



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ENERGIAHATÉKONYSÁGI VERSENYAUTÓ HAJTÁSLÁNC SZIMULÁCIÓJA

TDK dolgozat

Rátki Gergely

Konzulens:

Lukács Kristóf

Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék (GPK)



Budapest, 2024

Szerzői jog © Rátki Gergely, 2024.

NYILATKOZAT AZ ÖNÁLLÓ MUNKÁRÓL

Alulírott, Rátki Gergely, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a Tudományos Diákköri Konferencia dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2024. november 10.



Rátki Gergely

A kutatás célja a BME SharkTeam versenycsapatának versenyképességének előmozdítása volt. Bár a kutatás és a számítások alapjául a valós adatok szolgáltak, a csapat stratégiai előnyének megőrzése érdekében a publikált anyagban nem a tényleges mérőszámok kerültek feltüntetésre. Ez lehetővé teszi a munka nyilvánossá tételét anélkül, hogy a csapat versenyképessége veszélybe kerülne. Bízunk benne, hogy hamarosan egy kiemelkedő eredményt érünk el, amely által a kutatásaink a konkurens csapatok figyelmének középpontjába kerülhetnek, hiszen mi magunk is előszeretettel merítünk más csapatok publikációiból.



Rátki Gergely

TARTALMI KIVONAT (ABSZTRAKT)

A BME SharkTeam által fejlesztett „Léna” nevű energiahatékonysági versenyautó egy Diesel-hibrid hajtáslánccal van ellátva, melyhez a csapat saját építésű Diesel-motort használ. A verseny célja, hogy a résztvevő csapatok a lehető legkevesebb üzemanyag felhasználásával teljesítsenek egy 16 kilométeres távot 39 percen belül. Ennek során számos paraméter befolyásolja a hatékonyságot, de két tényező különösen kiemelkedő: a jármű tömege és a motor hatásfoka.

Minél kisebb egy motor, általában annál kisebb a hatásfoka. A csapatunk talált egy optimumot, ha egy kisebb motort használnánk, akkor a hatásfok jelentősen romlana, ha növelnénk a tömeget, akkor a tömeg miatt már hatalmas hátrányunk lenne a többi csapathoz képest. A motorunk jelentősen nagyobb teljesítményre képes, mint amennyire a járműnek folyamatosan szüksége van. Az optimális üzemanyag-felhasználás érdekében a motor nem működik folyamatosan a verseny alatt, hanem szakaszosan üzemel, amikor szükséges. Mivel a motor teljesítménye és hatásfoka nem ideális a jármű konstans futásteljesítményéhez, a szakaszos üzemelés kulcsfontosságú a hatékonyság növelésében.

A kutatásom során egy LabView szimulációt készítettem, amely az adott motor teljesítménymutatói és a valós mérések alapján képes előre jelezni a jármű energiahatékonyságát különböző versenykörülmények között. A szimulációs modell segítségével megvizsgálhatók a motor hatékonyságát befolyásoló tényezők, mint például a terhelési ciklusok, az energiafelhasználás optimalizálása, valamint a motor és a hibrid rendszer együttműködésének finomhangolása.

A kutatásom célja, hogy az adott motor paramétereire leginkább illeszkedő üzemeltetési stratégiákat dolgozzak ki, amelyekkel a jármű maximális hatékonyságot érhet el a versenyen. A szimuláció eredményei alapján javaslatokat fogalmazok meg a motor működési ciklusainak optimalizálására, hogy a versenycsapatunk a lehető legjobb eredményt érhesse el a 2025-ös versenyen.

CONTENT EXTRACT (ABSTRACT)

The energy-efficient race car named "Léna," developed by the BME SharkTeam, is equipped with a Diesel-hybrid powertrain, for which the team uses a custom-built Diesel engine. The goal of the competition is for the participating teams to complete a 16-kilometer distance within 39 minutes while using the least amount of fuel possible. Several parameters influence efficiency during the race, but two factors are particularly significant: the vehicle's weight and the engine's efficiency.

Generally, the smaller an engine is, the lower its efficiency tends to be. Our team has found an optimal balance: using a smaller engine would significantly reduce efficiency, while increasing the weight would place us at a major disadvantage compared to the other teams. Our engine is capable of producing much more power than the vehicle continuously needs. For optimal fuel consumption, the engine does not run continuously during the race but operates intermittently when necessary. Since the engine's power and efficiency are not ideal for constant vehicle performance, intermittent operation is crucial to improving efficiency.

In my research, I developed a LabVIEW simulation that, based on the engine's performance metrics and real-world measurements, can predict the vehicle's energy efficiency under various race conditions. The simulation model allows us to examine factors that influence the engine's efficiency, such as load cycles, optimization of energy usage, and fine-tuning the cooperation between the engine and the hybrid system.

The goal of my research is to develop operational strategies that best fit the engine's parameters, enabling the vehicle to achieve maximum efficiency during the race. Based on the simulation results, I will propose recommendations for optimizing the engine's operating cycles so that our race team can achieve the best possible results in the 2025 competition.

TARTALOM

TARTALMI KIVONAT (ABSZTRAKT)	3
CONTENT EXTRACT (ABSTRACT)	3
1 BEVEZETÉS	6
1.1 ENERGIAHATÉKONYSÁGI VERSENY	6
1.1.1 TÖRTÉNETE	6
1.1.2 SZABÁLYOK ÉS REKORDOK	6
1.2 BME SHARKTEAM	7
2 ELMÉLETI ÁTTEKINTÉS	8
2.1 FUTÁSTELJESÍTMÉNY IGÉNY KOMPONENSEI	8
2.1.1 LÉGELLENÁLLÁS	8
2.1.2 GÖRDÜLÉSI ÉS KANYARELLENÁLLÁS	9
2.1.3 EMELKEDÉSI ELLENÁLLÁS	10
2.1.4 GYORSÍTÁSI ELLENÁLLÁS	10
2.2 HAJTÁSLÁNC ELEMELK	11
2.2.1 DIESEL-MOTOR	11
2.2.2 LENDKERÉK	12
2.2.3 BLDC MOTOR	13
2.2.4 SZUPERKAPACITÁS, MINT ENERGIATÁROLÓ	14
2.2.5 LIPO AKKUMULÁTOR	15
2.2.6 ÖNMŰKÖDŐ TENGELYKAPCSOLÓK	16
2.2.7 FOGASSZÍJHAJTÁS	16
2.3 SZIMULÁCIÓS MÓDSZEREK	17
2.3.1 DINAMIKAI HAJTÁSLÁNC SZIMULÁCIÓ NUMERIKUSAN	17
2.3.2 LABVIEW	18
2.3.3 VÁLTOZÓ IDŐFELBONTÁS	19
3 BME SHARKTEAM HAJTÁSLÁNCÁNAK BEMUTATÁSA	20

4	SZIMULÁCIÓ FELÉPÍTÉSE	21
4.1	ADATOK	21
4.1.1	BEOLVASÁS	21
4.1.2	2 ÉS 3 DIMENZIÓS INTERPOLÁCIÓ	22
4.1.3	PÁLYAADATOK	23
4.2	IDŐMENEDZSMENT	24
4.3	INDÍTÁS	25
4.4	DIESEL-MOTOR	27
4.5	HIBRID RENDSZER	28
4.6	TENGELYKAPCSOLÓK	29
4.7	FUTÁSTELJESÍTMÉNY SZÁMÍTÁS	31
4.8	INTEGRÁLÁS	33
4.9	MEGJELENÍTÉS	37
4.10	FÁJLBÓL INDÍTÁS	38
4.11	KIMENETEK	38
5	MÉRÉSEK	39
5.1	VILLANYMOTOR FÉKPADOZÁSA	39
5.1.1	CELLA KALIBRÁCIÓ	40
5.1.2	MÉRŐ SZOFTVEREK	40
5.1.3	ADATOK KIÉRTÉKELÉSE	40
5.2	VERSENYAUTÓ TESZTELÉSE	41
5.2.1	TESZTRENDSZER	41
5.2.2	ADATOK KIÉRTÉKELÉSE	41
6	ÖSSZEGZÉS	42
6.1	BEFEJEZÉS	42
7	IRODALOMJEGYZÉK	43
8	ANGOL NYELVŰ ÖSSZEFOGLALÓ (SUMMARY)	46
9	ÁBRAJEGYZÉK	47

1 BEVEZETÉS

1.1 ENERGIAHATÉKONYSÁGI VERSENY

1.1.1 TÖRTÉNETE

A világ legnagyobb energiahatékonysági versenye, amit évről évre közép- és felsőoktatási intézményekben tanuló fiatal mérnök csapatoknak szerveznek meg. A maraton története egészen 1939-ig nyúlik vissza, amikor a versenyt azóta is szervező olajvállalat felsővezetői fogadást kötöttek egymással, hogy ki tud tovább menni adott mennyiségű üzemanyaggal. A kihívás a vállalat falain belül zárt körben évekig működött míg végül 1985-ben megszervezték az első olyan versenyt, ahova külsős csapatokat is meghívtak. A 2025-ös lengyel verseny tehát a jubileumi 40. verseny lesz. Az eredeti kategória a prototípus belső égésű kategória azóta kibővült városi autó kategóriára is, valamint hajtás szerint 2 új kategóriával, az elektromossal és a hidrogén üzemanyagcellással.

1.1.2 SZABÁLYOK ÉS REKORDOK

A verseny alapvetően úgy zajlik, hogy a csapatoknak egy nagyjából 16 kilométeres távot kell teljesíteniük 39 percen belül, ami nagyságrendileg 25 km/h átlagsebességnek felel meg. Az utóbbi években a verseny egy régi Formula 2 szabvány pályán volt megrendezve, a csapatok körbe-körbe mennek rajta. A versenyen egyszerre több tíz ugyanolyan kategóriájú autót kiengednek a pályára, ezért habár nem a pályapozíció számít, hanem az idő, azért nagyon sokat számíthat az is, hogy kap-e egy versenyautó egy kis szélárnyékot, vagy esetleg leszorul-e az optimális ívről a többiek miatt. A versenyen az a csapat nyer, amelyik a kategóriájában a legkevesebb üzemanyagot fogyasztotta. A versenyt követően a szervezők az eredményt átszámolják egy érthetőbb számértékre, például a ICE kategóriánál arra, hogy egy liter üzemanyaggal a csapatok mekkora távot lettek volna képesek megtenni.

A világrekord a belsőégésű prototípus kategóriában a Microjoule (Saint-Joseph La Joliverie) csapata tartja 3771 km/l -es eredménnyel, amely egy Budapest-Balaton távolságnak felel meg, Barcelona érintésével.

A szabályok az évek során folyamatosan változnak, és habár a rekordot tartó csapat lassan 30 éve bajnoka egyhuzamban a kategóriának, a rekordot megközelíteni sem tudták az elmúlt években.

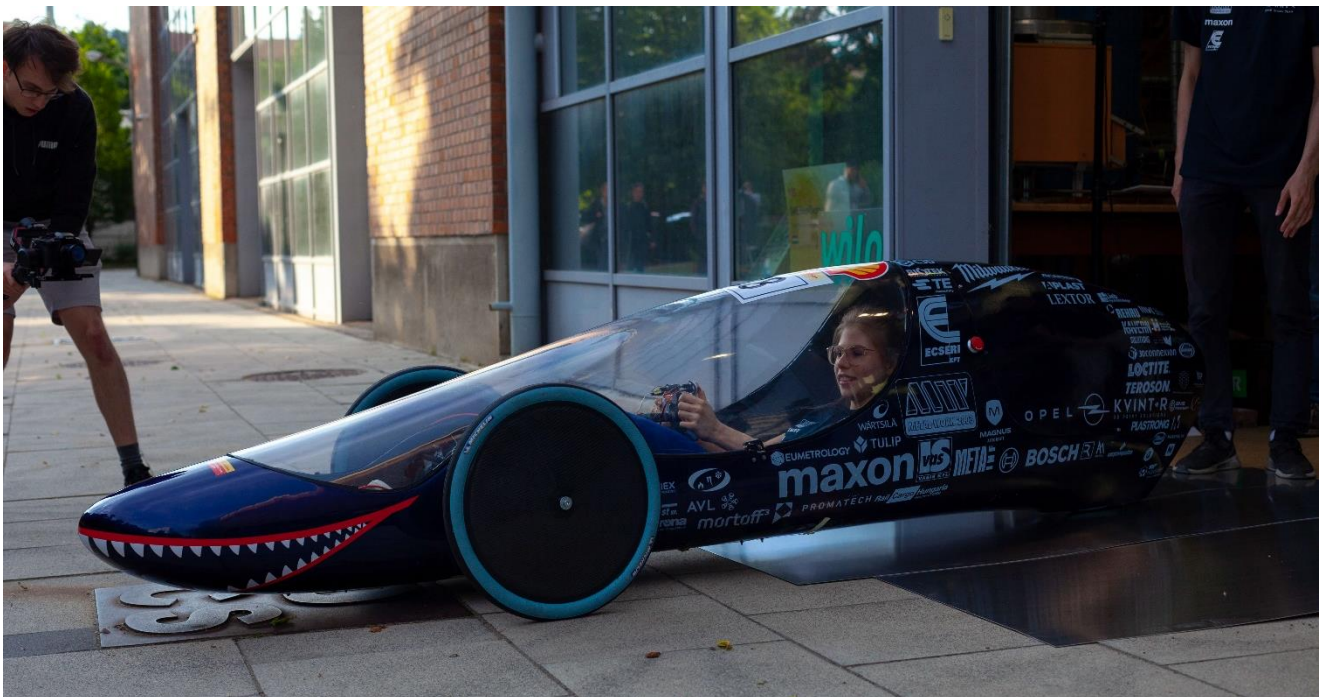
Jött egy fontos szabálymódosítás a 2024-es versenyre, amely értelmében mindenkinek mérni fogják a villamos fogyasztását a versenyen egy jouleméter segítségével, és azt rendkívül előnytelenül számítják utána vissza üzemanyag fogyasztásra. Ennek a szabálymódosításnak a hatására a BME SharkTeam a saját fejlesztésű Diesel-motorjára egy hibrid rendszert fejlesztett a szezon során. Jelen dolgozat ennek a hibrid hajtásláncnak az optimalizálására irányul.

1.2 BME SHARKTEAM

Ebben a kutatásban a BME SharkTeam energiahatékonysági versenycsapatának idei versenyautója „Léna” lesz a vizsgálat tárgya.

A csapat 2014-ben alakult először, amikor lelkes hallgatók kitalálták, hogy Diesel-motorral hajtott prototípus versenyautót fognak fejleszteni egy 2015-ös energiahatékonysági versenyre. Ez sikerült is a csapatnak, akik 2015-ben Rotterdamba utaztak első versenyautójukkal Mr. Shark-kal. Ez a kezdetleges konstrukció az utolsó pillanatban ugyan elkészült, de nem volt versenyképes. Miután hazajöttek a versenyről, a tapasztalatok alapján elkezdtek tervezni egy ambiciózus versenyautót, Lénát, aminek sajnos az építése 2016 végén félbemaradt, ezzel pedig a csapat is hibernálódott. A tervek és a meglévő alkatrészek bekerültek egy raktárba, és egészen 2022-ig ott porosodtak. Végül 2022-ben pár lelkes alapszakos, a Gépészmérnöki Karon tanuló hallgató újraélesztette a BME SharkTeam versenycsapatot. A csapat legfőbb célkitűzése Léna befejezése és versenyképessé tétele lett.

Az autó egy önhordó szénszálas szendvics vázra épült. A saját fejlesztésű és építésű egyhengeres Diesel-motor tavaly kapott egy superkapacitoros, két BLDC motoros hibrid hajtásláncot, amelyet a teljes autó rendszerével együtt több saját STM32 alapú mikrokontrollerrel vezérel. A teljes autóban CAN-busz és Bluetooth kommunikáció van. Léna egyedi tárcsafékkrendszere és futóműve pedig lehetővé teszi, hogy a megtervezett rendszerek tökéletesen illeszkedjenek a pályára.



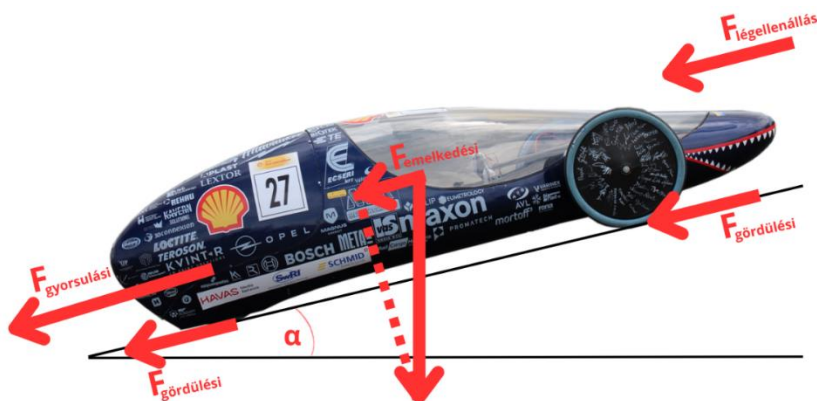
1-1. ábra Léna kigurul a műhelyből a BME SharkTeam rollout rendezvényén (saját kép)

2 ELMÉLETI ÁTTEKINTÉS

2.1 FUTÁSTELJESÍTMÉNY IGÉNY KOMPONENSEI

Egy jármű futásteljesítmény-igény dinamikai modelljének meghatározása esetén alapvetően 4 fő komponenst kell figyelembe venni ($F_{\text{lég}}$; $F_{\text{gördülési}}$; $F_{\text{emelkedési}}$; $F_{\text{gyorsítási}}$) [1]

$$F_{\text{ellenállás}} = F_{\text{lég}} + F_{\text{gördülési}} + F_{\text{emelkedési}} + F_{\text{gyorsítási}} \quad (2.1)$$



2-1. ábra Hosszirányú erőhatások emelkedőn gyorsító autó esetén (saját szerkesztés)

2.1.1 LÉGELLENÁLLÁS

A légellenállás a közegellenállásból adódó fizikai erő. A jelenség során a mozgó test levegő részecskékkal való találkozásából adódó erő. A légellenállás az alábbi képlettel számítható: [2]

$$F_{\text{légellenállás}} = \frac{1}{2} \rho_{\text{levegő}} \Delta v_{\text{jármű}}^2 c_d A_{\text{jármű}} \quad (2.2)$$

$F_{\text{légellenállás}}$	légellenállási erő	$[N]$
$\rho_{\text{levegő}}$	levegő sűrűsége	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$\Delta v_{\text{jármű}}$	jármű-közeg sebesség különbsége	$\left[\frac{m}{s}\right]$
c_d	légellenállási tényező	$[-]$
$A_{\text{jármű}}$	jármű homlokfelülete	$[m^2]$

A képlet alapján a légellenállási erő akkor lép fel szélcsendben, ha a jármű mozgásban van ($v_{\text{jármű}} > 0$). A levegő sűrűsége egy adottsága a versenypályának, azon a verseny csapat nem tud változtatni, ezzel szemben a légellenállási tényező és a homlokfelület a jármű tervezésekor történő megfelelő megválasztásával a légellenállási erő csökkenthető. A képletből még egy fontos következtetést lehet levonni, mégpedig, hogy a légellenállási erő a sebességgel négyzetesen arányos.

A bemutatott (2.2) képletben fontos figyelembe venni az adott komponensek vektorjait, és fontos kiemelni, hogy kanyarban megváltozik a jármű légellenállási tényezője. [3]

2.1.2 GÖRDÜLÉSI ÉS KANYARELLENÁLLÁS

A gördülési ellenállás a jármű kerekeinek és a jármű által használt út felületeinek érintkezéséből adódó, a mozgás irányával ellentétes erő. Ez az erő több tényezőből adódik össze melyeket egy gördülési ellenállási tényezőbe összegez a szakirodalom, ezen tényező használatával az alábbi képlet adja a gördülési ellenállási erőt: [1]

$$F_{\text{gördülési}} = m_{\text{jármű}} g c_{rr} \quad (2.3)$$

$F_{\text{gördülési}}$	gördülési ellenállási erő	[N]
$m_{\text{jármű}}$	jármű tömege	[kg]
g	nehézségi gyorsulás	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
c_{rr}	gördülési ellenállási tényező	[-]

A képlet alapján ezen tényező független a sebességtől. Viszont ez csak részben igaz, tekintettel arra, hogy a sebesség növekedésével a gumiabroncsok hőmérséklete növekedni fog, amely számos tanulmány szerint növeli a gördülési ellenállási tényezőt, és ezáltal az ellenálló erőt is. [4]

A fenti leegyszerűsített (2.3) képlet alapvetően a lineáris mozgással foglalkozik, viszont kanyarodó mozgás esetén is lehet használni, ha a kanyarban a keréken ébredő többlet gördülési ellenállás beleszámolódik a gördülési ellenállási tényezőbe. [5]

A gördülési ellenállási tényező jelentős hatással van a teljes jármű ellenállására, éppen ezért kiemelten fontos annak alacsonyan tartása. Viszont ez a tényező magába integrálja a csapágyak és a futómű esetleges hibáit is. Ha például a kerékdőlés vagy az összetartás nem pontos, a kerekek folyamatosan oldalirányú erőhatásoknak vannak kitéve, amelyek következtében a gördülés helyett enyhe csúszás következik be. Ez nem csupán a gumiabroncsok élettartamát csökkenti le, de a gördülési ellenállási tényezőben is megjelennek, hatalmas energiaveszteséget okozva az autónak. [6]

2.1.3 EMELKEDÉSI ELLENÁLLÁS

Az emelkedési ellenállás valójában a helyzeti energiakülönbség leküzdéséhez szükséges erő. Azért érdekes ez a tényező, mert ezen tényező leküzdése nem veszteség, amennyiben egy zárt körpályán történik a mérés. Az energiamegmaradás törvénye alapján az emelkedésre fordított energia a lejtőn 100%-ban visszanyerhető. [7]

$$F_{\text{emelkedési}} = m_{\text{jármű}} g \sin \alpha \quad (2.4)$$

$F_{\text{emelkedési}}$	emelkedési ellenállási erő	$[N]$
$m_{\text{jármű}}$	jármű tömege	$[kg]$
g	nehézségi gyorsulás	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
α	emelkedő szöge	$[^\circ]$

2.1.4 GYORSÍTÁSI ELLENÁLLÁS

A jármű gyorsításakor a gyorsulásból eredő ellenállás fontos szerepet játszik. Az m tömegű testnek, hogy gyorsulni tudjon, le kell küzdenie a tömeg és jármű esetén a kerekek tehetetlenségéből fakadó ellenállást. Noha a kerekek tehetetlensége jellemzően kisebb, a pontos szimuláció érdekében ezt is figyelembe kell venni. A test tehetetlensége lendületet ad az autónak, és a körpályán fellépő emelkedési ellenálláshoz hasonlóan itt sincs közvetlen veszteség ameddig nem égetjük el az energiát fékezéssel, mivel a gyorsítási energia mozgási energiává alakul. Az energiamegmaradás törvénye értelmében a felgyorsított jármű a gyorsító erő megszüntetésekor ezt az energiát meg tudja tartani. [7]

$$F_{\text{gyorsítási}} = m_{\text{jármű}} a_{\text{jármű}} k_{\text{jármű}} \quad (2.5)$$

$F_{\text{gyorsítási}}$	emelkedési ellenállási erő	$[N]$
$m_{\text{jármű}}$	jármű tömege	$[kg]$
$a_{\text{jármű}}$	jármű gyorsulás	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
$k_{\text{jármű}}$	forgási tömegtényező	$[-]$

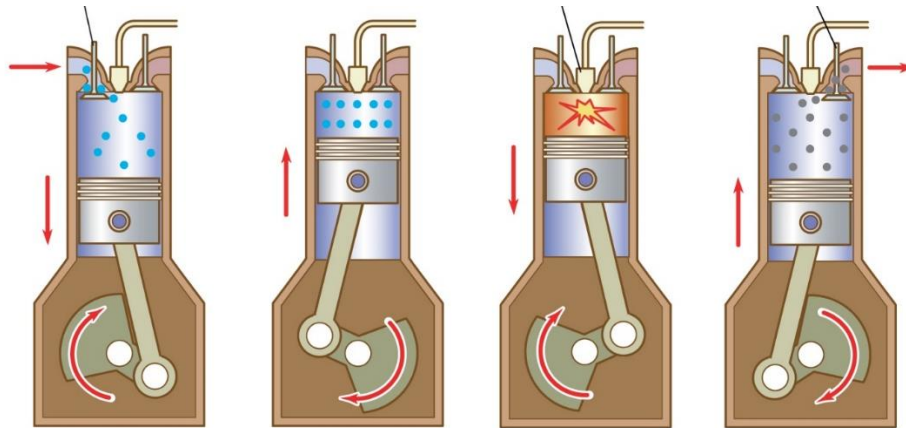
Az egyenletben a $k_{\text{jármű}}$ forgatási tömegtényező kifejezi a rotációs és transzlációs tömegek viszonyát, amelyet a $(1+\text{keréktehetetlenség tényező})$ formátumban lehet a képletbe illeszteni. Ezzel a kerék tehetetlenségéből adódó ellenállás figyelembevétele is biztosított, amely a gyorsulás során fellépő tehetetlenségi erők hatását hivatott modellezni. A forgatási tömegtényező jelentős szerepet játszik a jármű dinamikai viselkedésének pontosabb leírásában, ezért fontos számolni vele. [1]

2.2 HAJTÁSLÁNC ELEMEEK

2.2.1 DIESEL-MOTOR

A négyütemű Diesel-motor működése alapvetően az alábbi ütemekkel írható le: [8]

1. **Szívás** a motor beszívja a tiszta hideg levegőt
2. **Sűrítés** a beszívott levegőt összesűríti, amitől a levegő felhevül
Égés a sűrített, felhevült levegőben előállnak az égés feltételei, és begyullad a befecskendezett porlasztott üzemanyag.
3. **Expanzió** az égés hatására megnövekedett hőmérsékletű és nyomású gáz munkát végez ahogy a dugattyú a felső holtpontból az alsó holtpont felé mozog.
4. **Kipufogás** az égéstermékek a kipufogó szelepeken keresztül távoznak.



2-2. ábra Négyütemű Diesel-motor működése [8]

2.2.1.1 HATÁSFOK

A belsőégésű motorok között relatív nagy hatásfokkülönbségek vannak, többek között a működési elvből és a körfolyamatokból adódóan. [9] A Diesel-motorok termikus hatásfoka jellemzően magasabb, mint a benzines vagy etanolos motoroké. Ennek oka a Diesel-motor működési elve, ahol a magas sűrítési arány, valamint a gyújtás avagy öngyulladás jelentősége kulcsfontosságú. [10] [11]

Jelenleg a legnagyobb hatásfok, amit Diesel-motorból ki tudott bárki hozni 53,09% effektív hatásfok. [12]

A közúti járművek motorjai a szakirodalom szerint ennél alacsonyabb tartományban 30-45% között mozognak. Ez az effektív hatásfok több komponensből tevődik össze, melyek közül 4-et emel ki a szakirodalom, az égési veszteségeket, a termodinamikai veszteségek (a körfolyamat alapvető vesztesége és a falak felé történő hőátadásokból származó veszteség), gázcsere veszteség (szívás és kipufogás áramlási vesztségei), mechanikai veszteségek (fogaskerekek, csapágyak, stb.): [13]

$$\eta = \eta_{\text{égési}} \cdot \eta_{\text{termodinamikai}} \cdot \eta_{\text{gázcsere}} \cdot \eta_{\text{mechanikai}} \quad (2.6)$$

2.2.1.2 INDÍTÁS

A Diesel-motorok esetén a befecskendezett üzemanyag öngyulladása a komprimált levegő felmelegedésének hatására következik be, így nincs szükség gyújtógyertya alkalmazására. Az indítási folyamat úgy zajlik, hogy a forgattyús tengelyt és ezáltal a lendkereket fel kell pörgetni egy megfelelő fordulatszámra. A kívánt fordulathoz elérését követően megkezdődik a befecskendezés, és után elindul az égés folyamata a motorban. Ezen folyamathoz, egy erős indítómotorra van szükség, amely általában egy villamos gép, amelynek az a feladata, hogy az égés előtt felpörgetse a főtengely komponenseit. Ezt a folyamatot dekompresszor segítségével lehet segíteni, amely például lehetővé teszi a kipufogó szelepek folyamatos nyitvatartását, csökkentve ezzel a motor felpörgetéséhez szükséges nyomatékot. Amíg a motor és a lendkerék el nem éri a megfelelő fordulatszámot, a hengerben lévő levegő nem komprimálódik [10] [11]

A Diesel-motorok indítási módszerei sokféle technológiát alkalmaznak, mivel ezek a motorok viszonylag nagy nyomatékot igényelnek már az indításhoz is. Az egyik leggyakoribb módszer a fogaskerékes indító, amely egy villamos géppel, például egy indítómotorral kapcsolódik a motor főtengelyéhez egy Bendix mechanizmus segítségével. A Bendix rugós kuplung révén a villamos gép forgatja meg a főtengelyt, és a motor elindulását követően az indítómotor szabadonfutóra vált. Egy másik módszer az úgynevezett agymotoros indítás, amit például a BME SharkTeam is alkalmaz. Itt a villamos gép közvetlenül a főtengelyre van szerelve, és ezzel közvetlenül forgatja meg azt, elkerülve az áttételek használatát, ami gyorsabb és hatékonyabb indítást tesz lehetővé, valamint a főtengely forgási energiáját képes akár generátorként elnyelni.

2.2.2 LENDKERÉK

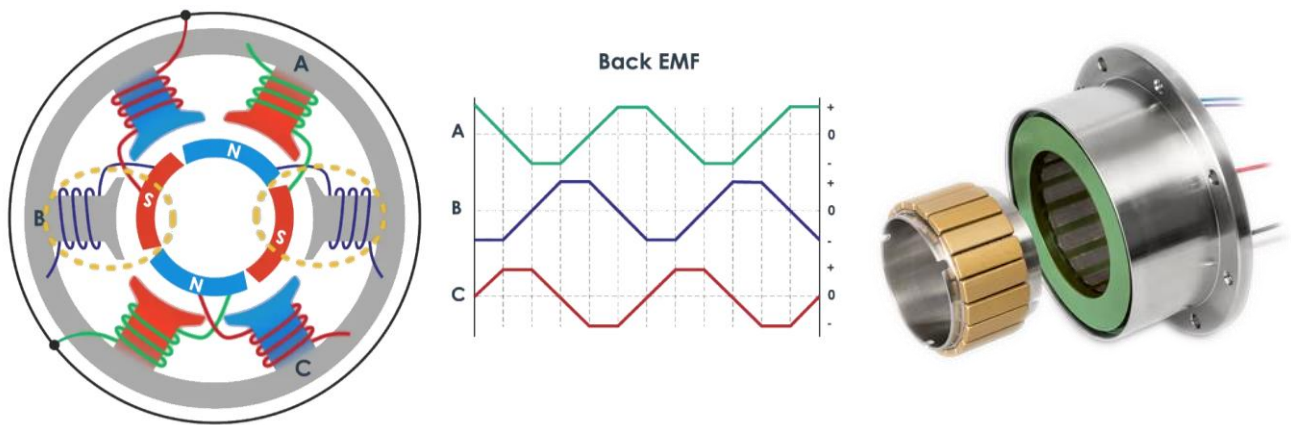
A lendkerék a forgattyús (fő-) tengely egyik alapvető alkatrésze, amelynek az a feladata, hogy az inerciájával kiegyenlítő hatást gyakoroljon a forgó tengelyre. Az elsődleges szerepe az, hogy a forgási energia tárolásával és felszabadításával kiegyenlítse a motor működése során keletkező forgási egyenletlenségeket, amelyek például egyhengeres motoroknál jellemzőek. [14]

A lendkerék forgási energiát tárol, amelynek a legfontosabb paramétere a tehetetlenségi nyomaték. [15] Ezen tényező a képletéből ($I = m \times r^2$) adódóan a tengelytől minél távolabb (r), a lehető legnagyobb tömeg (m) segítségével érhető el a legnagyobb tehetetlenségi nyomaték. [7] Éppen ezért használnak előszeretettel olyan megoldásokat, hogy a kikönnnyített lendkerék szinte küllőkkel tart egy nagyobb tömegű, akár eltérő anyagú gyűrűt, amely a tényleges tehetetlenséget adja. [10]



2-3. ábra Lendkerék egy Trevithick
1802-es gőzmozdonyon [15]

2.2.3 BLDC MOTOR



2-4. ábra BLDC motor felépítése és vezérlése [16] ; Maxon motor DT65M [17]

2.2.3.1 MŰKÖDÉSI ELV

A BLDC motorok tükörfordításban kefe nélküli egyenáramú motorok, de a működésük ennél komplexebb. Habár a motorvezérlő tényleg egyenáramról kapja az energiát, az ESC (Electronic Speed Controller - motorvezérlő) egy beépített inverter segítségével háromfázisú, trapézjel alakú váltakozó feszültséget hoz létre. Ezt a feszültséget a motor tekercseire adja, így a forgórész mozgása szinkronizálódik az állórész által létrehozott forgó mágneses mezővel. [16]

A BLDC motorok tehát gyakorlatilag szinkron gépként működnek, mivel a forgórész sebessége pontosan követi az elektronikus vezérlés által meghatározott mágneses mező forgási sebességét. Ez a működési elv adja a motorok nagyfokú hatékonyságát és pontosságát: a kefe nélküli kialakításnak köszönhetően elkerülhető a mechanikai érintkezésből eredő kopás és energiaveszteség, míg a szinkron működés stabil fordulatszámot és rendkívül magas, akár 90% feletti hatásfokot biztosít. [17]

2.2.3.2 INDÍTÁS

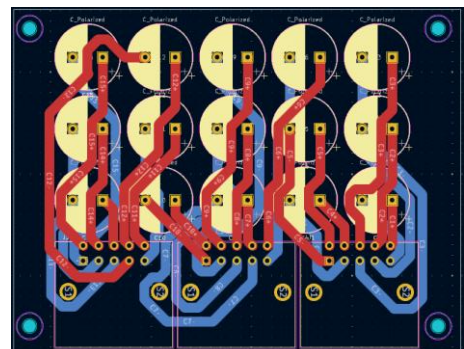
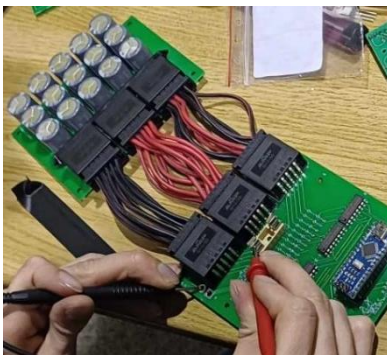
A BLDC motorok indításában és vezérlésében elengedhetetlen, hogy a vezérlőegység pontosan ismerje a forgórész helyzetét a motor pozíciójának megfelelő szinkronizálásához. Szenzor nélküli motorok esetén az egyik leggyakoribb indítási technika a remegtetés. Ezen módszer azon alapszik, hogy a vezérlő rövid impulzusokat küld a motor tekercseire, amelyek rezgéseket váltanak ki a forgórészben. A generált mozgás elindítja a motort, és ahogy a forgórész elkezd mozogni, úgy kialakul a back-EMF (visszaható feszültség), amely a motor forgásából ered. A vezérlő a visszaható feszültség segítségével képes meghatározni a forgórész pozícióját és sebességét, ezáltal folyamatos és precíz működést biztosítva. A remegtetés tehát nemcsak a motor elindítását szolgálja, hanem alapot ad a back-EMF generálódásának, amely lehetővé teszi a pozíció folyamatos monitorozását és szabályozását a vezérlő számára. [18] [19]

2.2.3.3 GENERATÍV ÜZEM

A BLDC motorokat nemcsak motorüzemben, hanem generátorként is alkalmazzák, ahol az állandó mágneses forgórész mozgásából elektromos energia keletkezik. Generátorüzemben a tekercseken váltakozó feszültség indukálódik, amelyet az inverter (ESC - Electronic Speed Controller) segítségével visszaalakítanak egyenárammá. Ez lehetővé teszi az energia tárolását vagy különböző alkalmazásokban történő felhasználását. Az inverter egyenirányítja és stabilizálja a generált feszültséget, biztosítva ezzel a megfelelő feszültség- és áramellátást az akkumulátorok, vagy egyéb energiatárolók számára. [20]

Fontos megemlíteni, hogy a közvetlen kapcsolat miatt nem lehet a motort lekapcsolni a tengelyről, ezáltal ha a tengely forog, és a motor se nem hajt, se nem generál, akkor a vasvesztéssel számolni kell, ezt az energiát hővé alakítja.

2.2.4 SZUPERKAPACITÁS, MINT ENERGIATÁROLÓ



2-5. ábra Szuperkondenzátorok a BME SharkTeam hibrid rendszerében (1. 3. saját kép) (2. [22])

A szuperkapacitások (más néven szuperkondenzátorok) olyan fejlett energiatároló eszközök, amelyek a hagyományos akkumulátorok és kondenzátorok tulajdonságait ötvözik. Különösen magas teljesítményt nyújtanak, képesek gyors töltésre és kisülésre, ugyanakkor nagy kapacitással rendelkeznek, amely lehetővé teszi számukra a gyors energiaátvitelt nagy áramok formájában. Működésük az elektrokémiai duplaréteg kondenzációs elvén alapul, ahol az elektromos energia tárolása az elektrolitban lévő ionok mozgásán alapszik. A szuperkapacitások legfontosabb jellemzője az alacsony belső ellenállás, amely biztosítja a gyors töltést és a kiszolgálható áram magas szintjét. [21] [22]

2.2.4.1 HIBRID SZUPERKAPACITÁS

A hibrid szuperkapacitások az energiatárolás terén forradalmi megoldást jelentenek, mivel ötvözik a szuperkapacitások gyors töltési és kisütési képességeit a lítium-ion akkumulátorok magas energiatárolási kapacitásával. Ezek az eszközök párhuzamosan működnek, lehetővé téve az optimális energiatárolást és teljesítményt olyan alkalmazásokban, ahol a gyors energialeadás és -felvétel elengedhetetlen. [23]

2.2.4.2 GENERÁTOROS TÖLTÉS

A hibrid szuperkapacitások töltése során a tengely regeneratív fékezésből származó mozgási energia elektromos energiává alakul, amelyet az ESC invertere után az energiatároló rendszer képes elnyelni. Ez a folyamat azonban számos veszéllyel is járhat, például túltöltéssel vagy kiegyenlítetlen töltéssel, amelyek gyors elhasználódáshoz vagy akár tűzveszélyhez vezethetnek. Különösen többcellás hibrid szuperkapacitás-pakkok esetében kiemelten fontos a feszültségmonitorozás és a megfelelő töltési áramok betartása a Battery Management System (BMS) segítségével. A BMS folyamatosan figyelemmel kíséri a feszültséget és az áramot, biztosítva ezzel a rendszer integritását és védelmét a különböző kockázatokkal szemben, ezáltal elengedhetetlen a biztonságos működéshez, mivel a szuperkapacitások maximális feszültségkülönbsége kritikus lehet. [24]

A modern BMS nemcsak a feszültség és áram monitorozására képesek, hanem aktív és passzív kiegyenlítési funkciókat is biztosítanak a cellák között. A passzív kiegyenlítés során a BMS az egyik cellában felesleges töltést elvezet, például ellenállások segítségével, hogy csökkentse annak feszültségét a leggyengébb cella szintjére. Az aktív kiegyenlítés ezzel szemben lehetővé teszi a töltés átcsoportosítását a cellák között, így megőrizve az energiát, miközben a feszültségszintek kiegyenlítése történik. Ez a két technika segít optimalizálni a teljesítményt és meghosszabbítani az energiatároló rendszer élettartamát, mivel biztosítja, hogy minden egyes cella egyenlő arányban vegyen részt a töltési és kisütési folyamatokban. [25]

A szuperkapacitásoknál és akkumulátoroknál a 100%-os töltöttség és a lemerült állapot közötti feszültségkülönbség kritikus fontosságú. Például egy lítium-ion akkumulátor esetén a maximális feszültség 4,2 V, míg a lemerült állapot körülbelül 3,0 V, ami 1,2 V-os különbséget jelent. A szuperkapacitások esetében a feszültségkülönbség 2,7–3,0 V között mozog, attól függően, hogy milyen típusról van szó. [26]

2.2.5 LiPo AKKUMULÁTOR

A LiPo (lithium-polymer) akkumulátorok nagy energiasűrűségű, könnyű energiatárolók, amelyek a lítium-ion technológián alapulnak, de elektrolitként gél vagy polimer anyagot használnak. Ezek a tulajdonságok lehetővé teszik, hogy a LiPo cellák kisebbek és rugalmasabb formájúak legyenek, így jól alkalmazhatók súly- és helyérzékeny eszközökben, például drónokban, távirányítós modellekben és hordozható elektronikai eszközökben. A LiPo akkumulátorok gyors töltést és nagy áramerősségű kisütést biztosítanak, így ideálisak magas energiaigényű, gyors áramfelvételt és -leadást igénylő alkalmazásokhoz, például hibrid rendszerekben. [27] [28]

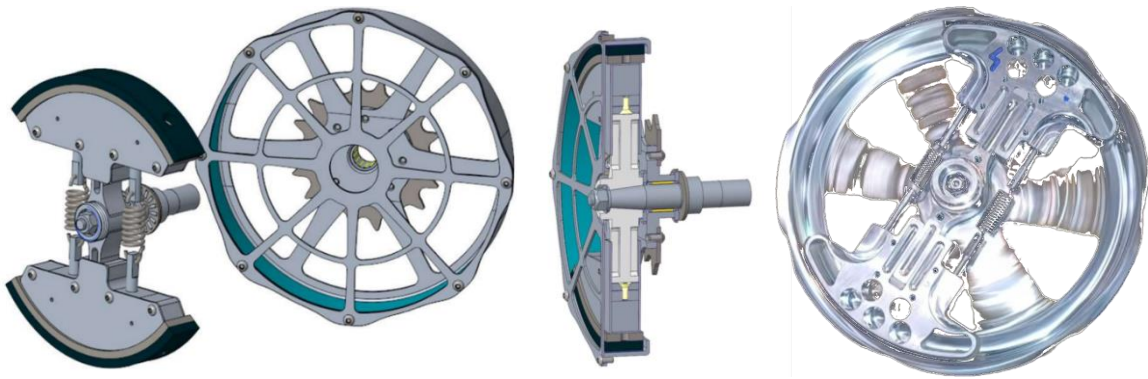


2-6. ábra LiPo akkumulátor [28]

2.2.6 ÖNMŰKÖDŐ TENGELYKAPCSOLÓK

Az önműködő tengelykapcsolók olyan mechanikai eszközök, amelyek a hajtáslánc tengelyei között automatikus kapcsolást, vagy bontást végeznek külső beavatkozás nélkül.

2.2.6.1 RÖPSÚLYOS KUPLUNG

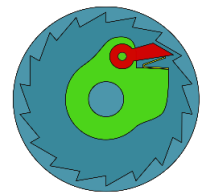


2-7. ábra A BME SharkTeam saját tervezésű röpsúlyos kuplungja [29]

A röpsúlyos kuplungok működése azon alapul, hogy a belső forgatott tengelyre rugókkal rögzített röpsúlyok vannak elhelyezve. Amikor a tengely szögsebessége növekszik, a centrifugális erő hatására a röpsúlyok szétfeszülnek. Egy előfeszített rugó viszont egy bizonyos erő határáig képes tartani a röpsúlyokat. Amint ez az erő meghaladja a rugó ellenállását, a röpsúlyok súrlódó felülete a dobhoz tapad, és megkezdí a nyomaték átvitelét. E folyamat eredményeként a két tengely végül összekapcsolódik és együtt forog. A fenti ábrán egy konkrét két röpsúlyos konstrukció látható. [29]

2.2.6.2 KILINCSMŰ SZABADON FUTÓ

A kilincsmű szabadonfutó egy tengelykapcsoló, amely lehetővé teszi, hogy az egyik tengely csak egy irányba forogjon a másikhoz képest. Ez a „racsnis” mechanizmus rugókkal ellátott kalapácsokat használ a visszahajtás megakadályozásával csökkentve a hajtáslánc veszteségeit. Hátránya a kalapácsok súrlódása, amely energiaveszteség. [30]



2-8. ábra Racsnis [30]

2.2.7 FOGASSZÍJHAJTÁS

A fogasszíjhajtás egy csúszásmentes, szinkronizált hajtási megoldás, amely a szíjhajtás előnyeit kihasználva alakkal záró kapcsolatot biztosít. Nagy hatásfokú működés érhető el vele, és kevésbé érzékeny a szennyeződésekre és az egytengelyűségi eltérésekre a hajtáslánchoz képest. [31]



2-9. ábra BME SharkTeam hátsó szíjkerék (saját kép)

2.3 SZIMULÁCIÓS MÓDSZEREK

A szimulációs módszerek alkalmazása kulcsszerepet játszik a mechanikai rendszerek és az energiafelhasználás pontos modellezésében, különösen a hajtásláncok esetében, amelyek egyesítik a mechanikai és elektromos komponensek működését. A mechanikai rendszerek szimulációja során az 1D modellek lehetővé teszik a rendszerek dinamikájának egyszerűsített, de mégis hatékony modellezését. Ezen modellek segítségével az erők és nyomatékok eloszlása, valamint a mechanikai komponensek kölcsönhatásai könnyedén követhetők a rendszerben. A hajtáslánc dinamikájának vizsgálata az diszkrét idejű szimulációk révén történik, amelyek figyelembe veszik az alkatrészek közötti mozgásokat, gyorsulásokat és a nyomatékok pillanatnyi változásait. [32]

A villamos fogyasztás szimulációja külön figyelmet érdemel a hibrid és elektromos hajtásláncok esetében, mivel az energiafelhasználás pontos modellezése alapvető a rendszer hatékonyságának értékeléséhez. Az energiamenedzsment rendszerek (EMS) az elektromos motorok működését és energiaátvitelét optimalizálják, figyelembe véve az akkumulátorok és villamos motorok közötti energiaáramlást, valamint az egyes komponensek energiahatékonyságát. A villamos fogyasztás figyelembevételével a szimulációk segíthetnek az energiafelhasználás csökkentésében és az üzemanyag-takarékosság növelésében, különösen a jármű teljesítményének különböző üzemmódjainak és ciklusainak vizsgálatával. A különböző szimulációs szoftverek, mint a MATLAB/Simulink, a LabVIEW és a Modelica, lehetővé teszik a mechanikai és villamos rendszerek együttes modellezését, és támogatják a különböző komponensek közötti interakciók alapos elemzését. [33] [34]

2.3.1 DINAMIKAI HAJTÁSLÁNC SZIMULÁCIÓ NUMERIKUSAN

A 1D dinamikai szimulációk numerikus módszerekkel a mechanikai rendszerek viselkedésének modellezésére szolgálnak, ahol a rendszer változó állapotait, mint sebesség, gyorsulás és erő, diszkrét időlépésekkel számítják ki. Ezen módszerek célja a bonyolult, nemlineáris rendszerek egyszerűsítése, miközben pontosan modellezik a fizikai folyamatokat, például a járművek hajtásláncának dinamikáját. A numerikus integrációs eljárások, lehetővé teszik a gyors, iteratív számításokat, így biztosítva a különböző paraméterek, például az erőátvitel, a nyomaték és az energiafogyasztás pontos követését. Az ilyen típusú szimulációk előnye, hogy a valóságos körülményeket figyelembe véve, különböző operatív környezetekben elemezhetők a rendszerek, miközben minimalizálják a kísérleti tesztelés szükségességét és költségeit. [35]

2.3.2 LABVIEW

A numerikus szimulációk a fizikai rendszerek viselkedését matematikai modellek alkalmazásával, részletes számítások sorozatán keresztül közelítik meg. Ezek a módszerek lehetővé teszik a pontos, részletekbe menő elemzéseket, és alkalmasak az időbeli és térbeli változások alapos vizsgálatára. Különösen hasznosak olyan mérnöki alkalmazásokban, ahol például áramlástan, elektronikai vagy mechanikai rendszerek modellezése a cél. Az ilyen szimulációk, mint a végelem módszer (FEM), biztosítják a rendszer finom részleteinek megértését és elemzését. [35] Ezzel szemben a nem numerikus szimulációk logikai alapúak, például ügynök-alapú vagy diszkrét esemény szimulációk, és inkább szabályrendszereken keresztül működnek. Ezek a módszerek gyorsabbak, kisebb számítási kapacitást igényelnek, és általában egyszerűbb folyamatok, például üzleti vagy hálózati szimulációk modellezésére szolgálnak.

A LabVIEW szoftver különösen jól alkalmazható numerikus szimulációkhoz, mivel vizuális programozási környezete lehetővé teszi komplex rendszerek, például hajtásláncok, elektronikai és mechanikai elemek részletes modellezését. Az intuitív kezelőfelület és a jelentős számítási kapacitás révén a LabVIEW kiválóan alkalmas egy hatékony numerikus szimulációs környezet megteremtésére.

A LabVIEW szoftver egyik legfőbb előnye az adatfolyam-programozási megközelítése, amely intuitív és vizuális módszert kínál a programok fejlesztésére. Ez a módszer lehetővé teszi, hogy a felhasználók logikai kapcsolatokat hozzanak létre grafikus elemek összekötésével. Az adatfolyam-alapú programozás előnye, hogy a programozás folyamata szemléletesebb és könnyebben átlátható, ami gyorsabb fejlesztést eredményez. Emellett a hibakeresést is egyszerűsíti, mivel a vizuális elrendezés segít az adatok áramlásának követésében és a logikai hibák gyors azonosításában. [36]

A LabVIEW másik kiemelkedő jellemzője a SubVI (alprogramok) használata, amelyek lehetővé teszik a komplex rendszerek egyszerűbbé és átláthatóbbá tételét. A SubVI-k lehetővé teszik, hogy a nagyobb programokat kisebb, kezelhetőbb részekre bontsuk, így könnyebben követhető és karbantartható marad a kód. Mivel a SubVI-k grafikus alapúak, egyszerűen meghívhatók, paraméterek adhatók át nekik, és az eredmények vizuálisan visszajelezhetők, így még a bonyolultabb rendszerek esetén is könnyen érthetővé válik a működésük. A SubVI-k továbbá elősegítik a kód újrahasználatosságát, mivel ugyanazt az alprogramot több helyen is alkalmazhatjuk anélkül, hogy újra kellene írni. Ezáltal növeli a fejlesztési hatékonyságot és csökkenti a hibalehetőségeket, mivel a kód logikai egységei jól elhatárolódnak egymástól. A SubVI-k által biztosított moduláris felépítés különösen hasznos a bonyolult mérnöki modellek és szimulációk esetén, ahol a különböző funkciók és alrendszerek világosan definiált szerepekkel rendelkeznek. [36]

A szoftver emellett erős számítási képességekkel bír, így alkalmas komplex rendszerek szimulációjára és valós idejű feldolgozásra. Érdekes tulajdonsága a LabVIEW-nak, hogy könnyen bővíthető és testre szabható a felhasználói igények szerint, például modulok és eszköztárak révén, amelyek különféle mérnöki és kutatási alkalmazásokat támogatnak. A szoftver lehetőséget ad komplex szimulációk és valós idejű vezérlési rendszerek összeállítására, ami versenyképes alternatívává teszi más szimulációs platformok mellett.

2.3.3 VÁLTOZÓ IDŐFELBONTÁS

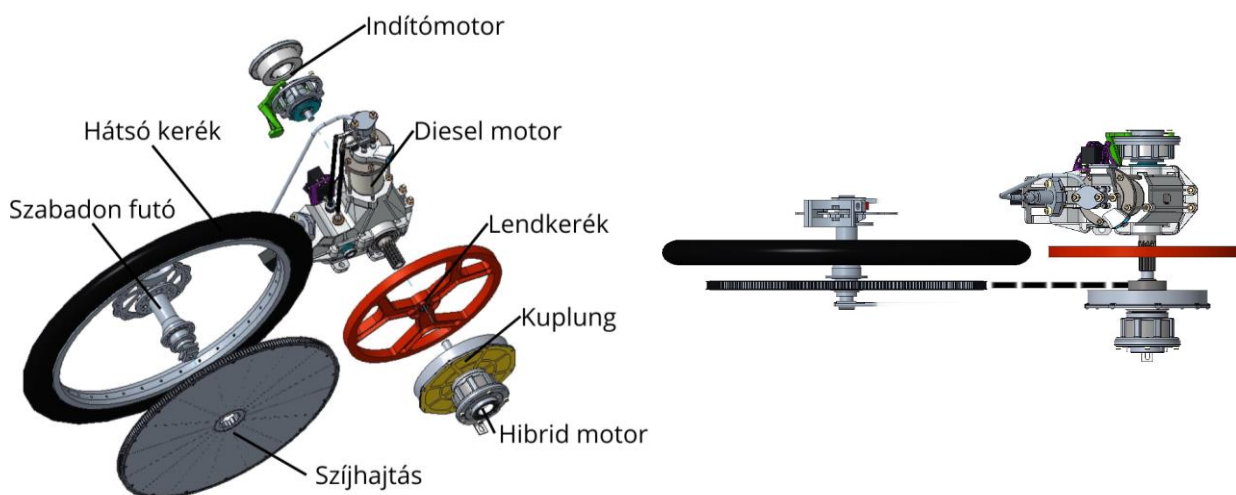
A diszkrét idejű numerikus szimulációknál az időfelbontás megválasztása kulcsfontosságú, mivel jelentősen befolyásolja a szimuláció sebességét és pontosságát. Ha az időlépés túl kicsi, a szimuláció túl lassan fog lefutni, míg ha túl nagy, a pontosság csökkenhet. Az optimális időlépés kiválasztása tehát kritikus, és az adott szimuláció jellege alapján kell meghatározni.

Egyes szimulációk esetében, ahol nem minden időegység alatt ugyanazt az algoritmust kell végrehajtani, hanem például bizonyos pillanatokban nem szükséges értékeket számolni, az időfelbontás optimális beállítása az egyes szakaszokban változhat. Ezt jól szemlélteti egy energiahatékonysági versenyautó hajtásláncának szimulálása. A verseny során a motor a futam csupán 10%-ában működik, és miközben működik, a szimulációnak sűrűbben kell figyelnie az adatokat, mivel több bonyolult számítást igényel, például a hajtásláncok működése. Ezzel szemben, amikor a jármű motor nélkül vitorlázik, az egyes időegységekben csak az ellenállásokkal kell foglalkozni, ami egyszerűbb számításokat jelent. Ezért ilyenkor az optimális időfelbontás sokkal nagyobb lehet, mivel nem szükséges minden pillanatra részletesen figyelni.

Ez a megközelítés a dinamikus időfelbontás (adaptive time-stepping) alkalmazását igényli, amely lehetővé teszi, hogy a szimuláció során az időlépést az aktuális rendszerállapot függvényében változtassák. A dinamikus időfelbontás segít a számítási igények optimalizálásában, és garantálja, hogy a szimuláció ugyanakkora pontossággal futtatható, de kisebb számítási költséggel.

A változó időfelbontás alkalmazása előszeretettel használt módszer a komplex rendszerek szimulációs modellezésében, különösen olyan esetekben, ahol a szimulációk során az időbeli változások dinamikusán, gyorsan vagy lassan zajlanak. Az irodalomban gyakran előfordul, hogy az eltérő szakaszok más-más számítási intenzitást igényelnek, és ezért az optimális időlépés változtatása nélkülözhetetlenné válik. Például a hibrid hajtásláncok szimulációja során. [37]

3 BME SHARKTEAM HAJTÁSLÁNCÁNAK BEMUTATÁSA



3-1. ábra BME SharkTeam hajtásláncának robbantott ábrája és felülnézete (Saját szerkesztés)

A fenti ábrán a BME SharkTeam versenycsapatának hajtáslánca látható, amely egy innovatív és összetett rendszert alkot, hogy maximális hatékonyságot biztosítson a versenyautó számára. A rendszer központjában egy saját fejlesztésű Diesel-motor található, amelyet egy a főtengyelre szerelt BLDC (Brushless DC) indítómotor indít agymotorként. Az indítómotor működése során a Diesel-motor beindul, és a motor forgattyús tengelyén keresztül egy lendkerék is felpörög. Ez a lendkerék jelentős tehetetlenséget ad a rendszernek, valamint segít kisimítani a motor egyhengeres működéséből adódó ingadozásokat. A lendkerék után egy speciális, röpsúlyos kuplung található, amely egy előre beállított fordulatszámra kezd meg a nyomaték átadását. Miután a motor és a szíjhajtás tengelye eléri az optimális fordulatszámot, a kuplung teljesen összekapcsolja őket. A rendszer további érdekes eleme egy másik BLDC motor, amely a kuplung szíj oldalán helyezkedik el. Ez a motor akkor is képes működni, amikor a Diesel-motor áll, így lehetővé teszi a versenyautó számára a tisztán elektromos hajtást. A hajtásrendszer végén egy szabadonfutó mechanizmus található, amely egy nagy áttétel segítségével biztosítja, hogy a szíj csak gyorsítani tudja az autót, de nem fékezheti azt. Ez a megoldás kulcsfontosságú a versenyautó maximális energiahatékonyságának elérésében, mivel lehetővé teszi a tökéletes gurulást, és segíti a legjobb teljesítményt a verseny során.

Miután a versenyautó eléri a kívánt sebességet, és a pilóta kikapcsolja a hajtást, a felpörgetett lendkerékben forgási energia marad. Mivel a forgási energia a fordulatszámmal négyzetes kapcsolatban áll, a leállítást követően az indításhoz szükséges energiánál sokkal több energia tárolódik a lendkerékben. A rendszer két BLDC motorja kontrollált módon elnyeli a lendkerék energiáját, amely a szuperkapacitoros hibrid rendszerbe és az akkumulátorba kerül, ezzel csökkentve a villamos energia fogyasztást és újrahasznosítva a lendkerék forgási energiáját a hajtásban.

4 SZIMULÁCIÓ FELÉPÍTÉSE

Fontos kritérium volt a szimuláció felépítése során, hogy a számolás a lehető legpontosabb legyen, és a szimuláció elkészítését követően a bemeneti adatok pontosításával a szimuláció eredménye is javuljon. Az egész szimuláció ennek a szellemiségében készült olyan parametrikusan, hogy akár a csapat későbbi autójánál is esetleg a városi autónál is alkalmazhassa kisebb átalakításokkal, vagy akár azok nélkül is.

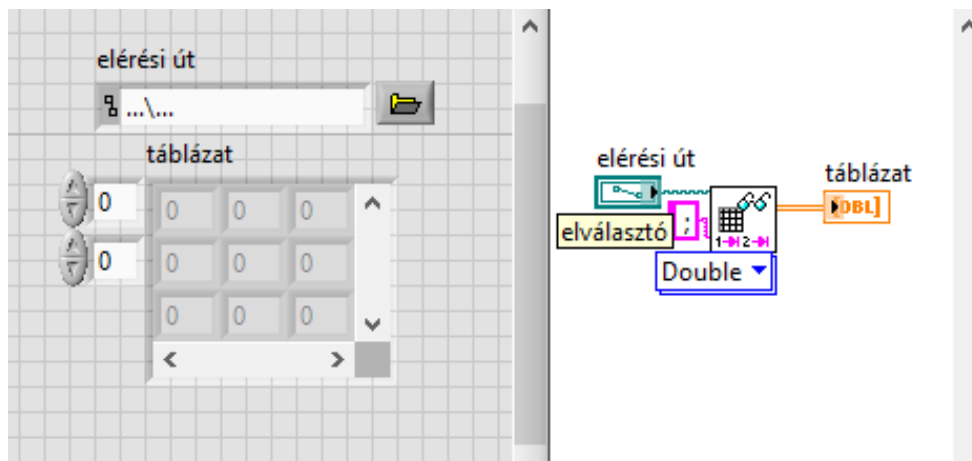
Tekintettel arra, hogy a LabVIEW szoftverében nem lehet nagyítani vagy kicsinyíteni, az egész szimuláció úgy készült oldalakra, hogy „lapozható” legyen, ezzel segítve az átláthatóságot.

4.1 ADATOK

Az adatok a legtöbb esetben táblázatosan kerültek megadásra. Például a légellenállási tényező a kanyarszögekkel összefüggésben van részletezve. Ennek alkalmazásával biztosítható, hogy a jövőbeli, pontosabb mérések és CFD szimulációk révén a szimulációk eredményei pontosabbá váljanak. Ez különösen fontos, mivel a légellenállási tényező jelentősen változik a kanyarok sugarának függvényében, és a szimulációk pontossága érdekében elengedhetetlen, hogy a kanyaroknál a megnövekedett ellenállás figyelembe legyen véve.

4.1.1 BEOLVASÁS

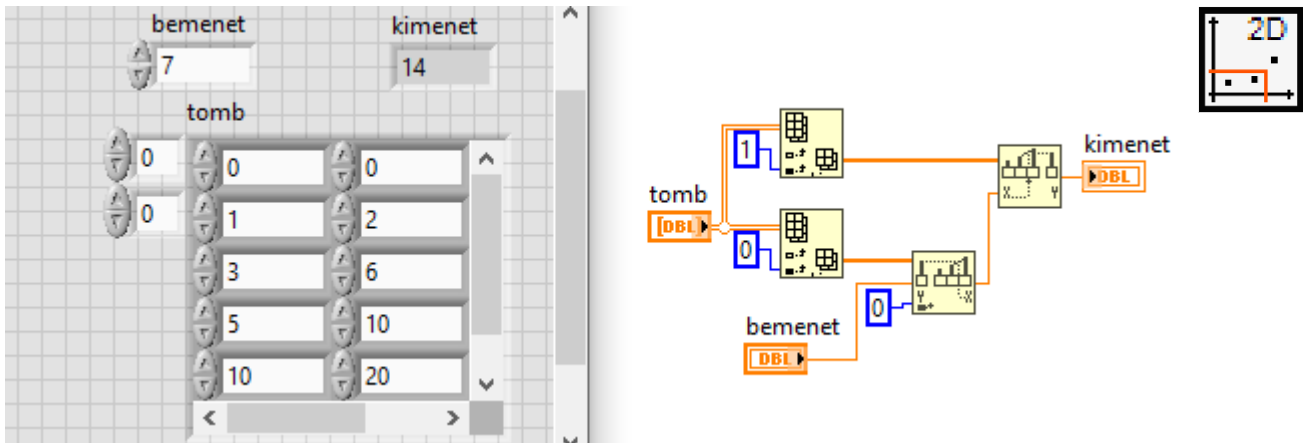
A bemeneti adatokat, ahol csak lehetett, táblázatos formában kerültek megadásra, hogy a szimuláció minél pontosabb eredményeket biztosíthasson. A LabVIEW szimulációba Excelből történik az adatbevitel, ahogy az alábbi ábrán is látható. Ez a művelet a LabVIEW beépített fájl beolvasó moduljával került megvalósításra és .csv fájlokat képes a szimuláció számára kezelhető tömbbe betölteni. A modulnak csak a .csv fájl fájlkezelőbéli elérhetőségi útvonalát kell beadni, az elválasztó karaktert, és egy tömböt amelybe az adatokat szeretnénk importálni.



4-1. ábra Beolvasás Excelből (saját szerkesztés)

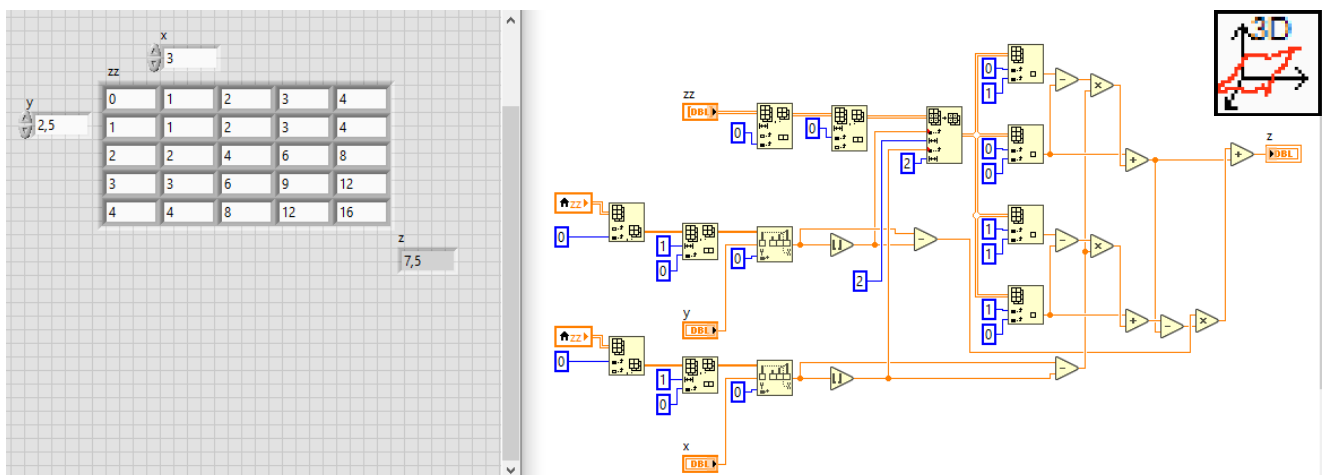
4.1.2 2 ÉS 3 DIMENZIÓS INTERPOLÁCIÓ

A táblázatos formában megadott adatok lineáris interpolációval kerülnek feldolgozásra, ami lehetővé teszi, hogy minden egyes pontra interpolált értékek legyenek hozzárendelve, még akkor is, ha az adott érték nem szerepel az adatgyűjtésben. Ezért minél több adat áll rendelkezésre, annál pontosabbá válik a szimuláció, mivel az interpoláció segít a részletesebb és pontosabb eredmények elérésében.



4-2. ábra Saját 2D interpoláció SubVI (saját szerkesztés)

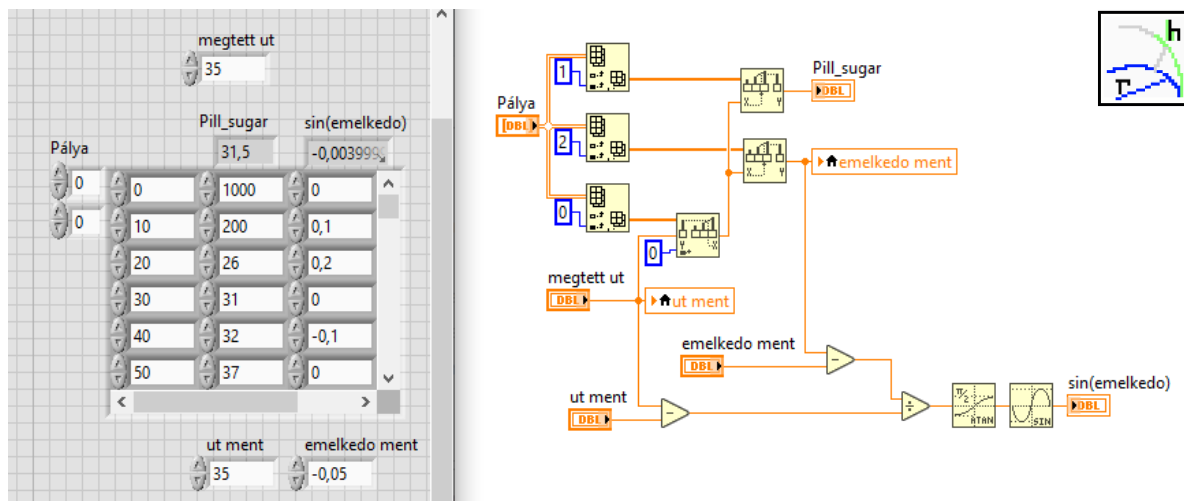
Vannak olyan adatok, amelyek 3 dimenziós formátumban kerülnek megadásra. Ilyen például a BLDC motorok jellegmezője, amelyek a fordulatszámokhoz és a nyomatékadatokhoz rendelnek hozzá egy hatásfok értéket. Ezeknél az adatoknál is interpolációval kerülnek meghatározásra a pillanatnyi értékek viszont ez esetben egy másik 3 dimenziós interpoláló SubVI segítségével.



4-3. ábra Saját 3D interpoláció SubVI (saját szerkesztés)

4.1.3 PÁLYAADATOK

A pályaadatok beolvasása és kielemezése egy kétszeres 2 dimenziós interpoláció és egy beépített szögfüggvény számítást tartalmaz. A bemeneti adatok (megtett út; kanyar sugár; emelkedés) formátumban vannak megadva, míg a számítás során a pillanatnyi sugárra van szükség (lineáris interpoláció) és a relatív emelkedésből számítható emelkedő szinuszos értékére (átalakított lineáris interpoláció). Ezért készült egy olyan SubVI, amely az előzőekben látható 2 dimenziós interpolációt duplikálja majd egy szögfüggvénnyel egészíti ki.



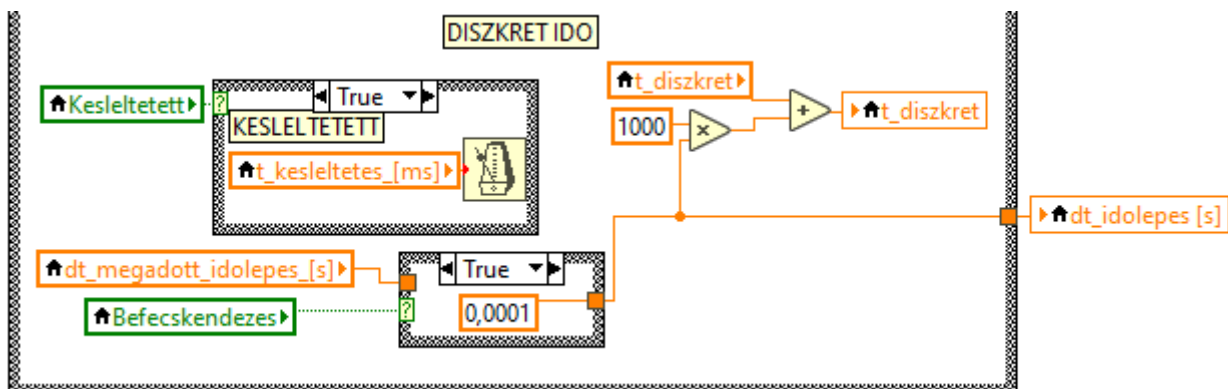
4-4. ábra Saját pályaadat értékelő interpoláló SubVI (saját szerkesztés)

A későbbi egyszerűbb számításhoz az alábbi képlet segítségével kerül meghatározásra a $\sin(\alpha)$ értéke, amely közvetlenül szorzatként behelyettesíthető az ellenállás számító képletbe. Az egyenlet a korábbi adatokhoz viszonyított deltából (különbség) számolja a pillanatnyi emelkedést, elősegítve, hogy a képlet akár dinamikusan változó osztásközökkel is alkalmazható legyen, még akkor is, ha az adatok abszolút értékek formájában érkeznek.

$$\sin(\alpha) = \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{\Delta h}{\Delta s}\right)\right) = \sin\left(\tan^{-1}\left(\frac{h_i - h_{i-1}}{s_i - s_{i-1}}\right)\right) \quad (4.7)$$

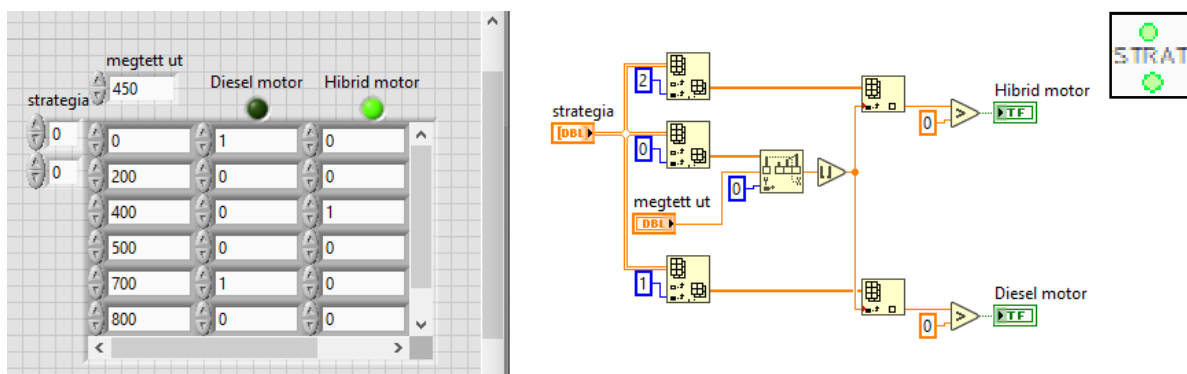
α	emelkedő sík vízszinttel bezárt szöge	[°]
Δh	pillanatnyi magasság változás	[m]
Δs	pillanatnyi megtett út	[m]
h_i	magasság i időpillanatban	[m]
s_i	megtett út i időpillanatban	[m]

Az Excelből érkező adatok között szerepelt egy olyan táblázat is, amelynek kiértékelése külön SubVI-t igényelt. Ez a táblázat a pálya stratégia értelmezésére szolgált. A kihívás abban rejlett, hogy a stratégia megadása úgy működik, hogy ha a második oszlopban 1 szerepel, akkor a rendszer elindítja a motort, ha pedig 0 szerepel, akkor leállítja azt. Azonban a lineáris interpolációval történő feldolgozásnál problémát jelentett, hogy 0 és 1 közötti tartományban az értékek folyamatosan váltakoznak, ezért az interpolálás során az értékeket egész számokra kellett kerekíteni. További bonyolítást jelentett, hogy mivel a Diesel és hibrid motorok függetlenül indíthatók, mindkét motor vezérlését egyetlen táblázatból kellett kezelni és beolvasni.



4-5. ábra Változó időfelbontású, késleltethető, diszkrét időlépés (Saját szerkesztés)

4.2 IDŐMENEDZSMENT



4-6. ábra Saját pályastratégia értékelő interpoláló SubVI (saját szerkesztés)

A szimuláció alapvetően diszkrét idejű, változó időfelbontású rendszerben működik, de képes valós idejű szimulációra is, illetve állítható késleltetéssel rendelkező diszkrét módú szimulációra. Ezek a működési módok különösen érdekesek lehetnek olyan alkalmazásokhoz, ahol a szimuláció szimulátorként szolgál. Ilyen esetekben például a pilóta reakcióit lehet vizsgálni a megjelenített adatok alapján, ami értékes visszajelzést nyújthat a valós vezetési és döntéshozatali folyamatokhoz.

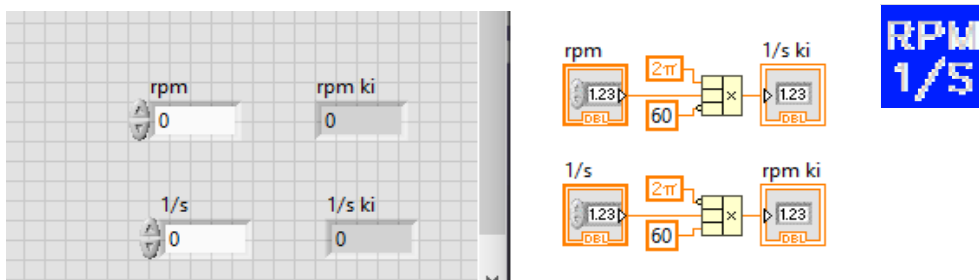
A szimuláció felépítése olyan, hogy a késleltetés egy kapcsoló által vezérelt várakozási mechanizmus, amely egyszerűen kiiktatható, így gyorsabb futtatás érhető el. Az időlépés változása különösen akkor figyelhető meg, amikor a motor befecskendezést kap, ilyenkor az alaphelyzetben néhány ezredmásodperces időlépés tízezred másodpercre csökken, ami a kritikus időszakok pontosabb elemzését szolgálja.

A szimuláció a különböző működési módokhoz igazodva változó időlépésű megközelítést alkalmaz. Vitorlázó üzemmódban az időlépés ezredmásodperces nagyságrendű, így az autóra ható tényezők körülbelül 7 milliméterenként kerülnek újraszámításra. Ha a Diesel-motor működésbe lép és üzemanyag befecskendezése történik, energia kerül a rendszerbe, az időlépés sűrűsödik, és az újraszámítások már kevesebb, mint 1 milliméter megtett út után történnek. Ez a finom felbontás lehetővé teszi, hogy a főtengely forgását kevesebb, mint egy fokos pontossággal kövessük, amely elengedhetetlen a motor pontos modellezéséhez.

Az időlépés értékei nem véletlenszerűen lettek meghatározva, hanem alapos elemzéssel és teszteléssel lettek optimalizálva. Az optimális időlépésnek köszönhetően a szimuláció a 39 perces, 16 kilométeres versenyt körülbelül két perc alatt képes végigszámolni a fent említett felbontással. Természetesen a szimulációs idő nagyban függ az indítások számától, de általánosan 2 perces szimulációs idővel lehet számolni. (Ez az idő egy alsó kategóriás i3-as processzorral ellátott laptopon lett mérve. A számítási kapacitás növelésével azonban akár felére is csökkenthető a szimuláció futás ideje.)

4.3 INDÍTÁS

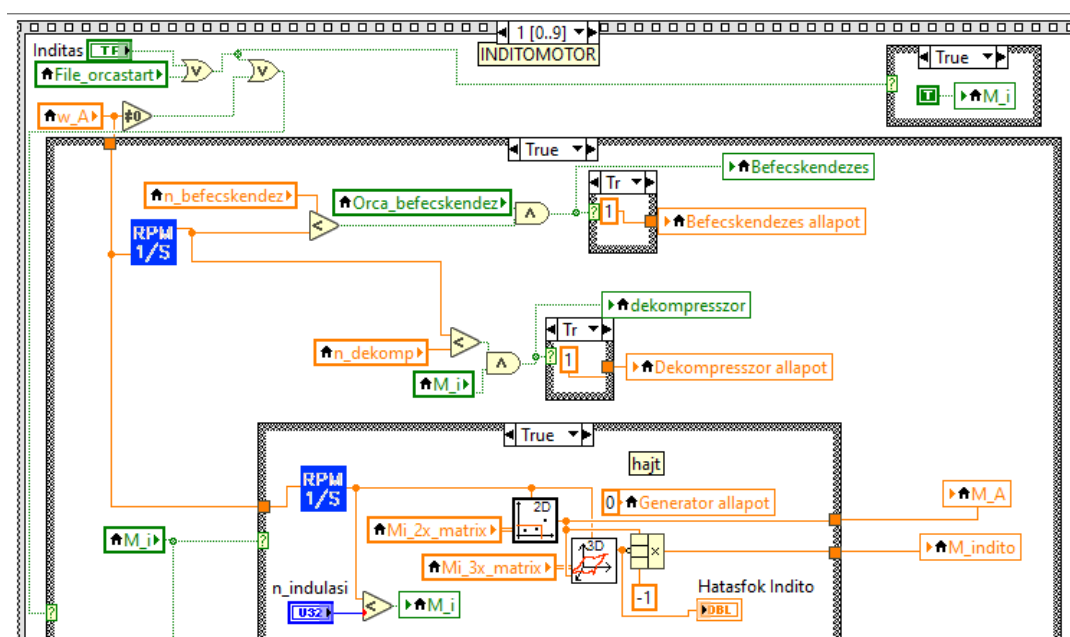
A modellezés során szükség volt egy gyors mértékegység-váltó alegységre, mivel a bemenetek és kimenetek gyakran fordulatszám (rpm) formájában jelennek meg, míg a köztes számításokhoz kényelmesebb a szögsebesség (rad/s) használata. Az alábbi SubVI feladata, hogy a fordulatszámot szögsebességgé konvertálja, a bemenet függvényében akár mindkét irányba.



4-7. ábra Fordulatszám mértékegység váltó SubVI (saját szerkesztés)

Az indítási folyamat impulzusszerű indítójellel kezdődik, ahogyan az a valóságban is történik. Ezt követően a működés vezérelten zajlik, külső beavatkozás nélkül. Az indítómotor felpörgeti a főtengelyt, miközben a dekompreszor szelep nyitva marad. Miután a megfelelő fordulatszámot elérte, megkezdődik az üzemanyag-befecskendezés. Amint a befecskendezés biztosan elindul, a dekompreszor (kipufogó szelep) bezárul, és ideális esetben a motor égésterében már elindul az égés. Ekkor már nincs szükség az indítómotorra, ezért az kikapcsol. Mivel az indítómotor közvetlenül a főtengelyhez van kapcsolva, hajtás nélkül vasvesztiséget termel, mikor működik.

Az indítómotor modellezésénél az akkumulátor energiaszintje a motor fordulatszámából és nyomatékából számított hatásfokkal elosztott energiaértékből kerül kiszámításra. Ennek eredményeként folyamatosan nyomon követhető, hogy mikor és mennyi villamos energiát fogyasztott az autó ahhoz, hogy elindítsa a Diesel-motort. A rendszer figyelembe veszi az akkumulátor energiateljesítményét, így az üzemeltetés alatt a felhasználó mindig láthatja, hogy a motor elindításához szükséges energia mikor és hogyan lett felhasználva.



4-8. ábra Az indítómotor modellezése (saját szerkesztés)

$$M_{indító} = \frac{-M_{hasznos}}{\eta \{M_{hasznos}; n_{főtengely}\}} \quad (4.8)$$

$M_{indító}$	indítómotor nyomaték leadása	[Nm]
$M_{hasznos}$	indítómotor főtengelynek adott nyomatéka	[Nm]
η	villanymotor hatásfoka nyomaték és fordulat függvényében	[-]

$\eta \{M_{hasznos}; n_{főtengely}\}$ a villanymotor hatásfoka, amely a jellegmezőből a nyomaték és a fordulatszám függvényében kerül kiolvasásra. Azért negatívan jelenik meg a nyomaték a képletben, mert abból kerül kiszámításra az integráláskor az akkumulátor fogyasztása.

A szimuláció ezen szakasza magában foglalja az indítómotor generátoros üzemmódját is, amely lehetővé teszi, hogy a leálló hajtásláncban a kuplung nyitása után a motor energiát nyerjen a lendkerékből, ekkor már a hibrid motor nem képes erre. A generátoros üzemmódnak köszönhetően az akkumulátor energiafogyasztása 0-ra csökkenthető, mivel a motor képes visszanyerni a rendszertől energiát. Ezzel biztosítva van, hogy az akkumulátor töltöttsége egy előírt maximális szinten maradjon az indítómotor működtetésével és az autó üzemeltetésével kapcsolatos folyamatok során.

4.4 DIESEL-MOTOR

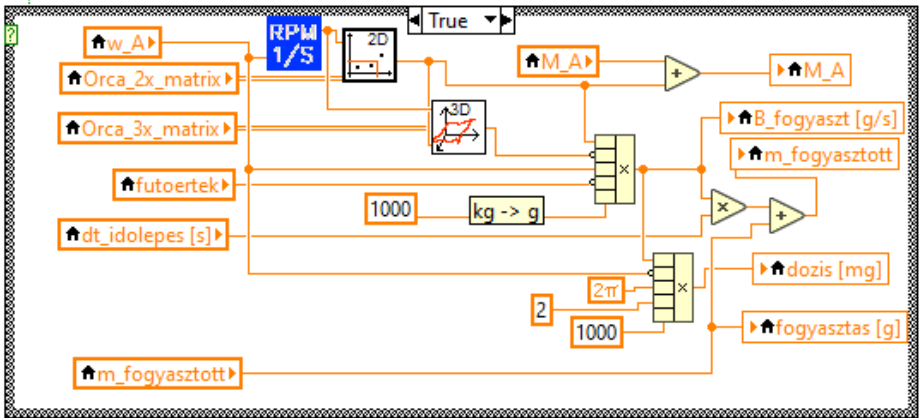
A Diesel-motor modellezése, hasonlóan az előző fejezetekhez, alapvetően arra épít, hogy az egész rendszert nyomatékkal modellezzük. Ennek értelmében a tengelyeken közvetlenül a nyomatékok mozognak, és a befektetett energia azonnal nyomatékká alakul. A motor nyomatékkal van vezérelve, így meg van adva, hogy milyen fordulaton milyen nyomatékot kell elérni. Az üzemanyag-befecskendezés, amely a valóságban bemenetként működik, itt kimenetként jelenik meg. Ez lehetővé teszi, hogy a szimuláció során a befecskendezést a kívánt nyomatékértékekhez lehessen beállítani.

Ezen szakaszban mérésre kerül az üzemanyag-fogyasztás is, mivel az üzemanyag-leadás közvetlenül összefügg a motor működésével és a nyomaték-igényekkel, amelyek a szimulációs paraméterek segítségével optimalizálhatók. A felhasznált üzemanyag mennyisége a befecskendezett dózis és az eltelt idő alapján kerül modellezésre.

$$B = \frac{M_{f\ddot{o}tengely} \cdot \omega_{f\ddot{o}tengely} \cdot 1000}{Q_{Diesel} \cdot \eta \{M_{f\ddot{o}tengely}; n_{f\ddot{o}tengely}\}}$$

(4.9)

B	fogyasztás	[g/s]
M _{f$\ddot{o}$tengely}	f $\ddot{o}$ tengely nyomatéka	[Nm]
ω	f $\ddot{o}$ tengely szögsebessége	[rad/s]
Q _{Diesel}	Diesel üzemanyag fűtőértéke	[J/kg]
η	villanymotor hatásfoka nyomaték és fordulat függvényében	[-]

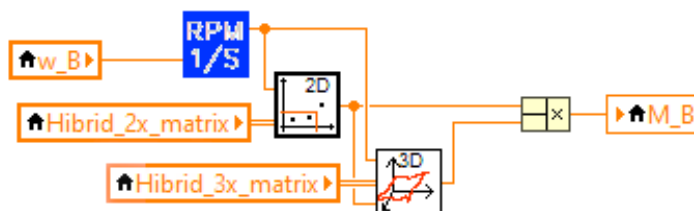


4-9. ábra A Diesel motor modellezése (saját szerkesztés)

4.5 HIBRID RENDSZER

A hibrid hajtáslánc, mind a szimulációban mind a valóságban nagyon hasonlít az indítómotorra. A vezérlők, amelyek a motorok működését irányítják, azonosak, és a motorok is ugyanazon Maxon motor széria két különböző teljesítményű példányai. A motorok sensorless BLDC típusúak, ami azt jelenti, hogy érzékelők használata nélkül működnek. A hibrid hajtáslánc esetében egy fontos különbség van az indító motorhoz képest: a motor közvetlenül a B tengelyt, azaz a szíjat hajtja.

Ez a motor képes energiát elnyelni, ami azért lesz még érdekesebb, mivel az energiátároló egy hibrid szuperkapacitás cellapakk. Az elnyelt energia gyorsan és nagy árammal tud visszatölteni a rendszerbe. A motor ezt a visszatöltést a kuplung kinyitásaig végzi, így hasznosítja a leállítás során a hajtáslánc tehetetlenségében tárolt forgási energiát. Az ilyen energiavisszatöltés lehetősége jelentős mértékben hozzájárul a rendszer hatékonyságához, és segít csökkenteni az üzemanyag-fogyasztást, mivel az energia nem vész el, hanem tárolódik és később felhasználható.



4-10. ábra Hibrid rendszer modellezése (saját szerkesztés)

A forgási energia és a regeneratív energia-visszatöltő rendszerek működése összefügg: mivel a forgási energia a sebesség négyzetével arányos, a hajtáslánc leállításakor a lendkerékben tárolt energia sokkal nagyobb lesz, mint az indításhoz szükséges energia. Ezért a regeneratív rendszerek rendkívül fontosak, mivel lehetővé teszik a felgyülemlett energia hatékony visszanyerését és tárolását, amit később fel lehet használni.

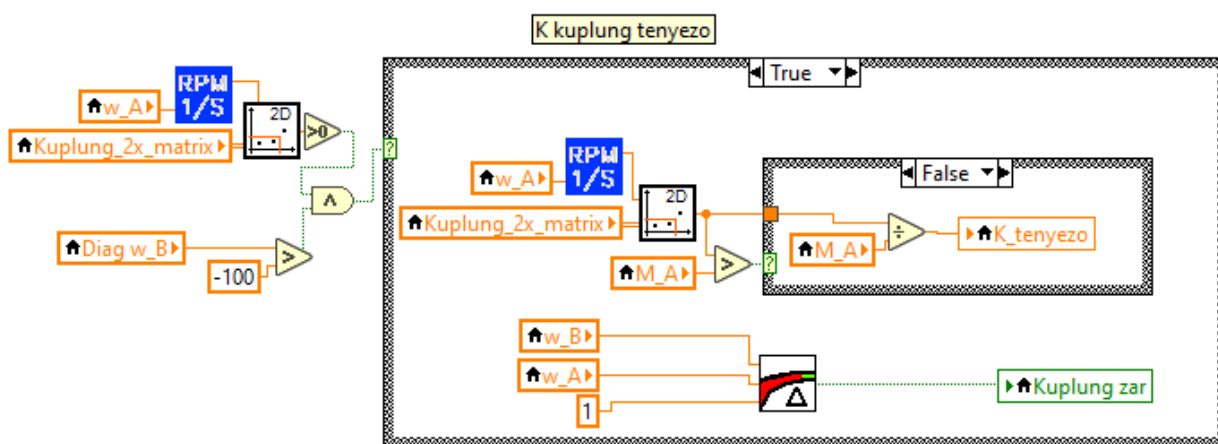
A versenyautók esetében ezek a rendszerek különösen előnyösek, mivel csökkenthetik az üzemanyag-fogyasztást, ha optimálisan vannak alkalmazva. Az energiavisszatöltés folyamata azonban veszteségekkel jár, például hőveszteség vagy a rendszer hatásfokának korlátai miatt. Ezért az energiát csak abban az esetben érdemes eltárolni, ha a megtakarított energia felhasználása meghaladja a veszteségekből adódó csökkenést. Hatékony energiagazdálkodás szükséges, hogy a visszatöltés ne rontsa a hajtáslánc teljesítményét, hanem hozzájáruljon a fenntartható üzemeltetéshez.

A jelenlegi rendszerben ez megvalósul, mivel a lendkerékben tárolt energia, ha nem lenne regeneratív visszatöltés, egyszerűen disszipálna és veszteségként jelentkezne. A visszatöltő rendszer tehát javítja a hatékonyságot, minimalizálja az energiapazarlást, és hozzájárul a fenntartható üzemeltetéshez és a versenyképesség növeléséhez.

4.6 TENGELYKAPCSOLÓK

A hajtáslánc három fő tengelyből áll, amelyeket két tengelykapcsoló köt össze. Az „A” tengely a Diesel-motor főtengelye, amely egy röpsúlyos kuplungra keresztül kapcsolódik a „B” tengelyhez, amely a hibrid rendszer részeként egy villanymotoros szíjhajtást valósít meg. A szíjhajtást egy racsnis szabadonfutó kapcsolja össze a harmadik, „C” tengellyel, amely az autó kerekét hajtja.

A röpsúlyos kuplung szerepe a Diesel-motor indításának finomságában rejlik, mivel lehetővé teszi a folyamatos és sima beindítást, ugyanakkor biztosítja, hogy az indítómotor nem hajtja a kerekeket véletlenül sem. Ezek a megoldások együttesen biztosítják, hogy a hajtáslánc minden eleme hatékonyan reagáljon az eltérő üzemeltetési körülményekre, minimalizálva a veszteségeket és növelve a rendszer hatékonyságát.

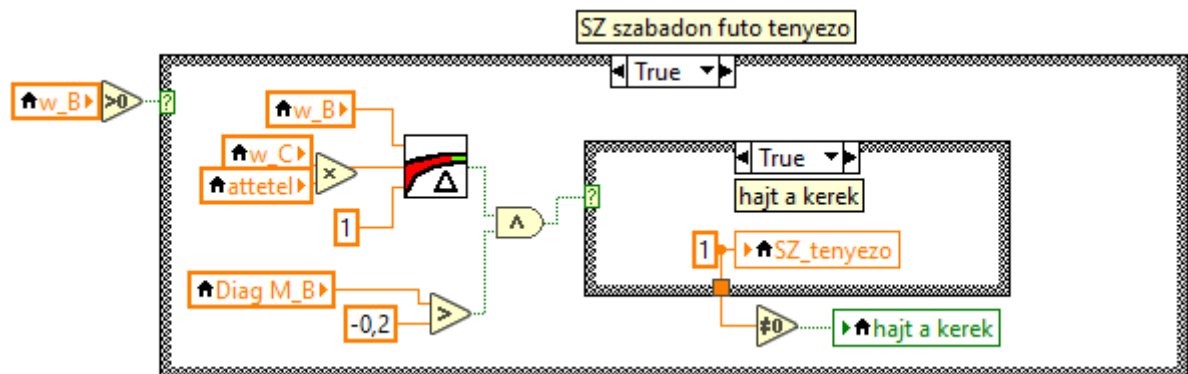


4-11. ábra Röpsúlyos kuplung állapotának meghatározása (saját szerkesztés)

A modellezés során bevezetett tényezők segítségével jelölhető, hogy az egyes tengelykapcsolók milyen állapotban vannak, legyenek azok zárt, nyitott vagy éppen részlegesen zárt állapotban. A röpsúlyos kuplung különösen figyelemre méltó abban, hogy nem csupán bináris kapcsolási állapotokat képes felvenni (teljesen zárt vagy teljesen nyitott), hanem a csúszásnak köszönhetően képes részlegesen átvinni a nyomatékot. Ez azt jelenti, hogy a kuplung lehetővé teszi a nyomaték egy meghatározott százalékának átvitelét, ami finomabb és fokozatosabb nyomatékátvitelt biztosít.

Ez a tulajdonság különösen hasznos lehet olyan helyzetekben, ahol a sima átmenet szükséges az energiaveszteségek minimalizálása és a mechanikai elemek kímélése érdekében. Az ilyen típusú kuplungok modellezése során figyelembe kell venni a csúszási jellemzőiket és az ehhez kapcsolódó nyomatékátviteli arányokat, hogy pontosan tükrözzék a valós működést a szimulációkban.

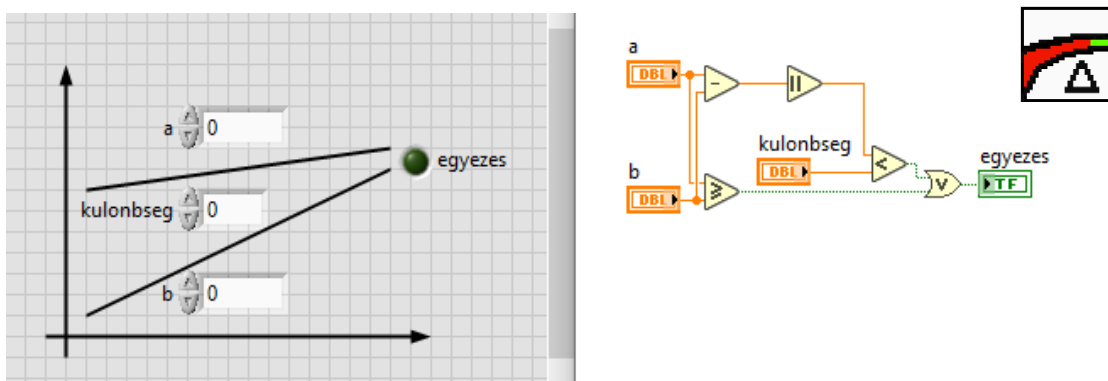
A racsnis szabadonfutó mechanizmus megakadályozza, hogy a hajtáslánc visszafelé hatva fékezze az autót, ami javítja az üzemelés hatékonyságát. Ez különösen fontos az energia optimalizálása szempontjából, hiszen segít elkerülni a mechanikai veszteségeket.



4-12. ábra Racsnis szabadonfutó állapotának meghatározása (saját szerkesztés)

Az ilyen típusú tengelykapcsolók, mint a röpsúlyos kuplung, gyakran fordulatszám különbségek kiegyenlítését figyelve működnek. A röpsúlyos kuplung például csúszni kezd mindaddig, amíg a dob el nem éri a tengely fordulatszámát, így biztosítva a fokozatos és sima nyomatékvitelt. Az alábbiakban bemutatott SubVI célja, hogy figyelje ezt a csúszási jelenséget, és egy kis hiszterézist engedve biztosítsa, hogy a két fordulatszám egy adott tartományon belül találkozzon.

A rendszer ellenőrzi, hogy a két fordulatszám mikor kerül egy adott tartományba, és ennek alapján beállítja a tengelykapcsoló állapotát. A hiszterézis lehetővé teszi, hogy a rendszer rugalmasan reagáljon a kisebb ingadozásokra, megakadályozva a túl gyakori kapcsolásokat. Ezen kívül fontos biztonsági funkció is be lett építve a rendszerbe, amely a kapcsolási fordulatszám-tartomány túl szűk beállítása esetén leállítja a rendszert, megakadályozva ezzel a túlfutást.



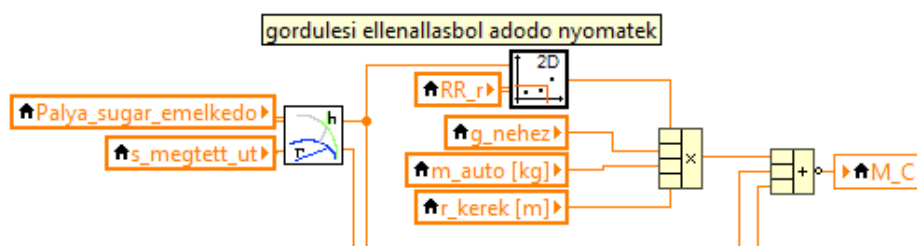
4-13. ábra Fordulatszám kiegyenlítő SubVI hiszterézissel (saját szerkesztés)

4.7 FUTÁSTELJESÍTMÉNY SZÁMÍTÁS

A gurulás közben ható ellenállások számítása során az erőket a kerék sugarával szorozva nyomatékká lehet alakítani, amit az autónak és a hajtásláncnak le kell küzdenie. Ezt a negatív nyomatéket nagy áttétellel továbbítják a hajtásláncra, ami ellenállást jelent az autó mozgásában. A számítások figyelembe veszik a gurulási ellenállást, az emelkedés hatást és a légellenállást is, amelyek hozzájárulnak a jármű mozgásával szembeni ellenálláshoz. A gyorsulási ellenállás nem itt kerül kiszámításra, hanem az integráláskor.

$$M_{\text{gördülési}} = F_{\text{gördülési}} \cdot r_{\text{kerék}} = c_{rr} \{r_{\text{pálya}}\} \cdot g \cdot m_{\text{autó}} \cdot r_{\text{kerék}} \quad (4.10)$$

$M_{\text{gördülési}}$	gördülési ellenállásból adódó nyomaték	[Nm]
$F_{\text{gördülési}}$	gördülési ellenállásból adódó erő	[N]
$r_{\text{kerék}}$	kerék sugár	[m]
c_{rr}	gördülési ellenállási tényező	[-]
$r_{\text{pálya}}$	pálya pillanatnyi kanyarsugár	[m]
g	nehézségi gyorsulás	[m/s ²]
$m_{\text{autó}}$	versenyautó teljes tömege	[kg]



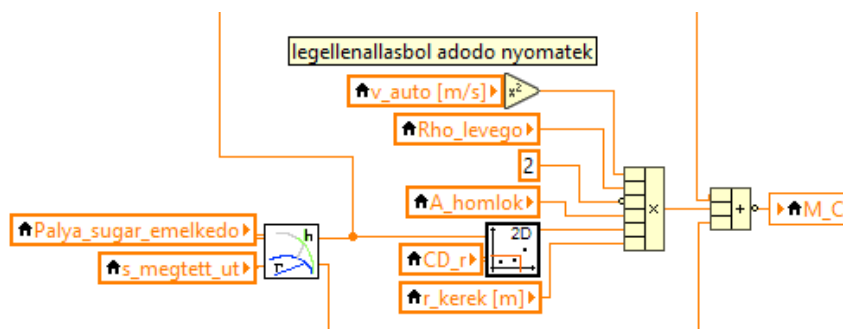
4-14. ábra Gördülési ellenállás kerékre redukált nyomatéka (saját szerkesztés)

A gördülési ellenállás nagyságát elsősorban a pálya sugara határozza meg, míg a többi tényező állandó az egyenletben. Habár a gördülési ellenállás a sebesség növekedésével is változhat, főként a gumiabroncs melegedéséből eredően, jelen modellben ezek a hatások elhanyagolhatóak.

$$M_{\text{légellenállási}} = F_{\text{légellenállási}} \cdot r_{\text{kerék}} \quad (4.11)$$

$$M_{\text{légellenállási}} = \Delta v_{\text{jármű}}^2 \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot \frac{1}{2} \cdot A_{\text{jármű}} \cdot c_d \{r_{\text{pálya}}\} \cdot A_{\text{jármű}} \cdot r_{\text{kerék}} \quad (4.12)$$

$M_{\text{légellenállási}}$	légellenállásból adódó nyomaték	[Nm]
$F_{\text{légellenállási}}$	légellenállási erő	[N]
$\rho_{\text{levegő}}$	levegő sűrűsége	$\frac{kg}{m^3}$
$\Delta v_{\text{jármű}}$	jármű-közeg sebesség különbsége	$\frac{m}{s}$
$A_{\text{jármű}}$	jármű homlokfelülete	[m ²]
c_d	légellenállási tényező	[-]
$r_{\text{pálya}}$	pálya pillanatnyi kanyarsugár	[m]
$r_{\text{kerék}}$	kerék sugár	[m]

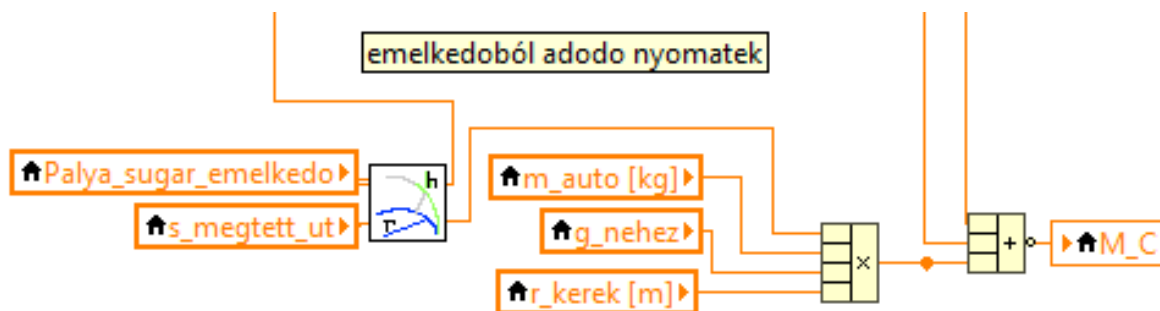


4-15. ábra Légellenállás kerékre redukált nyomaték (saját szerkesztés)

A légellenállás jól látható módon több tényezőtől függ, hiszen a képlet szerint négyzetesen függ a sebességtől, de a légellenállási tényező a kanyar szögének a függvényében is változik.

$$M_{emelkedési} = F_{emelkedési} \cdot r_{kerék} = m_{jármű} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot r_{kerék} \quad (4.13)$$

$M_{emelkedési}$	emelkedési ellenállásból adódó nyomaték	[Nm]
$F_{emelkedési}$	emelkedési ellenállásból adódó erő	[N]
$r_{kerék}$	kerék sugár	[m]
c_{rr}	gördülési ellenállási tényező	[-]
$r_{pálya}$	pálya pillanatnyi kanyarsugár	[m]
$m_{jármű}$	jármű tömege	[kg]
g	nehézségi gyorsulás	$\frac{m}{s^2}$
α	emelkedő szöge	[°]



4-16. ábra Emelkedési ellenállás kerékre redukált nyomaték (saját szerkesztés)

Az emelkedési ellenállás csak az emelkedő meredekségétől függ, a sebességtől független.

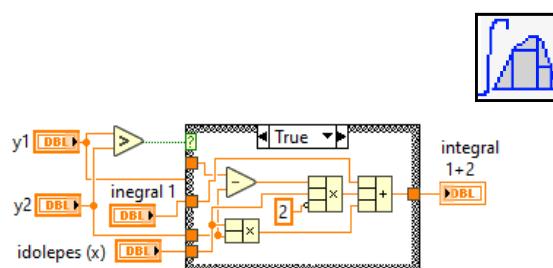
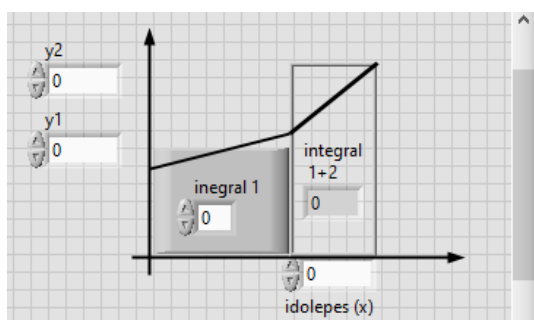
4.8 INTEGRÁLÁS

A numerikus szimuláció kulcsa az integrálás. Minden ciklus végén a kiszámolt értékeket, ha a mérőszám azt igényli, hozzá kell adni a korábbi értékhez. Ilyen például a megtett út vagy a szögsebesség. Az integrálások minél pontosabb elvégzése érdekében készült az alábbi SubVI, amely egy trapézszabályú integrálást alkalmaz. Ez figyelembe veszi az aktuális meredekség előjelét, így például, ha a sebesség csökkent, akkor is pontosan végzi el az integrálást az adott szakaszon.

$$\text{ha } y_i > y_{i-1} \quad \int_0^i a(t) = a_i = a_{i-1} + y_{i-1} \cdot \Delta t + \frac{(y_i - y_{i-1}) \cdot \Delta t}{2} \quad (4.14)$$

$$\text{ha } y_i < y_{i-1} \quad \int_0^i a(t) = a_i = a_{i-1} + y_i \cdot \Delta t + \frac{(y_{i-1} - y_i) \cdot \Delta t}{2} \quad (4.15)$$

$a(t)$	időfüggvény integrálandó értéke
a_{i-1}	korábbi időpillanatban számított integrálérték
y_{i-1}	a függvény értéke $i-1$ időpillanatban
y_i	a függvény értéke i időpillanatban
Δt	időintervallum hossza (időlépés)



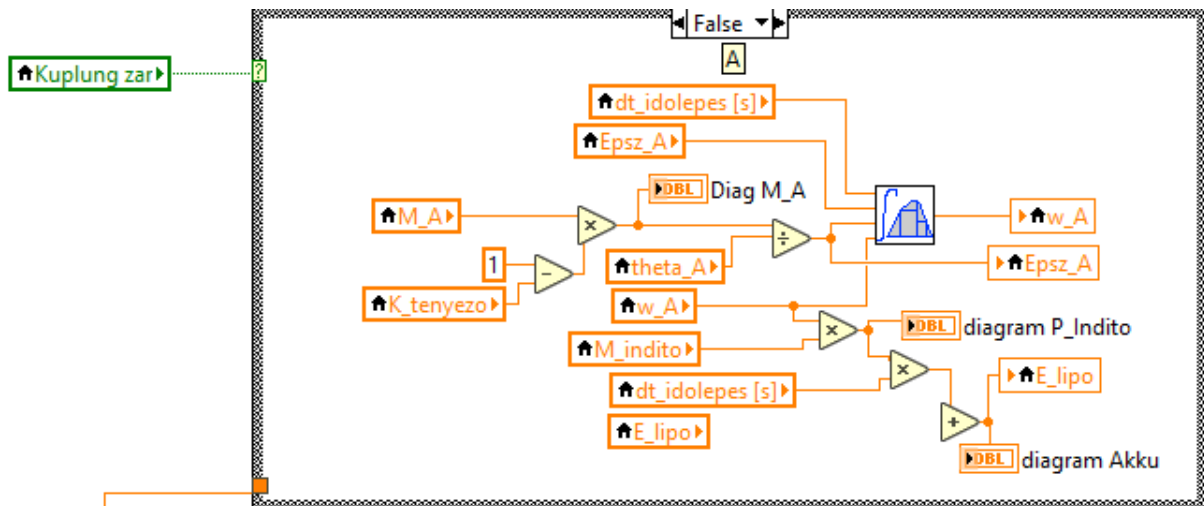
4-17. ábra Trapézintegráló SubVI, előjel figyelembevételével (saját szerkesztés)

Ahogy a korábbi modulok mindegyike, az integráló rész is teljesen kikapcsol amennyiben nincs rá szükség. Például a motor tengelyét csak akkor kell integrálni, ha a kuplung nem zárt állapotú, hiszen ha zár a kuplung bőven elég egyszer az összekapcsolt „A” és „B” tengelyt kiintegrálni, viszont ez a „B” tengelyhez tartozó integrátorban valósul meg. Az alábbi ábrán az „A” tengely, azaz főtengely integrálása látható, beépítve az akkumulátor fogyasztásának számításával.

$$\text{ha } \varepsilon_{Ai} > \varepsilon_{Ai-1} \quad \omega_{Ai} = \omega_{Ai-1} + \varepsilon_{Ai-1} \cdot \Delta t + \frac{\left(\frac{M_A \cdot (1-k)}{\theta_A} - \varepsilon_{Ai-1} \right) \cdot \Delta t}{2} \quad (4.16)$$

$$\text{ha } \varepsilon_{Ai} < \varepsilon_{Ai-1} \quad \omega_{Ai} = \omega_{Ai-1} + \varepsilon_{Ai} \cdot \Delta t + \frac{\left(\varepsilon_{Ai-1} - \frac{M_A \cdot (1-k)}{\theta_A} \right) \cdot \Delta t}{2} \quad (4.17)$$

ε_{Ai}	főtengely szöggyorsulása i pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right]$
ε_{Ai-1}	főtengely szöggyorsulása i-1 pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right]$
ω_{Ai}	főtengely szögsebessége i pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$
ω_{Ai-1}	főtengely szögsebessége i-1 pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$
M_A	főtengely nyomatéka	$[\text{Nm}]$
k	kuplung zártsága [0...1]	$[-]$
Δt	időlépés	$[\text{s}]$
θ_A	főtengely tehetetlensége	$[\text{kg m}^2]$



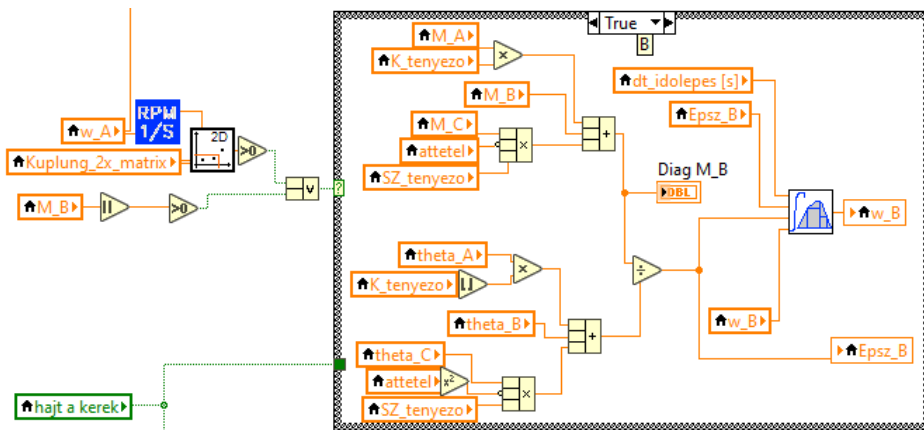
4-18. ábra „A” tengely integrálása (saját szerkesztés)

Amennyiben a kuplung záródik, és a fenti integrálás már nem szükséges, akkor a figyelem a „B” tengely integrálására összpontosul. Ebben az állapotban, amikor a rendszer szabadonfutó módba kapcsol, a „C” tengely integrálása is lehetővé válik. Itt kerül kiszámításra a gyorsítási ellenállás, amely a θ_C értékében jelenik meg. Ez azért van így, mert az autó tömegéből és a kerék redukált tehetetlenségéből származó erőhatások integrálásával úgy lehet modellezni, mintha a keréken egy ellenálló nyomatékot alkalmaznánk, amely a jármű mozgásával ellentétes irányba hat.

$$\text{ha } \varepsilon_{Bi} > \varepsilon_{Bi-1} \quad \omega_{Bi} = \omega_{Bi-1} + \varepsilon_{Bi-1} \cdot \Delta t + \frac{\left(\frac{M_A \cdot k + M_B + M_C \cdot SZ \cdot a}{\theta_A \cdot k + \theta_B + \frac{\theta_C \cdot SZ}{a^2}} - \varepsilon_{Bi-1} \right) \cdot \Delta t}{2} \quad (4.18)$$

$$\text{ha } \varepsilon_{Bi} < \varepsilon_{Bi-1} \quad \omega_{Bi} = \omega_{Bi-1} + \varepsilon_{Bi} \cdot \Delta t + \frac{\left(\varepsilon_{Bi-1} - \frac{M_A \cdot k + M_B + M_C \cdot SZ \cdot a}{\theta_A \cdot k + \theta_B + \frac{\theta_C \cdot SZ}{a^2}} \right) \cdot \Delta t}{2} \quad (4.19)$$

ε_{Bi}	szíjhajtás szöggyorsulása i pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right]$
ε_{Bi-1}	szíjhajtás szöggyorsulása i-1 pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right]$
ω_{Bi}	szíjhajtás szögsebessége i pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$
ω_{Bi-1}	szíjhajtás szögsebessége i-1 pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$
M_A	főtengely nyomaték	$[Nm]$
M_B	szíjhajtás nyomaték	$[Nm]$
M_C	kerék nyomaték	$[Nm]$
k	kuplung zártsága [0...1]	$[-]$
SZ	szabadonfutó zártsága [0;1]	$[-]$
a	áttétel	$[-]$
Δt	időlépés	$[s]$
θ_A	főtengely tehetetlensége	$[kg \cdot m^2]$
θ_A	szíjhajtás tehetetlensége	$[kg \cdot m^2]$
θ_A	autó tehetetlensége	$[kg \cdot m^2]$



4-19. ábra „B” tengely integrálása (saját szerkesztés)

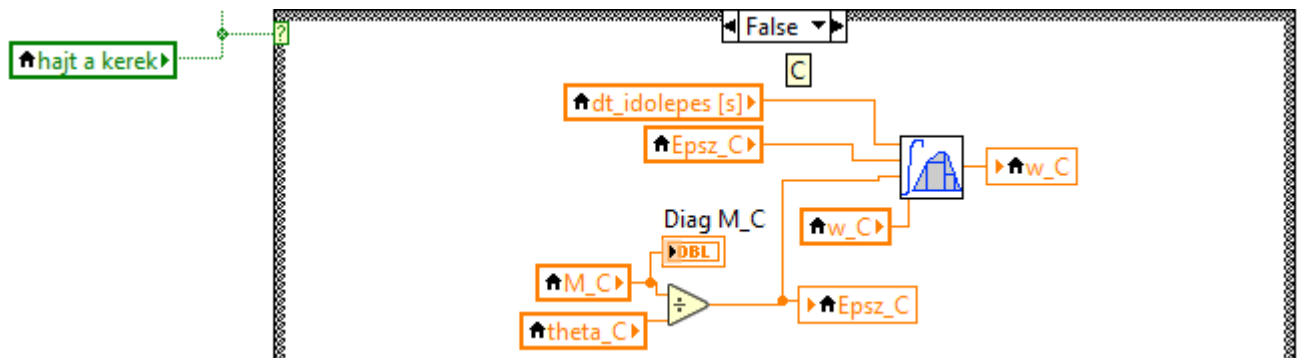
Bizonyos időszakokban, az optimalás érdekében, az „A” és „B” tengelyek integrátorai lekapcsolódnak. Ekkor aktiválódik a „C” tengely integrátora, amely a futás során felmerülő ellenálló nyomatékokat integrálja, majd a kapott értékeket fordulatszámra alakítja.

$$\text{ha } \varepsilon_{Ci} > \varepsilon_{Ci-1} \quad \omega_{Ci} = \omega_{Ci-1} + \varepsilon_{Ci-1} \cdot \Delta t + \frac{\left(\frac{M_C}{\theta_C} - \varepsilon_{Ci-1}\right) \cdot \Delta t}{2} \quad (4.20)$$

$$\text{ha } \varepsilon_{Ci} < \varepsilon_{Ci-1} \quad \omega_{Ci} = \omega_{Ci-1} + \varepsilon_{Ci} \cdot \Delta t + \frac{\left(\varepsilon_{Ci-1} - \frac{M_C}{\theta_C}\right) \cdot \Delta t}{2} \quad (4.21)$$

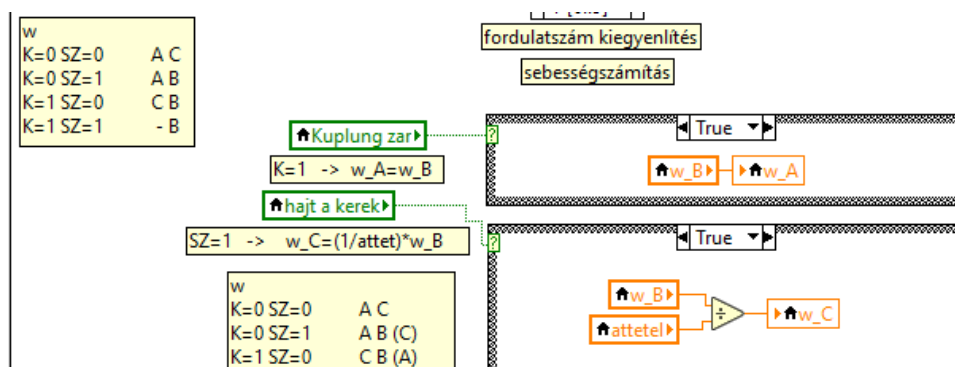
ε_{Ci}	kerék szöggyorsulása i pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\right]$
ε_{Ci-1}	kerék szöggyorsulása i-1 pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\right]$
ω_{Ci}	kerék szögsebessége i pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$
ω_{Ci-1}	kerék szögsebessége i-1 pillanatban	$\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$
M_C	kerék nyomatéka	$[\text{Nm}]$
Δt	időlépés	$[\text{s}]$
θ_C	autó tehetetlensége	$[\text{kg m}^2]$

Az alábbi ábrán a „C” tengely integrátora látható, ahol a theta_C az előbbieken említett módon a versenyautó kerékre redukált tehetetlenségét jelöli. Ez az érték a tömegből lett kiszámítva, majd összegezve a kerekekből, mint forgó tömegből adódó tehetetlenséggel



4-20. ábra „C” tengely integrálása (saját szerkesztés)

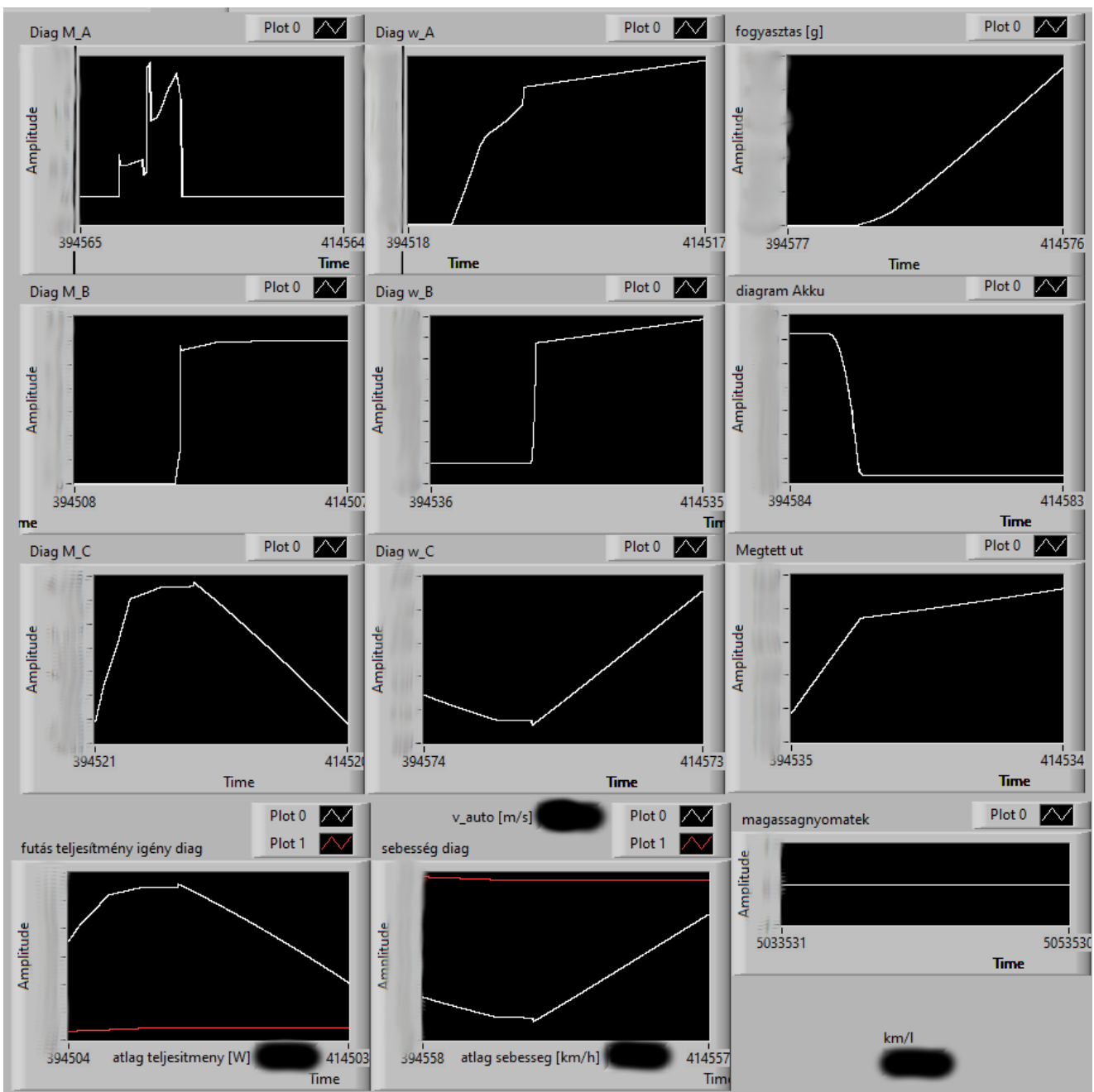
Az integrálásokat követően figyelembe kell venni a tengelykapcsolók állapotát, és amennyiben ez indokolt kiegyenlíteni a fordulatszámokat.



4-21. ábra Tengelykapcsolók fordulatszámkiegyenlítő hatása (saját szerkesztés)

4.9 MEGJELENÍTÉS

A szimuláció megfelelő vizualizációja kulcsfontosságú a hibák gyors felismerésében. A diagrammok esetében, ahol az átlagértékek kiemelkedőek, célszerű ezeket más színnel kiemelni, hogy könnyebben követhetők legyenek. Például az alábbi ábrán a piros színnel jelölt átlagos futásteljesítményigény vagy átlagsebesség segíthet az adatok gyorsabb értelmezésében. Az ábrán látható törések főként az időfelbontás dinamikus változásaiból erednek, ami befolyásolhatja a megjelenített adatokat. Az ilyen típusú vizualizációk lehetővé teszik a pontosabb elemzést és a hibák gyorsabb észlelését.



4-22. ábra Szimuláció által megjelenített diagrammok (saját szerkesztés)

4.10 FÁJLBÓL INDÍTÁS

A szimuláció teljes futásidejének optimális kihasználásához elengedhetetlen, hogy ne kézi paraméterezés történjen, hanem minden bemenet, így a stratégia is fájlból kerüljön beolvasásra a szoftver által. Az első szint ezt úgy valósítja meg, hogy egy Excel fájlt kell beadni, amely tartalmazza a stratégiát, ezzel biztosítva, hogy a szimulációban a két perces futásidő teljes mértékben kihasználható. A következő fejlesztési szint ennél is előrébb tart, amikor nem csupán egyetlen stratégia, hanem akár több száz is betölthető a szoftverbe, amely így képes akár egy egész napig futtatni a különböző szimulációkat. A fájlból történő indításhoz jelenleg a stratégia táblázat alapján történik az adatbeolvasás, ciklusonként. Ez lehetővé teszi, hogy a rendszer felismerje, melyik motornak kell működnie az adott pillanatban. A szimuláció követi a motorok indítását és leállítását, és a rendszer előre beállított paraméterek alapján végzi a munkát. Jelenleg a stratégiát úgy lehet beállítani, hogy az út adott pontján indítsa el a motort, ami a versenyek során is gyakori megközelítés, mivel ott is hasonló módon van meghatározva a helyszíni indítási pont.

Tervben van a fejlesztés, hogy a stratégia a jövőben ne csak pozícióval, hanem sebességgel is összekapcsolható legyen. Ez azt jelenti, hogy beállítható lesz minimum sebesség érték is, amely alatt elindul a motor, illetve maximum sebesség, amely felett a hajtás leállhat. Ezen paraméterek kombinációja is alkalmazható lenne, így például egy kanyar kijáratánál a motor automatikusan beindulhat, de leállításához a sebesség is figyelembevételre kerülhet.

4.11 KIMENETEK

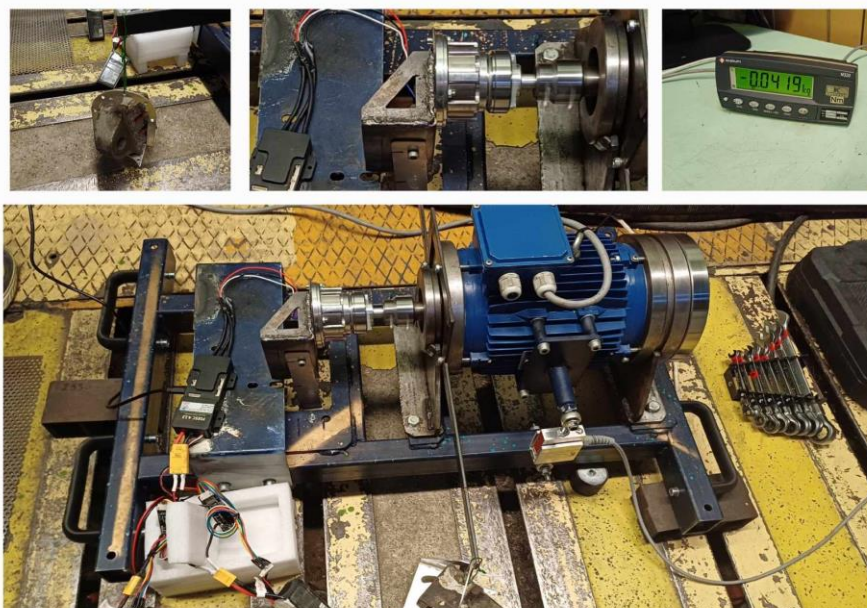
A szimuláció kiértékeléséhez és a további bemenetek generálásához elengedhetetlen a megfelelő kimeneti adatok kiválasztása. Mivel minden futtatás után hatalmas adatbázis keletkezik a diagrammokon és a pillanatnyi értékeken alapulva, fontos kiemelni azokat az adatokat, amelyek a leginkább mérvadók a stratégia értékelésében. A legfontosabb mutatók közé tartozik a fogyasztás [km/l], az eltelt idő és a megtett út. A fogyasztás értéke alapvetően meghatározza, hogy egy adott stratégia mennyire volt hatékony és versenyképes: minél magasabb a [km/l] eredmény, annál jobban közelít a tökéleteshez. Fontos azonban figyelembe venni a verseny specifikus kritériumait is. Például egy alapvető követelmény, hogy a versenyt 39 percen belül kell befejezni, azaz a 16 kilométeres távot ezen időn belül kell teljesíteni. Ezért a stratégia kiértékelésekor nemcsak a fogyasztás, hanem az idő és a táv is fontos szerepet kap. A jövőben érdemes a kimeneti adatokat fájlba menteni, hogy egyszerű sorba rendezéssel vagy bonyolultabb algoritmusokkal könnyen értékelhetők és elemezhetők legyenek, így támogatva a további finomhangolást és optimalizálást.

5 MÉRÉSEK

A kutatás középpontjában a korábbi fejezetekben bemutatott szimuláció állt, de annak pontosításához és ellenőrzéséhez elengedhetetlenek a mérések. Kétféle mérési terv készült, amelyek közül csak az egyik valósult meg a dolgozat írásáig. A motorok részletes jellegmezőjének meghatározása szükséges volt, mivel a gyártó nem adta ki ezeket az adatokat, hivatkozva arra, hogy a vezérlés beállításai jelentősen befolyásolják az eredményeket, így nem tartották értelmeseznek a jellegmező kimérését. Azonban egy maximális teljesítményadat elérhető volt, amely segítségével a mérések megfelelő módosítása megtörtént. A fékpadi mérés mellett egy teljes futásteljesítmény mérés is tervbe volt véve, amely azonban a dolgozat befejezéséig nem valósult meg. Ez a második teszt a szimulációk és a gyártói adatok hitelességének ellenőrzését szolgálja majd.

5.1 VILLANYMOTOR FÉKPADOZÁSA

A mérés a Maxon DT65M szenzor nélküli BLDC motor vizsgálatára irányult, amelyet egy FSEC vezérlő működtetett. Az adatgyűjtés a csapat saját tervezésű fékpadján készült. A kimeneti nyomatékok egy csapágyazott fékgépre szerelt erőmérő cella mérte, az adatok pedig egy mérőegységen keresztül egy egyedi fejlesztésű LabVIEW környezetben kerültek kiolvasásra és rögzítésre. A fordulatszám és a bemeneti áramadatok a FSEC vezérlőből származtak, amely a bemeneti feszültség kezelését is ellátta. A fékpad csapágyazása azonban nem volt optimális, jelentős hiszterézist okozva, ezért az adatgyűjtést folyamatos forgás mellett, üresjáratú nullázással kellett végezni. Továbbá, a rendszer előfeszítése érdekében egy állandó terhelő nyomatékokat alkalmaztak a fékgépen.



5-1. ábra Fékpadi mérés összeállítás (saját szerkesztés)

5.1.1 CELLA KALIBRÁCIÓ

A mérés során erőmérő cella került alkalmazásra, ezért a mért adatokat kalibrálni kellett, hogy azokat nyomaték értékekké lehessen átalakítani a számításokhoz. A kalibrációs folyamat úgy zajlott, hogy különböző súlyok lettek kimérve gramm mérleg segítségével, és ezek egy a fékpad tengelyétől pontosan kimért távolságra elhelyezett tartóba lettek helyezve. Az erőmérő cella által rögzített adatok ezután lineáris regresszióval lettek kiértékelve. A legfontosabb paraméter a regressziós egyenes meredeksége volt, mivel ez adja meg azt a konstans értéket, amellyel a cella által mért erőt szorozva meghatározhatók a nyomaték adatok.



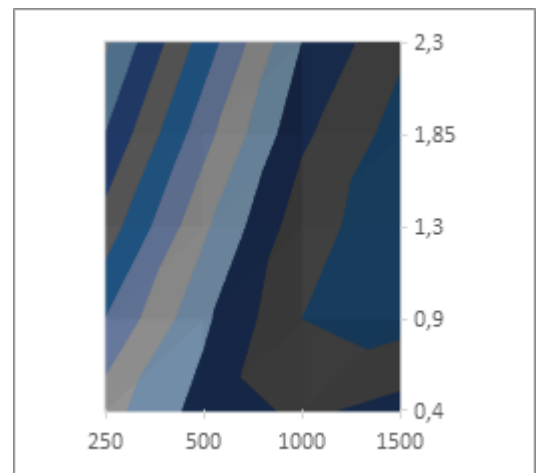
5-2. ábra Erőmérő cella kalibráló súlyok és kalibrációs elrendezés (saját szerkesztés)

5.1.2 MÉRŐ SZOFTVEREK

A mérés során két szoftver alkalmazására került sor: az egyik a LabVIEW, amely a nyomatékadatok rögzítésére szolgált. A LabVIEW szűrt mozgóátlagos nyomatékmérést alkalmazott a mérések pontosságának maximalizálása érdekében. A másik szoftver a VESC TOOL, egy nyílt forráskódú motorvezérlő program volt, amelyet kifejezetten a motor vezérlőegységéhez fejlesztettek. Ez a szoftver rögzítette a motor működésével kapcsolatos további adatokat, például a fordulatszámot és áramfelvételt.

5.1.3 ADATOK KIÉRTÉKELÉSE

Az adatok végső kiértékelése Excelben történt, ahol a bemenő és kimenő teljesítmények kerültek összehasonlításra. A kimenő teljesítmény a motor fordulatszámaival (x tengely) és nyomatékával (y tengely) lett kiszámítva. Mivel a mérés relatív mérés volt, az eredményeket el kellett tolni, hogy azokat megfelelő referenciaértékekhez kerüljenek. Az eltolás úgy zajlott, hogy a maximális kimeneti teljesítmény a katalógusban megadott 92%-ra lett állítva, figyelembe véve a vezérlő hatásfokát is. Ez biztosította, hogy a mért adatok az elméleti és gyakorlati értékekhez is közelítettek, így pontosabb következtetések vonhatók le.



5-3. ábra Fékpadi mérési adatok elemzése, jellegmező (saját szerkesztés)

5.2 VERSENYAUTÓ TESZTELÉSE

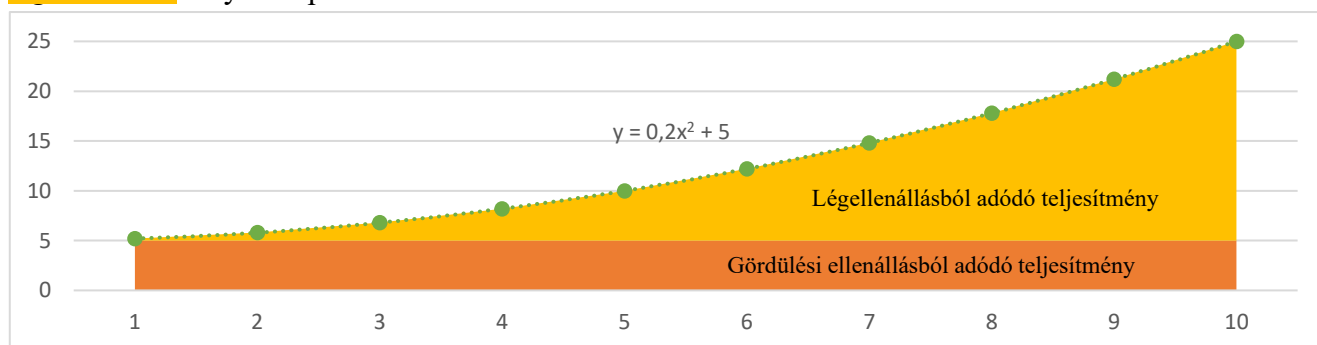
A versenypálya adatai Excel fájlból történő importálásának köszönhetően a szimuláció könnyen ellenőrizhető. A versenypálya helyére a tesztpálya pontfelhőjének behelyettesítésével lehetővé válik a szimulált és a valós fogyasztási adatok összehasonlítása. Továbbá, egy egyszerű mérési eljárás segítségével valós körülmények között a gördülési és légellenállás értékek is meghatározhatók. Ehhez az autót egyenletes sebességgel kell mozgatni sík terepen, miközben a felvett teljesítményt kell mérni. Fontos megemlíteni, hogy a mérés során a veszteségekbe bekerülnek a hajtáslánc (vezérlő, motor, szíj) veszteségei is, de ezt lehet kompenzálni előzetes fékpadi mérésekkel.

5.2.1 TESZTRENDSZER

A tervezett teszt során a Diesel-motor nem kerülne beépítésre, a hajtás kizárólag a hibrid rendszer BLDC motorjával történne, amelyet két LiPo akkumulátor lát el energiával. Ezek az akkumulátorok összesen legfeljebb 50 V feszültséget biztosítanak, így a motor specifikációi alapján a teszt során a jármű maximális sebessége körülbelül 30 km/h lenne. Ez a sebesség elegendő a gördülési és a légellenállási tényezők meghatározásához. A mérések során a motort vezérlő FESC adatokat küld CAN-buszon keresztül a versenyautó központi egységébe. Az így kapott információk továbbításra kerülnek a pilóta kijelzőjeként funkcionáló okostelefonra, amely az adatokat rögzíti.

5.2.2 ADATOK KIÉRTÉKELÉSE

A teljesítményadatokból a komponensek meghatározhatók másodfokú polinomiális regresszió alkalmazásával, melynek egyenlete pontosan leírja az egyes tényezők súlyát. A légellenállás a sebességgel négyzetes arányban változik, míg a gördülési ellenállás mértéke független a sebességtől. Ezzel a módszerrel a mért teljesítményértékek alapján a két komponens külön-külön meghatározható. Például az alábbi hipotetikus diagram szemlélteti, hogyan alakul a különböző sebességeken mért ellenállási teljesítmény (y tengely) a sebesség függvényében (x tengely). Az egyenlet ismeretében, a paraméterek (például kerékátmérő, levegő sűrűsége, homlokl felület) figyelembevételével a gördülési és légellenállási tényezők pontosan visszaszámíthatók.



5-4. ábra Ellenállások megoszlása sík terepen konstans sebességnél (saját szerkesztés)

6 ÖSSZEGZÉS

Az elmúlt hónapokban egy rendkívül izgalmas kutatásban vehettem részt, amely lehetőséget biztosított arra, hogy alaposabban megértsem a versenyautó működésén keresztül egy komplex energetikai rendszer viselkedését. A kutatás során egyre mélyebb betekintést nyertem az autó és annak energetikai rendszere közötti dinamikákba. Az egész projekt nagy hatással volt rám, és mindenképpen szeretném folytatni a munkát, befejezni a még el nem végzett, de már megtervezett méréseket, hogy a szimulációm minél hitelesebbé tegyem.

A következő lépésként célom, hogy a tesztek lebonyolítása mellett egy olyan algoritmust dolgozzak ki, amely gépi tanulási módszerekkel képes optimalizálni a bemeneti stratégiákat a kimeneti adatok függvényében. Feltételezésem szerint – bár a szimuláció elég gyors ahhoz, hogy a nyári verseny előtt brute force módszerrel megtaláljam az optimális indítási stratégiát – mégis egy keresési algoritmus, esetleg egy neurális háló segítségével sokkal precízebben és gyorsabban meghatározható lenne az ideális stratégia.

Nagy megtiszteltetés lenne, ha a tavaszi versenyen az általam meghatározott stratégia alapján tudna a csapat versenyezni. Az első számítások alapján már most is közelíthetjük a tavalyi bajnok eredményét optimalizálás nélkül. Ezt a feltételezést szeretném a tesztek révén tavasszal megerősíteni. Az optimalizálással pedig a lehető legjobb lehetőség dobogós helyezést kihozni a csapatból.

Hosszú távú fejlesztési terveim is vannak, amelyek kiterjesztik ezt a kutatást. Az egyik legérdekesebb ötlet az lenne, ha képes lenne egy előre tanított algoritmus a verseny közben, élő adatok alapján, optimális stratégiát készíteni a pilótának, figyelembe véve az olyan zavaró körülményeket, mint például a többi autó jelenléte a pályán vagy a környezeti tényezők, mint például a szél változása.

Idén a csapat a városi autó fejlesztését is tervezi. A szimulációm próbáltam úgy megtervezni, hogy az képes legyen a városi autó modellezésére is. A városi autó hidrogén üzemanyagcellás hajtásának figyelembevételével szeretném a Diesel-motor helyett modellezni a hidrogéncellához kapcsolódó energetikai rendszereket, hogy azokat a szimuláció is képes legyen számolni.

6.1 BEFEJEZÉS

Szeretnék köszönetet mondani BME SharkTeam csapatának, akik teljes erőbedobással dolgoztak az elmúlt években Lénának az elkészítésén. Köszönöm konzulensemnek Lukács Kristófnak a szakmai útmutatást, valamint barátaimnak és családomnak, akik a dolgozat leadása előtt átolvasták és építő jellegű visszajelzéseikkel segítettek a munka megvalósításában. Végül, de nem utolsósorban Önöknek, tisztelt Olvasók, hogy figyelmükkel megtiszteltek és elolvasták a munkámat!

7 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] P. Gáspár, B. Németh és J. Bokor, Járőrnyítás, Budapest: Akadémiai Kiadó, 2019.
- [2] J. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics (sixth edition), New York: McGraw-Hill Education, 2017.
- [3] S. Rijnsa, T.-R. Teschner, K. Blackburn és J. Brighton, „The Effects of Cornering Conditions on the Aerodynamic Characteristics of a High-Performance Vehicle and Its Rear Wing,” *Physics of Fluids*, pp. Volume 36, Issue 4, April 2024.
- [4] J. Hyttinen, M. Rothhämel, J. Jerrelind és L. Drugge, „Simulation of transient rolling resistance of bicycle tyres at various ambient temperatures,” *PLOS ONE*, 2024.
- [5] H. Olofson, *Rolling resistance during cornering impact of lateral forces for heavy-duty vehicles*, Stockholm: KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY SCHOOL of ENGINEERING SCIENCES, 2015.
- [6] V. Jansson, A literature study of rolling, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2022.
- [7] L. Holistics, Fizika, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1986.
- [8] L. V. H. Armstrong és C. L. Proctor, „Diesel engine,” 11. szeptember 2024. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>. [Hozzáférés dátuma: 2. november 2024].
- [9] E. Kovács, Dízel vontatójárművek I. Vasúti dízelmotorok, Typotex Kiadó, 2012.
- [10] J. B. Heywood, INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS, United States of America: McGraw-Hill, 1988.
- [11] V. Ganesan, Internal Combustion Engines Fourth Edition, New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2012.
- [12] B. Schultz, „Weichai unveils diesel engine with 53.09% thermal efficiency,” 22. április 2024. [Online]. Available: <https://www.powerprogress.com/news/weichai-unveils-diesel-engine-with-53.09-thermal-efficiency/8036865.article>. [Hozzáférés dátuma: 2. november 2024].
- [13] R. Y. Dahham, H. Wei és J. Pan, Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges, Basel: MDPI, 2022.
- [14] M. Bartha, L. Borbás, A. Eleőd, P. Ficzer, L. Lovas, J. Nyitrai és M. Nyolcas, JÁRMŰ- ÉS HAJTÁSELEMEK III., Typotex Kiadó, 2011.

- [15] B. M. Trust, „Wikipédia,” Birmingham Museums Trust, 11. Augusztus 2005. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=39738474>. [Hozzáférés dátuma: 2. november 2024].
- [16] Dejan, „how-brushless-motor-and-esc-work,” How to Mechatronics, március 2019. [Online]. Available: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>. [Hozzáférés dátuma: 2 november 2024].
- [17] Maxon Motor Group, „ECDT65Frameless,” Maxon Motor Group, [Online]. Available: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/motor/ecmotor/ecframeless/ECDT65Frameless/783332>. [Hozzáférés dátuma: 2. november 2024].
- [18] B. Akin és M. Bhardwaj, Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors, Texas Instruments, 2015.
- [19] D. Perumal, R. Sandeep és K. Vasudevan, „Simple position sensorless starting method for brushless DC motor,” *IET Electric Power Applications*, %1. kötet2, %1. szám1, pp. 49-55, 2008.
- [20] M. Deepak, C. Bharatiraja és L. Mihet-Popa, „A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications,” *IEEE Access*, %1. kötet10, %1. szám7, pp. 1-1, 2021.
- [21] Z. Stevic és I. Radovanovic, „Supercapacitors: The Innovation of Energy Storage,” *Updates on Supercapacitors*, október 2022.
- [22] Eaton, „Hybrid supercapacitors,” Eaton, [Online]. Available: <https://www.eaton.com/gb/en-gb/skuPage.HSL1225-3R8127-R.html>. [Hozzáférés dátuma: 3 november 2024].
- [23] P. Simon és Y. Gogotsi, „Materials for Electrochemical Capacitors,” *Nature Materials* 7(11), pp. 845-854, november 2008.
- [24] R. Shidid és B. Dasharath, „Battery Management System using microcontroller,” január 2024.
- [25] S. Ness, Y. Boujoudar, A. Aljarbounh és A. Mohamed, „Active balancing system in battery management system for Lithium-ion battery,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 14(4), pp. 3640-3648, április 2024 .
- [26] L. Han, L. Wang, Z. Chen, Y. Kan, Y. Hu, H. Zhang és X. He, „Incombustible Polymer Electrolyte Boosting Safety of Solid-State Lithium Batteries: A Review,” *Advanced Functional Materials* 30(32), április 2023.
- [27] K. Gerse, Energiatárolók, Akadémia Kiadó, 2020.

- [28] Tattu Gens, „Tattu R-Line,” [Online]. Available: <https://gensace.de/products/tattu-r-line-version-5-0-1200mah-22-2v-150c-6s1p-lipo-battery-pack-with-xt60-plug>. [Hozzáférés dátuma: 3. november 2024].
- [29] I. Tóth, Röpsúlyos tengelykapcsoló tervezése verseny járműbe, Budapest: GÉP- ÉS TERMÉKTERVEZÉS TANSZÉK SZAKDOLGOZAT, 2023.
- [30] Technoargia, „Wikipédia,” [Online]. Available: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Kilincsmű>. [Hozzáférés dátuma: 3 november 2024].
- [31] V. Simon, Hajtástechnika, Akadémia Kiadó, 2019.
- [32] A. Lajunen, K. Kivekäs, V. Freyermuth, R. Vijayagopal és N. Kim, Simulation-Based Assessment of Energy Consumption of Alternative Powertrains in Agricultural Tractors, Basel: MDPI, 2024.
- [33] A. Sanchawat, R. Agarwal, R. Chandrasekar és P. Baskar, „Simulation of a Drivetrain of a Vehicle comprising Continuously Variable Transmission,” *International Journal of Engineering and Technology*, %1. kötet5, %1. szám3, pp. 3041-3050, 2013.
- [34] K. Tammi, T. Minav és J. Kortelainen, Thirty Years of Electro-Hybrid Powertrain Simulation, Finnország: Aalto University, 2018.
- [35] R. Kovács és V. Józsa, Bevezetés a numerikus módszerekbe, Akadémia Kiadó, 2019.
- [36] J. Gräff, LabVIEW bevezető mechatronikusoknak, Akadémia Kiadó, 2023.
- [37] J. Jardim, K. C. d. O. Salim, P. H. L. d. Santos, C. A. d. Silva Neto, M. Groetaers dos Santos, H. M. d. Barros és G. N. Taranto, „Variable Time Step Integration for Real-Time Simulation of Hybrid Powertrains,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, %1. kötet11, %1. szám6, 2017.

8 ANGOL NYELVŰ ÖSSZEFOGLALÓ (SUMMARY)

The energy-efficient race car "Léna," developed by the BME SharkTeam, is equipped with a Diesel-hybrid powertrain featuring a custom-built Diesel engine. In the competition, teams aim to complete a 16-kilometer course within 39 minutes, using as little fuel as possible. While several parameters influence efficiency during the race, two factors are particularly significant: the vehicle's weight and the engine's efficiency.

Generally, smaller engines tend to be less efficient. Our team has found an optimal balance: using a smaller engine would significantly reduce efficiency, while increasing the vehicle's weight would place us at a major disadvantage compared to other teams. Our engine is capable of producing much more power than the vehicle continuously requires. To optimize fuel consumption, the engine operates intermittently rather than continuously, engaging only when necessary. Since the engine's power and efficiency do not ideally match constant performance needs, intermittent operation is crucial for improving overall efficiency.

In my research, I developed a LabVIEW simulation that uses engine performance metrics and real-world measurements to predict the vehicle's energy efficiency under various race conditions. This simulation model enables us to examine factors influencing engine efficiency, such as load cycles, energy usage optimization, and fine-tuning the coordination between the engine and the hybrid system.

The goal of my research is to develop operational strategies that align with the engine's parameters, enabling maximum efficiency during the race. Based on simulation results, I will propose recommendations for optimizing the engine's operating cycles, helping our team achieve the best possible results in the 2025 competition.

Keywords: Powertrain simulation, LabVIEW simulation, Energy efficiency

9 ÁBRAJEGYZÉK

1-1. ábra Léna kigurul a műhelyből a BME SharkTeam rollout rendezvényén (saját kép).....	7
2-1. ábra Hosszirányú erőhatások emelkedőn gyorsító autó esetén (saját szerkesztés)	8
2-2. ábra Négyütemű Diesel-motor működése [8].....	11
2-3. ábra Lendkerék egy Trevithick 1802-es gőzmozdonyon [15]	12
2-4. ábra BLDC motor felépítése és vezérlése [16] ; Maxon motor DT65M [17]	13
2-5. ábra Szuperkondenzátorok a BME SharkTeam hibrid rendszerében (1. 3. saját kép) (2. [22])	14
2-6. ábra LiPo akkumulátor [28].....	15
2-7. ábra A BME SharkTeam saját tervezésű röpsúlyos kuplungja [29]	16
2-8. ábra Racsní [30].....	16
2-9. ábra BME SharkTeam hátsó szíjkerék (saját kép).....	16
3-1. ábra BME SharkTeam hajtásláncának robbantott ábrája és felülnézete (Saját szerkesztés)	20
4-1. ábra Beolvasás Excelből (saját szerkesztés).....	21
4-2. ábra Saját 2D interpoláció SubVI (saját szerkesztés).....	22
4-3. ábra Saját 3D interpoláció SubVI (saját szerkesztés).....	22
4-4. ábra Saját pályaadat értékelő interpoláló SubVI (saját szerkesztés)	23
4-5. ábra Változó időfelbontású, késleltethető, diszkrét időlépés (Saját szerkesztés)	24
4-6. ábra Saját pályastratégia étrekelő interpoláló SubVI (saját szerkesztés)	24
4-7. ábra Fordulatszám mértékegység váltó SubVI (saját szerkesztés).....	25
4-8. ábra Az indítómotor modellezése (saját szerkesztés)	26
4-9. ábra A Diesel motor modellezése (saját szerkesztés)	27
4-10. ábra Hibrid rendszer modellezése (saját szerkesztés).....	28
4-11. ábra Röpsúlyos kuplung állapotának meghatározása (saját szerkesztés)	29
4-12. ábra Racsnis szabadonfutó állapotának meghatározása (saját szerkesztés)	30
4-13. ábra Fordulatszám kiegyenlítő SubVI hiszterézissel (saját szerkesztés).....	30
4-14. ábra Gördülési ellenállás kerékre redukált nyomatóka (saját szerkesztés).....	31
4-15. ábra Légellenállás kerékre redukált nyomatóka (saját szerkesztés)	32

4-16. ábra Emelkedési ellenállás kerékre redukált nyomatéka (saját szerkesztés).....	32
4-17. ábra Trapézintegráló SubVI, előjel figyelembevételével (saját szerkesztés)	33
4-18. ábra „A” tengely integrálása (saját szerkesztés).....	34
4-19. ábra „B” tengely integrálása (saját szerkesztés)	35
4-20. ábra „C” tengely integrálása (saját szerkesztés)	36
4-21. ábra Tengelykapcsolók fordulatszámkiegyenlítő hatása (saját szerkesztés)	36
4-22. ábra Szimuláció által megjelenített diagrammok (saját szerkesztés)	37
5-1. ábra Fékpadi mérés összeállítás (saját szerkesztés).....	39
5-2. ábra Erőmérő cella kalibráló súlyok és kalibrációs elrendezés (saját szerkesztés)	40
5-3. ábra Fékpadi mérési adatok elemzése, jellegmező (saját szerkesztés).....	40
5-4. ábra Ellenállások megoszlása sík terepen konstans sebességnél (saját szerkesztés).....	41