

Elektromos és emberi erővel hajtott kerékpárok energiaköltsége

Háttér

Az elektromos rásegítésű kerékpározás felfutóban van, mivel egyesíti a biciklizés egészségi és környezeti előnyeit a motoros jármű kényelmével. A Gépjárműbiztonsági Törvény legutóbbi módosítása szerint a segédmotoros kerékpár maximum 500 watt elektromos teljesítményű lehet, ami megfelel az emberi erővel hajtott járműének (Canada Gazette 658-659).

Az egyéb közlekedési eszközökhöz képest a hagyományos kerékpár az emberi helyváltoztatás egyik leghatékonyabb formája. Egy kilométert biciklizni körülbelül 5-15 wattórányi (Wh) energiába kerül, míg ugyanannyit gyalogolni 15-20, vonattal utazni 30-40, és egyedül autózni 400 wattórába. Feltételezhető, hogy az elektromos kerékpár összesített környezeti hatása szintén nagyságrenddel kedvezőbb lenne az autózásnál, buszozásnál és egyéb városi közlekedési formáknál. Ugyanakkor megfogalmazznak fenntartásokat is azzal az esettel kapcsolatban, ha olyan ember használ elektromos kerékpárt, aki egyébként képes lenne közönséges biciklin járni. Úgy érvelnek, hogy ha pusztán izomerővel is mozoghat az ember, akkor az akkumulátor és az elektromosság csak a környezeti ártalmat és a költséget növeli. Ez azonban elhamarkodott vélemény, mivel nem veszi figyelembe, hogy a villanymotor emberi munkát vált ki, amely viszont fokozott táplálkozásba kerül. Így az elektromos és a közönséges bicikli fenntarthatóságát csakis komplett életciklus-elemzéssel lehet összevetni.

Feltételezések

Az életciklus-összehasonlítás leegyszerűsítésére több feltételezést vezetünk be. Az első, hogy az elektromos és a közönséges kerékpár kilométerenkénti energiafogyasztása hasonló egymáshoz. Ez elfogadható, mivel hasonlóak a kettő aerodinamikai jellemzői, és a villanymotor, illetve az akku plusz súlya elhanyagolható az ember-jármű össztömeghez képest. Érvényét veszti ugyan, ha elektromos kerékpáron gyorsabban megy az ember, mint pedálozva, mert ilyenkor hirtelen nő a légellenállás, de mivel az elektromos rásegítés 32 km/óra, tehát a gyakorlott bringás sebességére van korlátozva, első közelítésben elhanyagolhatjuk e tényezőt.

Az összehasonlításban csak a kétféle közlekedési mód ráfordításait vesszük figyelembe. Az elektromos kerékpár ugyanazokból a szerkezeti elemekből épül fel, mint a közönséges, plusz ott a motor, a vezérlés, az akku és a töltő. Ezért nagyobb a gyártási költsége, de a motor, a vezérlés és a töltő nem kíván karbantartást, és nagyon hosszú élettartamú, úgyhogy a legyártás után nem generál további költséget. Cserélni csak az akkut kell, és ezt figyelembe is vesszük a számításokban.

Ignoráljuk viszont a másodlagos hatásokat, például az egészségügyi előnyöket és az edzés költségét, valamint az akkumulátorok mérgező anyagait a kiselejtezéskor. Az elsőt nagyon bonyolult lenne számszerűsíteni, a második viszont veszt jelentőségéből, ahogy elterjed az akkuk újrahasznosítása.

Ezekkel a feltételezésekkel egyszerű energia-összehasonlításra redukáltuk az életciklus-elemzést. Elegendő meghatározni azt a primer energiát, amely az adott izommunka fedezéséhez szükséges táplálék előállítására kell. Ezt hasonlítjuk aztán össze a villanymotor és az akku által végzett azonos munkamennyiség primer energia igényével.

Primer energiának nevezzük az ember által létesített energiaforrásokat, például azt, amit az elektromos hálózatból, vagy fosszilis tüzelőanyagok elégetésével kapunk. Nem tartozik bele a növénytermesztés által hasznosított napsugárzás. A jelen tanulmányban a primer energia egysége a mega-joule (MJ), míg a feltöltött akku energiatartalmát wattóraban (Wh), az élelmiszer energiatartalmát pedig kalóriában (kcal) fejezzük ki.

1 MJ = 1,000,000 Joules

1 kcal = 4,200 Joules

1 w-h = 3,600 Joules

Az élelmiszertermelés energiaszükséglete

Az élelmiszertermelés nagy energiafogyasztó a nyugati társadalmakban. A Canadian Food Production átfogó tanulmánya szerint ez az ágazat 11 százalékot vesz igénybe Kanada összesített energiafelhasználásából. Benne van a mezőgazdasági ipar direkt energiafelhasználása, továbbá a műtrágya, a növényvédő szerek és a mezőgazdasági gépek gyártásáé, valamint az élelmiszerek gyártásának, csomagolásának, szállításának és elkészítésének energiaigénye. Fejenként és naponta ez 56 MJ vagy 13,400 kcal. Összehasonlításként: egy személy átlagos élelmiszer-kalóriefogyasztása az életkora során nagyjából 2000 kcal per nap. Úgy számolhatunk tehát, hogy Kanadában az élelmiszertermelés hatékonysága 2:13.4, tehát minden egyes élelmiszer-kalória előállításához 7 kalóriára volt szükség. Ez az 1:7-es arány ugyanolyan, mint Svédországhoz, és hasonló az Egyesült Államokéhoz (1:11), illetve a nyugati társadalmak átlagához.

Metabolikus hatékonyság

A kerékpározó ember metabolikus hatékonysága figyelemre méltóan jó. Mérések szerint egy jól edzett sportember 22 – 26 százalékos hatásfokkal dolgozik, a pedálozás ütemének és a teljesítménykifejtésnek a függvényében. Ez azt jelenti, hogy a kerékpározásra fordított minden kalóriányi mechanikai energiát 4 kalóriányi tápanyag-energiával kell megváltani. Ha ezt összevetjük az élelmiszertermelés hatékonyságával, akkor megkapjuk az emberi teljesítménykifejtés nettó hatékonyságát.

$N_{human} = 1:7 * 1:4 = 1:28$

Más szóval, a bringás által a pedálon kifejtett egységnyi mechanikai energia ára 28 egységnyi primer energia (például fosszilis tüzelőanyag).

Akkumulátorgyártás

Az elektromos kerékpár energiaforrása a tölthető akkumulátor. Jelenleg négyféle vegyhatáson alapuló akku használatos. Legelterjedtebb az ólomakku (PbA), alkalmilag

használatos a nikkel-kadmium akku (NiCad), míg a nikkel-fémhidrid- (NiMH) és a lítiumion-akku (Li-ion) a jövő megoldásaként terjed. A lítiumion- és a nikkel-fémhidrid (NiMH) akkunak nagy az energiasűrűsége, az ólomakku olcsó, a NiCad pedig hosszú élettartamú. Az egyes típusok összesített környezeti hatásával nemigen törődtek eddig. Ezért egyenként vizsgáljuk meg mindegyikük életciklus-energiafelhasználását. A gyártásukhoz szükséges energiáról nehéz összehasonlítást találni. A legalaposabbat az 1. táblázat foglalja össze. Azt mutatja, hogy hány mega-joule szükséges egy wattórányi akkukapacitás előállításához. Gyári adatokon alapul, megadja az eredeti és a visszaforgatott nyersanyagok költségét. Itt csak az előbbivel foglalkozunk, bár a visszaforgatott anyag jóval kevesebbe kerülhet.

Táblázat 1: Akkumulátorok gyártásának energia költsége. Forrás: Rydh, 2003

Akku típusa	Anyag visszaforgatás (MJ/w-h)	Gyártás (MJ/w-h)	Teljes (MJ/w-h)
Li-ion	0.67	1.2	1.9
NiCad	2.0	2.1	4.1
NiMH	1.6	2.1	3.7
PbA	0.77	0.42	1.2

A számadatokban benne van a nyersanyagok szállítása a gyártóüzembe, illetve a kész akku elszállítása a végfelhasználóhoz. Jelenleg az elektromos kerékpárok akkuit többnyire Kínában vagy Tajvanon gyártják, és légi úton szállítják Észak-Amerikába. A 2. táblázat az akkuszállítás energiaköltségét mutatja az energiasűrűségük alapján, 10,000 km-es távon (Tajvan->Vancouver), és a légi fuvarozásra 20 MJ/tonnakilométer hatékonyságot feltételezve. Látható, hogy a lítiumion és a NiMH esetében a szállítási és a gyártási energia összehasonlítható, míg az ólomakku szállítása csaknem hétszer annyi energiába kerül, mint a gyártása.

Táblázat 2: Akkumulátor légi szállításának energia költsége

	Energia sűrűség (w-h/kg)	Szállítási hatékonyság (MJ/tonne-km)	Távolság (1000 km)	Szállítási költség (MJ/w-h)
Li-ion	120	20	10	1.7
NiCad	40	20	10	5.0
NiMH	60	20	10	3.3
PbA	25	20	10	8.0

Akkumulátor-életciklus

Egy akkumulátorból kivehető összes energiamennyiség függ a wattórában kifejezett kapacitástól és az akku töltés-kisütés ciklusainak lehetséges számától. A kerékpárnak szolgáltatott mechanikai energia ez az előbbi, szorozva a motor hatásfokával.

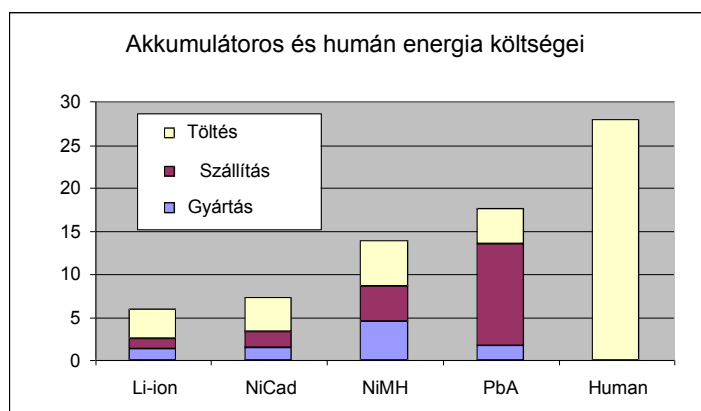
Az akkumulátor feltöltésekor elhasznált energia több, mint a motornak szolgáltatott energia, mert az elektromos hálózat és az akku közötti töltőrendszerben veszteségek keletkeznek. E két számadatot a 3. táblázat utolsó két oszlopa tünteti fel. A NiMH és a PbA akku csekély ciklusszáma az elektromos kerékpárt használók gyakorlati tapasztalatain alapul. A rendszerint közölt 500 ciklus optimistának tűnik kerékpáros felhasználásra. Tesztelt NiCad akkuk több mint 2000 ciklust bírtak tökéletes karbantartás mellett, így elektromos kerékpár esetében realiztikusnak tűnik 1000 ciklussal számolni. A lítiumion-akku még túl új ahhoz, hogysem megbízható életciklus-bebecslést lehetne tenni, ezért a gyártók által megadott 500 ciklussal számolunk.

Táblázat 3: Input és Output energia az akkumulátorból

	Ciklus-szám	Hálózat hatékonys.	Töltés hatékonys.	Töltő hatékonys.	Motor hatékonys.	Telj.Inp.Energia (MJ/w-h)	Telj.Out.Energia (MJ/w-h)
Li-ion	500	0.5	0.95	0.85	0.75	4.5	1.4
NiCad	1000	0.5	0.8	0.85	0.75	10.6	2.7
NiMH	300	0.5	0.6	0.85	0.75	4.2	0.8
PbA	250	0.5	0.8	0.85	0.75	2.6	0.7

A töltési hatékonyság az akkuból kinyert energia és a betáplált elektromos energia hányadosa. A lítiumos szite tökéletes e szempontból, míg a többiben másodlagos cellareakciók játszódnak le, amelyek sok energiát rabolnak el töltés közben. Modern teljesítményelektronikával 85 százalék körüli töltéshatékonyság érhető el, és a legtöbb kerékpár-agymotor eléri a 75 százalékos hatásfokot. A közmű áramszolgáltatási hatásfokát 50 százaléknak vesszük – Kanadában ennek forrása hő-, atom- és vízi-erőmű.

Valamennyi adat figyelembe vételével meghatározzuk az elektromos kerékpár energiamérlegét: a 3- táblázat Energy Out adatát elosztjuk az Energy In, valamint a 2. táblázatból vett szállítási energia, és az 1. táblázat szerinti gyártási energia összegével. Az egyes akku-féleségek arányszámát az 1. ábra mutatja be, az emberi erő korábban számított költségével együtt.



1. ábra: Életciklus-energiaigény

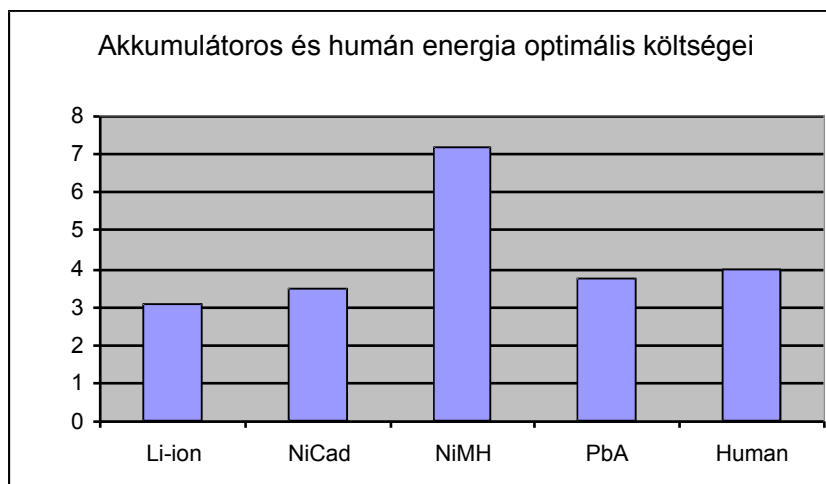
Az eredmény azt mutatja, hogy a lítiumion-akku a messze leghatékonyabb, mert kicsi a szállítási súlya, olcsó a gyártása és magas a töltési hatásfoka. Kevéssel marad le a NiCad akku, mert nagyszámú töltési ciklusa ellensúlyozza nagy gyártási és szállítási költségét. Sokkal rosszabb az ólomakku, egységnyi energia kinyeréséhez 17-szer annyit kell befektetni, legtöbbjét a súlyos szerkezet szállítására. Ám az ólomakku még így is harmadával kevesebb energiát fogyaszt, mint a kerékpározó ember.

A fenti számokat jellemző esetek feltételezésével kaptuk. A korrektség kedvéért el kell ismerni, hogy a bringás táplálkozhat teljes egészében helyben termelt, iparilag fel nem dolgozott élelemmel is. Ekkor már 1:1 lehet az arány. Beszámítva a 25 százalékos metabolikus hatékonyságot, az emberi energiahatékonyság aránya 1:4, tehát kissé jobb a lítiumion-akkus bicikliéénél.

Lehet hasonlóan optimális helyzetet elképzelni az akkura is. Vancouverben a hálózati

áram vízi erőművekből származik, a hatásfok közel 100 százalék. Ezenkívül vannak helyi akkugyártók, lítiumosból és ólomakkuból is. Az előbbi ábrához hasonló a 2. ábra, amely helyi akku-beszerzéssel és vízi energiájú áramtermeléssel számol, a bringás esetében pedig helyileg megtermelt élelemmel.

A legkedvezőbb energiaköltségek az akku és az ember részére



2. ábra: Energiaigény, helyi források esetén

Érdekes módon hasonló a legkedvezőbb helyzet az elektromos hajtás és az emberi erő részére. Ilyenkor a NiMH kívánja a legnagyobb energiabevitelt, míg az ólom- és NiCad-akku szinte egy szinten áll a lítiumion-akkival, az arány $\sim 1:3 - 1:3 \frac{1}{2}$.

Összegzés

Annak az ösztönös sejtésnek ellenére, hogy az elektromos kerékpározás több energiát igényel a közönséges biciklizésnél, az életciklus-elemzés megmutatja, hogy 2-4-szer kevesebb primer energiát használ el a megszokottan táplálkozó kerékpárosnál. Ennek oka, hogy a nyugati társadalmakban nagyon sok energiába kerül az élelmiszerek megtermelése és szállítása.

A fenntarthatóság szempontjából az elektromos kerékpár legjobb akkuja a lítiumionos. Optimális esetben a gyártására és töltésére felhasznált energiának csaknem egyharmadát tudja átadni a bicikli kerekének. Előnyös az is, hogy könnyű a biciklin elhelyezett akkumulátortelep. Kár, hogy drága, és ezért gazdaságilag kevésbé előnyös másféle akkuknál.

Megjegyzés:

A cikkben említett kalkulációk 2004-es állapotokra vonatkoznak. Azóta eltelt 8 évben a technológia sokat fejlődött, viszont a költségek is jelentősen megváltoztak. Az üzemanyag ára például jelentősen megemelkedett, ami a szállítási költségek növekedését is magával hozta. Bár a költségszerkezet megváltozott, a fenti kalkuláció meglepő konklúziója ma is érvényes, ezért fordítottuk le, és tettük közzé ezt az anyagot.

Jelenleg az elektromos kerékpárok fokozatosan teret nyernek, köszönhetően többek közt a gazdaságossági és használhatósági előnyeiknek. Az akkumulátorok közül 2012-ben már szinte csak Lithium akkumulátorokat építenek be termékeikbe a gyártók. Bár áruk továbbra is magasabb, mint a korábban használt más típusoknak (NiCad, NiMH, PbA), az előnyeik miatt fokozatosan egyeduralkodóvá váltak. A jövő az elektromos járműveké!