

OTDK-dolgozat

2023

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GAZDASÁG- ÉS TÁRSADALOMTUDOMÁNYI KAR**



A Visegrádi Együttműködés zöld hidrogéntermelési potenciáljának felmérése és
az optimális fejlesztési hotspotok kijelölése

Assessment of the potential for green hydrogen production in the Visegrad
Group and assignment of the optimal development hotspots

Rozs Bálint

Konzulens: Dr. Hortay Olivér

Kézirat lezárásának dátuma: 2021. 11. 01.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	1
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	6
2.1. A hidrogén	6
2.2. A hidrogén mint energiahordozó	8
2.3. A hidrogén előállítása	10
2.3.1. Szénből történő előállítás	11
2.3.2. Földgázból történő előállítás	12
2.3.3. Parciális oxidáció fosszilis üzemanyagokból	13
2.3.4. Elektrolízis	14
2.3.5. Magas hőmérsékletű elektrolízis	15
2.3.6. Termokémiai hidrogén előállítás	15
2.4. A hidrogén tárolása	16
2.4.1. Komprimált hidrogéngáz	16
2.4.2. Nagyléptékű hidrogéntárolás	17
2.4.3. Cseppfolyósított hidrogéntárolás	18
2.4.4. Kísérleti tárolási technológiák	19
2.5. Hidrogén ellátási lánc	20
2.6. A hidrogén felhasználása	22
2.7. A hidrogén ellátásbiztonsági és geopolitikai aspektusai	26
2.8. Az energiaunió és a hidrogéngazdaság helyzete az Európai Unióban	27
2.9. A Visegrádi Együttműködés energiabiztonsága	28
2.9.1. Lengyelország hidrogénstratégiája (<i>Polskiej Strategii Wodorowej</i>)	28
2.9.2. Csehország hidrogénstratégiája (<i>Vodíková Strategie České Republiky</i>)	30
2.9.3. Szlovákia hidrogénstratégiája (<i>Národnej vodíkovej stratégie</i>)	31
2.9.4. Magyarország hidrogénstratégiája	31
3. A potenciálbecslési modell	33
3.1. Mintavétel	36
3.2. A rendelkezésre álló és hasznosítható napenergia potenciálbecslése	37
3.3. A rendelkezésre álló szélenergia potenciál	40
3.4. Hidrogén potenciálbecslés	43
3.5. Fejlesztési célterületek kijelölése	47
3.5.1. Analitikus hierarchia folyamat	47
3.5.2. Döntési probléma azonosítása és a mutatók meghatározása	48
3.5.3. Mutatók közötti páronkénti összehasonlítás	49
3.5.4. Szempontok priorizálása	51
3.5.5. A NUTS2-es statisztikai régiók értékelése és a hotspotok kijelölése	52
3.5.6. A NUTS2-es régiók beruházási szempontú értékelésének megjelenítése	53
4. KÖVETKEZTETÉSEK	54
5. IRODALOMJEGYZÉK	56

ÁBRA- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. ábra - Üzemanyagok térfogatra és tömegre vonatkoztatott energiasűrűsége	9
2. ábra Hidrogén előállítása különböző forrásokból.....	11
3. ábra-A hidrogén előállításának folyamata széngázképzés útján	12
4. ábra- A földgázból történő hidrogénelőállítás folyamata	13
5. ábra Az elektrolízis egyszerűsített folyamatábrája.....	14
6. ábra Különböző hidrogéntárolási technológiák összehasonlítása energiasűrűség és hidrogéntartalom szerint.	16
7. ábra Szénszálas kompozit hidrogéntartály a Toyota Mirai gépjárművekhez	17
8. ábra A: Energiahordozók tárolása sóbarlangokban	18
9. ábra A)-A hidrogénszállítás lehetséges eszközei a volumen és a távolság függvényében.....	20
10. ábra A potenciálbecslési módszer felépítése és folyamata	34
11. ábra A Mintavételi pontok és mBf szerinti magasság	36
12. ábra A globálsugárzás összetevői.....	37
13. ábra Az éves globálsugárzási adatok alapján számított fotovoltaikus termelési volumenek alakulása	39
14. ábra A rotor által súrolt felület (m^2) ábrázolása	41
15. ábra Az éves átlagos szélesebbégi adatok alapján számított szélenergia termelési volumenek alakulása	42
16. ábra Becsült zöld hidrogén előállítási volumen.....	44
17. ábra A nap és a szél hidrogénelőállítási volumenjének alakulása az északi szélességi körök vonatkozásában	45
18. ábra Éves becsült hidrogénelőállítási volumenek NUTS2-es régiókra vonatkoztatva, körméterben kifejezve	46
19. ábra AHP döntési struktúra	48
20. ábra A döntéshozói szempontok súlya	51
21. ábra A régiók rangsorolása a „Hidrogén beruházási” pontszám alapján.....	53
1. táblázat A hidrogén és a metán tulajdonságainak összehasonlítása	7
2. táblázat Különböző üzemanyagok fűtőérték szerinti összehasonlítása	10
3. táblázat A lengyel hidrogénstratégiai előterjesztés célkitűzései.....	29
4. táblázat AHP szerinti páros összehasonlítási mátrix	49
5. táblázat Súlyozott összehasonlítási mátrix	50
6. táblázat A régiók értékelésének folyamata a különböző beruházási szempontok alapján	52

1. BEVEZETÉS

A globalizáció és a technológiai fejlődés korábban elképzelhetetlen életszínvonalnövekedést tett lehetővé, amelynek révén civilizációnk a történelemben eddig sosem látott mértékű haladást valósított meg. Ugyanakkor társadalmaink dinamikus fejlődése és prosperálása számos nem várt globális problémát is eredményezett, amely kihívásokra választ kell találnunk, mind lokális, mind globális szinten. Az energia kiemelten fontos szerepet játszik a fejlődésben és a gazdasági növekedésben, ezáltal a társadalmi jólét biztosításában. Ugyanakkor a fosszilis energiahordozók megnövekedett felhasználása, mint a gazdasági növekedés fő mozgatórugója, súlyos környezeti problémák okozója is egyben, mint például a klímaváltozás és szélsőséges időjárási jelenségek. Mindezek következtében tetemes anyagi károk keletkeznek, és emberek milliói kényszerülnek elhagyni lakóhelyüket (Porter and Kramer, 2007).

A globális klímaváltozás közel sem ismeretlen jelenség a bolygónk történetében, ugyanakkor a múltban leginkább természetes okai voltak. A napjainkban tapasztalt változások ugyanakkor már minden jel szerint az emberi tevékenység számlájára írhatóak. Az iparosodás, a népességnövekedés és a gazdasági növekedés következtében jelentős mennyiségű üvegházhatású gáz került a légkörbe (elsősorban szén-dioxid (CO_2), nitrogén-dioxid (NO_2), metán (CH_4), amelynek következtében a föld átlaghőmérséklete egyre gyorsabb ütemben növekszik. Ezen gázok légköri koncentrációjának további fokozódása úgynevezett üvegházhatást idéz elő, mivel csapdába ejti a hőmérsékleti kisugárzás egy részét, ennek következtében megnövekszik a földfelszín és a troposzféra hőmérséklete. Az üvegházhatású gázok túlzott felhalmozódása véglegesen megváltoztathatja a föld ökológiai rendszereinek törékeny egyensúlyát, amelynek drasztikus következményei lehetnek bolygónk biodiverzítására nézve. (Motavalli, 2003). A kontinentális éghajlat megváltozása és a tengerszint emelkedése pedig jelentős zavarokat okozhat a globális ellátási láncok működésében (Masson-Delmotte et al., 2018).

Az ilyen komplex ellátási problémák súlyos humanitárius krízisek okozói lehetnek a jövőben. A fokozódó elszegényedés, a társadalmi csoportok közötti konfliktushelyzetek növekedése tovább súlyosbíthatja a már jelenleg is fennálló társadalmi egyenlőtlenségeket. Az emelkedő élelmiszerárak, a csökkenő vízkészletek, a sűrűsödő időjárási anomáliák következtében az erőforrásokhoz való hozzáférés korlátozódhat, aminek következtében megnövekedhet az esetleges geopolitikai konfliktusok kiéleződésének esélye (Koubi, 2019).

Az említett problémák kezelése, megoldása csak egy olyan komplex, fenntartható fejlődési stratégia megalkotásával lehetséges, amely során a jelenkor szükségleteit a jövő generációi jólétének veszélyeztetése nélkül elégitjük ki (Dombi, 2009). 2015-ben az ENSZ klímaváltozási konferenciáján mintegy 195 ország részvételével tárgyalások kezdődtek, egy, a világ minden országára kiterjedő általános klímavédelmi egyezmény megalkotása érdekében. Az érintett felek végül egyetértésre jutottak, így megszületett a Párizsi Megállapodás (*Accord de Paris*), ez a világ első átfogó klímavédelmi egyezménye. A megállapodás céljait a második cikkely rögzíti, amelyek értelmében tagországok vállalják, hogy a globális átlaghőmérséklet emelkedését jóval 2 °C alatt tartják, az iparosodás előtti szinthez viszonyítva. Az egyezmény további céljai közé tartoznak még az éghajlatváltozással szembeni ellenálló képesség növelése, az üvegházhatású gázkibocsátást csökkentő fejlesztések elősegítése, illetve az említett célok teljesüléséhez szükséges pénzáramlások és befektetések biztosítása. A párizsi egyezményben meghatározott célok elérésének egyik fontos eszköze a fenntartható energiapolitika és a megújuló energiaforrások használatának ösztönzése.

Napjaink energiagazdálkodása egyelőre még fenntarthatatlan pályán mozog, amelynek okai összetettek és sokrétűek. A túlzó energiafogyasztás jellemzően a fejlett társadalmak sajátossága, ugyanakkor jelentős növekedés figyelhető meg a fejlődő világ energiaéhsége szempontjából is, amelynek mozgatórugója a dinamikus népességnövekedés, és ezzel párhuzamosan az igény az életszínvonal növekedésére (Wolfram et al., 2012). Az irracionális energiaigényeket azonban feltétlenül csökkentenünk kell, ezért elengedhetetlen a társadalmak környezettudatosságának növelése és a megújuló energiaforrások arányának növelése az energiamixben. Ilyen megújuló energiaforrás lehet például a napenergia, a vízenergia, vagy a szélenergia, valamint ide tartoznak az energetikailag hasznosítható növények, ipari melléktermékek, növényi és állati hulladékok felhasználásával előállított biomasszák is. A geotermikus gradiens függvényében pedig a föld számos pontján nyílik lehetőség a geotermikus energia hasznosítására is, amely a lakossági fűtési szektor dekarbonizálásával hatékonyan járulhat hozzá a globális klímavédelmi törekvésekhez.

Az elmúlt években a megújuló energetikai kapacitások dinamikus növekedése figyelhető meg. A legfrissebb IEA jelentés szerint a 2020-as évben az új villamosenergia termelési kapacitások közel 90%-a megújuló energiaforrásokból származott és csupán 10%-a származott fosszilis energiahordozókból. Ugyan a jelentés alapján biztató tendencia rajzolódik ki, amely a fenntartható energiagazdálkodás irányába mutat, a megújuló energetikai kapacitások energiamixben történő további növelése azonban csak az energiatárolási technológiák

fejlesztésével, az ilyen irányú kapacitások jelentős növelésével lehetséges. A megtermelt energia tárolása a megújuló energetikai kapacitások esetében különösen fontos, hiszen jelentősen elősegítheti a megújulók nagyobb penetrációját az energetikai ellátó rendszerinkben. A hálózatba integrált energiatárolási kapacitások kiküszöbölhetik a változó és bizonytalan szezonális, illetve napi ingadozásokból fakadó veszteségeket és növelhetik az ellátás biztonságát (IEA, 2020; Omar J. Guerra et al., 2020).

A volatilis termelés veszélyeinek vonatkozásában intő példa lehet egy tavaly nyári kaliforniai áramszünet esete is. Az Egyesült Államok egyik legnagyobb hetilapja, a Los Angeles Times terjedelmes cikkben foglalkozott a nem mindennapi áramkimaradással, amelyben ismertetésre kerültek a sajnálatos eset okai is. Bár Kalifornia állam energiaellátása megközelítőleg 95%-ban megújuló energiaforrásokra támaszkodott az érintett időszakban, a kapacitások legnagyobb részét a fotovoltaiikus energiaforrások képezték. Napnyugta után a kieső energiaforrásokat nem sikerült megfelelő időben pótolni, így a fogyasztóknak államszerte áramkimaradásokkal kellett szembesülniük (LA Times, 2021).

A megújuló erőforrásokból származó energia tárolása során számos technológiai kihívással kell még szembenéznünk. A leggyakrabban alkalmazott tárolási stratégiák közé tartozik a szivattyús víztározók kialakítása, amely megoldás csak ott alkalmazható, ahol adottak az ehhez megfelelő domborzati viszonyok. Sajnos globális szinten, az ilyen technológiához szükséges terepviszonyok csak mérsékelten állnak rendelkezésre. A szoláris hőtároló rendszerek (STS) ugyan lehetővé teszik bizonyos mértékű energia hő formájában történő tárolását, azonban a felhasználási oldal változatos igényeit a szóban forgó megoldás egyenlőre még nem képes kielégíteni. (Kalaiselvam, 2014). Az akkumulátorok kapacitásai jelenleg még nem állnak megfelelő technológiai szinten az ilyen volumenű energiatárolási feladatok ellátására, az egyre növekvő ipari igények miatt kérdéses a megfelelő rendelkezésre állásuk a közeljövőben. Az amerikai NREL kutatói arra a következtetésre jutottak, hogy a legkézenfekvőbb megoldás a szükséges energia eltárolására a hidrogénteknológia alkalmazása lenne.

A hidrogén, mint ígéretes energiahordozó egyre növekvő és kiemelt figyelmet élvez világszerte. Felhasználható ipari alapanyagként, üzemanyagként vagy másodlagos energiahordozóként. Továbbá segíthet kiküszöbölni az időjárásfüggő megújuló energiaforrások szezonális ingadozásának negatív hatásait, a volatilitás kezelésére alkalmas szabályozási képesség megteremtésével (EC, 2020). A gázhálózatba történő bekeverése kezdetben átmeneti és kiegyensúlyozó funkciót tölthet be (Djilali, 2019).

A legfontosabb tulajdonsága azonban, amely miatt a figyelem középpontjába került, hogy felhasználása nem jár károsanyag kibocsátással és megújuló energiaforrásokból is előállítható (Sartbaeva et al, 2007). A fent említett tulajdonságánál fogva kiválóan alkalmazható a különböző ipari folyamatok és gazdasági ágazatok dekarbonizálására, így kulcsfontosságú szerepe lehet a párizsi klímaegyezményben foglalt célok elérésben. A megújuló energiaforrásokból történő hidrogén előállítás különösen vonzó gazdasági és stratégiai lehetőségeket kínál a primer energiahordozókban szegény országok számára (Rahmouni et al, 2017).

A hidrogénnek ugyanakkor az emissziócsökkentés mellett van egy másik igen fontos energiabiztonsági vonatkozása is. Az orosz-ukrán konfliktus és a nyomában kialakuló geopolitikai események rávilágítottak, hogy a nagyarányú importfüggőség súlyos ellátásbiztonsági és árkockázatot hordoz magában. Ezért Európa szempontjából különösen nagy jelentőséggel bír a szénhidrogén importfüggőség csökkentése, és az importarány minél inkább kezelhető szinten tartása, amelynek fontos eszköze lehet a hidrogén a jövőben. Az energiabiztonság nem csak napjainkban játszik meghatározó szerepet a technológiai fejlesztések alakításában. Az 1973-as olajválság és annak következményei átformálták a világot, és a mai napig éreztetik hatásaikat. Az olaj árának drasztikus emelkedése arra ösztönözte a nyugati társadalmakat, hogy értékeljék át az üzemanyagokhoz fűződő addigi viszonyukat, és kezdjenek erőteljes, az energiabiztonságot szem előtt tartó fejlesztésekbe. Ezen technológiai erőfeszítéseknek köszönhetjük a hidrogén és elektromobilitás koncepciójának alapjait is (Mazloomi & Gomes, 2012).

Az olajválságainak azonban történelmi léptékű következményei is voltak a világra nézve. Az olajárrobbanás következtében a nem energiatakarékos és kevésbé hatékony technológiákra építő szocialista országok eladósodtak, ami hozzájárult a keleti blokk felbomlásához, a nyugati világot pedig korábban sosem látott technológiai és gazdasági hegemoniához juttatta (Madarász, 2010). Jelenleg ismét egy globális technológiai verseny tanúi lehetünk, amelyben a hidrogéntekológiákra várhatóan fontos szerep hárul. A történetek intő példaként szolgálhatnak a technológiai fejlődés és adaptáció jelentőségének vonatkozásában.

Napjainkban az Európai Unió jelentős lépéseket tesz a kontinens hidrogéniparának megteremtése érdekében. További jelentős állami investíciók figyelhetők meg az Ázsiai és Csendes-óceáni Gazdasági Együttműködés (APEC) tagországok vonatkozásában is, ami várhatóan tovább fokozza a gazdasági és technológiai elsőségért folytatott globális versenyt.

Egy megfelelően funkcionáló és széleskörű európai hidrogén-ellátásilánc megalkotásához magas szintű regionális együttműködések kialakítására lesz szükség. Közép-Kelet Európa vonatkozásában a Visegrádi Együttműködés országai az elmúlt három évtized során kialakított magasszintű politikai, gazdasági és diplomáciai összeköttetésük révén ideális célterületei lennének a régió hidrogéngazdaságának kialakítására. A regionális hidrogéngazdaság kiépítése elősegítheti a megújuló energiaforrások maximális kiaknázását, illetve egy diverzifikált ellátási-portfólió kialakításával hozzájárulhat az energiafüggetlenség erősítéséhez. A hidrogéntechnológia alkalmazásának kérdése különösen aktuális Lengyelország számára, amelynek az energiagazdaságát érintő fontos átmenet küszöbén áll napjainkban (WB, 2018).

A hidrogéngazdaság irányába történő átmenet első lépése az elérhető zöld-hidrogén előállítási potenciál meghatározása a megújuló energiaforrások és helyi infrastrukturális adottságok figyelembevételével. A jövőben a források hatékony allokációja szempontjából kulcsfontosságú lesz ezen optimális fejlesztési célterületek azonosítása. Jelen dolgozat céljai, a zöld hidrogén előállításának potenciálbecslése és az ideális fejlesztési célterületek azonosítása NUTS2 regionális szinten.

A következő fejezetekben ismertetem a hidrogéntechnológia általános jellemzőit, illetve bemutatom a hidrogéntermelés különböző lehetőségeit, kiemelve ismertetem a zöld, emissziómentes előállítási technológiákat. Majd potenciálbecsléseket végzek napenergia és szélenergia vonatkozásában az érintett négy tagország esetében. Az így kapott értékekből pedig meghatározom az elérhető „zöld” hidrogén előállítási volumenek. A potenciálbecslések során gyűjtött adatokat a Kriging módszer segítségével interpolálom és az így kapott eredményeket megjelenítem.

A fejlesztési források hatékony allokációja szempontjából meghatározó lehet a termelési tényezőkön túlmutató egyéb infrastrukturális és felhasználási komponensek figyelembevétele is egy beruházási döntés meghozatala során. Ezért a kutatásom további célja, hogy az előállítási volumenek mellett a szállítási, tárolási és felhasználási tényezők AHP (Analytic Hierarchy Process) módszerrel történő súlyozásával kijelölhessem az optimális fejlesztési célterületeket NUTS2 tervezési-statisztikai régió szintjén.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A fenntartható fejlődés társadalmi és gazdasági koncepciójának kialakítása során kiemelten fontos szerepet kap az emissziómentes energiatermelés és az energiafelhasználás kérdése. Egyre több kutatás támasztja alá, hogy a hidrogén lehet a hiányzó láncszem az energiarendszer tiszta forrásokra történő átállításában. Azt a gazdasági koncepciót, amelyben a hidrogén tölti be az energia elosztásának központi szerepét hidrogéngazdaságnak nevezzük. A hidrogéngazdaság jelentősége túlmutat az energiaipari fenntarthatóságban betöltött szerepén, energetikai jelentősége mellett gazdasági hatásait is érdemes figyelembe venni (Dou et al., 2017). A hidrogén előállítása, tárolása és szállítása, azaz a hidrogén disztribúciója várhatóan jelentős szerepet tölt majd be a jövő fenntartható gazdaságában. Napjainkban a hidrogéngazdaság témaköre kiemelt helyet foglal el az Európa Unió és a világ valamennyi vezető gazdaságának közép- és hosszú távú fenntarthatósági és energetikai stratégiájában (Margitfalvi, 2012). A következő fejezetekben bemutatom a hidrogén általános fizikai – kémiai jellemzőit, az energiahordozóként történő alkalmazásának sajátosságait. Ismertetem az előállításának, tárolásának és felhasználásának egyes lehetőségeit. A szakirodalmi áttekintést végül egy nemzetközi kitekintéssel zárom, amelyben bemutatom a hidrogéngazdaság irányába tett globális erőfeszítéseket.

2.1. A hidrogén

Felfedezése valószínűleg Robert Boyle nevéhez fűződik, aki 1671-ben egy kísérlete során megfigyelte, hogy a vasreszelék és a híg sav közötti reakciók nyomán gáz képződik. Ugyanakkor Henry Cavendis volt, aki 1776-ban felismerte, hogy a hidrogén egy önálló elem, amely égésekor víz keletkezik. Később Antoine Laurent de Lavoisier nevezte el az fentebb említett tulajdonsága után. A neve görögül vízképzőt jelent, amely a görög hüdór (víz) és gennó (nemzeni) szavakból ered (Grochala, 2015). Az egész világegyetem egyik legkönnyebb és legbősegebben hozzáférhető eleme. A periódusos rendszer első helyét foglalja el, vegyjele H, rendszáma pedig 1. A vízhez hasonlóan színtelen, szagtalan, nem mérgező, ugyanakkor nagyon is éghető, ezáltal robbanásveszélyes diatomikus gáz. A hidrogéngáz és oxigéngáz keverékét durranógáznak is nevezik, ugyanis kémcsőben meggyújtva erőteljes durranó hang kíséretében felrobban, ugyanakkor a tiszta hidrogén égése csendes kékes lánggal történik. A hidrogéngáz robbanóelegyet képezhet a levegővel 4–74%-os, a klórral 5–95%-os koncentrációban szikra vagy nyílt láng hatására. A hidrogén öngyulladás hőmérséklete 584 °C. (Patnaik, 2007).

Bár a bolygónkon szinte mindenhol megtalálható, leggyakrabban más elemekkel, kötött formában találkozhatunk vele, például H_2O , azaz víz formájában, illetve a szénhidrogénekben is megtalálható, mint például a metánban (Schiller, 2014). A hidrogén meglehetősen szokatlan abból a szempontból, hogy kationt és aniont egyaránt könnyedén képez, ugyanis a legtöbb elem csak az egyikre képes. A legkönnyebb, a legkisebb atomtömegű elem, molekuláris tömege majdnem nyolcadrésze a metánnak (CH_4) ahogy az a 2. táblázatban is látható. A hidrogénnek (H_2) a természetben három izotópja fordul elő, melyeket a következőképpen jelöljük: ^1H , ^2H és ^3H . A prócium (^1H), a hidrogén leggyakoribb izotópja, egy protonból és egy elektronból áll. A stabil izotópok közül az egyetlen, amelyben nincs neutron. A deutérium (^2H) és a trícium (^3H) ritkábban fordul elő a természetben. (Náray-Szabó, 2006)

A hidrogén alkotja a világegyetem teljes elemi tömegének 75% -át. A Hertzsprung–Russell-diagram szerinti úgynevezett fősorozati csillagok, mint például a mi Napunk is nagyrészt plazma halmazállapotú hidrogénből állnak, amelyet magfúziós folyamatok által héliummá alakítanak át. Ilyen szempontból az energiahordozóink nagy része is a hidrogénből származtatható (Enghag, 2008).

A hidrogén és a metán tulajdonságainak összehasonlítása		
Tulajdonságok	Hidrogén (H_2)	Metán (CH_4)
Sűrűség (gáz) [kg/m^3]	0,09	0,716
Molekuláris tömeg [kg/kmol]	2,016	16,043
Levegő-üzemanyag arány (AFR) [kg/kg]	0,029	0,058
Energiasűrűség (gáz) [MJ/dm^3]	3	12,6
Legkisebb fűtőérték [MJ/kg]	120	50
Öngyulladási hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]	584,8	536,8
Minimális gyújtási energiaérték [mJ]	0,02	0,29
Oktánszám	nincs	RON 120
Lamináris lángsebesség [cm/s]	230	42

1. táblázat A hidrogén és a metán tulajdonságainak összehasonlítása
forrás: Grabner et al., 2005

A hidrogén könnyebb a levegőnél, ezért előszeretettel alkalmazták a korai léghajók ballonjainak feltöltésére. Ugyanakkor a fentebb említett robbanásveszélyes tulajdonságai miatt jelentős

kockázatokkal járt az ilyen irányú felhasználása. Az LZ 129 Hindenburg német léghajó 1937-es katasztrófája után végleg felhagytak a hidrogén ilyen célú alkalmazásával (Dessler, 2005). Az elmúlt években ugyanakkor a technológia fejlődése és a hélium világpiaci árának emelkedése miatt ismét felmerült a hidrogén működtetésű léghajózás az áruszállítás vonatkozásában. A technológia ilyen jellegű alkalmazása elhozhatja a léghajózás új hajnalát és jelentősen csökkentheti a légiközlekedés okozta környezeti terhelést (Dumas, 2012).

A hidrogént az iparban jelenleg is számos helyen használják fel, főleg a szénhidrogének feldolgozása során, például a katalitikus krakkolásnál. A hidrogénezés segítségével akár a halogénnal felépített műanyagokat is további hasznos vegyületekre bonthatjuk. (Német, 2013). Továbbá a nitrogénműtrágyák gyártása során, az úgynevezett Haber-Bosch eljárás során is kulcsfontosságú szereppel bír (Britannica, 2020). Napjainkban a felhasználási lehetőségei már nem csak a klasszikus ipari folyamatokra korlátozódnak, hanem az elektromobilitásban, továbbá az energetikai rendszereink modernizációjában is alkalmazható (Mars, 2019).

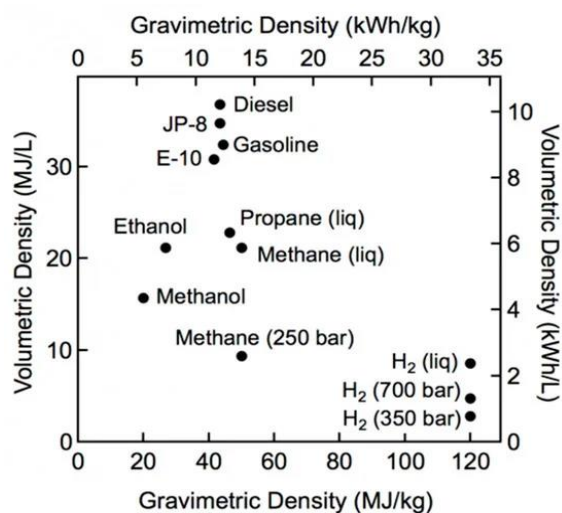
Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy a hidrogén nem primer energiahordozó. Ahogyan fentebb említésre került, bár bőségesen megtalálható a földön, azonban más elemekkel való kötésben. Ahhoz, hogy energiahordozóként alkalmazzuk, a kötések költséghatékony megbontása, és a folyamat során keletkező hidrogén kinyerése, tárolása kulcsfontosságú szereppel bír a technológia jövője szempontjából (Hamacher, 2016). Az előállításának lehetséges alapanyagiról és eljárásairól bővebben a Hidrogén előállítása c. fejezetben értekezek.

2.2. A hidrogén mint energiahordozó

Napjainkban a világ primer energiaigényének jelentős részét fosszilis energiahordozók felhasználásával elégítjük ki, meghatározó hányadot képvisel még az atomenergia, de a megújuló energiaforrások felhasználása is dinamikusan növekszik az energiamixekben. Gyakran jelentős különbségek alakulhatnak ki a felhasználási és termelési oldal vonatkozásában. Ilyen esetekben kiegyenlítésre, kompenzációra van szükség a szolgáltatás biztosítása érdekében, amelyet fosszilis energiahordozók használatával, jellemzően gázerőművek segítségével valósítanak meg (Rosen& Koohi-Fayegh, 2016).

A szakemberek egy jelentős része úgygondolja, hogy a hiányzó láncszem a hidrogén lehet, amely másodlagos energiahordozóként is fontos szerepet kaphat a nehezen dekarbonizálható ágazatok kibocsátáscsökkentésében a jövőben.

A leginkább hangoztatott érv a hidrogén felhasználása mellett annak magas egységnyi tömegre vonatkoztatott energiasűrűsége, amely jóval nagyobb más energiahordozókhoz képest, a fűtőértéke például a hagyományos fosszilis üzemanyagainkhoz mérten akár háromszoros is lehet, amit a 2. táblázat szemléltet. Az ilyen jellegű alkalmazása csökkentheti a szezonális és napi ingadozás mértékét, amelynek köszönhetően jelentősen növelheti az ellátásbiztonságot és a megújuló energetikai technológiák piaci penetrációját a jövőben. Ugyanakkor a magas energiasűrűség előnyét csak speciális kihívást igénylő tárolási technológiák mellett lehet kihasználni, mivel a hidrogénnek alacsony az egységnyi térfogatra vett energiasűrűsége, mint ahogy az 1. ábrán látható (0,09 kg/m³ normális körülmények között) (Mars, 2019). A tárolásának lehetséges módjait a következő, A hidrogén tárolása c. fejezetben mutatom be.



1. ábra - Üzemanyagok térfogatra és tömegre vonatkoztatott energiasűrűsége
forrás: US Department of Energy (DOE)

További előnye, hogy üzemanyagcella-rendszerű felhasználása nem jár CO₂ gáz kibocsátásával, így az ilyen módon történő hasznosítása zéró emissziós megoldásnak tekinthető. Napjainkban a globálisan hidrogénigény teljes mennyiségének megközelítőleg 95%-át fosszilis energiahordozók felhasználásával állítják elő. Valamennyi felhasznált energiahordozó közül a földgázt alkalmazzák a legnagyobb mennyiségben, a teljes előállítás mintegy 68%-a származtatható belőle. A hidrogén iránti igény kielégítésére a teljes földgáz felhasználásának megközelítőleg mintegy 6%-át, a teljes szénfelhasználás mintegy 2%-át fordítják globálisan. A megújuló energiaforrásokból ugyanakkor csak a teljes előállított mennyiség körülbelül 5%-a eredeztethető (I.E. Agency, 2019). A világ teljes hidrogén felhasználása 2019-ben 70 millió tonna körül alakult, és a piaci igény dinamikus emelkedést mutat (Ajanovic & Haas, 2018).

Különböző üzemanyagok fűtőérték szerinti összehasonlítása		
Üzemanyagtípusok	Fűtőérték [MJ/kg]	
	Alsó hőérték	Felső hőérték
Komprimált Hidrogéngáz	119,96	141,88
Cseppfolyósított hidrogén	120,04	141,77
Földgáz	47,13	52,21
Cseppfolyósított földgáz	48,62	55,19
Komplex gázkeverékek	46,89	50,94
Nyersolaj	42,68	45,53
LPG	46,6	50,14
Hagyományos gázolaj	43,44	46,52
RFG	42,34	45,42
Hagyományos dízel	42,78	45,76
Kénszegény dízel	42,6	45,56
Barnaszén	22,73	23,96
Feketekőszén	26,12	27,26
Kokszolószen	28,6	29,86
Metanol	20,09	22,88
Etanol	26,95	29,84

2. táblázat Különböző üzemanyagok fűtőérték szerinti összehasonlítása
forrás: (Abe et al., 2019)

Napjainkban a figyelem a zöld, azaz megújuló energiaforrásokból származó hidrogén előállítására összpontosul. Ebben a tekintetben a protoncsere-membrános tüzelőanyagcellák napenergetikai és szélenergetikai rendszerekbe történő integrálása optimális megoldást nyújthat a jövőben. Az üzemanyagcellatechnológiát a hidrogén felhasználásáról szóló fejezetben mutatom be.

2.3. A hidrogén előállítása

A hidrogén több forrásból és számos módszerrel is előállítható, történhet szénhidrogénekből, vízből, de bizonyos esetekben akár a levegőből is különböző desztillációs eljárások segítségével. Napjainkban a globális hidrogén előállítás túlnyomó része földgázból történik gőzmetán-reformálás (SMR) segítségével. Jelenetős mennyiséget készítenek még kőolajból,

valamint szénből víz-gőz reakciók (gázosítás) segítségével (Kayfeci, 2019). Jelenleg a globális hidrogén előállítás 96%-a az alábbi technológiai megoldásokkal hajtják végre, döntően SMR-technológiával. Az ilyen módon előállított hidrogén a szaknyelv „barna/szürke” hidrogénnek nevezi, utalva a szénhidrogénekből történő előállítására, amely folyamatok során jelentős mennyiségű üvegházhatású gáz keletkezik (Nikolaidis & Poullikkas, 2015). Amennyiben az így keletkező CO₂ gázt csapdába ejtik, úgy „kék” hidrogénről beszélhetünk. Napjainkban egyre nagyobb szerep jut az elektrokémiai hidrogénelőállításnak, mint például az elektrolízis folyamata. Ez a technológiai megoldás döntően megújuló energiaforrásokra támaszkodik, mint a szél, a nap vagy a vízenergia. A szaknyelv az ilyen módon történő hidrogénelőállítást „zöld” hidrogénnek nevezi. Továbbá jelenleg biztató kutatások folynak még a biológiai előállítás lehetőségeinek és technológiájának feltárása kapcsán, amely fontos szerepet kaphat a jövő hidrogéngazdaságának működtetésében is. A következő fejezetekben bemutatom a barna és zöld hidrogén előállításának legelterjedtebb megoldásait, illetve kitérek azon kísérleti technológiákra is, amelyekkel a Visegrádi Együttműködés országainak döntéshozói is számolnak a jövőben. A szürke, kék és zöld hidrogén közötti legfontosabb különbségeket a 2. ábra szemlélteti.



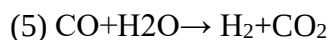
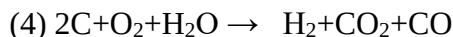
2. ábra Hidrogén előállítása különböző forrásokból
saját szerkesztés

forrás: POSCO CO. (2021), POSCO to Establish Hydrogen Production Capacity of 5 Million Tons

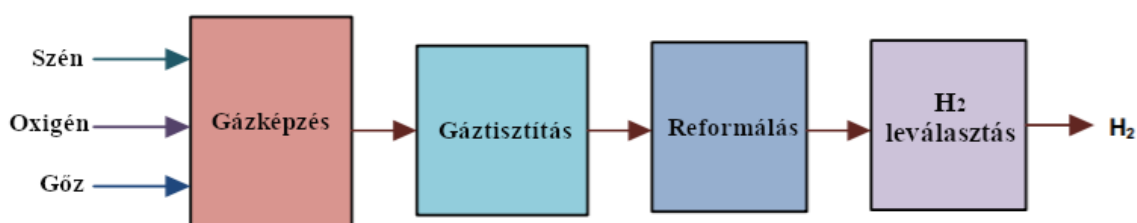
2.3.1. Szénből történő előállítás

A szénből történő előállítás a legrégebbi eljárás, amely segítségével hidrogén állítható elő. Az előállítási folyamat során megközelítőleg 900°C fokra melegítik a szenet, aminek a következtében gázhalmaz állapotúvá válik. Majd a forró gőz és oxigén hozzáadása után, általában nikkel alapú vagy vas-(króm-dioxid)-(tórium-dioxid) katalizátoron vezetik keresztül. Végül a kapott szintézisgázt reformálják (4). A folyamat a 3. ábrán ismertetem. A folyamat

végén szénmonoxid is keletkezik, ezért preferenciális CO-oxidációra lehet szükség (5) (Nicola et al., 2008).



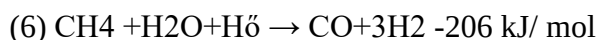
A szén gázosítása már egy közel két évszázada alkalmazott technológiai eljárás, így érett eljárásnak tekinthető (Lin, 2002). Fontos szerepe volt a múltban az úgynevezett városi gáz előállítása során, ilyen üzem volt például az Óbudai Gázgyár is. Ugyanakkor a hidrogén előállításának vonatkozásában nem a legelőnyösebb eljárás, ugyanis magas hőmérsékletet igényel, illetve jelentős üvegházhatású gáz kibocsátással jár.

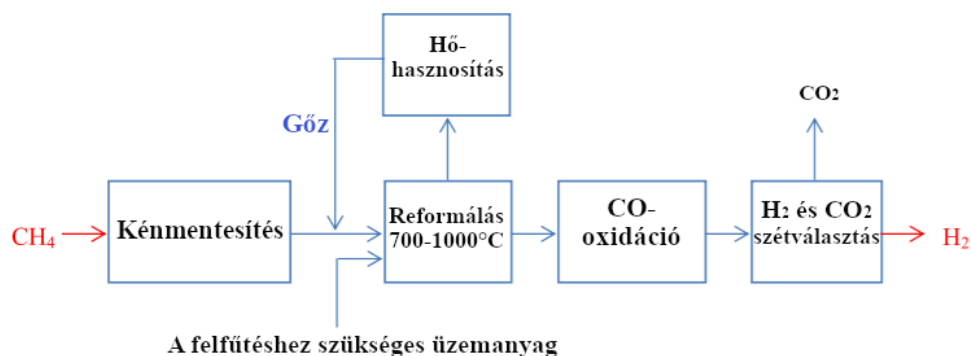


3. ábra-A hidrogén előállításának folyamata széngázképzés útján
saját szerkesztés
forrás: Kayfeci et al, 2019

2.3.2. Földgázból történő előállítás

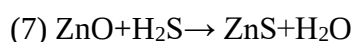
Napjainkban a hidrogén előállításában leggyakrabban alkalmazott és legelterjedtebb technológia a katalitikus gőzreformálás. Az eljárás során bizonyos energiahordozókból jellemzően földgázból nagy tisztaságú hidrogént és széndioxidot nyerhetünk (6). Ahhoz, hogy a folyamat megfelelően végbemehessen 700-1000 °C és 3-25 bar biztosítása szükséges (Oertel et al., 1987). Bár az eljárást széleskörűen a földgáz esetében alkalmazzák általában hidrogén előállításának céljából, de más alapanyagok esetében is alkalmazható, mint például a metanol, etanol, LPG és a Fischer Trapsch szintézis valamennyi alapanyaga. A földgáz tömegének megközelítőleg 25%-át alkotja a hidrogén (Kayfeci et al, 2019). A folyamatot a 4. ábrán szemléltetem.



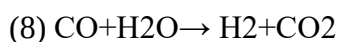


4. ábra- A földgázból történő hidrogénelőállítás folyamata
saját szerkesztés
forrás: Nikolaidis & Poullikkas, 2017

Az endoterm reformáló eljárás előtt minden esetben szükséges a technológiai áram kéntelenítése, mivel a reformálási eljárás során használt Co-NI katalizátorok érzékenyek a kénre. A leggyakrabban alkalmazott kéntelenítési eljárás az aktív szénen történő adszorpció, vagy a ZnO-val történő reakció (7) alkalmazása (Kalamaras & Efstathiou, 2013). A folyamat a következő:

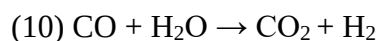
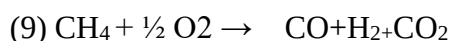


Az ilyen módon reformált gáz ugyanakkor szénmonoxidot tartalmaz, ezért egy másodlagos reformálási eljárásra is szükség lehet a CO hidrogén és CO₂-re történő átalakítása miatt, ezzel növelve a hatékonyságot (8).



2.3.3. Parciális oxidáció fosszilis üzemanyagokból

A parciális oxidáció egy olyan katalitikus eljárás, amely során a metánból és számos egyéb fosszilis üzemanyagból szintézisgáz állítható elő. A szintézisházból pedig a fentebb ismertetett gőzreformálással hidrogén állítható elő. A folyamat érdekessége, hogy amíg 950 °C esetén katalizátor szükséges a kémia reakció bekövetkezéséhez (CPOX), 1150-1315 °C esetén nincs szükség katalizátor jelenlétére (POX). (Nikolaidis & Poullikkas, 2017). Az ilyen módon keletkező szintézisgáz hidrogént, szénmonoxidot és széndioxidot tartalmaz (8). A CO jelenléte miatt itt is célszerű egy másodlagos reformálás közbeiktatása (9).

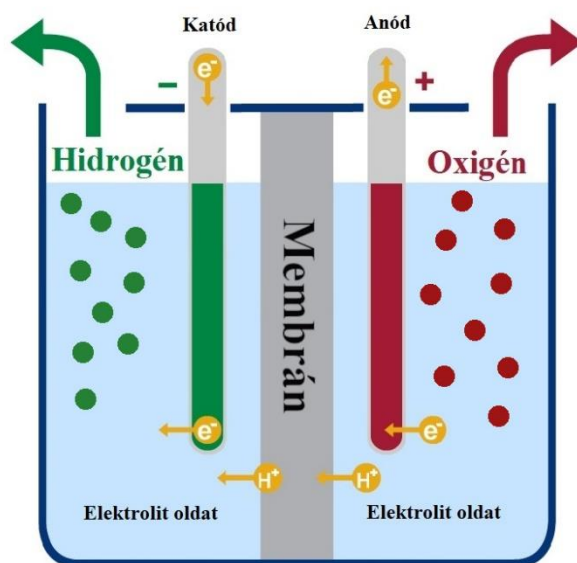


Ezen eljárás során is szükséges az alapanyag kéntelenítése 950 °C esetén a katalizátorok kénérzékenysége miatt. A kénmentesítés és a megfelelő hőmérséklet elérése esetén tiszta

oxigén hozzáadása szükséges. (S. Freni et al., 2000). A folyamat alkalmazható például a kőolajból és a finomított származékaiból történő hidrogénelőállításra (Dufour et al. 2011).

2.3.4. Elektrolízis

A hidrogénelőállítás egy másik lehetséges módja a víz elektrolízise (5. ábra). Ezen módszer esetén elektromos áramot vezetnek a vízbe (H_2O), amelynek következtében a vízmolekula alkotóelemire bomlik, így hidrogén (H_2) és oxigén (O_2) keletkezik. A víz elektrolízise során a katódon mindig gáz halmazállapotú hidrogén, az anódon pedig oxigén keletkezik, 2:1 arányban. A fentebb említett elektrokémiai folyamathoz csupán víz és elektromos áram szükséges, amely során 99,999 %-os tisztaságú hidrogén és oxigén keletkezik (Shafie et al., 2019).



5. ábra Az elektrolízis egyszerűsített folyamatábrája
forrás: Wood Mackenzie Ltd. (2019), *The future for green hydrogen*, saját szerkesztés

Az elektrolízis folyamatának felfedezése William Nicolson és Sir Anthony Carlisle nevéhez fűződik. Az ő eredményeiket felhasználva alkotta meg később August Wilhelm von Hoffman német kémikus a Hoffman-féle vízbontó készüléket. Ahogy a hidrogén ipari felhasználása növekedett, úgy szorult háttérbe az elektrolízis, mint eljárás az ipari előállítás során, és vált uralkodóvá az STR technológia, amelynek okai a kedvezőbb előállítási költségekben keresendők. A technológiai fejlődésnek és az egyre szigorodó környezetvédelmi irányelveknek köszönhetően az elektrolízissel előállított hidrogén versenyképes és gazdaságos alternatívát jelenthet a hagyományos előállítással szemben (Mcugh, 2005). Ugyanakkor a technológia nagyüzemi szintű alkalmazásához jelentős mennyiségű vízre is szükség van. A korlátozott vízkészletű országok esetében ezen erőforrás rendelkezésre állása limitáló tényező lehet.

Napjaink a hidrogén termelésének csupán 4-5%-a megy végbe ilyen módon. Ideális esetben 1 kg hidrogén előállításához 39 kWh áramra és 8,9 liter vízre van szükség. Az elektrolízis folyamatának hatékonysága megközelítőleg 56-73%-os, amely elmarad az STR technológia hatékonyságától, ugyanakkor a megújuló energiaforrásokkal történő kombinált alkalmazása esetén sokkal környezetkímélőbb technológia lehetőség (Lampert et al., 2016).

2.3.5. Magas hőmérsékletű elektrolízis

A technológiai eljárás hasonló elven működik, mint az imént ismertetett elektrolízis, ugyanakkor kihasználja azon körülményt, amely szerint az elektrolízis energiaigénye alacsonyabb magas hőmérsékleten. Ilyen módon a hidrogén előállításához kevesebb energia szükséges, és nagyobb hatékonyság érhető el (Wang et al, 2014). A technológiai megoldás alkalmazása ideális lehet például a napenergiából történő hidrogén előállítás során, geotermikus rendszerek és elektrolizálók kombinálása esetén, de a hagyomány SMR technológiai eljárás során keletkező hő is hasznosítható ilyen módon (Ni et al, 2007). A magas hőmérsékletű elektrolízis biztosításához a nukleáris erőművek hulladékhője ugyancsak alkalmas lehet.

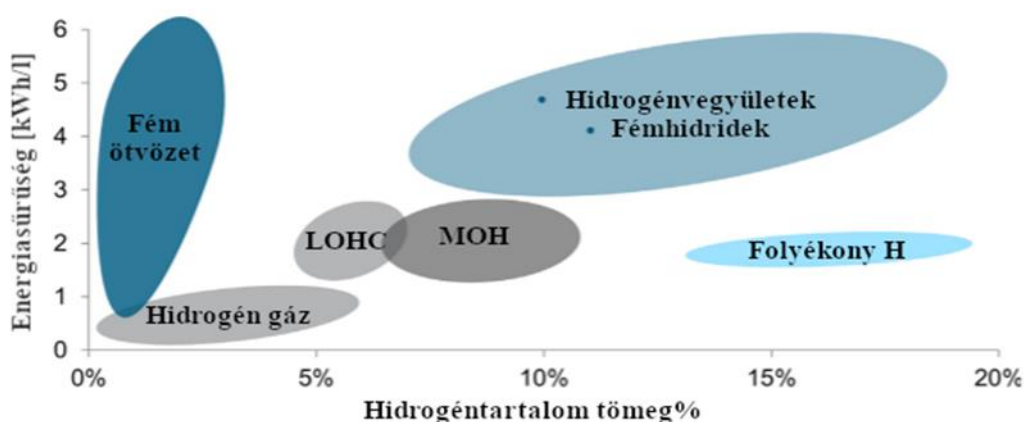
2.3.6. Termokémiai hidrogén előállítás

A magas hőmérsékletű elektrolízishez hasonlóan itt is kulcsfontosságú a magas hőmérséklet biztosítása. A koncentrált naperőművek, vagy nukleáris reaktorok hulladékhőjének hasznosításával emissziómentes, fenntartható módon állíthatunk elő hidrogént és oxigént vízből. A folyamathoz ugyanakkor 2000 °C fölötti hőmérséklet és cérium-oxid vagy réz klorid hozzáadása szükséges (Steinfeld, 2002). Továbbá a technológia alkalmazásával lehetőség nyílna megállítani az atomenergetikai kapacitások fokozatos háttérbe szorulását. Sok esetben, az egyébként tökéletesen működőképes erőművek leállítása és költséges szétszerelése nem feltétlen a legelőnyösebb megoldás, amennyiben más alternatív funkciókkal új szerepek ellátására is alkalmasak lehetnének (Major, 2020).

Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma ezért több kutatást is folytat a nukleáris erőművek gazdaságos hasznosításának kérdéskörében. A kutatások rávilágítottak az atomerőművek hidrogéntermelésbe történő bekapcsolásának lehetőségére. Az ilyen jellegű hibrid, azaz mind hidrogén, mind villamosenergia termelésre alkalmas erőművek már gazdaságosan elégíthetnék ki az ipari és hálózati igényeket, és jól integrálhatóak lennének a megújuló energiaforrások mellé a jelenlegi energetikai rendszerinkbe. Nem utolsósorban hatékonyan hozzájárulnának a klímavédelmi céljaink eléréséhez (Kramer, 2020).

2.4. A hidrogén tárolása

A zöld hidrogén üzemanyagként történő alkalmazásának egyik fő kérdése a szállítás és tárolás megvalósítása. A tárolási infrastruktúra és eszközpark kialakítása során figyelembe kell venni, hogy a kisebb mennyiségű hidrogén elhelyezésére alkalmas mobil tárolóeszközök épp úgy szükségesek, mint a nagyobb tárolási volumenű stacionárius tározók. Mint már fentebb említésre került a hidrogén erősen robbanásveszélyes, az egységnyi térfogatra vetített energiasűrűsége pedig alacsony (Personen & Alakunnas, 2017). A tároláshoz és szállításhoz cseppfolyósítani vagy sűríteni szükséges.



6. ábra Különböző hidrogéntárolási technológiák összehasonlítása energiasűrűség és hidrogéntartalom szerint.

LOHC- Folyékony organikus hidrogénszállító, MOH- Fémorganikus anyagok

forrás: Reuß et al. (2017). Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model, Applied Energy., saját szerkesztés

2.4.1. Komprimált hidrogéngáz

Jelenleg a legelterjedtebb technológia a komprimált gáz formájában, nagy nyomás alatt történő tárolása. A jelenlegi üzemanyagcellák kifogástalan működéséhez a hidrogénnek minden esetben nyomás alatt kell lennie, 35 MPa (350 bar) és 70 MPa (700 bar) közötti értéken. Ennek megfelelően a jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható hidrogén meghajtású járművek üzemanyagtartálya 350 vagy 700 bar nyomáson tárolja a hidrogéngázt. A járművekhez szükséges infrastruktúra kialakítása is ennek figyelembevételével került kialakításra (Personen & Alakunnas, 2017). A rendkívül könnyű súly és a nagynyomású tárolás miatt fennáll a veszélye az esetleges szivárgásból adódó balesetek bekövetkezésének. Mivel a fémekre metallurgiai szempontból kedvezőtlen hatású, így a jelenleg legelterjedtebb acél és alumínium tartályokban történő tárolása további kockázatok hordozhat magában.

A szénszálas kompozit tartályok ugyan mérsékelhetik a szivárgásból fakadó biztonsági kockázatokat, illetve a fém tartályoknál kisebb üres tömegük nagyobb mozgásteret biztosíthat az alkalmazás során, azonban a jelenlegi magas költségeikből fakadóan egyelőre csak a közlekedési szektorban alkalmazzák ezt a megoldást (Jorgensen, 2011). A 7. ábrán látható egy a Toyota által kifejlesztett üzemanyagtartály.



7. ábra Szénszálas kompozit hidrogéntartály a Toyota Mirai gépjárművekhez
forrás: Brindusescu, G. (2018). Toyota FCV Hydrogen Tanks are Bulletproof, Autoevolution.

2.4.2. Nagyléptékű hidrogéntárolás

A kutatók és mérnökök egyéb tárolási lehetőségeket is kutatnak, amelyek gazdaságosak és praktikusak lehetnek a tárolás szempontjából. Amennyiben a hidrogént nagy mennyiségben, hosszú időn keresztül szükséges tárolni, kézenfekvő megoldás lehet az erre alkalmas földalatti geológiai képződmények hasznosítása, mint például a sókupolák barlangjai, amelyeket az 8. ábra A) részében szemléltetnek. Az ilyen felszín alatti geológiai struktúrák ideálisak lehetnek a hidrogén tárolására, ugyanis nagy nyomás esetén is áthatolhatatlanak, így elejét vehetik szivárgások kialakulásának. Ilyen módon a szélsőséges, felhős napokon, amikor a megújuló energiaforrások termelési kapacitása visszaesik, lehetőség nyílna a hidrogén kitárolására és üzemanyagcellák vagy kombinált ciklusú erőművek segítségével a kieső kapacitások pótlására (Deveci, 2018).

Ugyanakkor azon országoknak sem kell lemondani a hidrogén ilyen jellegű tárolásáról, amelyek nem rendelkeznek a fentebb leírt geológiai struktúrákkal. Egy meghatározott térfogatszázalékig (elméleti maximum 40-50%) tárolhatnak hidrogént a már kitermelt mezőkből átalakított gáztározókban is (8. ábra B, rész). Ugyanakkor az ilyen jellegű tárolás során számos komplikáció léphet fel, amennyiben a hidrogén reakcióba lép a tározóban lévő egyéb ásványi anyagokkal, például a kénnel.

Ezen reakciók következtében a reakciótermékek elzárhatják a tározó pórustereit is. A megfelelő technológiai eljárások kidolgozásához még további kísérletek szükségesek a jövőben (Bünger et al., 2016). Napjainkban hazánkban is ilyen jellegű kísérletek folynak az MVM csoport Kardoskúti gáztározójában (Gidai, 2021).



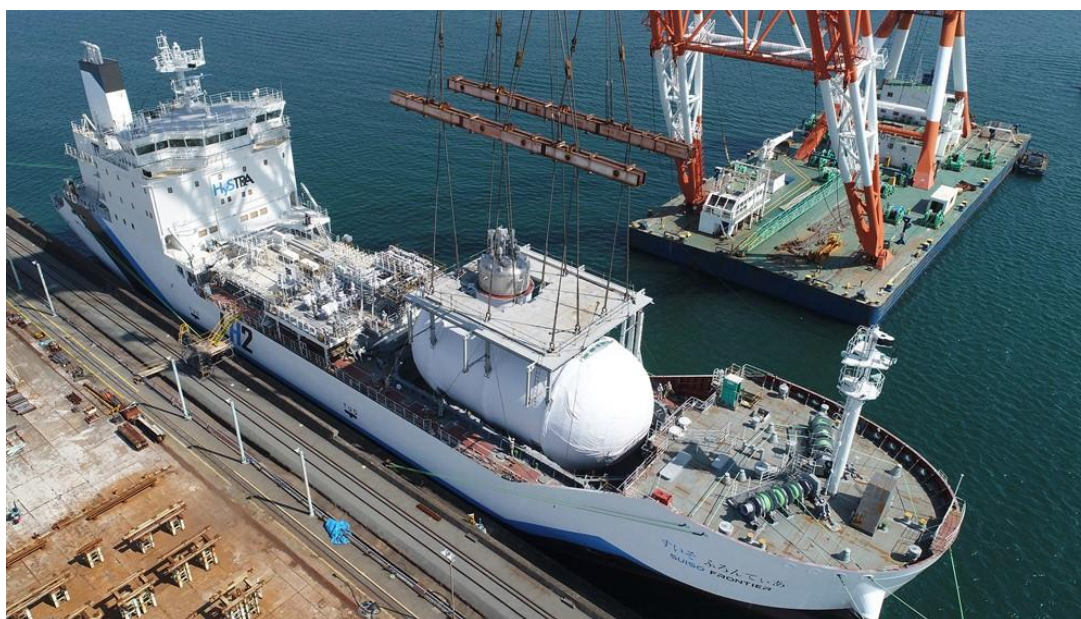
8. ábra A: Energiahordozók tárolása sóbarlangokban
 Forrás: DEEP-KBB GmbH., Room for energy and new ideas, saját szerkesztés
 B: Hidrogén kitárolása és hasznosítása
 Forrás: DEEP-KBB GmbH., Utilising depleted reservoirs structures, saját szerkesztés

2.4.3. Cseppfolyósított hidrogéntárolás

A hidrogén tárolásának másik lehetősége a kriogén folyadék formájában történő tárolás, amely eljárással a jelenlegi technológiai színvonal mellett a legmagasabb sűrűség érhető el. A cseppfolyósított hidrogéngáz sűrűsége 71g/l, forráspontja pedig -272,15 °C. Ez a sűrűség mintegy 1,8-szor magasabb, mint a 70 MPa-n (700 bar) tárolt komprimált hidrogéngáz (Midilli et al. 2005). Ugyanakkor ezen tárolási eljárás számos hátránnyal is rendelkezik.

A rendkívül alacsony forrásponti hőmérséklet miatt folyamatos hűtést igényel, ami egyrészt energiaigényes, másrészt pedig a hatékony hűtési technológiai bonyolultságából fakadóan igen költséges megoldásnak tekinthető. A hőszivárgás minimalizálása érdekében kettős falú, különleges acélötvözetből készült, kriogén tartályok és fejlett hőszigetelési eljárások alkalmazása szükségesek ezen tárolási technológia használata során. A cseppfolyósított hidrogéngázt a fentebb említett okok miatt leginkább speciális mérnöki, ipari területeken alkalmazzák, ilyen terület például az űrhajózás, különböző labordiagnosztikai eljárások, de várhatóan a polgári repülésben is szerepet kaphat (de Jongh& Adelhelm, 2010).

Érdemes még megemlíteni, hogy 2019.-ben bocsátották vízre a világ első, folyékony hidrogén szállítására képes tankerhajóját. Nevét a vízrebocsátás helyszínéül szolgáló Kobe -városáról kapta, a tervező vállalat pedig a Kawasaki Heavy Industries volt. A tanker alkalmas $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten, azaz folyékony halmazállapotban hidrogént. Mivel a jármű csupán 1.250 m^3 cseppfolyós hidrogéngáz tárolására alkalmas, ezért csak demonstrációs projektnek tekinthető, mégis fontos állomása az interkontinentális hidrogénszállítás kialakulásának (KHI, 2019).



1. ábra A világ első folyékony hidrogént szállító tankerhajója

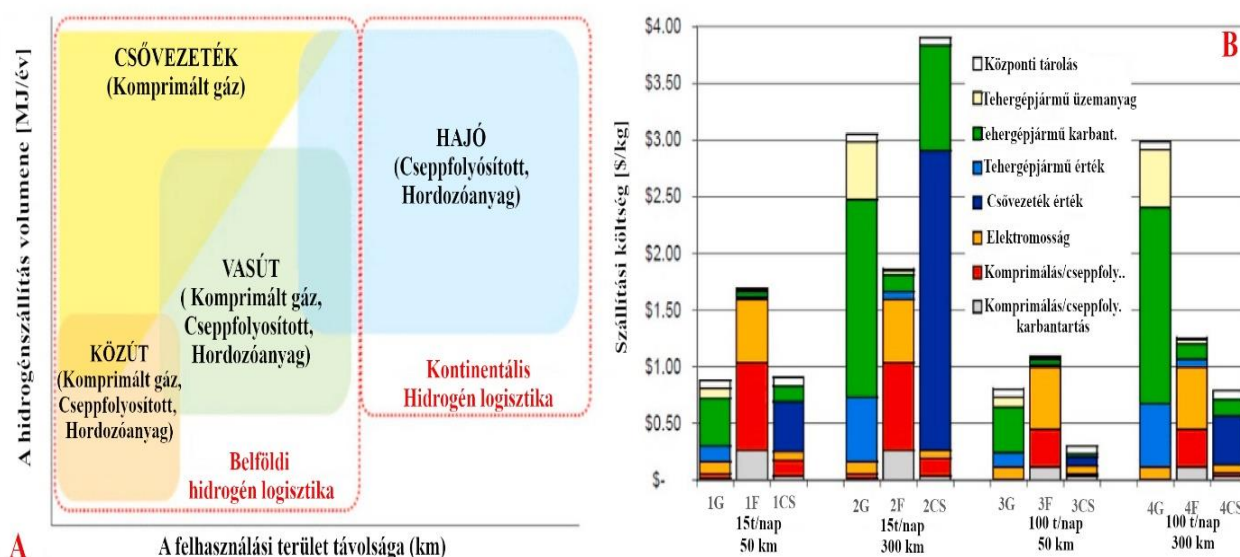
forrás: Bahtić, F. (2021), KHI gets ClassNK's AiP for world's largest liquefied hydrogen carrier CCS

2.4.4. Kísérleti tárolási technológiák

Jelenleg ígéretes kutatások folynak egyéb, innovatív tárolási módszerekkel kapcsolatban. Ilyen megoldás lehet a hidrogén ammóniává, etanollá történő átalakítása, vagy a fémorganikus anyagok, fémhidridek formájában történő tárolása (Suri & Siddique, 2019). Napjainkban számos kutatás foglalkozik a szilárdfázisú hidrogéntárolók kérdéskörével. Az elképzelés alapját az adja, hogy bizonyos szilárd anyagokban, fémötvözetekben elnyelethető a hidrogén. A hidrogén elnyeletésével pedig még a folyékony állapotnál is nagyobb sűrűség érhető el (Russman&Dahari, 2016).

2.5. Hidrogén ellátási lánc

A zöld hidrogén másodlagos tüzelőanyagként történő felhasználásának egyik legnagyobb kihívása a szállítás biztosítása, amely nehézség a hidrogén robbanásveszélyes profiljából, illetve alacsony térfogati energiasűrűségéből eredeztethető. A cseppfolyósítással ugyan a térfogati energiasűrűség problémája hatékonyan orvosolható, azonban az eljárás összetettsége és az ebből adódó magas költségek miatt mégsem tekinthető minden esetben optimális megoldásnak. A szállítás jellegéből adódóan különféle módszerek és technológiai megoldások kombinált alkalmazására lehet szükség, amelyek az áthidalni kívánt távolság függvényében lehetnek közúti, vasúti, vízi és csővezetékes megoldások (Suri & Siddique, 2019). A 9. ábra a szállítás különböző lehetőségeit mutatja be a szállítani kívánt hidrogén volumene és a költségek, illetve távolság függvényében. Mint ahogy a 9. ábra A) részénél látszik, a kontinensek közötti nagy távolságú szállítás tekintetében a vízi szállítás módszer a javasolt, a hidrogén cseppfolyósított, vagy az egyelőre még csak kísérleti stádiumban lévő hordozóanyagok alkalmazásával. A rövid és középtávú, belföldi szállítások esetén más módszerek, eljárások alkalmazása lehet célszerű a jövőben, mint ahogy a 9. ábra B) részénél is látható, a 300 km-ert meghaladó távolság esetén a csővezetékek alkalmazása a leghatékonyabb eljárás, ugyanakkor ez függ a szállítani kívánt mennyiségtől is (Jang&Ogden, 2007).



9. ábra A)-A hidrogénszállítás lehetséges eszközei a volumen és a távolság függvényében
 forrás: Song et al. (2020) Assessment of hydrogen supply solutions for hydrogen fueling station: a Shanghai case study., *Int. J. Hydrogen Energy.*, saját szerkesztés
 B)-A hidrogén szállítási költségei a szállításitechnológia és távolság függvényében
 forrás: Jang C., Ogden J. (2007). Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode, *Int. J. Hydrogen Energy.*, saját szerkesztés

A közelmúltban jelentős érdeklődés figyelhető meg a hidrogén már meglévő gázhálózatban történő szállítása vonatkozásában. Az ilyen irányú kutatások és technológiai fejlesztések a hidrogéngazdaság felé vezető út egy közbenső állomásai lehetnek a jövőben, elősegíthetik a technológia piaci penetrációját és a hidrogénipar fejlődését. A konvencionális gázvezetékek ugyan alkalmasak arra, hogy egy meghatározott térfogatszázalékban a földgázhoz keverve továbbítsák a hidrogént. Ez a mennyiség a jelenlegi kísérletek alapján 5-15% között teszi lehetővé a hidrogén bekeverését. Napjainkban a maximálisan bekeverhető mennyiség országonként eltér. Ugyanakkor az ennél nagyobb mennyiségű továbbítása a gázhálózatban jelentős kockázatokat hordozhat magában. Az acélszerkezetbe történő hidrogén permeáció a mechanikai tulajdonságok romlásához, szubkritikus repedések megjelenéséhez vezethet, amely nem várt műszaki meghibásodások forrása lehet a jövőben (Cerniauskas et al., 2020).

A földgáz hálózat részleges átalakítása ugyanakkor költséghatékonyabb megoldás lehet a kezdetekben, mint egy teljesen különálló, új hidrogénhálózat kiépítése. Mivel a szén fokozatosan kivezetésre kerül az országok energiamixéből, így a földgáz és megújuló energiaforrások súlyának növekedésével kell számolni. Célszerű olyan gázhálózatot érintő fejlesztéseket végrehajtani, amelyek egyrészt képesek kielégíteni a megnövekedett földgázfelhasználás által támasztott igényeket, másrészt az esetleges megújuló energiahordozókból termelt zöldhidrogént is képesek továbbítani hidrogénnel kevert földgáz azaz HCNG (hydrogen compressed natural gas) formájában (Bo et al. 2019).

A földgázba történő bekeverés ugyanakkor nem csak az alapvető gázipari infrastruktúrára nézve kíván meg bizonyos jellegű módosítások, hanem a felhasználási oldalon is. A háztartási készülékekben 10%-os térfogatszázalékig feltehetően még nem okoz problémát, viszont ennél magasabb mennyiségben már módosítások szükségesek a biztonságos használat érdekében. Az előkeverés nélküli égőkkel működő berendezések, mint például a kazánok és kemencék, illetve a gázturbinák, gázmotorok esetében viszont valószínűleg kisebb mennyiség esetén is szükség lesz fejlesztésekre. A CNG tartályok esetében pedig már 2% fölötti hidrogéntartalom is anyagkárosodást okozhat a tartály anyagában (Galyas, 2018).

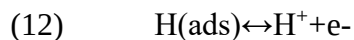
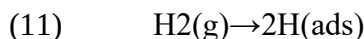
2.6. A hidrogén felhasználása

A hidrogén alkalmazása, mint ígéretes, szekunder energiahordozó már egy régóta kutatott terület, ugyanakkor a technológia kiforratlansága a közelmúltig nem tette lehetővé a gyakorlati megjelenését a mindennapjainkban. Manapság már számtalan vezető energetikai vállalat és kutató gondolja úgy, hogy a hidrogén nélkülözhetetlen lesz majd a jövő emissziómentes és fenntartható energiarendszerében. Fontos szerepet játszhat a megújuló energiaforrások által termelt energia tárolásában és szállításában akár nagy távolságokra is. Továbbá hatékonyan járulhat hozzá az ipar, a közlekedés és az energiaszektor dekarbonizálásához, amely szektorok jelenleg a globális CO₂ kibocsátás mintegy kétharmadáért tehető felelőssé (Ball & Weeda, 2015; Samsatli et al., 2016).

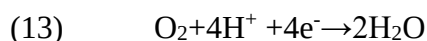
A hidrogén hatékonyan alkalmazható a közlekedési szektor minden területén. Környezetbarát, emissziómentes meghajtást biztosíthat a személy és tehergépjárművek, buszok, vonatok, vízi járművek és repülőgépek esetében is. Az előzetes becslések szerint a gépjárművek száma 2050-ig 2,5 milliárdra fog nőni, amely jelentős környezeti terhelést és a légszennyezés súlyosbodását okozhatja a városokban (Staffel et al. 2019.) A hidrogénmeghajtású járművek hatékonyan csökkenthetik a környezetszennyezést és a légszennyezést. Utóbbi egyre súlyosabb méretek ölt napjainkban, és jellemzően a nagyvárosok lakosságát sújtja. A légszennyezés következtében kialakuló megbetegedések felelnek a városi lakosság idő előtti elhalálzásának jelentős hányadáért, ezért ezen szennyezés csökkentése kulcsfontosságú jelentőséggel bír a jövőben (EEA, 2020). Üzemanyagként történő alkalmazása esetén alapvetően két módszert különböztethetünk meg. A hidrogént lehetséges közvetlenül elégetni a megfelelő átalakítású belső égésű motorokban, ugyanakkor ezen technológia megoldás alacsony hatékonysággal bír, és a környezet számára káros vegyületek keletkezésével, mint például a nitrogén-oxidok (NO_x) jár, ezért nem terjedt el igazán. A földgáz és dízel üzemű gépjárművek esetén lehetőség van az üzemanyaghoz is hozzáadni a hidrogént egy bizonyos csekély mennyiségig, amely a régebbi típusú belsőégésű gépjárművek esetében átmenetileg hasznosnak bizonyulhat. A leghatékonyabb megoldás ugyanakkor, hogy üzemanyagcella segítségével villamosenergiát állítunk elő, amely segítségével a jóval hatékonyabb és teljesen emissziómentes elektromos hajtásláncot működtetjük. Az ilyen típusú gépjárműveket FCEV, azaz üzemanyagcellás elektromos járműveknek nevezzük, amelyek esetében napjainkban protoncsere membrános (PEM) üzemanyagcellát és tisztán elektromos hajtásláncot használnak (Hart et al., 2015; Pollet et al., 2012).

Napjainkban az üzemanyagcellák (tüzelőanyagcellák) az elektrokémiai áramforrások harmadik legnagyobb csoportját képviselik az akkumulátorok és primer cellák (elemek) után. Szerkezetüket, felépítésüket tekintve jelentős hasonlóságot mutatnak a fentebb említett két csoporttal, ugyanis anódból, katódból és az őket elválasztó elektrolitból állnak. A legfőbb különbséget az jelenti, hogy nem a már meglévő energiát tárolják el, hanem a beléjük tárolt üzemanyagból (tüzelőanyag) közvetlenül áramot termelnek. Jelenleg számos különböző üzemanyagcellatípus van forgalomban, amelyek, mind felépítésükben, mind a működésükhöz szükséges üzemanyagfajta tekintetében is különböznek (Inzelt, 2004). Napjainkban az úgynevezett protoncsere membrános üzemanyagcellák alkalmazása számít a legnépszerűbb megoldásnak. Az ilyen típusú üzemanyagcellák előnye, hogy jól viselik az állandó ki és bekapcsolásokat, amely tulajdonságra a közlekedés során szükség is van. Hátrányuk ugyanakkor, hogy a katalizátor anyagát alkotó keverék platinát tartalmaz. A platinacsoportba sorolható fémek igen népszerűek számos ipari és orvosi területen. E fémek felhasználásával készülnek például a hagyományos belsőégésű motorok katalizátorai, számos orvosi implantátum, de a nagy szilárdságú hőálló ötvözetek készítésénél is fontos szerepe van. Az ilyen széleskörű felhasználás következtében meglehetősen drága, a kitermelést biztosító bányák túlnyomó részén pedig csupán egy maroknyi ország osztozik (Cordelia, 2008).

A protoncsere membrános üzemanyagcellákban (PEM) a hidrogén (H_2) az üzemanyag és az oxigén (O_2) tölti be az oxidálószer szerepét. Az anódon lejátszódó cellareakciót elektrokémiai egyenletekkel írhatjuk le a következő módon: Először a hidrogén a katalizátor felületén adszorbeálódik (11) amely esetünkben a platina, majd egy gyors elektrokémiai reakció során oxidálódik (12).



A folyamat során a protonok az elektroliton keresztül a katódhoz vándorolnak ionos vezetés formájában. Ezután egy a katódon lejátszódó cellareakció következik, az oxigén redukciója (13), ez a cellareakció ugyancsak a platina alapú katalizátor felületén játszódik le. A folyamat végterméke víz, illetve elektromos- és hőenergia lesz, amely biztosítja a hidrogénnel működő eszközök energiaellátását (Inzelt, 1999).



A közlekedés dekarbonizációja szempontjából kulcsfontosságú a személy és tehergépjárművek kibocsátás csökkentése. Napjainkban ezen gépjárművek felelősek a közlekedési szektor károsanyag kibocsátásának körül belül feléért. Az FCEV típusú járművek magas ára nem teszi lehetővé a nagyszámú elterjedést, ezzel pedig az ágazat károsanyag kibocsátásának korrekcióját, ugyanakkor az utóbbi években a szükséges üzemanyagcella technológia ára meredek zuhan, amely bizakodásra adhat okot a jövőre nézve. A platina, mint katalizátor kulcsfontosságú szerepet játszik a technológia költségei szempontjából. Az elmúlt évek során számos jelentős előrelépés történt a katalizátorok platinatartalmának csökkentése érdekében, ezáltal csökkent az előállítási költség, amely lehetővé teszi az olcsóbb, megfizethető FCEV járművek elterjedését a jövőben (Stephens et al., 2016).

A hidrogén további potenciális alkalmazási területei közé tartozhat a közlekedési szektoron belül a vasúti alkalmazás. Bár a dízel típusú vonatokat már a legtöbb helyen korszerűbb és környezetkímélőbb villamosvonatokra cserélték, még napjainkban is vannak olyan, csak igen költségesen villamosítható vonalak, ahol a hidrogénmeghajtás kézenfekvő megoldás lehet a jövőben (Logan et al., 2020). Napjainkban Angliában és Németországban már zajlanak azoknak a kísérleti szerelvényeknek a fejlesztései, amelyek a hidrogén meghajtású vasutak első generációját fogják jelenteni (Patel, 2021). A másik ígéretes felhasználási terület a vízi közlekedés, ezen belül is a tengeri szállítmányozás. Ezen nagyméretű hajókon bőséges hely áll rendelkezésre a hidrogénes rendszerek kiépítésére, és a kikötői infrastruktúra is költséghatékonyan átalakítható ezen eszközök meghajtásának kiszolgálására. Vélhetően a teherhajók fontos szerepet játszanak majd a kontinentális hidrogén logisztika működtetésében is (Atilhan et al., 2021).

A repülés esetében is folynak kutatások a hidrogéntechnológia vonatkozásában. A légiközlekedés az egyik legnehezebben dekarbonizálható ágazatok közé tartozik, továbbá az egyik legszennyezőbb a szegmense a közlekedési ágazatnak. Számos kutatás zajlott és zajlik napjainkban is a kibocsátás csökkentés lehetőségeiről. Sajnos a jelenlegi akkumulátorok nem rendelkeznek olyan tulajdonságokkal, amelyek lehetővé tennék a hatékony alkalmazásukat a légiközlekedésben (Baroutaji et al., 2019). Számos nagyobb repülőgépgyártó vállalat dolgozik a hidrogénmeghajtású repülőgépek első generációjának megalkotásán (Airbus, 2021).

Az ipari és lakossági hőszektorban is megjelenhet a hidrogéntechnológiai a jövőben. A hő-és melegvíz felhasználás adja a lakó és kereskedelmi épületek végső energiafogyasztásának 60-80%-át Európában. A kitűzött klímacélok elérése szempontjából kulcsfontosságú a fűtésből származó károsanyag kibocsátások csökkentése (Staffel et al. 2019.) Ugyanakkor a hőszektor

dekarbonizációja meglehetősen nehéz feladat annak összetettsége és szezonalitása miatt, továbbá a szektor szerkezeti felépítése éghajlatonként is igen eltérő lehet. Mivel a lakossági és ipari hőigény naponta és évszakonként is folyamatosan változik, ezért a hőszektornak nagyon rugalmasnak kell lennie napjainkban is. A konvencionális energia hordozók költséghatékonyan képesek biztosítani a szükséges rugalmasságot, ellentétben a megújuló energiaforrásokkal, amelyek jelenleg erre a feladatra nem alkalmasak (Dodds et al, 2015).

A hőszektor dekarbonizációjára ugyanakkor már vannak törekvések, amelyek közül a legfontosabb feladat a hőigény csökkentése. Korszerű szigetelési technológiák és intelligens mérőberendezések alkalmazásával 20%-os kibocsájtás csökkentés is elérhető lenne. A további nagyobb mértékű csökkentés érdekében a hidrogén alkalmazására is lehetőség lenne. A gázvezetékhalózati átalakításával és lakossági PEM üzemanyagcellák alkalmazásával hatékonyan és emissziómentesen lenne lehetőség a hőszivattyúk és a téli csúcsidőszak során a kiegészítő elektromos fűtőtestek energiaellátására (CCC, 2015).

A hidrogén hatása többszempontról is előnyös lehet a villamosenergia ellátás biztosításában is. Az üzemanyagcellák segítségével rugalmasabbá és megbízhatóbbá válhat a termelés, ugyanis a megújuló energiaforrások dinamikus elterjedése miatt a villamoshálózat rugalmasságának biztosítása egyre nagyobb kihívást jelent a szakemberek számára. A hidrogénteknológia hatékony megoldást kínálhat erre a problémára, biztosíthatja a rendszer számára szükséges rugalmasságot, segíthet a kereslet és kínálat kiegyensúlyozásában (Grams et al. 2017). Mivel ezek az egységek bárhol elhelyezhetők, lehetőség nyílik az átvitelből és elosztásból fakadó veszteségek minimalizálása, a villamosenergia hálózat hatékonyságának növelése. Mivel az üzemanyagcellák működése során a villamosenergia mellett hő is keletkezik, így lehetőség nyílik a kombinált alkalmazásukra például a téli csúcsidőszakok leküzdése érdekében, továbbá a megújulók túltermelése esetén a rendszerben keletkező feleslegről hidrogén előállításával lehetőség nyílna a zöld energia eltárolására (Gang &Kwon, 2018).

A hidrogén villamosenergetikai célú hasznosításának másik lehetősége annak közvetlen elégetése a gázturbinás erőművekben. Az ilyen jellegű hasznosításhoz ugyanakkor mindenféleképpen szükség van a turbinák bizonyos szintű átalakítására, amely során érdemes figyelembe venni a hatékonyság kérdését. A hidrogén közvetlen elégetésnek hatékonysága alacsonyabb az elektrokémiai megoldásokhoz képest. Továbbá nem kívánt nitrogén-oxidok kibocsájtásával jár, amely az indirekt üvegházhatású gázok egyike (Chiesa et al. 2005).

2.7. A hidrogén ellátásbiztonsági és geopolitikai aspektusai

Az elmúlt évtized során az energiaszektor fokozatosan egyre komplexebbé, összetettebbé vált. Ennek következtében, a korábbiaknál lényegesen integráltabb ellátási láncok kialakításával jelentősen javult az ellátásbiztonság és az energiahatékonyság. Ugyanakkor a napjainkban tapasztalható integrációnak, az energetikai rendszereink összetettségének az előnyök mellett számos hátrányos oldala is van. Az interdependens energetikai rendszereinknek nagymértékű sérülékenységet mutatnak a komplex ellátásbiztonsági helyzetekkel kapcsolatban, legyenek azok természeti csapások, geopolitikai konfliktusok vagy egészségügyi vészhelyzetek (Takács, 2018).

A 21. században előreláthatólag számos, a közelmúltban látott globális kihívással kell szembenéznie az emberiségnek. Ahhoz, hogy a jövőben elkerülhessük a kiterjedt és súlyos ellátási zavarokat növelnünk kell a rendelkezésre álló energiaforrásokat számát. Az ellátás diverzifikálása jelenti korunk energiabiztonságának alapját, amelyben fontos szerepet kaphatnak a megújuló energiaforrások és egyéb innovatív új technológiai eljárások.

A megújulókból származó villamosenergia árának csökkenése, illetve az előállítási technológia fejlődése következtében egyre nagyobb figyelem vetül a hidrogénre, mint a jövő egyik lehetséges energiahordozójára. Mivel a felhasználása nem jár károsanyagkibocsátással fontos szerepe lehet a klímaváltozás ellen vívott harcban. A fenntarthatósági vonatkozása mellett ugyanakkor a nehezen dekarbonizálható iparágak emissziócsökkentése révén a versenyképességi vonatkozása is jelentős lehet (Hoffmann et al., 2020).

A világ legnagyobb gazdaságai számos ambiciózus bejelentést tettek az iparágat illetően. Az EU már nekilátott a kontinens hidrogéniparának megteremtéséhez, amelynek részleteit a következő fejezetben ismertetem. Ázsiában Japán rendelkezik a legfejlettebb hidrogéntekológia tapasztalattal, a Toyota a közelmúltban vezette be a piacra a világ első hidrogénmeghajtású autójának második generációját (Toyota, 2020). A japán kormány 20 milliárd dollárt tervez befektetni a hidrogéniparába 2030-ig (IEEFA, 2020). Kína is jelentős szerepet szán a hidrogénnek a dekarbonizációs terveiben. A világ második legnagyobb gazdasága 2060-ig szeretné elérni a karbonsemlegességet, amelynek kulcsa a biztonságos és fenntartható energiatárolás. A következő 2025-ig tartó öt éves terv keretében mintegy 35 millió tonnás éves hidrogénfelhasználási szint elérést tűzték ki, már 16 tartományban elkezdtek a szükséges infrastruktúra tervezését és kiépítését (Hu, 2021). Az Egyesült Államok

hidrogéntechnológiai fejlesztései főleg az üzemanyagcellatechnológiákra összpontosítanak, azonban jelenleg is zajlik egy széleskörű kormányzati hidrogénstratégia megalkotása (Balaraman, 2021).

Az állami beruházások mellett a piaci folyamatok is pozitívan járulnak hozzá a hidrogén piaci penetrációjához. A zöld hidrogén előállítása szempontjából nélkülözhetetlen elektrolizálók előállítási költsége megközelítőleg 18-20%-ot csökken évente, amíg a működtetésüket biztosító PV-panelek előállítási költségének csökkenése a 28%-ot is meghaladja. Várhatóan rövidesen megindulhatnak az első energetikai célú szállítások, amelynek következtében a hidrogén egy nemzetközileg keresett stratégia erőforrás lehet a jövőben akár napjaink LNG szállítmányai (Bradshaw & Boersma, 2020)

2.8. Az energiaunió és a hidrogéngazdaság helyzete az Európai Unióban

Napjainkban a 27 országot magában foglaló Európai Unió a világ egyik legnagyobb energiaimportőre. Mivel a tagállamok többsége fosszilis energiahordozókban szegény, ezért a teljes energiaszükségletének több mint felét importból kénytelen fedezni. A már önmagában is kockázatos importfüggőség tényét ugyanakkor tovább súlyosbítja, hogy az energiahordozók behozatalában egy-egy külső ország rendkívül nagy részesedést képvisel, mint például Oroszország (Kengyel, 2010). Az erőteljes külső függőség ugyanakkor csökkentheti az EU geopolitikai pozícióját és versenyképességét a jövőben. Ezért az Európai Tanács 2014 megkezdte az energiaunió koncepciójának kidolgozást a kontinens ellátásbiztonságának biztosítása érdekében. Az energiaunió fő céljai közé tartozik a megfizethető energia biztosítása az ipari szereplők számára, a külső energiabeszerezés diverzifikálása, illetve a károsanyag kibocsátás csökkentése (EC, 2014). A támogató szakpolitika eredményesnek bizonyult, az elmúlt években dinamikusan növekedett a megújuló energiaforrások kapacitása a tagországok energiamixeiben, ám az EU egy még ambiciózusabb elképzelés megvalósításába fogott.

Az Európai Bizottság 2019-ben ismertette a European Green Deal (EGD) elnevezésű elképzelését. A cél, hogy 2030-ig megközelítőleg 50%-kal, majd 2050-ig 100%-kal csökkentsék az EU károsanyagkibocsátását. Mind a 27 tagállam egyetértett a zöld megállapodás céljaival. Ezen nagyvolumenű elképzelés egyik fontos eleme a hidrogén, amelyet az EU az új, emissziómentes energiarendszereink központi eszközének tekint. 2020-ban elfogadásra került a közösség Hidrogénstratégiája. A stratégia a hidrogén megújuló energiaforrásokból történő zöld előállítására és a felhasználáshoz szükséges megfelelő infrastruktúra kialakítását helyezi

előtérbe 2050-ig. Az európai hidrogéngazdaság megteremtését az Unió megközelítőleg 470 milliárd euróval támogatja.

2.9. A Visegrádi Együttműködés energiabiztonsága

Ahogy a 2009-es orosz-ukrán gázkrízis megmutatta, az energetikai összeköttetés kulcsfontosságú szerepet tölt be a magas szintű ellátásbiztonság megteremtésében. A megfelelő összeköttetés hiányában akár a földrajzi értelemben egymáshoz közelebb eső országok sem tudnak hathatós segítséget nyújtani egymásnak egy komplex ellátási nehézség esetén (Szolnoki et al., 2011). Az azóta eltelt több mint egy évtizedben jelentős, az energiabiztonság kérdését szem előtt tartó infrastrukturális fejlesztések zajlottak le térségünkben. Napjainkban már nem az összeköttetés jelenti a fő kihívást, hanem az ellátási portfólió diverzifikációjának megteremtése. A visegrádi tagországok közül Magyarország és Szlovákia energiafüggősége a legsúlyosabb, különösen a földgáz tekintetében. Bár Csehország és Lengyelország nem tartozik a legsérülékenyebb európai országok közé, azonban a szén energiamixből történő kivezetésével az energiafüggőség kérdése vélhetően súlyos probléma lesz a jövőben (Zgut et al., 2017).

A Visegrádi Négyek előtt álló egyik legnagyobb kihívás a jövőben az energiafüggőségük csökkentése és az energiabiztonságuk megteremtése, amelynek egyik lehetséges eszköze lehet a hidrogén. A hidrogén az ellátásbiztonsági jelentősége mellett nem elhanyagolható gazdasági lehetőségekkel is kecsegtet ezen országok számára. Az együttműködés valamennyi tagországa már foglalkozik a hidrogéngazdaság koncepciójával. A következő fejezetekben bemutatom a visegrádi országok hidrogénstratégiáit, ismertetem a tagországok elképzeléseit a hidrogéniparaik kialakításáról.

2.9.1. Lengyelország hidrogénstratégiája (*Polskiej Strategii Wodorowej*)

Lengyelországban 2021. januárjában kezdődött meg egy széleskörű konzultáció az ország hidrogénstratégiájának megalkotásáról (MKS, 2021). A lengyel hidrogénstratégiai előterjesztés (*Projekt Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r*) szerint a fejlesztések vélhetően két ütemben zajlanak majd a jövőben, az első szakasz megközelítőleg 2025-ig, míg a második szakasz 2040-ig tart. Az első szakaszban meghatározásra kerül az alacsony kibocsátású hidrogéngazdaság kiépítéséhez szükséges nemzeti kompetenciák és technológiák összesége. Továbbá beazonosításra kerülnek a felhasználásának lehetséges célterületei mint például az energetikai, közlekedési és ipari alkalmazás. Megkezdődik az előállítási és disztribúciós hálózatok kialakításához szükséges jogszabályi és finanszírozási

háttér kidolgozása (PSW, 2021). Összeségében elmondható, hogy a fejlesztések ezen szakaszának célja a későbbi beruházások előkészítése és megalapozása.

A fejlesztések második ütemében a hidrogéngazdaság működéséhez szükséges infrastrukturális és termelési kapacitások kiépítése kerül előtérbe. Bár Lengyelország napjainkban a világ 5. legnagyobb hidrogéntermelője, az évente előállított megközelítőleg 1 millió tonna hidrogént jellemzően fosszilis energiahordozók felhasználásával készül. A lengyel kormány hosszútávú célja, hogy a környezetbarát megújuló energiaforrások felhasználásával történjen a hidrogénelőállítás a jövőben. A kormányzat a megújulókhöz kapcsolt elektrolizáló kapacitások mellett fontos szerepet szánna a jövőben az atomenergiának is a hidrogénelőállítás során. A stratégia elképzelés hosszútávú célja, hogy a lengyel gazdaságban megjelenhessen egy új, innovatív hidrogénágazat, amely amellet, hogy lendületet adhat megújuló energiaforrások terjedéséhez, számos új, innovatív munkahelyet is teremthet az országban (PSW, 2021).

A tervezet 6 fő célt jelöl meg a stratégiai célkitűzések teljesüléséhez, amely fő célok a 3. táblázatban láthatóak.

A lengyel hidrogénstratégiai előterjesztés fő célkitűzései	
1. célkitűzés	A hidrogénteknológiák megjelenése az energiaellátásban
	- Kombinált erőművek alkalmazása, 580 Gwh szükséglet kielégítése évente
2. célkitűzés	A hidrogénteknológiák megjelenése a közlekedésben
	- Legalább 2000 db, az országban legyártott hidrogénüzemű busz üzemeltetése
3. célkitűzés	A lengyel ipar károsanyag kibocsátásának csökkentése
	- Legalább 5 úgynevezett "Hidrogénvölgy" kialakítása a fő ipari területeken
4.célkitűzés	A hidrogén előállításához szükséges kaapcítások kiépítése
	- Megközelítőleg 2 GW beépített elektrolizáló kapacitás, 20%-os "zöld" hidrogén arány
5.célkitűzés	A hidrogén elosztásához szükséges infrastruktúra megteremtése
	- Tiszta hidrogén szállítására alkalmas vezetékek kiépítése, meglévő vezetékek fejlesztése
6.célkitűzés	Ösztönző és stabil szabályozási környezet kialakítása
	- A piac működésrészteinek kidolgozása, jogharmonizáció a közösségi szabályozással

3. táblázat A lengyel hidrogénstratégiai előterjesztés célkitűzései
forrás: PSW, 2021

A stratégiai előterjesztés még további 40 intézkedést irányoz elő a kitűzött célok elérése érdekében. A lengyel szakemberek előrelátásáról tanúskodik, hogy az elektrolizálók működéséhez szükséges megnövekedett vízfogyasztást is figyelembe veszik az infrastrukturális tervezés során. Mivel az elektrolizálók működéséhez jelentős mennyiségű vízre van szükség,

ezért a kormányzat széleskörű infrastrukturális beruházásokat tervez a vízhálózat területén is. A döntéshozók azzal számolnak, hogy a szén kivezetése után fontos szerep hárul majd a hidrogénre a lengyel energiabiztonság biztosításában (PSW, 2021).

2.9.2. Csehország hidrogénstratégiája (*Vodíková Strategie České Republiky*)

A Cseh Köztársaság kormánya 2021. július végén hagyta jóvá az ország új hidrogénstratégiát, amely már illeszkedik a közös európai hidrogénstratégiai elképzeléshez (MPO, 2021). A Cseh kormány a hidrogént tartja az egyik legfontosabb eszközének a klímaváltozás ellen vívott küzdelemben. A cseh hidrogénstratégia elemzi a hidrogén előállításának és felhasználásának különböző aspektusait, és prioritásokat fogalmaz meg a Cseh Köztársaság hidrogéniparának jövőbeli fejlődéséhez. A kormányzat a hidrogéngazdaság kiépítését három szakaszban tervezi megvalósítani. Az első 2021-2025-ig tart, a második 2026-2030-ig, majd ezt követi a harmadik befejező szakasz, amely 2031-től 2050-ig tart (VSČR, 2021).

Az első szakaszban a hidrogén közlekedésben történő felhasználása játssza a fő szerepet, ami annak köszönhető, hogy feltételezhetően itt gazdaságosan lehet alkalmazni a kezdetekben. A fő kihívást a hidrogén magas ára és a hidrogénmeghajtású járművek alacsony száma jelenti. Ezért a cseh kormány az első szakaszban a gazdaságosság okán úgynevezett „hidrogénmobilitási szigeteket” hozna létre a hidrogéntermelő helyek közelében, ezzel biztosítva az ilyen jellegű közlekedési eszközök rentábilis működését. Mivel a kormányzat ebben a szakaszban még számol nagy mennyiségű felhasználással, így a továbbításhoz szükséges vezetékhálózat kiépítése sem képezi tárgyát ennek a periódusnak. A hidrogén szállítása valószínűleg még megoldható lesz közúti, vasúti szállítójárművekkel (VSČR, 2021).

A második szakaszban megkezdődhet a hidrogén ipari felhasználásának előkészítése. A felhasználási célterületek kiterjesztése elsősorban attól függ, hogy a hidrogén előállítását biztosító technológiák milyen ütemben fejlődnek. A kormányzat ebben a szakaszban még a konvencionális hidrogénelőállítási technológiák és szén-dioxid csapdázási eljárások alkalmazásával is reálisan számol, ugyanakkor az elsődleges cél a zöld hidrogénelőállítási kapacitások megteremtése, az elektrolizálókhöz csatlakoztatott nagyméretű helyi nap- vagy szélenergiák építésével. Vélhetően ebben a szakaszban még kormányzati támogatásokra lesz szükség a technológia alkalmazása során. Ennek a szakasznak a végén várhatóan megkezdődik a hidrogénvezetékek építése és a már meglévő gázvezetékek átalakítása. A meglévő infrastruktúra átalakítása lehetővé teszi a hidrogén szállítási és elosztási volumenének növelését (VSČR, 2021).

A harmadik szakaszban már a hidrogénelőállításnak és szállításnak már kormányzati támogatások nélkül is életképesnek kell lennie. A kormányzat ebben a szakaszban azzal számol, hogy a hidrogénüzemű járművek megkezdik kiszorítani a belső égésű konvencionális járműveket a piacról. A technológia stabilan megjelenik a cseh energetikai szektorban. Várhatóan elkezdődnek az arra irányuló kísérleti projektek, hogy a háztartásokat is becsatlakoztassák a hidrogénellátási láncba (VSCŘ, 2021).

2.9.3. Szlovákia hidrogénstratégiája (*Národnej vodíkovej stratégie*)

A szlovák kormány 2021. júniusában hagyta jóvá az ország első hidrogénstratégiáját, amely kimondja, hogy Szlovákiának a jövőben jelentős szerepet kell szánnia hidrogén energiahordozóként történő használatára különös tekintettel minden olyan iparágra, ahol az elektrifikáció nem lehetséges, vagy csak nagyon költséges eljárásokkal valósítható meg. A szlovák kormány fontos szerepet szán a hidrogéniparnak ország gazdaságában (TASR, 2021). Bár a szlovák hidrogénstratégiát csak 2021-ben fogadták el, már 2015 óta rendelkezik az ország egy a hidrogéntechológiai nemzeti szervezettel, a nemzeti hidrogénszövetséggel (NVAS). A szervezetet azzal a céllal hozták létre, hogy támogassák a hidrogéntechológiák kutatását, bevezetését és alkalmazását. Napjainkban a NVAS két fő célkitűzéssel rendelkezik. Szakmai szövetséggént kulcsszerepet kíván játszani a hidrogéntechológiák bevezetésében, illetve közreműködik a technológia penetrációt elősegítő támogató szakpolitika kialakításában (NSAV, 2021).

2.9.4. Magyarország hidrogénstratégiája

A magyar kormány 2021. májusában fogadta el az ország első hidrogénstratégiáját. A stratégiában foglaltak alapján a kormányzat elsődleges célja a hazai ipar károsanyagkibocsátásának csökkentése. A hidrogén fontos eszköz lehet a klímapolitikai célok elérésében. A stratégia többek között kitér az előállítás kérdésére is. Napjainkban az ipari alapanyagként felhasznált hidrogént, döntően metánból állítják elő, gőzmetánreformálás útján. A cél, hogy a felhasznált hidrogént tisztán megújuló energia felhasználásával, "zöld" úton állítsák elő a jövőben. A kormányzat vizsgálja a lehetőség annak is, hogy például a paksi erőműből származó energiával állítson elő hidrogént. A dokumentumban hangsúlyos szempont a hidrogénalapú mobilitás fejlesztése is. A Zöld Kamion Program keretében a teherforgalom emissziócsökkentésére 35-40 milliárd forint támogatást irányzott elő a kormányzat. A tömegközlekedés zöldítése is fontos prior lesz a jövőben. A Zöld Busz Program + keretében a helyi léptékű, szállítással összefüggő közszolgáltatások zöldítésére megközelítőleg 10-20

milliárd forintos támogatási összeget irányzott elő a kormányzat (MNH, 2021). A stratégiai terv a szén-dioxid vonatkozásában konkrét célszámokat is tartalmaz. Az előirányzott célszámok szerint az iparban 2030-ra évi minimum 95 ezer tonna CO₂ emissziót kell kiváltani a hidrogéntechnológia alkalmazásával. A dokumentumból az is kiderül, hogy 2030-ig évi minimum 10 ezer tonna zöld hidrogént kell felhasználni a közlekedésben, továbbá el kell kezdeni a hidrogén bekeverését a földgázhálózatba. A bekeverési arány legalább 2%-os, ilyen mértékben kell a hidrogén bekeveréséről gondoskodnia a gázszolgáltatóknak. A cseh kormány által készített hidrogénstratégiához hasonlóan ebben a stratégiában is megjelenik a szigetszerű előállítás és felhasználás koncepciója, amely úgynevezett hidrogénvölgyek kialakítását priorizálja. Az ilyen hidrogénellátási láncok adott földrajzi régiókban való létrehozásának támogatására további 10-15 milliárd forint értékű támogatás lett előirányozva (MNH, 2021).

3. A potenciálbecslési modell

A hidrogéngazdaság irányába történő átmenet során számos kulcsfontosságú regionális és országos döntést kell még meghozni. Várhatóan kiemelt fontosságú kérdés lesz a „zöld” hidrogén előállítására irányuló beruházások esetében az optimális lokációk meghatározása. Ezen célterületek meghatározásához elengedhetetlen az elérhető legjobb technológiai eljárások azonosítása, majd az adott terület termelési szempontú értékelése.

A szakirodalmi áttekintés során számos kibocsátásmentes hidrogénelőállítási eljárás került bemutatásra, ugyanakkor ezen módszerek többsége még kísérleti fázisban van. Napjainkban a zöld hidrogén előállításának egyik technológiailag is elérhető lehetősége a megújuló energiaforrások felhasználásával történő előállítás. A megújuló erőforrásokon belül is különösen a szél és a napenergia esetében vonzó lehetőség azok szakaszos rendelkezésre állása és magas piaci penetrációja okán. Ezért a kutatásom során a nap és szélenergia hasznosítható potenciálját veszem alapul a „zöld” hidrogén előállítási potenciálok meghatározására.

A hidrogén előállításának témakörben korábban már számos tanulmány készült. Touili és mtsai (2018) például Marokkó napenergia vonatkozású hidrogénelőállítási lehetőségeit elemezték. Kudria és mtsai (2020) pedig Ukrajna esetében végeztek hasonló vizsgálatot szélenergia vonatkozásában. A témakörben készült tanulmányok közös pontja, hogy részletes statisztikai elemzéseket készítettek nap- és szélenergia, illetve hidrogén vonatkozásában, majd térinformatikai szoftverek (GIS) használatával interpolálták és megjelenítették a kapott adatokat.

A fent említett tanulmányok inspirálóan hatottak a saját kutatási módszerem kialakításában, amely 3 fő szakaszból áll:

Az első szakaszban részletes statisztikai elemzéseket végzek a V4 országok vonatkozásában globálsugárzás és szélsébség esetében. A statisztikai elemzéshez szükséges globálsugárzási adatokat a Copernicus légkörfigyelő szolgálatától (CAMS¹) származnak.

A szélsébségre vonatkozó mérési adatok 150 m-es magasságra vonatkoznak, amelyeket a Global Wind Atlas² webalapú alkalmazásából importáltam ki. Az alkalmazás a DTU³ szélenergia intézetének adatbázisát használja. A négy ország vonatkozásában összesen 171

¹ CAMS- Atmosphere Data Store, <https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

² Global Wind Atlas, <https://globalwindatlas.info>

³ Danmarks Tekniske Universitet

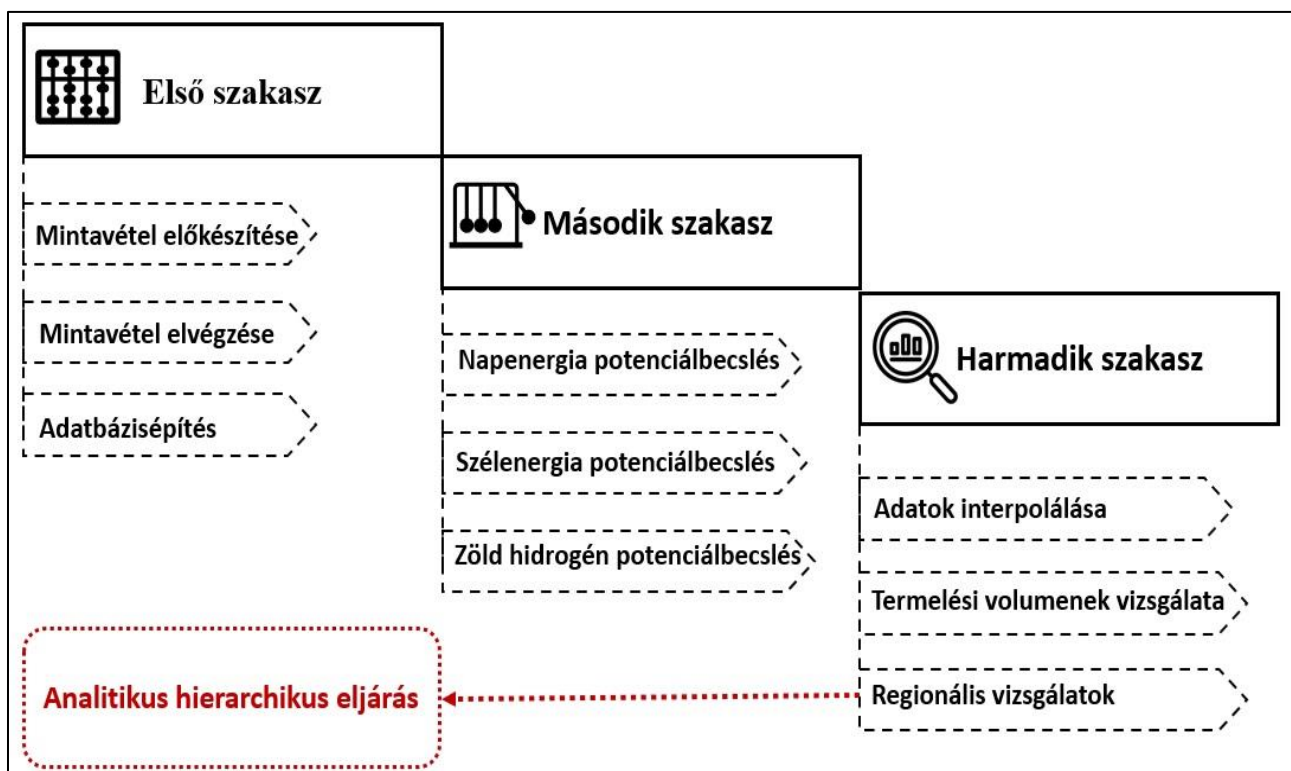
mintavételi helyet jelöltem ki. A kijelölt lokációs pontokból összesen 4104 mintát importáltam ki a vizsgálatomhoz.

A második szakaszban a részletes statisztikai elemzések során kapott területi egységre vonatkoztatott szél és napenergia adatokat a szakirodalomból megismert módszerekkel hidrogénre számítom át. Az így kapott adatok segítségével meghatározható, hogy a mérési pontokon egy év alatt mekkora mennyiségű „zöld” hidrogén állítható elő elektrolízis segítségével. Az így kapott kg/m^2 -re vonatkoztatott hidrogénelőállítás adatokat végül tonna/km^2 egységre számítom át a könnyebb értelmezhetőség érdekében.

A harmadik szakasz során a területi egységre vonatkoztatott hidrogénelőállítási adatokat interpolálom Kriging módszer segítségével. Az interpolációs eljáráshoz a SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) szoftvert használom. Az eredmények megjelenítéséhez a QGIS (Quantum GIS) térinformatikai szoftvert alkalmazom.

A potenciálbecslési adatok felhasználásával végül az kutatásom utolsó fejezetében meghatározom az optimális fejlesztési célterületeket AHP módszer segítségével.

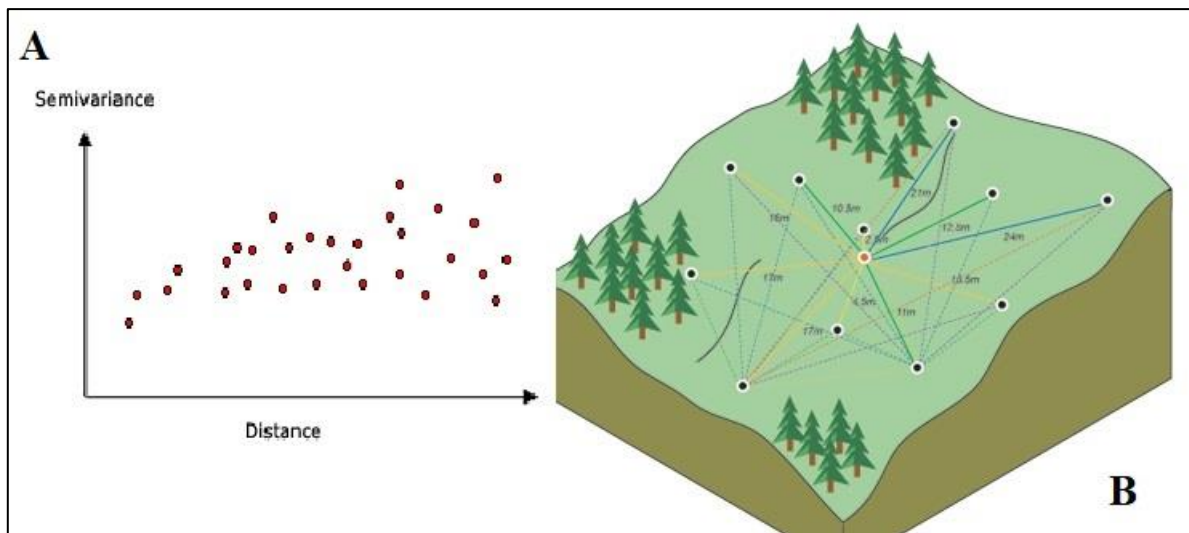
A módszerem felépítését és folyamatát az 5. ábrán mutatom be.



10. ábra A potenciálbecslési módszer felépítése és folyamata saját szerkesztés

3.1 Kriging módszer

A térinformatika és geostatisztika területén számos becslési eljárás használatos. Ezen becslési eljárások közül az egyik legismertebb és legelterjedtebb az úgynevezett Kriging módszer, vagy röviden kríggelés. A módszer a nevét D. G. Kriege dél-afrikai kutatóról kapta, aki először 1951-ben ismertette az általa kidolgozott eljárást. A módszert kezdetben jellemzően a bányászati és geológiai gyakorlatban alkalmazták, de napjainkban már számos egyéb területen is találkozhatunk vele (Kleijnen, 2017). A krígelés jellemzően egy olyan lineáris becslési eljárás, ahol egy számunkra ismeretlen pont várható értékének meghatározásához a környező mért adatokat használhatjuk fel, a módszer különlegessége, hogy a különböző távolságú pontokat nem ugyanakkora súllyal veszi figyelembe, illetve az általunk megszabott hatástávolságon kívüli pontokat pedig egyáltalán nem veszi figyelembe. Ennek következtében az interpolálandó paramétert regionalizált változóként jelenik meg az eljárás során. Lényegét tekintve ez azt jelenti, hogy a mérési pontok adott környezetben belül korrelálnak egymással, de egy meghatározott távolságon kívül már nem (Davis, 1987). A krígelés fontos eszköze a variogram modellek alkalmazása, amelyet az eljárás során a súlyozáshoz használunk. Egy hipotetikus variogram modellt a 2. ábra A) részében mutatok be, míg a kriging módszert pontsúlyozását az ábra B) részében mutatom be. az A kutatási munkám valamennyi erőforrástérképét a kriging interpolációs eljárás alapján készítettem el.

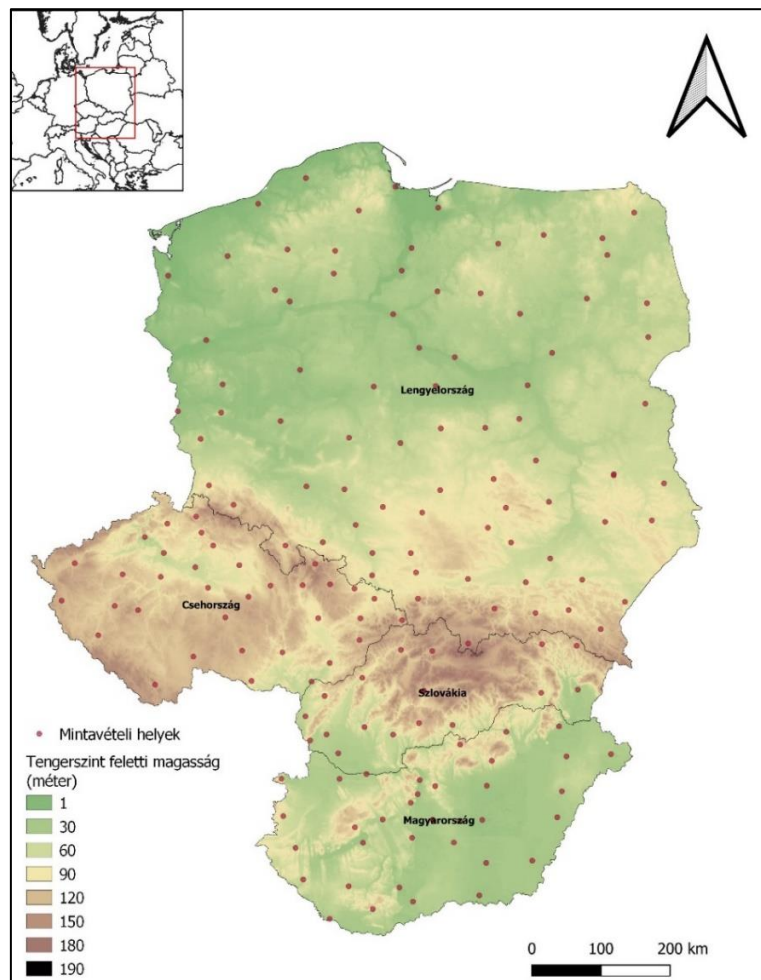


2. ábra A) Egy minta variogram bemutatása, B) A kriging eljárás pontsúlyozásának bemutatása

forrás: ESRI- ArcGIS 10.3 documentation, How Kriging works.

3.2. Mintavétel

A potenciálbecslés során 171 mintavételi helyet jelöltem ki a négy ország vonatkozásában. A lokációk kiválasztása során minden esetben a településeket részesítettem előnyben a könnyebb azonosíthatóság érdekében. A települések kijelölése során figyelembe vettem a NUTS2 regionális egységekben történő elhelyezkedésüket. Minden NUTS2⁴-es tervezési statisztikai régióban 5 települést választottam ki, amelyek a régió északi, déli, nyugati és keleti irányába helyezkedtek el, illetve amennyiben lehetőség volt rá az adott régió geometriai középpontjához legközelebb eső települést is. A kiválasztott települések földrajzi koordinátáit minden esetben meghatároztam, hogy a későbbi napsugárzásra és szélességre vonatkozó mintavételek során a szélességi és hosszúsági fokok alapján folytathassam a statisztikai adatgyűjtésem. A mintavételi pontok elhelyezkedését és a négy ország változatos domborzati viszonyait a 11. ábra szemlélteti.



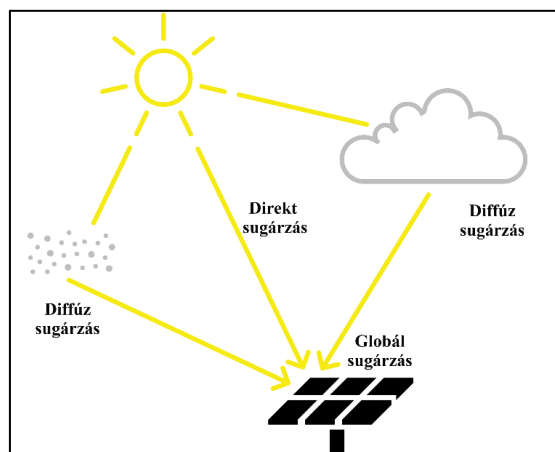
11. ábra A Mintavételi pontok és mBf szerinti magasság saját szerkesztés

⁴ Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS, Statisztikai Célú Területi Egységek Nomenklatúrája)

Az 1960-as években az egykori kelet-európai szocialista országok fokozatosan áttértek az Adriai alapszintről a Balti alapszintre, azaz ekkortól már a Balti-tenger abszolút magasságához viszonyították a különböző földrajzi pontok magasságát. A 11. ábrán ennek megfelelően a balti alapszinthez vonatkoztatva mutatom be az érintett országok domborzati viszonyait. Mint ahogy az ábrán látható a mintavételi pontok igen változatos domborzati viszonyokkal rendelkeznek. Jelen kutatásom legdélebbi mintavételi pontja Barcs települése (északi szélesség 45,96 fok és keleti hosszúság 17,458 fok), legészakibb pontja pedig Slupsk települése (északi szélesség 54,464 fok és keleti hosszúság 17,028 fok) volt.

3.3. A rendelkezésre álló és hasznosítható napenergia potenciálbecslése

A napenergiából származó hidrogénelőállítás volumene becsléséhez nélkülözhetetlenek az adott területre vonatkozó napsugárzás mérési adatai. Bár számos módszer létezik a nap által kibocsátott sugárzási energia értékelésére, mégis az általam áttekintett legtöbb szakirodalmi modell a vízszintes felületre érkező globálsugárzási adatok segítségével kalkulál (Dagdougui et al., 2011). A globálsugárzás a direkt (azaz a sík felszínre jutó rész) és a diffúz sugárzás összegét jelenti amelyet a 12. ábrán mutatok be, más megfogalmazásban a globálsugárzás az „1 m² vízszintes felületre eső, időegység alatt érkező energia mennyisége (W/m²)” (Kordás N., 2018). A globális sugárzást a föld legtöbb országában jellemzően földi telepítésű pyranométerekkel határozzák meg. A pyranométerek függetlenül és pontosan mérik a globálsugárzást, ugyanakkor a mérési adataik hozzáférhetősége korlátozott. A napsugárzásra vonatkozó területi adatokhoz legkönnyebben a szatellites adatbázisokból lehet hozzáférni. A műholdas adatok további előnye, hogy nagy területekre vonatkozóan állnak rendelkezésre. Hátrányukra írható viszont, hogy a pyranométerekhez viszonyítva kevésbé pontos adatokat szolgáltatnak (Touili et al., 2018).



12. ábra A globálsugárzás összetevőit saját szerkesztés

Jelen becsléshez a Copernicus légkörfigyelő szolgálatának (CAMS) napsugárzási adatbázisát használtam. A napsugárzási adatbázis globál, direkt és diffúz sugárzás tekintetében szolgáltat adatokat 2004-től egészen napjainkig. Az adatbázis a McClear módszert alkalmazza a napsugárzási adatok kalkulációja során. A 171 mérési pont esetében 2020.01.01-től 2020.12.31-ig vonatkozóan kértem le havi adatokat a globálsugárzás vonatkozásában.

A napsugárzási adatok összegyűjtése és kiértékelése után megállapítottam az adott mérési pontok globálsugárzásának átlagos évi összegét. Az így kapott adatok bemenetként szolgáltak a napenergia-termelés becslése során. A fotovoltaikus napelem technológia napjainkban egy széleskörben alkalmazott kiforrott technológia.

A napelemek által előállított villamosenergia alkalmas az elektrolizáló egységek működtetésére, így lehetőségünk nyílt „zöld” hidrogén előállítására is. Napjainkban a két legelterjedtebb napelemtípus a polikristályos illetve a monokristályos napelem. A monokristályos napelemegység teljesítménye nagyobb, mint a polikristályos napelemeké és a megbízhatósága is magasabb. Ezért, a napenergia potenciálbecslésem során egy monokristályos napelem legfontosabb specifikációit vettem alapul. A piacon jelenleg hozzáférhető monokristályos modulok hatékonysága átlagosan 17%.⁵

A globálsugárzási adatok ($\text{W/m}^2/\text{év}$) és a Touili és mtsai. (2018) által alkotott képlet alapján (14) a következő módon határoztam meg a napelemek éves termelési volumenét:

$$(14) \quad E_{PV} = G * \eta_{PV} * \eta_{PC}$$

E_{PV} = Az adott területi egységen egy év alatt termelhető villamosenergia mennyisége

G = A globálsugárzás átlagos évi összege

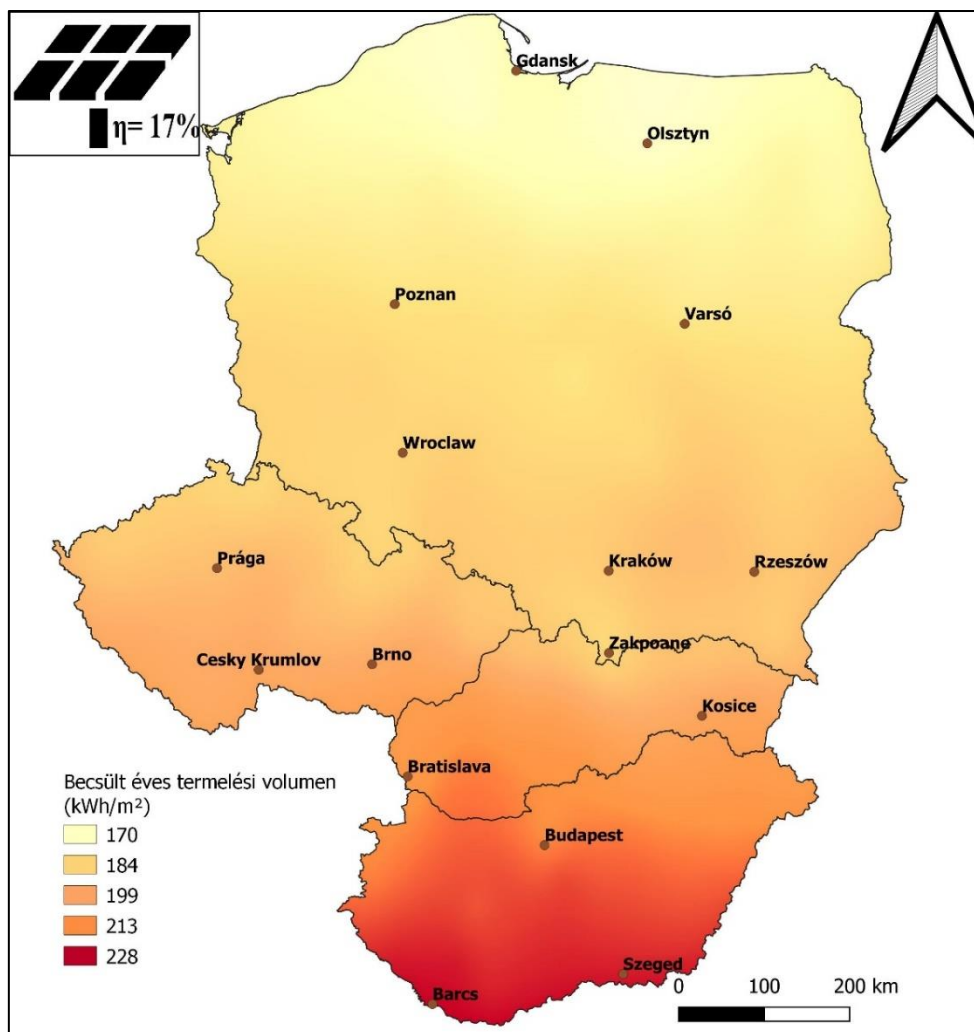
η_{PV} = A modul referencia hatékonysága

η_{PC} = Transzformátor hatékonysága

A transzformátor egységek hatékonysága a szakirodalmi adatok alapján átlagosan 90-97% között alakul. Jelen potenciálbecslésem során egy 95%-os átlagos értéket vettem alapul a számításaim során (Urakabe et al., 2010). Az így kapott értékeket végül átváltottam kWh értékre, a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében.

A potenciálbecslés során kapott értékeket végül interpoláltam és megjelenítettem. Az eredmények vizualizációja a 13. ábrán látható.

⁵ <https://www.eu-solar.hu/blog/a-napelemek-hatasfoka/>



13. ábra Az éves globálsugárzási adatok alapján számított fotovoltaiikus termelési volumenek alakulása saját szerkesztés

Mint ahogy a feni ábrán látható, a négy ország hasznosítható napenergia potenciálja igen változatosnak tekinthető. Az interpoláció eredménye alapján a legideálisabb termelési körülményeket Magyarországon a Dél-Dunántúl és a Dél-Alföld területén prognosztizálhatjuk, míg a legkevésbé ideális körülményekkel az észak-lengyelországi régiókban találkozhatunk. Szlovákia területén a Pozsonyi-medencében, Csehország esetében pedig a Cseh-erdő nyugati peremén a legideálisabbak a telepítési körülmények. Dél-Kelet Lengyelországban pedig a Sandomierzi-alföldön a legkedvezőbbek a termelési körülmények. A napelemek becsült éves termelési volumeneinek területi eloszlása egyenletesnek tekinthető. Az interpolációs eljárás alapjául szolgáló egyéni mérések vonatkozásában a legmagasabb termelési volument Barcs településén tapasztaltam, míg a legkisebbet az észak lengyelországi Łyna folyó partján elterülő Olsztyn városában.

3.4. A rendelkezésre álló szélenergia potenciál

A szélerőművek által termelhető villamosenergia vonatkozásában döntő tényező az adott területre jellemző átlagos szélesség. Ezért a szélességre vonatkozó adatok ismerete elengedhetetlen a szélenergia potenciáljának értékeléséhez. Jelen potenciálbecslés során a Global Wind Atlas nevű nyílt adatbázist használtam a mintavételi helyek szélességi jellemzőinek kiimportálására. A fentebb említett adatbázis a Dán Műszaki Egyetem – Szélenergetikai tanszékének és a Világbank-csoportnak a kooperációjában készült el. Figyelembe véve a szélerőművek fejlődési folyamatát és az ezzel járó magasságnövekedést a szélességi adatok 150 m-es magasságra vonatkoztatva importáltam ki az adatbázisból.

A 150 méteres magasságban végrehajtott szélességméréseket jellemzően SODAR⁶ vagy LIDAR⁷ módszerrel végzik. Az adatbázis elsősorban az adott területre jellemző átlagos havi, illetve éves szélesség vonatkozásában biztosít adatokat, így a későbbiekben én is ezen adatokkal dolgoztam a számításaim során. A modellemben egy hipotetikus szélerőmű éves termelési volumenének meghatározása alapján értékelttem egy-egy mintavételi terület szélenergiapotenciálját.

Az általam alkalmazott eljárás során a magasság mellett fontos tényező még a lapátok átmérője és a turbina hatásfoka is. A hipotetikus erőművem paraméterezésénél egy Vesta V150-4.2 MWTM IEC IIIB/IEC S⁸ típusú szélerőművet vettem alapul. Jelen típus szerkezete alkalmas rá, hogy a gondola magassága elérje a 150 métert is, így kiaknázza az ezen magasságban tapasztalható szélenergiapotenciált. A lapátok hosszúsága 73,7 méter, így abban az esetben, ha a lapát 12 óránál jár az erőmű magassága elérheti a 173,7 métert is. A rotor átmérője a lapátok hosszúságának kétszerese, azaz 147,4 méter.

A turbina hatásfokát elsősorban az aktuális szélesség határozza meg. A Betz törvény értelmében a szélerőművek hatásfokának elméleti maximuma 59%, ám a gyakorlatban 10-45% közötti értékek jellemzőek a szélesség és a szerkezeti kialakítás függvényében. Jelen potenciálbecslésem során a regionálisan jellemző átlagos éves szélesség alapján különböző hatásfok profilokat állítottam fel, amelyeket figyelembe vettem az adott mérési ponton a hipotetikus szélerőművek éves termelési volumenének kiszámítása során. A regionális profilok felállítása során Arsie és mtsai. (2005) munkáját vettem alapul.

⁶ SODAR (Sound Detection And Ranging) - Akusztikus mérő berendezés

⁷ LIDAR (Light Detection and Ranging) lézer alapú távérzékelés

⁸ Vesta V150-4.2 MWTM IEC IIIB/IEC S , https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v150-4_2_mw

Az átlagos szélességi adatok alapján a következő képlet (Kalmikov, A.,2017) segítségével határoztam meg a szél teljesítménysűrűségét (15) az adott mérési pont vonatkozásában (W/m²):

$$(15) \quad WSD = P/A = 1/2 \rho * V^3$$

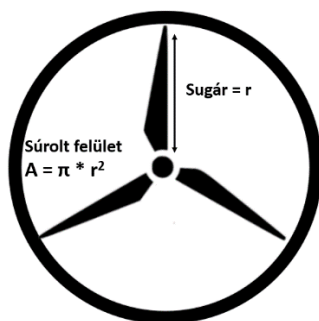
ρ = száraz levegő sűrűsége (átlagosan 1,225 kg/m³)

V = a szél sebessége

A következő lépés során meghatároztam a teljesítménysűrűség és a hipotetikus szélerőmű adatai alapján a várható teljesítményét (16), ahol a hatékonyság a C_{pg} (17) :

$$(16) \quad P = WSD^{(1/2 \rho * V^3)} * A * C_{pg}$$

A = a rotor által súrolt felület (m²), ami $\pi * r^2$ (r = a turbinalapátok által érintett kör átmérője). A rotor által súrolt felületet a 14. ábrán szemléltetem.



14. ábra A rotor által súrolt felület (m²) ábrázolása saját szerkesztés

$$(17) \quad C_{pg} = C_p * C_g$$

Ahol hol a C_p (a turbina hatékonysága) és a C_g (a transzformátor hatékonyság)

A turbina hatékonyságának meghatározása során az előzetesen felállított regionális hatékonyságprofilokat használtam. A transzformátor egységek hatékonysága esetében az előzőleg már ismertetett 95%-os értéket veszem alapul.

A következő lépés során kiszámoltam a szélerőmű éves termelési volumenét a következő képlet segítségével (18):

$$(18) \quad P_e = P * T$$

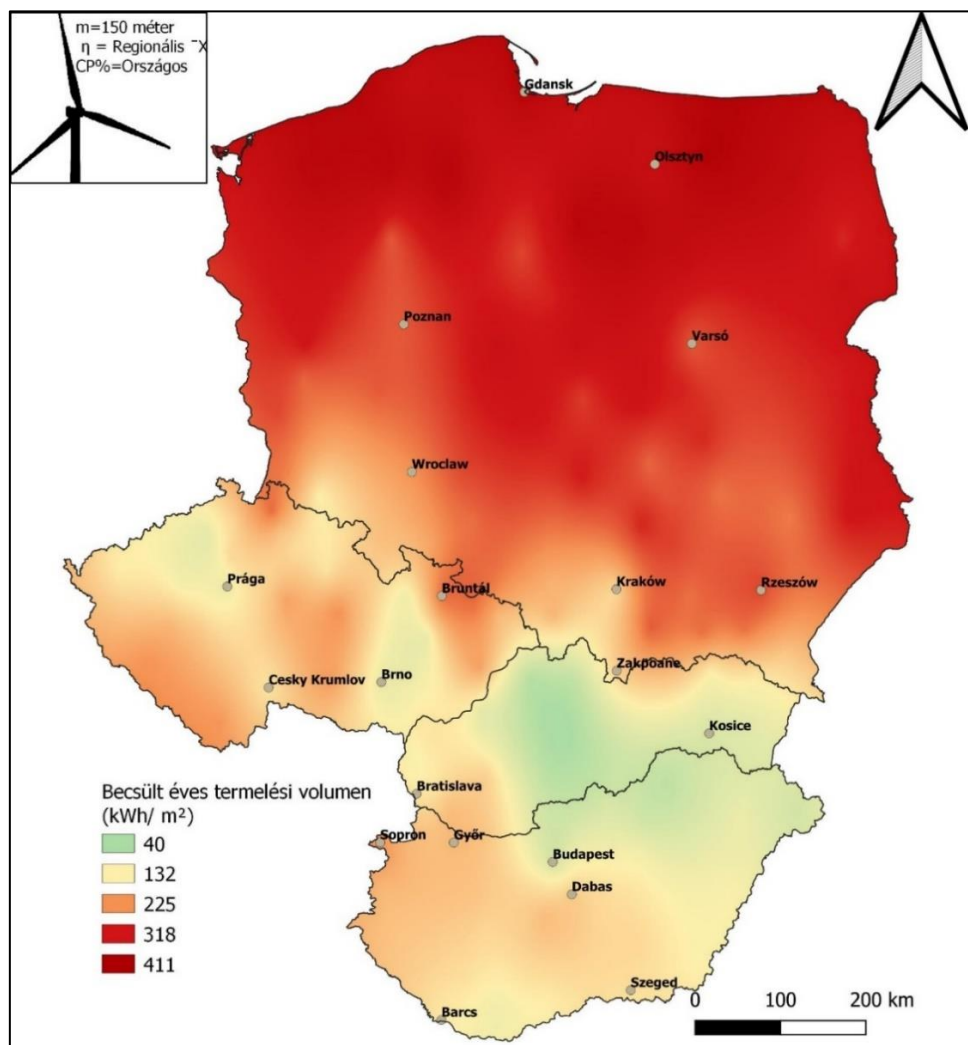
T = Az egy év alatt rendelkezésre álló időkeret, azaz 8760 óra

Ugyanakkor egy szélerőmű rendelkezése állása még ideális esetben sem közelíti meg az elméleti maximumot. Ezért az Európai Tanácsnak készített 2018-as szélenergiapotenciálra vonatkozó jelentésének adatait használtam fel a potenciálbecslés ezen szakaszában. A jelentés alapján Magyarország esetében átlagosan 20%, Szlovákia esetében 19%, Csehország esetében 23% és Lengyelország esetében 25%-os mutatókkal érdemes prognosztizálni a ténylegesen

várható éves termelési volument. A kapott eredményeket végül átszámítottam területi dimenzióra (W/m²) a következő képlettel (19):

$$(19) \quad P_t = \frac{P_{\acute{e}}}{A}$$

Az így kapott értékeket végül átváltottam kWh értékre. A potenciálbecslés során kapott értékeket végül interpoláltam és megjelenítettem. Az eredmények vizualizációja 15. ábrán látható. Így összehasonlíthatóvá válik, hogy egy adott területen az éves termelési volumenek vonatkozásában a napenergia, vagy a szélenergia hasznosítása az előnyösebb.



15. ábra Az éves átlagos szélességi adatok alapján számított szélenergia termelési volumenek alakulása
saját szerkesztés

A fenti ábrán látható, hogy a négy ország szélenergia potenciálja igen változatosnak tekinthető, az eredmények alapján a termelési volumenek csúcstértékei fordítottan jelennek meg a napenergia termelési volumenekhez képest. Az interpoláció eredménye alapján a legideálisabb termelési körülményeket Lengyelország északi és keleti régióiban prognosztizálhatjuk,

ugyanakkor az ország egész területe szélben igen gazdagnak mondható. A legkevésbé ideális körülményekkel a Kárpátok vonulatai mentén, Szlovákia középső régióiban, illetve Észak-Kelet Magyarországon találkozhatunk. Szlovákia területén ebben az esetben is a Pozsonyi-medencében, Csehország esetében pedig a Cseh-erdő, Cseh-Morva-dombság, illetve a cseh-sziléziai területeken a legideálisabbak a telepítési körülmények. Hazánkban az észak-nyugati régiókban találkozhatunk ideális telepítési körülményekkel, különösen az Alpokalja térségében. A napelemekkel ellentétben a szélenergia becsült éves termelési volumeneinek területi eloszlása sok esetben szélsőséges. Az interpolációs eljárás alapjául szolgáló egyéni mérések vonatkozásában a legmagasabb termelési volument Gdansk településén tapasztaltam, míg a legkisebbet Besztercebánya városának térségében.

3.5. Hidrogén potenciálbecslés

A megújuló energiaforrások által termelt villamosenergia már felhasználható a víz elektrolíziséhez, így a zöld hidrogén előállításához. Az elektrolízis segítségével előállított hidrogén további előnye, hogy rendkívül magas tisztaságú, így az üzemanyagcellák működéséhez szükséges komprimálás után akár egyből is felhasználható. Napjainkban az elektrolizáló berendezések többféle technológiai konstrukcióban is megtalálhatóak a piacon. A jelenleg legelterjedtebbnek tekinthető berendezések az alkálikus (KOH) elektrolizálók, de az úgynevezett protoncserélő-membrános (PEM) elektrolizálók is dinamikusán terjednek, a jelenlegi becslés során is ezt a technológiát veszem alapul. A harmadik csoport az úgynevezett szilárd-oxidos elektrolizálók kategóriája (SOE), de jelen technológia még fejlesztés alatt áll. A PEM technológia megközelítőleg 75%-os hatékonysággal működik (Kotowicz et al., 2018). A hidrogén előállítási volumenének becslése során a következő képletet használtam (20):

$$(20) \quad H_2 = \frac{E_{pv} \cdot P_t \cdot \eta_{el}}{F H_{h_2}}$$

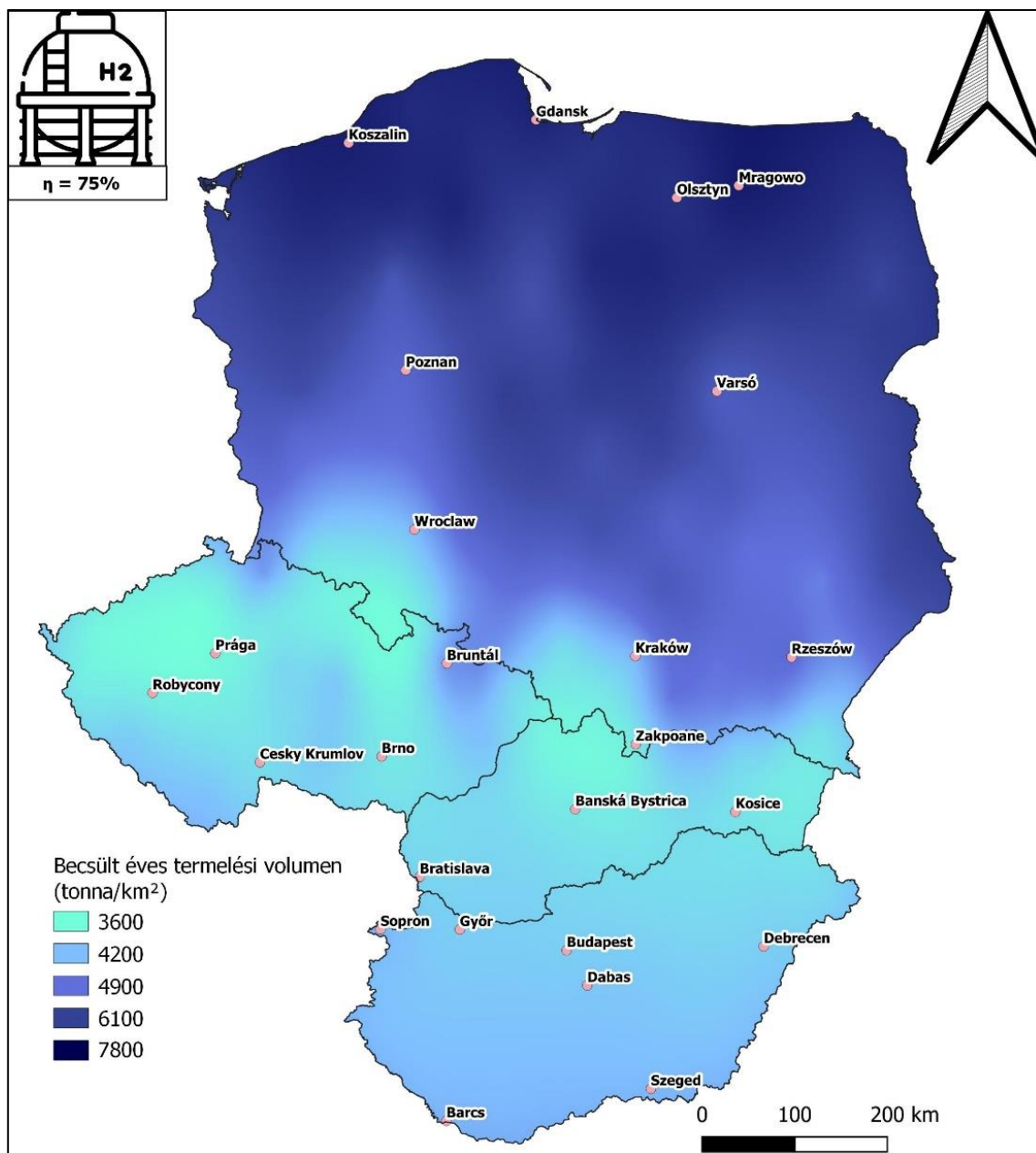
H_2 = Az előállítható hidrogén mennyisége kg/m²

η_{el} = Az elektrolizáló hatásfoka (75%)

EPV = Napelem becsült termelési volumene (kWh)

P_t = Szélerőmű becsült termelési volumene (kWh)

FH_{h_2} = A hidrogén felső fűtőértéke (39.4 kWh/kg) v. (144,88 MJ/kg)

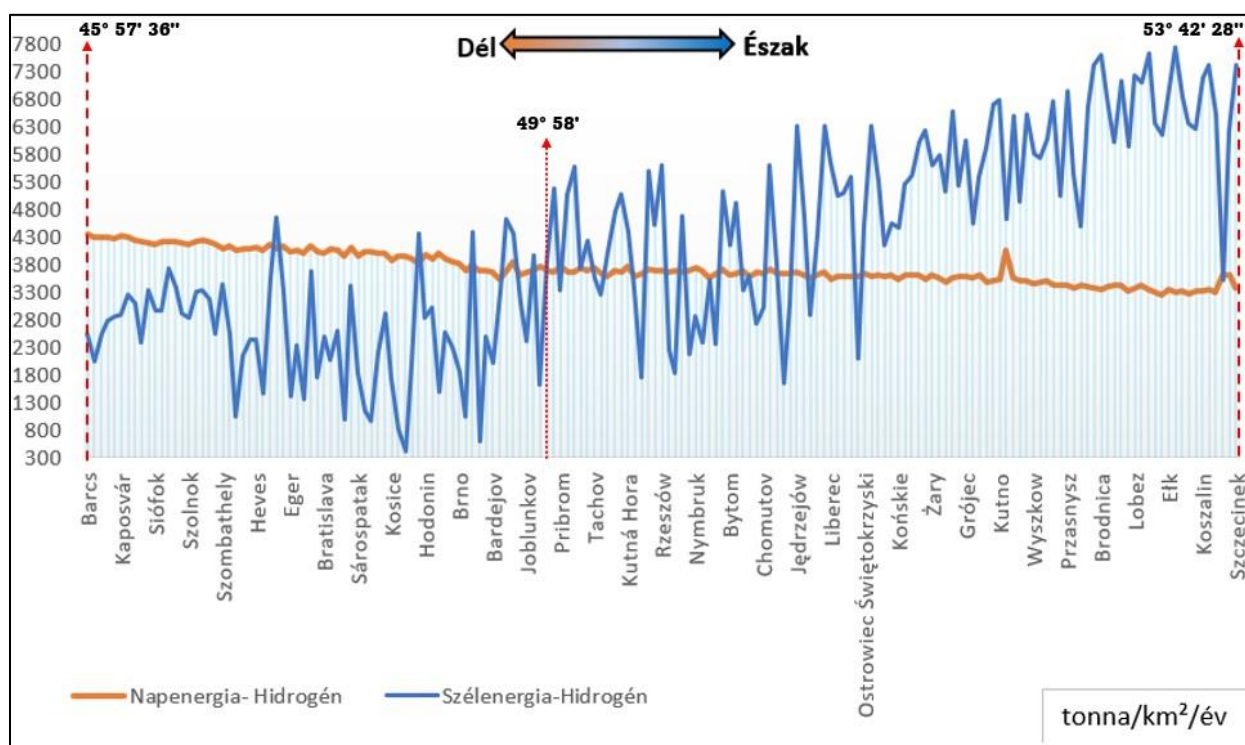


16. ábra Becsült zöld hidrogén előállítási volumen saját szerkesztés

A 16. ábrán a négy ország zöld hidrogén előállítási potenciálja látható. Az interpoláció során nem választottam külön a nap és szélenergiából származó hidrogénelőállítási értékeket, hanem az adott ponton elérhető legmagasabb becsült termelési volumenek alapján végeztem el az eljárást. Az eredmények alapján a legideálisabb termelési körülményeket a kimagasló szélenergia potenciálnak köszönhetően Lengyelország északi és keleti régióiban prognosztizálhatjuk, ugyanakkor az ország egész területe jelentős hidrogénelőállítási potenciált hordoz magában. A legkevésbé ideális körülményekkel a Kárpátok vonulatai mentén, Szlovákia középső régióiban, illetve Csehország nyugati peremterületein találkozhatunk.

Szlovákia területén a Pozsonyi-medencében ideálisak a feltételek a termelésre, Csehország esetében pedig a cseh-sziléziai területeken lehet jelentős előállítási volumeneket prognosztizálni. Hazánkban az ország teljes területén egyenlő eloszlású termelési volumeneket figyelhetünk meg. Az interpolációs eljárás alapjául szolgáló egyéni mérések vonatkozásában a legmagasabb termelési volumenek Gdansk, Mragowo, Szczecinek térségében határozta meg, míg a legkisebbet Besztercebányától északra, illetve Prágától nyugatra tapasztaltam.

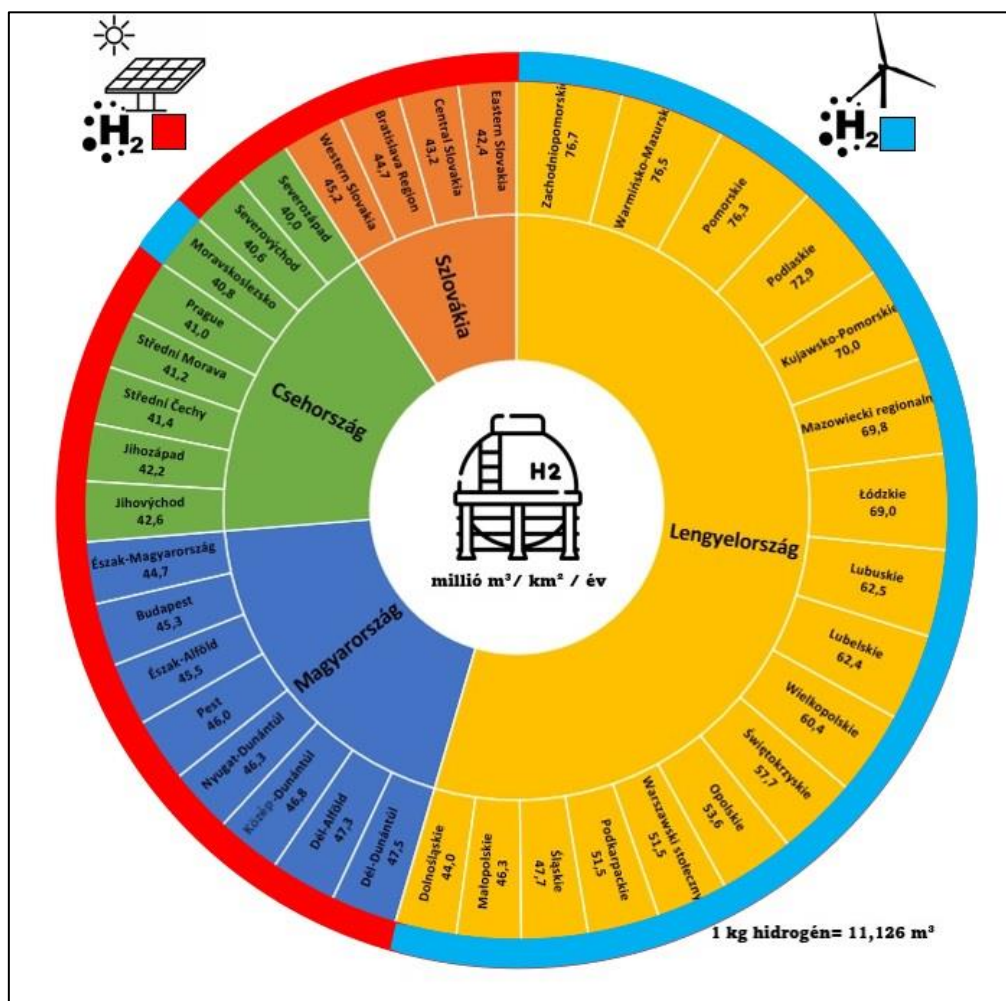
A 14. és a 15. ábrán megfigyelhettük, hogy a napenergia termelési volumenjeinek területi eloszlása egyenletesebben alakul, mint a szélenergia előállítási értékei. A következő, 17. ábrán megvizsgáljuk, hogy egymáshoz viszonyítva hogyan alakulnak a hidrogénelőállítási volumenek a két technológia vonatkozásában. A vizsgálatban a mérési pontokat észak-dél irányban rendeztem az északi szélességi körökön való elhelyezkedésük alapján.



17. ábra A nap és a szél hidrogénelőállítási volumenjének alakulása az északi szélességi körök vonatkozásában saját szerkesztés

A 17. ábrán látható, hogy a napenergiából történő hidrogénelőállítás egyenletes eloszlást mutat, észak felé haladva fokozatosan csökken. A szélenergiából történő hidrogén előállítás ugyanakkor jelentős ingadozást mutat, észak felé haladva jelentős növekedést figyelhető meg. Jellemzően a 49. északi szélességi fok fölött már nagyobb hidrogénelőállítási volumen érhető el a szélerőművek alkalmazásával, mint naperőművekkel.

A mintavételi helyek kijelölése során minden NUTS2-es tervezési statisztikai régióból 5 települést választottam ki, amelyek a régió északi, déli, nyugati és keleti irányába helyezkednek el, illetve amennyiben lehetőség volt rá a régió geometria középpontja irányában. Ilyen módon lehetőségem nyílt a kapott adatok alapján megbecsülni az adott régió átlagos éves termelési volumenét is. Az így kapott értékeket köbméter térfogatra vonatkoztatva a 18. ábrán mutatom be.



18. ábra Éves becsült hidrogén-előállítási volumenek NUTS2-es régiókra vonatkoztatva, köbméterben kifejezve saját szerkesztés

A 18. ábrán látható, hogy a zöld hidrogén előállítás szempontjából, jelen becslés alapján a legideálisabb régiók Lengyelországban találhatóak. Az észak-lengyelországi NUTS2-es statisztikai régiók (Vajdaságok) ideális területei lehetnek a hidrogénipari beruházások számára. Magyarország esetében a déli régiókban találkozhatunk ideális körülményekkel, míg Szlovákia vonatkozásában a nyugati régióban. Csehországban Morávia azaz a Dél-Keleti területek rendelkeznek a legideálisabb adottságokkal.

3.6. Fejlesztési célterületek kijelölése

Az előző fejezetekben azonosítottuk a „zöld” hidrogén előállításához elérhető legjobb technológiai megoldásokat, majd ezek alapján elvégeztük a vizsgálatban szereplő országok termelési szempontú értékelését regionális szinten. Ugyanakkor a fejlesztési források hatékony allokációja szempontjából meghatározó lehet a termelési tényezőkön túlmutató egyéb infrastrukturális és felhasználási komponensek figyelembevétele is egy esetleges beruházási döntés meghozatala során. Ezért a kutatásom további célja ezen tényezők AHP (Analytic Hierarchy Process) módszerrel történő súlyozása és az optimális fejlesztési célterületek kijelölése NUTS2 tervezési-statisztikai régió szintjén.

A vizsgálatom során egy hipotetikus döntéshozó szemszögéből vizsgáltam meg egy esetleges hidrogénipari beruházás kijelölése szempontjából legrelevánsabb komponenseket, majd elvégeztem ezen mutatószámok súlyozását az analitikai hierarchia folyamat (AHP) segítségével. Ilyen módon meghatározhatóvá válik, hogy mely NUTS2-es régiók esetében érdemes mélyebb vizsgálatokat végezni egy esetleges jövőbeni beruházás esetében. A súlyozott mutatószámok ismeretében minden országban külön-külön végzem el a régiók értékelését, hiszen bár számos gazdasági és kulturális kapcsolat jellemzi a vizsgált országokat, mind függetlenek és önállóak.

3.6.1. Analitikus hierarchia folyamat

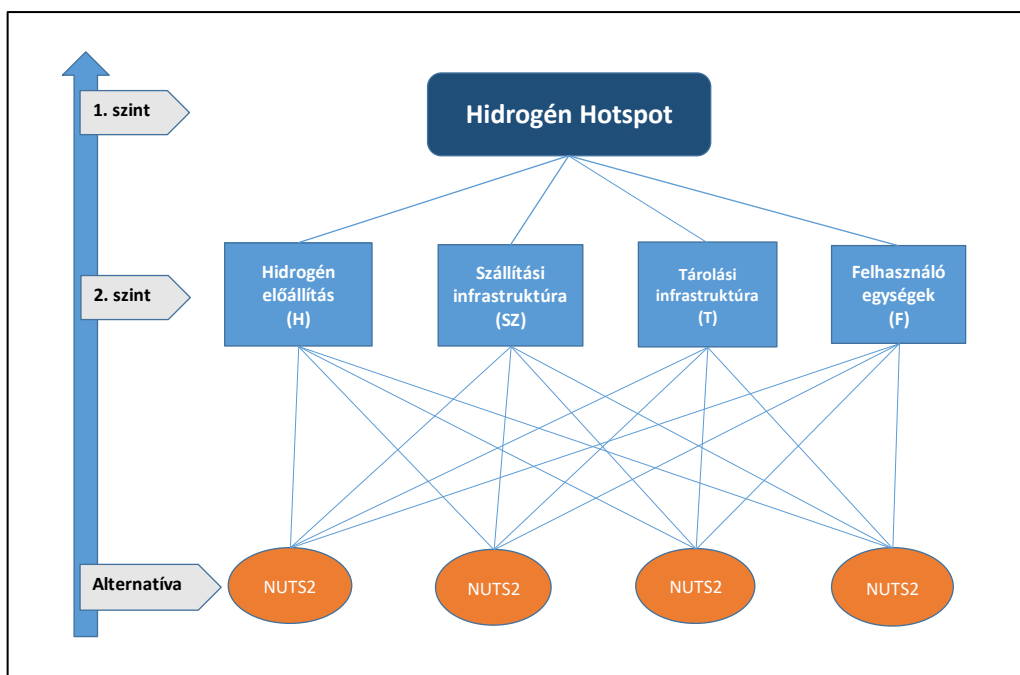
Az AHP-módszer megalkotása Thomas L. Saaty nevéhez fűződik, aki 1977-ben mutatta be az eredeti eljárást. Az eljárás azóta már számos reformon esett át az idők folyamán, míg végül Saaty és Vargas munkássága révén elérte a végleges formáját 2001-ben. Az AHP létrehozásának elsődleges célja az volt, hogy a döntéshozatali folyamatokban az objektív szempontokon túl szubjektív (döntéshozói és szakértői) szempontok is érvényesülhessenek. Emellett a kvantitatív és a kvalitatív módszerek integrálására is lehetőség nyílik (Duleba, Sz., 2006). Az AHP módszer segítségével olyan logikai és strukturális rendszert alkothatunk, amely a döntési probléma jobb megértését biztosítja azáltal, hogy komponenseire bontja a problémát, majd hierarchikus struktúrába rendezi azt. Az AHP különösen alkalmas olyan problémák megoldására, amelyek esetében nehezen kvantifikálható döntési elemek összehasonlítására van szükség. Ezen elemek páronkénti összehasonlítása biztosíthatja a döntéshozó számára a differens célok prioritizálását, vagyis két vagy több, egymásnak ellentmondó cél közül a fontosabb meghatározását (Rapcsák, T., 2007) Ezt kihasználva jelen esetben differens mutatószámokat fogunk súlyozni a fentebb leírt módszer segítségével. A módszerem 5 lépésből épült fel, amelyet a 19. ábrán mutatok be.

①		Azonosítjuk a döntési „problémát” és meghatározzuk a vizsgált a mutatókat.
②		Elvégezzük a mutatók közötti páronkénti összehasonlítását, kiszámítjuk mutatók végső súlyát. Ebben a lépésben ellenőrizzük az általunk felállított mátrixkövetkezetességét.
③		Priorizáljuk a mutatók szerepét a döntési folyamatban.
④		A priorizált mutatók alapján értékeljük a NUTS2-es statisztikai régiókat és meghatározzuk az ideális hidrogéngazdasági fejlesztési <u>hotspotokat</u> .
⑤		A kapott eredményeket végül megjelenítem.

19. ábra A hidrogén „Hotspotok” kijelölésének folyamata
saját szerkesztés

3.6.2. Döntési probléma azonosítása és a mutatók meghatározása

Az elképzelésem alapját egy egységesített és számszerűsített „Hidrogén beruházási” pontszám képezi. Így az AHP struktúrák 1. szintjén a cél egy úgynevezett „Hidrogén Hotspot” kategória került kialakításra. A struktúrák 2. szintjén a beruházás szempontjából releváns különböző mutatók találhatóak, amelyeket súlyozni fogok a következő lépések során. A struktúra legalsó szintjén kerültek rögzítésre a területi egységek, esetünkben Magyarország, Szlovákia, Csehország és Lengyelország NUTS2-es régiói. A 19. ábrán mutatom be vizuálisan az AHP struktúrámat.



19. ábra AHP döntési struktúra
saját szerkesztés

Jelen döntési folyamatban a „zöld” hidrogén becsült előállítási volumene mellett a szállítási és tárolási infrastruktúrát, illetve a potenciálisan felhasználóként jelentkezhető ipari egységeket vettem figyelembe a súlyozásnál. A szállítási infrastruktúra⁹ meghatározása során figyelembe vettem az adott régióban rendelkezésre álló autópályák és vasúti pályák hosszát, mivel a hidrogén jövőbeli disztribúciója során vélhetően mind a vasúti mind a közúti szállítás fontos szerepet tölt majd be ezért nem tettem különbséget a két infrastruktúra között, hanem összeadtam ezen tényezőket. A tárolási infrastruktúra meghatározása során a gáztározók regionális jelenlétét vizsgáltam, a tárolási kapacitásukat jelen folyamat során nem vettem figyelembe. A felhasználói egységek meghatározása során a régióban az Eurostat adatbázisa szerinti ipari létesítmények¹⁰ számát (egységeket) vettem figyelembe.

3.6.3. Mutatók közötti páronkénti összehasonlítás

A páronkénti összehasonlítást hajtjuk végre ebben a lépésben. Mivel hipotetikusan egy döntéshozó szemüvegén keresztül végezzük ezt a lépést, így lehetőséget kapunk a saját preferenciánk szerint szubjektív szempontokat is figyelembe venni a súlyozás során. Ahhoz, hogy a mutatószámok fontosságának szubjektív megítélését számszerűvé tegyünk, a 4 táblázatban szereplő AHP módszernél általánosan elfogadott intervallum skálát használtam.

A páros összehasonlítás szempontjai = A_1, A_2, A_3, A_4

A páros összehasonlítás mátrix értékei = w_i , $i = 1, \dots, n$, tetszőleges, pozitív valós számok.

A páros szempontok összehasonlítása azonos szempontok esetén = w_1/w_1 , eltérő esetben w_1/w_i .

Tehát a páros összehasonlítás mátrixok esetében a mátrixok elemei n darab pozitív valós szám közül választott két szám hányadosaként jelennek meg az eljárásunk során.

Döntési mátrix	Hidrogén Előállítás	Szállítási infrastruktúra	Tárolás	Felhasználás	AHP intervallum skála
					1-egyformán fontos
Hidrogén Előállítás	1	5	5	5	3-mérsékelten fontosabb
Szállítási infrastruktúra	1/5	1	4	3	5-sokkal fontosabb
Tárolás	1/5	1/4	1	3	7-nagyon sokkal fontosabb
Felhasználás	1/5	1/3	1/3	1	9-rendkívül fontos (2,4,6,8 is alkalmazható)

4. táblázat AHP szerinti páros összehasonlítási mátrix
saját szerkesztés

⁹ Rail and Motorways network by NUTS 2 regions, kilometres

¹⁰ SBS data by NUTS 2 regions and NACE Rev. 2 (from 2008 onwards), Manufacturing, Local units - number

A következő lépésben normalizáltuk a mátrixunkat, majd meghatározzuk az oszlopösszegeket. A páros összehasonlítás mátrixból az egyes szempontok „fontosságát”, azaz súlyát úgy kapjuk, hogy meghatározzuk a legnagyobb sajátértékhez tartozó sajátvektort. Tehát a normalizált mátrixunk vízszintes értékeit végül elosztjuk az előzőleg meghatározott oszlopösszegekkel. Az így kapott értékeket végül összeadjuk és elosztjuk az általunk vizsgálatban használt mutatók számával, azaz számtani átlagot számítunk ($n=4$). A táblázatunkat bővítjük egy 5. oszloppal jobb oldalon, amely a mutatók súlyozását mutatja. Az így kapott értékek az egyes beruházást befolyásoló tényezők döntéshozói szemszögből történő fontosságát reprezentálják. A mátrixunk normalizálása és a súlyozás a következő táblázatban látható:

Döntési mátrix	Hidrogén Előállítás	Szállítási infrastruktúra	Tárolás	Felhasználás	Szempon t súlya	%
Hidrogén Előállítás	0,6250	0,7595	0,483870968	0,4167	0,5712578	57
Szállítási infrastruktúra	0,1250	0,1519	0,3871	0,2500	0,2284989	23
Tárolás	0,1250	0,0380	0,0968	0,2500	0,1274372	13
Felhasználás	0,1250	0,0506	0,0323	0,0833	0,0728061	7
Σ	1,60	6,58	10,33	12	1,00	100

5. táblázat Súlyozott összehasonlítási mátrix saját szerkesztés

Ugyanakkor a tapasztalati páros összehasonlítás mátrixok sok esetben nem konzisztensek, ezért az esetleges következetlenségük mérésére meghatározzuk az úgynevezett következetlenségi hányadost (22), valamint a következetlenségi indexet (21). A következetlenségi indexek átlagos értékeit véletlenszerűen generált páros összehasonlítás mátrixok segítségével határoztuk meg minden n esetre, és ezeket RI-vel jelöljük (Rapcsák, T., 2007). Az eljárás esetén az alábbi formula alapján számítható:

$$(21) \quad CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

λ_{max} = A tapasztalati páros összehasonlítás mátrix legnagyobb sajátértéke

n = A páros összehasonlítás mátrix sorainak a száma

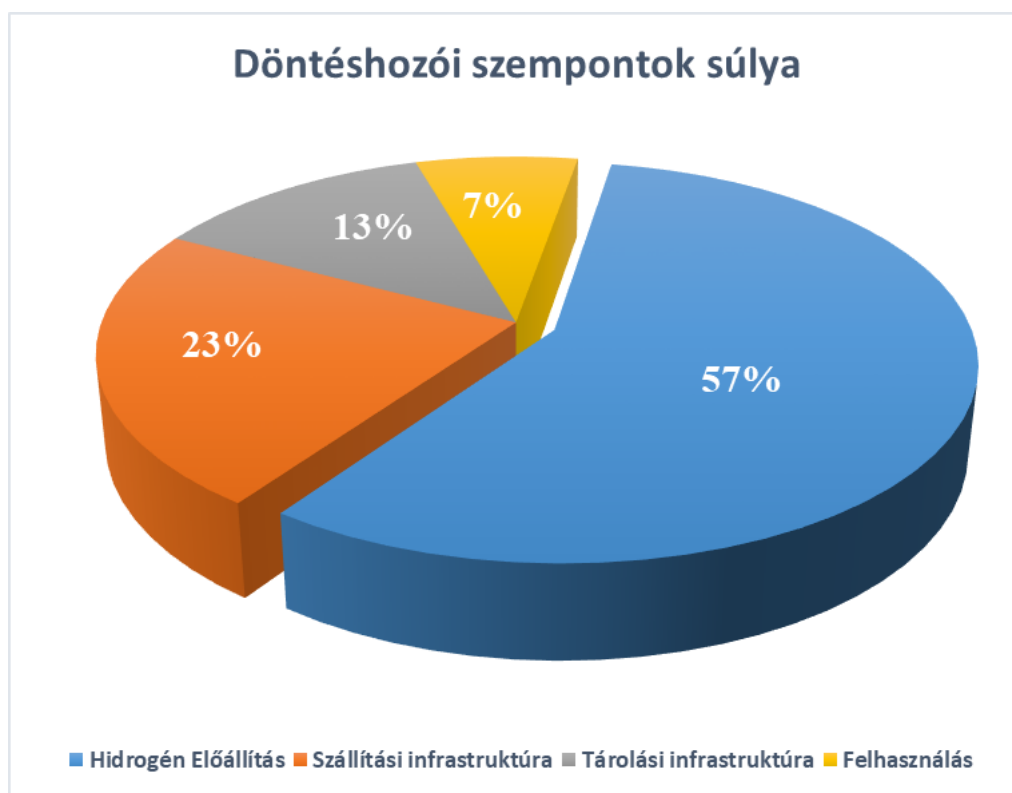
$$(22) \quad CR = \frac{CI}{RI}$$

Ha a CR kisebb, mint 0,1, úgy a mátrixunk konzisztensnek tekinthető, de ez nem feltétele egy jó döntésnek. Jelen $CR = 0,14$ így a szempontok bővítése célszerű opció lehet a jövőben.

3.6.4. Szempontok priorizálása

Az 5. táblázatban megkaptuk a szempontjaink súlyértékeit. A kapott eredményeket a 20. ábrán szemléltetem. Az ábra a hipotetikus döntéshozó termelési szempontú priorizálására világít rá. A második legfontosabb szempont tárolási infrastruktúra megléte, illetve a szállítási infrastruktúra rendelkezésre állása. A felhasználási oldal mindössze 7%-os súlyt képvisel az ideális célterületek kijelölése szempontjából. A felhasználási oldal döntési súlyának meghatározása során figyelembe vettem, hogy a legtöbb ipari egység a legfejlettebb régiókban található minden ország esetében, ezért amennyiben ez a szempont nagyobb súlyt kapna a döntési folyamatunkban, úgy nem szolgálná a jelenlegi és jövőbeli regionális fejlesztési elképzeléseket, amelynek fontos célja a fejlettségi különbségek csökkentése.

A tárolási és szállítási infrastruktúra esetében a súlyozás során figyelembe vettem, hogy a jelenlegi megoldások még nem alkalmasak egy teljesértékű disztribúciós hálózat működtetésére, még számos műszaki kihívásra kell megoldást találni a hatékony tárolás és szállítás megoldása érdekében. A szakirodalmi anyagok és az iparági jelentések áttekintése során arra a megállapításra jutottam, hogy jellemzően a szükséges technológiai fejlesztések lassúságát a hidrogén kínálati oldalának szűkössége okozza, ez vezetett a termelési szempont magasabb fontossági besorolásában.



20. ábra A döntéshozói szempontok súlya saját szerkesztés

3.6.5. A NUTS2-es statisztikai régiók értékelése és a hotspotok kijelölése

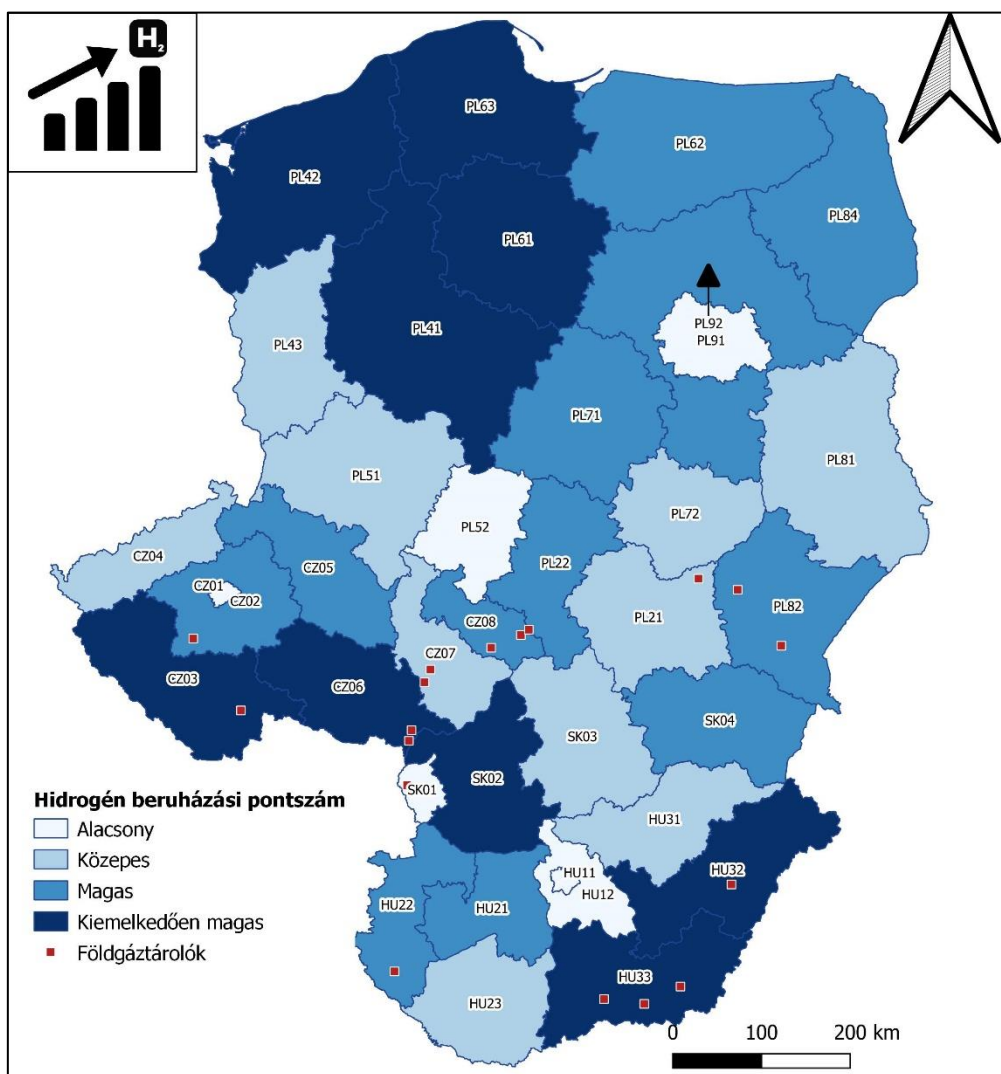
Az Eurostat adatok alapján értékelési táblázatokat állítottam fel az érintett országok vonatkozásában. A táblázatomba az AHP döntési szempontokhoz tartozó regionális adatok kerültek bele. Az értékelési folyamathoz szükséges országos táblázatokban minden értéket számokkal fejeztem ki az eurostat adatközlésének megfelelően, azonban ezen számadatok nem tekinthetők homogénnek, ahogy az a 6. táblázat ① Lépésénél is látszik. Ezért az értékelési táblázatban szereplő számadatokat átranszformálok 0 és 1 közé. Az egyik lehetséges transzformáció a táblázat soraiban szereplő értékek felhasználásával történő normálás, ami azt jelenti, hogy áttérünk egy arányossági skálára, ahol a maximum érték 1, és ezt az értéket az adott szempont szerinti legjobb alternatíva kapja (esetünkben a legideálisabb számérték), a többi pedig arányosan kisebb lesz. A normálást a 6. táblázat ② lépésében láthatjuk. A ③ lépésben a szempontok súlyainak segítségével értékeltem a régiókat egy esetleges beruházási döntés vonatkozásában. Az értékelés folyamatát Magyarország példáján keresztül mutatom be a 6. táblázat segítségével. A magasabb besorolás magasabb beruházási pontszámot jelent.

① Lépés	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra (km)	Tárolás (stratégiai gáztározók-db)	Felhasználó egységek (db)		
Budapest (HU11)	4067,35	260	0	11581		
Pest (HU12)	4135,13	541	0	8545		
Közép-Dunántúl (HU21)	4676,09	1178	0	6722		
Nyugat-Dunántúl (HU22)	4628,03	972	1	6293		
Dél-Dunántúl (HU23)	4751,77	1146	0	4803		
Észak-Magyarország (HU31)	4017,08	1027	0	5100		
Észak-Alföld (HU32)	4093,96	1484	1	6674		
Dél-Alföld (HU33)	4250,95	1323	3	7178		
② Lépés	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók-db)	Felhasználó egységek (db)		
Budapest (HU11)	0,85596	0,17520	0	1		
Pest (HU12)	0,87023	0,36456	0	0,73785		
Közép-Dunántúl (HU21)	0,98407	0,79380	0	0,58043		
Nyugat-Dunántúl (HU22)	0,97396	0,65499	0,333333333	0,54339		
Dél-Dunántúl (HU23)	1	0,77224	0	0,41473		
Észak-Magyarország (HU31)	0,84539	0,69205	0	0,44038		
Észak-Alföld (HU32)	0,86157	1	0,333333333	0,57629		
Dél-Alföld (HU33)	0,89460	0,89151	1	0,61981		
Szempont súlya =>	Súly = 0,57	Súly = 0,23	Súly = 0,13	Súly = 0,07		
③ Lépés	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók-db)	Felhasználó egységek (db)	Pontszám	Besorolás (1-4)
Budapest (HU11)	0,48790	0,04030	0	0,07000	0,59820	1
Pest (HU12)	0,49603	0,08385	0	0,05165	0,63153	1
Közép-Dunántúl (HU21)	0,56092	0,18257	0	0,04063	0,78413	3
Nyugat-Dunántúl (HU22)	0,55516	0,15065	0,043	0,03804	0,78674	3
Dél-Dunántúl (HU23)	0,57000	0,17761	0	0,02903	0,77665	2
Észak-Magyarország (HU31)	0,48187	0,15917	0	0,03083	0,67187	2
Észak-Alföld (HU32)	0,49109	0,23000	0,043	0,04034	0,80476	4
Dél-Alföld (HU33)	0,50992	0,20505	0,13	0,04339	0,88836	4

6. táblázat A régiók értékelésének folyamata a különböző beruházási szempontok alapján saját szerkesztés

3.6.7. A NUTS2-es régiók beruházási szempontú értékelésének megjelenítése

A régiók értékelése után lehetővé vált a régiók beruházási szempontú rangsorolása. Bár az értékelés során a hidrogén becsült előállítási volumene volt az egyik leglényegesebb szempont, a 21. ábrán megfigyelhetjük, hogy számos esetben mégsem az előállítás szempontjából legideálisabb területek értek el magas pontszámokat. A gáztárolók elhelyezkedése és a szállítási infrastruktúra főleg Csehország, Magyarország és Szlovákia esetében bizonyult döntő jelentőségűnek, amely annak köszönhető, hogy az előállítási volumenek egyenletes eloszlást követnek ezen országokban. Lengyelország esetében ugyanakkor a szélenergia szélsőséges eloszlása következtében az ország északi régiói kaptak magas beruházási pontszámot, szemben a gáztárolók szempontjából meghatározó déli régiókkal. Lengyelország esetében az Észak-Nyugati, Csehország esetében a Déli, Dél-keleti, Szlovákia keleti amíg Magyarországon az Észak- és Dél-Alföld régiói bizonyultak ideális beruházási célterületnek.



21. ábra A régiók rangsorolása a „Hidrogén beruházási” pontszám alapján saját szerkesztés

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A kutatásom során meghatároztam a visegrádi tagországok hasznosítható nap és szélenergia potenciálját éves villamosenergia előállításra vonatkoztatva egy négyzetméter területi dimenzióra kifejezve. Az így kapott eredmények alapján Lengyelország északi régiói kiemelkedően nagy hasznosítható szélenergia-potenciállal rendelkeznek, amelyből éves szinten akár 411 kWh is előállítható egy négyzetméterre vonatkoztatva. Napenergia vonatkozásában pedig Magyarországon esetében a legideálisabbak az adottságok, az ország déli peremterületein akár 288 kWh éves termelési volumen is prognosztizálható éves szinten. A jövőben az egyre növekvő hazai napelemkapacitásokat jól kiegészíthetik a lengyel szélparkokat, amennyiben lehetőség nyílik az energia hatékony tárolására például hidrogén formájában. Ezért a rendelkezésre álló nap és szélenergia-potenciálok birtokában megbecsültem az előállítható „zöld” hidrogén mennyiségét az érintett négy tagországban. Az elvégzett potenciálbecslés alapján a legmagasabb egységnyi területre vonatkoztatott előállítási volumen ugyancsak Lengyelország északi régióiban volt megfigyelhető, amely mértéke meghaladhatja az évi 6 ezer tonnás termelési volument is. Csehország esetében a cseh-sziléziai területeken lehet jelentős előállítási volumeneket prognosztizálni akár 4 ezer tonnát meghaladó mennyiségben, ugyanakkor az ország teljes területére vonatkoztatva a legtöbb esetben 3,5 ezer és 4 ezer tonna közé tehető az éves előállítható mennyiség. Hazánkban az ország teljes területén jellemzően egyenlő eloszlású termelési volumeneket figyelhetünk meg, amelyek az ország déli peremterületein elérhetik a 4,2 ezer tonnás éves termelést is. Vizsgáltam továbbá a potenciális hidrogén előállítási volumenek területi eloszlásának változását is a legdélebbi mérési ponttól a legészakibb mérési pont felé haladva, mind a nap, mind a szélenergiából történő előállítás vonatkozásában. A vizsgálat alapján az északi szélesség 49. fokától délre jellemzően a napenergiából történő hidrogén előállítás a hatékonyabb, míg ettől a ponttól északra a szélenergiából történő termelés az előnyösebb. A kutatásom további célkitűzése volt az ideális fejlesztési célterületek kijelölése NUTS2 regionális szinten egy esetleges hidrogénipari beruházás szempontjából. A célterületek meghatározásához az analitikus hierarchikus eljárást (AHP) alkalmaztam. A döntési szempontok kialakításánál figyelembe vettem a kutatásom friss eredményeit is az éves hidrogén termelési volumenekre vonatkoztatva. A további döntési szempontok közé tartozott a szállításhoz szükséges vasúti és közúti infrastruktúra rendelkezésre állása, a gáztárolók elhelyezkedése, illetve az adott régióban megtalálható ipari egységek száma, amelyek a potenciális felhasználói oldalt jelenítették meg a vizsgálatban. Bár a döntési eljárásban a hidrogéntermelés éves volumene volt a legfontosabb szempont, az így kapott

eredmények jellemzően különböztek attól, amit az éves hidrogén előállítás szemléltető térkép alapján prognosztizáltam volna. Mivel Csehország, Szlovákia és Magyarország adottságai leginkább a napenergiából történő hidrogénelőállításnak kedveznek, így ezen országok esetében az előállítási volumen területi eloszlása egyenletesnek mondható, különösen Magyarország esetében. Mivel nem tapasztalhatóak kardinális különbségek a regionális előállítási volumen vonatkozásában, így a rendelkezésre álló infrastruktúra és a gáztárolók elhelyezkedése válik döntő tényezővé. Lengyelország esetében jellemzően a szélenergiából történő hidrogénelőállítás az előnyösebb, így szélsőségesebben alakul a becsült előállítási volumen területi eloszlása. Ennek következtében már nem a szállítási infrastruktúra vagy a tározók elhelyezkedése a döntő tényező, hanem az éves előállítási volumen alakulása. Lengyelország esetében az ideális fejlesztési célterületek közé tartoznak a következő NUTS2-es régiók: Zachodniopomorskie, Wielkopolskie, Kujawsko-Pomorskie, Pomorskie. Csehország esetében pedig Jihozápad és Jihovýchod. Szlovákia tekintetében a Nyugat-Szlovákiai régió, amíg Magyarország vonatkozásában az Észak- és Dél-Alföld térsége. Fontos kiemelni, hogy bár lehetségessé vált a NUTS2-régió szintjén a „Hidrogén hotspotok” kijelölése, egy tényleges beruházás esetén minden esetben szükséges ezen régiók mélyelemzésére is.

A V4-ek közötti energiapolitikai együttműködés, valamint az országok kapacitásterveinek összehangolása biztonságosabb és hatékonyabb ellátást eredményezhet a jövőben, amelyben vélhetően már a hidrogén is fontos szerepet fog kapni. Jelen kutatás során csak az éves hidrogén előállítási volumeneket határoztam meg, a havi előállítás alakulását nem vizsgáltam. Ugyanakkor figyelembe véve, hogy a napenergia és a szélenergia éves termelési csúcsidőszakai eltérnek egymástól, így a jövőben érdemes lehet ilyen szempontból is megvizsgálni az előállítási volumen alakulását. Bár jelen munkám a Visegrádi Együttműködés tagországaival foglalkozik, a kutatási területet érdemes lehet kiterjeszteni a Balti-tenger és a Nyugat-Balkán térségére is. A nyugat-balkáni régió esetleges bevonása a V4-ek hidrogénstratégiájába mindkét fél számára jelentős előnyökkel járhat. A régióban a földrajzi és éghajlati adottságok révén különösen kedvezőek a lehetőségek napenergiakapacitások létesítésére, így például az északi területeken jellemzően szélcsendes nyári időszakokban is elegendő mennyiségű hidrogén állhatna rendelkezésre a visegrádi tagországok számára. A hidrogénkereskedelem jelentős bevételi forrásokat jelenthet a nyugat-balkáni régió számára. Az ellátásbiztonsági szempontok mellett a munkahelyteremtés és a tisztább energiatermelésre való átállás ösztönzésével a hidrogénipar pozitívan hathatna a térség európai integrációjának kérdésére is.

5. IRODALOMJEGYZÉK

Motavalli, J. (2003). The Reckoning. The Environmental Magazine, Vol. 14, No. 6, pp. 26-33.

Masson-Delmotte, V. et al. (2018). Global Warming of 1.5°C. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf

Porter, M. E., and Kramer, M.R. (2007). Strategy and Society: The Link between Competitive Advantage and Corporate Social Responsibility. Harvard Business Review, Vol. 84, No. 12, pp. 79-92.

Koubi, V. (2019). Climate Change and Conflict. Annual Review of Political Science, Vol. 22, pp. 343-360.

Dombi, M. (2009). Fenntartható energiagazdálkodás: a megújuló energiaforrások hasznosításának jelentősége, korlátai és lehetőségei. Acta agraria Debreceniensis, Vol. 33, pp. 145-154.

Wolfram, C., Shelef O., and Gertler P. (2012). How Will Energy Demand Develop in the Developing World?. Journal of Economic Perspectives, Vol. 26, No. 1, pp. 119-38.

U.S. Energy Information Administration. (2019). International Energy Outlook 2019 Reference case

Guerra, O.J., Zhang J., Eichman J., et al, (2020). The value of seasonal energy storage technologies for the integration of wind and solar power. Energy & Environment Science, Vol. 13, No. 7, pp. 1909-1922.

Roth, S. (2021). California just hit 95% renewable energy. Will other states come along for the ride?. Los Angeles Times, 2021. április 29., elérhető: <https://www.latimes.com/environment/newsletter/2021-04-29/solar-power-water-canals-california-climate-change-boiling-point> (olvasva: 2021. július 24.)

Kalaiselvam, S., Parameshwaran, R., (2014). Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: systems design, assessment and applications. Academic Press, San Diego? USA

European Commission (2020). A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe – Strategy. COM, 301 final, Brussels

Sartbaeva, A. et al., (2008). Hydrogen nexus in a sustainable energy future. *Energy & Environmental Science*, Vol. 1, No. 1, pp. 79-85.

Rahmouni, S. et al., (2017). Prospects of hydrogen production potential from renewable resources in Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 2, pp. 1383-1395.

Noureddine, B., Xiaodong, W. (2018). Poland Energy Transition: The Path to Sustainability in the Electricity and Heating Sector. The World Bank, Washington, D.C.

Djilali, M. et al., (2019). GIS based multi-criteria decision making for solar hydrogen production sites selection in Algeria. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 60, pp. 31808-31831.

Enghag, P. (2004). *Encyclopedia of the Elements. Technical Data, History, Processing, Applications*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp. 215-234.

Schiller, R. (2008). *Hidrogén az elemek királya*. Typotex, Budapest

Office of Energy Efficiency and Renewable Energy- Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office (HFTO). Hydrogen Storage elérhető: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> (olvasva: 2021. július 26.)

Patnaik, P. (2007). *A Comprehensive Guide to the Hazardous Properties of Chemical Substances 3rd Edition*. John Wiley & Sons Inc., Hoboken, USA, pp. 402.

Dumas, A. et al. (2012). Hydrogen Airships: A Necessary Return Because of High Costs of Helium. ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2012 november 9-15., Houston, Texas, USA

Dessler, A. J., Overs, D. E., and Appleby, W. H. (2005). The Hindenburg Fire: Hydrogen or Incendiary Paint?. *Buoyant Flight*, Vol. 52, No. 2&3, pp. 1-11.

Ajanovic, A., Haas, R. (2018). Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector. *Energy Policy*, Vol. 123, pp. 280-288.

International Energy Agency (2019). *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities, Technology Report*. elérhető: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (olvasva: 2021. július 21.)

Grabner, P., Wimmer, A., Gerbig F. and Krohmer, A. (2005). Hydrogen as a Fuel for Internal Combustion Engines – Properties, Problems and Chances. 5th International Colloquium FUELS, pp.3-13.

Mazloomi, K., Gomes, D. (2012). Hydrogen as an energy carrier: prospects and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16., No.5, pp. 3024-3033.

Madarász, M. (2010). A világpiaci kőolajárak és a Szovjetunió felbomlása In: Krausz, T. (2012). Rendszerváltás és történelem: tanulmányok a kelet-európai átalakulásról. L'Harmattan Kiadó, Budapest, pp. 91-112.

Pesonen, O., Alakunnas, T. (2017). Energy storage: A Missing Piece of the Puzzle for the Self-Sufficient Living, Publication series B: Research reports and Compilations. Lapland University of Applied Sciences, Rovaniemi

Jorgensen, S.W. (2011). Hydrogen storage tanks for vehicles: recent progress and current status. Current Opinion in Solid State and Materials Science, Vol. 15, pp. 39-43.

Deveci, M. (2018). Site selection for hydrogen underground storage using interval type-2 hesitant fuzzy sets. International Journal of Hydrogen Energy Vol. 43, No. 19, pp. 9353-9368.

Bünger, U. et al (2016). Large-scale underground storage of hydrogen for the grid integration of renewable energy and other applications, In: Compendium of Hydrogen Energy, Woodhead Publishing, Cambridge, pp.133-163.

Gidai, O. (2021). Magyarországon is beindul a hidrogénteknológia, lehetőséget kapnak a hazai beszállítók. Portfólió, 2021. május 26., elérhető: <https://www.portfolio.hu/gazdasag/20210526/magyarorszagon-is-beindul-a-hidrogentechnologia-lehetoseget-kapnak-a-hazai-beszallitok-484870> (olvasva: 2021. július 14.)

Reuß, M. et al. (2017). Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. Applied Energy, Vol. 200, pp. 290-302.

Midilli A., Ay, M., Dincer, I., Rosen, M. (2015). Hydrogen and hydrogen energy strategies I: current status and needs. [Renewable and Sustainable Energy Reviews](#), Vol. 9, No. 3, pp. 255-271.

Jongh, de P.E., Adelhelm, P. (2010). Nanosizing and nanoconfinement: new strategies towards meeting hydrogen storage goals. *ChemSusChem* Vol. 3, No. 12, pp.1332-1348.

Rusman, N.A.A., Dahari, M. (2016). A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 28, pp. 12108-12126.

Suri, S.U.K., Siddique, M. (2019). Novel and optimized techniques for storage and transportation of hydrogen: perspectives and challenges. *Journal of Applied and Emerging Sciences*, Vol. 9, No. 1, pp. 8-15.

Cerniauskas, S., Junco, A. J. C., Grube, T., Robinius, M., Stolten, D. (2020). Options of natural gas pipeline reassignment for hydrogen: Cost assessment for a Germany case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 21, pp. 12095–12107.

Chiesa, P., Lozza, G., Mazzocchi, L. (2005). Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 127, No. 1, pp. 73–80.

Liu, B., Liu, S., Guo S., Zhang, S. (2020). Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 3, pp. 1385-1398.

Inzelt, Gy. (2004). Régi-új áramforrások: a tüzelőanyag-elemek. *Fizikai Szemle*, Vol. 54. No. 8, pp. 252-258.

Pollet, B. G., Staffell, I., Shang, J. L. (2012). Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. *Electrochimica Acta*, Vol. 84, pp. 235-249.

Hart, D., Howes, J., Lehner, F., Dodds, P., Hughes, N., Fais, B., Sabio, N., Crowther, M. (2015). Scenarios for deployment of hydrogen in contributing to meeting carbon budgets and the 2050 target. Final Report, CCC – Committee on Climate Change, E4tech (UK) Ltd., London

European Environment Agency (2020). Air quality in Europe—2020 report. Luxembourg
Ball, M., Weeda, M. (2015). The hydrogen economy - Vision or reality?. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 25, pp. 7903–7919.

Samsatli, S., Staffell, I., Samsatli, N. J. (2016). Optimal design and operation of integrated wind-hydrogen-electricity networks for decarbonising the domestic transport sector in Great Britain. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 1, pp. 447–475.

Staffell, I., Scamman, D., Abad A. V. et al, (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system, *Energy & Environment Science*, Vol. 12, pp. 463-491.

Sealy, C. (2008). The problem with platinum. *Materials Today*, Vol. 11, No. 12, pp. 65-68.

Inzelt, Gy. (1999). *Az elektrokémia korszerű elmélete és módszerei*, II. kötet, Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., Budapest

Logan, K. G., Nelson, J. D., McLellan, B. C., Hastings, A. (2020). Electric and hydrogen rail: Potential contribution to net zero in the UK. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 87, Article 102523

Patel, T. (2021). A hydrogen-powered train will make transport history as Europe looks to become world leader in green rail travel. *Fortune*, 2021. április 23. elérhető: <https://fortune.com/2021/04/23/hydrogen-train-transport-europe-green-rail/> (olvasva: 2021. július 18.)

Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M. M., Atilhan, M., Moore, M., Nielsen, R. B., (2021). Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, Volume 31, Article: 100668

Airbus. The green hydrogen ecosystem for aviation, explained 2021. június 17. elérhető: <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2021/06/green-hydrogen-ecosystem-for-aviation-explained.html> (olvasva: 2021. július 29.)

Dodds, P. E., Staffell, I., Hawkes, A. D., Li, F., Grünewald, P., McDowall, W., Ekins, P. (2015) Hydrogen and fuel cell technologies for heating: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 5, pp. 2065-2083.

Climate Change Committee. (2015). The Fifth Carbon Budget: The next step towards a low carbon economy. elérhető: <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2015/11/Committee-on-Climate-Change-Fifth-Carbon-Budget-Report.pdf> (olvasva: 2021. július 14.)

Gang, B. G., Kwon, S. (2018). All-in-one portable electric power plant using proton exchange membrane fuel cells for mobile applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 12, pp. 6331-6339.

Grams, C. M., Beerli, R., Pfenninger, S., Staffell I., Wernli, H. (2017). Balancing Europe's wind power output through spatial deployment informed by weather regimes. *Nature Climate Change*, Vol 7, pp. 557–562.

Chiesa, P., Lozza, G., Mazzocchi, L. (2005). Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 127, No. 1, pp. 73–80.

Náray-Szabó, G. (2006) *Kémia*. Akadémiai Kiadó Zrt., Budapest, pp.301-304.

Német, B. (2013). *Ipari technológiák*. Pécsi Tudományegyetem, Pécs, pp. 77-78.

Encyclopedia Britannica: Haber-Bosch process. elérhető: <https://www.britannica.com/technology/Haber-Bosch-process> (olvasva: 2021. július 29.)

Grochala, W. (2015). First there was hydrogen. *Nature Chemistry*, Vol. 7, No. 3. pp. 264.

Rosen, M.A., Koohi-Fayegh, S. (2016). The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and Environment*. Vol. 1, pp. 10–29.

Hamacher T. (2016) Hydrogen as a Strategic Secondary Energy Carrier. In: Töpler J., Lehmann J. (2016) *Hydrogen and Fuel Cell*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1-20.

Dou, Y., Sun, L., Ren, J., Dong, L. (2017). Chapter 10 - Opportunities and Future Challenges in Hydrogen Economy for Sustainable Development. In: Scipioni, A., Manzardo, A., Ren, J. (2017) *Hydrogen Economy*, Academic Press, Elsevier, pp. 277-305.

Nikolaidis, P.; Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67, No. 67, pp. 597–611.

Kayfeci, M., Keçebaş, A., Bayat, M. (2019). Chapter 3 - Hydrogen production. In: *Solar Hydrogen Production: Processes, Systems and Technologies* (1st Edition), Academic Press, , Elsevier (pp.45-83)

Lin, S., Harada, M., Suzuki, Y., Hatano, H. (2002). Hydrogen production from coal by separating carbon dioxide during gasification. *Fuel*, Vol. 81, No. 16, pp. 2079-2085.

Dufour, J., Serrano, D. P., Gálvez, J. L., Moreno, J., González, A. (2011). Hydrogen Production from Fossil Fuels: Life Cycle Assessment of Technologies with Low Greenhouse Gas Emissions. *Energy Fuels*, Vol. 25, No. 5, pp. 2194–2202.

Ni, M., Leung, M.K.H., Leung, D.Y.C., Sumathy, K. (2007). A review and recent developments in photocatalytic water-splitting using TiO₂ for hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, No. 3, pp. 401-425.

Wang, M., Wang, Z., Gong, X., Guo, Z. (2014). The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 573-588.

Kramer D., (2020). Could hydrogen bail out nuclear power? *Physics Today*, Vol. 73, No. 8, pp. 20.

Major, A. (2020). A hidrogén jelentheti a jövőt az atomerőműveknek, *Portfólió*, 2020. augusztus 28. elérhető: <https://www.portfolio.hu/uzlet/20200828/a-hidrogen-jelentheti-a-jovot-az-atomeromuveknek-445370> (olvasva: 2021. július 29.)

Kengyel, Á. (2010). Az Európai Unió közös politikái, Akadémiai Kiadó, Budapest

Az Európai Unió Tanácsa (2014). CO EUR-PREP 14, 2014. június 25. Brüsszel, elérhető: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-8288-2014-INIT/en/pdf> (olvasva: 2021. július 25.)

Takács, G. (2018). Az energiabiztonság elmélete, *Közép-Európai Közlemények: A történelemtudomány, a regionális tudomány, a földrajztudomány, és a gazdálkodás- és szervezéstudományok művelőinek referált folyóirata*, Vol. 11. No. 3, pp. 58-78.

Minghe, H. (2021). China needs breakthroughs in green hydrogen to catch up with global leader Japan, experts say. *South China Morning Post*, 2021. június 21., elérhető: <https://www.scmp.com/business/article/3138166/china-needs-breakthroughs-green-hydrogen-catch-global-leader-japan-say> (olvasva: 2021. július 30.)

Bradshaw, M., Boersma, T. (2020). Natural Gas. Polity, pp. 114.

Hoffman, C., Hoey, van M., Zeumer, B. (2020). Decarbonization challenge for steel. McKinsey & Company, 2020 június 3., elérhető <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel> (olvasva: 2021. július 24.)

Balaraman, K. (2021). As the US begins to craft a hydrogen strategy, Europe's experience could offer valuable lessons. Utility Dive, 2021 július 6., elérhető: <https://www.utilitydive.com/news/us-hydrogen-strategy-europe-power-sector-lessons/602096/> (olvasva: 2021. július 27.)

Kaderják, P. (szerk.) (2011) The economic value of increased supply security. In: Security of energy supply in Central and South-East Europe, AULA Kiadó, Budapest, pp. 46-91.

Zgut et al. (2017) A V4 energiabiztonsága: a nukleáris energia és a szén földje. Political Capital, 2017. március 21., elérhető: https://www.politicalcapital.hu/hireink.php?article_read=1&article_id=422 (olvasva: 2021. augusztus 3.)

Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2021). Rozpoczęły się konsultacje publiczne projektu „Polskiej Strategii Wodorowej” elérhető: <https://www.gov.pl/web/klimat/rozpoczely-sie-konsultacje-publiczne-projektu-polskiej-strategii-wodorowej> (olvasva: 2021. augusztus 9.)

Polska Strategia Wodorowa Do Roku 2030 Z Perspektywą Do 2040 R. – Projekt (2021) <https://www.gov.pl/attachment/47841420-867b-4cec-a7d1-beeca70879d8> (olvasva: 2021. augusztus 9.)

Ministerstvo průmyslu a obchodu (2021). Vodíková strategie ČR schválena vládou. elérhető <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/strategicke-projekty/vodikova-strategie-cr-schvalena-vladou-262590/> (olvasva: 2021. augusztus 12.)

Vodíková Strategie České Republiky (2021). https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2021/8/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf (olvasva: 2021. augusztus 12.)

Szlovák Köztársaság Hírügynöksége (TASR) (2021). National Hydrogen Strategy Greenlighted by Government, elérhető: <https://www.tasr.sk/tasr-clanok/TASR:2021062300000291>(olvasva: 2021. augusztus 13.)

Národná vodíková asociácia Slovenska (NVAS) (2021) elérhető: <https://nvas.sk/en/o-nas/> (olvasva: 2021. augusztus 13.)

Magyarország Nemzeti Hidrogénstratégiája (2021) elérhető: <https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-nemzeti-hidrogenstrategiaja> (olvasva: 2021. július 13.)

MCHUGH, K. 2005: Hydrogen Production Methods. MPR Associates Inc., 41

McHugh, K. (2005). Hydrogen production methods. Conference papers, MPR Associates, Inc., MPRWP-0001

El-Shafie, M., Kambara, S., Hayakawa, Y. (2019). Hydrogen Production Technologies Overview. Journal of Power and Energy Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 107-154.

Lampert, D.J., et al. (2016). Wells to wheels: water consumption for transportation fuels in the United States. Energy & Environment Science, Vol. 9, No.3, pp. 787-802.

Samir Touili, Ahmed Alami Merrouni, Alae Azouzoute, Youssef El Hassouani, Abdel-illah Amrani, A technical and economical assessment of hydrogen production potential from solar energy in Morocco, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 43, Issue 51, 2018, Pages 22777-22796,

Kudria, S., Ivanchenko, I.V., Tuchynskiy, B., Petrenko, K., Karmazin, O.O., & Riepin, O. (2020). Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy*.

Kordas N., 2018. http://nimbus.elte.hu/tanszek/docs/MSc/2018_1/Kordas_Nora_2018.pdf

Hanane Dagdougui, Ahmed Ouammi, Roberto Sacile, A regional decision support system for onsite renewable hydrogen production from solar and wind energy sources, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 36, Issue 22, 2011, Pages 14324-14334,

T. Urakabe, K. Fujiwara, T. Kawakami and N. Nishio, "High efficiency power conditioner for photovoltaic power generation system," The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -, 2010, pp. 3236-3240

Arsie, Ivan & Marano, Vincenzo & Nappi, G & Rizzo, Gianfranco. (2005). A Model of a Hybrid Power Plant With Wind Turbines and Compressed Air Energy Storage. Proceedings of the ASME Power Conference, 2005. 10.1115/PWR2005-50187.

Kotowicz, J., Jurczyk, M. & Węcel, D. (2018). Equipment Exploitation in Power to Gas Installation. New Trends in Production Engineering, 1(1) 409-418.

Budapesti Corvinus Egyetem MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézetébe kihelyezett Gazdasági Döntések Tanszék Rapcsák Tamás Többszemponútú döntési problémák Egyetemi oktatáshoz segédanyag, 2007

<https://www.offshore-energy.biz/khi-gets-classnks-aip-for-worlds-largest-liquefied-hydrogen-carrier-ccs/>, Bahtić, F. (2021), KHI gets ClassNK's AiP for world's largest liquefied hydrogen carrier CCS

KHI, 2019, https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487

Duleba, Szabolcs. (2006). A közép- és felső vezetői döntéseket támogató AHP-módszer, és alkalmazása logisztikai szolgáltatók kiválasztására. Vezetéstudomány / Budapest Management Review. 37.

Kleijnen, Jack. (2017). Kriging: Methods and Applications. SSRN Electronic Journal. 10.2139/ssrn.3075151.

Davis, B.M., 1987: Uses and abuses of cross-validation in geostatistics. Mathematical Geology, 19, 241–248.

ESRI- ArcGIS 10.3 documentation, How Kriging works.

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>

MELLÉKLETEK

Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás
MAKROREGION CENTRALNY (PL7)	Lódzkie (PL71)	6198,398958	1310	0	18 278
	Świętokrzyskie (PL72)	5185,483564	721	0	6 544
MAKROREGION POLUDNIOWY (PL2)	Małopolskie (PL21)	4162,426485	1234	1	23 227
	Śląskie (PL22)	4282,885796	2139	0	28 879
MAKROREGION WSCHODNI (PL8)	Lubelskie (PL81)	5609,051116	970	0	8 946
	Podkarpackie (PL82)	4625,410417	1134	2	10 954
	Podlaskie (PL83)	6555,923341	757	0	5 239
MAKROREGION PÓŁNOCNO-ZACHODNI (PL4)	Wielkopolskie (PL41)	5431,887134	2100	0	26 353
	Zachodniopomorskie (PL42)	6897,929137	1208	0	10 778
	Lubuskie (PL43)	5618,006576	1016	0	5 441
MAKROREGION POLUDNIOWO-ZACHODNI (PL5)	Dolnośląskie (PL51)	3956,535216	1940	0	16 751
	Opolskie (PL52)	4814,887064	874	0	5 692
MAKROREGION PÓŁNOCNY (PL6)	Kujawsko-Pomorskie (PL61)	6290,127057	1487	0	11 533
	Warmińsko-Mazurskie (PL62)	6874,877154	1138	0	6 856
	Pomorskie (PL63)	6860,489148	1260	0	19 018
MAKROREGION WOJEWÓDZTWO MAZOWIECKIE (PL9)	Warszawski stołeczny (PL91)	4627,27881	300	0	21 676
	Mazowiecki regionalny (PL92)	6270,795745	1285	0	12 038

Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás
MAKROREGION CENTRALNY (PL7)	Lódzkie (PL71)	0,898588378	0,612435718	0	0,632917
	Świętokrzyskie (PL72)	0,751744975	0,337073399	0	0,226601
MAKROREGION POLUDNIOWY (PL2)	Małopolskie (PL21)	0,60343132	0,576905096	0,5	0,804287
	Śląskie (PL22)	0,620894432	1	0	1,000000
MAKROREGION WSCHODNI (PL8)	Lubelskie (PL81)	0,813150005	0,453482936	0	0,309775
	Podkarpackie (PL82)	0,670550585	0,530154278	1	0,379307
	Podlaskie (PL83)	0,950419062	0,353903693	0	0,181412
MAKROREGION PÓŁNOCNO-ZACHODNI (PL4)	Wielkopolskie (PL41)	0,787466358	0,981767181	0	0,912532
	Zachodniopomorskie (PL42)	1	0,564749883	0	0,373212
	Lubuskie (PL43)	0,814448288	0,474988312	0	0,188407
MAKROREGION POLUDNIOWO-ZACHODNI (PL5)	Dolnośląskie (PL51)	0,573583048	0,906965872	0	0,580041
	Opolskie (PL52)	0,698019212	0,408602151	0	0,197098
MAKROREGION PÓŁNOCNY (PL6)	Kujawsko-Pomorskie (PL61)	0,911892821	0,695184666	0	0,399356
	Warmińsko-Mazurskie (PL62)	0,99665813	0,53202431	0	0,237404
	Pomorskie (PL63)	0,994572286	0,589060309	0	0,658541
MAKROREGION WOJEWÓDZTWO MAZOWIECKIE (PL9)	Warszawski stołeczny (PL91)	0,670821448	0,140252454	0	0,750580
	Mazowiecki regionalny (PL92)	0,909083816	0,600748013	0	0,416843

Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás	SZUM	1-4
MAKROREGION CENTRALNY (PL7)	Lódzkie (PL71)	0,512195376	0,140860215	0	0,044304	0,697359756	3
	Świętokrzyskie (PL72)	0,428494636	0,077526882	0	0,015862	0,521883562	2
MAKROREGION POLUDNIOWY (PL2)	Małopolskie (PL21)	0,343955852	0,132688172	0,065	0,056300	0,597944104	2
	Śląskie (PL22)	0,353909826	0,23	0	0,070000	0,653909826	3
MAKROREGION WSCHODNI (PL8)	Lubelskie (PL81)	0,463495503	0,104301075	0	0,021684	0,589480847	2
	Podkarpackie (PL82)	0,382213833	0,121935484	0,13	0,026551	0,660700791	3
	Podlaskie (PL83)	0,541738865	0,081397849	0	0,012699	0,635835562	3
MAKROREGION PÓŁNOCNO-ZACHODNI (PL4)	Wielkopolskie (PL41)	0,448855824	0,225806452	0	0,063877	0,738539487	4
	Zachodniopomorskie (PL42)	0,57	0,129892473	0	0,026125	0,726017339	4
	Lubuskie (PL43)	0,464235524	0,109247312	0	0,013188	0,586671312	2
MAKROREGION POLUDNIOWO-ZACHODNI (PL5)	Dolnośląskie (PL51)	0,326942337	0,208602151	0	0,040603	0,576147348	2
	Opolskie (PL52)	0,397870951	0,093978495	0	0,013797	0,505646322	1
MAKROREGION PÓŁNOCNY (PL6)	Kujawsko-Pomorskie (PL61)	0,519778908	0,159892473	0	0,027955	0,707626296	4
	Warmińsko-Mazurskie (PL62)	0,568095134	0,122365591	0	0,016618	0,707079029	3
	Pomorskie (PL63)	0,566906203	0,135483871	0	0,046098	0,74848793	4
MAKROREGION WOJEWÓDZTWO MAZOWIECKIE (PL9)	Warszawski stołeczny (PL91)	0,382368225	0,032258065	0	0,052541	0,46716689	1
	Mazowiecki regionalny (PL92)	0,518177775	0,138172043	0	0,029179	0,685528807	3

Lengyelország régióinak értékelése

Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás	SZUM	1-4
Slovakia (SK0)	Bratislava Region (SK01)	4014,84	346,00	0,00	8018,00		
	Western Slovakia (SK02)	4063,39	1356,00	1,00	27833,00		
	Central Slovakia (SK03)	3878,52	1168,00	0,00	20487,00		
	Eastern Slovakia (SK04)	3809,05	1255,00	0,00	21719,00		
Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás	SZUM	1-4
Slovakia (SK0)	Bratislava Region (SK01)	0,98805	0,255162242	0	0,288075		
	Western Slovakia (SK02)	1,00000	1	1	1,000000		
	Central Slovakia (SK03)	0,95450	0,861356932	0	0,736069		
	Eastern Slovakia (SK04)	0,93741	0,925516224	0	0,780333		
Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás	SZUM	1-4
Slovakia (SK0)	Bratislava Region (SK01)	0,56319	0,058687316	0	0,020165	0,64204	1
	Western Slovakia (SK02)	0,57000	0,23	0,13	0,070000	1,00000	4
	Central Slovakia (SK03)	0,54407	0,198112094	0	0,051525	0,79370	2
	Eastern Slovakia (SK04)	0,53432	0,212868732	0	0,054623	0,80181	3

Szlovákia régióinak értékelése

Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás
Czech Republic (CZ0)	Prague (CZ01)	3688,98111	288	0	31 120
	Střední Čechy /Central Bohemia/ (CZ02)	3720,946249	1638	1	23 205
	Jihozápad /Southwest/ (CZ03)	3796,576935	1865	1	18 794
	Severozápad /Northwest/ (CZ04)	3594,658045	1649	0	13 250
	Severovýchod /Northeast/ (CZ05)	3652,326065	1844	0	28 285
	Jihovýchod /Southeast/ (CZ06)	3831,85149	1660	2	32 262
	Střední Morava /Central Moravia/ (CZ07)	3704,775127	1130	2	22 193
	Moravskoslezsko /Moravian-Silesian/ (CZ08)	4029,593875	763	2	17 119
Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás
Czech Republic (CZ0)	Prague (CZ01)	3688,98111	288	0	31 120
	Střední Čechy /Central Bohemia/ (CZ02)	3720,946249	1638	1	23 205
	Jihozápad /Southwest/ (CZ03)	3796,576935	1865	1	18 794
	Severozápad /Northwest/ (CZ04)	3594,658045	1649	0	13 250
	Severovýchod /Northeast/ (CZ05)	3652,326065	1844	0	28 285
	Jihovýchod /Southeast/ (CZ06)	3831,85149	1660	2	32 262
	Střední Morava /Central Moravia/ (CZ07)	3704,775127	1130	2	22 193
	Moravskoslezsko /Moravian-Silesian/ (CZ08)	4029,593875	763	3	17 119
Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás
Czech Republic (CZ0)	Prague (CZ01)	3688,98111	0,154423592	0	0,96460
	Střední Čechy /Central Bohemia/ (CZ02)	3720,946249	0,878284182	0,333333333	0,71927
	Jihozápad /Southwest/ (CZ03)	3796,576935	1	0,333333333	0,58254
	Severozápad /Northwest/ (CZ04)	3594,658045	0,884182306	0	0,41070
	Severovýchod /Northeast/ (CZ05)	3652,326065	0,988739946	0	0,87673
	Jihovýchod /Southeast/ (CZ06)	3831,85149	0,89080429	0,666666667	1,00000
	Střední Morava /Central Moravia/ (CZ07)	3704,775127	0,605898123	0,666666667	0,68790
	Moravskoslezsko /Moravian-Silesian/ (CZ08)	4029,593875	0,409115282	1	0,53062
Nuts1	Nuts2	Zöld hidrogén előállítás t/km2/év	Szállítási infrastruktúra km (2019)	Tárolás (stratégiai gáztározók)	Felhasználás
Czech Republic (CZ0)	Prague (CZ01)	0,521819146	0,035517426	0	0,624859
	Střední Čechy /Central Bohemia/ (CZ02)	0,526340725	0,202005362	0,043333333	0,822028
	Jihozápad /Southwest/ (CZ03)	0,537038947	0,23	0,043333333	0,85115
	Severozápad /Northwest/ (CZ04)	0,508476821	0,20336193	0	0,740588
	Severovýchod /Northeast/ (CZ05)	0,516634163	0,227410188	0	0,805415
	Jihovýchod /Southeast/ (CZ06)	0,542028655	0,204718499	0,086666667	0,903414
	Střední Morava /Central Moravia/ (CZ07)	0,524053264	0,139356568	0,086666667	0,798229
	Moravskoslezsko /Moravian-Silesian/ (CZ08)	0,57	0,094096515	0,13	0,83124

Csehország régióinak értékelése

1)	Hidrogén Hotspot kialakítása				2)	Hidrogén Hotspot kialakítása				3)	Hidrogén Hotspot kialakítása			
	Hidrogén Előállítás	Szállítási infrastruktúra	Tárolás	Felhasználás		Hidrogén Előállítás	Szállítási infrastruktúra	Tárolás	Felhasználás		Hidrogén Előállítás	Szállítási infrastruktúra	Tárolás	Felhasználás
Hidrogén Előállítás	1	5	5	5	Hidrogén Előállítás	1,00	5,00	5,00	5,00	Hidrogén Előállítás	1	5	2	5
Szállítási infrastruktúra	1/5	1	4	3	Szállítási infrastruktúra	0,20	1,00	4,00	3,00	Szállítási infrastruktúra	0,20	1	4,00	3
Tárolás	1/5	1/4	1	3	Tárolás	0,20	0,25	1,00	3,00	Tárolás	0,50	0,25	1	3
Felhasználás	1/5	1/3	1/3	1	Felhasználás	0,20	0,33	0,33	1,00	Felhasználás	0,50	0,33	0,33	1
SZUM	1,60	6,58	10,33333333	12	SZUM	1,60	6,58	10,33333333	12	SZUM	1,60	6,58	10,33	12

4)	Hidrogén Hotspot kialakítása				5)	Hidrogén Hotspot kialakítása				Szempont súlya
	Hidrogén Előállítás	Szállítási infrastruktúra	Tárolás	Felhasználás		Hidrogén Előállítás	Szállítási infrastruktúra	Tárolás	Felhasználás	
Hidrogén Előállítás	0,6250	0,7595	0,483870968	0,4167	Hidrogén Előállítás	0,6250	0,7595	0,483870968	0,4167	0,571257826
Szállítási infrastruktúra	0,1250	0,1519	0,3871	0,2500	Szállítási infrastruktúra	0,1250	0,1519	0,3871	0,2500	0,228498877
Tárolás	0,1250	0,0380	0,0968	0,2500	Tárolás	0,1250	0,0380	0,0968	0,2500	0,127437219
Felhasználás	0,1250	0,0506	0,0323	0,0833	Felhasználás	0,1250	0,0506	0,0323	0,0833	0,0728
SZUM	1,60	6,58	10,33333333	12	SZUM	1,60	6,58	10,33333333	12	

AHP döntési mátrix számítások I.

8)	$\lambda_{\max}$	
4,381750645		
következetlenségi indexet		
$\lambda_{\max-n}$		
n-1		
9)	0,381750645	
	3	
0,12725		
következetlenségi indexet (CI)		
10)	CI	
	RI	
0,141111111		
következetlenségi hányados (CR)		

AHP döntési mátrix számítások II.