

# AKKUMULÁTORHŰTÉS MÉRETEZÉSI FOLYAMATÁNAK VIZSGÁLATA FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓBAN

## INVESTIGATION OF ACCUMULATOR COOLING SYSTEM SIZING METHOD FOR FORMULA STUDENT RACECAR

Sipos Gábor <sup>1</sup> Bári Gergely <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

elektromos  
autó  
akkumulátor-hűtés  
hűtés  
regeneratív fékezés

### Keywords:

electric  
car  
accumulator cooling  
cooling  
regenerative braking

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 17.  
Átdolgozva 2019. február 27.  
Elfogadva 2019. március 19.

---

### Összefoglalás

Az elektromos autók, versenyautók egyik nagy megoldandó kihívása az akkumulátor megfelelő kialakítása. Érdemes kiemelt figyelmet fordítani az elektromos energiatároló berendezések hűtéstechnikai méretezésére, hogy a teljes versenytáv alatt maximális teljesítménnyel tudjon üzemelni a jármű hajtásrendszere. A kutatás az akkumulátor-hűtés méretezési folyamatával foglalkozik.

### Abstract

The proper design of electric vehicle's and racecar's accumulator is one of the biggest challenge of these vehicles. It is important to pay special attention to the sizing of the accumulator cooling system, in order to maximize the performance of the racecar for the entire race. This paper shows one way of the sizing method of accumulator cooling.

## 1. Bevezetés

A Formula Student nemzetközi versenysorozatban belsőégésű motorral szerelt és elektromos hajtásláncú autóknak is lehetőséget nyújtanak az indulásra. A BME Formula Racing Team e sorozatba fejleszt elektromos járműveket már 2011 óta. Az autó számára legnagyobb kihívást jelentő, 22 km hosszú Endurance versenyszám [1] ( a továbbiakban Endurance) során az autók nagyjából 20-25 percen keresztül üzemelnek folyamatosan, pusztán a féltávnál ejtenek meg a csapatok egy pilótacserét. Az évek során e versenyszám során tapasztaltak alapvetően jelölik ki az induló csapatok fejlesztési irányait, így a mi csapatunk számára is. Az elektromos járműveinknél felmerülő megbízhatósági problémák jellemzően a hajtáslánc hatékonysága, az akkumulátor kapacitása és e két terület hűtése köré csoportosultak. Annál fogva, hogy az említett versenyszám bír a legnagyobb pontértékkel, e problémák kiküszöbölése kulcsfontosságú. A felsorolt problémaköröket a fejlesztési folyamat legelején, a jármű-, és részegység szintű követelmények és specifikációk formájában lehet hatékonyan kezelni. Munkámmal egy, hűtés szempontjából is megfelelően felépített kialakítást szeretnék elérni, illetve az ehhez vezető utat bemutatni.

### 1.1. Járműkonceptió

A dolgozat alapjául szolgáló járműkonceptió elektromos, összkerék-hajtású és karbon

kompozit monocoque-vázzal szerelt. Nagyfeszültségű, 600 V-os, 80 kW leadására alkalmas akkumulátor szolgáltatja az energiát, mely a motorvezérlőn keresztül látja el a négy darab kerékagyra szerelt motort. Összkerékajtott elektromos járműként képes mind gyorsításkor, mind fékezéskor mind a négy motor nyomatékát használni, így kizárólag regeneratíván fékezni is - mely üzemmód hozzájárul az akkumulátor melegedéséhez, az energiahatékonyság növelés mellett. A szabályzatból következő 80 kW-os teljesítményhatár, melyet az akkumulátorból kifolyó ágon mérnek árammérő szenzorok segítségével megköti a csapatok kezét teljesítmény tekintetében, ám a hozzá társított 60°C-os maximális cellahőmérséklet - melyet a verseny szervezői szintén ellenőrizhetnek - már komoly kihívás elé állítja a csapatokat az akkumulátor-tervezés kapcsán.

A nagyfeszültségű energiatároló hűtését a korábbi modellek esetében levegővel oldottuk meg, mellyel azonban komoly, túlmelegedési problémákat tapasztaltunk: az Endurance verenszám tesztelesekor, jellemzően a táv kétharmadánál (pályától függően), 33 °C-os környezeti hőmérsékletnél már túlmelegedés miatt állt meg az autó, az akkumulátor hőmérséklete elérte a 60 °C-ot.

## 2. Akkumulátor melegedés számítása

Egy hűtésrendszer méretezésénél mindenekeelőtt az egység által disszipált hőmennyiséget szükséges ismerni, amit a rendszernek el kell vezetni.[2] A pontos érték meghatározása annál nagyobb feladat, minél több dolog függvénye - az akkumulátor esetében pedig több, egymást összetetten befolyásoló tényezőtől függ a melegedés mértéke. E tényezők az akkumulátorban helyet foglaló cellák, ezek töltöttségi állapota, elhasználtsága és az éppen kifolyó áram erőssége, melyek két ugyanazon felépítésű pakk közt is különbséget tehetnek. Egy ilyen egység melegedésének modellezése a belső ellenállás fogalmának bevezetésével lehetséges, ugyanis egy akkumulátor belső ellenállásán átfolyó áram fog fűteni, a feljebb említett tényezők tehát ezt a belső ellenállást befolyásolják tulajdonképpen.[3]

$$R_b = f(T_c, Soc, Soh, I)$$

## 3. Metódus

Az elektromos Formula Student autónk a verseny koncepciójából fakadóan jól szenzorozott, a jármű számost területéről gyűjtünk információt minden egyes pályára guruláskor. Csapatunk járművei sem kivételek, többek közt a következő értékeket monitorozzuk, monitoroztuk az FREC-006 és 007 modellekben:

- kormányzó
- hűtőközeg belépő hőmérséklet
- hűtőközeg kilépő hőmérséklet
- motorvezérlő hőmérséklete
- motor hőmérséklet
- akkumulátor cellák hőmérséklete
- akkumulátor cellák feszültsége
- akkumulátor árama
- akkumulátor összefeszültség
- gyorsulás (első és hátsó mérőpont)
- CAN üzenetek
- motor fordulatszám
- köridők
- gps pozíció
- féknyomások
- pedálállások
- rugóút

A rendelkezésre álló információk alapján [4], célravezető eljárás lehet a belső ellenállás meghatározására, ha egy vagy több korábbi modell által gyűjtött adatokból indulunk ki, hisz az akkumulátor konfigurációja nem változik, kapacitást és feszültségszintet tekintve nincs, nem szükséges eltérni a korábbi megoldásoktól.

Első körben a gyorsulás versenyszámon, illetve az erre történt gyakorlásokon gyűjtött adatokat kell megvizsgálni, hisz ekkor az autót egy 75 m hosszú egyenes szakaszra állítják, majd a pilóta a rajtjelet követően hirtelen gyorsítani kezd, teljes teljesítményt kikérve a motorvezérlőtől, egész a pálya végéig. Ez a szituáció egy letisztult helyzetet eredményez a járműnél, innen érdemes tehát belső-ellenállás becslést végezni. Legalább 5-6 adathalmazt szükséges megvizsgálni, hiszen

változhat akár ugyanazon pálya tapadási viszonya is, indulhat máshonnan is az autó, továbbá a pilóták reakcióiban is lehetnek eltérések. Amennyiben követjük az akkumulátor villamos modellezését [2], a kiértékelés során vizsgálni kell az akkumulátor össz feszültség beesését ( $\Delta U$ ), hogy ez mekkora áram hatására következett be ( $I$ ), így pedig eljutunk az egység belső ellenállásához ( $R_{b,Acc}$ ).

$$R_{b,Acc} = \frac{\Delta U}{I}$$

A belső ellenálláson disszipáló hő ( $W_{melegítés}$ ) kiszámolása a következő lépés, az Endurance időtartama ( $t_2-t_1$ ), az akkumulátor belső ellenállása ( $R_{b, Acc}$ ) és a folyó áram négyzetének ( $I^2$ ) segítségével, így az alábbi integrál:

$$W_{melegítés} = \int_{t_1}^{t_2} I^2(t) \cdot R_{b, Acc} dt$$

E műveletet az autó adatgyűjtő rendszerével kell elvégezni, miután betápláltam az általam meghatározott belső ellenállás értékét, a szoftver pedig ehhez a hajtásrendszeren átfolyt áramot integrálva eredményül adja az akkumulátort melegítő hőt. Fontos kiegészítés, hogy eredetileg a rendszer a regeneratív fékezéskor negatív előjellel látja el az áramot, hiszen ellenkező irányban folyik, viszont esetünkben az áram iránya teljesen mindegy, mindkét esetben fűti a rendszerünket, így abszolút értékben számolunk vele.

Emellett a felhasznált energiát is érdemes feljegyezni a teljes versenytávrá, így a képletből megkapott, és a teljes felhasznált energia hányadosával veszteségtényezőt tudunk definiálni. Az akkumulátor teljes kapacitását, amelyet egy versenytáv alatt el szándékozunk használni, ezzel a veszteségtényezővel megszorozva, majd a versenytáv becsült idejével elosztva megkapjuk a teljesítményt, mely az akkumulátort melegíteni fogja, ezáltal a modellezés alapjául szolgálhat.

### 3.1. FREC-006

Első körben a 2016-ban használt versenyautó adatai kerülnek elemzésre. Nyolc gyorsulás-versenyszám gyakorlás, illetve verseny adatsorait elemeztem az előző fejezetben leírt módon, mely elemzés eredményét az alábbi táblázat foglalja össze.

	$\Delta U$ [V]	$I$ [A]	R belső [ $\Omega$ ]
1.	42,7	143,4	0,3
2.	37	136	0,27
3.	44	143,5	0,31
4.	44,7	157,2	0,28
5.	36,4	137,5	0,26
6.	38,6	145,3	0,27
7.	37,4	141,2	0,26
8.	42,7	147,9	0,29

1. táblázat. Belső ellenállás meghatározása

A  $\Delta U$  oszlop a gyorsításkor beeső feszültségértékeket foglalja össze, míg az  $I$  oszlop az ekkor a cellákon folyó áramot, ezekből pedig előállt minden sorban az előző fejezetben vázolt módon a számolt belső ellenállás. A maximális érték 0,31  $\Omega$ -ra adódott, így a továbbiakban ezzel számolok.

Következő lépésként 9 db hosszútávú versenyszám adatsorait elemeztem, felhasznált és melegeedésre fordított energiamennyiségek segítségével. Az adatokat az alábbi táblázatban foglaltam össze, az adatsorokat azok keletkezési dátumaival azonosítom, meghatározom továbbá a veszteségtényezőt.

Dátum	Felhasznált energia Wh	Melegítésre fordított energia Wh	Veszteségtényező %
20160812	7511	188	2,5
20160807	5675	139	2,4
20160724	7893	237	3
20160723	6377	191	3
20160710	4636	128	2,8
20160707	11179	258	2,3
20160624	8215	191	2,3
20160614	6063	147	2,4
20160614	7085	171	2,4

2. táblázat. 2016-os adatsor

A legnagyobb veszteségtényező a vizsgált távok alatt 3 % volt, ennek segítségével határozom meg az akkumulátort fűtő teljesítményt: a 6kWh-s akkumulátorpakkot - akkumulátor melegedés szempontjából - legrosszabb esetben 20 perc alatt merítjük le. Így a fűtőteliesség:

$$P_{melegítés} = 6 \text{ kWh} \cdot \frac{3\%}{20 \text{ min}} = 0,54 \text{ kW}$$

### 3.2. FREC-007

Egy, az előző fejezetben tárgyalt jármű vizsgálata mellett vizsgáltam a 2017-es modell által készített adatsorokat is. Mivel az akkumulátor konfigurációja megegyező volt, összehasonlítható vizsgálatokról beszélünk. Az alábbi táblázat 4 darab 2017-es Endurance fogyasztási és melegedési adatait mutatja.

Dátum	Felhasznált energia Wh	Melegítésre fordított energia Wh	Veszteségtényező %
20170525	6899	105	1,5
20170526	8009	240	3
20170703	7564	238	3,1
20170802	6878	212	3,1

3. táblázat. 2017-es adatsor

A maximális veszteségtényező 3,1 % volt, ezt egy hivatalos időmérési adattal, a csehországi versenyen abszolvált Endurance mérési adatával kiegészítve egy újabb fűtési teljesítményt lehet számolni.

$$t_{endurance, Csehország} = 1552,21 \text{ s}$$

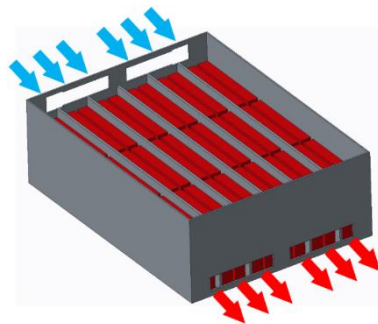
$$P_{melegítés} = 6,878 \text{ kWh} \cdot \frac{3,1\%}{t_{endurance, Csehország}} = 0,4961 \text{ kW}$$

Így az FREC-006 és 007 fejezetek eredményei alapján, a rosszabb esetet alapul véve, 0,54 kW érdemes feltételezni, mint az akkumulátorban termelődő hőáram.

#### 4. Hőtani - áramlástani modellezés

Konceptcionális vizsgálatot és tervezést követően kijelenthető, a versenyszabályzat alapján az akkumulátorhűtés módjának leginkább a léghűtés felel meg. Megoldandó feladat, hogy a cellatestekre és a cellafülekre egyaránt megfelelő mennyiségű hűtőlevegő jusson. Hogy ezt a megfelelő mennyiséget meghatározzam, hőtani-áramlástani szimulációknak szükséges alávetnem az akkumulátor belső kialakítását, majd úgy rendezni a cellatömböket, hogy azokat az autón kívülről beszívott levegő egyenletesen tudja hőmérsékleten tartani.

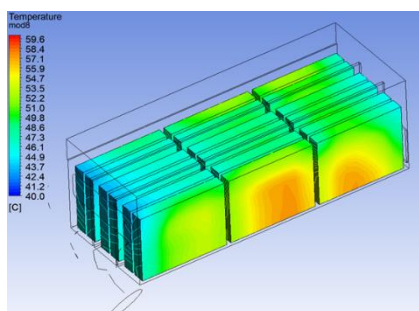
Az akkumulátor konfigurációja, melyhez nem nyúlhatok, a következő: 144s3p, vagyis a cellákat először párhuzamosan kötve 3-as egységekre osztjuk (modulok), majd ezekből 144-et sorosan építünk be. Ez 432 cellát jelent. Egy ilyen sok elemből álló, biztonságkritikus rendszer elektronikai és mechanikai kialakítása, felügyelő rendszere túlságosan összetett felépítésű, hogy egy végeselemes programban hatékonyan lehessen vizsgálni, egyszerűsíteni szükséges.[5] A geometriai egyszerűsítések következtében állt elő egy kiinduló modell, melynek negatívját is elkészítettem, hogy azt, mint a hűtőlevegő térfogatáramként funkcionáló térrészt tudjak használni a végeselemes programban. A kiinduló modellt és a levegő be-, és kilépési nyílásait az 1. ábra mutatja.



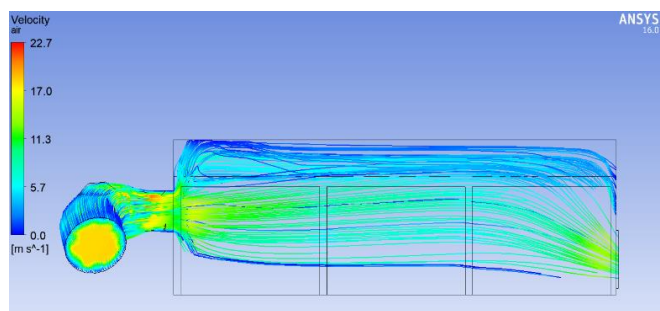
1. ábra. A kiinduló geometriai modell

Lipo cellák lévén, lítium-polimer anyagtulajdonságokat alkalmaztam [6] a cellákat jelentő tömbökre, vagyis a már említett cellahármasokra. A modell felépítése során a nyílásokon túl megadtam a cellatömbök, mint hőforrások hővezetési és hőátadási együtthatóit, a belépő levegő térfogatáramát és hőmérsékletét és kiinduló hőmérsékletet. A vizsgálatok során paramétereztem a be-, és kilépőnyílások méretét és pozícióját, illetve bizonyos terelőelemeket is építettem be az áramlási térbe, hogy a cellák hőeloszlása minél egyenletesebb legyen, ezek hatásait figyelembe véve közelítettem a végleges, autóba építendő megoldáshoz. Az egyes kialakítások milyenségét az átlagos modulhőmérséklet – térfogatáram, maximális modulhőmérséklet-térfogatáram diagramok alapján, az egyenletes hőmérséklet eloszlás alapján, és a nyomásesés alacsony szinten történő tartása alapján ítélt meg. A nyomásesésre a korlátozottan rendelkezésre álló, akkumulátorhűtésre fordítható teljesítmény miatt kellett ügyelni, melyet az autó kifeszültségű akkumulátorából oldunk meg. Ez 160 W-ot jelent. Hogy pontosan mely típusú ventilátorok, milyen elrendezésben és mennyiségben alkalmasak a kiszámolt, szükséges, 0,178 m<sup>3</sup>/s előállítására, nyomásesés-térfogatáram diagram segítségével vizsgáltam meg, és jutottam el – az általam kialakított belső elrendezés görbéjének felvétele után.

A kutatómunka alapján kijelenthető, hogy a 2017-es modell kialakítása sem átáramoltatott levegőmennyiség, sem hőmérsékleteloszlás, sem pedig beömlőnyílások pozíciója alapján nem volt megfelelő, e tényezők okozták a versenyeken tapasztalt akkumulátor túlmelegedési problémákat. Az új elrendezéssel és hűtéssel az átlaghőmérséklet 50°C-ra adódott 40°C-os külső (és kiinduló) hőmérsékletet feltételezve, míg a maximális hőmérséklet sem éri el az 60°C-ot. A biztonsági



2. ábra. A hőmérséklet eloszlása



3. ábra. A hűtőlevegő útja és sebessége

tényezőt egyfelől a 40°C-os kiinduló hőmérséklet, másfelől – és nagyobb részben – az egyszerűsített geometria miatt csökkent hőleadó felület nagysága jelenti. A szimmetria, és a beömlő jelentette nagyobb számítási igény miatt csak a modell felével dolgoztam, ezt jól mutatja a 2. ábra, amely egyébként a hőmérséklet-eloszlást is ábrázolja. A 3. ábrán a légáramlatok sebességeloszlását ábrázoltam.

## 5. Konklúzió és fejlesztési lehetőségek

A vizsgálatokat Formula Student versenyautóra végeztem el, az akkumulátorhűtés-méretezési folyamat tehát így került kidolgozásra. Az általam használt modell legfontosabb bemenő paramétereit, a termelődő hőmennyiséget olyan, versenypályán használt akkumulátor által generált adatokból nyertem ki, mely konfigurációját tekintve egyezik az általam kialakítottal. A további fejlesztési irányokat illetően fontos lépés kell legyen, hogy az akkumulátor tervezésekor még nem rendelkezésre álló, akkumulátor-szintű adatsorok nélkül is képesek legyünk hőmennyiséget meghatározni. Ennek egy lehetséges módja lehet, hogy egy darab cella letesztelése alapján alkotunk olyan hőtani modellt, melyből kinyerhető a cellák összes belső ellenállása, a beépített áramutakéval egyetemben. A vizsgálatra – természetesen a cellatesztet követően – a MATLAB Simulink moduljának Racing Lounge – Battery Modelling funkciója lehet alkalmas, melyben áramkörökkel tudjuk modellezni a cellákat. Az itt alkotott modellek bemenetére definiálhatjuk az Endurance versenytávok alatt gyűjtött adatainkat - a feszültség és áram görbéket -, hogy pontos, e cikkben használt állandósult állapot béli vizsgálat helyett időben változó, tranziens jelenségekként írjuk le az akkumulátorok melegedését. E melegedési értékeket pedig be tudjuk táplálni az ebben a cikkben is használt ANSYS FLUENT modellbe, így modellezve a még nem összeépített új akkumulátor melegedését, hűtését és elektronikai paramétereit is. E kutatás eredményeképp sikerült feltárni a meglévő akkumulátorpakk fő gyengeségét, modellt alkotva megoldást találni, és új irányokat kijelölni is.

## Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 számú projekt biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## References

- [1] [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2019/rules/FS-Rules\\_2019\\_V1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf)
- [2] Mehrdad Mastali, Evan Foreman, Ali Modjtahedi, Ehsan Samadani, Amir Amirfazli, Siamak Farhad, Roydon A. Fraser, Michael Fowler 2018 Electrochemical-thermal modeling and experimental validation of commercial graphite/LiFePO4 pouch lithium-ion batteries
- [3] Lip Huat Sawa, Yeong Jin Kinga, Ming Chian Yewa, Tan Ching Nga, Wen Tong Chongb, Nugroho Agung Pambudi 2017 Feasibility study of mist cooling for lithium-ion battery
- [4] Jiuchun Jiang, Yan Liang, Qun Ju, Linjing Zhang, Weige Zhang, Caiping Zhang 2017 An Equivalent Circuit Model for Lithium-sulfur Batteries
- [5] Zhao Lu, Xiaoling Yu, Lichuan Wei, Yalin Qiu, Liyu Zhang, Xiangzhao Meng, Liwen Jin 2018 Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement
- [6] Yuanwang Deng, Changling Feng, Jiaqiang E, Hao Zhu, Jingwei Chen, Ming Wen, Huichun Yin 2018 Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review