

A pneumatikus energiatárolás lehetőségei a közlekedésben

Hamvas Kornél*, Tolnai András**, Dr. Szabó József Zoltán***

*Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, BSc. hallgató
1081 Budapest Népszínház utca 8 (e-mail:hamvaskornel@gmail.com)

**Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Intézeti mérnök
1081 Budapest Népszínház utca 8 (e-mail:tolnai.andras@bgk.uni-obuda.hu)

*** Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Egyetemi docens
1081 Budapest Népszínház utca 8 (e-mail:szabo.jozsef@bgk.uni-obuda.hu)

Abstract: A járművek energiaigénye, a közelmúltig, szinte kivétel nélkül a bányászott szénhidrogének felhasználásával lettek kielégítve (kivételet képez néhány szegmens, ilyen pl. a vasúti villamos vonatás). Ez a megoldás, bár műszakilag teljességgel bevált, napjainkra több világméretű problémát is okoz. Mára köztudott tény, hogy ennek alternatívájaként, a nagy gépjárműgyártók, a villamos hajtást preferálják. Természetesen ez a megoldás is rengeteg kérdőjelet vet fel. Legfőképpen az energia tárolása okoz gondot, hiszen az alkalmazott akkumulátorok kapacitása messze alulmúlja a benzin, vagy a gázolaj energiatartalmát. Jelen cikk azt vizsgálja, hogy az energia tárolását hogyan tudjuk megoldani más elven, jelesül pneumatikus tehát sűrített levegőt felhasználva.

1. BEVEZETÉS

Általánosságban elmondható, hogy közlekedésünk, az ehhez tartozó energetikai és szervezési rendszer forradalom előtt áll. Az elmúlt 100 évben szinte egyeduralgokodnak számító, bányászott szénhidrogének alapuló energiaforrások felhasználása olyan szintre jutott, hogy annak - elsősorban környezetszennyező hatásai, globálisan, az egész emberi jólétet veszélyeztetik. Kijelenthetjük, hogy az úgynevezett alternatív, környezetkímélő energiaforrások között jelenleg az elektromos hajtás válik egyre inkább egyeduralgódóvá. Itt a legnagyobb gondot a villamos energia tárolása okozza melyet, kivétel nélkül a különböző típusú, elektrokémiai elven működő tárolóegységek, más szóval akkumulátorok biztosítanak. Ezekről általában elmondható, hogy a fejlesztők jelentős eredményeket értek el az energiakapacitás terén. Sajnos a súlyuk, térfogatuk, valamint nehézkes kezelhetőségük miatt még mindig csak nagy kompromisszumok árán vetekedhetnek a finomított szénhidrogénekkel. Jogosan merül fel a kérdés, hogy más fizikai elven működő energiatároló egység kapacitása, jobban meg tudja e közelíteni a hagyományos hőerőgépek üzemanyagának energiatartalmát.

A vizsgálat során csak az energiakapacitásra koncentrálnak. Ezen felül, persze számos egyéb, más tényezők is befolyásolják az akkumulátorok használhatóságát. Ilyenek pl. a feltöltési idő, a hosszabb állásidő alatt bekövetkező úgynevezett önkisülés, vagy az esetleges sérüléskor előforduló veszélyessé válás, pl. a kifolyó maró anyagok okozta további károkozás, vagy a tűzveszély. De itt kell megemlítenünk az előállításakor, megsemmisítésakor, újrahajósításakor jelentkező

környezetvédelmi problémákat is. Ezekre tehát vizsgálatunkban nem térünk ki.

1.1 Energiatárolók Funkcionális áttekintése

Már az önmaguktól működő járművek (Automobilok) elterjedésének kezdetekor felmerült a mechanikai energia közvetlen tárolásának lehetőségnek vizsgálata. Amely, három módon valósítható meg. Mindhárom esetre van példa a közlekedésgépészetben, azonban ezek inkább csak elvi, kísérleti megoldásként maradtak fenn, elterjedni nem tudtak. Az első ilyen lehetőség, közvetlenül a mozgás megőrzése melletti tárolás, pl. nagyméretű, forgó lendkerék segítségével. Ennél a megoldásnál a súrlódási veszteség miatti tárolási idő (önkisülés) nagyon korlátozott, valamint az energia ki és bevezetése is bonyolult mechanikai, gépészeti megoldásokat kíván. A második megoldás, az előfeszített rugóban tárolt rugalmas energiát használja ki. Ennél a konstrukciónál a tárolt energia mértéke fajlagosan (a rugó egy kilogrammjára vetítve) nagyon kicsi, ezen felül a töltés és kisütés megvalósítása is komoly gépészeti problémákat vet fel. Azonban a tárolási idő, tulajdonképpen korlátlan. A harmadik megoldás esetében is a mechanikai feszültségben lévő energiát tároljuk, de a szilárd testek helyett a gázok összenyomhatóságát használjuk ki. Tulajdonképpen, a sűrített, nyomásnövelt gázok expanziós munkavégző képességében rejlik az energiatárolás mikéntje. Ez utóbbi megoldás a bányajaratokban való vasúti vontatásban került alkalmazásra, ahol nem a nagy távok megtétele volt a fő feladat, hanem az üzembiztonság és az a körülmény, hogy a mély, szűk járatokban nem lehetett gőzgépeket használni.

2. ÖSSZEHASONLÍTÁSI MÓDSZER [1][2]

Munkánk során három energiatárolási módszert hasonlítunk össze, az energiakapacitás szempontjából.

Ezek a(z):

- Elektromos hajtások
- Belsőégésű motorok
- Pneumatikus hajtás

Megjegyezzük, hogy az üzemanyagcellás járművek is elektromos meghajtásúak, azonban azok még csak nagyon korlátozottan állnak rendelkezésre. Ennek egyik oka, hogy az üzemanyagcella egyik üzemanyaga a hidrogén, melynek mozgó járművön való tárolása, jelenleg egyáltalán nem megoldott.

Az elektromos akkumulátorok tárolókapacitása annak típusától, és tömegétől (ennek értelmében a térfogatától) függ. Mivel a tömeggel kvázi egyenes arányban áll a kapacitás, így a különböző típusú akkumulátorok 1 kg tömegére vetített tárolókapacitást vizsgáljuk. Ugyanígy járunk el a belsőégésű motorok üzemanyaga esetén, illetve a sűrített levegő alkalmazásakor.

A pneumatikus energiatárolásnál nem hagyhatjuk figyelmen kívül, a tartály tömegét, mely sokkal nagyobb a tulajdonképpeni energiatároló közeg, a levegő tömegénél. Mivel a tartály mérete, falvastagsága, így a tömege függ a benne lévő gáz nyomásától (és magától a tartály anyagától), a nagyobb nyomás nagyobb tömeget jelent, ami a fajlagos energiatartalmot rontja.

A belsőégésű motorok, mint hőerőgépek, kémiai energiát alakítanak át mechanikai munkává, miközben az üzemanyag (a folyamat szempontjából) irreverzibilisen megváltozik, illetve eltűnik. Így az üzemanyag 1 kg tömegére vetített elégségek felszabaduló tiszta hőenergiát vesszük bemenő energiának, ami, tulajdonképpen az üzemanyag égéshője. Ez az érték a további számításokban: 44 MJ/kg. Megjegyezzük, hogy a napjainkban legtöbbet felhasznált üzemanyagoknak, a benzinnek és a gázolajnak körülbelül ugyanakkora az égéshője, tehát ezt a két üzemanyag típust nem vizsgáljuk külön. Az energia átalakító egységet, (ami a belsőégésű motor) sem vizsgáljuk működési ciklus szerint, hanem a hatásfok szempontjából jobbnak mondható, diesel-rendszerű motorokat vizsgáljuk. (Ezek hatásfokát a számításokban $\eta=0,4$ -nek feltételezzük.)

Ugyan így járunk el a pneumatikus hajtás esetén is, ahol –részletesebb elemzést követően- egy hasonló összehasonlítást végzünk. Ennél a hajtásmódnál figyelembe kell venni a tartály tömegét is, mely tulajdonképpen a pneumatikus hajtás üzemanyagát tárolja.

Az elemzéskor csak a tárolóegységek tömegét vesszük figyelembe, az energiaátalakításhoz szükséges gépek

tömegét nem. Mivel az azonos teljesítményű belsőégésű-motorok, a villanymotorok, valamint a pneumatikus motorok tömege (és térfogata) nem tér el egymástól jelentősen, nem viszünk nagy hibát az összehasonlító módszerbe.

2.1 Az összehasonlítás lépései

Az összehasonlítást először egy elemzéssel kezdjük. Először azt vizsgáljuk, hogy a különböző típusú elektromos akkumulátoroknak, a sűrített levegőnek, illetve a benzinnek, vagy gázolajnak mekkora az energiatartalma.

Az elektromos hajtás elemzésekor figyelembe kell venni, hogy az elektromos energia közvetlenül nem felhasználható, ehhez szükség van egy energiát átalakító gépre, mely a villanymotor és a hozzá tartozó szabályzóegység. Majd a mechanikai energia (jellemzően a forgó tengelyen átvitt nyomaték) a kihajtáson keresztül, a kereket és az egész járművet hajtja. Ezen elemek csak bizonyos hatásfokkal tudják átalakítani a villamos energiát mechanikává, így az akkumulátorbanban tárolt összes energia csak egy része kerülhet felhasználásra. Az energiafolyamatot az 1. ábra szemlélteti



1.ábra: A villamos hajtás energetikai láncolata

A hatásfok tekintetében a motorok és hozzá tartozó szabályzó, illetve mechanikai egységek igen jóknak mondhatók. Az összh hatásfokot a következő képlettel számítottuk ki:

$$\eta_{\text{össz}} = \eta_{\text{akk}} \cdot \eta_{\text{sz}} \cdot \eta_{\text{mot}} \cdot \eta_{\text{mech}} \quad (1)$$

Az elemzéshez szükséges számszerű értékek az 1. táblázatban láthatók.

Szerkezeti elem neve	Hatásfok
Akkumulátor	0.95
Szabályzó egység	0.97
Villanymotor	0.94
Mechanikai kihajtás	0.94
Össz. Hatásfok $\prod \eta$ ()	≈ 0.8

1.táblázat: A villamos hajtás egyes elemeinek hatásfoka.

A belsőégésű motorok és a hozzá kapcsolódó transzmissziós egységek hatásfoka jóval rosszabb a villanymotorokénál. Így a rendszer összhatófoka is jóval rosszabbra adódik. A belsőégésű motorokkal hajtott járművek energetikai láncolata a 2.ábrán látható.



2.ábra A belsőégésű motorok energetikai láncolata

Az összhatófokot az előzőekhez hasonlóan az egyes részegységek hatásfokainak szorzatából kapjuk és a következő képlettel számolható ki :

$$\eta_{\text{össz}} = \eta_{\text{mot}} \cdot \eta_{\text{vált}} \cdot \eta_{\text{oszt}} \cdot \eta_{\text{mech}} \quad (2)$$

Az elemzés elvégzéséhez a 2. táblázatban látható értékeket használtuk fel.

Szerkezeti elem neve	Hatófok
Belsőégésű motor	0.4
Váltómű	0.85
Osztómű	0.95
Mechanikai kihajtás	0.98
Össz. Hatásfok ($\prod \eta$)	≈0.3

2.táblázat:

A belsőégésű motorral hajtott járművek hatásfoka

A 2. táblázatból látható, hogy a belsőégésű motorral hajtott járművek jóval rosszabb hatásfokúak, mint villamos hajtás esetén. Azonban a benzin és a gázolaj energiatartalma jóval nagyobb az elektromos akkumulátorokéhoz képest, így még ennek ellenére is a belsőégésű motorral hajtott járművek üzemanyagának fajlagos energiatartalma jóval nagyobb a villamos hajtáshoz képest.

A legelterjedtebb akkumulátor típusok közül néhányat találmányra kiválasztva meghatározhatjuk, azok joule-ban kifejezett tárolt energiáját. Ehhez a gyártók által megadott villamos kapacitás, (amperórában kifejezve) és a névleges feszültség szükséges. Az egy kilogramm tömegre vetített, úgynevezett fajlagos kapacitás meghatározásához az akkumulátor tömegének ismerete is szükséges. Ezeket az adatokat különböző gyártók katalógusaiból szereztük. Az egyes tárolóegységek adatai a 3. táblázatban találhatóak.

Akkumulátor típus	Kapacitás (Ah)	Feszültség (V)	Tömeg (kg)
Ólom(Pb)	230	12	40
NiCd	350	1.2	15

NiMH	10	7.2	1.2
Li-polymer	9	12	1.2
Li-ion	20	3.6	0.4

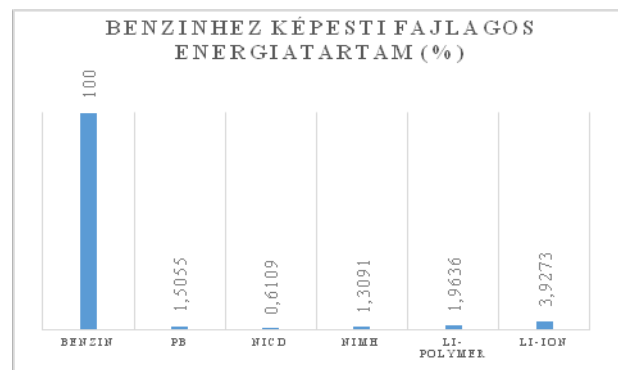
3.táblázat Különböző típusú akkumulátorok adatai

A tárolt energiát úgy határozzuk meg, hogy a feszültséget összeszorozzuk a gyártó által megadott kapacitással:

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t \quad (3)$$

Mivel a (3) képletben szereplő I-t az egy másodpercen átfolyó áramerősséget jelenti, ezt használhatjuk a kapacitás kiszámításához. Azonban a katalógusban található értéket meg kell szorozni 3600-al, mivel ott egy órára vonatkozik az átfolyó áram. Meg kell jegyezni, hogy az akkumulátorkapacitás nem független a terheléstől és más egyéb tényezőtől. Ezekon felül a hőmérsékletnek is nagy szerepe van a kapacitásban. Pl. a -20 °C-os hőmérsékletű ólomakkumulátornak a valódi kapacitása már csak fele a gyártó által megadottnak. Természetesen ezek az értékek más-más típus esetén változóak, de a trendek hasonlóak.

Az így kiszámított 1 kilogramm akkumulátorra vonatkozó fajlagos kapacitás értékek az 1. diagramon láthatók.



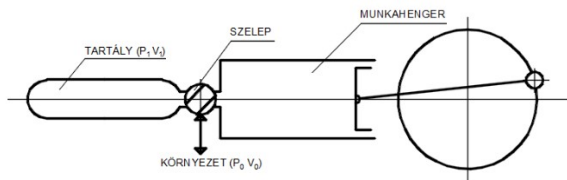
1. diagram A különböző akkumulátorok energiatartalma a benzinnel képest.

Az 1. diagramból látható, hogy az akkumulátorok messze rosszabb energiahordozók, mint a benzin, illetve a gázolaj, azonban meg kell jegyeznünk, hogy nem vettük figyelembe, hogy a villamos hajtás mindig csak akkor fogyaszt energiát, amikor az ténylegesen használva van (nincs alapjárat), ezen felül itt megoldható a rekuperáció, azaz fékező üzemben, a fékezéskor felszabaduló energiát visszatölthetjük a rendszerbe.

Ugyan ilyen összehasonlító módszer szerint járunk el a pneumatikus energiatárolás és hajtás esetén is. Először meg kell határozni, hogy egy kilogramm, nyomás alatti gáz mekkora expanziós munkát tud végezni. Majd figyelembe kell azt is venni, hogy a nyomás alatti gáz valamilyen nyomástartó edényben kell tárolni, ennek a tárolóedénynek a tömege többszöröse, a tárolandó gáz tömegének, így a tároló teljes tömege, a nyomás (tehát a töltöttség) függvényében csak elhanyagolható módon változik.

3.A PNEUMATIKUS ENERGIATÁROLÁS [3][4]

A sűrített levegős (pneumatikus) energiatárolás egy nyomástartó edényben (palackban) való nagynyomású gáz expanzióját jelenti, célszerűen egy tágulni képes térfogatban. Az egyszerűsített sémát a 3. ábrán látható.



3. ábra A pneumatikus hajtás egyszerűsített elve.

A tartályban lévő nagynyomású gáz egy szelepen keresztül a munkahengerbe kerül, ahol expandálódik a környezeti nyomásig, miközben a dugattyún munkát végez. Ez az egyenes vonalú mozgás, a forgattyús hajtóművön keresztül forgó mozgássá alakul. Ezután a szelep a környezettel köti össze a munkahengert és a palackot lezárja. Így a dugattyú újra felfelé tud haladni a forgattyús mechanizmus tehetetlensége által, vagy (kettősműködésű munkahenger esetében) a dugattyú másik oldalán a tartályból való, nagynyomású levegő bevezetésének okán.

Az energetikai vizsgálatot úgy végezzük, hogy feltételezzük, a tartályban lévő levegő egyetlen ütem alatt a környezeti nyomásra tud expandálni. Ez a valóságban nem igaz, de a hasznos munka meghatározásának szempontjából, teljesen indifferens, hogy az expanzió egyszerre, tehát egy ütem alatt történik, vagy részletekben. A tartályban lévő expanziót politropikus állapotváltozásnak feltételezzük. Mivel levegő a munkaközeg ezért a politropikus kitevőt, $n=1,35$ -ös értékkel vettük figyelembe. Általában a kompresszorok tervezésekor is ezt az értéket szokták használni.

Alapvető fizikai jelenség, hogy minél nagyobb az egységnyi tömegű gáz (levegő) nyomása, annál nagyobb az általa végezhető munka. Viszont a nagyobb nyomás kisebb térfogatot is jelent, ami az energiatárolás szempontjából kedvező tulajdonságnak tűnik.

3.1 A levegő állapotváltozójának számítása

A nagynyomású tartályban a kompresszió utáni gáznak lecsökken a fajtérfogata, mely az egységnyi tömegű (1kg) gáz térfogatát jelenti. A komprimált (és minden más) állapotot az egyesített gáztörvény (4) írja le, ideális gázok esetében. Ezt jól lehet alkalmazni relatíve alacsony nyomások esetére, mivel nem igényel nehézkes matematikai apparátust és viszonylag pontos eredményt ad. Azonban a szakirodalom szerint, levegő esetén, 250 bar felett már nem célszerű ezt a formulát alkalmazni, mert e nyomás felett kezdve már az eredmény pontatlan. A kompressziós állapotváltozást (tehát a sűrített levegő előállítását) izotermnek gondoljuk, mert az összesűrített levegő igaz felmelegszik a kompresszorban, azonban az a tartályban vissza is hűl a kiinduló hőmérsékletre, ami a vizsgálatunkban 293 K, tehát 20°C.

$$p \cdot V = R \cdot T \quad (4)$$

Ahol:

- p-A gáz nyomása (Pa)
- V-A gáz fajtérfogata (m^3/kg)
- R-A levegőre specifikus gázállandó (J/kgK)
- T-A hőmérséklet (K)

Az univerzális gázállandót levegőre 287,2 J/kgK értékkel vettük figyelembe.

A számítást a következő nyomásértékekkel végeztük el:

$$10, 50, 100, 150, 200, 500, 750, 100 \text{ (bar)}$$

Mivel igen nagy nyomások is előfordulnak, meg kell határozni a levegő állapotváltozóit úgy is, mint reális gáz. Erre a Van de Waals egyenlet ad lehetőséget. Ugyan is a reális gáz másként viselkedik, mint az ideális. A módosított (5) egyenletben szereplő a és b tényezők táblázati értékek, valamint az anyagmennyiségre vonatkozik, tehát n-molra, nem pedig 1 kg-ra.

n –mol anyagmennyiségre, általánosan, a reális gázok állapotváltozójának állapotegyenlete:

$$\left(p + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (5)$$

Ahol:

- a -értéke levegőre: 0,133 Jm³/mol
- b -értéke levegőre: 3,66 · 10⁻⁵ m³/mol

- R-értéke: 8,314 J/molK

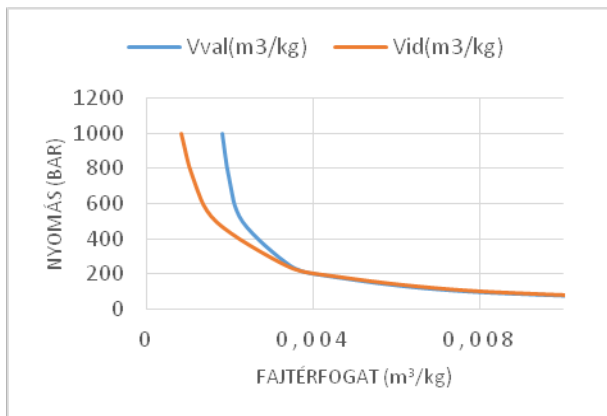
A számításához meg kell határozni 1 kg levegő mol-ban kifejezett anyagmennyiségét (6), ami:

$$n = \frac{1}{M_{\text{levegő}}} = \frac{1}{0,02096} = 34,53 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} \quad (6)$$

Megjegyezendő, hogy a Van der Waals –féle egyenlet sem ad teljesen pontos eredményt, azonban a nagy nyomásoknál (250 bar felett) már kötelező a használata.

Mivel az (5) egyenletben a fajtérfogatot (V) szeretnénk kiszámolni, adott nyomáson és hőmérsékleten, át kell rendezni azt.

Ha átrendezzük a (5) képletet egy, a fajtérfogatra nézve, harmadfokú egyenlethez jutunk, aminek gyökeit hagyományos, algebrai úton nehézkes megtalálni. Megoldásként az MS EXCEL táblázatkezelőbe előre beépített, úgynevezett gyökkereső algoritmust használjuk. Ez a módszer, numerikusan, a gyökök rendezett egymás utáni próbálgatásával, iterációjával oldja meg az egyenleteket. Így elvileg bármekkora fokú egyenletet meg lehet oldani, természetesen, csak ha van (valós) megoldás. Az így kapott, reális és ideális gázra vonatkozó fajtérfogat értékeket a 2. diagramban ábrázolva láthatjuk.



2. diagram Az ideális és reális gázok fajtérfogata és nyomása T=293 K-on

Látható, hogy az ideális gázok kb.300 bar felett térnek el jelentősen a reális gázok állapotátározóitól. Ezért ezen érték felett már reális gázként kell kezelni a levegőt, mint munkaközéget, ez viszont nehezebb a bonyolultabb egyenletmegoldás miatt.

Az expanziós munka meghatározásához szükség van a tágulás végi állapotátározókra is. Ezt a politropikus állapotváltozást leíró egyenlettel tudjuk kiszámítani (6), feltételezve, hogy a gáz nyomása a környezetre csökken.

$$V_1 = \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{n}} \cdot V_0 \quad (6)$$

Ahol:

- p_0, V_0 –Kezdeti állapot nyomása és fajtérfogata
- p_1, V_1 –Végállapot nyomása és fajtérfogata

3.2 Az expanziós munka meghatározása

A kiinduló és végállapot állapotátározóinak kiszámítása után politropikus állapotváltozást feltételezve meghatározzuk az expanziós munkát (7). Az expanzió során a gáz munkát végez, miközben lecsökken a nyomása és a hőmérséklete. A végállapothoz tartozó hőmérsékletet nem határoztuk meg külön, mert az a végzett munka szempontjából közömbös.

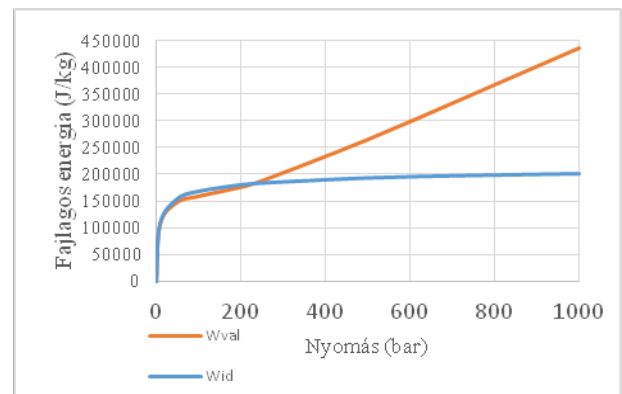
Az expanziós munka, politropikus állapotváltozás esetén:

$$W = \frac{1}{n-1} (p_0 \cdot V_0 - p_1 \cdot V_1) \quad (7)$$

Ahol:

- n –poliropikus kitevő (n=1,35)
- p_0, V_0 Kezdeti állapotjelzők
- p_1, V_1 Vég állapotjelzők

Az így meghatározott expanziós munkák a 3. diagramban láthatók a nyomás függvényében.



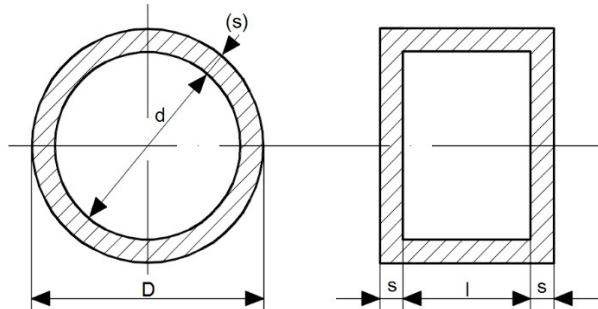
3. diagram: Az expanziós munka a kezdeti nyomás függvényében, reális és ideális gázok esetén

A 3. diagramban látható, hogy kb. 250 bar nyomás alatt nincs nagy különbség a valóságos és az ideális gázok fajlagos energiátartalma között. Ez fölött, azonban a reális gázokra azt látjuk, hogy egy közel állandó meredekségű egyenes mentén nő az energiátartam. Ha

az ideális gázok görbéjét nézzük, azt látjuk, hogy kb. 200 bar után már nem nő lényegesen a fajlagos (tehát egységnyi tömegre vetített) energiatarthatam. 1000 bar nyomáson látható, hogy a valóságos és ideális nyomásokból számított fajlagos energiatarthatamok között több mint kétszeres eltérés tapasztalható.

4. A TARTÁLY MÉRETEINEK MEGHATÁROZÁSA [5]

A nagy nyomású gázokat (így a levegőt is) nyomástartó tartályokban kell tárolni, melyek tömegét hozzá kell adni a tárolt levegő tömegéhez. A tartályok tömegét, azok geometriai alakja, mérete és anyaguk sűrűsége határozza meg. A geometriai alakot (4. ábra) alapvetően két végén lezárt körgyűrűnek feltételezzük, melynek falvastagságát a kazánképlettel (8) határozzuk meg, a lezáró lapokét pedig a falvastagsággal megegyező vastagságú, a külső átmérővel azonos átmérőjű korongoknak. A valóságban a tartályok kialakítása nem ilyen, azonban a számítások elvégzéséhez közelítőleg jó eredményt ad.



4. ábra A tartály egyszerűsített rajza, főbb méretei

A kazánképlettel (8) meghatározhatjuk, hogy egy nyomással terhelt, adott belső átmérőjű, megengedett mechanikai feszültségű anyagból készült tartálynak mekkora a falvastagsága.

$$s = \frac{d \cdot p}{2 \cdot \sigma_{\text{meg}}} \quad (8)$$

Ahol:

- s – A tartály falvastagsága
- p – A tartályt terhelő nyomás
- σ_{meg} – A tartály anyagára megengedhető maximális mechanikai feszültség

Az így kiszámított méretekből meghatározható a tartály anyagának térfogata, melyet megszorozva az anyag sűrűségével megkapjuk a tartály tömegét.

A vizsgálatunkat három különböző anyagra végeztük el, mindhárom esetben $d=200$ mm belső átmérőt feltételezve, 1000 bar nyomással terhelve. Mivel ezen a

nyomáson a levegő fajtérfogatát már meghatároztuk ($0,001835 \text{ m}^3/\text{kg}$) a tartály hossza mindhárom esetben ugyanakkorára adódik, 1 kg levegő esetén, $l=0,0584 \text{ m}$ (9).

$$l = \frac{4 \cdot V}{d^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0,001835}{0,2^2 \cdot \pi} = 0,0584 \text{ (m)} \quad (9)$$

A tartályt alkotó szerkezeti anyagok mechanika tulajdonságai (sűrűség, σ_{meg}), valamint az 1 kg, 1000 bar levegő megtartásához szükséges térfogat (V_{tart}) és az ebből számolt tömegek az 4. táblázatban láthatók.

Anyag	Sűrűség (kg/m ³)	σ_{meg} (MPa)	V_{tart} (m ³)	Tömeg (kg)
ACÉL	7800	50	0,240	1878
ALUMÍNIUM	2700	50	0,240	650
KEVLÁR	1400	700	0,029	4

4. táblázat Tartályok anyagai és tulajdonságai

Az 4. táblázatból látható, hogy acél tartályt alkalmazva nagyon nagyra adódik a tartály tömege, hiszen mindössze 1 kg levegő tárolásához majdnem 2 tonnás tartályra van szükség. Ugyan ezt látjuk az alumínium esetében is, igaz ott 650 kg tömegű a tartály. Azonban a kevlár esetében már csak 4 kg ez az érték. Ehhez, töltött állapotban hozzá adódik az 1 kg levegő, így mindössze 5 kg-ra adódik a 437028 J expansziós energiát tartalmazó levegő tömege, tartállyal együtt.

4.1 A pneumatikus energiátárolás összehasonlítása.

Az egy kilógrammra vetített energiatarthatam számítását úgy végezzük, hogy meghatározzuk az 1 kg pneumatikus energiahordozó energiatarthatamát. Ebbe bele kell számítani a közegnek és a közeget tároló tartálynak a tömegét is. Az 4. táblázatban szereplő, tartályokat alkotó szerkezeti anyagok szerinti, 1 kg levegőt tartalmazó 1000 bar fajlagos energiatarthatamok a 5. táblázatban szerepelnek.

Tartály anyaga	Töltött tömeg (kg)	Fajl. energiatarthatam (J/kg)
ACÉL	1879	232
ALUMÍNIUM	651	670
KEVLÁR	5	86210

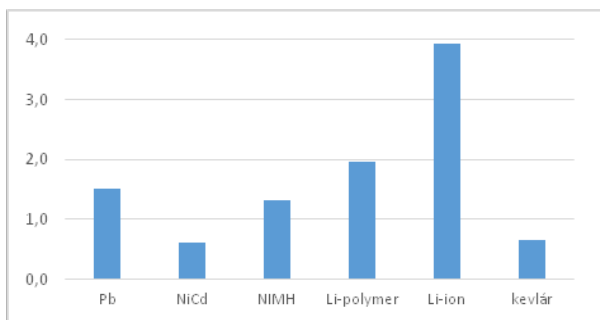
5. táblázat Különböző tartályanyagokkal számított fajlagos energiatarthatam

A 5. táblázatban látható, hogy az acél és alumínium tartályok alkalmazása nem reális mozgó járművön, mivel azok nagy tömege miatt fajlagosan csak nagyon kis energiát tudnak tárolni, 1 kg-ra vetítve. Viszont a

kevlárból készült tartályok már alkalmasak lehetnek erre, mivel az energiátartalmuk megközelíti a NiCd akkumulátorok energiátartalmát.

A 5. táblázatból látható, hogy a pneumatikus energiátárolásban a tartály anyaga sarkalatos tényező. Így célszerű a tartály anyagával jellemezni az energiasűrűséget, mivel a munkaközeg mindig a levegő. Mivel az acél és alumínium szerkezeti anyagok nagyon rossz eredményt hoznak, célszerű a továbbiakban csak a kevlárt vizsgálni, mint a tartályt alkotó szerkezeti anyagot.

A pneumatikus energia, mechanikai energiává alakítása itt is géppel történik, mely ugyanolyan hatásfokkal rendelkezik, mint más gépek. Konstruktív szempontból a dugattyús motorokéhoz hasonló megoldás képzelhető el, mint pneumatikus motor. Azonban léteznek más konstrukciók is, mint pl. a szárnylapátos pneumatikus motor. Ezek hatásfokát vehetjük egységiesen $\eta_{\text{mot}}=0,9$ -re. Ehhez még a közlőmű és a kihajtás hatásfoka adódik, ami megegyezik a hagyományos belsőégésű motorokkal hajtott járművek közlőművének hatásfok adataival. Így a teljes hatásfok érték $\eta_{\text{össz}}=0,7$. Az ezzel az értékkel számított teljes fajlagos energiátartam, kb. 65000 J/kg. Ez az elektromos hajtás tárolóeszközeivel összehasonlítva a 4. diagramban látható, ahol a benzines hajtásmód jelenti a 100%-ot. (A benzín, gázolaj energiátartalma nem szerepel a 4. diagramban)



4. diagram Benzínhez képesti fajlagos energiátartamok, százalékban megadva

A 4. diagramban látható, hogy az 1000 bar nyomást hordozó, kevlárból készült tartály energiasűrűsége majdnem megegyezik a NiCd-akkumulátorok fajlagos energiátartalmával, így elmondható, hogy energiakapacitás terén a pneumatikus hajtásmód is lehetséges alternatívája lehet a hagyományos hajtásoknak.

6. ÖSSZEGRÉS

Munkánk során egy elemzést végeztünk napjaink járműgépészeti fejlesztései terén, melyek az alternatív hajtások energiátároló kapacitásaira irányulnak. Megvizsgáltuk a korszerű villamos hajtás akkumulátorait,

abból a szempontból, hogy mekkora fajlagos energiát képesek tárolni, jellemzően 1 kg tömegre vonatkozóan. Az elemzést a hagyományosnak mondható benzín, illetve a gázolajos hajtásmódhoz viszonyítottuk és azt találtuk, hogy számos előnye mellett a villamos hajtás tárolóeszközei még mindig csak a 2-4%-át tudják produkálni a hagyományos, benzines, gázolajos megoldásokhoz képest. Ezen felül a pneumatikus tárolóeszközöket is megvizsgáltuk. Az elemzés rámutat, hogy e tárolási mód kb. 1000 bar túlnyomás mellett közelíti meg az akkumulátorok fajlagos energiakapacitását. Rámutattunk arra is, hogy a pneumatikus hajtásmód egységnyi tömegre vetített energiasűrűsége lényegében a tartály anyagától függ és csak a nagy szilárdságú, könnyű, kompozitokból készült tárolóeszközök lehetnek versenyképesek a ma forgalomban lévő akkumulátorokkal. Az elemzés terjedelmi okokból nem volt mindenre kiterjedő, ugyanis csak érintőlegesen vettünk figyelembe más tényezőket az energiakapacitáson kívül, melyek a felhasználhatóság szempontjából fontos tulajdonságok. Ilyenek az önkisülés, illetve a töltési idő, a gyárthatóság, vagy a gazdasági kérdések. Azonban így is kijelenthetjük, hogy ugyan korlátozott módon, de lehet helye a pneumatikus hajtásnak a közlekedésben.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Járműfejlesztési tevékenységünket és jelen cikk elkészültét támogatta: *AVENTICS HUNGARY KFT.* A szerzők ezúton köszönik meg az általuk nyújtott önzetlen támogatást.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] David Linden, Thomas B. Reddy (2002) *Handbook of batteries* The McGraw-Hill Companies Inc.
- [2] D. Pavlov, G. Papazov, M. Gerganska (1991) *Battery energy storage system* Unesco Regional office for science and technology for europe.
- [3] Tarik Al-Shemmeri (2010) *Engineering Thermodynamics* Tarik Al-Shemmeri & Ventus Publishing ApS
- [4] Veres György (2012) *Hidraulika és pneumatika* Pannon Egyetem
- [5] Dr. Fazekas Lajos (2013) *Válogatott fejezetek a gépészeti alapismeretekből* Terc Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.