

TÓTH BÉLA

Okleveles gépészmérnök
ny. MÁV mérnök főtanácsos

Visszatápláló-fékezés és kifuttatás együtt?

Előzmény

Az energiatakarékos vasúti vontatás témában Kisteleki Mihály és Wiedermann Kornél Gazdaságos vonattovábbítás tárgyú oktatófilmet A Közlekedés, -és Postaügyi Minisztérium, Vasúti Főosztály megbízásából készítette a KÖZDOK.

Lásd: www.youtube.com/watch?v=5uWEtUSHQA8

A film a mozdonyvezető képzés része lett, és amíg a rendszerváltozás éveiben nem szedték fel a pályamenti emelkedő-lejtés jelzőket, a filmet az oktatásnak megfelelően használni lehetett.

A számítástechnika és a programozás még 1980-as években állította Tóth Béla útjába az energiatakarékos vasúti vontatás témát. 1988-ban Dr. Várszegi György vezérigazgató által támogatott gazdaságos vonattovábbítás téma Tóth Béla segítségére volt. A Gépészet segítette a járművel támogatást, egy V43-asra felszerelt berendezéssel kezdődhettek a kísérletek a 40/a vonalon. A Kelenföld-Érd Felső- Érd vonalszakaszon kísérletezett Tóth Béla vezette innovációs csapat.

A tudás hasznosítására Tóth Béla által irt MÁV szabadalom elfogadásra került. A rendszerváltás éveiben a gyorsan elszegényedő MÁV évek multán a MÁV a szabadalmakat nem fizette, a kísérletek is abbamaradtak.

A gazdaságos vontatás szabadalom kudarca ellenére a fejlesztés fontosságát Tóth Béla nem adta fel, ismerte az energiatakarékos vonattovábbítás fontosságát. A Vasútépítésben több Tóth Béla cikket tettünk közzé.

Tóth Béla MÁV-os gépészmérnök volt, összeállt a GYSEV-es Előhegyi István közlekedés mérnökkel és Dr. Zobory István BME egyetemi professzorral, és közösen szabadalmat alkottak.

Az ún., EnOpt szabadalom nem kellett a MÁV-nak a GYSEV-nek, a szabadalmat a Knorr-Bremse hasznosította 2008. év után.

Tóth Béla, Vasútépítésnek átadott 2000 évi írása a következő:

Bevezető

Vasútüzemi gyakorlat során felmerülhet a kérdés: van-e haszna energetikai szempontból, vagy inkább káros, ha visszatápláló fékezés mellett kifuttatást is alkalmazunk a megállító fékezést megelőzően. Első közelítésként talán adhatunk olyan választ, hogy a kifuttatás bizonyára káros hatású, mivel ekkor egy alacsonyabb sebességről kell a fékezést indítani, és ezáltal kevesebb energia táplálható vissza a táphálózatba. De aztán gondolhatunk arra is, hogy kifuttatás nélküli esetben, a fékezést megelőzően hosszabb úton kell vonóerőt alkalmaznunk a sebességtartáshoz. Melyik válasz igaz? Erre a dilemmára kísérel meg elfogadható választ adni a következő rövid tanulmány.

Ismeretes, hogy hagyományos fékezési rendszerek alkalmazása esetén igen jelentős vontatási-energia megtakarítás érhető el a vonat megállító fékezését megelőző szabad kifuttatás révén. Jogosan merül fel most a kérdés: milyen energetikai összefüggés állapítható meg a visszatápláló fékezés és a kifuttatás között? Az első közelítés olyan megfontolásra vezethet, hogy visszatáplálás esetén a nagyobb sebességről történő fékezés nyilván nagyobb mértékű energia visszanyerést eredményezhet, tehát a fékezést megelőző kifuttatás, mely esetben a fékezés kisebb sebességről indul, kedvezőtlenebbé válhat.

A kérdés részleteinek vizsgálatát elősegíti az 1. ábra, ami a megállást megelőző **sebesség-út menetábra** aktuális részletét szemlélteti sematikus¹ formában, kifuttatás nélküli (A-görbe) és kifuttatásos (B-görbe) menet esetére.

Az ábra jelölései:

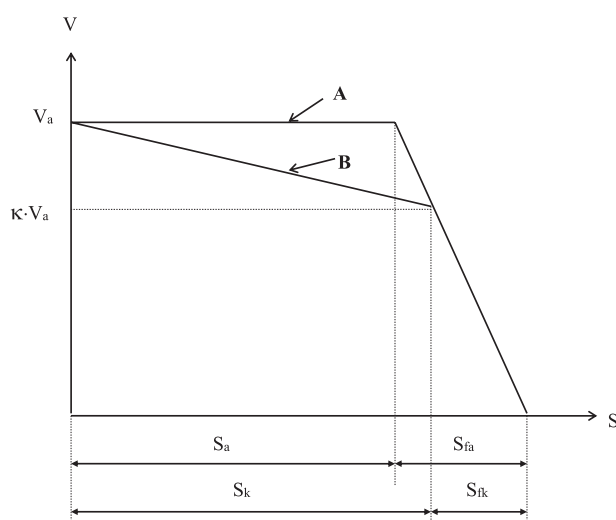
v_a : vonat alapsebesség, m/s

κ : kifuttatási sebesség tényezője ($0 < \kappa < 1$)

S_a, S_k : kifuttatás nélküli, ill. kifuttatási út, m

S_{fa}, S_{fk} : fékezési út kifuttatás nélkül, ill. kifuttatással, m

¹ A valóságban a kifuttatási és a fékezési út lefolyása – ebben az ábrázolásban – nem egyenes vonalú.



1. ábra

Az itt következő részadatokat a 80...120 km/h sebességtartományban, csak a kifuttatás kezdetétől a megállásig terjedő út- és időtartományban – az 1. ábrának megfelelően – értelmeztük, továbbá a pályát sík-egyenesnek tekintettük.

Az a_f fékezési lassulás (felvett érték):

$$a_f = 0,7 \text{ m/s}^2$$

Az a_k kifuttatási lassulás, amely a kifuttatáshoz tartozó e_k közepes menetellenállásból és a g nehézségi gyorsulásból számítható:

$$a_k = g \cdot e_k$$

Ezek felhasználásával az S_k kifuttatási és az S_{fk} fékezési úthossz, valamint az S_{fa} kifuttatás nélküli fékezési úthossz közvetlenül számítható.

$$S_k = \frac{(1 - \kappa^2) \cdot v_a^2}{2 \cdot a_k}; \quad S_{fk} = \frac{(\kappa \cdot v_a)^2}{2 \cdot a_f}; \quad S_{fa} = \frac{v_a^2}{2 \cdot a_f}$$

Fentiek ismeretében, az állandó sebességű S_a úthossz értéke

$$S_a = S_k + S_{fk} - S_{fa}$$

is könnyen meghatározható. A kifuttatás **Km** százalékos mértéke a κ kifuttatási sebesség-tényezőből adódóan:

$$Km = 100 \times (1 - \kappa) \%$$

Az 1. ábra szerinti vizsgálati modell tulajdonságaiból következően, a vizsgált teljes útszakasz a kifuttatás mértékétől függően más és más hosszúságú lesz, és rövid meg-

állóhely-távolságoknál az itt szereplő, nagyobb hosszúságot kijelölő kifuttatási mértékek meg sem valósulhatnak. Erre vonatkozó tájékoztatásul, az alábbi táblázaton megadtuk a kifuttatási úthosszra vonatkozó nagyságrendi adatokat. A kapott eredmény szerint, a kifuttatás okozta menetidő-többlet vízszintes pályán igen csekély. Emelkedőben ez az érték – a kifuttatási út csökkenése miatt – tovább csökken.

Kifuttatás mértéke	5 %	10 %	15 %	20 %
Kifuttatás hossza	800-1200 m	1700-2400 m	2500-3600 m	3400-4800 m
Többlet menetidő	~1 s	~4 s	~9 s	~17 s

A fékezési energia hasznosíthatóságának elemzése

A fékezési energia-visszatáplálás elemzéséhez a következőkből indulhatunk ki.

1. Általánosságban, fékezéskor a jármű lendületi energiáját kell felemésztetnünk. A fékező erő azonban két tényezőből tevődik össze:
 - a fékberendezés által kifejtett erőhatásból, valamint
 - az adott, folytonosan csökkenő sebességhez tartozó menetellenállásból.
 Nyilvánvaló, hogy energia-visszatáplálásra csak az első összetevőhöz tartozó energia hasznosítható, míg a másodiké menthetetlenül elvész (hővé alakul át).

Ebben az elemzésben e két erő eredőjét, s ezzel a fékezési lassulást végig állandónak tekintjük.

2. Nyilvánvaló, hogy azonos egyéb paraméterek mellett, a nagyobb sebességről történő fékezéshez nagyobb fékezési energiamennyiség tartozik.
3. A kifuttatás nélküli esetben a fékezésből nyerhető – a kifuttatásosénál nagyobb – energiamennyiségből levonódik az állandó sebesség fenntartásához a fékezést megelőző úthosszon (1. ábra) felhasznált vontatási energia.
4. A rendelkezésre álló fékezési energiának csak az energia-átalakító berendezés hatásfoka által meghatározott része táplálható vissza.

Az itt összefoglaltak alapján, az összehasonlítás céljára a következő energia-mérleg írható fel a kifuttatásos, ill. kifuttatás nélküli hasznosítás esetére:

$$W_{kif} \Leftrightarrow W_{tel} - W_{von}$$

ahol W_{kif} : visszatáplálható fékezési energia a **kifuttatási** sebességről ($\kappa \cdot v_a \rightarrow 0$)

W_{tel} : visszatáplálható fékezési energia a teljes sebességről ($v_a \rightarrow 0$)

W_{von} : vontatási energia a fékezést megelőző, kifuttatás nélküli szakaszon ($v_a = \text{áll}$)

Az energia-összetevők meghatározásának formulái (feltetelezve, hogy a motorkocsi csak villamosan fékezik):

$$W_{\text{kif}} = \eta \cdot m_g \cdot \left(1 + \delta - \frac{g \cdot e_f}{a_f}\right) \cdot \frac{(\kappa \cdot v_a)^2}{2}$$

$$W_{\text{tel}} = \eta \cdot m_g \cdot \left(1 + \delta - \frac{g \cdot e_f}{a_f}\right) \cdot \frac{v_a^2}{2}$$

$$W_{\text{von}} = m \cdot (1 - \kappa^2) \cdot \left(\frac{1}{a_k} - \frac{1}{a_f}\right) \cdot g \cdot e_a \cdot \frac{v_a^2}{2}$$

ahol $e = a + c \cdot v^2$: fajlagos menetellenállás, N/N

e_f : fajlagos menetellenállás átlagos értéke, fékezés-kor, N/N

e_a : fajlagos menetellenállás az alapsebességen, N/N

δ : forgó tömegek együtthatója

η : átviteli hatásfok a visszatáplálásnál

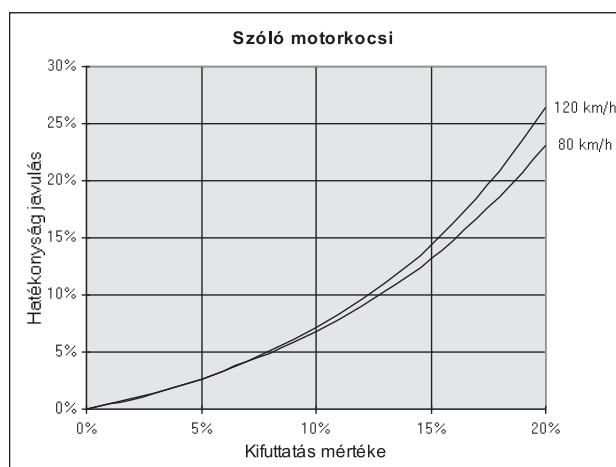
m_g : motorkocsi(k) tömege, kg

m : teljes vonat tömege, kg

A hatékonyság

A felsorolt összefüggések felhasználásával, a kifuttatással együtt alkalmazott energia-visszatáplálás hatékonyságát a kifuttatás nélküli változathoz képest a következőképpen fejezhetjük ki, a vizsgált menetszakaszra vonatkozólag:

$$H = \frac{W_{\text{kif}}}{W_{\text{tel}} - W_{\text{von}}}$$



2.a. ábra

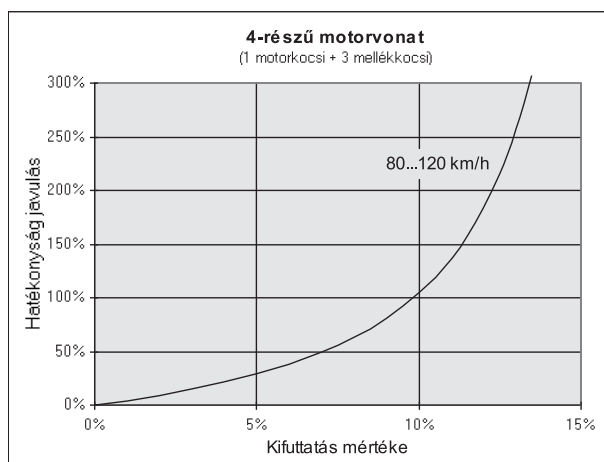
Ennek az összefüggésnek alapján készített diagramok (2.a és 2.b ábra), amelyek azonban csak a kifuttatási szakaszra vonatkoztathatók, jól jellemzik az energia-visszatápláló fékezés hatékonyságát – 80...120 km/h alapsebesség-tartományban – a kifuttatás mértékének függvényében.

Értékelés

Legfontosabb megállapításként rögzíthetjük, hogy visszatápláló fékezési rendszerben a fékezést megelőző kifuttatás az energia-megtakarítás hatékonyságát tovább növeli. Észre kell vennünk azonban, hogy a jelen vizsgálatban figyelembe vett menetszakasz csupán a befejező részét képezi egy indulástól megállásig terjedő valóságos menetábrának, így az itt észlelt megtakarítási arány is módosul aszerint, hogy milyen mértékű energia-fogyasztás történt a megelőző szakaszban.

Elemzésünkben kitűnőleg, szóló motorkocsi, vagy csak motorkocsikból álló szerelvény esetén, a megállító fékezést megelőző, átlagos mértékű kifuttatás – az 1. ábra szerinti menetszakaszra vonatkoztatva – 2...10 %-kal növeli megtakarítást ahhoz képest, mintha csak kifuttatás nélküli visszatáplálás történt volna (2.a ábra). Ehhez képest, amikor a szerelvény a motorkocsi mellett egy vagy több mellékkocsit is tartalmaz, az így képződő viszonylagos megtakarítás mértéke (2.b ábra) az előzőnek többszörösére növekedhet. Ennek könnyen belátható oka az, hogy kifuttatás nélkül a fékezést megelőző többlet vonóerő-munka, mint veszteség, a mellékkocsik tömegének arányában növekszik, miközben a visszatáplálható energia nagysága változatlan.

Egy teljes menet során, a kifuttatások révén megvalósítható energia-megtakarítási viszonyokat számítógépes menet-szimuláció segítségével tanulmányoztuk a Budapest Déli pu. – Székesfehérvár vonal figyelembevételével.



2.b. ábra

	Menetidő	Teljes energia-fogyasztás	Visszatáplált energia	Eredő energiafogyasztás	Kifuttatás hatékonysága
Kifuttatás nélkül	54,8 perc	722 kWh	134 kWh	588 kWh	0 %
30 s kifuttatással	55,2 perc	636 kWh	113 kWh	523 kWh	11,1 %
45 s kifuttatással	55,8 perc	589 kWh	102 kWh	487 kWh	17,2 %

1. táblázat: a szimulációs futtatások eredményének összefoglalása

vel. A szimulációs modell adatai, valamint a futtatások eredményei a Függelék 3. fejezetében találhatók. Az 1. táblázat táblázat a szimulációs futtatások eredményének összefoglalását tartalmazza.

A kifuttatás alkalmazását gyakorlatilag nem hátráltatja az ezzel összefüggő tényleges menetidő-hosszabbodás, mert – mint azt a korábbi táblázaton megmutattuk – a szóba jöhető 5...10 %-os kifuttatási mérték mellett a menetidő-hosszabbodás megállásonként nem több néhány másodpercnél.

Mindezek figyelembevételével, – a gyorsfékezés és a vészfékezés esetét kivéve – gazdasági szempontból célszerűnek tűnik az üzemi fékezéshez az olyan vezérléstechnikai konstrukció kizárása, amely megengedi a vonóerő-kikapcsolás és a fékezés-indítás időátmenet nélküli megvalósulását, mert így – egy túl kényelmes vezetési stílus esetén – a kívánatos kifuttatásos menetfázis kiküszöbölődik.



3. ábra: A függelék néhány számítástechnikai részletét bemutató FLIRT-ek találkozási Kelenföldön. (Fotó: Kovács Károly)

Függelék

Néhány számítástechnikai részlet

I. A kifuttatás változó sebességű folyamata vízszintes pályán

1.1 A kifuttatási út és idő közelítő számítása

Az alkalmazott változók

v_1, v_2 : kezdő- ill. végsebesség, m/s

a_f : fékezési lassulás, m/s²

δ : forgó tömegek együtthatója

$$a_k = \frac{g}{1+\delta} \cdot \left(a + c \cdot \frac{v_1^2 + v_2^2}{2} \right) : \text{közepes kifuttatási lassulás, m/s}^2$$

A kifuttatási út és idő:

$$t = \frac{2 \cdot s}{v_1 + v_2} \quad s = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot a_k}$$

1.2 A pontos számítás

Az alkalmazott további változók

m : tömeg, kg

t : idő, s

v : sebesség, m/s

s : út, m

g : nehézségi gyorsulás, m/s²

$F_e = g \cdot m \cdot (a + c \cdot v^2)$: menetellenállás, N

	Időfüggvény	Útfüggvény
Newton-egyenlet	$F = (1 + \delta) \cdot m \cdot \frac{dv}{dt}$	$F = (1 + \delta) \cdot m \cdot \frac{v \cdot dv}{ds}$
Behelyettesítéssel	$m \cdot g \cdot (a + c \cdot v^2) = (1 + \delta) \cdot m \cdot \frac{dv}{dt}$	$m \cdot g \cdot (a + c \cdot v^2) = (1 + \delta) \cdot m \cdot \frac{v \cdot dv}{ds}$
Változók szétválasztásával	$\frac{g}{(1 + \delta)} \cdot dt = \frac{dv}{a + c \cdot v^2}$	$\frac{g}{(1 + \delta)} \cdot ds = \frac{v \cdot dv}{a + c \cdot v^2}$

Az integrálások elvégzésével ($v_2 \rightarrow v_1$ határok között) a kifuttatási út és idő:

$$s = \frac{1+\delta}{2 \cdot g \cdot c} \cdot \ln \left(\frac{a+c \cdot v_1^2}{a+c \cdot v_2^2} \right)$$

$$t = \frac{1+\delta}{g \cdot \sqrt{a \cdot c}} \cdot \left[\arctg \left(\sqrt{\frac{c}{a}} \cdot v_1 \right) - \arctg \left(\sqrt{\frac{c}{a}} \cdot v_2 \right) \right]$$

2. A fékezés változó sebességű folyamata vízszintes pályán

Az alkalmazott változók

- m_g : motorkocsi(k) tömege, kg
- v_f : fékezési kezdősebesség, m/s
- a_f : fékezési lassulás, m/s²
- δ : forgó tömegek együtthatója

A fékezési lassulás értékét állandónak tekintjük:

$$\frac{dv}{dt} = a_f = \text{áll.}$$

A lassulást előidéző, sebesség-függő erő-összetevők:

- a fékberendezés fékezőereje: $F_f(v)$
- a menetellenállás: $F_e(v) = g \cdot m_g \cdot (a + c \cdot v^2)$

A Newton-féle egyenlet:

$$F_f + g \cdot m_g \cdot (a + c \cdot v^2) = (1+\delta) \cdot m_g \cdot a_f$$

A fékberendezés fékezőereje, amelynek energiája visszatáplálással hasznosítható:

$$F_f(v) = m_g \cdot [(1+\delta) \cdot a_f - g \cdot (a + c \cdot v^2)]$$

3. A szimulációs futtatások eredményei

A menet-szimuláció legfontosabb adatai:

- Pályaszakasz: Bp. Déli pu. – Székesfehérvár
- Vonattípus: 4-résű elővárosi villamos motorvonat
- Vonattömeg: 230 t
- Vonat alapsebesség: 110 km/h

A választott vonal hossza: 67,1 km, mely hosszon a vonat 17 megállóhelyen áll meg, így az átlagos megállóhely távolság: ~3,95 km. A szimulációs menetek rendre

- kifuttatások nélkül,
- 30 másodperces (átlagosan 6,5 %-os) kifuttatásokkal,

– 45 másodperces (átlagosan 9 %-os) kifuttatásokkal lettek végrehajtva.

3.1 Kifuttatás nélküli menet

Távolság km	Szolgálati hely	Menetidő perc
0.0	Budapest_Déli_pu.	-
4.2	Budapest-Kelenföld	3.9
3.1	Budafok-Albertfalva	2.6
1.8	Budafok-Belváros_mh.	2.0
6.9	Nagyttény	4.8
1.5	Nagyttény-Érdl._mh.	1.8
2.4	Érd_alsó	2.5
4.1	Tárnok	3.2
8.7	Martonvásár	5.9
3.2	Baracska_mh.	2.8
5.2	Pettend_mh.	3.9
2.4	Kápolnasnyék	2.3
3.0	Velence_mh.	2.7
1.5	Velencefürdő_mh.	1.8
2.3	Gárdony	2.2
1.8	Agárd_mh.	2.0
5.0	Dinnyés	3.8
10.0	Székesfehérvár	6.6

67.1 km

54.8 perc

Vontatási-energia fogyasztás: 722. kWh

Visszatáplálható energia: 134. kWh

3.2 Megállás előtti, 30 s időtartamú kifuttatás

Távolság km	Szolgálati hely	Menetidő perc
0.0	Budapest_Déli_pu.	-
4.2	Budapest-Kelenföld	3.9
3.1	Budafok-Albertfalva	2.7
1.8	Budafok-Belváros_mh.	2.0
6.9	Nagyttény	4.8
1.5	Nagyttény-Érdl._mh.	1.9
2.4	Érd_alsó	2.5
4.1	Tárnok	3.3
8.7	Martonvásár	5.8
3.2	Baracska_mh.	2.9
5.2	Pettend_mh.	3.9
2.4	Kápolnasnyék	2.3
3.0	Velence_mh.	2.7
1.5	Velencefürdő_mh.	1.8
2.3	Gárdony	2.3
1.8	Agárd_mh.	2.1
5.0	Dinnyés	3.8
10.0	Székesfehérvár	6.5

67.1 km

55.2 perc

Vontatási-energia fogyasztás: 636. kWh

Visszatáplálható energia: 113. kWh

3.3 Megállás előtti, 45 s időtartamú kifuttatás

Távolság km	Szolgálati hely	Menetidő perc	Távolság km	Szolgálati hely	Menetidő perc
0.0	Budapest_Déli_pu.	-	2.4	Kápolnasnyék	2.4
4.2	Budapest-Kelenföld	3.9	3.0	Velence_mh.	2.8
3.1	Budafok-Albertfalva	2.7	1.5	Velencefürdő_mh.	1.8
1.8	Budafok-Belváros_mh.	2.1	2.3	Gárdony	2.4
6.9	Nagytétény	4.8	1.8	Agárd_mh.	2.1
1.5	Nagytétény-Érdl._mh.	2.0	5.0	Dinnyés	3.8
2.4	Érd_alsó	2.6	10.0	Székesfehérvár	6.6
4.1	Tárnok	3.2	67.1 km		55.8 perc
8.7	Martonvásár	5.9	Vontatási-energia fogyasztás: 589. kWh		
3.2	Baracska_mh.	2.8	Visszatáplálható energia: 102. kWh		
5.2	Pettend_mh.	3.9			

MÁV-ADATOK:

FLIRT KONTRAV43 INGA VONAT				
ÉV	2012.	FVS stat.*	átszámítás átlagos vonatterheléssel	
V43 INGA ÁTLAGOS VONATTERHELÉSEL	5,4	kWh/100etkm	11,88	kWh/vkm
FLIRT	3,7	kWh/100etkm	4,44	kWh/vkm
KÜLÖNBSÉGE, A MEGTAKARÍTÁS	kerekítve		7	kWh/km
FLIRT ENERGIAKÖLTSÉG MEGTAKARÍTÁS	villamos energia e.ár.*		25	Ft/kWh MÁV adat
	a FLIRT előnye		175	Ft/km
*MEGJEGYZÉS, ÉVENTE VÁLTOZÓ ÉRTÉKEK				
ÖSSZESÍTÉS				
A TELJES FLOTTA FUTÁSKM	40	millió km		
REALIZÁLT ENERGIAKÖLTSÉG MEGTAKARÍTÁS	7000	millió Ft	30...60 db növekvő flotta produkciója	
1 FLIRT VONATKM	175	Ft/km		
NAPONTA 530KM/FLIRT	92 750	Ft/nap		
ÉVENTE 341 ÜZEMNAP/FLIRT	31 627 750	Ft/év		
1 DOLGOZÓ FLIRT EGY ÉV ALATT	33 853 750	Ft/év	energia költségmegtakarítást ért el	
56 DOLGOZÓ JÁRMŰ/ÉV			1 895 810 000	Ft/flotta
2007-2012 (5 ÉV), 56 DOLGOZÓ JÁRMŰVEL			9 479 050 000	**2012. évi energia árszinten
MEGTAKARÍTÁS ENERGIÁBAN				
56 DOLGOZÓ FLIRT 40 MILLÓ KM TELJ.	5 152 000	Ft/nap	a dolgozó flottára	
ÖT ÉV ALATT ELÉRT VILLAMOS ENERGIA MEGTAK.	715 400	kWh		
A MEGTAKARÍTOTT VILLAMOS ENERGIA ÉRTÉKE	17 885 000	Ft		
A 60-AS FLOTTA	szerződésben vállalathoz közeli igénybevétellel 570km/nap, jármű			
NAPI FLIRT FUTÁS	570	km/jármű		
56 DOLGOZÓ FLIRT/NAP	31 920	km/nap		
ÉVENTE	11 650 800	km/év		
ENERGIAKÖLTSÉG MEGTAKARÍTÁS:	2 038 890 000	Ft/év		
2007 -2015 ÖSSZESÍTÉS	25	Ft/kWh	Nem nőtt a villamos energia ára	
VONTATÁSI ENERGIA MEGTAKARÍTÁS	7	kWh/km		
ENERGIAFOGYASZTÁS FLIRT ELŐNY	175	Ft/km		
FLOTTA FUTÁSA 2015 NYARÁIG ELÉRI				
HASZNOS JÁRMŰ KM-T	80	millió km		
ÖSSZESÍTETT ENERGIAKÖLTSÉG MEGTAKARÍTÁS	14 000	millió Ft		
2016. ÉVBEN TELJESÜLHET				
FUTÁSKM	100	millió km		
ÖSSZESÍTETT ENERGIAKÖLTSÉG MEGTAKARÍTÁS	17 500	millió Ft		