molekuláknál gyakran megfigyelt villódzás és degradáció kevésbé jellemző rájuk, emellett a működésükhöz nincs szükség alacsony hőmérsékletre és előállításuk is viszonylag egyszerű [6].

Kutatásaink során ilyen színcentrumok – elsősorban nitrogénhez, szilíciumhoz és germániumhoz köthető optikailag aktív ponthibák – nanogyémánt szerkezetekben történő kialakításával és vizsgálatával foglalkoztunk. Vizsgálataink során kétfajta megközelítést alkalmaztunk. Az elsőnél, melyet nitrogénhez köthető színcentrumok kialakítására használtunk, a megfelelő tisztaságú kiindulási nanogyémánt szerkezeteket kereskedelmi forgalomból szereztük be, majd ezekbe nitrogént juttattunk be ion implantációval. Ezt követően különböző utókezeléseket alkalmaztunk a szerkezeten belüli nitrogénatomok és szénvakanciák mozgatásához, melynek célja az optikailag aktív, komplex hibahelyszerkezet kialakítása volt. Ennek az általunk kifejlesztett, többlépcsős technológiai eljárásnak köszönhetően sikeresen alakítottunk ki úgynevezett N3 centrumokat 20 nm alatti átlagos szemcsemérettel rendelkező nanogyémánt kristályokban [7], ismereteink alapján elsőként a világon. Az N3 centrum előnye, hogy az ultraibolya hullámhossztartományhoz közel (~415 nm körüli) emittál, emellett paramágneses tulajdonságokkal is bír, így mind az orvosi biológiai, mind pedig kvantuminformatikai alkalmazások szempontjából hasznos fizikai tulajdonságokkal rendelkezik [8].



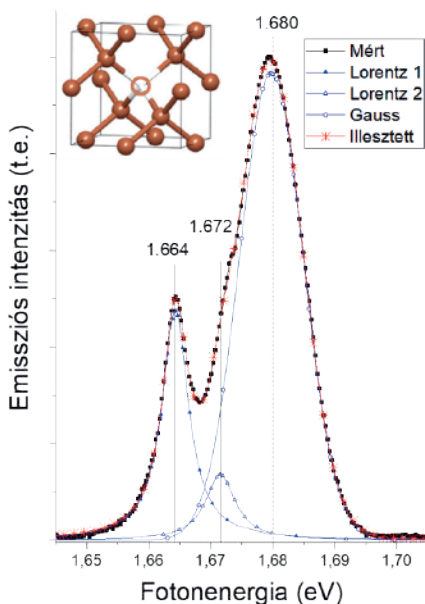
1. ábra: (a) Az MWCVD berendezéssel növesztett tipikus nanokristályos gyémánt vékonyréteg pásztázó elektronmikroszkópos képe; (b) az N3, valamint (c) SiV és GeV centrumok atomi szerkezetének sematikus ábrája; (d) ezen színcentrumok fotolumineszcencia spektrumai.

A másik esetben a szilíciumhoz és germániumhoz rendelt hibahelyeket – úgynevezett SiV és GeV centrumokat – közvetlenül a nanokristályos gyémánt szerkezet növekedése során hoztuk létre a Wigner Fizikai Kutatóközpontban található és saját kezűleg épített mikrohullámú kémiai gőzfázisú leválasztó (Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, MWCVD) rendszer segítségével. A berendezés működése során a parányi méretű nanogyémánt kristályokat gáz fázisból állítjuk elő metánt és hidrogént alkalmazva. Míg a metán gáz szolgáltatja a gyémántkristályok növekedéséhez elengedhetetlen szénforrást, addig a hidrogén szerepe legalább ilyen fontos, mivel speciális kémiai tulajdonságainak köszönhetően sokkal hatékonyabban marja el a nem sp^3 hibridizációjú szénatomokat, azaz nem gyémántot alkotó szerkezeteket, melyek csak szennyezésekként rontanák a növekedő kristályszerkezet minőségét és tulajdonságait. Bár a növekedési folyamat az általunk épített MWCVD rendszerben viszonylag lassú (200-300 nm/h), azonban a berendezés lehetőséget biztosít a növesztési paraméterek változtatására, ezáltal eltérő tulajdonságokkal rendelkező gyémánt szerkezetek állíthatók elő [9].



2. ábra: Az általunk épített és a Wigner Fizikai Kutatóközpontban üzemelő MWCVD gyémántleválasztó berendezés (felső ábra) és gyémántnövesztés során a mintatérben a forrásgázok mikrohullámú aktiválásával létrejövő plazmagömb (alsó ábra).

Az egyik ilyen kísérletsorozatunk során azt vizsgáltuk, hogy a gyémántszerkezet hogyan hat a biológiai és kvantuminformatikai alkalmazások szempontjából ígéretes SiV centrumok emissziós tulajdonságaira. A nanokristályos gyémántrétegek mint mátrixanyagok tulajdonságainak szisztematikus változtatásával kísérletileg igazoltuk, hogy a centrum zérusfonon vonalának aszimmetrikus kiszélesedését egy másik színcentrum, az úgynevezett GR1 hibahely jelenléte okozza, mely emissziós sávját tekintve a SiV centrumhoz nagyon közel esik, de atomi szerkezetét tekintve teljesen eltér attól [10]. Gyakorlati szempontból a GR1 centrum jelenléte hátrányos, mivel kiszélesíti a SiV centrum emissziós sávját és az egyfotonforrás alkalmazásoknál is zajként járulhat hozzá a detektált optikai jelhez, azonban megfelelő utólagos hőkezelések segítségével ezen nemkívánatos centrumok mennyisége jelentősen csökkenthető a szerkezetben, melyet kísérleteinkkel is igazoltunk [10].



3. ábra: A SiV és GR1 centrumokat egyszerre tartalmazó nanogyémánt réteg emissziós spektruma, valamint a GR1 centrum atomi szerkezetének sematikus ábrája. A mért spektrum dekompozíciója egyszerűen elvégezhető a GR1 centrumhoz tartozó dupla zérusfonon vonal két Lorentz, míg a SiV centrum zérusfonon vonalának egy Gauss görbével történő illesztéssel.

Rezonáns gyémánt nanoszerkezetek fotonikai és szenzorikai alkalmazásokra

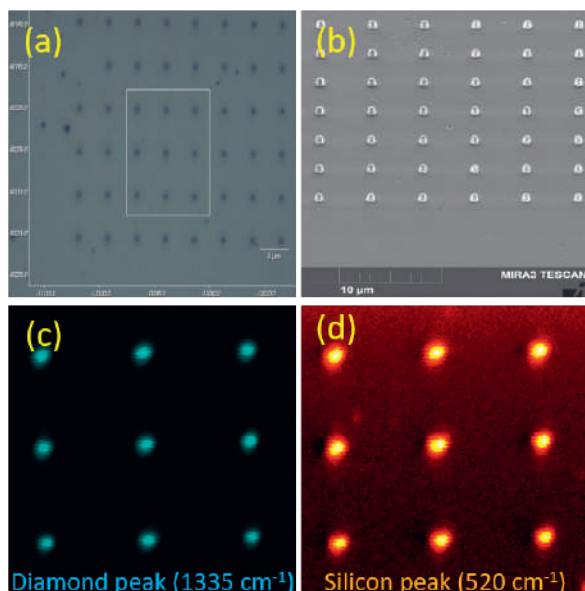
Egy másik kutatási terület, mellyel nemrég kezdtünk aktívan foglalkozni, a fotonikához és nanoszenzorikához kapcsolódik. Ezen kutatások fő mozgatórugója, hogy a napjainkban használt félvezetőkre, azaz a szilíciumra és germániumra épülő elektronikai ipar, melyből az elektromos készülékeinkben található chipek túlnyomó többsége is készül, a klasszikus fizika által már nem értelmezhető méretbeli korlátokhoz közelít. Az ilyen összetett áramkörökbe integrált elektronikai eszközök száma már nem növelhető tovább a komponensek méretének további csökkentésével, hiszen akkor olyan kvantumos jelenségek jelentkeznének, melyek során az

alkotóelemek egymással való kölcsönhatása jelentősen korlátozná, vagy teljesen ellehetetlenítené az adott eszköz alapvető funkcióját. Emellett, a félvezetőipar kezdetétől jelenlévő alapvető probléma – a melegedés okozta veszteségek – azaz a működés során felhasznált elektromos áram jelentős részének a hővé való alakulása is olyan új technológiák kutatása és fejlesztése felé irányította a tudósokat, melyek kiküszöbölik az említett problémákat, miközben biztosítják például az egyre nagyobb méretű adatfájlok gyorsabb és biztonságosabb átvitelét és tárolását az ehhez szükséges eszközök méretének további csökkentése mellett. Ennek eredményeként született meg egy új koncepció, melynek lényege, hogy a jelenleg is használt elektromos áramkörökről, ahol a fizikai folyamatok elektronok közreműködésével történnek, térjünk át fotonikus áramkörökre, ahol a főszerep a fényé, azaz a fotonoké. Utóbbi számos előnnyel járna, hiszen a fotonok gyors adatátvitelt és adatfeldolgozást tesznek lehetővé, ráadásul a megfelelő anyagok és közegek megválasztásával a veszteségek is elhanyagolhatóak, gondoljunk csak a korszerű optikai vezetékes internethálózatra, ahol az optikai jeleket az óceán fenekén futó száloptika segítségével több ezer kilométerre vagyunk képesek továbbítani. További komoly előnyt jelent a fotonokra épülő kvantuminformatika és kvantumbitek lehetősége, mely a fény polarizálhatóságát használja ki és a polarizációs állapotok változtatásával sokkal nagyobb szabadsági fokot kínál az információ kódolásában és tárolásában, mint a ma használt bináris rendszer, ahol nullák és egyesek írnak le mindent [11].

Bár elsőre mindez nagyszerűen hangzik és a megvalósítása is egyszerűnek tűnhet, azonban számos technológiai és műszaki probléma van még melyet meg kell oldani azelőtt, hogy a kezünkbe vehetnénk az első fotonikus áramkörökkel működő okostelefonokat vagy laptopokat. Jelenleg is a világ számos kutatóintézetében és vállalatában folytatnak olyan kutatásokat, amelyek célja változatos fotonikus szerkezetek kialakítása különböző platformokból, azok elméleti és kísérleti vizsgálata és a legtöbb szempontból tökéletes anyag megtalálása vagy megalkotása. Kutatócsoportunk a Kasseli Egyetemen szorosan együttműködve gyémánt alapú nanoszerkezetek kialakításával és vizsgálatával foglalkozik. Köszönhetően az egyedülálló fizikai és kémiai tulajdonságoknak és az

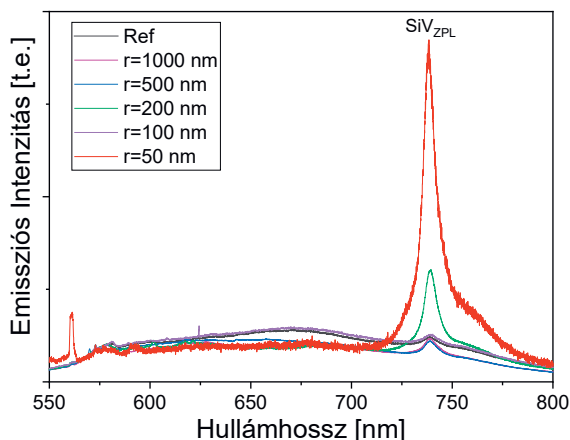
előző részben bemutatott színcentrumokkal való kombinálhatóság miatt, a gyémánt a legígéretesebb anyagok közé tartozik, ami a fotonikai és kvantuminformatikai alkalmazásokat illeti. Mindemellett, a nagy törésmutató miatt, olyan eszközök kialakítására is alkalmas, megfelelő méret és alak mellett, amelyek nanoantennaként viselkedve összegyűjtik és/vagy felerősítik a hasznos optikai jelet. Ez a nemrég felfedezett jelenség a rezonáns Mie szóráson alapul és olyan új, a nanotechnológiában és fotonikában eddig ismeretlen jelenségek és eszközök kialakítását teszi lehetővé és vizsgálhatóvá, melyek számtalan alkalmazási lehetőséget rejtenek a nanolézerektől a magas kvantumhatásfokkal működő rezonátorokon és szenzorokon át egészen a komplex logikai kapukig és optikai kapcsolókig, és amelyek a kvantumszámítástechnika alapjait jelentik [12].

Előzetes szimulációkkal kapott eredményeinkre alapozva, melyek azt mutatták, hogy a gyémántból készült nanoszerkezetek hatékonyan erősítik a látható tartományba eső elektromágneses sugárzást, különböző átmérővel és magassággal rendelkező gyémánt nanooszlopokat alakítottunk ki azok lézerefénnyel való kölcsönhatásának kísérleti vizsgálata céljából. Az oszlopok kialakítása elektronsugaras litográfiával és reaktív ionmaratással történt a Kasseli Egyetemen töltött kiküldetésem során. A strukturálásnál alkalmazott megközelítés nagy előnye, hogy drága tömbi gyémánt helyett a nanooszlopokat (4(a-b) ábrák) CVD technológiával növesztett nanokristályos rétegben hoztuk létre. Emellett, az optikai vizsgálatok céljából, a nanooszlopok szilícium hordozón kerültek kialakításra és a szerkezeten belül SiV centrumokat tartalmaznak. Míg előbbinek a külső elektromágneses térerőváltozás monitorozása, addig utóbbinak a szerkezeten belüli erősítés mértékének meghatározása céljából van jelentősége.



4. ábra: a szilícium hordozón CVD gyémánt rétegből kialakított nanooszlopok (a) optikai és (b) elektronmikroszkópos képe, valamint az optikai képen kiválasztott terület (c) gyémánt és (d) szilícium hordozó szórási csúcsára elkészített Raman-térképek 532 nm-es lézeres gerjesztéssel mérve. A (d) ábrán jól látható, hogy a hordozó Raman-szórási jele jelentős intenzitásnövekedést mutat a CVD gyémánt nanooszlopok jelenléte esetén.

A kísérleteink során azt találtuk, hogy leginkább a nanoszlopok mérete és a gerjesztéshez használt lézer hullámhossza befolyásolja az erősítés mértékét. A különböző hullámhosszon végzett optikai vizsgálatok igazolták, hogy a kialakított CVD gyémánt nanooszlopok hatékonyan erősítik a külső lézerrel keltett optikai jelet, mind a közeltér monitorozására használt szilícium hordozó Raman-szórási (4.(c-d) ábrák), mind pedig a nanoszerkezeten belüli SiV színcentrumok fotolumineszcencia jelének vonatkozásában (5. ábra). A kísérleteink során kapott legjobb erősítési tényező meghaladta az egy nagyságrendet.



5. ábra: A különböző méretű CVD gyémánt nanooszlopokban és referencia rétegben kialakított SiV centrumok emissziós intenzitásának változása az oszlopátmérő függvényében. A spektrumok szobahőmérsékleten és ugyanazon mérési paraméterek alkalmazása mellett kerültek rögzítésre 532 nm-es lézeres gerjesztést alkalmazva. A mért spektrumok minden esetben a gyémánt Raman-szórási csúcsára történő normálás után kerültek ábrázolásra.

Összefoglalásként elmondható, hogy az általunk folytatott vizsgálatok eredményei alátámasztják azokat a várakozásokat, melyek szerint a gyémánt, mint nagy törésmutatójú dielektrikum, a fotonika, nanooptika és a fényalapú kvantumszámítástechnika egyik legígéretesebb platformja. Az általunk alkalmazott technológia széles körben elérhető és viszonylag olcsó megoldást kínál CVD gyémánt nanoszerkezetek kialakítására és a kialakított nanoszerkezetek jó hatékonysággal alkalmazhatóak a látható hullámhossztartományba eső optikai jel erősítésére, így ígéretes a különböző nanofotonikai és kvantumoptikai eszközök megvalósítása szempontjából.

Köszönetnyilvánítás

A folyamatos szakmai támogatásért és biztatásért köszönettel tartozom volt témavezetőmnek, prof. Koós Margitnak, valamint osztályvezetőmnek, dr. Veres Miklósnak és közvetlen kollégáimnak, elősorban Gál Dávidnak, Csikvári Péternek, Bodoky Lukácsnak. Emellett a kutatási feltételek biztosításáért

köszönet illeti a Wigner FK jelenlegi és volt vezetését, illetve az NKFIH-t a posztdoktori kiválósági program keretében nyújtott támogatásért.

A PD 134625 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a PD_20 „OTKA” pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék:

- [1] Roberts, Royston M. *Serendipity: Accidental discoveries in science*. 1989.
- [2] <https://www.bordaloii.com/>
- [3] Neves, A. J., and Maria Helena Nazaré, eds. *Properties, growth and applications of diamond*. No. 26. IET, 2001.
- [4] Turcheniuk, Kostiantyn, and Vadym N. Mochalin. „Biomedical applications of nanodiamond.” *Nanotechnology* 28.25 (2017): 252001.
- [5] Praver, Steven, and Igor Aharonovich, eds. *Quantum information processing with diamond: principles and applications*. Elsevier, 2014.
- [6] Gali, Adam. „Theory of the neutral nitrogen-vacancy center in diamond and its application to the realization of a qubit.” *Physical Review B* 79.23 (2009): 235210.
- [7] Himics, L., et al. „Effective implantation of light emitting centers by plasma immersion ion implantation and focused ion beam methods into nanosized diamond.” *Applied Surface Science* 328 (2015): 577-582.
- [8] Himics, L., Tóth, S., Veres, M., Balogh, Z., & Koós, M. (2014). Creation of deep blue light emitting nitrogen-vacancy center in nanosized diamond. *Applied Physics Letters*, 104(9), 093101.
- [9] Popov, C., et al. „Growth and characterization of nanocrystalline diamond/amorphous carbon composite films prepared by MWCVD.” *Diamond and related materials* 13.4-8 (2004): 1371-1376.
- [10] Himics, L., et al. „Origin of the asymmetric zero-phonon line shape of the silicon-vacancy center in nanocrystalline diamond films.” *Journal of Luminescence* 215 (2019): 116681.
- [11] Krenn, Mario, et al. „Quantum communication with photons.” *Optics in Our Time* 18 (2016): 455.
- [12] Kuznetsov, Arseniy I., et al. „Optically resonant dielectric nanostructures.” *Science* 354.6314 (2016).

Dr. Jevcsák Szintia

Kutatóhelyszíne: Debreceni Egyetem (DE), Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar (MÉK), Élelmiszertechnológiai Intézet (ÉTECH)

Táplálkozástudománytól az élelmiszerfejlesztésig! Célok, feladatok, kutatási lehetőségek

*„Egészségünk talán minden korábbinál
inkább a saját kezünkben van”*

Julian Sheather

Bemutakozás

1989-ben Kárpátalján, Ungváron születtem. A középiskolai tanulmányaimat az Ungvári 10. Számú Dayka Gábor Középiskolában végeztem. 2007-ben felvételt nyertem az Ungvári Nemzeti Egyetem biológia szakára, melynek öt éves képzését végeztem el. Szakdolgozatomat a Huszt mellett elhelyezkedő védett Nárciszok Völgyének elemzéséből írtam. Tanulmányaimat a Debreceni Egyetem Általános Orvostudományi Karának Táplálkozástudományi mesterképzésén folytattam. 2015-ben doktori képzésre jelentkeztem a Debreceni Egyetem Kerpely Kálmán Doktori Iskolájába. 2019-ben sikeresen megvédtem disszertációmát és summa cum laude minősítéssel doktori címet szereztem az Agrártudományok területén Növénytermesztési és Kertészeti Tudományokban. 2019-től a DE MÉK Élelmiszertechnológiai Intézetében tudományos segédmunkatársként dolgoztam, majd 2020-tól tudományos munkatársként végzem kutatói és oktatói feladataimat az intézetben.

Táplálkozástudomány

Tanulmányaimat a Debreceni Egyetem Általános Orvostudományi Karának táplálkozástudományi mesterképzésén folytattam. Ezen képzésen számos ismeretre tettem szert olyan tárgyak keretében, mint a táplálkozásbiokémia, az orvosi biokémia, orvosi mikrobiológia vagy a klinikai dietetika. Kutatásomat különböző gyümölcsök beltartalmi paramétereinek meghatározásában végeztem (Jevcsák, 2014). A vizsgált minták Kárpátaljáról kerültek beszerzésre, mint a piros ribiszke, josta és meggy. A josta (*Ribes nigrolaria*) a fekete ribiszke/ribizli (*Ribes nigrum*) és a köszméte/egres (*Ribes uva-crispa*) keresztezéséből alakult ki (1. ábra).



1. ábra: A josta termése

(Forrás: <https://www.mygardenlife.com/plant-library/6020/ribes/nidigrolaria>)

Szabványban, leiratokban megjelöltek szerint határoztam meg a gyümölcsök szárazanyag- és savtartalmát (MSZ 6367-3 és MSZ EN 12147), C-vitamin tartalmát (α - α dipiridiles módszerrel), összes fenolos antioxidáns tartalmát (Kim et al., 2003 leirata szerint), valamint összflavonoid-tartalmát (Meda et al., 2005 leirata szerint). A képzés keretében lehetőségem nyílt külföldi szakmai gyakorlat elvégzésére, mely során Lengyelországban a Varsói Egyetem Élettudományi Karának Élelmiszertudományi Intézetében (Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie) kutatást végeztem

a *Különböző módszerek tanulmányozása gyümölcsök beltartalmi értékeinek meghatározására* témában. A DE ÁOK ezen mesterképzésén okleveles táplálkozástudományi szakember szakképesítést szereztem.

Agrártudományok

A 3 éves PhD képzés keretében lehetőség volt a korábban elvégzett és további összetett vizsgálatok elvégzésére olyan alternatív gabonaféléken, mint a termesztett köles (*Panicum miliaceum* L.) és a szemescirok (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), melyek rendkívül nagy szárazságtűrő képességgel rendelkeznek és csekély termesztési feltételek mellett is sikeresen termesztethetők. A teljes kutatást a *Nitrogén-ellátás hatása a termesztett köles és a szemescirok minőségi paramétereire és élelmiszeripari hasznosíthatóságára* címmel készítettem el (Jevcsák, 2019), amelynek fontosabb részeit a következőkben mutatom be:

Problémafelvetés

Kisparcellás kísérlet került beállításra az Agrár Kutatóintézetek és Tangazdaság Karcagi Kutatóintézetében. Ismerve a környezeti tényezőket, talajadottságokat, növénytermesztési tényezőket, vizsgálhattam az alkalmazott műtrágyák dózis hatásait a köles és cirok fajták mennyiségi és minőségi paramétereire. A hatásvizsgálatot nem csupán a beállított növényeken tanulmányozhattam, hanem az eredményeket az évjáratok összehasonlításával is vizsgálni tudtam. A gabonák számos beltartalmi paramétereinek meghatározását követően, azok élelmiszeripari hasznosíthatóságának vizsgálatát is célul tűztem ki.

Anyag és módszerek

A kísérleti minták közül Maxi, illetve Lovászpatonai pirosmagvú köles fajtákat, valamint Zádor szemescirok hibrid mintákat vizsgáltam. A Maxi köles szemtermésének színe világossárga, fehér, termésátlaga 3,0 és 4,0 t/ha között változik, melegigényes növény (Blaskó, 2012; M.-né Drienyovszki et al., 2017). A Lovászpatonai köles magja piros, termésátlaga 3 t/ha körül mozog, betegségeknek ellenálló, rezisztens fajta (Radics–Pusztai, 2011; M.-né

Drienyovszki et al., 2017). A Zádor szemescirok hibrid (2. ábra) világosbarna terméssel jellemezhető, termésátlagos 5,0 és 8,0 t/ha között változik, egyik legfontosabb sajátossága alacsony tannin tartalma (*Ábrahám, 2010*).



2. ábra: **A Zádor szemescirok (2017. júliusában és szeptemberében)**
(Forrás: Murányi és Jevcsák, 2017)

A tápanyagutánpótlás megválasztásánál mészammon-salétrom (27% nitrogén tartalmú), valamint monoammónium-foszfát (12% nitrogén tartalmú) kerültek kijuttatásra. Véletlenszerű parcella elrendezésben eltérő nitrogén dózisokat alkalmaztunk, de összehasonlíthatóság jegyében minden fajtánál azonos N került kiszórásra: kontroll (0 kg/ha), 40 kg/ha, 80 kg/ha, 120 kg/ha, 160 kg/ha, valamint 200 kg/ha nitrogén dózisok.

A fizikai és kémiai vizsgálatok közül csupán néhányat megemlítve a vizsgálati módszerek feltüntetésével a következőket végeztem el: ezerszemtömeg meghatározása (x g/1000 db), hamutartalom meghatározása (MSZ EN 1135:1995), keményítőtartalom (MSZ 6830-18:1988) és a keményítő összetételének vizsgálata, mint az amilóz:amilopektin arány, sérült keményítő tartalom és rezisztens keményítő mennyiségének meghatározása (*Megazyme enzimes módszerekkel*, 2015). Meghatározásra került a minták élelmi rosttartalma (*Magyar Élelmiszerkönyv 3-2-2008/1*), mikro- és makroelem tartalma (*Kovács et al., 1996*). Az említett vizsgálatokon túl számos egyéb táplálkozás-élettani szempontból jelentős paraméter került meghatározásra (*Jevcsák, 2019*).

Következtetések

Az eredményeim alapján 7 új tudományos és 4 gyakorlatban alkalmazható eredményt fogalmaztam meg. Többek között megállapítottam, hogy a különböző nitrogén kezelések nem csupán a fehérje koncentrációjának emelkedését eredményezik, hanem az ásványi elemek koncentrációját is befolyásolják. Az, hogy mely dózis teszi lehetővé a legnagyobb változást, az adott elemtől is függ. Az alkalmazott kezelések a keményítő összetételt jelentős mértékben nem befolyásolták. Ezáltal a kezeléseken túl, a környezeti feltételek változása mellett is számíthatunk adott mennyiségben a rezisztens-, a sérült keményítő és az amilóz tartalomra. Az általam vizsgált gabonafélékben a zsírsavak tekintetében a legnagyobb arányt a linolsav, olajsav, valamint a palmitinsav tették ki, a zsírsavprofilban azonban nem történt számottevő változás a kezelések hatására. Meghatároztam, hogy a legmagasabb antioxidáns hatású vegyület tartalommal a Zádor szemescirok rendelkezett, melyet a Maxi, végül a Lovászpatonai köles minták követték (Jevcsák-Sipos, 2017a; Jevcsák et al., 2017a; Jevcsák et al., 2017b; Jevcsák et al., 2018).

A továbbiakban javaslatot tettem arra vonatkozóan, hogy ezen alternatív gabonák nagyobb hangsúlyt kapjanak a kutatás és a termesztés szemszögéből is, hiszen a szélsőséges időjárási viszonyok a szárazságtűrő, igénytelen növények egyre nagyobb termesztésbe való megjelenését fogják megkövetelni. Fontos ezen növények egyre nagyobb megismerése, valamint növénytermesztésben való hatásuk elemzése. Mindemellett fontos a kezelések gazdaságos megválasztása és megfelelő alkalmazása a környezet terhelésének mérséklése szempontjából egyaránt (Jevcsák, 2019).

Kutatási lehetőségek

Adoktori képzéshez kapcsolódóan számos ösztöndíjprogramban való kutatási lehetőség rejlik. A kritériumoknak megfelelően, a fő irányvonal mellett, témához közvetetten kapcsolódó kutatási lehetőségeket biztosítanak a különböző programok. Így például a PhD-képzés első tanévében részt vettem a Balassi Intézet által szervezett Márton Áron Kutatói Szakkollégium Programjában

a cirok és a köles analitikai vizsgálataival. Másodéves doktorandusz hallgatóként részt vettem a Külgazdasági és Külügyminisztérium Külföldi Magyar Intézetekért és Nemzetközi Oktatási Kapcsolatokért Felelős Helyettes Államtitkárság által hirdetett Márton Áron Kutatói Programban, amely során a pohánka (más néven hajdina) tápanyagtartalmát és felhasználási lehetőségeit vizsgáltam (Jevcsák, 2018). A PhD harmadik tanévében elnyertem az Új Nemzeti Kiválóság Program Doktori Hallgatói ösztöndíját. Doktorjelöltként pedig elnyertem az Új Nemzeti Kiválóság Program Doktorjelölti Kutatói ösztöndíját, ezen programok keretében doktori témámnak élelmiszeripari technológiában való hasznosíthatóságát vizsgáltam.

Ezen túlmenően a doktori képzés, valamint a különböző programokban való részvétel lehetőséget nyújt publikálásra, hazai és nemzetközi konferenciákra való jelentkezésre. Szintén néhány példát említve, részt vehettem a 9. Közép-Európai Élelmiszer Kongresszuson, a 21. Klinikai táplálkozás című világkongresszuson, amelyekre előadásanyag vagy poszter bemutatásával jelentkeztem (Jevcsák–Sipos, 2017b). Hazai konferenciák tekintetében a Magyar Táplálkozástudományi Társaság által szervezett Táplálkozástudományi Kutatások című PhD konferencián a 2018-as és a 2019-es évben is első helyezést értem el a Technológia szekcióban, ami pozitív megerősítést adott az eddigi kutatási tevékenységemről.

Élelmiszertechnológia

A kiváló beltartalmi tulajdonságokkal rendelkező növényi alapanyagok feldolgozását és élelmiszeripari alkalmazhatóságát a DE MÉK Élelmiszertechnológiai Intézet dolgozójaként kutathatom tovább már 2019-től. Kutató-fejlesztői és oktatói feladataimat az intézethez tartozó Élelmiszeripari Innovációs Központban (ÉIK) végezhetem, ami kiváló lehetőséget biztosít a feladatok elvégzésére. Az élelmiszermérnök hallgatók számára gyakorlatok formájában mutatom be a malomipari technológiák gépeit, termékeit, de kutatási cél megvalósítására szak- és diplomadolgozók szempontjából is számos technológiai fejlesztésben segítem a kutatómunka megvalósulását. A szakterületemhez tartozó néhány élelmiszerfejlesztési irányvonalat a következőkben ismertetek:

- Gabonafélék felhasználásával történő malomipari termékek előállítása, azok fejlesztése. A gabonák alkalmazása különböző sütőipari termékek előállítására. Különböző próbatermékek készítése különböző arányú lisztek, valamint dúsítóanyagok felhasználásával.

- Álgabonák és gluténmentes lisztek felhasználása lisztkeverékek előállításához.

- Különböző sütőipari próbatermékek fejlesztése rostokkal, olajos magvakkal.

- Édesipari próbatermékek készítése, csokoládé előállítása, dúsítása, fejlesztési lehetőségei.

Ezen utóbbi tématerület igen kedvelt a hallgatók körében, az ÉIK-ben lehetőség van kis- és nagyméretű táblás csokoládék, valamint különböző alakú bonbon csokoládék elkészítésére, fejlesztésére (3. ábra). Annak érdekében, hogy az emberi szervezet számára magas hozzáadott értékkel rendelkező terméket állítsunk elő, mindenképp természetes alapanyagokat és dúsítóanyagokat választunk. A receptúra kialakításánál nagyon fontos, hogy a termékprototípus kedvező tápanyag-összetétellel rendelkezzen, hogy mind élvezeti szempontból, mind pedig a táplálkozás szempontjából kedvező minőségű termék készülhessen.



3. ábra: **Bonbon csokoládék fejlesztése magas kakaótartalmú tejszokoládé pasztilla felhasználásával az ÉIK-ben** (Forrás: Jevcsák, 2020)

Néhány példa a sikeresen végzett élelmiszermérnöki alapképzéses (BSc), illetve élelmiszerbiztonsági és -minőségi mérnöki mesterképzéses (MSc) hallgatók témavezetői, feltémavezetői munkák eredményeiről, témacímek a következők:

- Dúsított gluténmentes pogácsák készítése és a gluténmentesen diétázók igényeinek felmérése (*Lőrincz Lívia Eszter, 2020*)
- Különböző rostokkal dúsított Focaccia és Ciabatta fejlesztése és vizsgálata (*Kardos Renáta Tímea, 2021*)
- Növényi kivonatokkal dúsított csokoládé fejlesztése, valamint analitikai, élelmiszerbiztonsági és gazdasági aspektusainak analízise (*Kalmár Gréta, 2020*) (*Kalmár et al, 2020*)
- „Choco Lady”: A premenstruációs szindróma tüneteinek enyhítését célzó növényi kivonatokkal dúsított csokoládé fejlesztése (*Kalmár Gréta, 2021*)
- Gomolya sajtok állományvizsgálata különböző sólé koncentrációk és sózási időtartamok függvényében (*Pocsai Boglárka Dóra, 2021*)

További értékes témák kidolgozása, hallgatói munkák, kutatási megvalósítások zajlanak jelenleg is az intézetben és az innovációs központban. Az intézet feladataihoz tartozik továbbá szak- és diplomadolgozatok védésénél bírálói, államvizsgán, valamint helyi TDK-n és OTDK-n bizottsági feladatok elvégzése.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet a Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar dékánjának, az Élelmiszertechnológiai Intézet intézetvezetőjének, Dr. Stündl László egyetemi docensnek, hogy lehetőséget biztosít a kutatói-fejlesztői és oktatási tevékenységek elvégzésére mind az intézet, mind pedig az ÉIK keretén belül. Továbbá köszönöm minden kollégám, munkatársam szakmai segítségét és tanácsát.

Felhasznált irodalom

- Ábrahám, É. B.: CIROK (SORGHUM SPP.) [In: Gondola István (szerk.) *Az alternatív növények szerepe az Észak-alföldi Régióban.*] Nyíregyháza, 263-275 (2010)
- Blaskó, L.: *Alternatív növények fajtakínálata.* Debreceni Egyetem AGTC KIT Karcagi Kutató Intézet. Kutató Intézet a Közép-Tisza mentén. 10, (2012)
- Jevcsák, Sz.: Apohánkatápanyagtartalma és felhasználása. In: Ifjúság, tudáspolitikai, jövőkép: kilátások és kihívások a Kárpát-medencében. Szerk.: Bodó, B.; Szoták, Sz., Külgazdasági és Külügyminisztérium. *Határhelyzetek*, Budapest. 10, 351-361 (2018) ISSN: 2064-3918. ISBN: 9786155389696.
- Jevcsák, Sz.: *A piros ribizske, a josta és a meggy egyes beltartalmi értékeinek vizsgálata.* MSc Diplomadolgozat. Debreceni Egyetem, Debrecen, 2014. június.
- Jevcsák, Sz.; Biró, A.; Gálné Remenyik, J.; Lehoczki, G.; Murányi, E.; Jóvér, J.; Diósi, G.; Sipos, P.: Műtrágyakezelések hatása a szemescirok lisztmintáinak zsírtartalmára és zsírsavösszetételére = Effect of fertilization on the fat content and fatty acid profile of sorghum flour samples. *Élelmiszervizsgálati Közlemények.* 64 (4): 2278-2335 (2018) ISSN: 0422-9576.
- Jevcsák, Sz.; Murányi, E.; Sipos, P.: Termesztett köles fajták tápanyagtartalmának vizsgálata. *Élelmiszer Tudomány Technológia.* 71 (3): 13-17. ISSN:2061-3954 (2017a)
- Jevcsák, Sz.; Murányi, E.; Stündl, L.; Jóvér, J.; Sipos, P.: Effect of different levels of nitrogen on the total polyphenol and total flavonoid content of sorghum and millet flours. *Acta Universitatis Sapientiae, Alimentaria.* 10: 107-115. EISSN: 2066-7744 (2017b)
- Jevcsák, Sz.; Sipos, P.: Az agrotechnikai kezelések hatása a közönséges köles beltartalmi paramétereire. *Agrártudományi Közlemények.* 72: 65-69. ISSN:1587-1282 (2017a)
- Jevcsák, Sz.; Sipos, P.: Sorghum and millet as alternative grains and their utilization in gluten free roduct developement. In: 21. *World Congress of Clinical Nutrition.* Budapest, 114 (2017b)
- Jevcsák, Sz.: *Nitrogén-ellátás hatása a termesztett köles és a szemescirok minőségi paramétereire és élelmiszeripari hasznosíthatóságára.* Ph.D. Disszertáció. Debreceni Egyetem, Debrecen, 2019. szeptember.
- Kalmár, G.; Jevcsák, Sz.; Máthé, E.: Növényi kivonatokkal dúsított csokoládé fejlesztés. *V. Nemzetközi Interdiszciplináris Konferencia.* (2020)

- Kovács, B.; Győri, Z.; Prokisch, J.; Loch, J.; Daniel, P.: A study of plant sample preparation and inductively coupled plasma emission spectrometry parameters. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 27 (5-8): 1177-1198 (1996)
- Kim, D. O.; Jeong, S. W.; Lee C. Y.: Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums. *Food Chemistry*. 81: 321-326 (2003)
- Magyar Élelmiszerkönyv* 3-2-2008/1 sz. irányelv, 1. sz. melléklet. Élelmiszerek összes élelmi rosttartalmának a meghatározása enzimes-gravimetriás módszerrel II.
- Meda, A.; Lamien, C. E.; Romito, M.; Millogo, J.; Nacoulma, O. G.: Determination of the total phenolic, flavonoid and proline contents in Burkina Fasan honey, as well as their radical scavenging activity. *Food Chemistry*. 91: 571-577 (2005)
- Megazyme Amylose/Amylopectin (2015): The measurement of the amylose and amylopectin contents of starch.
- Megazyme Resistant Starch (2015): AOAC Method 2002.02. AACC Method 32-40.01. Codex Type II Method.
- Megazyme Starch Damage (2015): AACC Method 76-31.01. ICC Method No. 164.
- Mendlerné Drienyovszki, N.; Lajtos, Á.; Véghné Tóth, B.: A Debreceni Egyetem Agrár Kutatóintézetek és Tangazdaság alternatív növényei. Karcagi Kutatóintézet. Nyíregyházi Kutatóintézet. Debrecen, 1-38 (2017)
- MSZ 6367-3 (1983): Élelmezési, takarmányozási, ipari magvak és hántolt termények vizsgálata. Nedvességtartalom meghatározása.
- MSZ 6830-18:1988 (1988): Takarmányok tápláléértékének megállapítása. Keményítőtartalom meghatározása.
- MSZ EN 1135:1995 (1995): Gyümölcs- és zöldséglevelek. Hamumeghatározás.
- MSZEN 12147 (1998): Gyümölcs- és zöldséglevelek. A titrálható savasság meghatározása.
- Radics, L.– Pusztai, P.: Alternatív növények korszerű termesztése. Köles (*Panicum miliaceum* L.) Szaktudás Kiadó Ház, Budapest. 176-185 (2011)
- Megazyme Resistant Starch (2015): AOAC Method 2002.02. AACC Method 32-40.01. Codex Type II Method.
- Megazyme Starch Damage (2015): AACC Method 76-31.01. ICC Method No. 164.
- Mendlerné Drienyovszki Nóra – Lajtos Ágnes – Véghné Tóth Bianka (2017): A Debreceni Egyetem Agrár Kutatóintézetek és Tangazdaság alternatív növényei. Karcagi Kutatóintézet. Nyíregyházi Kutatóintézet. Debrecen, 1-38.

MSZ 6367-3 (1983): Élelmezési, takarmányozási, ipari magvak és hántolt termények vizsgálata. Nedvességtartalom meghatározása.

MSZ 6830-18:1988 (1988): Takarmányok táplálóértékének megállapítása. Keményítőtartalom meghatározása.

MSZ EN 1135:1995 (1995): Gyümölcs- és zöldséglevelek. Hamumeghatározás.

MSZ EN 12147 (1998): Gyümölcs- és zöldséglevelek. A titrálható savasság meghatározása.

Radics László - Pusztai Péter (2011): Alternatív növények korszerű termesztése. Köles (*Panicum miliaceum* L.) Szaktudás Kiadó Ház, Budapest. 176-185.

Dr. Kolozsvári István

*Kutatás helyszíne: II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola,
Biológia és Kémia Tanszék, Fodor István Kutatóközpont*

Odonatológiai vizsgálatok a Tisza ukrajnai felső szakaszán

Bevezetés

A Tisza kárpátaljai ágrendszerében élő vízi makrogerinctelenekkel kapcsolatos kutatásaimat 2005-ben kezdtem biológia–földrajz szakos hallgatóként II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola Biológia Tanszékén Beregszászon. Főiskolai tanulmányaimat követően 2010-ben felvételt nyertem a Debreceni Egyetem Természettudományi és Technológiai Karán működő Juhász-Nagy Pál Doktori Iskola képzésére. A Tisza kárpátaljai szakaszán előforduló szitakötőfajok faunisztikai és élőhelyi vizsgálataival kapcsolatos tényleges kutatásaimat a Debreceni Egyetem Hidrobiológiai Tanszéken, illetve ezzel párhuzamosan 2011-től a II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola Fodor István Kutatóközpontjának kötelékében folytattam. Szakmai előmenetelem szempontjából ez a két intézmény volt a legmeghatározóbb.

A Tisza magyarországi felső szakaszának hidrobiológiai és hidroökológiai célú kutatásai terén a Debreceni Egyetem Hidrobiológiai Tanszékén felhalmozott tapasztalati és szak módszertani háttér nagy segítségemre volt a sikeres adatgyűjtés, illetve a terepi és laboratóriumi vizsgálatok megvalósításában, eredményeim feldolgozásában és értékelésében. A II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskola Fodor István Kutatóközpontjának, valamint Biológia és Kémia Tanszékének nyitott és ösztönző hozzáállása szintén segítette szakmai fejlődésemet.

Kutatómunkám elsősorban terepi jellegű volt. A szitakötőlárva és exuviumok gyűjtése több éven át tartó nehéz és fáradtságos munka, viszont

eszközök és műszerek terén nem igényelt költségesebb laboratóriumi háttérrel.

Munkámat több tanulmányi és kutatói ösztöndíj is segítette. Főiskolai hallgatóként 2009-ben megkaptam a Zrínyi Ilona Kárpátaljai Magyar Szakkollégium ösztöndíját, majd PhD hallgatóként 2010 és 2013 között az Emberi Erőforrások Minisztériuma által biztosított Miniszteri Ösztöndíjban részesültem. 2012 és 2013 között részt vehettem a Nemzeti Kiválóság Programban, 2016-ban a Nemzeti Tehetség Programban és 2017-ben elnyertem a Visegrádi Alap ösztöndíját.

Kutatásaim során elsősorban arra kerestem a választ, hogy a Tisza kárpátaljai szakaszára még jellemző fonatosan szétágazó (anasztomizáló) mederstruktúrájú főági, mellékági, holtági és holtmedri vízterekben mely szitakötőfajok lelhetők fel, az egyes fajok milyen arányban és mennyiségben vannak jelen, illetve az előforduló fajok példányai hogyan kötődnek a területre jellemző igen sokszínű és gyorsan változó élőhelytípusokhoz. A szűkebb értelemben vett faunisztikai gyűjtésekkel párhuzamosan rendszeres mederanyag-gyűjtéseket és műszeres partvonal-méréseket végeztem az egyes mederszakaszok átrendeződését és a partoldalak kanyarulatváltozásait illetően [1].

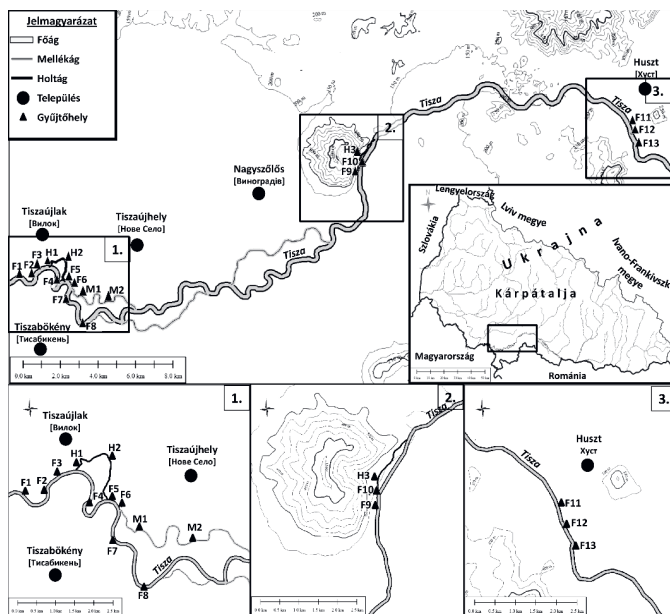
A folyami szitakötők kiváló élőhelyi indikátorok. Jól jelzik az élőhelyüket érő külső hatások következményeit, kiválóan alkalmazhatók környezetminőségi kutatások alanyaiként [2], [3]. A szitakötő-fauna minőségi és mennyiségi viszonyainak vizsgálata a folyóvizek élőhelyi jellemzésére, valamint biodiverzitására ható folyamatok feltárására is lehetőséget nyújthat. E tulajdonságaik miatt a szitakötőket a Nemzeti Biodiverzitás-monitorozó Rendszer kiemelt élőlénycsoportjai között tartják nyilván [4]. A kémiai és fizikai jellegű vízvizsgálatok pillanatnyi állapotot mutató eredményein túlmutatva a szitakötőpopulációkban tapasztalható mennyiségi és fajösszetételbeli változások alapján hosszabb időszak vonatkozásában vonhatunk le következtetéseket. Míg például egy az ott élő szervezeteket elpusztító vegyi jellegű szennyezés esetében a szennyezőanyag akár néhány órán belül is műszeresen mérhetetlenné válva felhígulhat, különösen folyók esetében, addig a mindezekre érzékeny bioindikátor fajok populációviszonyainak monitorozása akár több évre visszamenőlegesen is nyújthat információkat

egy adott élőhely ökotoxikológiai helyzetéről. A sárgás szitakötők (*Gomphus flavipes*) lárváiból kimutatható színesfémek és nehézfémek koncentrációit is vizsgáltuk a Debreceni Egyetem kutatóival együttműködve a Tiszán, a Szamoson és a Túron [5]. Az alábbiakban a Tisza ukrainai felső szakaszának szitakötő-faunája terén végzett faunisztikai kutatásaim eredményeit és tapasztalatait szeretném röviden ismertetni.

Anyag és módszer

Terepi gyűjtéseimet a Tisza Tiszaújlak [Вилок] és Huszt [Хуст] közötti főági (F), mellékági (M) és holtági (H) részein végeztem. Faunisztikai gyűjtőmunkám során 30 méter hosszú folyószakaszokat jelöltem ki Tiszaújlak [Вилок], Tiszaújhely [Нове Село], Tiszabökény [Тисабикень], Nagyszőlős [Виноградів] és Huszt [Хуст] települések közelében (1. ábra).

A lárvák gyűjtése az imágó-megfigyelésekhez képest nehezebben és körülményesebben megvalósítható, viszont a lárvák alkalmasabbak a rájuk ható élőhelyi viszonytárságok vizsgálatára, mint a nagy távolságok megtételére is képes imágók [4]. A szitakötők lárváit a mederaljzat felszínén, a mederanyagba ágyazódva, a mederben található tereptárgyak felületén vagy a vízi növényekre kapaszkodva lelhetjük fel. Viszonylag hosszú, általában több évi lárvális fejlődést követően hagyják csak el a vízi környezetet és váltanak szárazföldi életmódra [6], [7]. E tulajdonságuk miatt kiválóan alkalmasak az élőhelyi hatótényezők vizsgálatára [3]. Célirányos és rendszeres mennyiségi gyűjtésük ugyanakkor technikailag nehezen megvalósítható. A lárvák mennyiségi gyűjtése a lezárásos kigyűjtéses módszerrel zajlik [8], [9]. Terepi gyűjtőmunkám során 30 méter hosszúságú mederszakaszokon folytattam kézi kaparóhálós lárvagyűjtést. Mennyiségi gyűjtéseim az egyes gyűjtőhelyek területegységére vonatkoztatva történtek. A partvonalától a sodorvonal irányában, amennyiben az aktuális meder és vízállásviszonyok ezt lehetővé tették 5 méter széles sávban történt a lárvák elfogása. A háló alsó egyenes szegélye 40 cm, hálójának lyukbőssége 1 mm, nyelének hossza 180 cm volt. Amennyiben a gyűjtött lárvákat a terepi azonosítást követően nem engedtem szabadon, Попова (1953), valamint Матушкіна és Хрокало (2002) ajánlásai szerint további vizsgálatok céljából 70%-os töménységű etil-alkohol oldatban tartósítottam.



1. ábra: A mennyiségi szitakötő lárv- és exuviumgyűjtések helyszínei a Tisza Tiszaújlak és Huszt közötti szakaszán

A szitakötők lárvális fejlődésük végén elhagyják addigi vízi élőhelyüket és a partra másznak. A partoldal talaján, a parti növényzetre, gyökerekre, fák törzsére, vagy az ott található egyéb tereptárgyakra felkapaszkodva alakulnak át szárazföldi repülő rovarrá [12], [7]. A folyamat végén szerencsés esetben az állat elrepül, viszont a vedlésből származó lárvabőr, amelyet exuviumnak nevezünk, hátra marad [10]. A kibújás alatt a szitakötők teljesen védetlenné válnak mind a ragadozókkal, mind a természeti viszontagságokkal szemben. Ez a módszer természetvédelmi szempontból igen kíméletes, ráadásul az így gyűjtött adatok kiválóan alkalmasak faunisztikai, populációdinamikai, etológiai és számos egyéb odonológiai vizsgálatokhoz. Mennyiségi gyűjtéseim az egyes gyűjtőhelyek területességére vonatkoztatva történtek. A fellelt szitakötőfajok exuviumainak gyűjtése az illető partoldal 3 méter széles sávján, illetve a partszegély vízből kiálló tereptárgyairól történt.

Gyűjtőhelyeink térképi ábrázolásánál az Environmental Systems Research Institute (ESRI) ArcGIS 10.0 - ArcMap geoinformatikai szoftverét használtam fel.

Eredmények és értékelésük

A Tisza felső szakaszán végzett lárvagyűjtéseim során a meder bizonyos részein nagyobb, máshol kisebb lárvaszámot, esetenként a lárvák teljes hiányát tapasztaltam. A lárva vizsgálatokhoz hasonlóan az exuviumgyűjtések is azt mutatták, hogy a partoldal különböző részeit a szitakötők eltérő mértékben preferálják kibújási helyük megválasztásakor. A folyami szitakötők lárváinak és exuviumainak előfordulási jellegzetességeit feltáró munkám tapasztalatai alapján arra a következtetésre jutottam, hogy összehasonlító értékelésre és valódi monitorozásra alkalmas adatokat csak úgy nyerhetünk, ha az adatfelvétel szempontrendszere a vizsgálat teljes időtartama alatt változatlan marad. Egy olyan adatlap formátumú élőhelyfelmérési módszert dolgoztam ki, ami lehetőséget nyújt a vízfolyások (vízterek) egy-egy adott szakaszán (víztestjében) az élőhelyi viszonyok adott időpontban történő rögzítésére [13]. Az adatlap a faunisztikai adatok 8 alapismérve mellett 30 élőhelyi háttérváltozó megjelenésének és súlyának rögzítését teszi lehetővé, egyaránt figyelmet szentelve a víztömeg, a meder és a partoldal sajátosságainak, ill. a gyűjtőhely abiotikus és biotikus tényezőinek. A módszer megoldást kínál a vízfolyásoknál végzett odonatológiai, vagy más vízi makrogerincteleneket érintő vizsgálatok helyszíni körülményeinek és terepi háttérváltozóinak egységes rögzítésére, távolról pedig a térbeli és időbeli változások összehasonlításra is alkalmas.

A 2011–2012 közötti időszakban gyűjtött 1965 exuvium feldolgozása során 6 szitakötőfaj előfordulását azonosítottam [*Gomphus vulgatissimus*, *Gomphus flavipes*, *Onychogomphus forcipatus*, *Ophiogomphus cecilia*, *Calopteryx splendens*, *Platycnemis pennipes*]. Az egyes élőhelyek fajösszetételében és a fajok élőhelyenkénti mennyiségi viszonyaiban olykor jelentős különbségeket találtam. Az egyes szitakötőfajok a különböző parttípusokat kibújási helyük megválasztásakor eltérő mértékben preferálták. A palajos alacsonypartokat és a mesterségesen átalakított védett partoldalakat a *G. vulgatissimus* faj egyedei választották a legnagyobb arányban (62,24%). Az *O. forcipatus* faj exuviumai a rombolódó magaspartokon fordultak elő gyakrabban (56,80%). Kutatásaim során összefüggéseket mutattam ki egyes élőhelyi háttérváltozók és a folyami szitakötőfajok (*Gomphidae*) előfordulási

sajátosságai között, s külön kiemelendő, hogy a lárvák és az exuviumok alapján is a part növényborítottságának és a lombkorona záródásának mértéke bizonyult jelentős mértékűnek, ami egyértelműen utal az imágók előfordulást meghatározó szerepére. Vizsgálataim eredményei szerint a *G. vulgatissimus* faj egyedei a part növényborítottságának és a lombkorona záródásának mértékével, valamint a part jellegével, az *O. forcipatus* faj egyedei a sodorvonal mélységével, a meder mélyülési tendenciájával, a part növényborítottságának típusával és a víz hőmérsékletével, a *G. flavipes* és az *O. cecilia* fajok exuviumai a mederfenék mozaikosságával, a partmenti sáv vízáramlási jellegével, a lombkorona záródásának mértékével és a parti növényborítottság mértékével mutattak összefüggést. Új eredményeim révén közelebb kerülhetünk a struktúrindikátorként is számon tartott folyami szitakötők (Gomphidae) élőhelyválasztási mechanizmusának jobb megismeréséhez, az egyes élőhelyek szitakötők általi benépesülésének alaposabb megértéséhez.

Terepi kutatómunkám másik részegységeként azt vizsgáltam, hogy milyen minőségi, illetve mennyiségi különbségek és hasonlóságok figyelhetők meg a Tiszaújlak és Huszt közötti Tisza-szakasz főág-mellékág-holtág rendszerének szitakötő-faunájában. A Tisza tisaújlaki, tisaújhelyi, tiszabökényi, nagyszőlősi és huszti szakaszain 8 főági, 2 mellékági és 3 holtági mederszakaszon gyűjtött 255 lárvá és 1587 exuvium feldolgozása alapján 8 szitakötőfaj előfordulását azonosítottam (*Gomphus vulgatissimus*, *Gomphus flavipes*, *Onychogomphus forcipatus*, *Ophiogomphus cecilia*, *Somatochlora metallica*, *Calopteryx splendens*, *Platycnemis pennipes*, *Sympecma fusca*). Vizsgálati területem Tiszaújlak és Tiszabökény közötti szakaszának élőhelyi sokszínűségét jól jelzi, hogy itt még mind a négy Magyarországon is előforduló folyami szitakötőfaj képviselőit felleltem, Huszt térségében viszont már csak a *G. vulgatissimus* és az *O. forcipatus* fajok egyedei voltak jelen. A főági szakaszokon a lárvák esetében a *G. vulgatissimus* (48,0%), a *C. splendens* (29,6%) és az *O. forcipatus* (20,8%), míg a holtágaknál a *C. splendens* (49,5%) és a *P. pennipes* (23,7%) egyedei domináltak. A mellékágban az *O. forcipatus*, a *G. vulgatissimus* és a *C. splendens* egyedei voltak a leggyakoribbak. A Tisza tisaújlaki, tisaújhelyi, tiszabökényi, nagyszőlősi és huszti szakaszán a főág, a mellékágak és a holtágak szitakötő-faunájának mennyiségében és összetételében jelentős különbségeket

mutattam ki. A szitakötő-fajegyüttesek alapján végzett statisztikai adatfeldolgozás eredményei a főági, mellékági és holtági élőhelytípusok között egyértelmű jellegzetességeket mutattak. A tiszaujlaki és a nagyszőlősi holtág vízteréből származó szitakötőadatok fajösszetételükben eltérést mutatnak mind a főági, mind a mellékági részek hasonló adataitól. A holtágak esetében a főág és mellékágak nagyszitakötő (Anisoptera) dominanciájától eltérően lárvadataim a kisszitakötők (Zygopterák) egyes képviselőinek markáns jelenlétét mutatták. A főági és mellékági szakaszokon elsősorban a vízfolyásokra jellemző fajok fordultak elő, míg a holtágakban jelentős volt azoknak a fajoknak az aránya is, amelyek a lassan áramló vízfolyásokban, illetve az állóvizekben is előfordulnak. A *G. vulgatissimus*, az *O. forcipatus* és *C. splendens* fajok egyedei mindhárom medertípusnál jelen voltak. A *G. flavipes* csak a fő- és mellékági, míg a *S. metallica* és a *S. fusca* egyedei csak a holtági gyűjtőhelyekről kerültek elő [14], [15], [16].

Összefoglalás

Kutatási eredményeim a Tisza e szakaszára vonatkozóan hiánypótló jellegűek. Amennyiben Ukrajnában is folytatódnak a már korábbiakban megkezdett szabályozási munkálatok, a Tisza e szakaszának természetközeli jellege úgy tűnhet el, hogy az itt élő szitakötőfajok helyzetéről korábbi kutatások hiányában alig vannak ismereteink. A folyómedreknek ez a sokszínűsége kiemelt fontosságú a szitakötő-fauna nagy mértékű diverzitásának fenntartásában és az értékes fajok állományainak megőrzésében. A Tisza felső szakaszának élőhelyi viszonyai igen sérülékenyek, bizonyos szakaszokon igen gyors és intenzív változások tapasztalhatók, ezért igen időszerű e vizek természeti értékeinek mielőbbi feltárása. Ha a jövőben a szabályozási munkálatok kiterjednek a folyó e szakaszára is, akkor a Tisza mentén az ilyen jellegű élőhelyek tanulmányozására már sehol sem lesz lehetőség.

Irodalomjegyzék

- [1] I. Kolozsvári, J. Molnár, Gy. Dévai: Recent river channel change detections in the section of the River Tisza above Tiszaújlak (Виллок). – *Landscape & Environment* 10(3–4): 123–130 (2016).

- [2] Dévai Gy.: A környezetminősítés szünbiológiai alapelvei két amfibikus rovarcsoport példáján (Odonata, Diptera: Chironomidae). Az, 'MTA Doktora' cím elnyeréséért benyújtott értekezés tézisei. – KLTE Ökológiai Tanszéke, Debrecen, 49 pp (1997).
- [3] Chovanec, J. Waringer, J.: Ecological integrity of river–floodplain systems—assessment by dragonfly surveys (Insecta: Odonata). – *Regul. Rivers: Res. Mgmt.* 17: 493–507 (2001).
- [4] Dévai Gy.: A szitakötők közösségszintű monitorozása. In: FORRÓ L. (szerk.): Rákok, szitakötők és egyenesszárnúak. Nemzeti Biodiverzitás-monitorozó Rendszer V. – Magyar Természettudományi Múzeum, Budapest, p. 50–53 (1997).
- [5] E. Simon, O. Kis, T. Jakab, I. Kolozsvári, K. Málnás, S. Harangi, E. Baranyai, M. Miskolczi, B. Tóthmérész, Gy. Dévai: Assessment of contamination based on trace element concentrations in *Gomphus flavipes* (Odonata: Insect) larvae of the Upper Tisza Region. – *Ecotoxicology and Environmental Safety* 136: 55–61 (2017).
- [6] P.S. Corbet: Biology of Odonata. – *Ann. Rev. Entomol.* 25: 189–217 (1980).
- [7] Suhling, F. – Müller, O.: Die Flußjungfern Europas - Gomphidae. In: Die Neue Brehm-Bücherei 628. – Westarp Wissenschaften, Magdeburg & Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 237 pp (1996).
- [8] T.T. Macan: The Odonata of a Moorland Fishpond. – *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 49/2: 325–360 (1964).
- [9] J.H. Lawton: A population study on larvae of the damselfly *Pyrrosoma nymphula* (Sulzer) (Odonata: Zygoptera). – *Hydrobiologia* 36/1: 33–52 (1970).
- [10] A.H. Попова: Личинки стрекоз фауны СССР (Odonata). 0– Академии Наук СССР, Москва–Ленинград, 235 pp (1953).
- [11] Н.О. МАТУШКИНА, Л.А. ХРОКАЛО: Визначник бабок (Odonata) України личинки та екзувії. Учебний посібник для студентів біологічних спеціальностей. – Фітосоціоцентр, Київ, 72 pp (2002).
- [12] P.S. CORBET: A biology of dragonflies. Facsimile reprint. – E.W. Classey Ltd., Faringdon, XVI + 274 pp., VI plates (1983).
- [13] Kolozsvári I., Jakab T., Dévai Gy.: Javaslat a vízfolyásokon végzett odonatológiai felmérések élőhelyi háttérváltozóinak adatlapon történő egységes rögzítésére. – *Studia odonatologica hungarica* 17: 85–123 (2015).
- [14] I. Kolozsvári, L.J. Szabó, Gy. Dévai: Dragonfly assemblages in the upper parts of the River Tisza: a comparison of larval and exuvial data in three channel types. –

Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae 61/2: 189–204 (2015).

- [15] I. Kolozsvári, Gy. Dévai, L.J. Szabó: Occurrence pattern analysis of dragonflies (Odonata) on the river Tisza between Vilok and Huszt based on exuviae. – *Applied Ecology and Environmental Research* 13/4: 1183–1196 (2015).
- [16] Kolozsvári I., Dévai Gy.: Új adatok Kárpátalja szitakötő faunájához. New data on the dragonfly (Odonata) fauna of Transcarpathia (Zakarpatska region, Ukraine). – *Studia odonatol. hung.* 21: 43–62 (2021).

Szanyi István

*Kutatás helyszíne: Ungvári Nemzeti Egyetem; Eötvös Loránd Tudományegyetem;
Wigner Fizikai Kutatóközpont; MATE Műszaki Intézet*

Protondiffrakció

Magamról

A tudományos-kutatói pályám 2016-ban kezdődött, amikor még az Ungvári Nemzeti Egyetem akkori Magyar Tannyelvű Humán- és Természettudományi Karának másodéves fizika szakos hallgatója voltam. Prof.dr.Jenkovszky László, kárpátaljai születésű, de Kijevben tevékenykedő fizikus, az elméleti nagyenergiás részecskefizika nemzetközileg elismert kutatója látogatott el hozzánk Ungvárra és ismertette számunkra a tudományos életbe való bekapcsolódás lehetőségeit. Vonzott a tudományos pálya, így a Professzor Úr irányítása alatt elkezdtem a kutatói tevékenységet. Néhány hónap múlva már diákkonferencián és nemzetközi szakmai konferencián mutattam be az eredményeimet az egymással rugalmasan ütköző protonok elméleti tanulmányozásáról. Ezt követően az első tudományos publikációm is megszületett. Jelenleg is a nagyenergiás részecskefizika területen folytatom a kutatásaimat, de már az Eötvös Loránd Tudományegyetem doktoranduszaként, valamint a Wigner Fizikai Kutatóközpont és a MATE Műszaki Intézetének tudományos segédmunkatársaként. Ebben az írásban egy általános részecskefizikai bevezetőt követően röviden összefoglalom, hogy tudományos tevékenységem során mivel foglalkozom, milyen eredményeket sikerült eddig elérnem, amelyeknek köszönhetően már közel 40 konferencia előadást tartottam és több mint 20 általam szerzett és társszerzőségemmel készült tudományos munka jelent meg.

Modern fizikai világkép

Jelenlegi tudásunk szerint a világegyetem közel 70%-a sötét energia, 25%-a sötét anyag és csak 5%-a olyan szokványos anyag, amely minket és a körülöttünk lévő dolgokat felépíti. A sötét energiáról szinte semmit nem tudunk, csak azt, hogy jelen van és a világegyetem gyorsuló tágulását okozza, melynek következtében a világegyetem bármely gravitációsan kötetlen két pontja között a távolság gyorsuló ütemben növekszik. Ugyanilyen keveset tudunk a sötét anyagról is. Mindössze azt tudjuk róla, hogy jelen kell lennie például a galaxisokban, mivel az általunk érzékelhető szokványos anyag önmagában nem lenne képes olyan erős gravitációs hatást kifejteni, amely az egyes galaxisokat összetartja, vagy amely a galaxison belül elhelyezkedő objektumok általunk megfigyelt mozgását eredményezné. A világegyetem egészének 5%-át adó szokványos anyag az, amelynek elemi részeiről és annak kölcsönhatásáról nagyon sokat tudunk már, elsősorban a részecskefizika standard elméletének keretében.

A részecskefizika standard elmélete a természetben eddig megfigyelt négy alapvető kölcsönhatás közül hármat ír le: az elektromágneses, a gyenge és az erős kölcsönhatást. A negyedik kölcsönhatás, a gravitáció, egyelőre kilóg a standard elméletből. A gravitációt leíró eddigi legpontosabb elmélet Albert Einstein általános relativitáselmélete, amely a gravitációs hatásokat a téridő görbültségével magyarázza. Azt az elméletet, amely mind a négy kölcsönhatást egységesen leírja, a mindenség elméletének nevezik. A mindenség elméletének egyik példája a húrelmélet, amely a részecskéket nem pontszerű, hanem kiterjedt objektumokként, rezgő húrokként kezeli. Azonban mindeddig sem a húrelmélet, sem más mind a négy kölcsönhatást egyesítő elmélet nem nyert kísérleti bizonyítást.

A részecskefizika standard elméletében a részecskék két fő típusát különböztetjük meg: anyagi részecskék és kölcsönhatás közvetítő részecskék. Ezeken felül van még a Higgs-bozon, ami tömeget ad azoknak a részecskéknek, amelyek vele kölcsönhatnak. A standard modellben szereplő elemi részecskéket és alapvető tulajdonságait az 1. ábra foglalja össze.

Az anyagi részecskéknek két csoportja van: kvarkok és leptonok.

A kvarkoknak hat ún. ízüik van: u, d, s, c, t és b, amelyek tömegei ilyen sorrendben növekednek. Az u, c és t kvarkok elektromos töltése az elektron töltése pozitív előjellel vett értékének kétharmada. Az d, s és b kvarkok elektromos töltése az elektron töltésének egyharmada. A leptonoknak is hat ízüik van: elektron, müon és tau, valamint neutrínó párjaik. A müon és a tau elektromos töltése megegyezik az elektron elektromos töltésével, a neutrínók elektromosan semleges részecskék. Az elektron, a müon és a tau tömeggel rendelkező részecskék. Bár a standard részecskefizikai modellben a neutrínók tömegtelenek, a kísérileg észlelt neutrínóoszilláció, amely során a neutrínó háromfajta íze átalakul egymásba, arra utal, hogy a neutrínóknak is van tömegük.

Az anyagi részecskéknek vannak antirészecske párjaik is, amelyek a részecskéktől az ellenkező előjelű töltésjellegű kvantumszámaikban különböznek. Például az elektron negatív elektromos töltésű, míg antirészecskéje, a pozitron, pozitív töltésű, de töltésének abszolút értéke az elektron töltésének abszolút értékével megegyező. A leptonszám is egy töltés jellegű kvantumszám, amely az elektron esetén -1, a pozitron esetén +1.

A részecskefizika standard elméletében az elektromágneses kölcsönhatást az elektromos töltéssel rendelkező részecskék között a tömeggel nem rendelkező fotonok közvetítik. A taszítóerő két elektron között vagy a vonzóerő egy elektron és pozitron között fotoncsere következményeként értelmezhető. Az elektromágneses kölcsönhatásnak köszönhetően jöhetnek létre az atomok, amikor a pozitív elektromos töltésű atommag a vonzóerő hatására befogja a negatív elektromos töltésű elektronokat, vagy a molekulák is, amikor az atomok pozitív és negatív elektromos töltésű részeinek kölcsönös vonzása következtében kémiai kötések alakulnak ki.

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III		
tömeg →	2,3 MeV/c ²	1,27 MeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
töltés →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
név →	u-kvark	c-kvark	t-kvark	foton	Higgs-bozon
	4,8 MeV/c ²	95 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Kvarkok	d-kvark	s-kvark	b-kvark	gluon	
	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e ⁻	ν _μ	ν _τ	Z ⁰	
	elektron-neutrínó	muon-neutrínó	tau-neutrínó	Z-bozon	
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	80,4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Leptonok	e	μ	τ	W [±]	
	elektron	muon	tau	W-bozon	

Bozonok (kölsönhatások)

1.ábra: A világegyetem közel 5%-át kitöltő szokványos anyag elemi építőkövei és azok alapvető tulajdonságai¹ a standard részecskefizikai modellben

Az erős kölcsönhatást a színtöltéssel rendelkező kvarkok között a gluonok közvetítik. Az elektromágneses kölcsönhatást közvetítő foton esetével ellentétben, a standard modellben nyolc különböző gluon létezik. A kvarkok színtöltése piros, kék vagy zöld lehet, az antikvarkoké pedig antipiros, antikék vagy antizöld. A gluonok úgy képzelhetők el, hogy színeket és antiszíneket is hordoznak. Az erős kölcsönhatás olyan, hogy leírásához nyolcféle színeket és antiszíneket tartalmazó kombináció keverhető ki. Mivel a gluonok színtöltést hordoznak, önmagukkal is kölcsönhatnak az erős kölcsönhatás révén.

A színtöltések azt az absztrakciót jelentik, hogy míg az elektromágneses kölcsönhatás esetén a kétféle elektromos töltés kioltja egymást, addig az erős kölcsönhatás esetén nem csak kettő, de háromféle töltés is kiolthatja egymást. Egy szín és egy antiszín színtöltés tekintetében semleges, azaz fehér

¹ Einstein híres $E=mc^2$ képlete szerint, ahol E az energia, m a tömeg és c a fénysebesség, a tömeg és az energia között ekvivalencia van, az energia tömeggé alakulhat és fordítva. A részecskefizikában az energiát elektronvolt egységekben mérik (eV) és Einstein képlete alapján a tömegre az eV/c² mértékegységet használhatjuk, ami $1.78 \cdot 10^{-36}$ kg-nak felel meg.

A spin a részecskék belső impulzusmomentuma, amely csak diszkrét (nem folytonos) értékeket vehet fel. Az adott állapothoz tartozó spin impulzusmomentum értékét az s spinkvantumszám határozza meg. A fermion részecskék spinkvantumszáma félegész szám (1/2, 3/2, 5/2, ...), a bozon részecskéké egész szám (0, 1, 2, ...). A fermionokat a Pauli-elv értelmében nem lehet egymásba préselni, melynek következményei között van a közönséges anyag merevsége és az atomok bonyolult elektronszerkezetének kialakulása is.

kombinációt alkot. Az RGB színmodell analógiáját követve ebben az absztrakcióban a piros, a kék és a zöld együttes kombinációja is színsemleges.

A minket körülvevő 0 °C körüli hőmérsékletekkel jellemezhető alacsony energiás környezetünkben (de ettől még jóval nagyobb hőmérsékleteken is) a kvarkbezáródás jelenségének következtében a kvarkok színsemleges, azaz fehér színű összetett részecskéket alkotnak. Így jön létre a proton, amely két u és egy d ún. vegyértékkvarkot tartalmaz. Azért mondjuk, hogy vegyértékkvark, mert ezen kvarkok kötött állapotaként értelmezve a protont, annak több tulajdonsága is, például elektromos töltése és színsemlegessége megmagyarázható. Nem így azonban a proton tömege. Ha összeadjuk a két u és egy d kvark tömegeit $9,4 \text{ MeV}/c^2$ értéket kapunk, a proton tömege azonban $938 \text{ MeV}/c^2$. Honnan jön akkor a proton tömegének 99%-a? A válasz az, hogy a kvarkok közötti kölcsönhatásból, amelyet a gluonok közvetítenek. A kölcsönhatás energiája gerjeszti a vákuumot, így a proton belsejében a gluonok folyamatosan változnak: rövid életű kvark–antikvark párokra esnek szét, amelyek majd összeolvadva újra gluonokat keltenek. Ennek következtében a megfelelően nagy energiára felgyorsított protont² hat különböző ízű kvark és azok antikvark párjaik, valamint gluonok alkotják folyamatosan változó számban úgy, hogy ez a fluktuáló összetétel imitálni tudja három kvark együttesét. A három vegyértékkvark kötött állapotaként jellemezhető részecskéket, mint például a protont és a neutront is, barionoknak hívjuk. Egy kvark és egy antikvark kötött állapotából felépülő részecskéket mezonoknak nevezzük. A barionokat és a mezonokat együttesen pedig hadronoknak nevezik.

Amennyiben kis helyen annyi energia összpontosul, hogy az közel 2 billió °C hőmérsékletnek felel meg³, akkor az aszimptotikus szabadság jelenségének köszönhetően a kvarkok a hadronokból kiszabadulnak, létrejön az ún. kvark-gluon plazma, az anyagnak az a halmazállapota, amely gluonokból és csaknem teljesen szabad kvarkokból áll. Mindez azért lehetséges, mert az erős kölcsönhatás erőssége függ az energiától: a nagyenergiájú folyamatokban az erős kölcsönhatás ereje gyengébb, mint a kis energiájú folyamatokban.

A bezárt kvarkok eredő erős kölcsönhatása tartja össze az atommagban a

2 Ha a proton nincs felgyorsítva, nem összpontosul annyi energia, hogy a protonnál is nagyobb tömegű c, t és b kvarkok is létrejöjjenek.

3 2 billió °C hőmérséklet nagyenergiájú részecskeütközésekben mesterségesen létrehozható és tanulmányozható, de jelenlegi tudásunk szerint, ilyen hőmérséklet jellemezheti a neutroncsillagok magját is, amely a Nap magjától 150 000-szer forróbb.

protonokat és a neutronokat is. Az erős kölcsönhatás közel százszor erősebb az elektromágneses kölcsönhatástól, ami meggátolja, hogy az atommag pozitív elektromos töltésű, tehát egymást az elektromágneses kölcsönhatás által taszító protonok az atommagból szétrepüljenek.

A részecskefizika standard modellje leírja a gyenge kölcsönhatást is, amelyet a W^+ , a W^- és a Z^0 részecskék közvetítenek az anyagi részecskék ún. gyenge hipertöltésén keresztül. A standard modell anyagi részecskéi és a Higgs-bozon rendelkeznek gyenge hipertöltéssel, így azok mind részt vesznek a gyenge kölcsönhatásban. A gyenge kölcsönhatás következtében például egy d-kvark u-kvarkká tud alakulni, miközben egy W^- részecske keletkezik, ami rögtön egy elektronra és egy antielektron-neutrínóra bomlik. A gyenge kölcsönhatás révén magyarázhatók meg a Napban lezajló magfúziós reakciók is, amelyben a neutronok protonokká alakulnak. A neutron vegyértékkvark szerkezete udd. A neutron egyik d vegyértékkvarkja a gyenge kölcsönhatás következtében u vegyértékkvarkká alakul, így uud vegyértékkvark szerkezetű proton keletkezik. Mindennek eredményeként másodpercenként 100 milliárd naptól érkező elektronneutrínó megy keresztül a Föld felületének 1 négyzetcentiméteres területén. Tekintve, hogy a gyenge kölcsönhatás az elektromágneses kölcsönhatástól mintegy tízezerszer gyengébb, a semleges elektromos töltésű neutrínók lényegében kölcsönhatás mentesen, észrevétlenül haladnak át rajtunk és a Föld egészén. Minden 100 milliárd neutrínóból közel csak egy hat kölcsön a gyenge kölcsönhatás révén a Földet alkotó részecskékel.

Érdemes még megemlíteni, hogy a gravitáció, amelynek ereje 10^{32} -szer kisebb a gyenge kölcsönhatás erősségénél, csak a nagyobb tömegek tartományában fejt ki jelentős hatást, az elemi részecskék kölcsönhatásának vizsgálatában lényegében elhanyagolható. Az erős kölcsönhatás hatótávolsága 10^{-15} m, míg a gyenge kölcsönhatásé 10^{-18} m. A gravitációs és az elektromágneses kölcsönhatás hatótávolsága azonban lényegében végtelen. Mivel a pozitív és a negatív elektromos töltés egymást kioltja, az univerzum nagyléptékű szerkezetét a gravitáció alakítja ki.

Protonok „diffrakciója”

Miután az olvasó az előző fejezetben megismerkedett a világegyetem

működését uraló alapvető kölcsönhatásokkal és azok alapvető szerepével az általunk megfigyelt jelenségek értelmezésben, most azt a területet részletezem, amelyben magam is kutatást végzek. Ez a terület az erős kölcsönhatás tárgykörébe tartozó nagyenergiás részecske diffrakció, melyen belül én a protonokat és az antiprotonokat magába foglaló jelenségeket kutatom. Amint alább ki fog derülni, ez azt jelenti, hogy a részecskegyorsítóknak nagy energiákra felgyorsított és egymással ütköztetett protonok és antiprotonok eredményeként létrejövő folyamatok egy részhez tanulmányozom. Napjainkban az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet (CERN) Nagy Hadronütköztető (angolul Large Hadron Collider, LHC) névre keresztelt részecskegyorsítójában mérnek proton-proton ütköztetéseket. Az általam végzett kutatómunka az LHC-ből és korábbi gyorsítókból származó adatok elméleti értelmezése, modellezése.

A hagyományos diffrakció az a jelenség, mikor a hullám terjedése közben hullámhosszával összemérhető méretű résen halad keresztül vagy hullámhosszával összemérhető méretű akadállyal találkozik és behatol az árnyékolt térbe. A diffrakció mindenféle hullám esetén felléphet, de a legközismertebb talán a fény, vagyis lényegében az elektromágneses hullámok diffrakciója. A fényhullám diffrakcióját leíró törvények formailag hasonlóak két nagyenergiás részecske ütközésének kvantummechanikai leírásához [1]. Egy nagyenergiás részecske-ütközés tehát analóg a fényhullám egy átlátszatlan akadályon történő diffrakciójával.

Két részecske ütközése, mikor a kölcsönhatási energia a részecskék közötti távolságtól függ, úgy modellezhető, mint egyetlen részecske mozgása egy erőterben. A legegyszerűbb kvantummechanikai leírásban a részecske mozgásegyenlete a Schrödinger egyenlet, melynek megoldása a részecske ψ hullámfüggvénye. A hullámfüggvény a részecskék ütközése után a bejövő síkhullám és az ütközés helyéről kiinduló kimenő gömbhullám szuperpozíciója lesz,

$$\psi(\mathbf{r}) = e^{ikz} + f(\vartheta, \varphi) \frac{e^{ikr}}{r},$$

ahol $\mathbf{r} \equiv (x, y, z)$ a pozícióvektor, $r = |\mathbf{r}|$ annak abszolút értéke, e^{ikz} a bejövő síkhullám a z tengely mentén, $i = \sqrt{-1}$ az imaginárius egység,

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ a hullámszám, ahol λ a hullámhossz, $\frac{e^{ikr}}{r}$ a kimenő gömbhullám, $f(\vartheta, \varphi)$ az ún. szórási amplitúdó, ϑ a szórási szög, azaz az részecske ütközés előtti és utáni mozgásirányai által bezárt szög, valamint φ a $\mathbf{z}$ tengelyre merőleges síkbeli szög. A diffrakciót szenvedett fényhullám is a fenti alakban írható fel. A fizikailag releváns mennyiség itt a szórási amplitúdó, amelynek abszolútérték négyzete a

$$d\sigma_{el} = |f(\vartheta, \varphi)|^2 d\Omega$$

a differenciális hatáskeresztmetszetnek nevezett, kísérletileg mérhető mennyiséget határozza meg. A differenciális hatáskeresztmetszet a részecske Ω és $\Omega + d\Omega$ által határolt térszögtartományba való szóródásának a valószínűsége⁴. A $d\sigma_{el}$ mennyiséget a teljes térre integrálva a σ_{el} integrális rugalmas keresztmetszetet kapjuk, amely annak a valószínűségével arányos, hogy az ütköző részecske rugalmasan szóródott függetlenül attól, hogy milyen térszögbe. Hasonlóan a σ_{in} rugalmatlan hatáskeresztmetszet annak a valószínűségével arányos, hogy az ütköző részecske rugalmatlanul szóródott. A σ_{tot} teljes szórási hatáskeresztmetszet, amely annak a valószínűségével arányos, hogy történik-e egyáltalán valamilyen kölcsönhatás az egymást megközelítő részecskék között, a rugalmas és rugalmatlan hatáskeresztmetszetek összege: $\sigma_{tot} = \sigma_{el} + \sigma_{in}$.

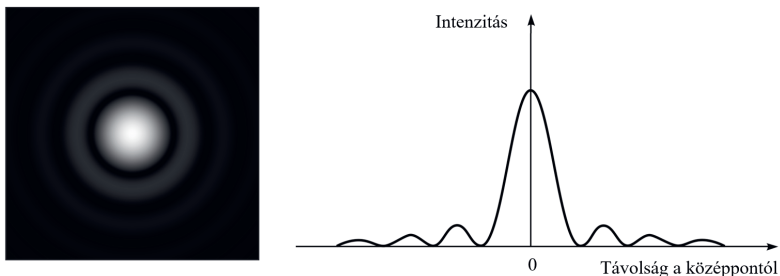
Az optikában a diffraktált fény intenzitását kis szögek és nagy hullámszámok esetén egy fő csúcs és egy gyors csökkenés jellemzi, amelyet másodlagos maximumok követnek, ahogy ezt a 2. ábra szemlélteti. A kis átadott impulzusokkal járó részecskeütközési folyamatok hatáskeresztmetszeteinek szögfüggése durvább közelítéssel exponenciálisan lecsengő, és az optikai diffrakció folyamatát jellemző mintázatok figyelhetők meg benne. Példaként a 3. ábrán a protonok ütközését jellemző differenciális hatáskeresztmetszetet láthatjuk a szórási szöggel arányos átadott impulzusnégyzet függvényében.

Az optikai és kvantummechanikai diffrakció közötti analógia azonban csak a rugalmas szórás esetén teljes, mikor az ütköző részecskék belső állapo-

⁴ Mikor két részecske egymással kölcsönhat, akkor szemléletesen a hatáskeresztmetszetük az a mozgásukra merőleges effektív terület lesz, amelyben találkozniuk kell ahhoz, hogy a kölcsönhatás egyáltalán létrejöhessen közöttük. Az effektív terület kapcsolatban van a részecske effektív méretével. A hatáskeresztmetszet tehát egy terület dimenziójú mennyiség. Az adott tudományterületen a megszokott egység a millibarn ($1 \text{ mb} = 10^{-31} \text{ m}^2$).

ta és szerkezete nem változik meg. Rugalmatlan szórásban már a kölcsönható részecskék belső állapota és szerkezete megváltozhat, amit a leírás folyamán figyelembe kell venni.

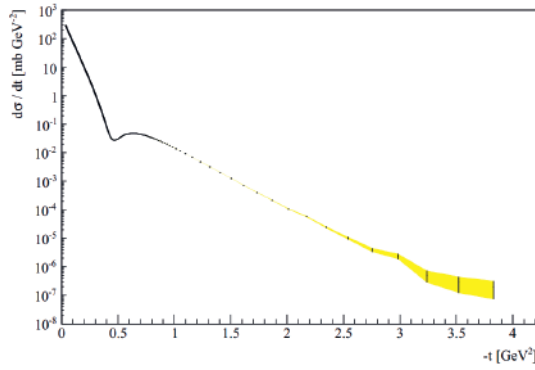
A részecskediffrakció tárgykörébe tartozó proton–proton ütközési folyamatokat a 4. ábra szemlélteti⁵. Az ilyen folyamatokat nagy üres, részecskeeltetés nélküli térbeli tartományok, nagy pszeudorapiditás⁶ rések, $\Delta\eta$ -k, jellemzik. Ezekben a folyamatokban a vákuum kvantumszámaival rendelkező részecske cseréje, a pomeron csere dominál. A pomeron úgy értelmezhető, mint páros számú gluonok kötött állapotának cseréje. A pomeron csere tehát legegyszerűbb esetben két összekapcsolódott gluon cseréjét jelenti. Bonyolultabb esetekben négy, hat vagy több összekapcsolódott gluon is kicserélődhet, mint pomeron. A protonok diffrakciójából tehát elsősorban az erős kölcsönhatás sajátosságait tudjuk vizsgálni.



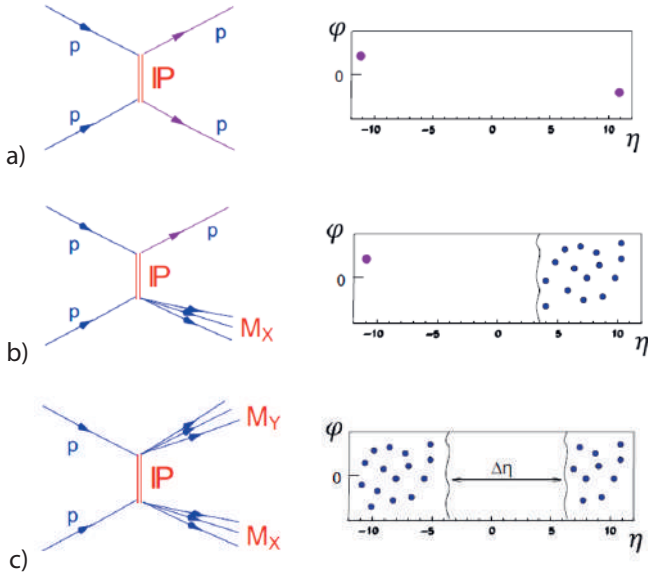
2. ábra: A fény diffrakciójából kialakuló mintázat egy átlátszatlan körlemez formájú akadály következtében az akadálytól nagy távolságokon és a mintázat intenzitáseloszlása a középpontjából mért távolság függvényében. A minta középpontjában az Airy-korongnak nevezett intenzitásmaximum jelenik meg, amelyet egyre csökkenő intenzitású koncentrikus gyűrűk követnek.

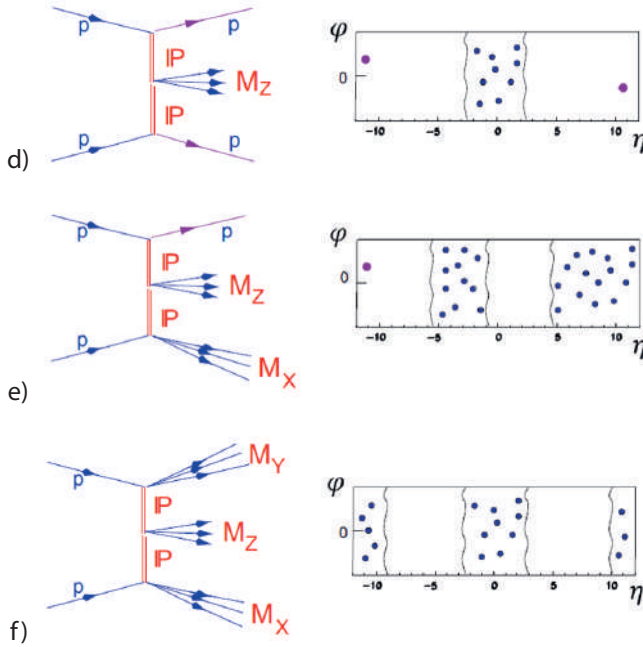
⁵ A proton–proton és proton–antiproton folyamatok első közelítésben nem különböznek egymástól, így a proton–proton folyamatok tárgyalása jelen esetben a proton–antiproton folyamatokat is magába foglalja.

⁶ A pszeudorapiditás a részecskefizikában gyakran használt térbeli koordináta, amely a szórási szöggel az $\eta = -\ln \tan \vartheta/2$ kapcsolatban van. Ahogy a szórási szög megközelíti a nulla fokot (a z tengelyt), a pszeudorapiditás a végtelenbe tart. Ha a szórási szög kilencven fok, a pszeudorapiditás zérus.



3. ábra: A protonok rugalmas ütközését jellemző differenciális hatáskeresztmetszet a szórási szöggel arányos $-t$ átadott impulzusnégyzet függvényében 13 TeV ütközési energián [2]





4. ábra: Proton–proton ütközési folyamatok: a) rugalmas ütközés, b) egyszeres diffrakció, c) dupla diffrakció, d) centrális diffrakció, e) centrális+egyszeres diffrakció és f) centrális+dupla diffrakció. Bal oldalon a folyamatok diagramjait láthatjuk, ahol a folyamatban domináns kicserélődő részecskét, a pomeront jelöli, továbbá az, és a folyamat során keletkezett részecskék tömegét jelölik. A jobb oldalon pedig a folyamatok térbeli ábrázolásait láthatjuk azt ütközést követően a (a z tengelyre merőleges síkbeli szög) és az (pseudorapiditás) koordinátákkal.

A protonok diffrakciójának legegyszerűbb esete az 4a. ábrán szemléltetett rugalmas szórás, amikor az ütközés következtében nem keletkeznek új részecskék, a protonok belső állapota és szerkezete nem változik meg, vagyis a pomeron csak energiát és impulzust közvetít az ütköző protonok között. Az egyszeres diffrakció esetén, amelyet a 4b. ábrán láthatunk, a pomeron által közvetített kölcsönhatás következtében az egyik proton már felbomlik és belőle új részecskék keletkeznek. A 4c. ábrán szemléltetett dupla diffrakció esetében pedig mindkét proton felbomlik. A centrális diffrakció során (4d. ábra) a pomeronok ütközése következtében keletkeznek új részecskék

a protonok közötti tartományban. Kevert folyamatok is bekövetkezhetnek. Ez olyankor történhet például, amikor a centrális diffrakciót egyszeres vagy dupla diffrakció is kíséri (4e. és 4f. ábra). Ezen kívül még olyan diffraktív folyamatok is elképzelhetők, mikor többszörös pomeron–pomeron kölcsönhatás következtében közepén nem csak egy, de több nagy rapiditással elválasztott részecskekeltési tartomány jön létre.

Az LHC energiatartományában, vagyis teraelektronvoltos ütközési energiákon a teljes proton–proton szórási hatáskeresztmetszet közel egynegyedét a rugalmas ütközések adják, háromnegyedét pedig a rugalmatlan ütközések. A diffraktív folyamatok járuléka a rugalmatlan hatáskeresztmetszethez közel 25 % [3].

Eredményeim a diffrakciós folyamatok tanulmányozásában

Az erős kölcsönhatás elméletét a standard részecskefizikai modellben kvantum-színdinamikának nevezik. A kvantum-színdinamika analitikus perturbatív módszerei nem használhatók az alacsony átadott impulzusokkal járó diffrakciós folyamatok tanulmányozására, ahol az erős kölcsönhatás erőssége nagy. Az 1960-as évektől kezdve az analitikus S-mátrix és a Regge-elmélet keretein belül állnak rendelkezésre azok az eszközök, amelyek a diffrakciós folyamatok tanulmányozását is lehetővé teszik [1]. A Regge-elmélet értelmében a kis átadott impulzusokkal jellemezhető diffrakciós folyamatok domináns járuléka a pomeron-csere.

A kutatói pályámat a rugalmas proton–proton ütközések differenciális hatáskeresztmetszetében $-t = 0.1 \text{ GeV}^2$ környékén tapasztalható nem tisztán exponenciális viselkedés, az ún. „törés” jelenség tanulmányozásával kezdtem a Regge-elmélet keretén belül [4, 5, 6, 7, 8]. A fő eredmények a következők voltak: 1) az utóbbi években az LHC gyorsítóval a teraelektronvoltos energiákon megmért adatokban tapasztalható „törés” jelenség π -mezon hurok keletkezésével értelmezhető úgy, mint az 1970-es években az ISR gyorsítóval néhány tíz GeV energián mért adatok esetében is; 2) a π -mezon hurok hatása nem exponenciális viselkedésű pomeron–proton kölcsönhatási járulékon, valamint a kicserélődő pomeront képviselő nem lineáris Regge trajektórián keresztül vehető figyelembe, és mindkettőnek közel egyforma szerepe van a jelenség

leírásában; 3) a proton–proton differenciális hatáskeresztmetszet energiával kisebb értékek felé mozgó minimum struktúrája befolyásolhatja a „törés” jelenség megfigyelését az LHC energiáitól magasabb energiákon.

A következő lépésben a rugalmas proton–proton és proton–antiproton ütközéseket nullaszórásiszögeknél jellemző mennyiségeket kezdtem vizsgálni először az odderon járulékának bevonása nélkül [9], majd az odderon csere járulékának bevonásával is [10, 11, 12] dipólus Regge modell keretén belül. Az odderon a pozitív töltésparitású pomeron negatív töltésparitású testvére és úgy értelmezhető, mint páratlan számú gluon kötött állapota. A negatív töltésparitása következtében az odderon csere finom különbséget alakít ki a részecske–részecske és a részecske–antirészecske ütközések között. A kutatásom során kiderült, hogy az odderon fontos szerepet játszik a differenciális hatáskeresztmetszet minimum–maximum tartományának leírásában és az eddig legnagyobb, 13 TeV ütközési energián megmért ún. p -arány adatpont leírásában. A protonok kölcsönhatási tartományát is vizsgáltam [13, 14, 15]. A számításokból az jött ki, hogy a nagyobb LHC energiákon a protonok rugalmas ütközésének valószínűsége nem akkor a legnagyobb, mikor a két ütköző proton középpontja egy vonalban van, hanem akkor, amikor az ütköző protonok középpontjai egymástól kicsit távolabb eső párhuzamos egyeneseken fekszenek. Ez úgy magyarázható, hogy az ütköző protonok középső részében egy üregesség alakul ki, ahol a proton anyaga ritkább. A számításokból az is kijön továbbá, hogy a protont kívülről pionfelhő burkolja.

A Regge-elmélet keretei között az glunlabda részecskék tulajdonságait is vizsgáltam [16, 17, 18]. A gluonok összekapcsolódásából felépülő részecskéket glunlabdáknak nevezik, így a pomeron és az odderon, megfelelően, a páros és páratlan számú glunokból felépülő részecskék gyűjtőnevei is egyben. Ilyen részecskéket eddig még direkt módon nem sikerül detektálni. Az elméleti eredményeink szerint a leghosszabb élettartamú pomeron részecske tömege $1.75 \text{ GeV}/c^2$, míg a leghosszabb élettartamú odderon részecske tömege $3.0 \text{ GeV}/c^2$.

2018 őszétől a rugalmas proton–proton és proton–antiproton szórást egy módosított Bialas–Bzdak (BB) modell keretén belül is elkezdtem vizsgálni. A BB modellben a proton egy felöltöztetett (nem elemi) kvark és egy dikvark kötött állapotaként jelenik meg. Ez a modell Roy J. Glauber Nobel-díjas fizikus

által az atommag–atommag ütközések leírására kifejlesztett többszörös szóráselméletre épül. A BB modell szerint így két proton ütközése a protonokat alkotó kvarkok és dikvarkok elemi ütközéseinek összegzeként értelmezhető. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a modell egy korlátozott kinematikai tartományban jól leírja a mérési adatokat és segítségével egy 7.08σ szignifikanciajú odderon hatás figyelhető meg [19]. A részecskefizikában az 5.0σ és annál nagyobb szignifikanciajú jelek felfedezést jelentenek. Ez az eredmény modellfüggő választ adott a közel 50 éve fennálló kérdésre az odderon létezését illetően.

2019 őszétől az odderon modellfüggetlen módszerekkel történő keresésével kapcsolatos munkálatokba is bekapcsolódtam. Ötfős, magyar–svéd együttműködésből kialakult kutatócsoportunk a proton–proton szórási adatra jellemző skálázásnak nevezett ön hasonlósági törvényét megtalálva és alkalmazva 6.26σ szignifikanciajú modellfüggetlen odderon jelet talált [20, 21, 22]. Az európai LHC gyorsító TOTEM és az amerikai TEVATRON gyorsító D0 kísérletének közös kutatásába becsatlakozva extrapolációs módszerekkel 5.2σ szignifikanciajú odderon jelet sikerült kimutatnunk [23]. Tekintve, hogy az odderont három független módszerrel is sikerült felfedezést jelentő szignifikanciával kimutatni, létezése most már aligha megkérdőjelezhető.

Jelenleg a rugalmas proton–proton és proton–antiproton szórás modelljeinek továbbfejlesztésén és az új részecskék keletkezésével járó diffraktív szórási folyamatok modellezésén dolgozok. A Goulianos–Ciesielski-modellt [24] alapul véve az egyszeres, kétszeres és centrális diffrakciós folyamatokat leíró többszörös differenciális hatáskeresztmetszetek modelljeit kutatótársaimmal úgy egészítjük ki, hogy az tartalmazza a barion, mezon és gluonlabda rezonanciák járulékait is. Ezen folyamatok alternatív modellezését is vizsgáljuk a diffraktív szórás proton szerkezeti függvényes formalizmusát [25, 26, 27, 28] alkalmazva.

Végezetül pedig bátorítani szeretnék minden pályaválasztás előtt álló reál beállítottságú fiatalt, vagy éppen egyetemi éveit töltő hallgatót, hogy válasza a természettudományos kutatói pályát, mivel megannyi megértésre váró folyamat van még a természetben, a világegyetemben. A modern tudomány megteremtőjének tartott Galileo Galilei óta a világegyetemről szerzett jelenlegi tudásunk több száz évnyi kutatómunka eredménye megannyi tudós ál-

dozatos munkájának köszönhetően. Minden egyes kutató hozzájárul ahhoz, hogy a sok ismeretlen egy kis részletét megismerjük, megértsük, vagyis ahhoz, hogy a tudomány fejlődni tudjon.

Hivatkozások

- [1] V. Barone and E. Predazzi, High-Energy Particle Diffraction, *Texts and Monographs in Physics*, Vol. v.565 (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002).
- [2] G. Antchev et al. (TOTEM Collab.), First measurement of elastic, inelastic and total cross-section at $\sqrt{s} = 13$ TeV by TOTEM and overview of cross-section data at LHC energies. *Eur. Phys. J. C* 79, 103 (2019).
- [3] TOTEM Collab., Diffraction at TOTEM, <https://cds.cern.ch/record/1311536/files/p249.pdf>.
- [4] L. Jenkovszky, I. Szanyi, Fine structure of the diffraction cone: manifestation of t-channel unitarity, *Phys. Part. Nucl. Lett.* 14 (5) (2017) 687–697.
- [5] L. Jenkovszky, I. Szanyi, Structures in the diffraction cone: The “break” and “dip” in high-energy proton–proton scattering, *Mod. Phys. Lett. A* 32 (22) (2017) 1750116.
- [6] L. Jenkovszky, I. Szanyi, C.-I. Tan, Shape of Proton and the Pion Cloud, *Eur. Phys. J. A* 54 (7) (2018) 116.
- [7] I. Szanyi, Structures in the high-energy proton-proton diffraction cone, in: *17th conference on Elastic and Diffractive Scattering* (2017).
- [8] Szanyi István, A nem exponenciális kis- $|t|$ proton-proton differenciális hatáskeresztmetszet és leírása, *Ingenia Hungarica IV., Tanulmányok a IV. Kárpát-medencei Szakkollégiumi Konferencia előadásaiból* (2018).
- [9] N. Bence, L. Jenkovszky, I. Szanyi, Approaching the asymptotics at the LHC (2017), arXiv:1711.06380.
- [10] N. Bence, L. Jenkovszky, I. Szanyi, Recent LHC/TOTEM data challenging the standard Regge pole theory, *EPJ Web Conf.* 191 (2018) 04009.
- [11] I. Szanyi, N. Bence, L. Jenkovszky, New physics from TOTEM’s recent measurements of elastic and total cross sections, *J. Phys. G* 46 (5) (2019) 055002.
- [12] Szanyi István, A proton-proton és proton-antiproton előreszórás leírása LHC energiákon. *Scientia Denique XIII. évfolyam*, 1. kiadás (2018).

- [13] W. Broniowski, L. Jenkovszky, E. Ruiz Arriola, I. Szanyi, Hollowness in pp and p^-p scattering in a Regge model, *Phys. Rev. D* 98 (7) (2018) 074012.
- [14] Szanyi István, A kölcsönhatási régió alakja a nagyenergiás proton-proton ütközésekben. *Scientia Denique* IX. évfolyam, 1. kiadás (2019).
- [15] Szanyi István, A pomeron és az odderon tulajdonságai a TEVATRON+LHC adatok alapján egy dupla pólusú pomeron+odderon Regge modell keretén belül, *Annales III., Az ELTE Márton Áron Szakkollégium évkönyve* (2020).
- [16] I. Szanyi, V. Svintozelskyi, Pomeron-pomeron scattering, *Ukr. J. Phys.* 64 (8) (2019) 760–765.
- [17] I. Szanyi, L. Jenkovszky, R. Schicker, V. Svintozelskyi, Pomeron/glueball and odderon/oddball trajectories, *Nucl. Phys. A* 998 (2020) 121728.
- [18] Szanyi István, Gluonlabdák vizsgálata a Regge-elmélet keretein belül, *Annales III., Az ELTE Márton Áron Szakkollégium évkönyve* (2019).
- [19] T. Csörgő, I. Szanyi, Observation of Odderon effects at LHC energies: a real extended Bialas-Bzdak model study. *Eur. Phys. J. C* 81, 611 (2021).
- [20] T. Csörgő, T. Novák, R. Pasechnik, A. Ster, I. Szanyi, Proton Holography – Discovering Odderon from Scaling Properties of Elastic Scattering, in: *49th International Symposium on Multiparticle Dynamics* (2020).
- [21] T. Csörgő, T. Novák, R. Pasechnik, A. Ster, I. Szanyi, Evidence of Odderon-exchange from scaling properties of elastic scattering at TeV energies. *Eur. Phys. J. C* 81, 180 (2021).
- [22] T. Csörgő, T. Novák, R. Pasechnik, A. Ster, I. Szanyi, Scaling of high-energy elastic scattering and the observation of Odderon, *Gribov-90 Memorial Volume*, pp. 69-80 (2021).
- [23] V. M. Abazov, ... I. Szanyi et al. (TOTEM & D0 Collaborations), Odderon Exchange from Elastic Scattering Differences between pp and p^-p Data at 1.96 TeV and from pp Forward Scattering Measurements, *Phys. Rev. Lett.* 127, 062003 (2021).
- [24] R. Ciesielski and K. Goulianos, MBR Monte Carlo Simulation in PYTHIA8, *PoSICHEP* 2012, 301 (2013).
- [25] G. A. Jaroszkiewicz and P. V. Landshoff, Model for diffraction excitation, *Phys. Rev. D* 10, 170 (1974).
- [26] L. Jenkovszky, O. Kuprash, J. Lamsa and R. Orava, Low-Mass Diffraction at the LHC, *Mod. Phys. Lett. A* 26, 2029 (2011).

- [27] L. L. Jenkovszky, O. E. Kuprash, J. W. Lamsa, V. K. Magasand R. Orava, Dual-Regge Approach to High-Energy, Low-Mass Diffraction Dissociation, *Phys. Rev. D* **83**, 056014 (2011).
- [28] L. Jenkovszky, O. Kuprash, R. Orava and A. Sali, Low missing mass, single- and double diffraction dissociation at the LHC, *Odessa Astron. Pub.* **25**, 102 (2012).

Az ásott kutak vizének nitráatterhelése Kárpátalja alföldi mintaterületein

„Öntsünk tiszta vizet a pohárba!”

Szólás

Bevezetés

Amikor 2008-ban elkezdtem a PhD tanulmányaimat a Debreceni Egyetemen, Kárpátalján a környezeti kérdések tanulmányozása még igencsak gyerekcipőben járt, ami a munkámat nagyban nehezítette, de ezáltal az értékét is növelte. 2014-ben szereztem meg a PhD-fokozatot, a *Környezetföldrajzi vizsgálatok Beregszászban* témában megírt disszertáció megvédését követően. A munka felszíni és felszín alatti vizek minőségének vizsgálatát, talajvizsgálatokat és a falevelekre ülepedő por mennyiségi és minőségi meghatározását foglalta magában. A sikeres védést követően a II. Rákóczi Ferenc Kárpátaljai Magyar Főiskolán kezdtem dolgozni és kutatni. Azon az éven a főiskolán jelentős infrastruktúra fejlesztés történt, aminek a részeként jól felszerelt laborokat adtak át, ahol aztán környezetföldrajzi méréseket végezhattunk, így a kollégákkal és a diákokkal közösen tovább folytathattam a kutatást. A környezetvédelmen belül a vizek minőségének vizsgálatával foglalkoztam a legtöbbet és a legközelebb is ez áll hozzám. Az alábbi munkában is erről a témáról szeretnék írni.

Felszín alatti vizeink

A Kárpát-medence területe gazdag felszíni és felszín alatti vizekben egyaránt. Mélységi helyzetük alapján több típusba soroljuk:

A *talajvíz* a legfelső vízzáró réteg fölött elhelyezkedő víz. Legkönnyebben elérhető vízbázis, viszont a leginkább ki van téve a felszín felől érkező

szennyeződéseknek. A Kárpát-medence alföldi területein a talajvíz általában közel húzódik a felszínhez, a hegyvidéki területeken összefüggő talajvíztükör kialakulására nincs lehetőség, néhol pedig jelentős mélységben húzódik. A talajvizek nagyrészt elszennyeződtek az emberi tevékenység hatására. Elsődleges szennyező források a nem szigetelt szennyvíztárolók, trágyatároló telepek, hulladéklerakók, illetve a mezőgazdasági területekről származó műtrágya- és növényvédőszer-maradékok. A másik talajvizet érintő probléma a talajvízszint-süllyedés.

A rétegvíz két vízzáró réteg között elhelyezkedő víz. A Kárpátok medencéi világviszonylatban is bőséges artézivíz-készleteket rejtene. Többnyire jó, ivóvíz minőségű vizet biztosít, viszont természetes szennyeződést tartalmazhat (pl. arzénos vizek a Tiszántúlon, Duna-Tisza-közének déli részén, Dél-Dunántúlon). A túlzott kitermelés következménye a rétegvizek szintjének csökkenése. Magyarország medenceterületein általában évente 0,1–0,4 méter apadás figyelhető meg a rétegvizekben is.

A karsztvíz a mészkőterületek kőzetrepedésiben, hasadékaiban tárolt részvíz. A karsztvizek viszonylag gyorsan mozognak, pótlódásuk elég ütemes, de éppen az ezzel összefüggő kis szűrőhatás miatt szennyeződés-érzékenyek. A karsztvizek értékes ivóvízbázisok, többnyire csapadékvízzel táplálkoznak. Könnyen elszennyeződnek, mivel a karsztosodó kőzeteken általában vékony talajréteg húzódik, így a szennyeződés szinte szűrés nélkül a vízbázisba juthat.

A felszín alatti vizek közt megemlíthetők a Kárpát-medence belső területein nagy jelentőséggel bíró parti szűrésű vizek, amelyek a folyóvíz és a felszín alatti vizek keverékéből jönnek létre, vízminőségük a folyó és a háttérvíz minőségétől függ. Fontos ivóvízbázis, viszont helyzetéből adódóan sérülékeny [1], [2], [3].

A felszín alatti vizeknek nagy a jelentősége a Kárpát-medencei országok ivóvízellátásában, Magyarországon 94%-át teszik ki, Szlovákia esetében pedig 87,3%-át adják [4], [5]. Romániában azonban csak a 40%-a származik felszín alatti vízkészletekből. Ott a vízellátás döntő része azokból a mesterséges módon kialakított hegyvidéki víztározókból származik, amelyek a magasan fekvő területek kiváló minőségű lefolyó vizeit fogják fel [6].

A Kárpát-medence országaiban a közüzemi vízszolgáltatás helyzete javul, így egyre többen jutnak megfelelő minőségű ivóvízhez. Magyarországon a közüzemi vízellátás a lakosság 98,3%-a számára érhető el [7]. Szlovákiában is

növekszik ez az érték, 88,3% volt egy 2018-as tanulmány szerint [8]. Romániában 2017-ben a lakosság 67,5 %-a csatlakozott közüzemi vízszolgáltatóhoz, a maradék 32,5% főleg vidéki területeket jelent, ahol a lakosok helyi vízforrásokat kell víznyerés céljából felhasználniuk [9]. Szerbiában pedig 87,9% volt ez az érték (2018) [10].

A vizek szennyezése

A víz minőségét sokféle, egyidejűleg lejátszódó és egymást befolyásoló fizikai, kémiai és biológiai folyamat alakítja. A vizek kémiai jellemzésénél annak kémhatását, szervesanyag-tartalmát, klorid-, szulfát-, nitráttartalmát, szervesetlenanyag-tartalmát és keménységét vizsgálják [11]. Ezek közül részletesebben a nitrát-szennyezésre fogok kitérni.

A nitrát egészségkárosító hatása régóta ismert, elsősorban a gyermekekre veszélyes. A nitrát határérték feletti jelenléte az ivóvízben a csecsemőknél methemoglobinémiát, más néven „kékkórt” okozhat, mivel a nitrát a csecsemők gyomrában nitritté redukálódik. A nitrit csökkenti a vér hemoglobinjának oxigénszállító képességét, szöveti oxigénhiányt okozva [4].

A nitrát természetes körülmények között is megtalálható a természetben, csak jóval kisebb arányban. A nitrát (NO_3) megjelenése a felszíni vagy felszín alatti (talajvíz) ivóvízforrásokban legnagyobb részben emberi tevékenység, különösen az állattenyésztés, műtrágyázás, szennyvíz-szikkasztás következménye. A felszín alatti vizek – elsősorban a talajvíz és a rétegvíz – nitrátosodása már évtizedekkel ezelőtt elkezdődött. A talajvíz csaknem mindenütt elszennyeződött a Kárpát-medencében, ivóvízellátásra nem vehető igénybe. A talajvizek nitrátosodása azért is komoly gond, mert kapcsolatban lehetnek a mélyebb rétegvizekkel. A rétegvizekre telepített vízkivétel növeli a talajvíz mélybe szivárgását, ezzel lehetőség van a rétegvíz elnitrátosodására [11].

A talajvíz mennyiségi és minőségi tulajdonságait befolyásolják a meteorológiai feltételek, illetőleg az évszakok váltakozása, a települések talajainak vízáteresztő képessége, valamint a talajvíz mélysége is [12], [13]. A szennyvízcsatorna-hálózat kiépítettsége szintén meghatározó, ugyanis a nem kezelt szennyvíz, vagy a szigeteletlen szennyvízáknaiban tárolt szennyvíz a talajvíz nagymértékű romlását okozhatja. Magyarországon, Báránd településen vég-

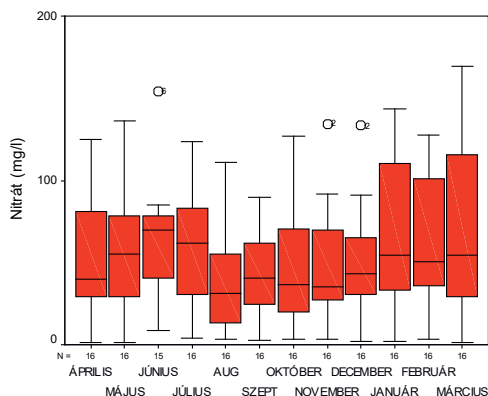
zett vizsgálatok kimutatták, hogy pozitív irányú változások történtek a talajvíz minőségében a csatornahálózat kiépítését követően [14].

Kárpátalja területén végzett vizsgálatok eredményei

Kárpátalján a természeti adottságok kedveznek a felszín alatti vizek jó minősége megőrzésének, ugyanis a síkvidéki részen a felső üledékréteg vízzáró agyag és vályog, ami a felszínhez közeli (átlagosan 3-7 m mélyen elhelyezkedő) felső vízréteg rétegvíz jellegét és viszonylagos tisztaságát biztosítja [15].

Kárpátalja lakosainak ivóvízellátását nagyobb részt felszín alatti vizek biztosítják, viszont ezek egyenlőtlenül oszlanak meg a régióban. Kárpátalján a lakosság vezetékes ivóvízzel való ellátása átlagosan 37,5% [16]. Ungváron, a megyeszékhelyen (98,4%), valamint Munkácson (86,4%) a legmagasabb az aránya a vezetékes vízhez jutó lakosoknak [17]. A kisebb városoknak csak egy részén van kiépítve a vízhálózat, ahogy Beregszászban is a városnak mindössze körülbelül 30%-án [18].

2009–2010-ben, egy éven keresztül, havi rendszerességgel, vizsgáltuk 16 ásott kút vízminőségének alakulását Beregszászban. Beregszász talajaiban a finom frakció aránya jelentős, 50% fölötti, így a felszínről a vizek csak nagyon lassan tudnak a mélybe szivárogni. Szintén előnyös a talajvízminőség szempontjából a viszonylag mélyen húzódó talajvízszint (1–6 m).



1. ábra: A beregszászi talajvíz kutak vizének nitráttartalma

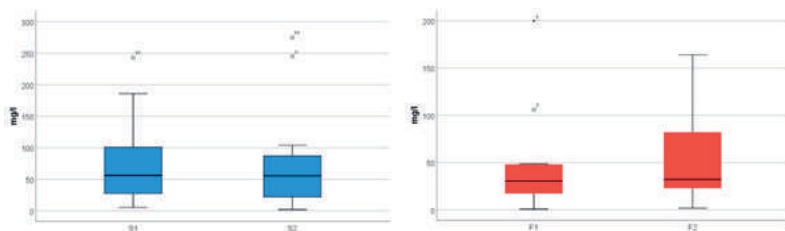
Mindezek ellenére a talajvíz nitrát-koncentrációjának átlaga Beregszászon 55,3 mg/l volt (1. ábra). Ukrajnában az ivóvizek nitráttartalmára meghatározott határérték 50 mg/l [19]. Határérték feletti nitrát koncentráció a minták 45,5%-ában volt. A legmagasabb mért érték 162 mg/l volt. Néhány mintavételi ponton kisgyermek is fogyasztja a kút vizét, akiket leginkább veszélyeztet a magas nitráttartalom [20].

A városokban elsősorban a háztartási szennyvíz lehet a fő szennyezőforrás, ott, ahol nem megoldott a szennyvízelvezetés, tárolás kérdése. Kárpátalján a szennyvízelvezető rendszerekhez hozzáférő lakosság aránya mindössze 27% [16]. Szennyvízelvezetés híján a víz az árokba vagy a kertbe jut, ahonnan elszivárog, jó esetben szigetelt szennyvíztárolóban tárolják és időközönként elszállítják.

Mivel Kárpátalján a lakosság nagyobb része falun él, fontos a falvak helyzetének a feltárása is. A vidéki településeken szinte teljesen hiányzik a központi vízszolgáltatás, a vízellátást a helyi kutak biztosítják, amelyek minőségét nem ellenőrzik államilag. A településeken létesített kutak egy része ásott kút, melyek az első vízáradó réteg vizét szolgáltatják. Az elmúlt évtizedekben csökkent a szerepük, mivel a száraz évszakban gyakran nem volt elegendő víz bennük, feltehetően a talajvízszint süllyedése miatt. A lakosság vízigénye növekedett a jóléti körülmények fokozódásával, amit aztán fűrt (vagy vert) kutakkal pótolnak. Ezek a kutak mélyebb rétegekből termelik a vizet, a fellépő vízhiány pótlására lettek létesítve, vagy pedig mezőgazdasági célokat szolgálnak, ugyanis Kárpátalja alföldi területén, több helyen fóliasátras zöldségtermesztést folytatnak, ami öntözést igényel. Az elmúlt évek során több kárpátaljai településen végeztünk vízminőség-vizsgálatot a hallgatókkal ásott és fűrt kutakból vett mintákon. Az alábbiakban két településen kapott eredményeinket szeretném bemutatni.

Salánk (Beregszászi járás) és Fornos (Munkácsi járás) is Kárpátalja alföldi területén fekvő falu. Népségüket nézve Fornoson 1455 fő, Salánkon pedig 3110 fő élt a 2001-es, legutóbbi népszámlálás adatai szerint. Jellemző mindkét területen az intenzív mezőgazdasági termelés, azon belül, a fóliaházas zöldségtermesztés. Salánk a Hömlöc-hegy lábánál helyezkedik el, de a lakott terület tengerszint feletti magassága mindössze 116–122 m között változik [21]. Fornoson az átlagos tengerszint feletti magasság 121 m, viszont a falu

területén belül nagyobb különbségek figyelhetők meg, 111–137 m között változnak a magasság értékei [21]. Így az első vízáadó réteg magassága is eltérő a két településen, míg Salánkon 1–4 méteren húzódott a vízszint az ásott kutakban, addig Fornoson 1–25 méteren.



2. ábra: A nitráttartalom alakulása Salánk és Fornos ásott kútjaiban az őszi (S1, F1) és a tavaszi mérés során (S2, F2) (Adatforrás: [22], [23])

Salánkon a nitráttartalom átlagértéke az őszi és tavaszi mérés során is meghaladta a határértéket [19], mindkét esetben a minták több mint fele 50 mg/l feletti koncentrációban tartalmazott nitrátot (2. ábra). Az őszi mérés során a vízszint alacsonyabban helyezkedett el, átlagosan 3 méter volt jellemző, a nitráttartalom átlagértéke 74,5 mg/l volt. A tavaszi mérés idején minden kútban magasabb vízszintek voltak jellemzők, a nitráttartalom azonban szinte ugyanannyi maradt, 75,5 mg/l volt az átlagérték. A legmagasabb érték is tavasszal fordult elő, értéke 275 mg/l volt [22].

Fornos esetében a nitráttartalom átlagértéke overall a határértéken belül maradt, míg tavasszal ez a mutató, 53 mg/l volt. Az őszi mintagyűjtés idején két kútnál fordult elő 50 mg/l fölötti érték, tavasszal azonban már 5 mintavételi ponton haladta meg a határértéket a mért érték. Fornoson is a tavaszi mérés idején volt magasabb a vízállás, ami mutatja, hogy a vízszintnövekedés idején a nitrátkoncentráció is növekedett.

A két település adatainak összehasonlítása is alátámasztja, hogy ahol a felszínhez közelebb húzódik a talajvízszint, ott magasabb a nitrátkoncentráció. Viszont vannak ellenpéldák is, Fornoson 24 méteres vízállásnál 200 mg/l volt a nitráttartalom [23].

Mindkét településen vizsgáltak fúrt kutakból vett vízmintákat is, ahol nagyságrendekkel alacsonyabb koncentrációk voltak kimutathatók, ezek a kutak mélyebbek is, mint az ásott kutak, de így is volt példa arra, hogy a

határértéket meghaladta a mért nitráttartalom értéke.

A falusi területeken a fő szennyezőforrás a mezőgazdasági termeléssel van összefüggésben, akár a műtrágyahasználat miatt, de az állattartás is megemlíthető. Mindkét fent említett településen az intenzív zöldségtermesztéshez köthető egy-egy pontban kialakult magasabb nitrátkoncentráció. Emellett a magasabb nitrát értékek a háztartási szennyvíz kibocsátásával magyarázhatóak, mivel a településeken nincs kiépített szennyvízcsatorna-hálózat.

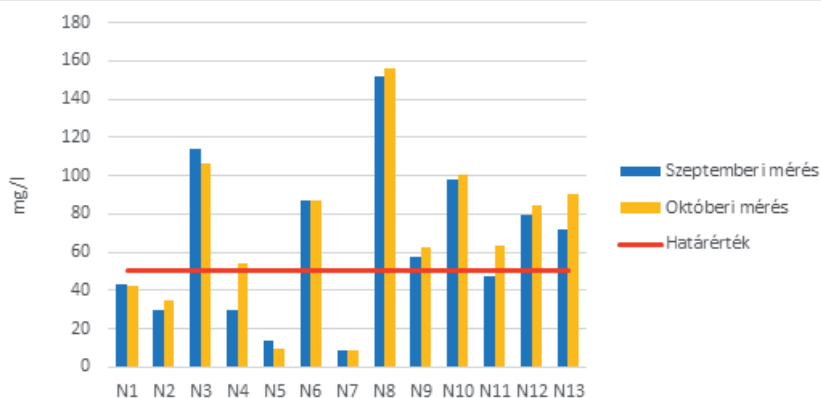
A közelmúltban kezdtük el Nagyberég ásott kútjainak vizsgálatát (a település népességszáma 2540 fő volt 2001-es népszámlálás idején), ahol a vizek kémhatását, elektromos vezetőképességét és nitráttartalmát mértük. A falu lakosai jelentős számban dolgoznak a Hoch-Bereg német–ukrán vegyesvállalat helyi üzemében, ami ruhaipari termékek előállításával foglalkozik. A lakosoknak csak kis része foglalkozik intenzív mezőgazdasági termeléssel, az Agro-Lucski mezőgazdasági vállalat művel 1200 ha földterületet a falu határában. A település átlagos tengerszint feletti magassága 126 méter, de 106–144 m között változnak a magasság értékei [21]. A faluban 13 ásott kútból vettünk mintát, két alkalommal (2021 szeptemberében és októberében), igyekeztünk a település területét lefedni. A kutakban a vízszint néhol 1,5 méter mélyen, máshol 22 méteren húzódott a változatos domborzatnak köszönhetően. A két hónap alatt nagyon kevés csapadék hullott, emiatt a kutakban a vízszint némileg lecsökkent. A 13 pontból, kettőn van fúrt kút is az udvaron, 11 ponton az ásott kút vizét fogyasztják ivóvízként. Két kút közös használatban áll, van, aki ezek vizét is fogyasztja.

A kémhatás a semleges tartomány körül alakult. Két esetben enyhén lúgos, egy mintavételi ponton pedig enyhén savas értékek fordultak elő. A két mérés között jelentős változás nem történt.

Az elektromos vezetőképesség átlagértéke kicsivel haladja meg a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}\cdot\text{t}$, a legalacsonyabb érték 390 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a legmagasabb pedig 1460 $\mu\text{S}/\text{cm}$ volt a két mérés során. Jelentős eltérés a két mérés eredménye között itt sem volt, kivéve a N4 mintavételi pontot, ahol októberben jelentősen nőtt a vezetőképesség értéke, valamint a nitráttartalom is ezen a ponton változott a legnagyobb mértékben.

A nitráttartalom átlagértéke 67 mg/l volt a vizsgált időszakban (3. ábra). Az októberi értékek valamivel magasabbak voltak a szeptemberinél. Az átlagérték

mindkét hónapban magasabb volt, mint a határérték. A legalacsonyabb mérési eredmény (szeptember: 8,6 mg/l, október: 8,9 mg/l) az N7 mintavételi ponton volt, amely a legmagasabban fekszik a falu déli részén. A legmagasabb nitrátkoncentráció pedig az N8 mintavételi ponton fordult elő, 152 mg/l és 156 mg/l-es értékekkel. A kutak térbeli elhelyezkedése nem ad magyarázatot a magasabb nitrátkoncentrációkra, ugyanis az N2 és N3, vagy N6 és N7 mintavételi pontok közel helyezkednek el egymáshoz, mégis jelentős eltérések mutatkoznak. A szennyezés forrása ezen a távolságon belül található feltehetően. A mezőgazdasági földek az alacsonyabban fekvő északi és keleti területeken összpontosulnak, kisebb arányban nyugaton, így kevés a valószínűsége, hogy a környező területek mezőgazdasági műveléséből származó műtrágya-maradékok felelősek a szennyezésért. A tulajdonosok az árokba kiengedett háztartási szennyvizet és ritkán a trágyalét nevezték meg, mint a kút közelében lévő lehetséges szennyezőforrást. Feltehetően több pontszerű forrás a felelős a magasabb nitráttartalomért.



3. ábra: Az ásott kutak vizének nitráttartalma Nagyberegén, 2021 őszén

A vizsgálatot szeretnénk folytatni, pontosan felmérni a lehetséges szennyezőforrások helyét, és továbbiakat megtalálni. Ezen kívül a csapadék hatását is szeretnénk tetten érni a további vizsgálatok során.

Összegzés

Összességében Kárpátalja városaiban és falvaiban jelen van a nitrátszennyezés problémája, a felszínhez legközelebbi vízáadó réteg a szennyezésnek leginkább kitett. Többnyire lokális szennyezésekről beszélhetünk, feltehetően több – a kutak közvetlen környezetében jelenlévő – pontszerű forrásból származnak, ezek lehetnek az állattartás szennyvize, a kezeletlenül kijuttatott háztartási szennyvíz stb., valamint a falvakban kimutatható a mezőgazdasági termelés hatása is. A szennyezés mértékét a terület természeti adottságai is befolyásolják. Kárpátalja falvaiban általános probléma a szennyvízkezelés és -elvezetés hiánya, emiatt a lakosok biztonságos ivóvízhez jutása is. Célunk a lakosság figyelmét felhívni a nitrátos vizek veszélyére és környezettudatosabb magatartásra ösztönözni őket.

Felhasznált irodalom

- [1] <https://www.arcanum.hu/hu/online-kiadvanyok/TenyekKonyve-tenyek-konyve-1/zold-19B21/magyarorszag-kornyezeti-allapota-1A08C/vizek-allapota-1A097/felszin-alatti-vizek-1A0AA/> Letöltés ideje: 2021.09.22
- [2] Borsy Zoltán (szerk.): Általános természetföldrajz. Nemzeti Tankönyvkiadó. Budapest (1998).
- [3] Somogyi Sándor, Szabó József: *A Kárpát-medence vízföldrajza*. In: Dövényi Z. (szerk.) Kárpát-medence földrajza. Budapest, Akadémiai Kiadó, (2012) pp. 187–212. (Akadémiai kézikönyvek) (ISBN:978-963-05-9281-9).
- [4] https://www.antsz.hu/data/cms90078/lvovizminoseg2017_v2.pdf Letöltés ideje: 2021.09.22.
- [5] Barloková, D., Ilavský, J. Groundwater: *An Important Resource of Drinking Water in Slovakia*. In: Water Resources in Slovakia: Part I (2018) pp. 277–301.
- [6] https://mta.hu/tudomany_hirei/a-lathatatlan-termeszeti-eroforras-111359 Letöltés ideje: 2021.10.28.
- [7] Magyarország ivóvízminősége 2018. Nemzeti Népegészségügyi Központ. https://www.nnk.gov.hu/attachments/article/188/lv%C3%B3v%C3%ADzmin%C5%91s%C3%A9g2018__2020_3.pdf Letöltés ideje: 2021. 09. 23.

- [8] M. Fendeková, M. Zeleňáková: *Water Supply and Demand in Slovakia*. In: *Water Resources in Slovakia: Part I* (2018) pp. 63–78.
- [9] Oana Teodora Moldovan, Rannveig Øvrevik Skoglund, Horia Leonard Banciu, Alexandra Dinu Cucos, Erika Andrea Levei, Aurel Perşoiu, Stein-Erik Lauritzen: *Monitoring and risk assessment for groundwater sources in rural communities of Romania* (GROUNDWATERISK). Research Ideas and Outcomes 5: e48898. 2019 doi: 10.3897/rio.5.e48898.
- [10] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wat_pop/default/table?lang=en Letöltés ideje: 2021.10.05.
- [11] Rácz Istvánné: *Vízkémiа II*. Szent István Egyetem, (2011). https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0019_Vizkemia_II/ch09.html Letöltés ideje: 2021.09.22.
- [12] Szabó, Gy., Angyal, A., Csikós, A., Bessenyei, É., Tóth, E., Kiss, P., Szabó, Sz.: *A talajvíz szennyezettségének vizsgálata alföldi településeken*. Földrajzi Közlemények 134(2), (2010), pp. 173–187.
- [13] Pál Zoltán, Bálint Kinga: *Települési talajvíz-szennyezési mintázatok erdővidéki falvak példáján*. Acta Siculica (2007), pp. 49–56.
- [14] Mester Tamás: *A szennyvízcsatorna-hálózat kiépítését követő talajvízminőség-változások vizsgálata egy kelet-magyarországi település példáján*. Egyetemi (doktori) értekezés, Debrecen, (2020).
- [15] Molnár József: *Vízrajzi adottságok*. In: Kárpátalja, A Kárpát-medence régiói 11. Szerkesztette: Baranyi B., Dialóg Campus Kiadó, Pécs-Budapest (2009), 541 p.
- [16] «Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2019 році.» Міністерством розвитку громад та територій України. Київ, 2020. <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2020/12/nacionalna-dopovid-za-2019-rik.pdf> Letöltés ideje: 2021.10.26.
- [17] Закарпатська Обласна Державна Адміністрація, Департамент Екології та Природних Ресурсів. Доповідь про стан навколишнього природного середовища Закарпатської області за 2017 рік м.Ужгород, 2018.
- [18] <https://karpataljalap.net/2016/01/06/korszerusitik-es-kibovitik-kozmuhalozatot> Letöltés ideje: 2021.10.27.
- [19] Державні санітарні правила та норми. "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10). Санітарно-хімічні показники безпечності та якості питної води. Міністерство Охорони

Здоров'я України.

- [20] Vince Tímea: *Környezetföldrajzi vizsgálatok Beregszászban*. Doktori értekezés. Debrecen, (2014).
- [21] Google Earth.
- [22] Palkó Ákos: Ásott és fúrt kutak vízminőségének vizsgálata *Salánkon*. Szakdolgozat. Beregszász, (2018).
- [23] Kukri Regina: Ásott és fúrt kutak vízminőségének vizsgálata *Fornoson (Munkácsi járás, Kárpátalja)*. Szakdolgozat. Beregszász, (2021).

Tartalomjegyzék

Dr. Hadnagy István: Hasznosítható-e a szélenergia Kárpátalján a felszín közeli szélmező energetikai tulajdonságai alapján?.....	7
Dr. Himics László: Gyémánt: csillogó drágakő a jövő technológiáiban, avagy egy kristály élete az ékszeriparon kívül.....	21
Dr. Jevcsák Szintia: Táplálkozástudománytól az élelmiszerfejlesztésig! Célok, feladatok, kutatási lehetőségek.....	35
Dr. Kolozsvári István: Odonatológiai vizsgálatok a Tisza ukrajnai felső szakaszán.....	47
Szanyi István: Protondiffrakció.....	57
Dr. Vince Tímea: Az ásott kutak vizének nitráatterhelése Kárpátalja alföldi mintaterületein.....	75

Kiadó:

Momentum Doctorandus
90202 Ukrajna, Beregszász, Kossuth tér 6.,
momentum.doktorandus@gmail.com

Видавник:

ГО «Моментум Докторандус», м. Берегове,
пл. Кошута 6, Закарпатська обл., Україна, 90202
momentum.doktorandus@gmail.com

ISBN 978-617-596-345-6

Borítóterv és nyomdai előkészítés:

Kovács Sándor

Nyomdai munkálatok:

Polihrafcentr „Lira” – www.lira-print.com
Надруковано в Поліграфцентрі «Ліра», м. Ужгород,
вул. Митрака 25, Закарпатська обл., Україна, 88000