

ZÉRÓ KIBOCSÁTÁSÚ JÁRMŰ - MEGALUX - TERVEZÉSE

Fodor Antal ^{1*}, Bagány Mihály ², Kutasi Zoltán ³, López Pérez, David ⁴

¹⁻³ Járműtechnológia Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar, Kecskeméti Főiskola, Magyarország

² Vehicle Technology of Universidad Miguel Hernandez de Elche, Españaol

Kulcsszavak:

napenergia
káros anyag kibocsátás
elektromos hajtás
aerodinamika
kompozit

Keywords:

Solar Energy
Emission
Electric drive
Aerodynamic
Composite

Cikktörténet:

Beérkezett 2015. október 10.
Átdolgozva 2015. október 31.
Elfogadva 2015. november 5.

Összefoglalás

Ebben a munkában összefoglaljuk a World Solar Challenge ausztráliai versenyre épített napelemes jármű tervezésének főbb momentumait. Ezt egyben egy cikksorozat indítójának is szánjuk. A világon egyre inkább előtérbe helyeződik a részben vagy egészében elektromos hajtásláncok fejlesztése. A jármű készítésének előzményeként megalkottuk a Megaméter energiatakarékos benzinmotoros járművet, ami jelenleg a világ második legkisebb fogyasztású járműve. Ezen az alapon indulva elkezdjük a Zéró kibocsátású járműfejlesztés összetett feladatát. Most a tervezési fázisok néhány állomását mutatjuk be.

Abstract

The aim of this paper is to summarize the main design steps of the Solar Electric Vehicle, which was built for the Australian World Solar Challenge. Our intention is to introduce the first article of a series. On the world highlights the development of semi or fully electric powertrain. As a prelude micro fuel efficient prototype car within a couple of years was built at Student Workshop of Kecskemét College Faculty of GAMF. Currently it is the second lowest consumption car on the world. This was an excellent basis for developing zero-emission car. As it was a very complex task, we are going to introduce the main design phases.

1. Bevezetés

A napenergiával meghajtott járművek versenyét (World Solar Challenge) 1987-ben rendezték meg először. A járműveknek, az ausztrál kontinentet átszelve közúton kell megtenni Darwin és Adelaide közötti 3022 km-es távot (1. ábra). A Kecskeméti Főiskola járműépítő csapata **MegaLux** nevű kocsijával benevezett a 2015-ös versenyre a Challenger kategóriába. A versenyen 23 országból 45 csapat indult. A nevezők között vannak a világ élvonalába tartozó egyetemek.

Szilícium alapú napelemekből 6 négyzetméternyi lehet elhelyezni a járműre, amit csak a napelemek által termelt villamos energia hajthatja. Pufferként beépíthető 20 kg lítium-ion akkumulátor. Az 5 - 6 napig tartó futam a gondosan megépített üzembiztos járműről, a jó versenytaktikáról, a csapat kitartásáról és a körültekintő szervezésről szól.

1 Fodor Antal Tel.: +36 76 516 300; fax: +36 76 5163 99
E-mail cím: fodor.antal@gamf.kefo.hu

2 Bagány Mihály Tel.: +36 76 516 300; fax: +36 76 5163 99
E-mail cím: bagany.mihaly@gamf.kefo.hu

3 Kutasi Zoltán Tel.: +36 76 516 300; fax: +36 76 5163 99
E-mail cím: kutasi.zoltan@gamf.kefo.hu

4 López Pérez, David Tel.: +34 679 64 57 99; fax: +34 966 65 89 28
E-mail cím: david.perez17@alu.umh.es

2. Energiamérleg és az elérhető átlagsebesség

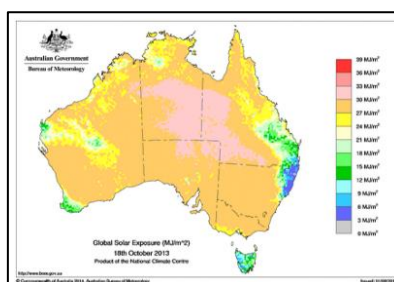
Az október végi (a déli féltekén ez a nyár eleje) versenyen, az útvonal mentén a besugárzott felületi energia $W_{\text{nap}} \approx 28 \text{ MJ/m}^2/\text{nap}$ (2. ábra). Egy $A = 6 \text{ m}^2$ felületű, a napenergiát $\eta_{\text{Si}} = 21\%$ hatásfokkal villamos energiává alakító naptábla energiatermelése naponta:

$$W_{\text{vill}} \approx \eta_{\text{Si}} A W_{\text{nap}} \approx 9,8 \text{ kWh} \quad (1)$$

A szabályzat megengedi, hogy a rajtvonalnál teljesen feltöltött akkumulátorral induljunk (4,5 kWh). Ha az akkumulátor átlagos kisütése napi 1 kWh, akkor naponta 10,8 kWh energia jut a hajtóműre.



1. ábra. A verseny útvonala



2. ábra. A napi besugárzott energia [2]

A hajtáslánc hatásfoka kb. 95%, így a napi vontatási munka 10,26 kWh. A napi haladási idő 8 óra, ezért az átlagos vontatási teljesítmény:

$$P_{\text{vonó}} = \frac{10,26 \text{ kWh}}{8 \text{ h}} \approx 1,28 \text{ kW} \quad (2)$$

A MegaLux kerekeinek gördülési ellenállási tényezője $f = 5/1000$, menetkész tömege $m = 240 \text{ kg}$. A gördülési ellenállás legyőzéséhez szükséges teljesítmény v sebességnél:

$$P_g = fmgv \quad (3)$$

A jármű homlokkeresztmetszete $A_{\text{hk}} = 0,76 \text{ m}^2$, légellenállási tényezője $c = 0,142$, a levegő sűrűsége $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$. A légellenállási együttható (k) és a légellenállás legyőzéséhez szükséges teljesítmény ($P_{\text{lég}}$) a Reylaigh-összefüggés alapján:

$$k = 0,5\rho A_{\text{hk}}c, \quad P_{\text{lég}} = kv^3 \quad (4)$$

2.1. A vontatási teljesítmény:

$$P_{\text{vonó}} = P_g + P_{\text{lég}}, \quad P_{\text{vonó}} = fmgv + kv^3 \quad (5)$$

Az elérhető átlagsebesség ennek a v -ben harmadfokú egyenletnek a gyöke. A fenti adatokkal számolva $v \approx 88 \text{ km/óra}$. Ennél a sebességnél kb. 1 kW szükséges a légellenállás legyőzésére. A 16"-os gumiabroncsok eredő gördülési ellenállása 12 N [1], [2].

3. A légellenállás, és az áramlásvizsgálat

A versenyjármű karosszériákkal szemben alapvető követelmény a kedvező légellenállás. Ennek eléréséhez ismernünk kell a járműtest körüli áramlási szerkezetet, valamint a járműre ható erők megoszlását. A modell körül kialakuló áramkép elemzésére numerikus szimulációt alkalmazhatunk. A járművek mozgása során, – láthatjuk az előző pontban – a teljes mentellenállás jelentős része a légellenállás. Ezért a forma kialakításánál arra kell törekedni, hogy ez csekély legyen. Ezt kis homlok-keresztmetszettel és kis ellenállás-tényezőjű forma kialakításával érhetjük el. Tudjuk, hogy a cseppalak és a szárnyprofil ellenállás-tényezője a legkisebb. Ha a profil csökkenő keresztmetszetű hátsó része kellően hosszú, akkor arról nem válik le a határréteg, a test mögött kisebb áramlási nyom keletkezik, így csökken az ellenállás. A jármű modelljén, a forma kialakítása

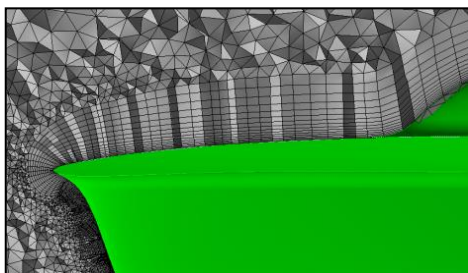
során, numerikus áramlás-szimulációt végeztünk. Annak digitális prototípusát, több fázisban formáltuk, optimalizáltuk. Az egyes változatokat újabb és újabb vizsgálatokkal ellenőriztük [1], [3], [4].

3.1. Az áramlási tér kialakítása

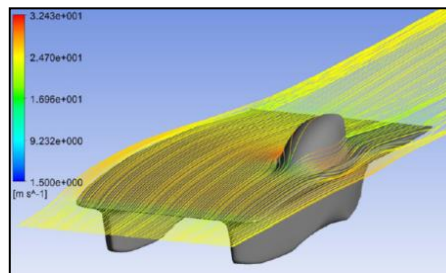
A numerikus áramlás-szimuláció modellalkotása során, a vizsgálat alá vont jármű digitális modelljének megalkotása mellett, szükséges definiálni azt a szinguláris teret, amelynek minimális nagysága már nem befolyásolja számottevően az analízis eredményének pontosságát. Az általános áramlástan ismeretek figyelembevételével ennek magasságát a jármű magasságának kétszeresére vettük fel. A szélességet, a geometriát mindkét oldalra felvéve, annak háromszorosára választottuk. Az áramlási tér hosszúsága három részből tevődik össze. Ezt a jármű előtt másfél-, a jármű után kétszeres járműhosszra vettük fel. Az elkészítéséhez létre kellett hozni a fenti kubaturát a karosszéria körül. Ez globális koordinátarendszer felhasználásával készült, majd Boole-művelettel kivontuk belőle a jármű térfogatát [1], [3], [4], [5], [6], [7].

3.2. Az áramlás-szimuláció paraméterei

Tapasztalat mutatja, hogy a közeg a benne mozgó testre erőt gyakorol. Ennek a meghatározása a hidro- és aerodinamika legbonyolultabb problémái közé tartozik. A relativitás elvéből következik, és mérésekkel is kimutatható, hogy a nyugvó közeg a benne v sebességgel mozgó testre ugyanolyan erőt gyakorol, mint a v sebességgel áramló közeg a benne nyugvó testre. Ez teszi lehetővé, hogy az erő vizsgálatánál a közegben mozgó test helyett, – a szimulációban – nyugvó testet vizsgáljunk áramló közegben. Ennek figyelembevételével készítettük el a numerikus áramlásvizsgálat beállításait, a rendelkezésünkre álló ANSYS Wokrbench Advaced CFX végesseleemes moduljában. Itt létre kell hozni egy határréteg hálót a felületeken, és egy volumetrikus hálót (3. ábra) az áramlás környezetéhez. Definiáltuk az áramlási tér (Default Domain) paramétereit is. Ezen kívül szükség volt még a járműre ható, a légellenállásból adódó erők egyenleteinek definiálásaira is.



3. ábra. A határrétegháló



4. ábra. Az áramvonalkép

3.3. Az eredmények értékelése

Az eredmények kiértékelését ezután az alábbiak szerint kapjuk. A közeg mozgásánál a tér tetszőleges pontjában a szoftver a sebességvektorokhoz hozzárendel vektorokat, vagyis egy sebességteret definiál. Majd az adott időpillanatban a sebességvektorokhoz simulógörbékét szerkeszt. Az így létrejött áramvonalkép végül jól jellemzi az áramlási térben a sebességek nagyság és irányváltozásait (4. ábra). A jármű végső kialakításnál elértük, hogy elhanyagolható oldalirányú nyomatók jelentkeznek, illetve a leszorító erő csekély. Ez azért előnyös, mert így nem lesz hajlamos a jármű az „elrepülésre”, illetve a túlzott leszorító erő indokolatlanul növelné a menetellenállást [1], [3], [4], [5], [6], [7].

4. A felfüggesztés

Általában egy ilyen napelemes versenyautó nagyon könnyű, és nem csak a formáját nézve, de a rugózott tömegei tekintetében is aszimmetrikus. Ezen túlmenően a felfüggesztéshez rendelkezésre álló hely, ahol az alkatrészeknek funkcionálisan is kifogástalanul kell végrehajtani a feladatát, csekély. Az alkatrészek mozgástartományának végállásainál a burkolófelületek rendkívül

közel vannak. A jármű modelljének kialakításában előnyt élvezett az aerodinamika és a kis homlokkeresztmetszet, ami komoly gondokat okoz a járműdinamika kidolgozása során. A versenyautónak – az autósportban is szokatlanul – nagy távolságot kell megtennie különleges körülmények között az ausztrál sivatagban, ezért (is) szükséges a robusztus, egyszerű, megbízható és könnyen beállítható futómű, valamint a gyors alkatrészcsere.

A tervezőnek elsősorban a biztonságos vezethetőséget, a jó vezetési élményt kell szem előtt tartania akként, hogy a végső kialakítás a lehető legkevesebb és legkisebb tömegű alkatrészből álljon úgy, hogy biztosítva legyen a kiváló minőségű gyártástechnológia megvalósíthatósága és az egész szerkezet járműdinamikai optimuma [8], [9].

4.1. Konceptcionális tervezés, és futómű geometria

A tervezés első fázisában megalkottuk a teljes járműdinamika paraméterezhető matematikai modelljét. Ez Excelben történt (5. ábra), majd ennek eredményeit kapcsoltuk az Autodesk Inventor tervező rendszerbe, illetve az Assetto Corsa nevű – egyébként komoly járműdinamikai képességekkel rendelkező – „játék” szimulátorba. Az előzetes számítások alapján meghoztuk a döntést, hogy a járműben a kerekek felfüggesztése független hossz-lengőkaros lesz, annak kisebb helyigénye miatt. Az első tengelyen akképpen alakítottuk ki a bázis méreteket, hogy azok biztosítsák az előírt forduló sugarat úgy, hogy a kormányzott kerék minden lehetséges vég helyzetében biztonsággal elférjen a rendelkezésre álló helyen. Ez alatt értendő a jobb és bal fordulóhoz a kerék elfordíthatóság végkitérése, illetve a be,- és kirugózás is. A hátsó tengelyen a lehető legegyszerűbb kialakítást valósítottuk meg.

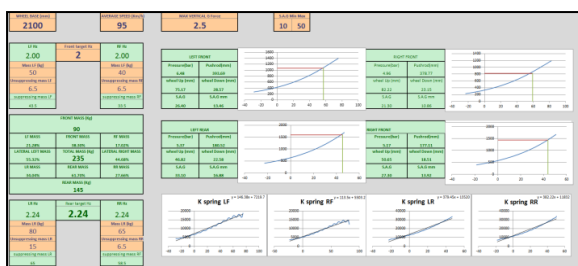
Az első futómű jellemző működési frekvenciáját 2 Hz-re vettük fel a merev, de komfortos rugózás érdekében. Így 90 - 95 km/h sebességnél fel tudja dolgozni a Stuart Highway (észak-dél irányú főút) útfelületére jellemző átlagosan 1 - 2 mm-es útegyenetlenségeket. Körülbelül ebben a sebességtartományban esik egybe az első és a hátsó tengelyen a gerjesztő tag által adott bemenő jel [8], [9].

$$f_{\text{Hz hátsó tengely}} = \frac{v_{\text{jármű}}^{1,5}}{f_{\text{Hz első tengely}} - L_{\text{tengelytáv}}} \quad (6)$$

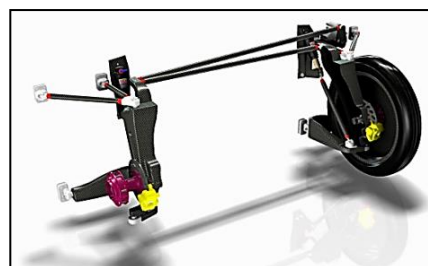
4.2. Légrugós lengéscsillapító alkalmazása

Kezdetben a kerékpároknál használt lengéscsillapítót alkalmaztuk. Ez kiválóan alkalmas egy ilyen futómű geometria rugózásának biztosítására. Ennek paramétereit egy kimerítő (itt nem részletezett) kísérletsorozattal határoztuk meg, beleértve egy három millió ciklusú fárasztóvizsgálatot is. Ezek alapján már rendelkezünk a szükséges egyenletek paramétereivel.

A vizsgálatok szerint, a lengéscsillapító exponenciálisan válaszol a nyomásváltozásra.



5. ábra. Futómű Excel konfiguráció



6. ábra. A futómű összeállítás

A rugózás paramétereit asszimmetrikusak a felépítmény egyenlőtlen tömegeloszlásai miatt. Az egység használatát végül a légrugózásra jellemző hőmérsékletérzékenység miatt elvetettük [8].

4.3. Spirálrugós lengéscsillapító alkalmazása

Ez a beépített rugóstag – a külső hőmérséklettől függetlenül – kerekenként biztosítja az optimális rugózást, a rugó előfeszítés állíthatóságát, a be,- és kirugózás gyors és lassú módjában is a pontos finombeállítást. A kezdeti (alap) beállítások mellett lehetővé teszi különböző áttételi

karokkal, hogy az eltérő paraméterű kerekhez azonos rugóstagot használhassunk [8], [9] (6. ábra).

$$S_{\text{előfeszítés}} = \frac{F_{\text{nyugvóponti}}}{k_{\text{rugómerevség}}} - S. A. G [\%] * S_{\text{teljes rugóút}} \quad (3)$$

5. A karosszéria kialakítása

A versenyeredmények részben a könnyű, merev, kis légellenállású karosszériának köszönhetőek. Cikkünk e részében vázoljuk egy ilyen karosszéria gyártástechnológiai tervezésének és megalkotásának főbb lépéseit. Ennek a sokszor egymással is ellenpólusban lévő főbb követelményei, hogy a karosszéria legyen minél kisebb, az alakja legyen szabadon megtervezhető, legyen minél merevebb és könnyebb. Ezeket világszínvonalon csak a szénszálas kompozitból készült karosszéria teljesítheti [10].

5.1. Előkészítés

Ha már kialakult az elrendezés és alapkoncepció, az alapvető funkciókat figyelembe véve a mechanikai tervezésben már közelítően számolhatók az olyan igénybevételek, amelyek a versenyautó egyes alkatrészeinek anyagát és gyártási technológiáját meghatározzák. A munka e szakaszára már kialakul a jármű belső műszaki tartalma is. A héjszerkezetű váz azért optimális, mert növeli a helykihasználhatóságot és a karosszéria inerciáját, a felhasznált anyagmennyiséget csökkenti, ami tömegcsökkentést eredményez. A belső felépítés optimalizálásához, illetve az előzetes rétegtrend számításokhoz szükség volt megelőző mechanikai- és anyagvizsgálatokra. Ennek alapjául a meglévő alkatrészek tömege, a pilóta tömege és a becsült terhelések szolgálták.

A szoftveres (a kompozit technológiára jellemző helyettesítő) végeselemes vizsgálat feltárta a karosszériában ébredő feszültség-térképet, amely alapján optimalizáltuk a belső bordák elrendezését és a végleges rétegtrendet, figyelembe véve a jó és könnyű gyárthatóságot. Ehhez előzőleg elvégeztük a felhasználandó anyagok próbatesteinek mechanikai vizsgálatát. Az anyagvizsgálatok eredményeinek kiértékelésével már meghatározható volt a végleges rétegtrend.

Mivel a héjszerkezetet több elemből lamináltuk és ezeket ragasztással rögzítettük egymáshoz az osztósíkok mentén, szükség volt a különböző ragasztási technikák mechanikai vizsgálatára is. A gyártástechnológia megválasztásakor az alkatrészekkel szemben támasztott viszonylag magas hőállóság is döntő szempont volt. Ezek figyelembevételével a korszerű repülőgépipari Prepreg technológiában alkalmazott szén - méhsejt - szén szendvicsszerkezet kialakítása és a Nomex méhsejt alkalmazása mellett döntöttünk [10], [11].

5.2. A gyártás

Az eddig csak számítógépen megálmodott karosszéria megvalósítása három lépésben történt: az ősminta, a negatívszerszám és a héjszerkezetű műanyag karosszéria elkészítése.

Az egyes alkatrészek ősmintái XPS hőszigetelő hablapokból marással készültek. Figyelembe vettük a felületek további kezelésének rétegvastagságait is. A poliészter anyagok használata miatt a habot el kellett szigetelni a felszabaduló sztiroltól epoxi-műgyantával és üveg-kompozit réteggel. A jó felületi minőségű végtermék készítéséhez az ősmintát fényeztük és políroztuk.

A negatív forma-szerszámot az ősmintára laminálva készítettük el. A használható szerszám készítéséhez az osztósíkok helyének pontos, alámetszés-mentes meghatározására is szükség volt annak érdekében, hogy mind az ősmintát, mind a járműtestet ki lehessen venni belőle (7. ábra). Ezek helyét a 3D modell alapján határoztuk meg. A szerszámokhoz epoxi-szerszámgél és epoxigyantát használtunk, ami egy epoxi-mátrixú, üvegszál erősítésű kompozit műanyag. Külön figyelmet érdemelt, hogy az anyagoknak és a szerszámnak a gyártás során 100 °C feletti hőterhelést kellett alaktartóan elviselni [10], [11] (7. ábra).

A harmadik lépésben készülő karosszériánál (8. ábra) a méhsejt pontos behelyezése egy ilyen bonyolult felületű szerszámba nem valósítható meg hagyományos módszerekkel. Ezért ennek technikáját (az esztétikai szempontokat is figyelembe véve) úgy dolgoztuk ki, hogy a külső, már térhálósodott szén-kompozit rétegen leválasztó fóliával aprólékosan kitalartuk azokat a területeket, ahol végül nem kell méhsejt réteg.

A felületre a megfelelő tapadás érdekében egy vékony csatoló réteget lamináltunk, melyre a szükségesnél nagyobb méhsejtet vákuumoztunk. A térhálósodás után a leválasztó fóliával kitakart felületekről a méhsejt egyszerűen eltávolítható volt. Ezután egyirányú szénszöveteket, illetve a szendvicsszerkezet záró szénszövet rétegét helyeztük az eddig a szerszámban előkészítettekre a rétegrendnek megfelelően, majd ismét levákuumoztuk. A karosszéria teherhordó eleme két fő részből áll, így szükség volt megfelelő tulajdonságú szerkezeti ragasztót felkutatni és a hozzá tartozó alkalmazástechnikát kidolgozni. Így végül az egyes technológiai lépések minősége ellenőrizhetőbb lett [10], [11].



7. ábra. Az osztósíkok, Nomex méhsejt



8. ábra. MegaLux részlet

Összefoglalás

Az elkészült jármű minősége minden tekintetben túlmutatott az évek óta hasonló járműveket építő versenytársak által épített járműveken, amiért a versenytársak számos elismerésben részesítettek bennünket. A jármű kerekei és a futóműalkatrészek is kompozit műanyagból készültek, melyeket hasonló tervezési és gyártási folyamattal állítottunk elő. Az érintett munkáink mellett a csapat által egyedileg tervezett és gyártott töltésvezérlő rendszer, egyedi telemetria és központi járművezérlő is elkészült, ami egy 18, egymással CAN-busz hálózaton kapcsolatot tartó számítógépes hálózati rendszer. A csapat kitartó munkája és segítőink, támogatók összefogása meghozta gyümölcsét, kijutottunk a World Solar Challenge 2015-ös ausztrál versenyre.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondunk mindenkinek, aki pénzügyileg, műszakilag, gyártással, eszköz-beszerzéssel, ügyintézással, de akár csak jó szóval is támogatta a magyar felsőoktatás jelenlétét ezen a – világ vezető egyetemeit felsorakoztató – nemzetközi versenyen.

A publikáció elkészítését a TÁMOP 4.2.1C-14/1/Konv számú projekt támogatta. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Bagány Mihály: *Műszaki áramlás*an KF GAMFK jegyzet, Kecskemét, 2009.
- [2] <http://www.bom.gov.au/> 2015.04.09
- [3] Fodor Antal - Boza Pál: Csőszerű bepattanó kötések vizsgálata végeelemes módszer alkalmazásával *GAMF közleményei 2009 XXIII.* Kecskemét 2009 pp. 49.
- [4] Fodor A.: Reverse Engineering a numerikus áramlás-szimuláció szolgálatában. Kecskeméti Főiskola, Factory Automation (konferencia kiadvány) 2010.
- [5] V.Raja, K.J.Fernandes, *Reverse Engineering*. Springer Verlag, 2008., ISBN 978-1-84628-855-5
- [6] Kodácsy János, Fodor Antal, A Reverse Engineering ipari alkalmazásának lehetőségei *Gépgyártás XLVIII.* évfolyam 2008/3. pp.100.
- [7] Erdogan Madenci, Ibrahim Guven.: *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®* The University of Arizona Springer ISBN-10: 0-387-28289-0
- [8] López Pérez, David, Estudio de la eficiencia y comportamiento de un prototipo para la shell eco-marathon, Pages 50-105.
- [9] William F. Milliken, Douglas L. Milliken, *Race Car Vehicle Dynamics*
- [10] Santin, J. J.: *The world's most fuel efficient vehicle*. VDF Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich, 2007.
- [11] <http://www.grm-systems.cz/en/carbon-reinforcements> 2014.09.10.