

Hidrogén hajtás alkalmazása belvízi hajózásban

Application of hydrogen propulsion in inland navigation

LÉVAI Emese¹, BEREZKY Ákos²

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar Hallgató,

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar Egyetemi Docens,
Budapest, Műegyetem rkp. 3, 1111, Telefonszám: (06 1) 463 1111

Abstract

Today, alternative drives are a key segment of international research. The aim of the dissertation is to examine one of these, the hydrogen drive, from a technical point of view. In addition, the aim is to examine how the propulsion of a Hungarian lake ferry could be converted from an internal combustion engine propulsion to a hydrogen propulsion, in line with international trends, while maintaining its suitability for its current task. We also discuss the infrastructural transformation required for inland hydrogen propulsion in inland waterway transport and tangentially in other transport systems.

Keywords: ship, hydrogen, propulsion, ferry, energy

Kivonat

Today, alternative drives are a key segment of international research. The aim of the dissertation is to examine one of these, the hydrogen drive, from a technical point of view. In addition, the aim is to examine how the propulsion of a Hungarian lake ferry could be converted from an internal combustion engine propulsion to a hydrogen propulsion, in line with international trends, while maintaining its suitability for its current task. We also discuss the infrastructural transformation required for inland hydrogen propulsion in inland waterway transport and tangentially in other transport systems.

Kulcsszavak: hajó, hidrogén, hajtás, komp, energia

1 HIDROGÉN TECHNOLÓGIA

A hidrogén a Földön atomszázalék tekintetében a második leggyakoribb elem, túlnyomórészt vegyületeivel találkozunk. Leggyakrabban a vízben, de a szerves vegyületek nagy része is tartalmazza. Fizikai és kémiai tulajdonságai közül a legtöbb alkalmassá teszi, hogy az energiaszektor foglalkozzon vele.

1.1. A hidrogén technológia létjogosultságáról általában

Bár a közvetlen kibocsátást szemlélve a hidrogénnel való hajtás környezetkímélő mivolta látványos, globálisan szemlélve azt tapasztaljuk, hogy összehatásfokban oly mértékben alulmúlja a fosszilis tüzelőanyaggal való meghajtást, hogy ezzel párhuzamba állítva költséghatékonyasága megkérdőjeleződik. A hidrogén hajtást vizsgálva labori körülmények között [1] a motor átlagos hatásfoka mindössze 30% volt, ez a gyakorlatban az alkatrészek kopásával és a korrózióval csak romlik. Viszonyításképpen a Volkswagen 2020. október 20-i sajtóközleménye [2] szerint az elektromos (akkumulátoros) autók hajtásának a hatásfoka hozzávetőleg 70-80%, ha csak a hajtást vesszük figyelembe (Tank to Wheel). A sajtóközleményben a fejlesztők tanulságként ki is jelentették: pont emiatt a látványosan alacsony előállítási hatásfok miatt csak ott jelenthető ki, hogy gazdaságos és környezetkímélő a hidrogénhajtás, ahol a zöld hidrogén és a VER (Villamos energia rendszer) a meghajtás alapja. Ezen utóbbin belül akkor, ha a villamos hálózaton valamely termelő egység kvázi „többletenergiát” termel, amit nem- vagy csak költségesen tudnánk eltárolni. Magyar viszonylatban erre vonatkozólag egy kiemelkedő tényező a Paksi Atomerőmű által termelt villamos energia. Az üzem közel 100%-os kihasználtsággal üzemel (eltekintve a karbantartásoktól, hűtőhőmérséklet-

változástól és a meghibásodásoktól). A fogyasztás már nem ennyire állandó érték, már csak a fűtésszezonok váltakozása és a napszakok is ingadozóvá teszi a lakossági villamos energia felhasználását. Ez azt jelenti, hogy az év bizonyos szakaszaiban atomerőműveinkben, valamint megújuló energiaforrásokat használó berendezéseinkben olyan villamos energia termelődik, amit utána közvetlenül nem is használunk el, ezt tárolni lehet, de körülményes. Ezt az energiát célszerű tehát hidrogén előállítására fordítani. Lakossági felhasználás tekintetében az árak is okozzák a technológia alacsonyabb népszerűségét az elektromos és a fosszilis tüzelőanyaggal működő járműhasználattal szemben: 100 km utat feltételezve a felhasználói költségek 2-7 euró körül mozognak, a hidrogén hajtás esetében ez 9-12 euró.

Itt ki kell emelni, hogy a hidrogén felhasználásánk első és legfontosabb aspektusa a fenntarthatóság. Sikere és elterjedése átütő mértékben gazdasági becslések szerint akkor várható, ha a fosszilis energiahordozók már nem állnak rendelkezésre. Így tehát látni kell, hogy a jelen kapcsolódó kutatásai nem csak akkor létjogosultak, amikor versenytársként értelmezhető a többi meghajtással szemben, hanem önmagában is értékes befektetés a következő század átalakuló energiapiaci helyzetére.

1.2. A magyar belvízi hajózás potenciális kapcsolata a hidrogén technológiával–

A fenti indoklásból kiderül, hogy az a technológia, ami az autópárházban működés terén részben már bizonyított, de költséghatékonyság területén még nem teljes a sikere, az a vízi közlekedésben előnyösebben tudna működni. A vízi közlekedésen belül azonban széles skálán mozognak a szállítási feladatok, emiatt a technológia sem minden esetben hozza a tőle elvárt költséghatékonyság javulást. Itt a felhasználást elkülönítjük kis-és nagyhajóknak. Kishajók esetén. Lokálisan, a felhasználó számára a helyi szigorítások lehetnek ekkor indokok a technológia mellett. Nagyhajók esetében olyami és tavi viszonylaton is kihívás lenne hidrogénüzemű járművek tömeges megjelenése. A közúttal ellentétben a vízi útvonalakon kötöttebb a töltőállomás elhelyezése. Ennek főbb szempontjai:

A töltőállomások

- Szárazföldön vannak,
- Kikötésre alkalmas (vagy azzá tehető) helyen vannak,
- Közelükben a kikötés lehetséges, nem akadályozzák a forgalmat,
- Elhelyezésének sűrűsége a hajózási útvonalon (ideális esetben) egy tisztán hidrogén üzemű (nem hibrid) jármű biztonságos haladásához elegendő.

Világviszonylatban ezt az új technológiát több hajózási feladatra vizsgálják, de a legfontosabb szegmensnek a tengeri áruszállítás bizonyult. A világ áruforgalmának 90%-át tengeri útvonalakon bonyolítják [3], így kibocsátásának csökkentése fontosságban érezhetően messze felülmúlja a kishajók kérdéskörét. Hajózásban a hidrogén technológia előnyei:

- Utazás közben a jármű nem bocsát ki szén-dioxidot. Környezetkímélősége mellett ez több olyan területen előnyhöz juttatja a járművet a belső égésű kivitelűekkel szemben, ahol kibocsátásbeli korlátozásoknak kell megfelelni (ilyen például maga a Balaton is) [4].
- A hidrogén energiasűrűsége igen magas így, ha megfelelő tárolási kapacitás áll rendelkezésre a hajón belül, a tankolások ritkák lehetnek, ideális esetben ritkébbak, mint a belső égésű motorral hajtott modelleknél.
- A hidrogén feltöltése gyors, körülbelül 3-5 perc (ehhez társul a személy(zet) munkája, az applikálás stb.). Egy akkumulátorcserével vagy töltéssel összehasonlítva tehát látványosan rövidebb tankolási időt feltételezhetünk.
- Hatótávolság-bővítő és kiegészítő szerephez jut a part menti és rövid távú tengeri szállításhoz, amikor az akkumulátoros elektromos megoldások nem- vagy csak nagyon körülményesen és/vagy drágán megvalósíthatóak, például a helyi hálózati kapacitás hiánya miatt.
- Alacsonyabb zajszinten működik, mint a belső égésű motoros hajók, ami ugyancsak természetvédelmi szempontból sérülékenyebb területeken és lakott területek mellett releváns [5].

Előnyök közé sorolhatjuk továbbá az újdonság értékét is, mivel a hidrogén technológia népszerű és újdonságként hat a piacon, így önmagában is figyelemfelkeltő.

Hajózásban a technológia hátrányai:

- A hidrogén könnyen meggyullad, és bár tárolására vonatkozó megoldásokat átvehetünk az autópárházban, a feladat összetettebb, hiszen nagyobb utakról, nagyobb térfogatról, ezáltal veszélyesebb gázmenyiségről van szó.
- Főként a nemesfémfelhasználás miatt az üzemanyagcellák kezdeti költségei magasak [6].

- Nincs olyan kiépült infrastruktúrája, mint a másik két energiahordozó típusnak.
- Nem mindig elegendő egy meglévő hajónak a hajtáslánc cseréje, mert az üzemanyag tartályhoz képest a hidrogén tartály térfogata jelentősen nagyobb lehet. Ha ezt biztonságosan szeretnénk elhelyezni a hajóban, akkor a külső lemezelés is módosulhat. Ez nagyon megnehezíti a tervezést, ami idő és anyagi veszteség.

A magyar belvízi hajózásban a fenti hátrányok, mint nehezítő körülmények jelen vannak, de a legnagyobb kihívás a megfelelő infrastruktúra kiépítése az üzemanyagfelvételhez. Ezek a szempontok, bár ugyanúgy megjelennek a tavi és a folyami hajózásban, utóbbinál jelentősen nehezebb logisztikailag megállapítani a hidrogén töltőállomások helyét, egyrészt, mert hosszabb utazásokról beszélünk, másrészt, mert a tavi hajózástól eltérően ez nemzetközi összehangoltságot is igényel. Mivel a dolgozat célja elsősorban a technológia vizsgálata, a tavi hajózási modellt választottam a későbbi vizsgálat tárgyául.

2. HAJTÁSLÁNCKOMPONENSEK MÉRETEZÉSE AZ ELŐTERVEZÉSI SZAKASZBAN

A tüzelőanyagcellás járművekkel kapcsolatban elsődleges fenntartás, hogy az eredeti hajtásláncnál sokkal több helyet foglal majd a járműben. A hajók esetén, különösen a személyszállításban kulcskérdés, hogy a szigorú szabályozásoknak megfelelően a lehető legtöbb embert (és/vagy személygépjárműveiket) legyenek képesek befogadni. Ezenfelül a hidrogéntartályok térfogatának meghatározása azért is fontos lépés, mert ez az érték szorosan összekapcsolódik a hajó majdani üzemével, hiszen a tartálytérfogat határozza meg, mikor és meddig kell tölteni. Emiatt a menetrend is nagyban módosulhat. A megismert információk alapján a Baross Gábor kompban két Caterpillar 3406 DITA motor van, ezeknek a fogyasztási normája biztonsági tényezővel:

$$B_s = 4 \frac{l}{h} \quad (1)$$

Szántód és Tihany között a Balatonon ennek a kompnak a menetideje hivatalosan oda és vissza 20 perc.

$$t = 20 \text{ min} \quad (18)$$

Ezek alapján egy oda-vissza út normája:

$$B_{trip} = t * B = 15.667 \text{ l} \quad (18)$$

A jelenleg használt tüzelőanyag fűtőértéke (LHV, Lower heating Value):

$$LHV = 35.94 * 10^6 \frac{J}{l} \quad (18)$$

A motor és a segédüzem energia fogyasztása ezek alapján:

$$E = LHV * B_{trip} = 5.631 * 10^8 \text{ J} \quad (18)$$

A motor üzemszerűen 1500 RPM fordulatszámom üzemel. A berendezés adatlapján leolvasható, hogy itt a teljes terhelésre vonatkozó BSFC (Brake-specific fuel consumption) értéke:

$$BSFC_{tt} = 205 \frac{g}{kWh} \quad (18)$$

Látható, hogy a 75%-os kihasználtság miatt a fogyasztás maximum 10%-kal emelkedik. A legkedvezőtlenebb esetet (pontosan 10% romlás) feltételezve:

$$BSFC = BSFC_{tt} * 1,1 = 225 \frac{g}{kWh} \quad (18)$$

Azaz kWh-ként maximum 20 gramm tüzelőanyag többlettel kell számolnunk.

A motor belső hatásfoka a fajlagos fogyasztás alapján 37%, azaz:

$$\eta = 0,37 \quad (18)$$

A fajlagos tüzelőanyag-áram:

$$B_{fajl} = 0.783 \frac{l}{min} \quad (18)$$

A bemenő energia:

$$E_{be} = B_{trip} * LHV = 5.631 * 10^8 \text{ J} \quad (18)$$

Továbbá a hajtáshoz felhasznált energia:

$$E_{hajtás} = \eta * B_{trip} * LHV = 2.083 * 10^8 \text{ J} \quad (18)$$

A bemenő hőmennyiség átlagos értéke:

$$Q_{be} = B_{fajl} * LHV = 469.017 \text{ kW} \quad (18)$$

Az átlagos teljesítményszükséglet ennek alapján:

$$P_e = \eta_e * Q_{be} = 173.536 \text{ kW} \quad (18)$$

Tüzelőanyag cella átlagos villamos teljesítmény igény meghatározása

Szabályozó és hajtásrendszer okozta veszteségekkel is számolnunk kell, ezek közül a két legjelentősebb egység:

- A teljesítményelektronika hatásfoka

$$\eta_{te} = 0.97 \quad (18)$$

- A hajtáslánc hatásfoka

$$\eta_{hl} = 0.9 \quad (18)$$

A tüzelőanyagcellától ennek alapján az elvárt átlagos teljesítmény, melyet szolgáltatnia kell a hajtásrendszer többi részének:

$$P_{elv} = P_e / (\eta_{te} * \eta_{hl}) = 196.096 \text{ kW} \quad (16)$$

A PEMFC cella teljesítménye igen széles skálán mozoghat terméktől és felhasználási területtől függően. Villamos teljesítmény szempontjából 500W-tól egészen 400 kW-ig beszerezhetünk ilyen alkatrészt. A számítást a motorhoz kapcsolódó számítások alapján egy 210kW teljesítményű darabbal végzem el (ld.: (19)), de piaci kínálattól függően több kisebb teljesítményű elemből összeállított pakkokkal is működőképes a rendszer.

$$P_{PEMFC} = 210 \text{ kW} \quad (17)$$

Az elvárt leadandó energia a cella oldaláról ekkor:

$$E_{Elv} = P_{PEMFC} * t = 2.52 * 10^8 \text{ J} \quad (18)$$

A motor teljesítményigénye ekkor kisebb, a differencia abból adódik, hogy a piacon kapható tüzelőanyag-cella teljesítménye előre meghatározott, a kínálatból pedig egy nagyobb (de közel akkora) darabot választottam (ld.: P_{PEMFC}).

$$E_{hajtás} = \eta_e * E_{be} = 2.083 * 10^8 \text{ J} \quad (19)$$

Hatásfoka alkalmazástól függően 30-60%-ig terjed. Mivel a tartálytér fogat szempontjából biztonságosabb a legrosszabb esettel számolni, a kompnál olyan üzemi körülményeket feltételeztem, melyek a cellákat 30% hatásfokon engedik működni.

A tárolandó energiamennyiség ebből (veszteség: cella veszteségei, azaz a nevező az aktuális típus hatásfoka):

$$E_T = \frac{E_{Elv}}{\eta_{hl} * \eta_{te} * \eta_{PEMFC}} = 9.622 * 10^8 \text{ J} \quad (20)$$

Innen a tárolandó hidrogén mennyisége már a berendezésben lejátszódó kémiai folyamatok alapján számolható:

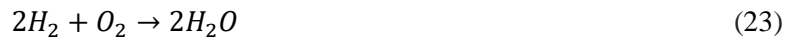
A katódreakció (redukció):



Az anódreakció (oxidáció):



A folyamat bruttóreakciója:



Látható, hogy a bruttóreakció nem más, mint egy hidrogén égési folyamat, az ebből a felszabadult hőmennyiség az anyag tulajdonságai alapján:

$$\Delta H = 572000 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \quad (24)$$

Figyelembevéve a fent kiszámított tárolandó energiát a hidrogénmennyiség moláris tömege:

$$n = \frac{E_T}{\Delta H} = 1682 \text{ mol} \quad (25)$$

A hidrogéngáz moláris atomtömege:

$$m_{atom} = 2 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \quad (26)$$

Így a szükséges hidrogéngáz tömege:

$$m_1 = n * m_{atom} = 3.364 \text{ kg} \quad (27)$$

Ezen adatok birtokában már lehetséges a tartálytér fogat számítása:

Az univerzális gázállandó:

$$R = 8.314 \frac{J}{mol * K} \quad (28)$$

Tárolási hőmérséklet a hajón:

$$T = 333 K \quad (29)$$

A tartálynyomás megválasztása a választott tárolási módtól és nyomástól függ. A két legelterjedtebb módszer ezek közül a gázállapotban és a folyadékállapotban tárolt hidrogén. Gázállapotban a hatályos szabályok és szabványosított tartályok szerint 350 bar és 700 bar verziók közül választhatunk. A választható nyomások jelölései:

$$P_{TARTALY1} = 700 \text{ bar} \quad (30)$$

$$P_{TARTALY2} = 350 \text{ bar} \quad (31)$$

Gázállapotban tárolva, 700 bar nyomáson az általános gáztörvény alapján:

$$V_{11} = \frac{n * R * T}{P_{TARTALY1}} = 0.067 m^3 \quad (32)$$

Gázállapotban tárolva, 350 bar nyomáson az általános gáztörvény alapján:

$$V_{12} = \frac{n * R * T}{P_{TARTALY2}} = 0.133 m^3 \quad (33)$$

Lehetőségünk van folyadékállapotban is tárolni a hidrogént. A Svájci Hidrogénszövetség (Swiss Hydrogen Association, továbbiakban SHA) hidrogéntárolásra vonatkozó tanulmánya szerint ezt 1 bar nyomás alatt, 71 kg/m³ sűrűségben tehetjük.

Ebben az esetben a tartálytérfogat:

$$V_{13} = \frac{m}{M_k} = 0.047 m^3, \quad (34)$$

ahol M_k a SHA által meghatározott sűrűség [7].

Látható, hogy legkisebb tartályt vásárolni, így leginkább takarékoskodni a géptéri szabad hellyel a folyadékállapotú hidrogénnel tudnánk. Azonban az is látható, hogy ennek a tárolási hőmérséklete rendkívül alacsony (a gázállapotú anyagnak majdnem egy tizenhatod része), ennek megteremtése pedig komoly tervezést és energiaigényt von maga után. Mivel a hajtás beépítésével pont az energiahatékonyság növelése az elsődleges cél, ebben az esetben célszerűbb a gázállapotú verziók közül választani. Itt láthatjuk, hogy a 700 bar nyomású tartály 0.017m³-ben múlja csak felül a folyadékállapotú tartálytérfogatot, összességében tehát ez bizonyul a legjobb választásnak (az előtervezés szakaszában). Mivel a hajózásban való használat fokozottan igénybe vett terület, emellett elakadás esetén a vízen körülményes a tankolás, így indokolt a magas biztonsági tényező (S):

$$S = 2,5 \quad (35)$$

Ebből a végleges minimális tartálytérfogat:

$$V_{végl} = V_{11} * S = 0.166 m^3 \quad (36)$$

További esetekben számítva (más sűrűségbe elhelyezve a hidrogénfelvételi helyeket) szinté kiszámítottam a tankolási időt és a tanktérfogatot.



1.ábra. esettanulmányok eredményei tartálytérfogat, töltési idő és tárolt hidrogéntömeg vonatkozásában

A kompozit tartályokat kereskedelmi forgalomban is megkaphatjuk, de egyedileg is készítenek ilyen tartályokat. Ennek teljes tömegét arányítva ugyancsak a Toyota autómobiljének tartálytömegéből tudtam számítani arányosan. Az a tartály 87,5 kg tömegű, és benne 5 kg gáz található. 700 bar nyomáson ez az 5 kg hidrogén 0.099 m³ térfogatot tesz ki [8]. (Megjegyzés: ez ellenőrzésnek is alkalmas referencia. Az első esetben például a hajóban némileg kevesebb, mint 3kg gáz volt, ehhez 0.058 m³ térfogat társult, azaz a kapott eredmény reális). Kiszámítva a végleges tartálytérfogathoz tartozó gáztömeget:

$$m_{31} = \frac{V_{31} * P_{TARTALY1} * m_{atom}}{R * T} = 100,9 \text{ kg} \quad (37)$$

Ekkor a tartálytömeg a mitából vett arányszámmal:

$$m_{tartály} = m_{31} * \frac{87,5 \text{ kg}}{5 \text{ kg}} = 1765,75 \text{ kg} \quad (38)$$

A súlysámításba ezt a tömeget fogom majd beleszámolni, motoronként. Igaz azonban a két tartály (autóé és hajóé) eltérő körülményeknek van kitéve, és jelen esetben az egyik (a hajózási célú) jóval nagyobb, mint a másik (közúti), gondolni kell arra, hogy a nagyobb tartályhoz merevítés, alátámasztás fog majd kelleni, támasztékokkal védeni kell a hullámszás vagy ütésterhelés okozta hatásoktól (pl. hajót egy széllökés a pontonhoz csapja). Emiatt ez a támogató rendszer a tartálytömeghez viszonyítva arányaiban nagyobb, mint az autó tartályának ilyen célú eleme. Emiatt a tömeghez is rendeltem egy biztonsági tényezőt:

$$S_{Mt} = 1.02 \quad (39)$$

Ekkor a végleges tartálytömeg:

$$MT = m_{tartály} * S_{Mt} = 1.801 \text{ t} \quad (40)$$

Összehasonlításképpen megvizsgáltam, milyen értékek adódnak ugyanazzal a járművel, ugyanazzal a szállítási feladattal, ha a jármű akkumulátorokkal működik. A technológia összehasonlítható egy másik meghajtási móddal, ami a dízel alternatíváját képezi. Abban az esetben, ha a hajtásláncban elhelyezett akkumulátorokat töltjük a parton, lokálisan szintén nincs kibocsátás, fajlagosan pedig a hidrogén gázhoz hasonlóan az azonos mennyiségű energiát biztosító villamos teljesítmény is olcsóbb, mint az ezzel arányos dízelolaj. Műszaki szempontból itt is a térfogat-és tömegváltozás lesz várhatóan a döntő különbség, így érdemes megvizsgálni ezt az esetet is. Ebben az esetben a motor, a segédgenerátor és az összefogyasztás az előző esettel azonos (hiszen a kiindulás is ugyanaz a motor). Az egy napra vetített oda-vissza utak időtartama nyáron (20 perces oda-vissza út és napi 30 forduló):

$$t_5 = 600 \text{ min} \quad (41)$$

Ebből a napi fogyasztás:

$$B_{trip} = t_5 * B = 470 \text{ l} \quad (42)$$

A fűtőérték változatlan, így a motor energiafogyasztása:

$$E = LHV * B_{trip} = 1.689 * 10^{10} \text{ J} \quad (43)$$

A hajtás energiafogyasztása egy úton figyelembe véve az előző számításnál is alkalmazott teljesítményelektronika (97%) és a hajtáslánc (90%) hatásfokokat::

$$E_{hajtás} = \eta_e * B_{trip} * LHV / \eta_{te} * \eta_{hl} = 3.22 * 10^8 \text{ J} \quad (44)$$

Harminc forduló esetén (n=30):

$$E_{hajtásNapi} = \eta_e * B_{trip} * LHV * n / \eta_{te} * \eta_{hl} = 4.77 * 10^9 \text{ J} \quad (45)$$

A fordulatszám és a hozzá tartozó BSFC arány szintén változatlan, hasonlóan a motor belső hatásfokához és a tüzelőanyagáramhoz. A bemenő energia értéke szintén nem változik. Egy hajózásban használt nagy kapacitású LiFePo₄ (lítium-vas-foszfát) akkumulátorra fogom elvégezni a számításokat.

Azért választottam a lítium-vas-foszfát akkumulátort, mert kiemelkedően jó ciklusállóság jellemzi, jól bírja a rendszeres feltöltést. Körülbelül 2000 töltés-kisütés ciklust képes teljesíteni (teljes kisütési mennyiség mellett). Kishajós tapasztalatok szerint az élettartamuk is kedvező, 9-10 évente kell csak akkumulátorokat cserélni a hajókban. Ez egy jelentős szempont, hiszen egy kompban ezek az akkumulátorok igen nehezen hozzáférhető helyen lesznek beépítve. Fontos a zselés belső felület, mert a hullámszás nem okoz problémát, szemben a folyadék-elektrolitos berendezésekkel. Emellett a töltési hatásfoka is magasabb, mint például az ólom-savas akkumulátorokak.

A lítium-vas-foszfát akkumulátor egységnyi tömegére jutó energia 320J/g és 580 J/g értékek között lehet [9]. Ezek közül a legkisebbet számítva az energiasűrűség meghatározása:

$$e = 320 \frac{\text{J}}{\text{g}} \quad (46)$$

Figyelembe véve a napi energiaigényt, az akkumulátorok tömege:

$$m_{akk} = \frac{E_{hajtasNapi}}{e} = 14,91 \text{ t} \quad (47)$$

Amennyiben a legmagasabb energiasűrűség értéket vesszük figyelembe:

$$e_2 = 580 \frac{J}{g} \quad (48)$$

Figyelembe véve a napi energiaigényt, az akkumulátorok tömege a második (kedvezőbb) esetben:

$$m_{akk2} = \frac{E_{hajtasNapi}}{e_2} = 8,22 \text{ t} \quad (49)$$

A számítás elvégezhető a LiFePO_4 akkumulátorokra jellemző tömegegységre vetített fajlagos elektromos munka adatok alapján is. Ehhez a hajtásigényt Wh-ban kifejezve használom:

$$\begin{aligned} E_{hajtasNapi} &= n * \eta_e * B_{trip} * LHV / \eta_{te} * \eta_{hl} = 4.773 * 10^9 \text{ J} \\ &= 1,326 * 10^6 \text{ Wh} \end{aligned} \quad (50)$$

Fajlagos elektromos munka jellemző legkisebb értéke [10]:

$$C_{fajl} = 90 \frac{Wh}{kg} \quad (51)$$

A hajtásigényt fedező akkumulátor tömeg ezzel a kiindulási értékkel számítva:

$$m_{akk3} = \frac{E_{hajtasNapi}}{C_{fajl}} = 14,73 \text{ t} \quad (52)$$

A két módszerrel való számítás eredményei igen közeli értékek, és akár az egyiket, akár a másikat tekintjük mérvadónak, elmondható, hogy jelentősen nagyobb egy, a teljes hajtás energiaigényét eltárolni képes (új állapotú) akkumulátorcsomag tömege, mint egy ezt kiváló hidrogén tartályból, tüzelőanyag-cellából és segédakkumulátorból álló rendszer tömege.

A nagy tömeg mellett az akkumulátorok újratöltésének ideje is szignifikáns eltérést mutat a tüzelőanyag-cellákéhoz képest.

Mivel a dolgozatban a kiszámított nagy akkumulátor tömeg miatt nem került konkrét típus kiválasztásra a töltési idővel kapcsolatban csak közelítésekkel tudtam élni, szintén nem foglalkoztam a kikötőkben rendelkezésre álló villamos teljesítménnyel. Szintén nem vettem figyelembe a töltés időbeli lefutását, mindössze a töltési teljesítményt vizsgáltam és, hogy azt fel is tudja venni folyamatosan az akkumulátor. Egy „hagyományos” gyors töltő esetén (3 fázis, 32 A) az átvihető maximális teljesítmény 22 kW. Így a töltési teljesítmény idő:

$$T_{22 \text{ kW}} = \frac{E_{hajtasNapi}}{P_{tölt1}} = 60,25 \text{ h} \quad (53)$$

Ez az érték nem megvalósítható. Ha figyelembe vesszük, hogy a piacon kapható legnagyobb teljesítményű töltők Tesla Supercharger (150 kW) és ennek beharangozott V3 változata (250 kW) a töltési idők jelentősen csökkennek:

$$T_{150 \text{ kW}} = \frac{E_{hajtasNapi}}{P_{tölt2}} = 8,83 \text{ h} \quad (54)$$

$$T_{250 \text{ kW}} = \frac{E_{hajtasNapi}}{P_{tölt3}} = 5,29 \text{ h} \quad (55)$$

Ezek a töltési idők már jobban megfelelnek a menetrendi igényeknek, viszont kérdéses, hogy negyed MW teljesítményrendelkezésre áll-e.

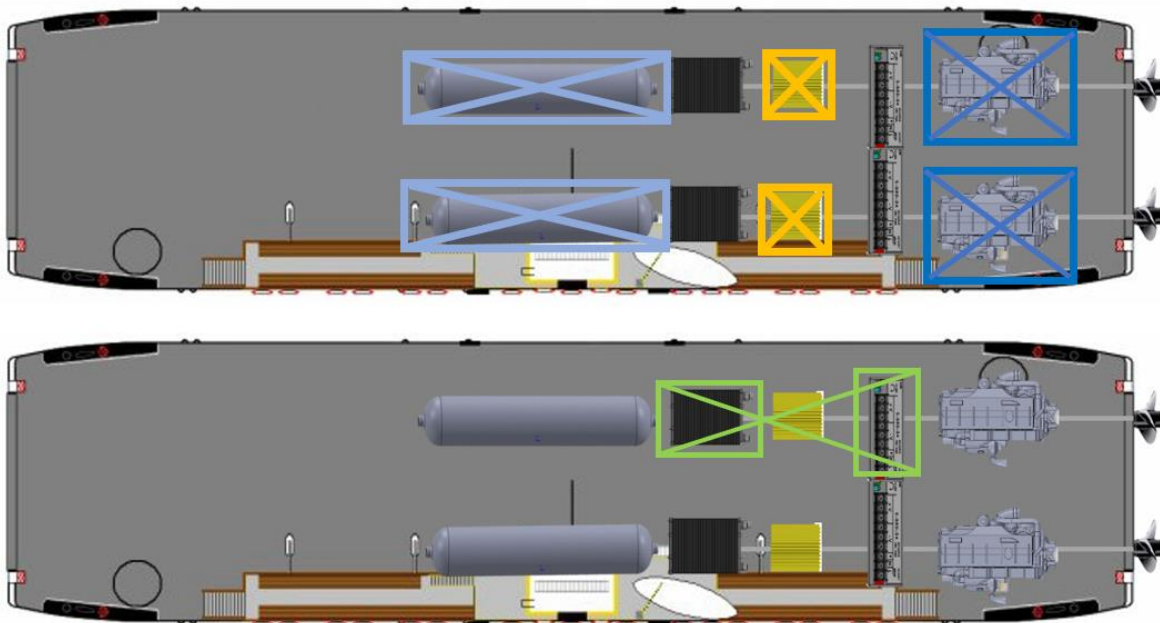
Látható, hogy ez a megoldás nem teljesít jobban, mint a hidrogén hajtás, mert a menetrendben fennakadást, a merülésben pedig (így pedig az ellenállásban) nagy változásokat okoz. Amennyiben természetesen költségkímélőbbnek bizonyul a hidrogén hajtás helyett ez a megoldás, úgy az éjszakai töltés szintén megoldható, melynek ideje nem terheli a menetrendi ütemtervet.

3. KONSTRUKCIÓS SZÁMÍTÁSOK

A követelmények hogy a konstrukció az új hajtáslánccal ne vagy ne számottevően produkáljon merülésnövekményt, azaz végeredményben ellenállástöbbletet. Ebben az esetben ugyanis kezdetét veszi egy tervezési spirál, hiszen a hidrogéntank tömegéből megnövekedett merülés, ebből nagyobb ellenállás, ebből pedig nagyobb tolóerőigény következik, amiből potenciálisan az ered, hogy nagyobb (tömeget jelent). A kereskedelmi tételek súlypontját saját CAD modell és adalapok alapján számítottam. További súlypontkoordinátákat a Kontakt-Elektro Kft.-vel való konzultáció mentén választottam. Ennek alapján a teljesítményelektronika, a tüzelőanyagcella, hűtés, palackok össztömege 120kW-onként 238 kg. Mivel azonban hazai tervezésben ezekkel az adatokkal csak kishajókat készítettek eddig, így a tartályokra vonatkozólag a magasabb, fent számított tartálytömeget veszem. Kishajóknál általában a hidrogéntartály körülbelül a hajtásrendszer tömegének 30%-a (akkumulátorok tömege arányosan magasabb, mint a kompnál), így a maradék tömegtételek súlyát 142,8kg/120kW-ban állapítom meg.

| | Tétel | K v | Tömeg | Összes Tömeg | Térfo- eat | Össz- térfogat | Hosz- szanti kar | Kereszt- irányú kar | Vertikális kar | Teljes tömeg | FSM | FSM típus |
|----|-------------------------|--------|---------|-----------------|---------------|-------------------|---------------------|------------------------|-------------------|-----------------|-----|-----------|
| 1 | Lightship | 1 | 466,000 | 466,000 | | | -20,500 | 0,000 | 2,020 | 0,000 | | User Spe |
| 2 | Motor | 1 | 1,567 | 1,567 | | | -10,750 | -2,087 | 0,123 | 0,667 | | User Spe |
| 3 | Hordképesség | 1 | 91,700 | 91,700 | | | -20,500 | 0,000 | 2,020 | 0,000 | | User Spe |
| 4 | Motor2 | 1 | 1,157 | 1,157 | | | -10,750 | 2,087 | 0,123 | 0,667 | | User Spe |
| 5 | vezérlőegység és cellák | 0,5 | 0,250 | 0,125 | | | -17,150 | 2,050 | 0,709 | 2,841 | | User Spe |
| 6 | Akkumulátor | 0,5 | 3,350 | 1,675 | | | -15,150 | -2,087 | 0,929 | 0,017 | | User Spe |
| 7 | Akkumulátor | 0,5 | 3,350 | 1,675 | | | -15,000 | 2,088 | 0,929 | 0,000 | | User Spe |
| 8 | vezérlőegység és cellák | 0,5 | 0,250 | 0,125 | | | -17,150 | -2,050 | 0,709 | 2,841 | | User Spe |
| 9 | Hidrogén tartály | 0,5 | 1,800 | 0,900 | | | -25,500 | 2,087 | 0,700 | 0,000 | | User Spe |
| 10 | Hidrogén tartály | 0,5 | 1,800 | 0,900 | | | -25,500 | -2,087 | 0,700 | 0,000 | | User Spe |
| 11 | Teljes terhelés | | | 565,824 | 0,000 | 0,000 | -20,435 | -0,002 | 2,000 | 7,033 | | |
| 12 | FS correction | | | | | | | | 0,012 | | | |
| 13 | Folyadékhoz tart. VCG | | | | | | | | 2,012 | | | |

2.ábra: Tömegtételek a hajóban elosztva, súlypontoszámítás



3.ábra: CAD modell elrendezése, hajó hajtáslánca, súlypontok vetítése

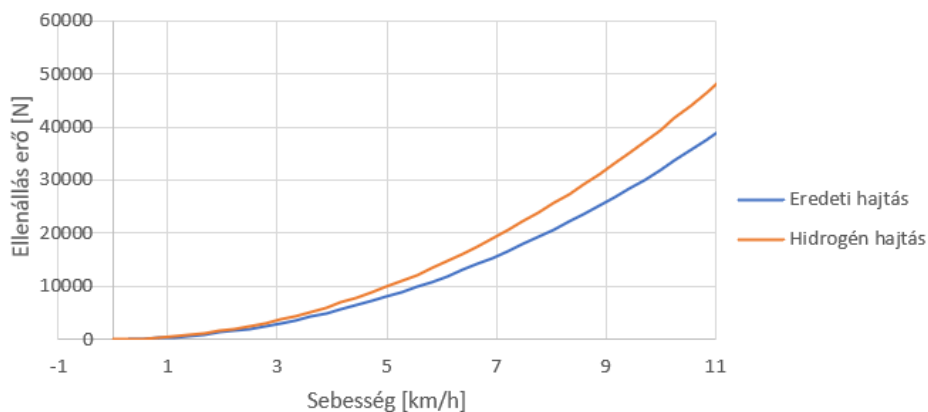
Megfigyelhető, hogy a merülés 1,25m-ről 1,513m-re emelkedett (az akkumulátorok, a vezérlés és a hidrogéntartály miatt).

| | Draft Amidships m | 0,000 | 0,106 | 0,187 | 0,264 | 0,350 | 0,429 | 0,508 | 0,586 | 0,663 | 0,741 | 0,818 | 0,895 | 0,972 | 1,049 | 1,126 | 1,203 | 1,281 | 1,358 | 1,435 | 1,513 |
|---|----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | Displacement t | 0,0004 | 29,95 | 59,89 | 89,84 | 119,8 | 149,7 | 179,7 | 209,6 | 239,6 | 269,5 | 299,5 | 329,4 | 359,4 | 389,3 | 419,3 | 449,2 | 479,2 | 509,1 | 539,1 | 569,0 |
| 2 | Heel deg | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 3 | Draft at FP m | 0,000 | 0,106 | 0,187 | 0,264 | 0,350 | 0,429 | 0,508 | 0,586 | 0,663 | 0,741 | 0,818 | 0,895 | 0,972 | 1,049 | 1,126 | 1,203 | 1,281 | 1,358 | 1,435 | 1,513 |
| 4 | Draft at AP m | 0,000 | 0,106 | 0,187 | 0,264 | 0,350 | 0,429 | 0,508 | 0,586 | 0,663 | 0,741 | 0,818 | 0,895 | 0,972 | 1,049 | 1,126 | 1,203 | 1,281 | 1,358 | 1,435 | 1,513 |

4. ábra: Megváltozott ellenállás és merülésérték számított értékei

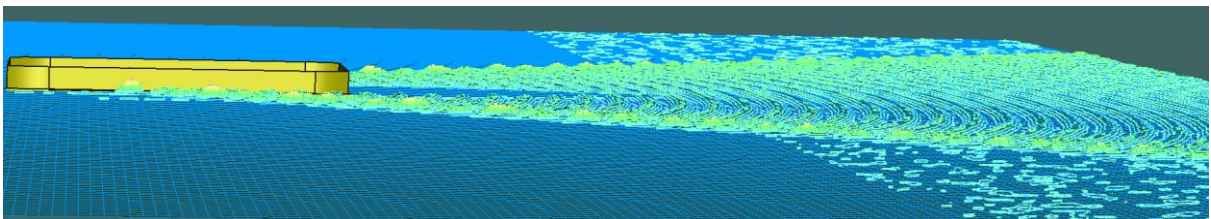
Az ellenállásokat a hajó gyakorlatban használt legnagyobb sebességig, 11km/h-ig számítottam Maxsurf Resistance programban. A többletterhelés miatti ellenállásnövekmény itt 19,23%-os. Ez nagy százaléknak minősül, azonban nem reprezentatív abból a szempontból, hogy a hajó átlagosan milyen sebességgel halad, illetve, hogy mennyi időt tölt ilyen nagy sebességen. A hajó útja során nem közlekedik konstans a maximális sebességgel, ezt az ellenállásnövekményt tehát a hajtásának csak egy időintervallumban részében kell ilyen mértékben leküzdenie. Egyéb sebességeknél a sebesség-ellenállás diagrammokról olvasható le a várható növekmény (a differencia a vártnak megfelelően kisebb).

Ellenállások a sebesség függvényében



5. Ellenállás a sebesség függvényében

Mivel a hajtáslánc végén szereplő tartályok térfogatát több, mint kétszeres biztonsági tényezővel állapítottuk meg, (és a 19,23%-os ellenállásnövekményt részben pont ez a túlméretezett tartály okozta) így ezt a közel 20%-os megnövekedett terhelést a motor várhatóan fedezni tudja. Az átalakítás tehát lehetséges, az utazásban nem okoz sebességkülönbséget, logisztikailag pedig nélkülözi a dízelolaj tankolási lépését, és csak napi egyszeri töltésre szorul, ami a menetrendi órákon kívül bármikor elvégezhető.



6. ábra: megváltozott hulámkép és a hajó alsó héja

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat célja az volt, hogy bemutassa, milyen szempontok vezérelhetnek, amikor egy hajó meghajtásának átalakítását fontoljuk meg tüzelőanyag cellás megoldásra, illetve, hogy ha ez már eldőlt (esetleg környezetvédelmi szigorítások miatt), akkor az előtervezés szakaszában milyen paraméterekre érdemes gondot fordítani. A dolgozat a gazdasági vonatkozásokra nem tért ki, ezért ez a megfontolás még további vizsgálatok tárgyát képezheti. Megállapítható, hogy az üzemanyagárban lényegesen olcsóbb és tisztább hidrogén ebben az esetben új ingázó komp létesítésében létjogosult opció, de annak megállapítása, hogy rövidtávon költséghatékony-e, további vizsgálatok szükségesek gazdasági szakember bevonásával. Mindemellett látni kell, hogy ezekhez a gazdasági számításokhoz a dolgozatban szereplő műszaki vizsgálatok szintén elengedhetetlenek.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] T. Wallner, H. Lohse-Busch, N. Shidore: Operating strategy for a hydrogen engine for improved drive-cycle efficiency and emissions behavior, Hydrogen Energy [Online] (34.) 2009. 2.p.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908009233>
- [2] Volkswagen Company's communication: The efficiency of pure battery-electric vehicles is much higher [Online] <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/stories/the-efficiency-of-pure-battery-electric-vehicles-is-much-higher-frank-welsch-5545>
- [3] Fuel Cells And Hydrogen Joint Undertaking Maritime Hydrogen: The Next Big Wave [Online] <https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Maritime%20hydrogen.%20The%20next%20big%20wave.pdf>
- [4] 2000. évi XLII. Törvény a Balatoni hajózásról
- [5] S.Nag, P.Sharma, A.Gupta, A.Dhar: Combustion, vibration and noise analysis of hydrogen-diesel dual fuelled engine, Fuel [Online] (241) 2019. 488-489.p.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118321185>
- [6] C.Zhang, J.Greenblatt, M.Weil, J. Eichmann, S. Saxena, M.Muratoori, O.Guerra: Flexible grid-based electrolysis hydrogen production for fuel cell vehicles reduces costs and greenhousegas emissions, Applied Energy [Online] (278) 2020. 7-8.p. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920311491>
- [7] Swiss Hydrogen Assotiation Hydrogen Storage [Online] <https://hydropole.ch/hydrogen/storage/#!prettyPhoto>
- [8] S.Almeida, R. Kruczán: Effects of drivetrain hybridization on fuel economy, performance and costs of a fuel cell hybrid electric vehicle, Hydrogen Energy [Online], (42.) 2021. 3-5.p.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360319921036715?token=8AA18E5B86228C9017E29E0FD7B543ED1F7FA618BA87553C60127EF1B3D174A3181738AACFECFD326BAE99641F86F22D&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211024134027>
- [9] Lítium akkumulátorok fizikai sajátosságai Stock Number NS6130-02-269 [Online] https://www.nanoshel.com/uploads/product_pdf/lithium-iron-phosphate1484060530CAT-269.pdf
- [10] BATTERY CELL COMPARISON epec Engineered Technologies [online] <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>

A szerző konferencia részvételét a BME Gépészmérnöki Kar NTP-HHTDK-21-0051 pályázata támogatta.