

Pneumatikus járműhajtás múltja, jövője

Szakács Tamás

Óbudai Egyetem - Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar – adjunktus
Hungary (e-mail: szakacs.tamas@bgk.uni-obuda.hu).

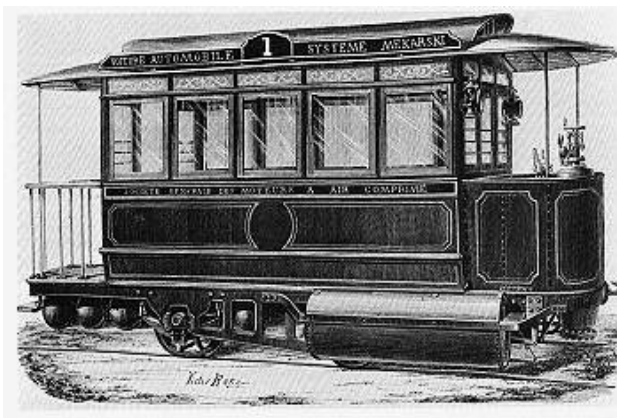
A cikk első felében a sűrített levegővel való járműhajtás kialakulásának érdekes, kevésbé közismert mérföldköveit jelenét mutatom be, a másodikban a közúti, és a versenycélú járművek számára energetikai számításokat végzek.

Meglepő, de 170 évvel ezelőtt a légmotorok nagyon nagy szerepet töltek be a járművek hajtásában. Tiszta, csendes, üzembiztos, és biztonságos hajtási módnak bizonyultak a városi személyszállítástól kezdve a robbanásveszélyes bányákban való szállítási feladatokig. Kevesen tudják, hogy az első önerőből felszállni képes repülőgép, vagy az első mechanikus hajtású tengeralattjáró is sűrített levegős motorral üzemelt. Az ilyen motorok hatásfoka magas, tűz-, és robbanásveszélyt nem jelentenek! A környezetszennyezése csak annyi, amennyi a sűrített levegő előállításakor keletkezik. A belsőégésű motorral hajtott járművekkel ellentétben, ezek a járművek regeneratív fékezésre is alkalmasak. A sűrített levegő fajlagos energiataralma 100 évvel ezelőtt messze meghaladta az akkori akkumulátorok energiataralmát, de a mai korszerű akkumulátorokkal is versenyképesek! Tömegük viszont az elhasznált hajtóanyaggal együtt csökken, szemben az akkumulátorokéval.

1. A PNEUMATIKUS HAJTÁSOK ELTERJEDÉSE

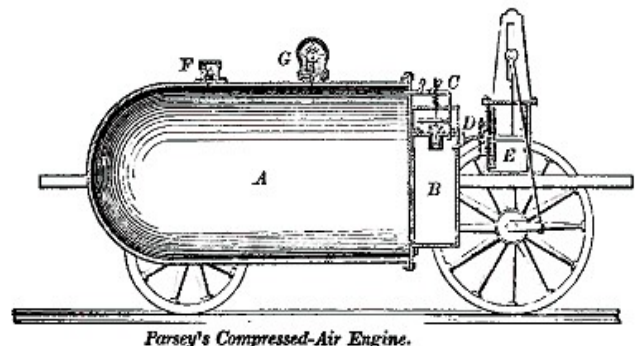
A pneumatikus hajtás első szabadalma Charles Carpenter Bompas nevéhez fűződik, aki 1928-ban Angliában szabadalmaztatott egy mozdonyhajtást Angliában. Az első sűrített levegővel hajtott jármű 1838-ban épült Franciaországban (Tóth 2017)

Andraud és Tessie 1838-as tervei alapján Louis sikeres koncepciótesztelések után épített egy lövontatású kocsizhoz hasonló személyszállító pneumatikus hajtású járművet, ami a kocsiban 20, a peronon további 14 ember szállítására volt alkalmas. A hajtásrendszert ideálisnak nevezte, mert az csendes, sima, egyenletes járású, nem füstöl, nem ég benne tűz, és nem szórt parazsat. (1. ábra).



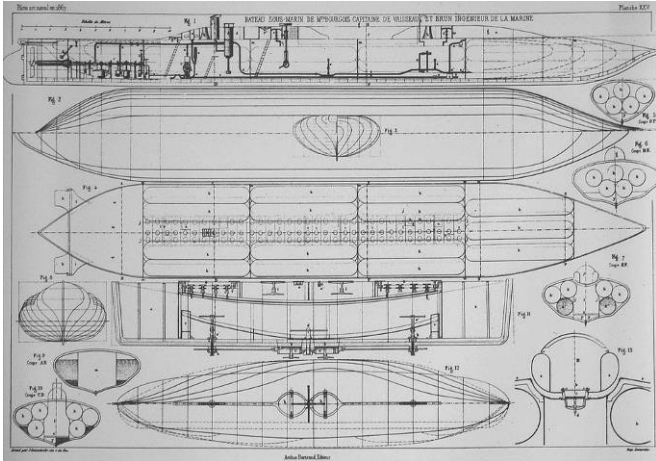
1. ábra: A Mékarski-féle jármű (Tóth 2017)

A Parsey-féle sűrített levegővel hajtott mozdony 1847-ből egy légtartályból (A) egy automatikus nyomáscsökkentőből (C), és egy kettősműködésű hengerből (E) állt. (2. ábra) A mozdonyt szénbányákban használták, mert a gőzmozdonyal szemben nem jelentett robbanásveszélyt.



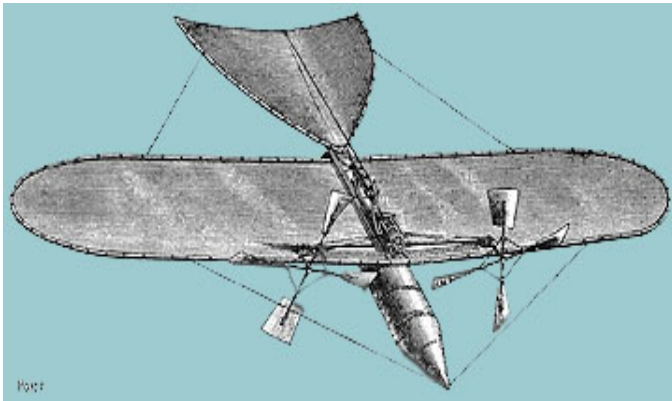
2. ábra: Parsey-féle sűrített levegővel hajtott mozdony (Forrás: Compressed-Air Propulsion)

Az első mechanikus meghajtású tengeralattjárót, az 1863-as, Plongeur-t is (3. ábra) sűrített levegővel hajtott dugattyús motor hajtotta. (Le Masson, H. 1969). A sűrített levegőt 23db, összesen 153m³ térfogatú, 12,5 bar nyomású tartályban tárolták. A motor teljesítménye 60 kW (80 LE), hatótava 5 mérföld (9 km), sebessége 4 csomó (7,2 km/h).



3. ábra. Plongeur tengeralattjáró (Le Masson, H. 1969)

Victor Tatin 1879-ben elkészítette az első repülőgépet, ami felszállópályán kifizva önerőből volt képes felemelkedni. A gép levegőmotorral üzemelt. (4. ábra)



4. ábra. Victor Tatin repülőgépe (Gray, 2015)

1896-1930 között többszáz H.K. Pittsburgh Compound Porter légmotdony készült a robbanásveszélyes bányák számára (5. ábra).



5. ábra. Porter légmotora Homestake Gold Mine aranybányában.

Fotó: Mike Decker

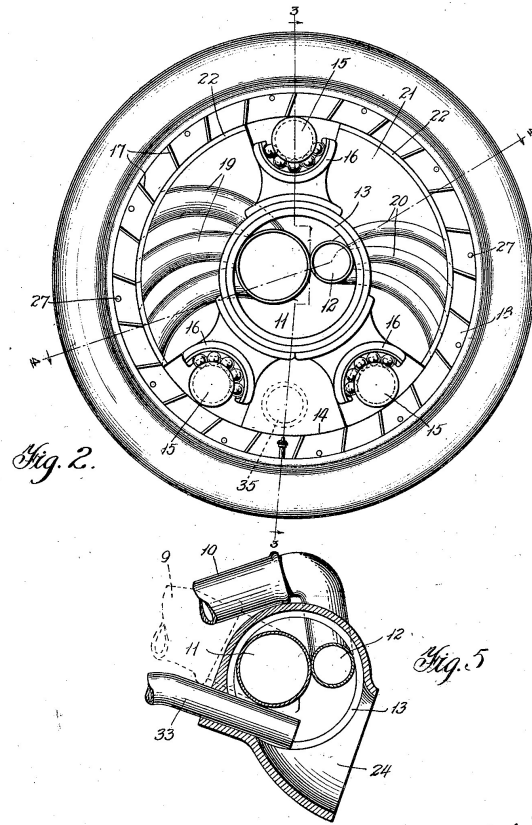
1927-ben Case George A. nyújtott be szabadalmat (6. ábra) pneumatikusan hajtott járműre. (Case, 1927)

July 29, 1924.

1,503,264

G. A. CASE
 PNEUMATIC VEHICLE DRIVE
 Filed Feb. 27, 1923

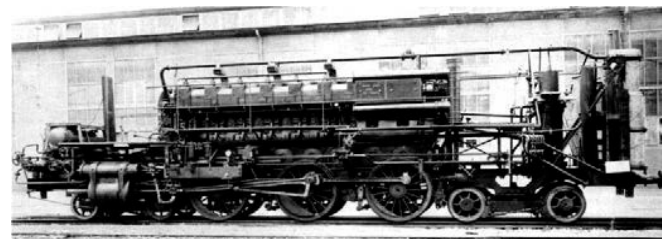
3 Sheets-Sheet 2



Inventor
 Geo. A. Case
 E. W. Anderson for.

6. ábra. Case George féle pneumatikus motor (Case, 1927)

Az 1930-as német, 1,200 LE-s dízel-pneumatikus hibrid motdony. V3201 (7. ábra.). A dízelmotor hajtotta kompresszor szolgáltatta a levegőt a pneumatikus hajtás részére. A dízelmotor hőveszteségének hasznosításával a gép hatásfoka 26%-al nőtt.



7. ábra. A V3201 dízel-pneumatikus hibrid motdony

[<http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/LOCOLOCO/diesair/diesair.htm>]

Ha a hirdetésnek lehet hinni, akkor a 8. ábrán látható autó igazán versenyképes jármű lehetett.

Az oldalnézeti képen látható a négy db. légtartály, ami 500 mérföldre elegendő hajtóanyaggal látja el a légmotort. A jármű 35 mérföldes sebességgel közlekedett. A motor nem igényel hűtést, sem gyújtást, nincs karburátor, sem mozgó alkatrészek tucatjai.



8. ábra. Sűrített levegővel hajtott személygépjármű Los Angeles -ből. (Forrás: AutoStory.com)

2. ENERGETIKAI SZÁMÍTÁSOK

A pneumobil versenyen a járművek hajtására használt munkaközeg a nitrogén.

A nitrogén a legnagyobb mennyiségben felhasznált ipari gáz. Sok helyen felhasználják, de ezek közül a legfontosabbak az ammóniagyártás valamint a dinamitgyártás.

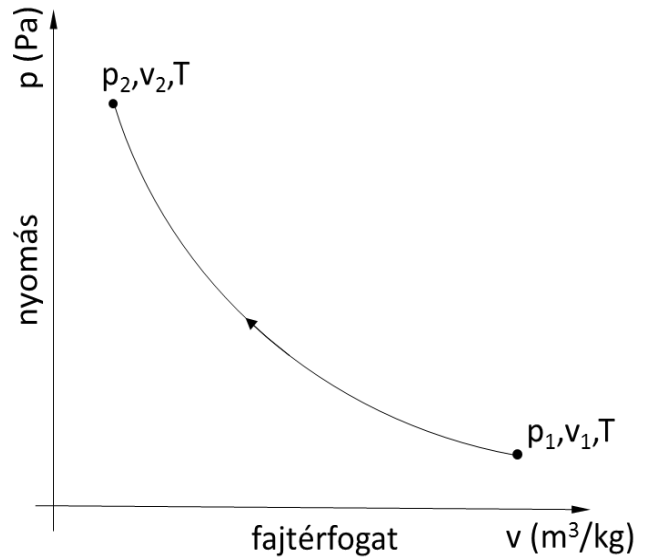
Mivel a nitrogén inert gáz, ezért lehetővé teszi, hogy bizonyos területeken az oxigéntartalomból eredő káros hatásokat kiküszöböljék. Ilyen területek például az élelmiszerek csomagolása, borászat, elektronikai iparban a forrasztóberendezések üzemeltetéséhez. Az üzemelés során, mivel a nitrogén nehezen cseppfolyósodó gáz, ezért alkalmazzák gáztöltétként légrugókban, tűzoltópalackokban és habszifonokban.

A cseppfolyósított nitrogént hűtésre használják fel, például a gyorsfagyasztott élelmiszerekben. (wikipedia.hu: levegő)

A pneumobil versenyen egyrészt ezek az előnyös tulajdonságok miatt használják a sűrített nitrogént hajtóanyagként, másrészt pedig azért, mert az ipar számára készülnek 10 és 14l térfogatú 200 bar nyomású nitrogénpalackok. További előnye a nitrogénnek a levegővel szemben, hogy nincs benne nedvesség, sem oxigén, így sem fagyás, sem robbanásveszély nem áll fenn, és nem korrodál. További információ az ipari nitrogéngázról: https://www.messer.hu/documents/20598/852917/nitrogen_4_5.pdf

A következőkben számításokat végzek a sűrített levegő, illetve a nitrogén energiatartalmára, valamint egy légmotortal hajtott jármű becsült hatótávolságára.

A számításban m-tömegű 20°C hőmérsékletű levegőt sűrítünk izotermikusan 1bar nyomásról előbb 200, majd 300 bar nyomásra az 1. ábra szerint.



9. ábra. Izotermikus sűrítés

A felvett adatok:

$t=20^{\circ}\text{C}$, vagyis $T=293,15\text{K}$,
 a levegő gázállandója: $R_s 287,05 \text{ J/kgK}$,
 sűrűsége: $\rho_{\text{lev}, 20^{\circ}\text{C}}=1,2 \text{ kg/m}^3$,
 a kezdeti nyomás $p_1=1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$,
 a sűrítési végtérfogat $V_2=10 \text{ l} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$.

A nitrogén specifikus gázállandója a levegővel szemben $10 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ -nel, 3,4%-al több, így a sűrített nitrogén ugyanakkora térfogaton 3,4%-al több energiát tartalmaz.

Az első esetben a sűrítési végnomás $p_2=200$ (bar) Ekkor a kezdeti térfogat $V_1=2$ (m^3), $m=2,4$ (kg)

Ebben az esetben a sűrítési fajlagos munka:
 $w = R_s \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = 287,05 \cdot 293,15 \cdot \ln\left(\frac{2}{10}\right) = -445846 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ (1)

Ezt az energiát expandálva 0,446 MJ/kg energiát nyerünk.

Az összes, $m=2,4$ (kg) tömegre számítva ez $E = w \cdot m = 0,446 \cdot 2,4 = 1,07 \text{ MJ}$ energiát jelent.

Az második esetben a sűrítési végnomás $p_2=300$ (bar) Ekkor a kezdeti térfogat $V_1=3$ (m^3), $m=3,6$ (kg)

Ebben az esetben a sűrítési fajlagos munka (2)
 $w = R_s \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = 287,05 \cdot 293,15 \cdot \ln\left(\frac{3}{10}\right) = -479965 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$

Ezt az energiát expandálva 0,48 MJ/kg energiát nyerünk.

Az összes, $m=3,6$ (kg) tömegre számítva ez 1,73 MJ energiát jelent.

Tehát a 10 literes palack 200, ill. 300 bar nyomáson 1,07, illetve 1,73MJ energiát tárol.

Vegyünk egy pillantást a fajlagos energiasűrűségekre, és hasonlítsuk össze a villamos energiatárolókéval:

Energiatároló	Fajlagos energiasűrűség (MJ/kg)
Lithium-ion	0.36–0.875
Alkáli	0.5
Nickel-metal hydride	0.288
Ólom-savas akku.	0.17
Ultrakapacitás (EDLC)	0.01-0.036
Ultrakapacitás (Pseudo)	0.031

Látható, hogy a tároló tömege nélkül számított fajlagos energiatartalmak az alkáli elemek, és a lítium akkumulátorok tartományába esnek.

Ha a 10l-es ipari palack $m_p=17$ kg tömegét is figyelembe vesszük, akkor 200bar nyomáson 0,055, 300bar nyomáson 0,08Mj/kg fajlagos energiatartalmat kapunk.

Ha a gázt az acél tartályához képest negyedannyi ($m_p=4,5$ kg) tömegű kompozit tartályokban tároljuk, 200bar nyomáson 0,155, 300bar nyomáson 0,213Mj/kg fajlagos energiatartalmat kapunk, ami már ismét versenyképes a villamos energiatárolókkal.

Vegyük figyelembe azt is, hogy a tartály tömege a gáz fogyasztásával csökken. 300 bar nyomással töltött kompozit tartály tehát közel azonos fajlagos energiatartalommal bír, mint a NiMh akkumulátor. Nagyobb összetérfigattal számolva az arány még jobb lehet.

A továbbiakban közelítő számításokat végzek egy pneumatikus versenyjármű hatótavának meghatározására.

Kiindulási adat az előbbieken meghatározott 10l űrtartalmú palackban tárolt 200, és 300 bar nyomású sűrített levegő energiája.

A számításhoz az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kar Pow-Air csapatának Ignite nevű járművén végzett méréseket használom fel. (10. ábra)



10. ábra: Az Óbudai Egyetem Ignite nevű pneumobilja

A számításhoz felvett adatok:

75 kg-os pilótával, 17 kg palacktömeggel a mért gördülési ellenállás: 30 N. A jármű homlokfelülete megközelítőleg 1 m^2 Az alaktényező $c_w=0,47$. A haladási sebesség a hosszútávfutamban előírt minimális átlagsebesség: $v_n=15 \text{ km/h}$ ($= 4,17 \text{ m/s}$).

A levegő sűrűsége 20°C -on $1,2041 \text{ kg/m}^3$

Ezekkel az adatokkal a számított légellenállás:

$$F_l = c_w \cdot \frac{\rho}{2} v_k^2 \cdot A = 0,47 \cdot \frac{1,2041}{2} \cdot 4,17^2 \cdot 1 = 4,91 \text{ N} \quad (3)$$

Az összes ellenállás az emelkedési, és a tehetetlenségi ellenállásokat elhanyagolva: $F_m=34,91 \text{ N}$

A pneumatikus motor hatásfokát $\eta_m=0,7$, az erőátvitelét $\eta_{ca}=0,8$ -ra becsülve az összhatósfok $\eta=0,56$.

A hatótáv meghatározását a következőképpen végzem el:

A palack energiatartalma fedezi a menetellenállások s -út megtételéhez felhasznált munkáját, vagyis

$$E = W = \frac{F_m \cdot s}{\eta} \quad (4)$$

Az egyenletet a megtett útra rendezve:

$$s = \frac{E \cdot \eta}{F_m} \quad (m) \quad (5)$$

A 200 bar nyomású palack energiáját a hatásfokkal csökkentve, a maradék energiát a menetellenállások

$$s = \frac{1070 \text{ kJ} \cdot 0,56}{34,91 \text{ N}} = 17,16 \text{ km} \quad (6)$$

út megtétele alatt emészti fel.

A verseny során a 3 pilótacsere miatt a járművet négyszer kell nulláról az előírt 15 km/h sebességre gyorsítani, vagyis a gáz energiájából négyszer kell 4,17 m/s-hoz tartozó

mozgásenergiát létrehozni. Ha a jármű tömege 80kg, a pilóta 75kg, a palack 17 kg, akkor az össztömeg 175 kg. A mozgásenergia

$$E_m = 4 \cdot \frac{m}{2} v^2 = 4 \cdot \frac{175}{2} 4,17^2 = 77400 \text{ J} \quad (7)$$

Ez az energiavesztés az 5. egyenlet szerint 1241,5 m-rel csökkenti a gáz energiájából megtett utat. Így a 200 bar palack energiájával számolva már csak 15,921 km tehető meg.

A pneumobil versenyen mért távolsági rekord kis híján 13km, de a versenyen többször meg kell állni, kanyarodni, vannak rossz minőségű útfelületek, így a számítások helytállónak látszanak.

Ha a palacknyomás 300 bar lenne, akkor a jármű elméletileg sík úton egyenletes haladással 27,71km-t tenne meg. Ebből versenykörülmények között 20-22km realizálódna. 50 literes, 300 bar nyomású tartállyal a hatótáv gyakorlatilag 100km körül várható, ami már egy külvárosi ingázó járműnek is megfelel.

3. KÖVETKEZTETÉSEK

A pneumatikus hajtás a járműtechnika fejlődésének kezdetén versenyképes volt a többi hajtással. Az 1. fejezetben bemutatott pneumatikus járművek a maguk nemében úttörők voltak. Az idő során aztán az olcsó fosszilis üzemanyagok elterjedésével, valamint az akkor még elhanyagolt környezetszennyesés miatt elveszítették a jelentőségüket.

Manapság az energiahatékonyság, a fosszilis üzemanyagoktól való minél nagyobb függetlenség és a környezetvédelem ismét előtérbe kerültek, aminek következtében megjelentek az alternatív hajtási módok. Ennek térnyerését bizonyítják a villamos-, és a villamos hibridhajtások elterjedése.

A villamos hajtáson kívül érdemes megfontolni a pneumatikus hajtásokat is. A cikk második felében végzett számítások eredményei ezt igazolják.

FELHASZNÁLT IRODALOM

Carroll F. Gray: Flying machines: Victor Tatin
<http://www.flyingmachines.org/tatin.html>

Case George A Pneumatic vehicle drive US 1503264 A
Szabadalom, benyújtva: 1923 február 27
<http://www.google.com/patents/US1503264>

TÓTH István Tibor, Compressed Air, as an Alternative Fuel
1st Agria Conference on Innovative Pneumatic Vehicles
ACIPV 2017 May 05, 2017 Eger, Hungary ISBN 978-963-449-022-7

Le Masson, H. (1969) Du Nautilus (1800) au Redoubtable
(Histoire critique du sous-marin dans la marine française), Paris pp.55–59

Messer katalógus: Ipari nitrogénpalackok:
https://www.messer.hu/documents/20598/852917/nitrogen_4.5.pdf

The German Diesel-Pneumatic Locomotive. 2010
<http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/LOCOLOC/O/diesair/diesair.htm>

Compressed-Air Propulsion 2010
<http://www.aqpl43.dsl.pipex.com/MUSEUM/TRANSPORT/comprair/comprair.htm>

AutoStory First Air Car. Letöltve: 2017
<http://www.automostory.com/first-air-car.htm>

wikipedia.hu: levegő Letöltve: 2017

