

FUTÁSI ELLENÁLLÁSOK CSÖKKENTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

Novák Nándor

TARTALOMJEGYZÉK

1. SHELL ECO-MARATHON CÉLJA, TÖRTÉNETE	3
2. FUTÁSI ELLENÁLLÁSOK	3
2.1 Gördülési ellenállás	4
2.2 Légellenállás.....	7
2.3 Emelkedési ellenállás	9
2.4 Gyorsítási ellenállás	10
2.5 Vonóerő (Futási ellenállás)	11
3. ELLENÁLLÁSOK CSÖKKENTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI.....	15
3.1 Gördülési ellenállás-tényező (f_R) csökkentése.....	15
3.2 Kerékcsapágyazás	23
3.3 Légellenállás-tényező (c_w) és homlokfelület (A) csökkentése	25
3.4 A tömeg csökkentési lehetőségei	30
3.5 Vezetési stratégia.....	32
3.6 Hatásfok növelése	33
4. A PARAMÉTEREK BEFOLYÁSA TELJESÍTMÉNYIGÉNYRE	33
5. CSÖKKENTÉSI LEHETŐSÉGEK A MAI UTCAI GÉPJÁRMŰVEK TERÜLETÉN	34
FELHASZNÁLT IRODALOM	36

FUTÁSI ELLENÁLLÁSOK CSÖKKENTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

A Pécsi Tudományegyetem Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Karának Team Orca csapata elindult a 2011-es Shell Eco-Marathon nevű versenyen. A csapat tagjaként lehetőségem nyílt nekem is részt venni ezen a rendezvényen. A 2012-es rotterdami megmérettetésre a csapat teljesen új, hidrogén üzemanyagcellás járművel készül. A TDK dolgozat témája a 2012-es versenyautó tervezéséhez szorosan kapcsolódik, mivel a fogyasztáscsökkentés lehetőségeihez lényegesen hozzájárul a futási ellenállások csökkentése is.

1. SHELL ECO-MARATHON CÉLJA, TÖRTÉNETE

A Shell Eco-Marathon verseny célja egy extrém alacsony fogyasztású versenyautó építése. 1939-ben rendezték meg először az Egyesült Államokban, 1985-től a verseny Európába költözött, ahol 20 európai országból érkezett több ezer főiskolai és egyetemi hallgató mérte össze tudását. Ma a verseny nemzetközivé bővült, Európán kívül Amerikában, és Ázsiában is megrendezik minden évben egyszer.

A résztvevők a prototípus ill. a városi kategória közül választhatnak, a meghajtáshoz szükséges energiaforrások szerint alkalmazhatnak 95-ös oktánszámú benzint, gázolajat, LPG gázt, metil-észtert és etanolt, elektromos hajtások esetében hidrogént, napenergiát és akkumulátorokból nyert elektromos áramot.

A versenyzőknek nem hivatalosan az is célja, hogy minden évben felülmúlják az előző évi 1 liter üzemanyaggal megtett kilométer rekordot, beírva magukat a Shell Eco-Marathon történelmébe. Ma az üzemanyagcellával futott európai rekordot a francia Polyjoule csapat tartja 4896,1 km/l-es eredménnyel [1].

2. FUTÁSI ELLENÁLLÁSOK

Általánosságban igaz, hogy a gépjárműveknek – legyenek akár teher- vagy személygépjárművek – megfelelő működésükhöz minden esetben valamilyen mértékű ellenállást kell legyőzniük. Ezeket az ellenállásokat nevezzük futási ellenállásnak. Forrásait tekintve ezek:

- Gördülési ellenállás (F_G)
- Légellenállás (F_L)
- Emelkedési ellenállás (F_E)
- Gyorsítási ellenállás (F_{Gy})

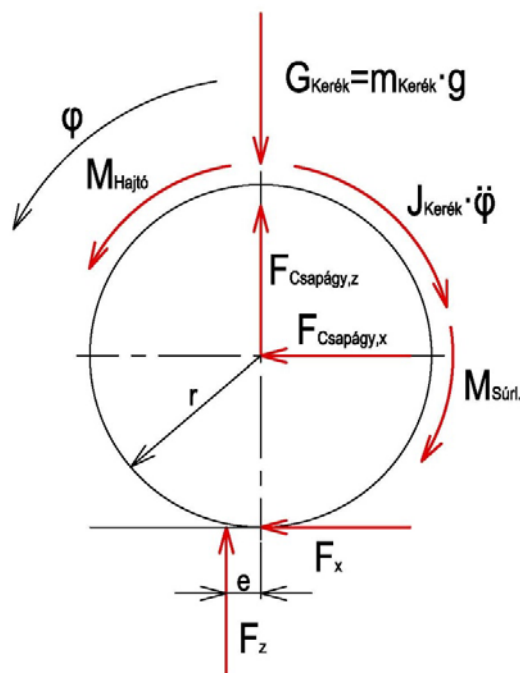
Ez fejezet az ellenállásokat részletesen tárgyalja, mivel ismeretük elengedhetetlen ahhoz, hogy a csökkentési lehetőségeket megfelelően kiválaszthassuk.

2.1 Gördülési ellenállás

A gépjárművek kerekei a megfelelő tapadás biztosítása végett olyan anyagból készülnek, amelyek rugalmassága olyan mértékű, hogy terhelőerő (pl. a gépjármű súlya) hatására alakjuk megváltozik. A gördülési ellenállás tulajdonképpen hét mechanizmus eredményeként fogható fel [2].

- Energiaveszteség az abroncs oldalfalának útfelülethez közeli részének alakváltozásából.
- Energiaveszteség a futófelület deformációjából.
- Súrlódás az érintkező felületek között.
- A kerék megcsúszása haladási- és keresztirányban.
- Az útfelület deformációja.
- Légellenállás az abroncsokon kívül és belül.
- Energiaveszteség az egyenetlen útfelület miatt - felületi érdességből -.

Számításához szükséges a kerékre ható erők és nyomatékok ismerete. A 2.1.1 ábrán egy hajtott kerékre ható erők és nyomatékok láthatóak [3].

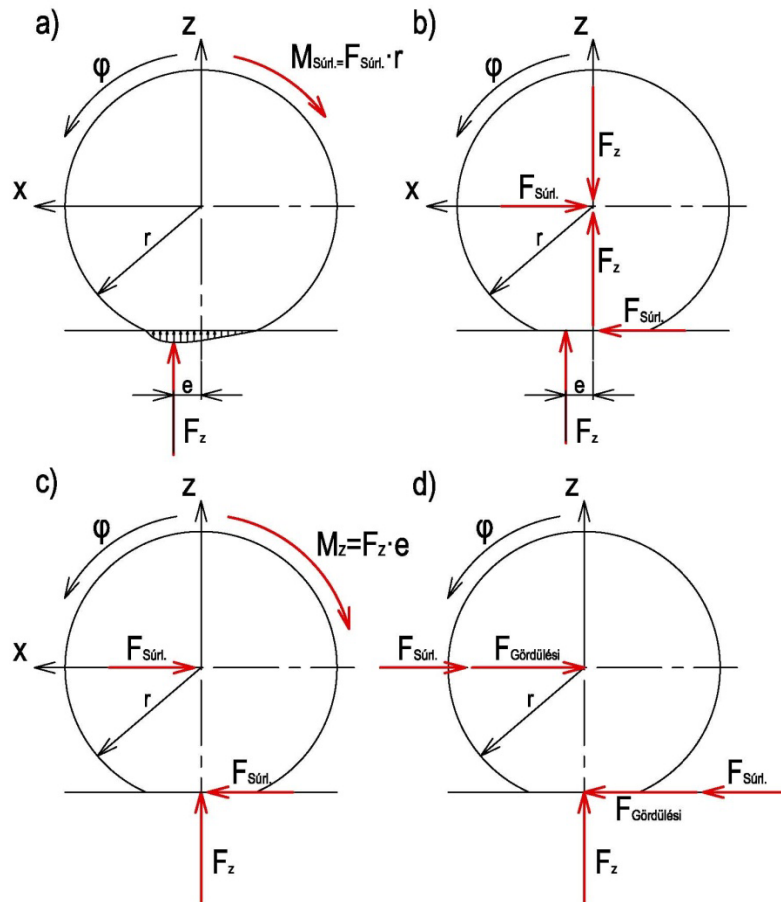


2.1.1 ábra. Hajtott kerékre ható erők és nyomatékok [3].

Az ábrán φ mutatja a kerék forgásának irányát, $M_{Hajtó}$ nyomaték a motor által egy kerékre jutó nyomaték, $G_{Kerék}$ az egy kerékre jutó nehézségi erő (gépjármű tömegéből számolva), $J_{Kerék} \cdot \ddot{\varphi}$ a d’Alambert- féle tehetetlenségi nyomaték, $M_{Súrl.}$ a csapágy súrlódásból ill. a féksúrlódásból származó, a futást hátráltató nyomaték, $F_{Csapágy,x}$ és $F_{Csapágy,z}$ erők a kerék csapágyazásában keletkező erők, F_X a kerületi erő, míg F_Z erő a kerékterhelés.

A gördülési ellenállás szempontjából F_Z erő ill. $M_{Súrl.}$ nyomaték a legfontosabb. Ezek meghatározásához szükség van egy egyszerűsített, a valóságot jobban közelítő modellre. Ezt a modellt a 2.1.2 ábra mutatja [3]. Az ábra a) részén látható, hogy a kerék anyagától - annak rugalmasságától - függően a kör kerület megváltozik, kismértékben deformálódik, így a kerékterhelés megoszló terhelésként hat, melynek eredő ereje F_Z a kör függőleges szimmetriatengelyétől e távolságra helyezkedik el.

Mivel $M_{Súrl.}$ nyomaték a kerék tengelye körül forgat, helyettesíthető egy erőpárral is, ebben az esetben legyen $F_{Súrl.}$ súrlódási erőpár. Egy egyszerű kiegészítést is tehetünk a kerék szimmetriatengelyében ható, egymással ellentétes irányú, tulajdonképpen egymást kioltó erők felvételével. Ez látható az ábra b) részén.



2.1.2 ábra. A gördülési- és súrlódási erők származtatása [3].

A kiegészítés révén F_Z erőpár szintén egy, a kerék tengelye körül forgató nyomatékot eredményez, nevezzük M_Z nyomatéknak (ábrán c) rész), amely felírható az útfelülettel párhuzamos erőpárral is ($F_{\text{Gördülési}}$ gördülési erőpár), ahogy a d) részen látható.

$$M_Z = F_Z \cdot e = F_{\text{Gördülési}} \cdot r$$

Ebből az egyenletből meghatározható a gördülési erő értéke a következő módon:

$$F_{\text{Gördülési}} = \frac{e}{r} \cdot F_Z = f_R \cdot F_Z = f_R \cdot m \cdot g$$

Az egyenletben megfigyelhető az e/r hányadossal meghatározott mértékegység nélküli ún. gördülési ellenállás-tényező (f_R). Ezzel könnyen összehasonlíthatóvá válik két jármű gördülési ellenállása. f_R több a kereket ill. az útfelületet jellemző tényezőtől függ, amelyeket a 3. fejezet részletesen tárgyal. Összehasonlításhoz tehát rögzíteni kell egy paraméter kivételével valamennyit, hogy valós eredményt kaphassunk. Néhány példa a 2.1.1 táblázatban látható.

Abroncs típusa	f_R [-]
Személygépjármű abroncs aszfalt vagy beton útfelületen	0,013
Kerékpár abroncs	0,006
Michelin 44-406 abroncs	0,0024
Michelin 45-75R16 abroncs	0,00081

2.1.1 táblázat. f_R tényező értéke különböző abroncs típusokra [4].

(Michelin 44-406 és 45-75R16 abroncs a Shell Eco-Marathon részére lett kifejlesztve)

A kanyarodáskor nagyszögben elforduló abroncs felülete erőteljes torzulást szenved. Ez a deformáció többszörösére növeli a gördülési ellenállás értékét az egyenes útfelületen mérthez képest. A növekedés mértékét azonban jelentősen lecsökkenteni nem lehet. A felhasznált források a következő megállapításokra jutottak [4].

- A tengelytávnak egyáltalán nincs befolyása az ellenállásra, szabadon megválasztható.
- A nyomtáv enyhén befolyásolja F_G értékét. A versenyszabályzatban [5] a nyomtáv mérete bizonyos korlátok közé van szorítva. Ezekben belül csekély hatása sem érvényesülhet.
- A talaj és a jármű súlypontja közti függőleges távolságnak van a legnagyobb befolyása, számítások alapján ez is mindössze 2,5%-kal csökkentheti az ellenállás változását.

Megállapítható, hogy a kanyarodáskor fellépő gördülési ellenállás a jármű paramétereitől csekély mértékben függ, a kanyarok számától, sugarától és hosszától azonban jelentősen. A pálya előzetes ismerete szükséges a megfelelő teljesítményű hajtás kiválasztásához.

A súrlódási erő értékét megközelítőleg a következő összefüggéssel határozhatjuk meg, ha eltekintünk a féksúrlódástól, tehát csak a csapágsúrlódást vesszük figyelembe.

$$F_{súrl.} = \mu \cdot m \cdot g \cdot \frac{d}{D}$$

Az egyenletben μ a súrlódástényező, m a gépjármű tömege, g a nehézségi gyorsulás, d a csapágyszármag, míg D a kerék külső átmérője.

A mai csapágygyártók a mérnököknek igen sok segítséget nyújtanak a megfelelő termék kiválasztásához. Többek között az ún. súrlódási nyomaték kalkulátorokkal is. A fenti képlet egyszerűsített alakja csupán a valóságos esetnek, így célszerű a gyártók által nyújtott segítséget felhasználni.

A tényleges gördülési ellenállás (F_G) természetesen $F_{Súrl.}$ súrlódási erő értékével növelt, bár ennek mértéke tapasztalatok szerint az összes ellenállás kb. 1%-a, így normál körülmények között a hétköznapi gépjárműveknél elhanyagolható. A verseny célja azonban a minél kisebb fogyasztás elérése, így a későbbiekben még szó esik a csapágyszármagban keletkező súrlódási erő csökkentésének lehetőségeiről is.

$$F_G = F_{Gördülési} + F_{súrl.}$$

2.2 Légellenállás

A Shell Eco-Marathon versenyről készült bármely fénykép vagy videó csakis olyan járműveket mutat, amelyek a hétköznapi gépjárművekhez egyáltalán nem vagy csak nagyon kis mértékben hasonlítanak. Alakjuk leginkább a tökéletes cseppformát próbálja követni, mivel ez a természetben kialakult, áramlástani szempontból legideálisabb forma.

A légellenállás tulajdonképpen a levegő által a gépjárművek felületére kifejtett erőkből származtatható. Ezek az erők két nagy csoportra bonthatók [16]:

- Levegősúrlódásból származó erőkre és
- Nyomáskülönbségből származó erőkre.

A levegőáram a jármű felületén lelassul, ami nyíró feszültség kialakulásához vezet. Az ebből eredő erőket nevezzük levegősúrlódásból származó erőknek [6]. Az áramlási sebesség csökkenése a felülettől mért bizonyos távolságon belül következik csak be. Azon kívül megmarad eredeti értékén ($0,99 \cdot v_{áramlási}$), az áramlás zavartalan lesz. Ezt a távolságot határ-

rétegnek nevezzük. A réteg nagysága az áramlás fajtájától függ. Lamináris az áramlás, ha a részecskék rendezetten, egymással nem keveredve áramlanak, turbulens ha örvények és keveredés és megfigyelhető. A lamináris minden esetben kedvezőbb. Egy áramlást az ún. Reynolds-számmal jellemezhetünk.

A nyomásváltozásból származó erők kialakulása több okra vezethető vissza [4].

- Rétegleválás,
- Indukált ellenállás,
- Interferenciából származó ellenállás,
- Nyomáscsökkenésből származó ellenállás.

A legjellemzőbb ok a rétegleválás. Ha az áramlás beesési szöge túl nagyra válik, az nem tudja követni a felületet és az áramlás leválik a jármű felületéről, iránya esetlegesen megfordul, ezzel a jármű felületén túlnyomást is okozva. A járművek előtt keletkező túlnyomás növeli legnagyobb mértékben a légellenállást.

Indukált ellenállásról olyan esetekben beszélhetünk, amikor az áramlást a járműre kifejtendő fel- ill. leszorító erők létrehozására használják.

Az interferenciából származó ellenállással akkor kell számolni, ha az áramlást nem csupán egy tényező (jelen esetben jármű) zavarja meg, hanem azon kívül egy másik is. A szuperpozíció elvének alkalmazása szerint a zavaró tényezők összeadódnak.

A felületen kialakuló határréteg miatt nyomáscsökkenés lép fel, így a jármű első részénél a nyomás nagyobb lesz, mint a hátsó részeken, ami szintén növeli a légellenállást. Ez a nyomáscsökkenés a levegősúrlódásból kialakult ellenállás következményeként értelmezhető.

A légellenállást döntően a különböző leválásokból származó erők és a felületen kialakuló súrlódási erők okozzák.

$$F_L = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

Az egyenletben c_w légellenállás-tényező, A a jármű áramlás irányára merőleges vetülete, ρ a levegő sűrűsége, v pedig a jármű és a levegő egymáshoz viszonyított sebessége (a jármű haladási irányában) [3].

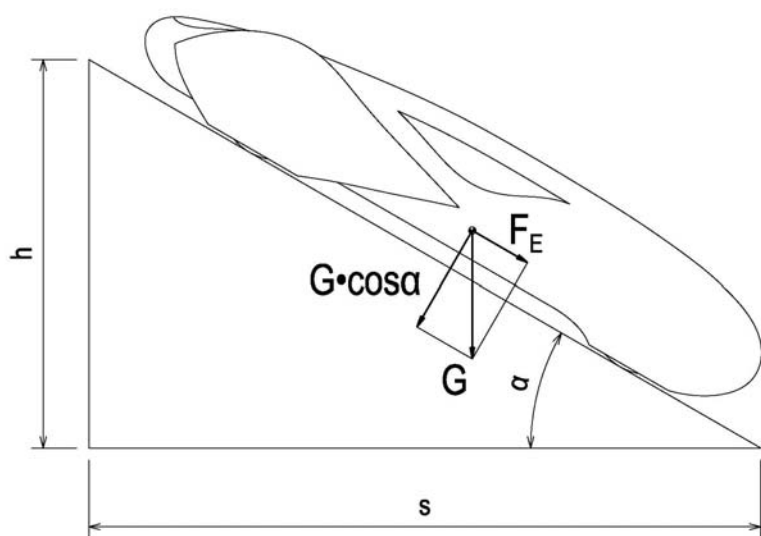
A 2.2.1 táblázatban néhány gyakori c_w érték és A homlokfelület látható.

Jármű	c_w [-]	A [m ²]
Átlagos személygépjármű	0,28...0,33	1,87±0,13
Forma-1 versenyautó	0,90...0,92	1,0...1,3
Áramlástanilag optimális jármű	0,15	0,29...0,3
Team Orca 2011-es járműve	0,0930	0,35

2.2.1 táblázat. c_w légellenállás-tényező és A felület néhány értéke.

2.3 Emelkedési ellenállás

Az emelkedési ellenállás (F_E) az az erő, amelyet a gépjárműveknek p emelkedésű útfelületen le kell győzniük úgy, hogy sebességük és gyorsulásuk állandó marad. Származtatása a 2.3.1 ábrán látható.



2.3.1 ábra. Az emelkedési ellenállás származtatása [7].

Az emelkedés értéke p , számítása a következőképpen történik.

$$p = \tan \alpha = \frac{h}{s}$$

Kis α szögek esetén igaz, hogy $\sin \alpha \approx \tan \alpha$. Az ellenállás értékét így hétköznapi járművek esetén a következő képlettel határozzák meg.

$$F_E = p \cdot m \cdot g$$

Mivel azonban a Shell Eco-Marathonra tervezett járműveknél igen fontos szerepe van az ellenállások mértékének, célszerű a számításoknál ezt az apró hibát is kiküszöbölni. Ez megtehető α szög pontos meghatározásával, majd egyenletbe helyettesítésével.

$$F_E = \sin(\arctan \alpha) \cdot m \cdot g$$

Ahol α az útfelület emelkedési szöge, m a jármű tömege, g pedig a nehézségi gyorsulás.

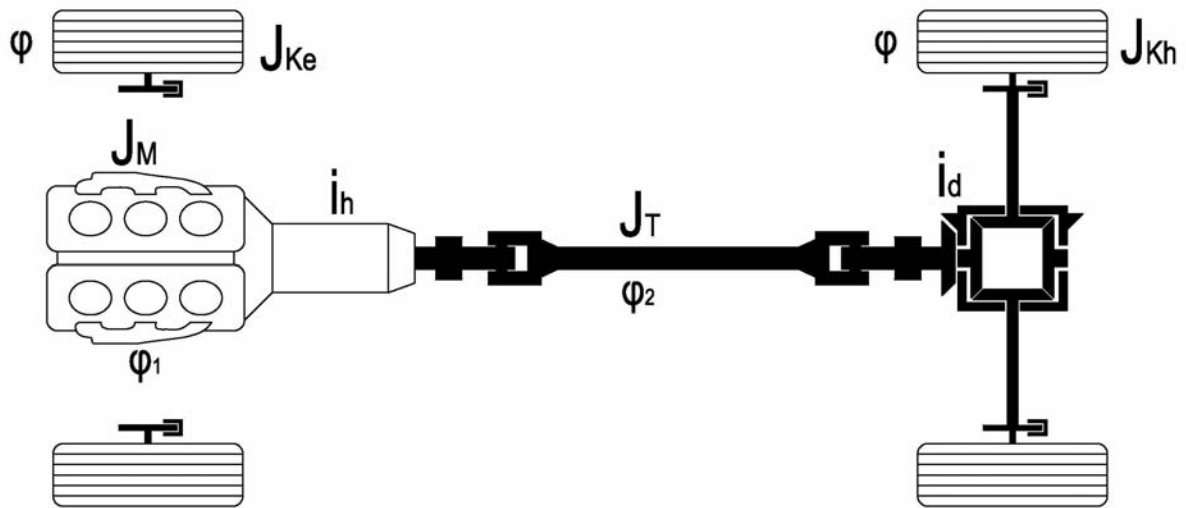
2.4 Gyorsítási ellenállás

A gyorsítási ellenállás az az erő, amelyet a gépjárműveknek le kell győzniük, hogy sebességüket megnöveljék, történjék az állandó vagy változó gyorsulással. Az ellenállás megnevezésében a „gyorsítás” szó szerepel, azonban az erő fennáll a sebesség csökkentésekor is. Ilyenkor azonban nem hátráltatja a gépjármű mozgását, hanem segíti azt, számolásnál negatív előjelet kap.

Számítása a következőképpen történik.

$$F_B = (m + m_r) \cdot a = m \cdot \left(1 + \frac{m_r}{m}\right) \cdot a = m \cdot \lambda \cdot a = \lambda \cdot G \cdot \frac{a}{g}$$

A képletben λ a mértékegység nélküli forgótömeg-tényező, mely a $\lambda = (1 + m_r/m)$ képlettel határozható meg. m_r az ún. redukált tömeg, amely a motor, a hajtáslánc ill. a futómű gyorsuló részeinek tehetetlenségét veszi figyelembe. Egy hétköznapi személygépjármű esetében fellépő tehetetlenségi nyomatékok és szögelfordulások láthatóak a 2.4.1 ábrán.



2.4.1 ábra. Hétköznapi személygépjárművekben fellépő tehetetlenségi nyomatékok és szögelfordulások [3].

Az ábrán J_M a motor, J_{Ke} az első-, J_{Kh} a hátsó kerék (féltengelyekkel, féktárcsákkal együtt), J_T pedig a kardántengely tehetetlenségi nyomatéka, i_h a sebességváltóban, i_d pedig a differenciálműben megvalósított áttétel. A hajtásláncra felírható mozgási energia az alábbi [3].

$$E_{Kin} = \frac{1}{2} \cdot [J_M \cdot \dot{\varphi}_1^2 + J_T \cdot \dot{\varphi}_2^2 + (J_{Ke} + J_{Kh}) \cdot \dot{\varphi}^2]$$

Mivel $\dot{\varphi}_1 = i_h \cdot i_d \cdot \dot{\varphi}$ és $\dot{\varphi}_2 = i_d \cdot \dot{\varphi}$, az egyenlet felírható a következő módon.

$$E_{Kin} = \frac{1}{2} \cdot [J_M \cdot (i_h \cdot i_d)^2 + J_T \cdot i_d^2 + J_K] \cdot \dot{\varphi}^2 = \frac{1}{2} \cdot J_r \cdot \dot{\varphi}^2$$

Az egyenletben J_r az útfelületre redukált nyomaték, amelyből számítható a redukált tömeg.

$$m_r = \frac{J_r}{r^2}$$

Ha visszahelyettesítünk a mozgási energia egyenletébe ellenőrizhető az eljárás.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot J_r \cdot \dot{\varphi}^2 = \frac{1}{2} \cdot (m_r \cdot r^2) \cdot \left(\frac{v^2}{r^2} \right) = \frac{1}{2} \cdot m_r \cdot v^2$$

Egy alacsonyfogyasztású, a versenyre tervezett járműnél persze nincsen se differenciálmű, sem pedig kardántengely, így a redukált tehetetlenségi nyomaték összetétele lényegesen megváltozik. A sebességváltó áttételeként a motor és a kerék közé beépített hajtás áttételét kell figyelembe venni.

$$J_r = J_M \cdot i_h + (J_{Ke} + J_{Kh})$$

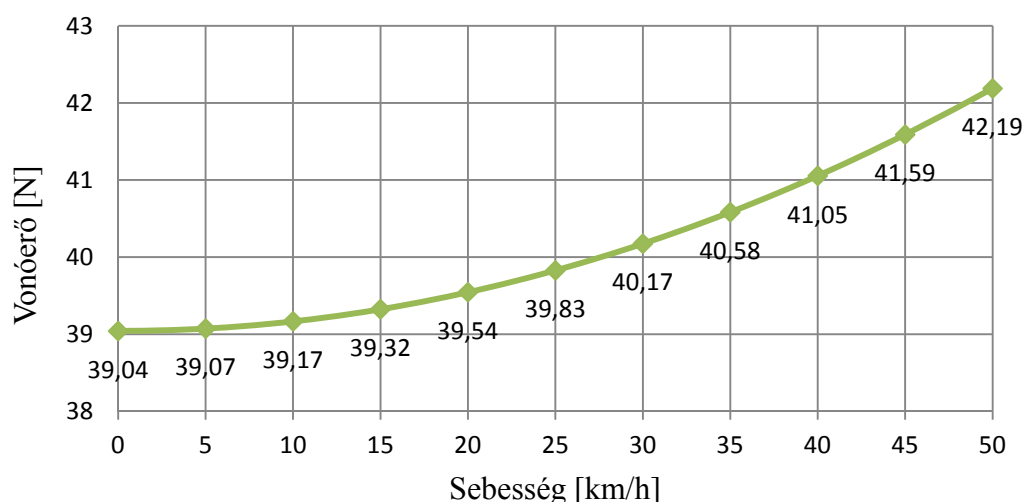
Természetesen m_r redukált tömeg számítása nem változik.

2.5 Vonóerő (Futási ellenállás)

A mozgásnak eleget téve a járműnek az útfelületre minimálisan az ellenállások összegével megegyező mértékű vonóerőt kell kifejtenie.

$$F_{Vono} = F_G + F_L + F_E + F_{Gy}$$

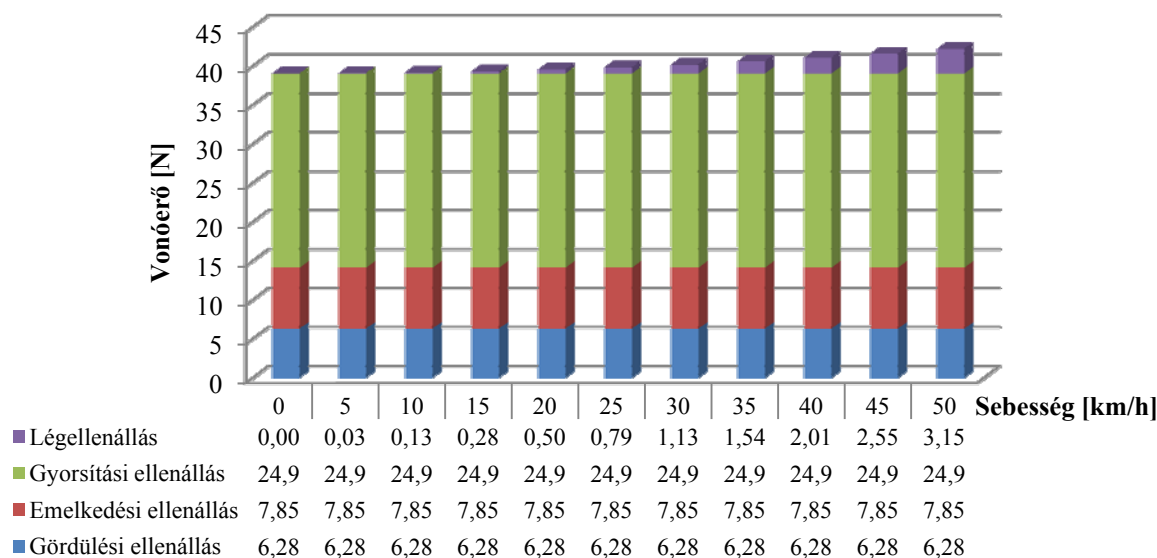
A erőszükséglet ábrázolható a sebesség függvényében, a kialakuló görbét vonóerő-görbének nevezzük. A 2.5.1 ábrán látható.



2.5.1 ábra. Vonóerő-görbe.

Összetevőit tekintve a vonóerőt állandó tömeg, állandó útemelkedés és konstans gyorsulás mellett csupán a sebesség befolyásolja. Ez mindössze a légellenállásnál játszik szerepet, tehát az előbb ismertetett feltételtelek mellett a gördülési-, az emelkedési- és a gyorsítási ellenállás

értéke szintén állandó. A sebesség növekedésével csak az összes ellenállás (vonóerő) alkotóinak aránya változik meg. A 2.5.2 ábrán található diagram mutatja meg a vonóerő összetevőit a sebesség függvényében. Az adatok egy Shell Eco-Marathonra épített jármű ellenállás értékeit mutatják, csökkentett gördülési ellenállás-tényezővel, minimális útemelkedéssel, és konstans gyorsulással.



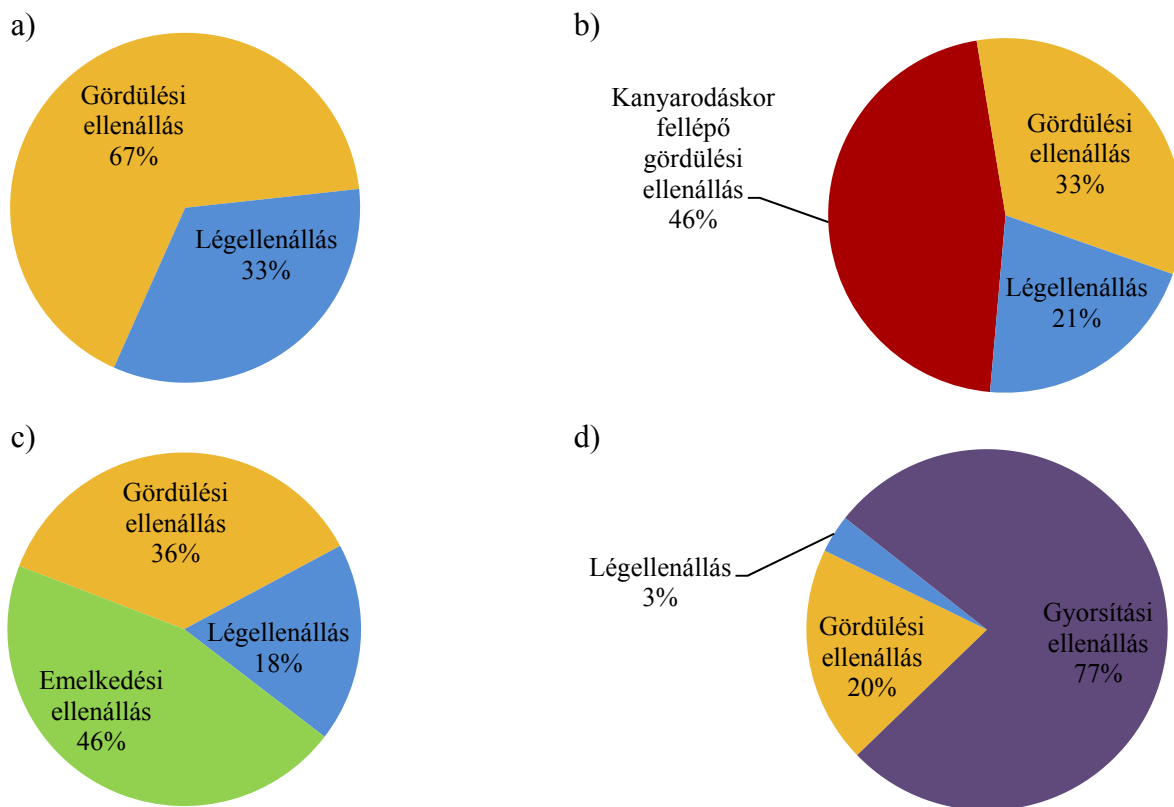
2.5.2 ábra. A vonóerőt alkotó összetevők a sebesség függvényében.

A diagramból jól látszik, hogy rögzített feltételek mellett a gyorsítási ellenállás teszi ki a legnagyobb hányadot az ellenállások közül. Minimális útemelkedés mellett is jelentős mértékű az emelkedési ellenállás. A 2.5.1 táblázat mutatja a számításokhoz használt értékeket.

Paraméter	Érték	Paraméter	Érték
f_R [N/N]	0,008	v [m/s]	6,94 m/s
m [kg]	80 kg	ρ [kg/m ³]	1,25 kg/m ³
g [m/s ²]	9,81 m/s ²	p [-]	0,01
c_w [-]	0,09	a [m/s ²]	0,3 m/s ²
A [m ²]	0,29 m ²	r [m]	0,238 m

2.5.1 táblázat. A számításokhoz használt értékek.

Mivel a legtöbb esetben a jármű mind gyorsulás, mind pedig emelkedés nélkül halad, kijelenthető, hogy a legdominánsabb, fogyasztáscsökkentés céljából legfontosabb ellenállás a gördülési ellenállás. Mivel egy ilyen típusú versenyjármű 45km/h-nál kisebb sebességgel közlekedik a légellenállás kisebb szerepet játszik. A 2.5.3 ábra diagramjai mutatják meg a különböző feltételek mellett teljesülő összetételt.



2.5.3 ábra. Különböző feltételek mellett teljesülő ellenállás összetétel.

a – emelkedés nélküli egyenes úton állandó sebességgel, **b** – emelkedés nélküli úton kanyarodáskor állandó sebességgel [4], **c** – útemelkedéssel állandó sebességgel, **d** – emelkedés nélküli úton állandó gyorsítással

A legyőzendő ellenállások pontos ismerete után kiválaszthatjuk a megfelelő meghajtómotort. A vonóerőt a kerék sugarával szorozva megkapjuk azt a forgatónyomatékot, amelyet a hajtott keréken a motornak minimálisan biztosítania kell az ellenállások legyőzéséhez.

$$M_K = F_{\text{vonó}} \cdot r$$

A sebességből számítható a kerék szögsebessége, amellyel M_K értékét beszorozva a kerékteljesítményt kapjuk.

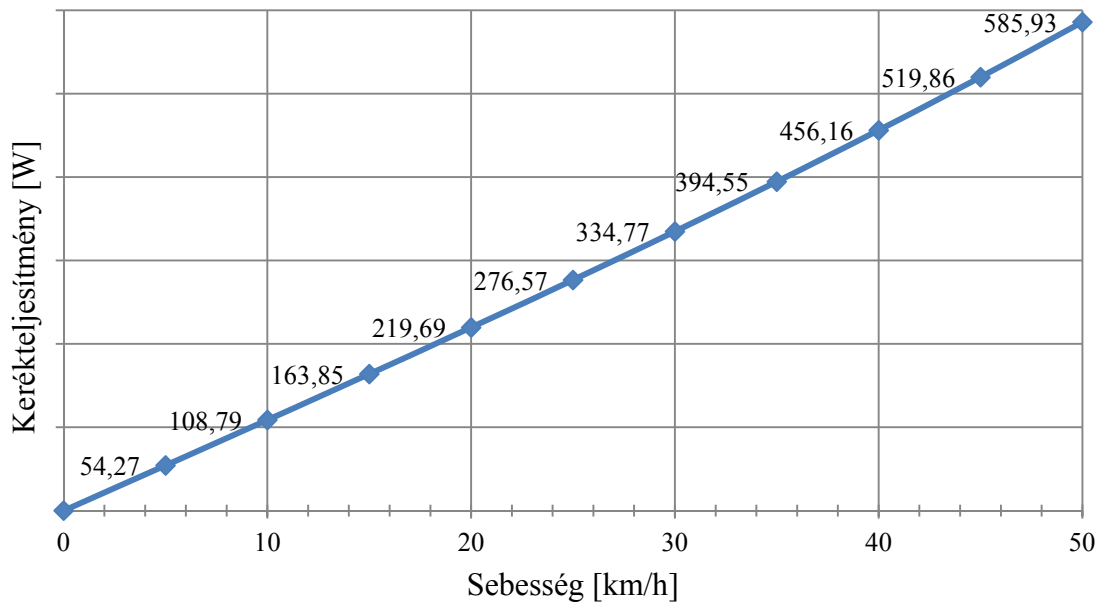
$$P_K = M_K \cdot \omega$$

A kerékteljesítmény szintén ábrázolható a sebesség függvényében ($P_K = f(v^3)$), ahogy ezt a 2.5.4 ábra is mutatja. Ezen kívül ábrázolható a 2.5.3 ábrán jelölt feltételek megvalósulása mellett, ez a 2.5.5 ábrán látható.

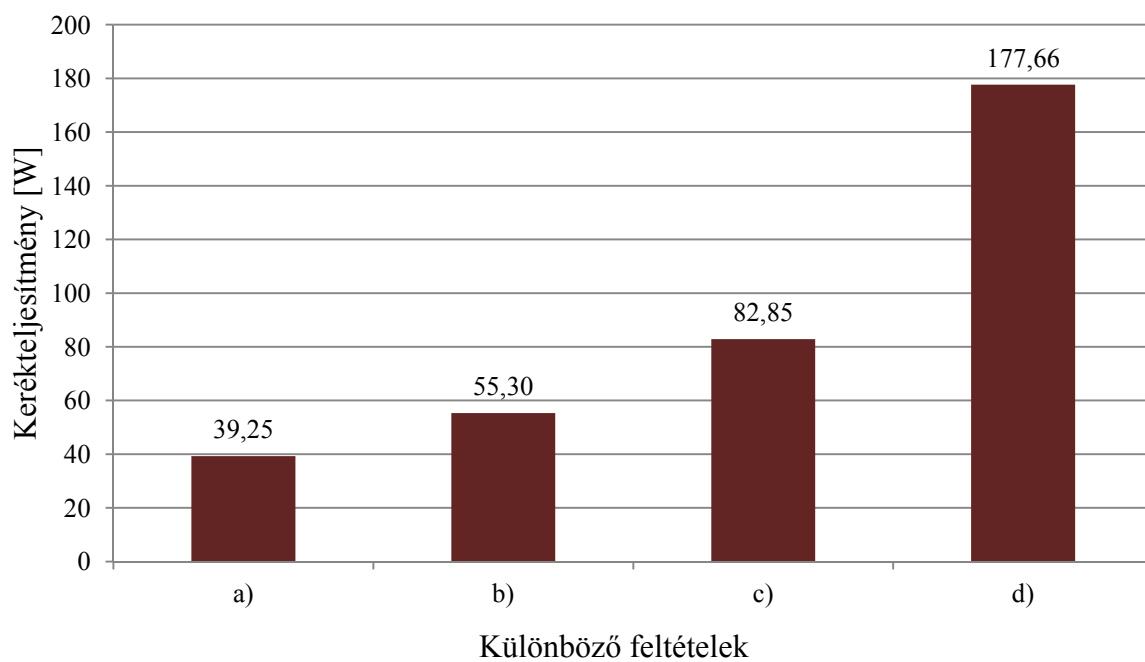
A hajtáslánc hatásfokát is számításba véve meghatározható a meghajtómotor teljesítménye is.

$$P_M = \frac{P_K}{\eta_{\text{hajtáslánc}}}$$

A motor helyes megválasztása kezdő lépés a fogyasztás minimalizálásához.



2.5.4 ábra. A kerékteljesítmény változása a sebesség függvényében.



2.5.5 ábra. Adott feltételek mellett megvalósuló kerékteljesítmény értékei Wattban
a – emelkedés nélküli egyenes úton állandó sebességgel, **b** – emelkedés nélküli úton kanyarodáskor állandó sebességgel, **c** – útemelkedéssel állandó sebességgel, **d** – emelkedés nélküli úton állandó gyorsítással

3. ELLENÁLLÁSOK CSÖKKENTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

A 3. fejezet tárgyalja a futási ellenállások különböző fajtáinak csökkentési lehetőségeit a következő paraméterek révén.

- a gördülési ellenállás-tényező,
- a csapágyazás,
- a légellenállás-tényező és a homlokfelület,
- a tömeg,
- a vezetési stratégia ill.
- a hatások.

3.1 Gördülési ellenállás-tényező (f_R) csökkentése

A gördülési ellenállás-tényezőről elmondható, hogy az alábbi paraméterektől függ, ezeket kell figyelembe venni, ha csökkenteni szeretnénk az ellenállást.

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| • A kerék kialakítása, | • a hőmérséklet, |
| • anyaga, | • a kerékdőlés, |
| • átmérője, | • a kerékösszetartás, |
| • szélessége, | • a rezgések, |
| • profilja, | • az útfelület minősége, |
| • kopottsága, | • a haladási sebesség. |
| • nyomása, | |

A kerék kialakításánál fő szempont, hogy szükséges-e tömlő alkalmazása, vagy sem [4]. A lehető legkisebb gördülési ellenállás-tényezőt természetesen tömlő nélküli abroncsok használatával lehet elérni. Ez abból adódik, hogy a tömlővel szerelt kerekek esetében a tömlő is deformálódik, valamint az abroncs és a tömlő között kismértékű csúszás jön létre. Általánosságban azonban elmondható, hogy minél kevesebb anyagból épül fel az abroncs, annál kevesebb anyagmennyiség fog deformálódni, tehát annál kisebb lesz az ellenállás értéke [8].

Mivel az útfelület nem tökéletesen tiszta, bármikor fennáll egy defekt veszélye tömlő nélküli abroncsoknál. Lehetőség lenne ezeket a kerekeket nagyobb szilárdságúra méretezni, bár f_R tényező értéke megnövekedne. A fellépő energiaveszteség olyan kismértékű, hogy jelentős befolyása nincsen a gördülési ellenállásra, így a kockázatot mérlegelve célszerűbb

tömlővel ellátott abroncsot alkalmazni, még ha fennáll a tömlő szivárgásának valószínűsége is. A veszteség elhanyagolható egy defektből származó baleset által okozott sérülések és károk nagysága mellett.

A kerekek anyaga nagy befolyással bír a gördülési ellenállás értékére. Anyagukat tekintve az abroncsok erősített, vulkanizált elasztomerek, melyek az alábbi alapanyagokból állnak [9].

- Természetes vagy szintetikus kaucsuk.
- Töltőanyagok
- Merevítő anyagok
- Lágyító anyagok
- A vulkanizáláshoz szükséges vegyi anyagok
- Öregedést gátló és egyéb vegyi anyagok

A kaucsuk feladata a jármű és az útfelület közötti megfelelő kapcsolat biztosítása. A szakirodalom szerint a természetes gumi kedvezőbb gördülési ellenállás-tényezőt eredményez [4].

A töltőanyagok (pl. korom, szilika, szén, kréta stb.) feladata a kopásállóság növelése, az abroncs tömegének csökkentése, a gumi színezése. Szilika anyagokkal kisebb ellenállás érhető el [4].

A merevítő anyagok tulajdonképpen a teherviselő részek egy abroncsban. Acél-, rayon, nylon vagy poliészter szálakból épülnek fel.

A lágyító anyagok (olajok és gyanták) adják az abroncs rugalmasságát. A vulkanizáláshoz szükséges anyagok közé a kénen és a cink-oxidon kívül egyéb vegyi anyagokat is sorolhatunk. Feladatuk az anyagon belüli kohéziós kapcsolat erősítése.

Az öregedést gátló anyagok segítik elő, hogy a kerekek ellenálljanak a nagy hőingadozásnak és sokáig használhatóak maradjanak.

Elmondható, hogy minél rugalmasabb az anyag, annál kevesebb energia szükséges a deformációhoz, tehát annál kisebb lesz f_R tényező értéke [8].

A kerekek átmérője szintén befolyásolhatja a gördülési ellenállást. Megválasztása az útfelület minőségétől függ, kis átmérőjű abroncsot keményebb úton (pl. aszfalton vagy betonon) alkalmaznak, nagy átmérőjűt pedig lágy, könnyen deformálódó felületeken (pl. sáros földúton, homokban). Ellenállás szempontjából a nagyobb átmérőjű keréknek kedvezőbb hatása lenne, de a verseny rendszerint aszfalton zajlik le. Emiatt célszerű a kisebb átmérőt választani. Ezen kívül a nagyobb átmérője kerekekhez nagyobb méretű karosszériára lenne

szükség. Tehát a légellenállás is megnövekedni alkalmazásukkal. A kerék átmérője már a tervezési fázis elején igen fontos szerepet játszik, mivel ehhez igazítva történik a jármű kialakítása.

Az abroncs szélessége is befolyásolja f_R értékét [8]. Azonos nyomás alkalmazása mellett a keskeny kerék nagyobb mértékű deformációt szenved, minek következtében nő az ellenállás. Tehát az abroncsot az átmérőmérethez szabványban megengedett legszélesebb méretűre kell megválasztani.

A gumiabroncs profilja szintén befolyásolja az ellenállás nagyságát [8]. Nedves körülmények között a mély vízelvezető horonnyal ellátott abroncsok kedvezőek, a megfelelő tapadás és úttartás csak ilyen módon biztosítható. Gördülési ellenállás szempontjából azonban az anyagihiány miatt megnövekedett deformáció következtében lényegesen rosszabb a mély profil. Minél finomabbra választják meg a profilt, annál alacsonyabbra csökkenthető f_R értéke. A profil nélküli ún. „slick” gumi kizárólag száraz útfelület mellett alkalmazható, nedves körülmények között a jármű elveszti tapadását. A motor nem képes átadni az útfelületre a nyomatékot, nagy sebesség mellett nem biztosítható az úttartás, romlik a kanyarodási képesség.

Az abroncsok kopottságának, elhasználtságának is van némi befolyása az ellenállás nagyságára. Bár számítással nem igazolható, a szakirodalom szerint [4] a kopottabb kerekek kisebb ellenállást hoznak létre. Ennek magyarázata az, hogy az abroncs a guminyomásnak megfelelően kopik, ezáltal egyre jobban idomul az útfelülethez. Mivel megnő az érintkező felület nagysága, kisebb deformációt szenved, csökken az ellenállás-tényező.

Az abroncs nyomása talán a legmeghatározóbb befolyásoló tényező. Az magas nyomás kemény útfelületen kedvező, míg az alacsony puha, akár porózus úton [8]. A versenyen rendszerint aszfalton zajlik le, ezért a kitűzött cél az elérhető legnagyobb nyomás alkalmazása. A túl alacsony nyomás a vállakon fellépő, megnövekedett nyíró igénybevétel miatt korai kopást, elhasználódást, akár szakadást okozhat, ezen felül rendkívüli módon növeli f_R tényező értékét. A nyomás növelésével több probléma is felléphet.

- Túl nagy nyomás esetén elég egyetlen élesebb tárgy a pálya felületén ahhoz, hogy az abroncs kilyukadjon, majd lassan leeressen, ezzel jelentős mértékben rontva a kormányozhatóságot és növelve a gördülési ellenállást.
- Ezen kívül könnyen defektet okozhat, amely a pilóta egészségén kívül a teljes projektet veszélybe sodorhatja.
- A túl nagy nyomás eredménye az is, hogy az abroncsok rugalmassága lecsökken, az útfelülettel érintkező felületek mérete szintén, és a jármű irányíthatatlanná válik.

A nyomás megfelelő megválasztása az első ill. a hátsó kerekeken a kormányozhatóságot is befolyásolhatja.

A 2011-es versenyjármű hátsókerék kormányzású és hajtású is volt egyben, melynek következtében gyorsításkor a keréken fellépő nyomaték miatt romlott az irányíthatósága. A kerekekben lévő nyomás változtatásával ezt a problémát nem lehetett kiküszöbölni. 2012-ben így módosítottuk az eredeti terveket, és elsőkerék kormányzást terveztünk, a hátsó kerék-hajtás viszont megmaradt. Így hasonló probléma nem állhat fenn, a kormányozhatóság pedig könnyen szabályozható az első abroncsokban lévő nyomás változtatásával.

Az első kerekek nagyobb nyomása alulkormányozottságot idéz elő, kisebb nyomás esetében túlkormányozott lesz a jármű. A 2012-es rotterdami városi pályán az alulkormányozottság és a tapadásvesztésből származó menetstabilitás veszteség szintén végzetes lehet a projekt szempontjából.

A hátsó kerék nyomásával is szabályozható az út és kerék közötti kapcsolat. Nagy nyomás esetén előfordulhat, hogy a tapadás nem lesz megfelelő, a motor nem tudja átadni a kívánt nyomatékot. Ellenkező esetben, tehát túl alacsony nyomásnál viszont f_R tényező értéke olyannyira megnőhet, hogy a keréken szükséges teljesítmény meghaladja az elektromotor maximális teljesítményét, ezzel túlterhelve azt. A hatásfokának romlása nem csak rendkívül magas fogyasztást (áramfelvételt) okozhat, hanem a teljes berendezés tönkremenetelét is.

Három különböző hőmérsékletnek van befolyása az ellenállás nagyságára: az útfelület hőmérsékletének, a futófelület, a váll és az oldalfal belső hőmérsékletének valamint a tömlőben található levegő hőmérsékletének [4]. Befolyását két különböző okra vezethetjük vissza. Az egyik, hogy megváltoztatja a tömlőben a nyomást, aminek hatása az előzőekben már tárgyalásra került. A másik, hogy megváltoztatja az abroncs anyagának rugalmasságát. Hatását pozitívként és negatívként egyaránt értékelhetjük. A magasabb hőmérséklet a nyomást megnövelve csökkenti az ellenállást, viszont az abroncs anyaga kilágyulhat. Egy bizonyos határt túllépve a nyomásnövekedés túl nagy lesz, ami viszont már káros lehet.

Helyesen csak akkor járhatunk el, ha meghatározunk egy olyan optimális pontot, amelynél kisebb hőmérsékleten a tapadás nem megfelelő, ill. amelynél nagyobb hőmérsékleten az abroncs anyaga kilágyl, elveszti merevségét, ezáltal a gumi „kenődik” az útfelületen és növeli az ellenállást.

A gépjárművek területén sok esetben alkalmaznak az úttartás, menetstabilizálás és kormányozhatóság szempontjából kerékdőlést. Ez azt jelenti, hogy a kerék alsó vagy felső részét a karosszéria irányába moztatják. Ha a felső rész kerül közelebb a karosszériához negatív kerékdőlésről, ha az alsó, pozitív kerékdőlésről beszélhetünk. Gyakorlatban csak a negatív szöggel történő döntést alkalmazzák, mivel használata igen előnyös, nagyobb tapadást biztosít kanyarodáskor. Pozitív kerékdőlést csak ritka esetben állítanak be, ez az egyenes szakaszon való stabilitást javítja.

A kerékdőlésnek szintén van némi befolyása a gördülési ellenállás értékére. Egyenes haladáskor a pozitív kerékdőlés miatt az érintkezési felület mérete lecsökken. Így természetesen csökken az abroncs anyagának deformációja, ezzel az ellenállás-tényező is. Kanyarodáskor a negatív kerékdőlés miatt az abroncs könnyebben fel tudja venni az útfelület formáját, egyenetlenségeit, az amúgy is megnövelt alakváltozást csökkentve. Ilyen módon szintén csökken f_R tényező értéke. Mivel azonban a jármű futása közben a kerékdőlés állítása eddig nem megoldott, és kanyarokkal tarkított pályagörbét veszünk alapul, bármely beállítást is választjuk, növeljük az ellenállás értékét. A helytelenül beállított kerékdőlés nem kívánt melegedést, idő előtti kopást (profilváltozást) valamint az abroncs idő előtti tönkremenetelét okozhatja. A pálya részletes ismerete (kanyar-egyenes arány) esetén meghatározható a megfelelő kerékdőlés.

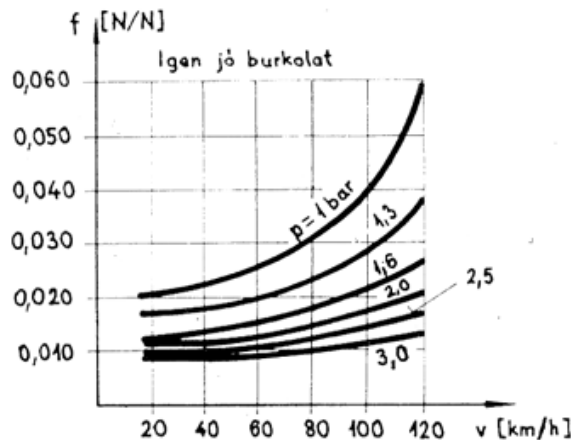
Futóművek beállításánál szintén gyakori a kerékösszetartás alkalmazása. Ez az egy tengelyen elhelyezkedő kerekek párhuzamosságának megszüntetése. Nagymértékben befolyásolja az autó menetstabilitását és viselkedését kanyarvételkor. Negatív szög esetén a kerekek összetartóak, pozitív esetén pedig széttartóak. A negatív kerékösszetartást általában az első tengelyen, pozitívot a hátsó tengelyen alkalmaznak. Az első kerekek negatív szöge értéke javítja a kanyarvételt, viszont rontja a stabilitást. Ezt küszöbölik ki a hátsó kerekeken beállított pozitív értékkel.

A túlságosan intenzív kerékösszetartás nagymértékben megnöveli nyírási igénybevételt. Az abroncsok nem a megfelelő helyen érintkeznek az útfelülettel, túlmelegedhetnek, változhat a profiljuk, nagyobb deformáció alakulhat ki, amely növeli az ellenállást.

Az abroncsban kialakuló rezgések kismértékben befolyásolhatják az anyag rugalmasságát, ezáltal növelve a deformációt és az ellenállás-tényezőt. Kialakulásuk elsősorban az útfelület egyenetlenségeiből származtatható, azonban a pontatlanul kerékkialakítás is forrásuk lehet. A rezgéshullámok összege olyan mértéket is meghaladhat, hogy egy pillanatra megszűnik a kerék-útfelület kapcsolat.

Az út felületi minősége is döntő lehet gördülési ellenállás szempontjából. Egyenletes, kemény felületen a gördülési ellenállás a kismértékű deformáció miatt kisebb lesz, mint lágy, durva felületen [10].

A gépjármű haladási sebességének befolyását f_R tényezőre különböző nyomásértékekre a 3.1.1 ábra mutatja [7].



3.1.1 ábra. f_R tényező változása sebesség függvényében [7].

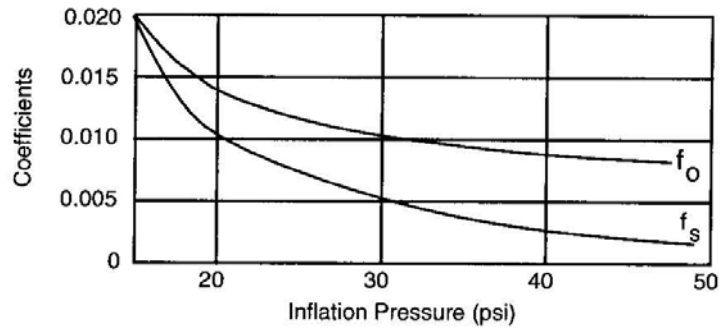
Az ábrán látható, hogy kizárólag nagy sebesség mellett lép fel növekedés változás az ellenállás-tényező értékében. Alacsony sebességnél lineáris a változás, a viszony az alábbi egyenlettel írható fel [2].

$$f_R = 0,01 \cdot \left(1 + \frac{v}{160,934} \right)$$

Nagyobb sebességeknél az ellenállás-tényező a következő függvény szerint változik [2].

$$f_R = f_0 + 3,24 \cdot f_s \left(\frac{v}{160,934} \right)^{2,5}$$

Az egyenletben f_0 az alap gördülési ellenállás-tényező, f_s a sebességgel arányos gördülési ellenállás-tényező. Értékük a 3.1.2 ábráról olvasható le [2].



3.1.2 ábra. f_o és f_s tényező változása a nyomás függvényében [2].

A versenyen elért sebességek viszonylag alacsonyak ($v < 40$ km/h), így f_R változásával nem kell számolni.

Az alábbi egyenlet a gördülési ellenállás-tényező értékére figyelembe vesz néhány már említett befolyásoló tényezőt [2].

$$f_R = C \cdot \frac{m}{D} \cdot \sqrt{\frac{h}{w}}$$

Ahol C az abroncs anyagának rugalmassági tényezője, m a kerékterhelés, D a külső átmérő, h az abroncskeresztmetszet magassága, w pedig a szélessége.

Az eddig tárgyalt paramétereket figyelembe véve a Team Orca 2012-es járművéhez a Michelin 45-75R16 jelű gumibroncsot választotta. A 2011-es autót szintén ezzel szereltük fel. Külső, gördülési átmérője 479 mm. Futófelülete 45 mm széles, profilját tekintve sima, „slick” guminak tekinthető. A versenyen elért sebességek nem olyan mértékűek ($v < 40$ km/h), hogy a nedves körülmények okozta tapadásvesztés bárkit, vagy bármit is veszélybe sodorna.

Az abroncs maximum 7 bar nyomást visel el, de biztonsági okokból csak 6 bar nyomáson üzemeltetjük. A gördülési ellenállás-tényező értéke természetesen a nyomással változik. Ez a felhasznált források alapján a 3.1.1 táblázatban látható [4].

Abroncs nyomása [bar]	f_R [-]
4 bar	0,001
5 bar	0,00084
6 bar	0,00081

3.1.1 táblázat. Michelin 45-75R16 gumibroncs f_R értékei p nyomás függvényében [4].

Sem negatív, sem pozitív kerékdőlést nem alkalmazunk, pályarajzból meghatározott kanyar-egyenes arány megközelítőleg egy, tehát a táv kb. 50%-át kanyarban, a maradék 50%-ot egyenesben kell megtenni. A kerékösszetartás előnyeit az alacsony sebesség miatt nem lehet megfelelően kihasználni, emiatt a jármű kerékösszetartás nélkül épül. A tengelytáv 1800 mm, a nyomtáv pedig 520 mm.

A tervezési fázisban több másik gyártó által készített azonos vagy éppen hasonló méretű abroncs is szóba került, de a gördülési ellenállás-tényező értékéről pontos adat nem állt rendelkezésre, így a csapat választása nem rájuk esett. Az abroncsok ára a Michelin 45-75R16-hoz viszonyítva alacsonyabb, de az ellenállás pontos ismerete nélkül túl nagy kockázatot jelentene alkalmazásuk.

A teljesség kedvéért a 3.1.2 táblázat tartalmazza a még választható, a célnak megfelelő abroncs típusokat [4,11,12,13].

Gyártó Megnevezés	Méret [ETRTO]	Nyomás [bar]	Tömeg [g]
Michelin Tubeless Eco-Marathon	44-406	5 bar	150 g
Michelin Eco-Marathon	35-406	5 bar	150 g
Continental SportContact	28-406	5,5-7 bar	295 g
Continental ComfortContact	32-406	4,8-5,8 bar	375 g
Continental Grand Prix	28-406	6,5-8,5 bar	205 g
Kenda KWEST K193	28-451	6,9 bar	375 g
Schwalbe Durano Draht	28-451	6 bar	255g
	28-406		230 g
Schwalbe Durano Falt	28-406	6 bar	190 g
Schwalbe Marathon Racer	40-406	4 bar	300 g
Schwalbe Tryker	40-406	4-6 bar	320 g

3.1.2 táblázat. A piacon kapható kis ellenállású abroncsok és paramétereik [4,11,12,13]

3.2 Kerékcsapágyazás

A csapágyakban minden esetben fékező nyomaték lép fel, ami káros a gördülési ellenállás szempontjából. A csapágyban keletkező ellenállás a felhasznált irodalom [4] szerint megközelítőleg a keréken fellépő ellenállás század része. Ezek alapján kijelenthető, hogy a kerekek csapágyazása nem elhanyagolható, bármely a helytelen csapágyválasztásból, beszerelésből ill. üzemeltetésből (kenésből) származó legkisebb probléma is súlyos befolyással van a gördülési ellenállás értékére, növeli a fékező nyomatékot.

A legfontosabb cél a csapágyban fellépő súrlódás minimalizálása. A piacon körültekintve több olyan gyártót is találunk, akik aktívan foglalkoznak kis súrlódású csapágyak készítésével. Termékkínálatukból több tényező figyelembevételével, megfelelő odafigyeléssel kiválasztható a megfelelő csapágy. Ennek sorrendje az alábbi

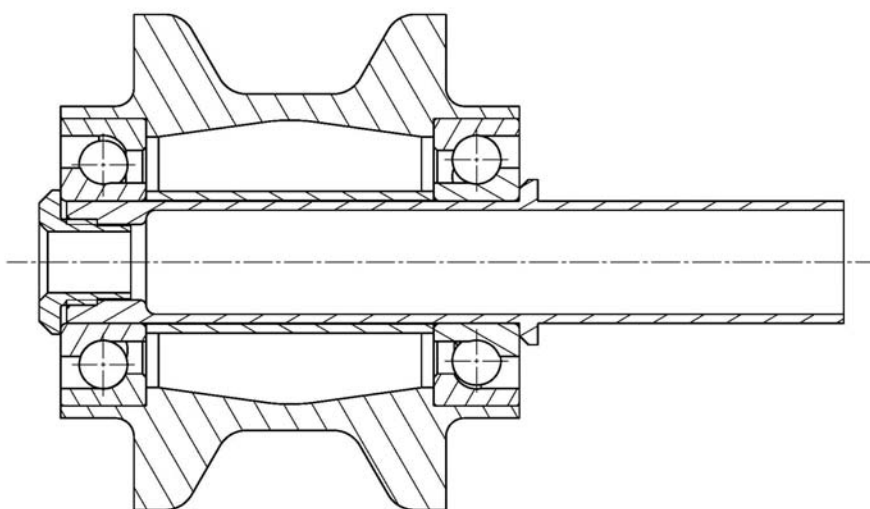
- A csapágyak típusa,
- geometriája,
- anyaga,
- elhelyezkedése és előterhelése valamint
- kenése.

A típus kiválasztásánál célszerű számításba venni azt a tényt, hogy egy csapágygolyó kisebb ellenállással képes haladni - forogni -, mint egy henger. A terhelést lehetőleg egyenlő mértékben kell elosztani a gördülőtestek - csapágygolyók - között. Előfeszíthetőségük miatt a ferde hatásvonalú golyós csapágyak bizonyulnak megfelelőnek.

A csapágy geometriája alatt az alkalmazott golyók átmérőjét, számát, a kapcsolási szöget valamint a mag- és a külső átmérőt érthetjük. A csapágygolyók átmérőjét csökkentve, az érintkezési felületet, ezáltal a súrlódást csökkenthetjük. Ezzel együtt jár a golyók számának növekedése és az egy golyóra jutó terhelés csökkenése. Célszerű azonban minél több, kis átmérőjű golyót választani az optimális gördülés érdekében. Mindennek egyedül a golyók szilárdsága szab alsó határ. A kapcsolási szög értéke általában 15° , 25° vagy 40° . Kanyarodás alkalmával a kerekek kismértékben axiális irányban is elmozdulnak, így az elvárt biztonság érdekében ilyenkor célszerű a 25° -os vagy a 40° -os szöget választani. Egyenes haladásnál természetesen a 15° -os megoldás a kedvezőbb, mivel a súrlódás lényegesen kisebb a golyók és a gyűrűk közt. A mag- és a külső átmérőt a golyók mérete és száma egyértelműen meghatározza.

A megfelelően kiválasztott anyag szintén csökkentheti a csapágyban fellépő súrlódást, ezzel az ellenállást a keréken. A csapágygolyók valamint a gyűrűk anyagaként a nagyobb gyártók már különböző kerámia- vagy polimerfajtákat kínálnak. Kosárananyagként is változatos anyag-kínálat áll rendelkezésre (pl. poliamid 66, poliamid 4,6, PEEK [14]). A golyókat pl. kerámiának választva a súrlódás felére csökkenthető. Ezzel együtt a csapágy tömege is jelentősen csökken.

A kiválasztott csapágyakat úgy kell elhelyezni, hogy az axiális erőkkel szemben maximálisan ellenálljanak. A legcélszerűbb elrendezést a 3.2.1 ábra mutatja.



3.2.1 ábra. Legcélszerűbb csapágyelrendezés egyelső kerék tengelyén.

Az ábrán látható megoldásban az előfeszítő erő értéke egy metrikus menettel pontosan beállítható. Értékének meghatározása kellő odafigyelést igényel, mert a csapágy kizárólag akkor fut a legkisebb súrlódással és veszi fel a legnagyobb terhelést, ha az előfeszítés pontosan meghatározza a kapcsolási szöget ill. az egy golyóra jutó maximális igénybevételt.

A csapágyak élettartamán kívül a súrlódás nagysága is nagymértékben függ a kenés minőségétől és rendszerességétől. A golyóscsapágyak kenése történhet zsírral illetve olajjal. A súrlódási nyomaték szempontjából a zsírral való kenés a hátrányosabb. Ez abból adódik, hogy a kinematikai viszkozitása jelentősen nagyobb, mint a kenőolajaké, így a golyók nehezebben gördülnek. A kenőanyag másik feladat ezen kívül a szennyeződések össze-gyűjtése. Ebből a szempontból viszont a zsírkenés az előnyösebb. A két kenőanyag között a döntő az lehet, hogy a megfelelő olajkenés megvalósításához bonyolultabb kialakítás szükséges. Ez többletsúlyt okozna, tehát a gördülési ellenálláson nyert előnyt elvesztenénk a tömeg növekedésével. A gyártók általában tesznek javaslatot arra, hogy mekkora mennyiségű kenőanyag szükséges

a csapágyak egyszeri kenéséhez. Ezeket az ajánlásokat célszerű betartani, hogy a gyártók által meghatározott értékeket (pl. súrlódási nyomaték, teherviselés) a csapágy elvárt szinten teljesíthesse.

A Team Orca csapat a 2012-es járműhöz a 3.2.1 ábrán látható csapágyazási módszert választotta az első kerekekhez. A választás az SKF 7204 BEGBP DB jelű csapágyakra esett. Ezek főbb paramétereit a 3.2.1 táblázat mutatja [15].

Magátmérő, d [mm]	20 mm
Külső átmérő, D [mm]	47 mm
Szélesség, B [mm]	14 mm
Csapágygolyók száma	11
Csapágygolyók átmérője [mm]	3,969 mm
Dinamikus teherbírás, C [kN]	13,3 kN, párban 23,2 kN
Statikus teherbírás, C_0 [kN]	8,15 kN, párban 16,3 kN
Számított súrlódási nyomaték [Nmm]	9,93 Nmm
Számított teljesítményveszteség [W]	0,468 W
Indulási nyomaték [Nmm]	8,9 Nmm
Tömeg, m [g]	110 g

3.2.1 táblázat. SKF 7204 BEGBP DB csapágyak tulajdonságai [15].

A csapágy jelölésében a B a 40°-os kapcsolási szöget, E az optimalizált belső kialakítást, GB az előfeszítés mértékét, P pedig az erősített üvegszálból készült kosarat jelenti. GB előfeszítés nagyságára is adottak pontos értékek: min. $-2\text{ }\mu\text{m}$, max. $-10\text{ }\mu\text{m}$ és min. 40 N max. 480 N előfeszítést szabad alkalmazni az optimális futáshoz [15].

A kenőzsír megválasztása a csapágyhoz illeszkedik. A csapat szintén egy SKF gyártmányt, SKF LGLT-2 jelű csapágyzsír választott [15]. kinematikai viszkozitása 40°C-on $\nu = 18\text{ mm}^2/\text{s}$, ajánlott üzemi hőmérséklete $T = -50\dots+120^\circ\text{C}$. A 3.2.1 táblázatban szereplő súrlódási nyomaték, indulási nyomaték és teljesítményveszteség már ezzel a viszkozitás értékkel van meghatározva SKF online kalkulátorral [15].

3.3 Légellenállás-tényező (c_w) és homlokfelület (A) csökkentése

A légellenállás-tényező és a homlokfelület általában együtt jellemzi egy adott jármű ellenállását. Megválasztásuk igen fontos, mivel egy olyan ellenállást képviselnek, amely a sebesség növekedésével négyzetesen nő.

Egy aerodinamikailag kiváló karosszéria tervezése nehéz feladat. Sokszor a technika nem teszi lehetővé, hogy áramlástani szempontok szerint történjen egy-egy szerkezet konstrukciója.

A homlokfelület csupán a jármű méreteitől függ, azok módosításával egyszerűen csökkenthető. Befolyása csupán a levegősúrlódásból keletkezett ellenállásra terjed ki. A légellenállás-tényezőt meghatározó legfontosabb paraméterek a következők.

- Vonalvezetés, ívek kialakítása
- Útfelület távolsága a légellenállás szempontjából fontos felülettől.
- A szél iránya és sebessége.
- A karosszérián lévő, áramlást akadályozó elemek.

A vonalvezetés több tényezőtől függ. Szimmetrikusan kialakított testek szabad levegőben sem leszorító-, sem felhajtóerőt nem termelnek. Ezzel ellentétben talaj közelben, vagy bármely egyéb, áramlást zavaró test közelében leszorító erő képződik [4]. Nagysebességű járművek (pl. versenyautók) esetében sokszor nem elég a jármű súlya ahhoz, hogy megfelelő menetstabilitást, kormányozhatóságot és úttartást biztosítsák. Leszorító erő létrehozásához az előbb említett kialakítás is lehet egy megoldás.

Az ívesen kialakított, aszimmetrikus forma szabad levegőben (zavarás nélkül) felhajtóerőt termel. Talaj közelben viszont nem keletkeznek erők. Fogyasztáscsökkentés céljából ez a kedvezőbb kialakítás. A Shell Eco-Marathon versenyre épített járműveknél az alacsony sebesség miatt nem célszerű leszorító erőt alkalmazni, hogy a jármű súlya ne növekedjen.

Az áramvonalas karosszéria kialakításánál egy másik fontos szempont a jármű alsó felülete és az útfelület közötti távolság. Ha a karosszéria túl közel kerül a talajhoz, az áramlás felgyorsul a jármű alatt. Ezzel együtt lecsökken a nyomás és tulajdonképpen szívó hatás lép fel. Ez a szívóhatás a leszorító erő. Ennek elkerülésére célszerű egy optimális távolságot választani. A szakirodalom szerint [4,6] ez kb. 0,15...0,25 m között van.

A szél iránya lényegesen befolyásolhatja a légellenállás-tényező értékét [3]. Az egyenletben négyzetesen vett v sebesség a jármű és a levegő között kialakult egymáshoz viszonyított sebesség. Így tehát szembeszélben összeadódik a két érték, hátszélben pedig a szélesebesség levonódik a jármű sebességéből. Ez a két eset igen ritka, általában a szél mindig valamilyen támadási szögen éri a járművet. Ilyen esetben a szélesebesség jármű haladási irányával párhuzamos komponense adódik a haladási sebességhez. Célszerű tehát a karosszériát úgy

kialakítani, hogy a lehető legszélesebb támadási szög tartományban képes legyen az áramló levegőt kis ellenállással elvezetni.

A karosszéria vonalvezetésének folytonossága szintén fontos paraméternek mondható. Amennyiben a felületen éles bemetszések - hornyok, furatok - találhatóak, az áramlás megtörik, és turbulenssé válik, ezáltal megnő a határréteg. Ez a növekedés természetesen a légellenállás-tényezőt is megnöveli.

A mai gépjárműveknél azonban oda kell figyelni a jármű berendezéseinek megfelelő hűtésére, ezért a karosszérián, leginkább a motortér előtt vagy fölött olyan réseket (pl. hűtőrács) helyeznek el, amelyeken a beáramló levegő hűtheti az alkatrészeket. Ez persze növeli a légellenállást, ezzel a fogyasztást, de a berendezések gyakori cseréje többletköltséget okozhatna. A pontosan a hűtés helyére irányított levegővel csökkenthető hátrányos hatása.

A Shell Eco-Marathon versenyre épített járművek mindegyikénél számításba vették, veszik ezeket a paramétereket. A Team Orca 2012-es autójának tervezésénél szintén fontos szerep jutott nekik.

Az első feladat a fő méretek meghatározása volt. A versenyszabályzatban [5] léteznek előírások ezekre, amelyeket a részvételhez be kell tartani. Ennél a pontnál játszanak szerepet a pilóta méretei is. Egy futam általában 30-50 perc hosszú, ezért lényeges az ergonómia. A pilótának kényelmesen el kell férnie ahhoz, hogy teljes mértékben a futamra, a vezetési stratégiára tudjon koncentrálni. A jármű méreteit a csapat 3 m-es hosszra, 0,7 m-es szélességre és 0,6 m-es magasságra korlátozta.

A tervezési fázis következő szakasza a kerekek száma és elrendezése volt. Lehetőségek szerint két-, három és négy kerék közül választhatunk. Megvizsgálva két kerék alkalmazását, stabilitási problémákról beszélhetünk. Négy kerék esetén az optimális futáshoz szükség lenne egy differenciálműre is a hátsó tengelyen, ami nem csak bonyolulttá, de nehezzé is tenné a járművet. A csapat végül a három kerekes elrendezés mellett döntött. Célszerű ezeket két tengelyen szimmetrikusan elhelyezni: elöl kettő és hátul egy (2+1) vagy elöl egy és hátul kettő (1+2). Kanyarodási képesség és menetstabilitás szempontjából a 2+1 kialakítás a kedvezőbb. Így erre esett a választásunk.

A karosszéria formájának kialakításához el kellett dönteni, hogy első-, hátsó kerék vagy vegyes kormányzást alkalmazunk-e és, hogy mely kerekek lesznek hajtottak. A hátsó kerék kormányzás mellett az szól, hogy a homlokfelület lényegesen csökkenthető, az első mellett, hogy egyszerűbben megoldható és stabilabb kormányzást tesz lehetővé. Ez viszont kismér-

tékben növeli a homlokfelületet. A már egyszer leírtak szerint a 2012-es jármű első kerék kormányzást és hátsó kerék hajtást kapott.

A tényleges karosszériatervezés ezek után kezdődhet meg. El kell dönteni, hogy az első két kerék a karosszérián belül vagy kívül helyezkedjen-e el. A felesleges áramlási veszteségeket úgy lehet elkerülni, ha a formán semmiféle éles törés valamint bemetszés nem található. Emiatt került minden a karosszérián belülre. Több modell készítése és számítógépes szimulációja révén lehet csak az optimális designt megtalálni. A 3.3.1 ábrán látható néhány általam készített modell.



3.3.1 ábra. Team Orca csapat csökkentett légellenállású karosszériaváltozatai.

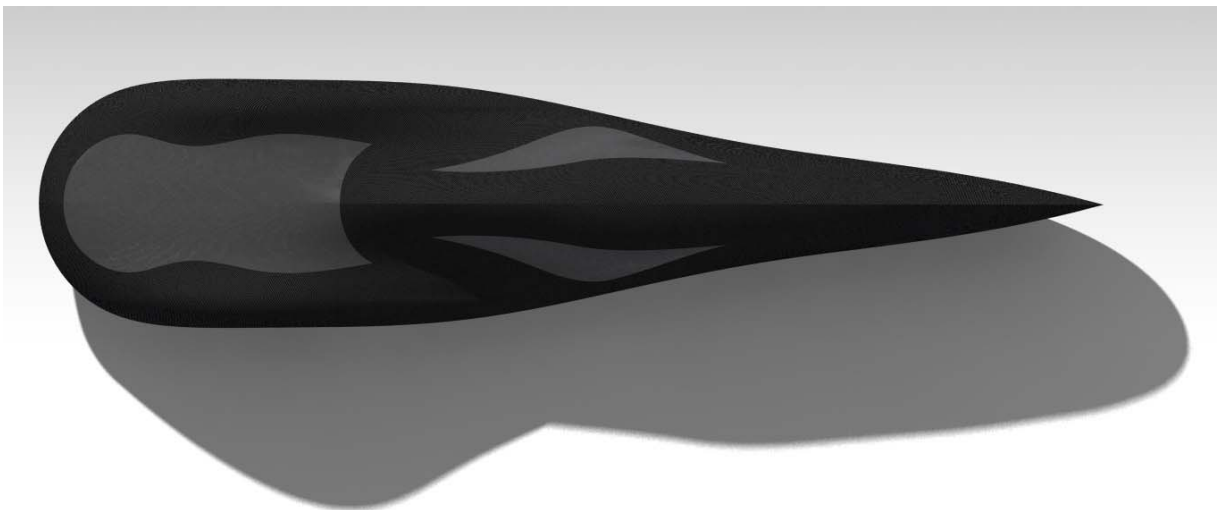
Az ábrán jobb oldalt látható a véglegesen elfogadott karosszéria. A csapat 2012-ben ezzel a járművel fogja képviselni a Pécsi Tudományegyetemet a Shell Eco-Marathonon.

A megfelelő c_w tényező eléréséhez törekedni kell az áramlástani szempontból tökéletes kialakításra. Ahhoz, hogy a járművön csupán minimális erő ébredjen a légellenállásból kifolyólag, a fél cseppforma a legideálisabb. A gépjármű alja követi az útfelület síkját, felső íve pedig cseppforma szimmetriasíkjával elmetszett felét. Ez persze csak elméletben megvalósítható, a valóságban figyelembe kell venni a stabilitáson és irányíthatóságon át a megfelelő úttartást is. A 2012-es pécsi jármű oldalnézete látható a 3.3.2 ábrán.



3.3.2 ábra. Oldalprofil.

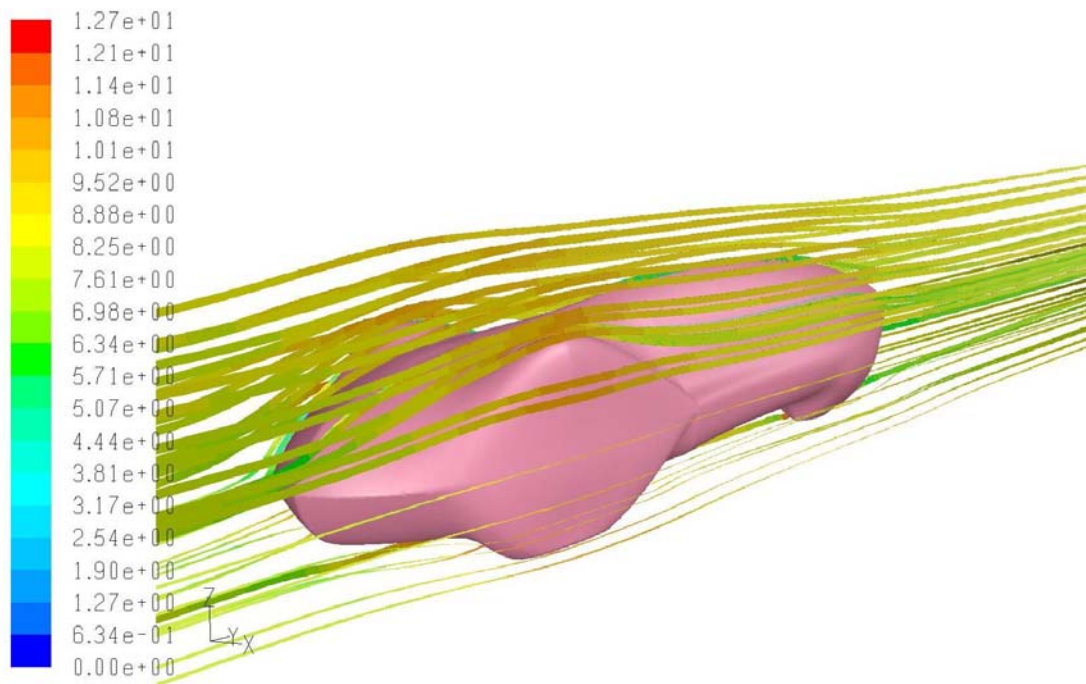
A jármű oldalprofilján látható, hogy a forma nem tartalmaz éles irányváltásokat, az áramlás megfelelően tudja követni felületét. Hasmagassága 75 mm, az autó alsó felülete párhuzamos az útfelület síkjával. Az első kerékdob úgy lett megtervezve, hogy a tökéletes cseppformát kövesse. A jármű profiljáról felülnézetből ugyanez elmondható, ez látszik a 3.3.3 ábrán is.



3.3.3 ábra. A jármű profilja felülnézetből

Az ablakok méretét a tavalyi járműéhez képest lényegesen megnöveltük, a pilóta így jobban kilát, könnyebben tájékozódik. Kialakításuknál ügyelni kell, hogy a karosszéria síkjába tökéletesen illeszkedjenek. A kerékkivágást a jármű alján a lehető legkisebbre kell megválasztani, szükség esetén beborítani, hogy az interferenciából és leválásokból keletkező többletellenállást csökkenteni tudjuk.

A karosszéria légellenállás-tényezőjének meghatározásához számítógépes áramlástechnikai vizsgálatokat és szimulációkat (CFD ellenőrzéseket) alkalmaztunk. Az ilyen módszerrel megállapított értékek általában csak tájékoztató jellegűek, a valóságot csak közelítik, mivel egy számítógépes programban a mai technikával még nem lehetséges az összes környezeti hatás szimulálása. A 3.3.4 ábra mutat egy áramlástechnikai vizsgálatot.



3.3.4 ábra. Légáramlás vizsgálat [19].

Az ábráról látható, hogy a felület hogyan változtatja meg a levegő áramlásának irányát. Az ebből kapott eredmények kiértékelése után az esetleges hibákat ki lehet javítani a modellen, majd a vizsgálat újból elvégezhető.

A 2011-es jármű légellenállás-tényezője $c_w = 0,093$ volt, az idei autóé számítógépes meghatározás alapján $c_w = 0,058$. A homlokfelület mérete a tavalyihoz képest $0,28 \text{ m}^2$ -ről $0,3 \text{ m}^2$ -re nőtt. Mindez az első kerék kormányzás bevezetése miatt.

A gördülő kerekek esetében is lép fel némi légellenállás. E célból érdemes az abroncsokat tartó felniket úgy megtervezni, hogy felületük szintén a lehető legsimább legyen és forgásuk közben ne akadályozza őket a levegő.

3.4 A tömeg csökkentési lehetőségei

A 2. fejezetből kiderül, hogy a tömeg a gördülési-, az emelkedési- és a gyorsítási ellenállás értékénél is közrejátszik, tehát ezen egyetlen paraméter változtatásával egyszerre csökkenthető három ellenállás. Több módja létezik a csökkentésnek.

- Kisebb sűrűségű anyagok használata, azonos szilárdsági tulajdonságokkal. Például acél helyettesítése alumíniumötvözetekkel, magnéziumötvözetekkel, műanyagok alkalmazása.

- Felhajtóerő létrehozása olyan mértékben, hogy a jármű-út viszony biztonságos szinten maradjon. A mai gépjárművek általában olyan nagy sebességre képesek, amely mellett ezt megtenni nem lehet, inkább leszorító erő létrehozását szokták célként kitűzni.

Egy Shell Eco-Marathonra épített autó esetében a legkézenfekvőbb megoldás a tömeg csökkentésére olyan anyagok használata, amelyek kisebb tömeg mellett képesek biztosítani a kellő szilárdságot. A járművet célszerű váz nélkül megvalósítani, mert így annak súlya nem jelent problémát. A legnagyobb tömeget így maga a karosszéria jelenti. Ahhoz, hogy önhordó szerkezetet hozhassunk létre, a karosszéria belső felületén merevítő bordázatot kell kialakítani. A felhasznált anyagok tekintetében érdemes az üvegszövetnél nagyobb szilárdságú szénszövetet választani, amelyet epoxi gyantával átítatva alakul ki a szerkezet. Szénszövetből több sűrűség áll rendelkezésre a piacon, mégis ajánlott a 145g/m^2 -es és 245g/m^2 -es használata. Ezek tömeg-szilárdság aránya a legkedvezőbb. A merevítéshez expandált papírt vagy poliuretán habot alkalmazhatunk. A kerék felnijeit is készíthetjük szénszövetből és epoxi gyantából.

A hajtáslánc elemeinek anyagát csak szűk határok között változtathatjuk, itt általában szükség van fémes anyagok használatára is. A 2012-es járművet egy elektromotor hajtja, melyet egy hidrogéncella táplál. A motor tömege mindössze 177 g, a cella viszont megközelítőleg 5 kg. Az egyéb elemek tömege egyelőre ismeretlen.

A teljes jármű tömegét erősen ajánlott 20 és 30 kg között tartani. A 2011-es autóban még beépítésre került egy alumínium váz is, amelyre üvegszövet karosszériát építettünk. A hajtást robbanómotor végezte. A jármű tömege hivatalos mérés alapján 42 kg, ami a teljes mezőnyt tekintve átlagosnak tekinthető.

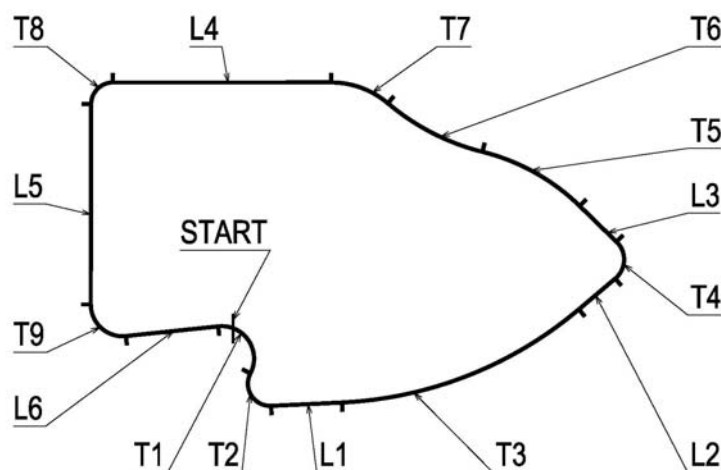
A versenyen igen fontos a megfelelő pilóta kiválasztása is. A versenyszabályzatban [5] 50 kg-ra van meghatározva a minimum testsúly, amelyet a pilótáknak teljesíteni kell. Ellenkező esetben többletsúlyt kell használni. A vezető hozzáértése természetesen fontosabb szempont kell, hogy legyen.

A tömeg csökkentésének létezik még egy lehetősége. A karosszériát úgy kell kialakítani, hogy felhajtóerő keletkezzen. Támadáspontját úgy kell elhelyezni, hogy se az első-, se a hátsó kereket ne szorítsa az útfelülethez, célszerű a jármű súlypontjában felvenni. Következésképpen az erő teljes nagyságával csökkenti a gépjármű súlyát.

Létrehozása több módon történhet. Az egyiknél a karosszériát már a kezdetektől úgy tervezik, hogy fellépjen egy bizonyos c_L tényező, amellyel a felhajtóerő nagysága határozható

meg. Másik megoldás lehet, hogy a karosszériára utólag elkészített aerodinamikai elemeket (szárnyakat) helyeznek el.

A rotterdami városi pálya vonalvezetésének ismeretében - melyet a 3.4.1 ábra mutat - belátható, hogy a gördülési ellenállás lesz a domináns. Ez a kanyarok számából, hosszából állapítható meg. Ahogy korábban említést nyert, a kanyar-egyenes arány, megközelítőleg egy.



3.4.1 ábra. Shell Eco-Marathon, Rotterdam 2012 [1].

Mivel a gördülési- és a légellenállás 67-33%-ban oszlik meg (2.5.3 ábra alapján), és a légellenállás az alacsony sebesség miatt amúgy sem számottevő, érdemes elgondolkodni a tömeg ilyen módon történő csökkentéséről.

A karosszéria újratervezése nem jelentett volna megoldást a problémára, a kialakítással járó kockázat is túl magas volt, ezért az utólagos elem létrehozásával fogunk próbálkozni. Ehhez meg kell tervezni egy nagy felhajtóerőt termelő szárnyprofilt, majd azt az optimális helyen kell elhelyezni a karosszérián. Jelen pillanatban ez a folyamat még csak a tervezési fázisban van.

3.5 Vezetési stratégia

Általánosságban igaz, hogy az ellenállások akkor okoznak magas fogyasztást, ha együtt lépnek fel. Ennek oka, hogy az összeadott erőknek megfelelően a motornak ilyenkor nagyobb teljesítményt kell leadnia. Ha az ellenállásokat egymástól különválaszthatnánk, lényegesen le lehetne csökkenteni a fogyasztást. Mivel azonban gördülési- és légellenállás minden esetben fellép, csak a maradék két ellenállást lehet befolyásolni.

A hétköznapi járművek vezetése közben a folyamatosan változó körülmények miatt erre sajnos nincs lehetőség. A Shell Eco-Marathon keretében viszont, ahol a járművek több kört tesznek meg ugyanazon a pályán, érdemes alkalmazni egy vezetési stratégiát. Ennek lényege, hogy az ellenállásokat különválasztjuk egymástól. Így például akkor gyorsít a pilóta, ha

egyenes szakaszhoz ért, így a kanyarodáskor létrejövő többlet gördülési ellenállás már nem lép fel. Egy másik megoldás lehet, ha lejtős, egyenes úton gyorsítunk, azonban a rotterdami pálya emelkedése $p = 0$, így ezt nem lehet alkalmazni. Ha kanyarodáskor a jármű csak lassú sebességgel halad mérsékelhető a fellépő gördülési ellenállás, valamint a légellenállás értéke.

Mindennek csak a versenykiírásban [5] szereplő teljesítési idő szab határt. A 10 db 1630 m hosszú kört mindössze 39 perc alatt kell teljesíteni, az átlagsebességnek ezáltal 25 km/h-nak kell lennie. Ezalatt persze a motornak nem szabad folyamatosan üzemelnie. A járműnek a megfelelő gyorsítási pontokon kell kb. 30-35km/h-ra gyorsítania, majd a kellő sebesség elérése és a motor kikapcsolása után, szabadon gurulnia a következő, előre meghatározott pontig.

3.6 Hatásfok növelése

A téma nem tartozik szorosan az ellenállás csökkentéséhez, közvetve mégis hatással van az ellenállások és motor teljesítménye - tehát fogyasztása - közötti kapcsolatra. Ezért csak röviden kerül tárgyalásra.

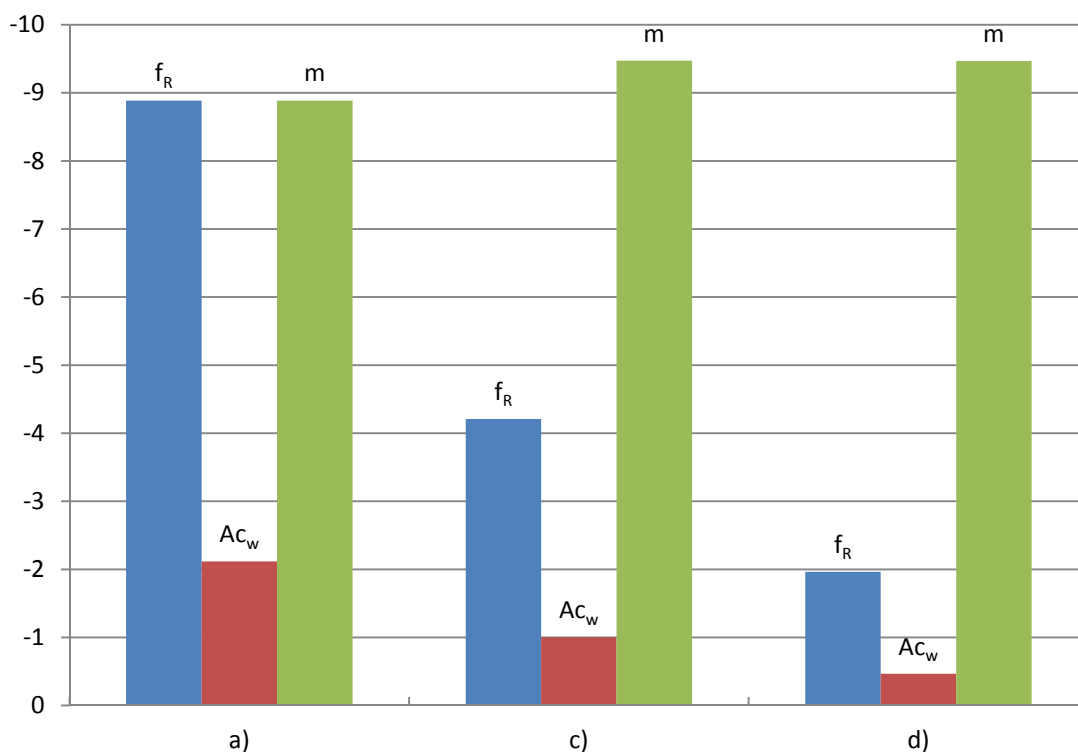
A hajtáslánc hatásfokát a szakirodalom [4] kb. 45%-ra becsüli hidrogéncella üzemű járműveknél. A robbanómotoros gépjárművek hatásfoka kb. 20-25%-ra tehető [17].

Azonos ellenállás esetén két különböző hatásfokú rendszer közül annak lesz kisebb a fogyasztása, amelyik hatásfoka magasabb, mivel ugyanazon vonóerő (kerékteljesítmény) létrehozásához kevesebb energiára van szüksége. Így a lehetőségekhez mérten törekedni kell a lehető legmagasabb hatásfok elérésére.

4. A PARAMÉTEREK BEFOLYÁSA TELJESÍTMÉNYIGÉNYRE

Összegezve az eddig leírtakat, sok olyan tényező létezik, amely befolyással van az ellenállások, ezáltal a kerékteljesítmény, a motorteljesítmény és a fogyasztás mértékére. Tervezésnél természetesen minden paramétert lehetetlen beleszámolni az eredménybe, ráadásul a módosítások egy része csak elméleti síkon valósítható meg.

A 4.1 ábrán látható diagram mutatja f_R gördülési ellenállás-tényező, A_{c_w} légellenállás-tényező és homlokfelület valamint m tömeg 10%-os csökkentésével járó teljesítményigény-csökkenést százalékban 2.5.3 ábrán adott feltételek teljesülése mellett.



4.1 ábra. Kerékteljesítmény csökkenése százalékban a paraméterek 10%-os csökkentése esetén adott feltételek mellett.

a – emelkedés nélküli egyenes úton állandó sebességgel, **c** – útemelkedéssel állandó sebességgel, **d** – emelkedés nélküli úton állandó gyorsítással

5. CSÖKKENTÉSI LEHETŐSÉGEK A MAI UTCAI GÉPJÁRMŰVEK TERÜLETÉN

A hétköznapi járművek esetében is fontos a fogyasztás csökkentése. Ennek oka, hogy a Földön található üzemanyag előállításához szükséges nyersanyagkészletek végesek. Másik oka, hogy a globalizáció miatt az üzemanyagárak emelkednek, emiatt a piaci igény az alacsony fogyasztású gépjárművekre irányul. A gyártók természetesen foglalkoznak a témával és igyekeznek kielégíteni minden vásárlói igényt. A járműfejlesztésnek hét nagy kritériumnak kell eleget tennie [18].

- Aktív biztonság
- Passzív biztonság
- Kényelem, komfort
- Minőség
- Környezettudatosság
- Gazdaságosság
- Design

Az utóbbi három valamilyen szinten összekapcsolódik, mivel egy jó designnal alacsony fogyasztás érhető el, ezáltal a jármű nem csak környezetbarát lesz, de gazdaságossága is javul. Persze a három kritérium nem csak a fogyasztáscsökkenést veszi figyelembe.

A gördülési ellenállás-tényezőt a gumibroncs gyártók próbálják a megadott szempontok szerint csökkenteni. Természetesen olyan alacsony értékek, amelyek egy versenyre tervezett alacsony fogyasztású autó esetében léteznek, nem érhetőek el hétköznapi gépjárműveknél. A kerékcsapágyazáson kívül a járműben található összes csapágyat úgy választják meg, hogy a legkisebb veszteséggel üzemeljenek.

A légellenállás csökkentése érdekében az autógyárak is ma már szimulációk és számítógépes vizsgálatok segítségével próbálják optimalizálni a karosszéria alakját úgy, hogy minden kihívásnak eleget tegyen, köztük a design, a gyárthatóság, a gazdaságosság és a minimális légellenállás által támasztottaknak is. Azonban sem a légellenállás-tényező sem a homlokfelület méretét egy bizonyos határon túl csökkenteni nem lehet.

A gépjárműgyártók a legtöbbet a tömeg csökkentése terén tehetnek a fogyasztás minimalizálása céljából. Ehhez leginkább új, kedvező szilárdsági tulajdonságokkal rendelkező könnyű anyagokat alkalmaznak. Így például:

- Karosszériaelemeket - vagy akár teljes karosszériát - nem acéllemezekből, hanem alumínium vagy magnézium ötvözetekből, esetleg szénszálalás műanyagból készítenek.
- Motorblokkot acélöntvény helyett szintén könnyű fémek ötvözeteiből állítanak elő.
- A kisebb terhelésnek kitett elemeket kerámiából vagy műanyagból készítik el.
- Kompakt megoldásokat fejlesztenek ki, amelyekkel egy berendezés akár több funkciót is elláthat egy helyett.

A Shell Eco-Marathon versenyeket mindenképpen eredményesnek tekinthetjük, mivel rendkívül nagy lehetőséget biztosít főiskolai és egyetemi hallgatók részére ötleteik megvalósításához és értékeléséhez. Minden alkalommal fennáll a lehetőség, hogy egy olyan technológia szülessen, amely alapjaiban változtatja meg a jövő közlekedését.

Pécs, 2011.11.13.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] <http://www.shell.com/home/content/ecomarathon/>.
- [2] Thomas D. Gillespie: Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, 1992.
- [3] Prof. Dr. Ing. Ferit Küçükay: Grundlagen der Fahrzeugtechnik Skriptum, Technische Universität Braunschweig, 2010.
- [4] Dr. Jean-Jacques Santin: The world's most fuel efficient vehicle - The design and development of Pac-Car II., vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2007.
- [5] Shell Eco Marathon Rules and Regulations, 2011.
- [6] Joseph Katz: Race Car Aerodynamics – Designing for Speed, Bentley Publishers, Cambridge, 1995.
- [7] Dr. Zvikli Sándor: Közlekedéstechnika II. elektronikus jegyzet (<http://eki.sze.hu/ejegyzet/ejegyzet/zvikli/index.htm>), Győr, 1999.
- [8] Ralf Bohle GmbH: http://schwalbe.de/ger/de/technik_info/, Reichshof, 2011.
- [9] Continental Reifen Deutschland GmbH: Gumiabrons alapok, 2010.
- [10] J.Y.Wong: Theory of Grund Vehicles 3rd Ed., Jahn Wiley & Sons Inc., Toronto, 2001.
- [11] Ralf Bohle GmbH: Schwalbe Katalog, Reichshof, 2011.
- [12] Continental Reifen Deutschland GmbH: Continental Katalog, 2011.
- [13] American Kenda Rubber: Kenda Tyres Bicycle Catalog, Reynoldsburg, 2011.
- [14] http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=en&newlink=1_0_1
- [15] SKF Katalógus, 2011.
- [16] John J. Bertin, Russel M. Cummings: Aerodynamics for Engineers 5th Edition, Pearson Education Upper Saddle Rivel, New Jersey, 2009.
- [17] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Hat%C3%A1sfok>
- [18] Prof. Dr. Ing. Ferit Küçükay: Fahrzeugkonstruktion I. (Fahrzeugantriebe) Skriptum, Technische Universität Braunschweig, 2010.
- [19] Háber István, Makida László: Energiatakarékos járműprototípus fejlesztése és gyártása. Proceeding of Factory Automation 2011, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2011.