

**Hibrid járműhajtásrendszer
architektúrájának és szabályozási
stratégiájának szimuláció-alapú
optimalizációja**

Mezőffy Máté, Járműmérnöki szak, SI80G2

Tartalom

Bevezetés	6
Probléma felvetése.....	8
Környezeti hatások	8
Társadalmi hatások	9
Hajtáslánc kiválasztása	12
Belsőégésű Motoros hajtás	12
Villanymotoros hajtás.....	14
Hibrid hajtás	15
Fogyasztási adatok.....	17
Összegzés.....	18
Hibrid modell felépítése	20
Matlab Simulink	21
Teljesítményigény levezetése	22
Bolygómű	25
Villanymotorok.....	27
MGU1	27
MGU2	28
Belsőégésű motor	29
Akkumulátor	32
Fogyasztási adatok (alapmodell)	34
Optimalizáció.....	39
Belsőégésű motor optimalizációja.....	39
Szelepvezérlés optimalizációja.....	39
Befecskendező rendszer optimalizációja.....	43
Hibrid szabályozási stratégia optimalizációja	47

Akkumulátor hatásfok optimalizációja.....	48
Belsőégésű motor munkapont optimalizációja.....	49
Üzem módok optimalizációja.....	51
Eredmények.....	53
Források.....	56

Ábrajegyzék

1. ábra: Autóvásárlási szempontok	6
2. ábra: Üvegházhatás mechanizmusa	8
3. ábra: Üvegházhatású gázok eloszlása az atmoszférában	9
4. ábra: Kőolaj lelőhelyek eloszlása a Földön	10
5. ábra: Halálozások száma évente légszennyezés miatt	11
6. ábra: Szén-dioxid kibocsátást csökkentő stratégiák a villamosság előállításban 2010.....	12
7. ábra: Belsőégésű motoros hajtáslánc	13
8. ábra: Belsőégésű motor felépítése	13
9. ábra: Egy akkumulátoros villanymotoros hajtáslánc felépítése.....	14
10. ábra: Egy főre eső elektromos áram forrásának eloszlása országonként 2021	15
11. ábra: Soros hibrid hajtáslánc felépítése.....	16
12. ábra: Különböző hibrid architektúrák tüzelőanyag- és áramfogyasztásai európai és amerikai menetciklusokon	19
13. ábra: Egy teljesítményosztó hibrid modellje.....	20
14. ábra: Az optimalizálási szimuláció folyamatábrája	21
15. ábra: Egy egyszerű Matlab Simulink modell.....	22
16. ábra: Veszprém időjárás előrejelzése 2022.10.30-ra	22
17. ábra: WLTC Class 3 menetciklus sebesség-idő grafikonja	23
18. ábra: A bolygómű	25
19. ábra: Bolygómű fordulatszám összefüggése.....	26
20. ábra: Nyomatékosztási logika Matlab Simulink-ben.....	27
21. ábra: MGU1 hatásfok diagramja.....	28
22. ábra: MGU2 hatásfok diagramja.....	29
23. ábra: Belsőégésű motor fajlagos fogyasztási jellegmező [g/kWh]	31
24. ábra: Belsőégésű motor modellje AVL Boost környezetben.....	31
25. ábra: Feszültség változása az akkumulátor töltöttség függvényében	33
26. ábra: Akkumulátor modellje Matlab Simulinkben	34
27. ábra: Programkód a kezdeti SOC beállítására	35
28. ábra: ICE munkapontjai a WLTC ciklus során (alapmodell)	36
29. ábra: MGU1 munkapontjai a WLTC ciklus során (alapmodell)	36
30. ábra: MGU2 munkapontjai a WLTC ciklus során (alapmodell)	37
31. ábra: Alapmodell felépítése Matlab Simulinkben.....	38

32. ábra: Miller-ciklus indikátor diagramja (hengertérfogat-nyomás)	40
33. ábra: Kipufogószelep nyitás optimalizálása (3000 rpm, teljes terhelés).....	41
34. ábra: A kipufogószelep ideális nyitási pontjai különböző terhelések (bal) és fordulatszámok (jobb) mellett.....	42
35. ábra: Szívószelep ideális nyitási időpontjai különböző terhelések mellett.....	42
36. ábra: Terhelésszabályozás a szívószelep zárási időpontjának változtatásával 2000 rpm (kék), 4000 rpm (piros) és 6000 rpm (sárga) fordulatszámoknál	43
37. ábra: Szívócső befecskendezés (bal) vs Közvetlen befecskendezés (jobb)	44
38. ábra: Közvetlen befecskendezés javító hatása	44
39. ábra: Homogén (bal) vs Rétegzett (jobb) keverékképzés	45
40. ábra: Fogyasztás optimalizálás keverékképzéssel	45
41. ábra: ICE optimalizált modell fajlagos fogyasztás jellegmező.....	46
42. ábra: Maximumhely kiválasztás Matlab Simulinkben.....	47
43. ábra: Akkumulátor veszteségei adott mértékű töltés mellett (SOC = 50%)	48
44. ábra: Példa az egységnyi idő alatti ekvivalens fogyasztás optimalizálásra (1,6 m/s, 3 kW kérés).....	49
45. ábra: Belsőégésű motor optimalizált munkapontjai a WLTC menetcikluson	50
46. ábra: Belsőégésű motor optimalizált munkapontjai a WLTC menetcikluson (javított) ..	50
47. ábra: Fogyasztási adatok a belsőégésű motor bekapcsolási fordulatszám függvényében	51
48. ábra: Fogyasztási adatok a belsőégésű motor bekapcsolási nyomaték függvényében	52
49. ábra: Fogyasztási adatok az alsó SOC korlát függvényében	52
50. ábra: Toyota Prius belsőégésű és villanymotor hatásfok diagramjai.....	53
51. ábra: Optimalizált modell fordulatszám-viszonyai (kék – MGU1, piros – ICE, sárga – MGU2).....	54
52. ábra: Optimalizált modell nyomaték-viszonyai (kék – MGU1, piros – ICE, sárga – MGU2)	54

Táblázat jegyzék

1. táblázat: Vizsgált hajtástípusok Globális fogyasztási adatai	17
2. táblázat: Döntési mátrix	18
3. táblázat: Menetellenállásokhoz szükséges adatok	23
4. táblázat: A Belsőégésű motor (ICE) jellemzői	29

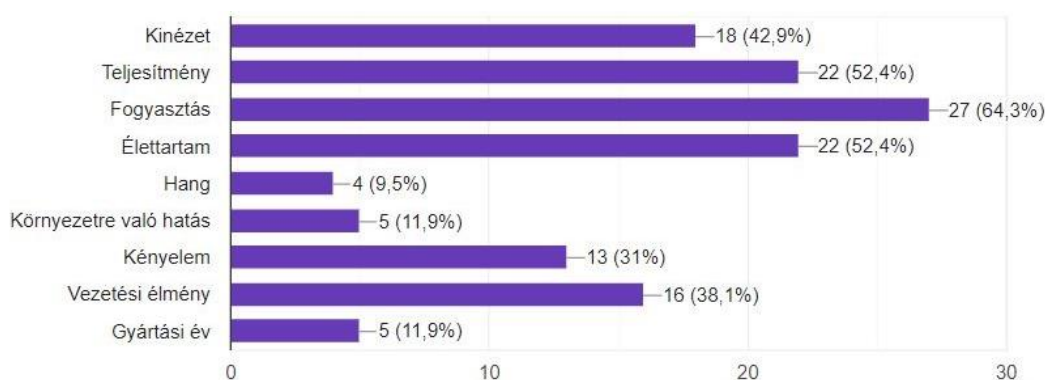
5. táblázat: : Különböző akkumulátor típusok egységnyi energiára vetített fajlagos tömege	32
6. táblázat: Chargex® CX20 jellemzői	32
7. táblázat: Optimalizált Belsőégésű motor hatása a fogyasztásra és a hatótávra	47
8. táblázat: Fogyasztási adatok optimalizációs lépésenként	55
9. táblázat: A dolgozat végeredménye (WLTC)	55

Bevezetés

Napjainkban növekvő teret hódít az úgynevezett „zöld forradalom”, ami a környezetet egyre nagyobb mértékben sújtó emberi tevékenységek csökkentésére, illetve megszüntetésére irányuló mozgalom. Több és több multinacionális cég vezet be karbonsemlegességi stratégiát, nagyobb figyelem kerül a hulladékok megfelelő tárolására, kampányok indulnak új fák ültetésére és igyekszünk eltávolodni a környezet számára káros alapanyagok használatától (pl. műanyag). A környezetszennyezés égető probléma a mai világban, a tevékenységnek néhány évtizeden belül súlyos következményei lehetnek. Fontos kiemelni a közlekedés szerepét a környezetszennyezésben, hiszen Európában a teljes energiafelhasználás közel 33%-át, míg a szén-dioxid kibocsátás 23%-át teszi ki [53].

Mivel a felhasználható energiamennyiség véges, illetve annak ára és elérhetősége nagy mértékben függ az előállító országtól, így a függetlenség megvalósításának feltétele az energiafelhasználás minimalizálása. A fent említett két globális probléma közös megoldása lehet egy adott egységnyi energiahordozóból kinyerhető munka maximalizálása. Ebből levezethető, hogy egy jármű egyik, ha nem a legfontosabb tulajdonsága annak energiafogyasztása.

A környezetvédelmi és energetikai megfontolások mellett fontos továbbá, hogy a fogyasztói igények kielégítése. A dolgozat során egy kérdőív alapú kutatás is készült egy szűkebb, 42 fős rétegben az autóválasztási szokásokról. A kérdőívet kitöltőknek a listából kellett kiválasztaniuk a számunkra két legfontosabb jármű tulajdonságot.



1. ábra. Autóválasztási szempontok

Az 1. ábra azt mutatja, hogy a megkérdezettek szerint egy autó legfontosabb tulajdonsága annak fogyasztása, ami a növekvő energiaárak mellett döntő jelentőségű. A környezetre való hatás már sokkal kevésbé fontos, az embereknek csupán 11,9%-a szerint választási szempont.

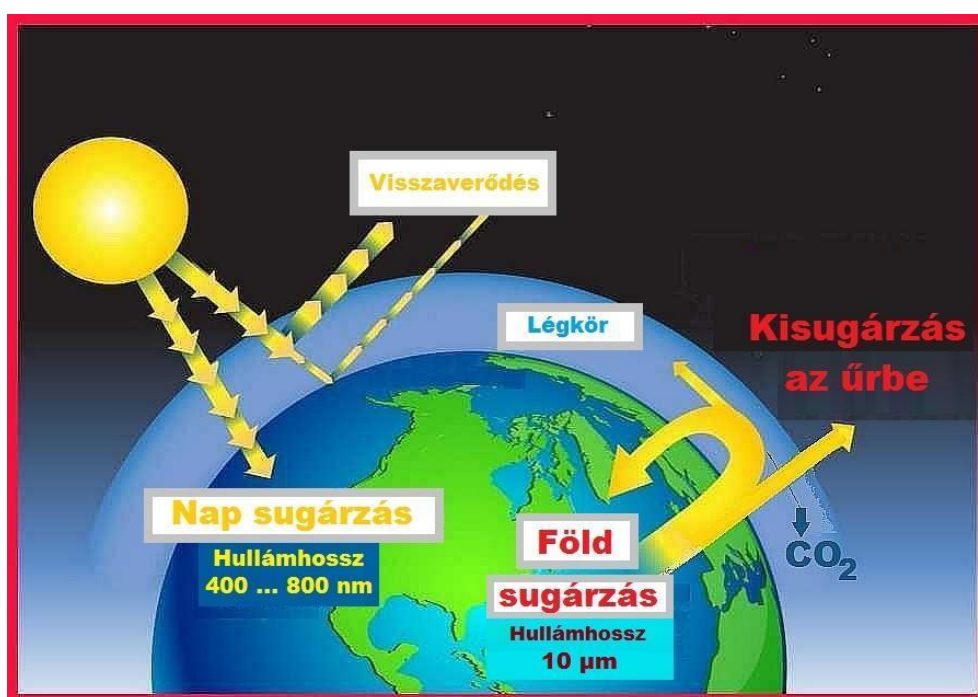
A fent említett tényezők hatására az ipart eddig domináló belsőégésű motorok mellett megjelentek az úgynevezett „alternatív járművek”. Mindegyik megoldás más módszerrel közelíti meg az energetikai, illetve a környezetszennyezési problémát. Ennek megfelelően a közvélemény is megosztott a témát illetően. A dolgozat megírásának pillanatában nem létezik olyan tudomány, ami egyértelműen meghatározná, hogy melyik megoldás a legjobb.

A kérdőívben a megkérdezettek 78,6%-át érdeklik az alternatív járművek, illetve 83,3%-a vásárolna ilyen autót kedvezőbb árviszonyok mellett. Mindez arra enged következtetni, hogy az új technológiáknak vannak érdeklődői, tehát ezen termékeknek van kereslete. Így ezzel a témával érdemes foglalkozni.

Probléma felvetése

Környezeti hatások

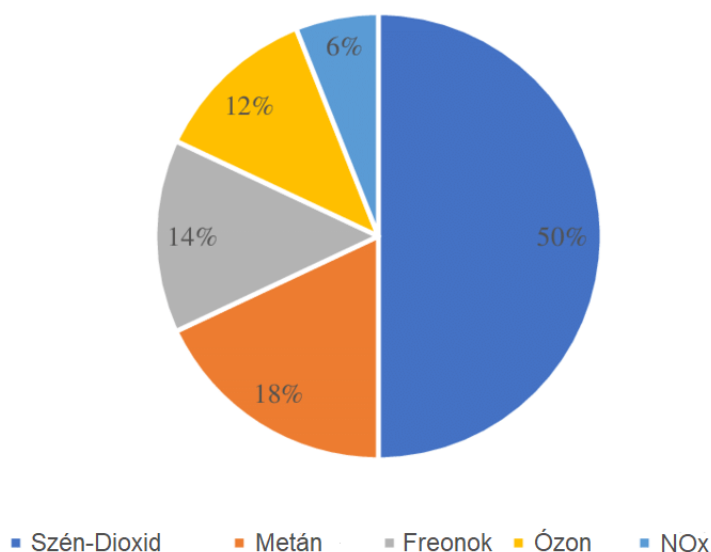
Az egyik legfontosabb modern környezeti jelenség a *globális klímaváltozás*, amit az emberiség által kibocsátott *üvegházhatású gázok* katalizálnak. Ezek olyan anyagok, amelyek a Napból érkező és a föld felszínéről visszaverődő elektromágneses sugárzás egy részét kiengedik a légkörből, egy másik részét csapdába ejti az atmoszférában, ami ennek köszönhetően visszaverődik a földre, hőt kibocsátva a levegőbe, így annak hőmérséklete tovább emelkedik [18][41].



2. ábra: Üvegházhatás mechanizmusa [21]

A felmelegedés mértéke arányos a benne található üvegházhatású gázok koncentrációjával. Az ilyen gázok folyamatos növekedésével bolygónk felmelegszik, ami hosszabb távon az ökoszisztéma összeomlásához vezethet, ennek következtében földünk élehetlenné válhat. A legfontosabb ilyen „szennyezők” a következők:

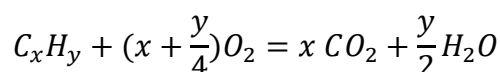
Az üvegházhatású gázok eloszlása az atmoszférában



3. ábra: Üvegházhatású gázok eloszlása az atmoszférában [40]

Járműipari szempontól ezek közül nagy jelentősége van a Nitrogén-Oxidoknak (NO_x: NO, NO₂, N₂O, ...), illetve a Szén-Dioxidnak (CO₂). Mindkét gáz nem-megújuló, azaz *fosszilis* energiahordozók égési melléktermékeiként jelennek meg. A Nitrogén-Oxid mindig elegendő levegő jelenlétében, magas hőmérsékleten történő égéskor keletkezik, így az oxigén és hőmérséklet szabályozása mellett csökkenthető a NO_x képződés. A különböző nitrogén-oxidok a globális klímaváltozás mellett szerepet játszanak a savas eső, illetve a városi szmog kialakulásában is.

Ezzel szemben a szén-dioxid a szénhidrogének tökéletes égésének természetes égésterméke [38]:



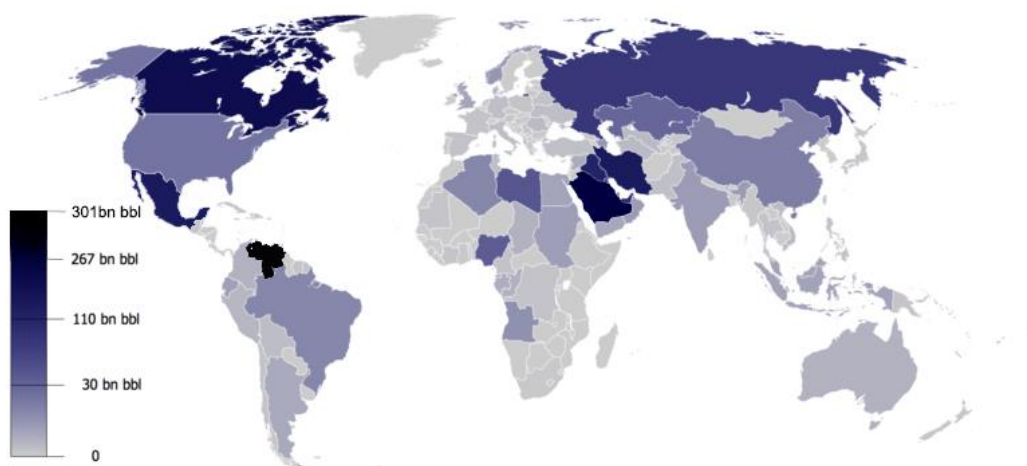
Ennek megfelelően a CO₂ csökkentésének egyetlen megoldása, ha kevesebb szénhidrogént égetünk el.

Társadalmi hatások

Mivel mi, emberek a természet részei vagyunk, így minden környezetre káros tényező a mi életszínvonalunkra is kihat. A globális felmelegedés csapadékhiányhoz, jégsapkák olvadásához és termőföldek pusztulásához, így közvetve élelmiszerhiányhoz, új betegségek terjedéséhez és városok víz alá kerüléséhez vezethetnek.

Korábban említésre került a nem-megújuló energiaforrás fogalom, ezek olyan természetben előforduló nyersanyagok, amiknek a kinyerési mértéke jóval meghaladja az újratermelődés mértékét, ennek megfelelően mennyiségük véges. Ide tartozik a kőolaj, illetve a földgáz. Ezen alapanyagok eltűnése a modern társadalom végét jelentené.

Ezen kívül fontos megemlíteni, hogy ilyen energiahordozók a Földön egyenetlenül osztdódnak el:



4. ábra: Kőolaj lelőhelyek eloszlása a Földön [25]

Tekintve a nyersanyagok értékét ez hatalmas gazdasági és politikai befolyást ad az őket birtokló országoknak. Így a többi államnak saját érdeke, hogy függetlenítsék magukat a fosszilis energiahordozóktól.

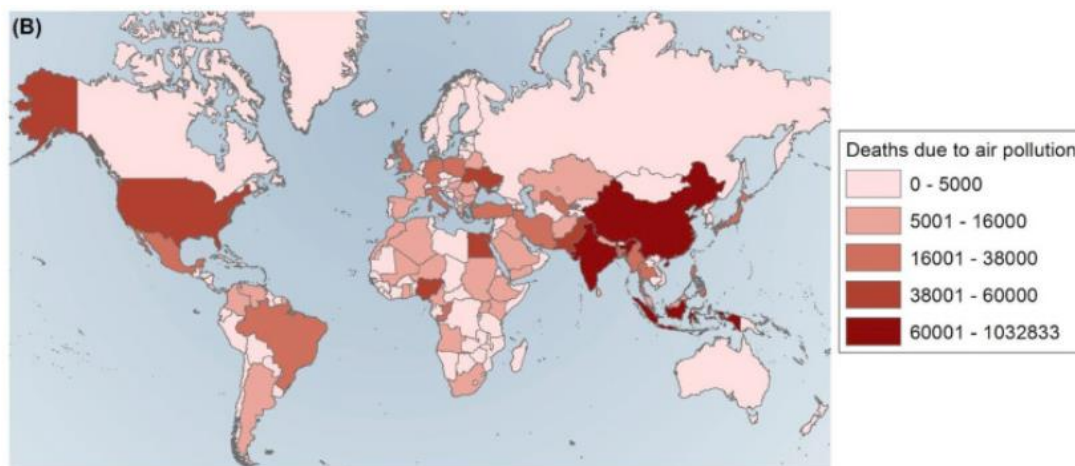
Kiemelendő a járműiparnak az emberi egészségre való hatása. Fosszilis energiahordozók elégetése szén-dioxid és víz mellett számos egyéb gáz, folyékony, vagy szilárd vegyületet hoz létre, ami élőlények számára súlyosan károsító hatású. Említésre méltó károsanyagok:

- **Szén-monoxid (CO)** – Szerves anyagok tökéletlen égése során keletkezik. Véráramba jutva a vér hemoglobinjával reakcióba lép, ami gátolja annak oxigén felvételét és elszállítását a szövetek felé. Már kis dózisban is halálos. [49]
- **Elégetlen szénhidrogének (HC)** – Égés során lokálisan *magas* levegő koncentráció mellett (szegény keverék) a hőmérséklet nagy mértékben lecsökken. Ennek köszönhetően ezekben a pontokban az égés folyamata lelassul, így nincs ideje reakcióba lépnie a megadott idő alatt, így az elégetlenül távozik (belsőégésű motorok). Szervezet számára irritáló, narkotikus hatásuk van, illetve bizonyos esetekben rákot okozhat [12]
- **Részecskék (PM)** – Égés során lokálisan *alacsony* levegő / oxigén koncentráció mellett (dús keverék) elemi szén válik ki, aminek további oxidációja korlátolt,

így az szilárd halmazállapotban távozik. Ezt hívjuk koromnak. Mellette fém alkatrészek súrlódása során kiváló kopadékok és elégett kenőolaj is hozzáadódik, így a keletkezők szilárd anyagokat gyűjtőnéven részecskéknek hívjuk. Ilyen részecskék válhatnak ki a jármű kipufogógázából, gumikból és a fékbetétekből is. Tüdőbe jutva lerakódhatnak, akadályozva a légzést, illetve kis részecskék átjuthatnak a sejtfalon, beépülve rákkeltőek lehetnek [12].

- **Kén-dioxid** (SO_2) – Főleg kéntartalmú fosszilis tüzelőanyagok égetéséből származik (villamos áram előállítás). Szervezetbe jutva légzési nehézségeket, súlyosabb esetben asztma kialakulását okozhatja. A forgalmazott tüzelőanyagok a törvény szerint ként nem tartalmazhatnak.
- **Nitrogén-oxidok** (NO , NO_2) – Magas hőmérsékletű égés során a levegő oxigénje és nitrogénje reakcióba lép nitrogén-oxidokat képezve. Élő szervezetbe jutva salétromsavvá (HNO_3) alakul, ami a tüdőt irritálja és a sejteket károsítja. [5]

A fent említett vegyületek a levegőbe jutva emberek millióinak halálához vezet évente. A légszennyezés csökkentésének leghatékonyabb módja, ha törekszünk a fosszilis eredetű anyagok elégetésének minimalizálására.



5. ábra: Halálozások száma évente légszennyezés miatt [56]

A környezet és az egészség védelme érdekében a hatóságok úgynevezett **kibocsátási normákon** keresztül maximalizálják az új belsőégésű motorok károsanyag emisszióját, megnehezítve az ilyen motorral szerelt járművek forgalmazását.

Hajtáslánc kiválasztása

Ahogy az előző két fejezetből kikövetkeztethető, a leghatékonyabb módja az energetikai szektor okozta környezeti és társadalmi hatások csökkentésére az az energia fogyasztás minimalizálása. Ezt úgy lehet elérni, hogy minél jobb hatásfokú gépeket alkalmazunk minél optimálisabb munkapontokban.

	Abatement		
	2020	2030	2035
Efficiency	71%	49%	48%
■ - End-use (direct)	34%	24%	24%
■ - End-use (indirect)	33%	23%	23%
■ - Power plants	3%	2%	1%
■ Renewables	18%	21%	21%
■ Biofuels	1%	3%	3%
■ Nuclear	7%	9%	8%
■ CCS	2%	17%	19%
Total (Gt CO ₂)	3.5	15.1	20.9

6. ábra: Szén-dioxid kibocsátást csökkentő stratégiák a villamosság előállításban 2010 [19]

De mit is jelent a hatásfok? Egy Európai Unió Direktíva a következőképp definiálja: „a kimeneti teljesítmény, szolgáltatás, termék vagy energia aránya a bemeneti energiához képest”. Tulajdonképpen ez azt jelenti, hogy két eszköz közül az a nagyobb hatásfokú, ami egységnyi bevitt mennyiségből a legtöbbet tudja kihozni. Képlettel a következőképp határozható meg [15]:

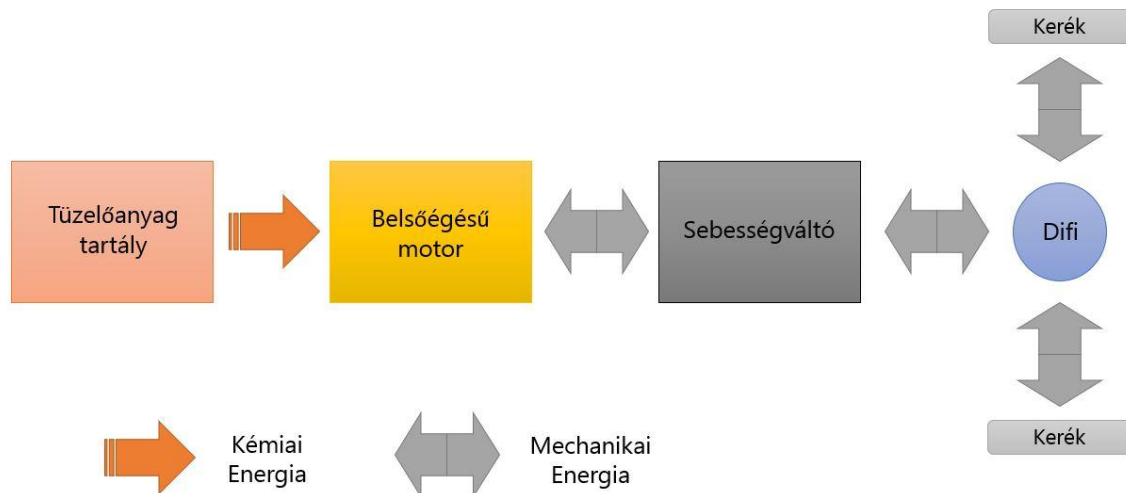
$$\mu = \frac{P_{ki}}{P_{be}} * 100 [\%]$$

Tehát a kimenő teljesítmény és a bemenő teljesítmény hányadosa.

A következőkben különböző hajtáslánc típusokat vizsgállok meg hatásfok, illetve egyéb fontos tényező figyelembevételével.

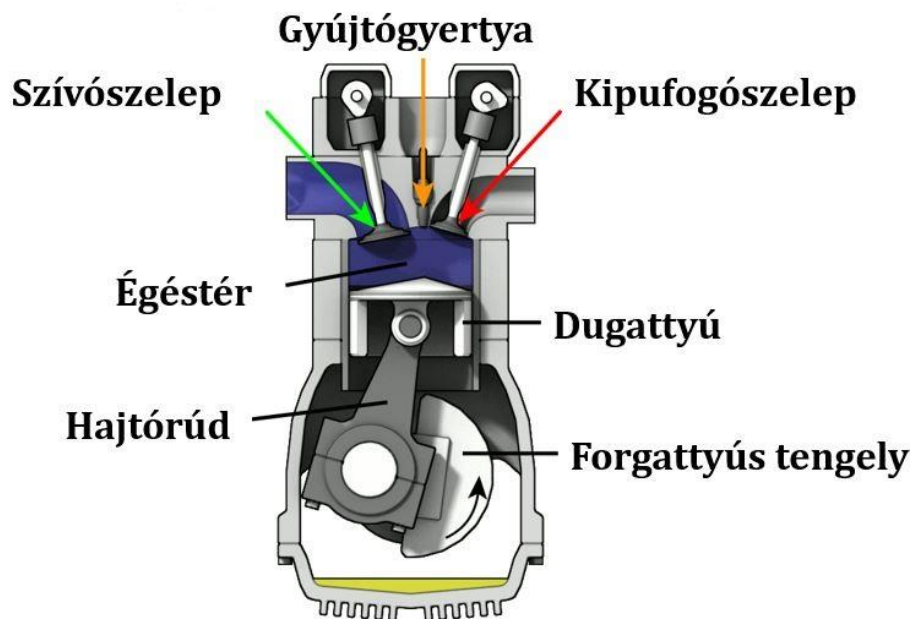
Belsőégésű Motoros hajtás

A belsőégésű motor (ICE – Internal Combustion Engine) az egy olyan hőerőgép, ami egy adott tüzelőanyagban (benzin, gázolaj, etanol, LPG, ...) rejlő kémiai energiát levegővel keverve, majd ezt az elegyet meggyújtva mechanikai energiává képes alakítani.



7. ábra: Belsőégésű motoros hajtáslánc

A levegő-tüzelőanyag keveréket először bevezetik a motor hengerébe, aminek meggyújtása során a gáz erősen terjeszkedi kezd (expanzió), ami egy függőleges irányú mozgást kényszerít a *dugattyúra*, alternáló mozgást hozva létre. Ezután a *hajtórúd* és a *főtengely* segítségével ez forgómozgássá alakul, ami kivezethető a kerekekhez.



8. ábra: Belsőégésű motor felépítése [10]

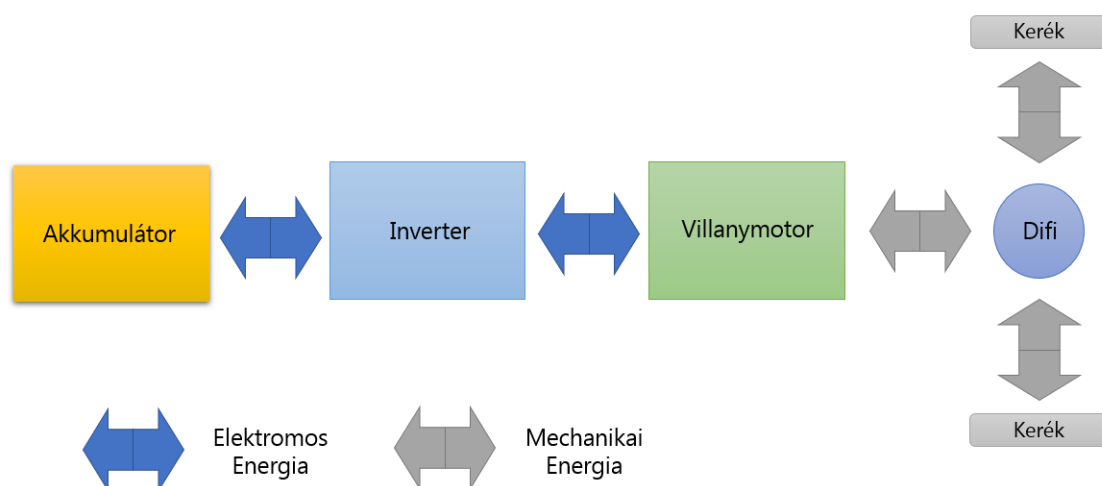
A nyert teljesítményt szükséges átalakítani annak érdekében, hogy az erő az útra átvihető legyen. Ezt úgynevezett lassító áttétellel oldják meg, vagyis a kerék forgási sebességét a motorhoz képest lelassítják, cserébe viszont több forgatónyomatékot kapunk. Ez a lassítás egy sebességváltó és egy differenciálmű segítségével jön létre.

Mire az energia a tartályból a kerekekhez eljut átmegy egy kémiai-mechanikai transzformáción, az alternáló mozgás forgómozgássá alakul, illetve kétszer módosul az áttétel. A felsorolt összes folyamat jelentős mértékű veszteséggel jár, így ennek a hajtásláncnak a hatásfoka nagyon alacsony lesz. Egy Otto motor legjobb esetben is 35-37%-on, míg egy Diesel motor 43-45%-os hatásfokkal tud üzemelni [10], ami a teljes rendszer hatásfokát 30-38%-ra teszi.

Ami a belsőégésű motorok hajtáslánc mellett szól az a kiforrottság, kiépített infrastruktúra, alacsony ár és kedvező lóerő/tömeg arány. Emellett nagysebességű, autópályás közlekedésnél nagyon alacsony fogyasztást produkál.

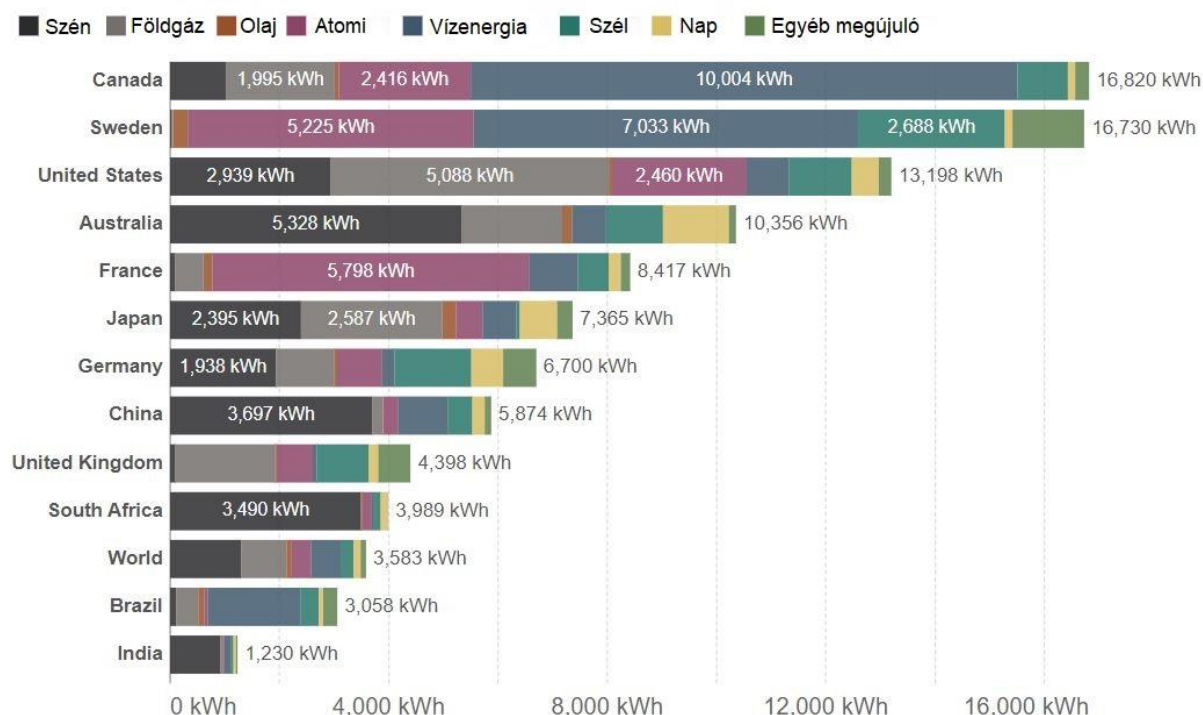
Villanymotoros hajtás

Egy villanymotor elektromos áram megfelelő bevezetésével elektromágneses reakciónak köszönhetően forgómozgást képes létrehozni érintkezés nélkül. Egy ilyen hajtás előnyös tulajdonsága, hogy nagyon alacsony fordulatszám mellett is képes maximális forgatónyomatékot leadni, ami indokolatlanná teszi a sebességváltó használatát. Ezzel jelentős mértékű súlycsökkentés érhető el, cserébe nagy sebesség mellett rosszabb fogyasztást produkál a magas fordulatszámok miatt. A hajtástípus legnagyobb előnye, hogy a motor képes a jármű mozgási energiáját elektromos energiává visszaalakítani, miközben az a járművet lassítja. Ezt hívjuk *regeneratív fékezésnek*.



9. ábra: Egy akkumulátoros villanymotoros hajtáslánc felépítése

Míg a lokálisan előállított károsanyagok mennyisége közel 0, a villamos hajtás kizárólag annyira tud „zöld” lenni, amennyire az előállított elektromos áram is „zöld”. Ennek megfelelően a villamosítás környezeti és társadalmi előnyei régióként különböznek:



10. ábra: Egy főre eső elektromos áram forrásának eloszlása országoként 2021 [45]

A 10. ábraáról leolvasható, hogy például Svédországban, ahol az áram közel 95%-a atomenergiából vagy megújuló energiaforrásból származik, a CO₂ kibocsátás jelentősen kisebb lehet a belsőégésű motorénál. Míg Kínában magasabb is lehet. A nem-megújuló energiaforrásból történő áramelőállításnál továbbá jelentős a SO₂ kibocsátás.

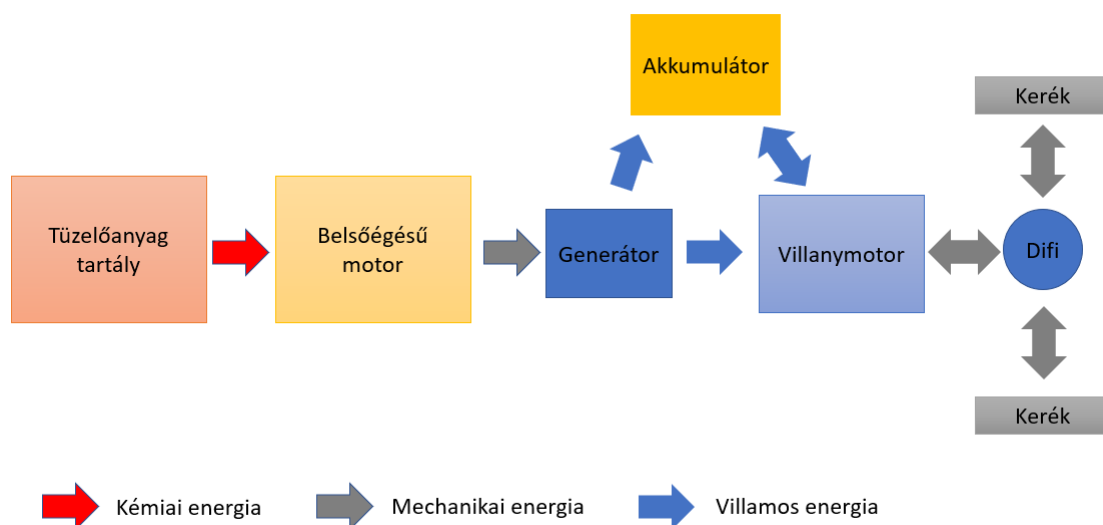
A hajtástípus elterjedésének legnagyobb gátja az akkumulátorral kapcsolatos nehézségek. Kis tömegre vetített fajlagos energiája révén nehéz (akár 2000 kg felett) járművet kapunk, ami növeli az energiafelhasználást és a PM emissziót a nagy terhelésnek kivetett gumik és fékek kopadékainak kiválásával. Egy akkumulátor előállítása költséges és környezetszennyező, megszabadulás után mérgező anyagok (pl: lítium) jutnak a természetbe [56].

Hibrid hajtás

Az első hibrid hajtású, sorozatgyártású személyautó 1997-ben jelent meg a Toyota Prius bemutatkozásával. A hibrid járművek alapját az adja, hogy ha egy villanymotor nagyon jó hatásfokkal működik városi körülmények között az állás közbeni 0 fogyasztás és a regeneratív fékezésnek köszönhetően és egy belsőégésű motor, ami városon kívül képes alacsony fogyasztást és nagy hatótávot biztosítani, akkor a két rendszer megfelelő összekombinálásával

a jármű teljes energiafogyasztása csökkenthető. A két motor többfajta architektúrában összekapcsolható:

- **Soros hibrid** – A jármű hajtását az elektromos motor biztosítja, ami vagy egy akkumulátorból, vagy egy belsőégésű motorral hajtott kisebb villanymotor által generált áramból vesz fel energiát. Utóbbi módszerrel az akkumulátor is tölthető menet közben. A BÉM közvetlenül nincs a kerekekhez hozzákötve, így annak munkapontja teljesen testreszabható. A hatásfok egy ilyen rendszer esetén a legalacsonyabb, mivel a tüzelőanyagból származó kémiai energiát először mechanikai, majd elektromos energiává kell alakítani, mindkét esetben jelentős veszteségek mellett.
- **Párhuzamos hibrid** – Ebben az esetben a belsőégésű motor és a villanymotor felváltva, vagy akár egyszerre hajthatja a járművet. Ugyan a munkapont nem testreszabható, a csupán egyszeres energiaátalakítás miatt a hatásfok magasabb. Ilyen rendszerben sebességváltó alkalmazása szükséges.
- **Kombinált hibrid** – Ez a hajtástípus képes soros és párhuzamos hibridként is működni a teljesítmény- és akkumulátortöltési igényeknek megfelelően. A két módozat közötti váltás történhet tengelykapcsolók segítségével; vagy teljesen dinamikus egy bolygómű használata mellett, ahol a belsőégésű motor teljesítménye a geometria által meghatározott arányban megy át sorosan, illetve párhuzamosan a kimenő tengelyre. A hatásfok általában itt a legmagasabb a rendszer flexibilitásának köszönhetően.



11. ábra: Soros hibrid hajtáslánc felépítése

Egy hagyományos értelemben vett hibrid járművet (FHEV – Full Hybrid Electric Vehicle) két akkumulátor töltöttségi állapot (SOC – State of Charge) között lehet használni, képes tisztán elektromos (EV) üzemmódra, ahol az alsó SOC korlát elérésekor a belsőégésű motor bekapcsolásával a felhasznált energiát vissza kell tölteni. Így a járműbe mindössze üzemanyagot szükséges tölteni, az elektromos áramot maga a jármű generálja. Léteznek azonban úgynevezett „plug-in hibrid” (PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle) autók, ahol az akkumulátort külső erőforrásról szükséges tölteni. Ennek megfelelően a belsőégésű motor az alsó SOC korlát elérésekor csak a töltés megtartásáról kell gondoskodnia, csökkentve fogyasztást.

Egy hibrid jármű egy hagyományos hajtáshoz képest alacsonyabb fogyasztást képes produkálni, köszönhetően a regeneratív fékezés lehetőségének. Egy plug-in hibrid (PHEV) képes megközelíteni egy elektromos jármű energiafogyasztását, azonban a nagy méretű akkumulátor és annak külső töltési szükségessége miatt ugyan kisebb mértékben, de előjönnek az elektromos hajtásnál tárgyalt hátráltató tényezők (áram „tisztasága”, akkumulátor gyártás emissziók, ...).

Fogyasztási adatok

Egy korábbi tanulmány összehasonlított hasonló teljesítményű hagyományos, villamos és hibrid járműveket tüzelőanyag-fogyasztásaik alapján. A számításba mind a használat közbeni fogyasztás („Tank to Wheel”) és a hajtóanyag előállítása közben felhasznált energia tüzelőanyag egyenértékre számítva („Well to Tank”).

1. táblázat: Vizsgált hajtástípusok Globális fogyasztási adatai [44]

<i>Hajtáslánc típusok</i>	<i>Globális fogyasztás ("Well to Wheel")</i>
Hagyományos hajtáslánc (ICE)	8,76 l/100km
Villamos hajtáslánc (EV)	11,18 l/100km
Hibrid hajtáslánc (HEV)	5,05 l/100km

Ugyan a gyártók által közölt hivatalos l/100 km fogyasztási adatok alapján a villamos jármű igényel a legkevesebb energiát, azonban az elektromos áram előállítási hatásfoka jóval alacsonyabb (32%) szemben a tüzelőanyag kinyerésével (88,6%), így egy hagyományos értelemben vett hibrid jármű a belsőégésű motoros hajtáshoz képest alacsonyabb „Tank to Wheel” fogyasztás, és megegyező előállítási hatásfoknak köszönhetően a legalacsonyabb globális fogyasztást produkálta [44].

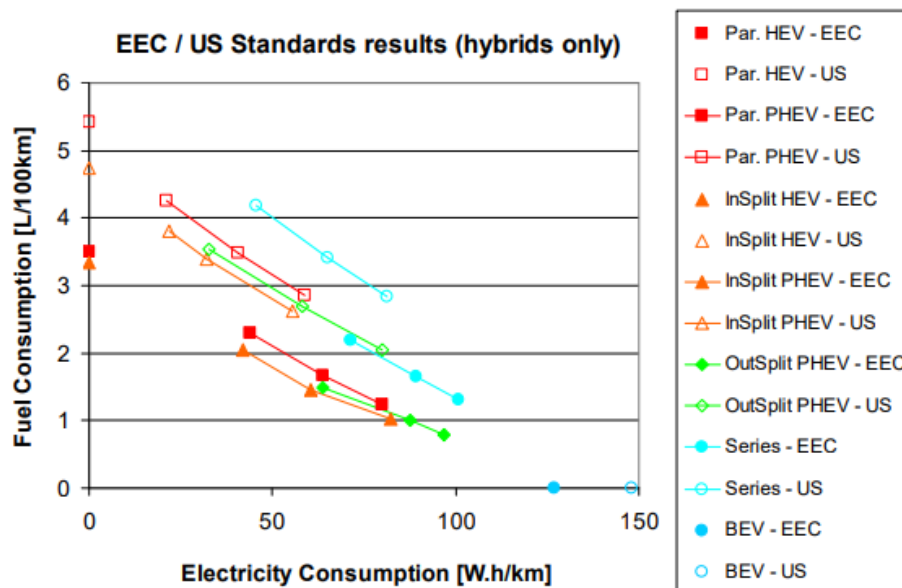
Összegzés

Az alábbi táblázatban az előző fejezetekben végigvezetett szempontok alapján kerültek értékelésre a vizsgált hajtástípusok. A kiértékelés módja az adott tényezőnek való megfelelés mértéke (+ - nagy hátrány, ++++ - nagy előny).

2. táblázat: Döntési mátrix

	Belsőégésű	Hibrid	Villamos
Ár	++++	++	+
Lóerő/Tömeg	++++	+++	+
Fogyasztás (város)	+	+++	++++
Fogyasztás (országút)	++++	+++	+
Hatásfok	+	++	++++
Nyomatéktartomány	++	++++	++++
Töltés	++++	++++	+
Hatótáv	++++	+++	+
Károsanyag kibocsátás	+	++	++++
Energiafüggés	+	++	++++
Energiaszükséglet (teljes élettartam)	+++	++++	+
Összesen	29	32	26

Az összes szempontot figyelembe véve a „legzöldebb” autó megépítésére egy hibrid hajtáslánc a legalkalmasabb. Szükséges emellett meghatározni az ideális architektúrát annak megfelelően, hogy melyikben rejlik a legmagasabb hatásfok potenciálja.

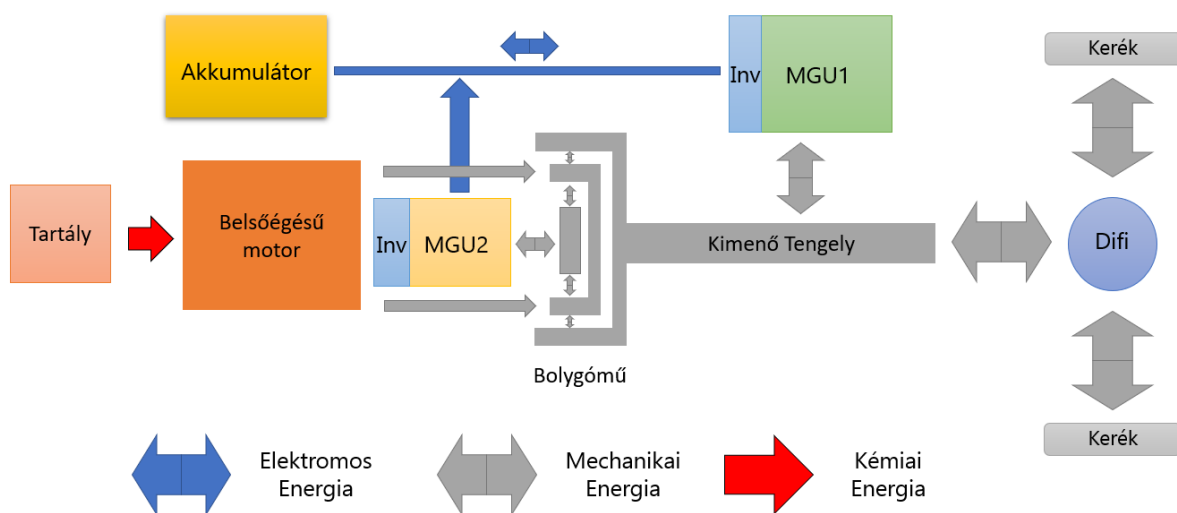


12. ábra: Különböző hibrid architektúrák tüzelőanyag- és áramfogyasztásai európai és amerikai menetciklusokon [2]

A legjobb fogyasztási adatokat egy „input-split”, tehát a belsőégésű motor irányából bemenő teljesítmény elosztású bolygóműves hibrid architektúra produkálta (Toyota Prius típusú), ennek megfelelően a dolgozat során egy ilyen hajtáslánc kerül szimulálásra és optimalizálásra.

Hibrid modell felépítése

A *modell* egy „olyan idealizált tulajdonságokkal rendelkező test, amely a valóságos testnek a vizsgálat szempontjából leglényegesebb tulajdonságait tükrözi”. Tehát egy modell megalkotásánál annak számunkra fontos jellemzőit megtartjuk, míg minden, ami számunkra szükségtelen elhanyagoljuk. Például egy házfal szilárdságtani vizsgálatánál teljesen jelentéktelen információ annak a színe. A felesleges tulajdonságok figyelmen kívül hagyása pedig a feldolgozandó információ mértékének jelentős csökkenéséhez vezet, így szimulációnk gyorsabban képes lefutni. Fontos tehát megvizsgálni, hogy hibrid hajtásláncunkban milyen alkotóelemeket milyen részletességgel szükséges megvalósítani, hogy szimulációnk a valóságot tükrözze [14].

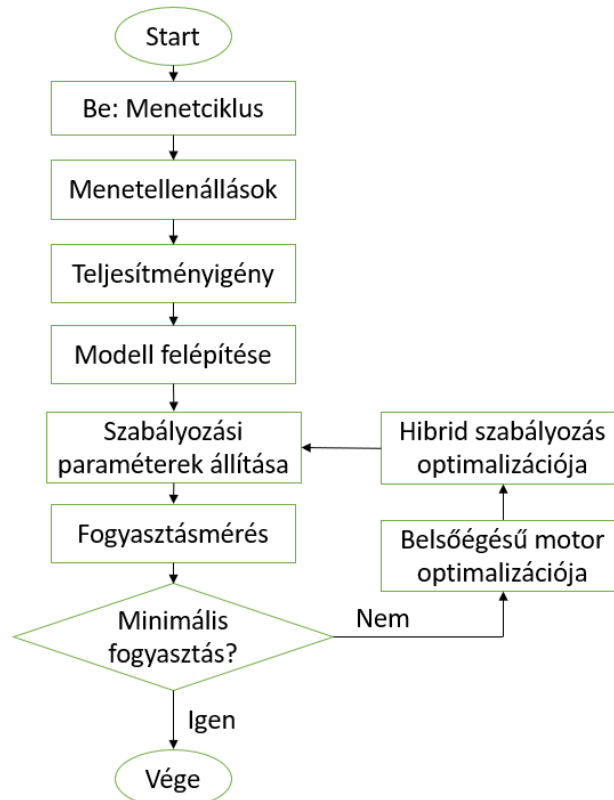


13. ábra: Egy teljesítményosztó hibrid modellje

Jelen esetben a vizsgált modell egy teljesítményosztó „input-split” hibrid, ahol három különböző motor működik párhuzamosan: egy *belsőégésű motor* (ICE), egy *hajtó villanymotor* (MGU1) és egy *generátor villanymotor* (MGU2). Ezeket az egységeket egy úgynevezett *bolygómű* köti össze, aminek köszönhetően, a generátor fordulatszámának szabályozásával, dinamikusán lehetséges változtatni az áttételezést a belsőégésű motor és a kimeneti tengely között annak érdekében, hogy motorunk minden időpillanatban ideális munkapontban legyen képes üzemelni.

Minden egyes motorhoz szükséges megadni egy tárolóeszközt, ahonnan a neki szükséges energiát képes kinyerni. A villanymotorok esetében ez egy *akkumulátor*, a belsőégésű motor esetében pedig egy *tüzelőanyag tartály*. Végül pedig szükség van egy *vezérlő modulra*, ami

minden egyes időpillanatban vezérli a fent említett komponenseket annak érdekében, hogy a rendszer teljes harmóniában működjön a fogyasztás minimalizálása érdekében.

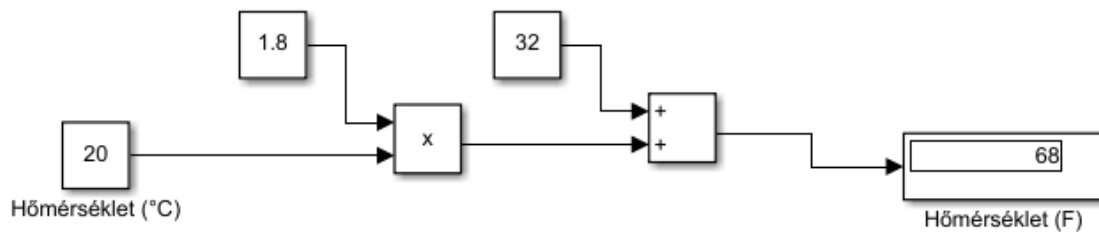


14. ábra: Az optimalizálási szimuláció folyamatábrája

Matlab Simulink

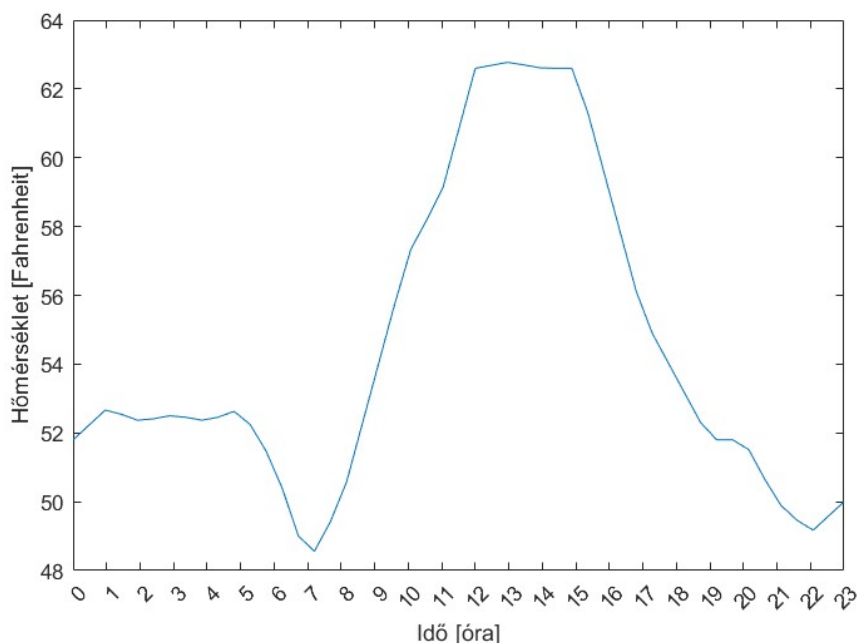
Ugyan léteznek különböző szoftverek egy hibrid hajtáslánc részletes szimulációjára, mint például Ansys, AVL Cruise, Siemens PLM Software, MapleSim, azonban ezen programok forráskódjai nem ismertek, így nem képesek kellő mértékű szabadságot adni a modell felépítésében. Ezzel szemben a Matlab programozó környezet segítségével minden egyes komponens saját akarat szerint testreszabható, illetve a korlátlan lehetőségek nyílnak a vezérlésben is.

A Matlab Simulink egy programkód vizualizált változatát adja, ahol úgynevezett blokkokkal dolgozunk, amik lehetnek matematikai műveletek, szabályozó modulok, táblázatok; amik adott bemenet(ek)re az általunk definiált logika szerint gyártanak kimenet(ek)et.



15. ábra: Egy egyszerű Matlab Simulink modell

A 15. ábra egy Simulink kódot mutat, ahol egy hőmérséklet konverzió történik ($^{\circ}\text{C} \mapsto \text{F}$). Minden programnak szükséges egy *bemenetet* adni, ami lehet egy konstans, vagy változó érték esetén megadható táblázatosan is. Jelen esetben a bemenetet (hőmérséklet Celsius fokban) először megszorozzuk 1,8-cal, majd hozzáadunk 32-t, így megkapjuk a *kimenetet* (hőmérséklet Fahrenheitben). A kimenet megjeleníthető egy adott értékként, vagy időbeli grafikon formájában is, ahol az adatok elemezhetőek.

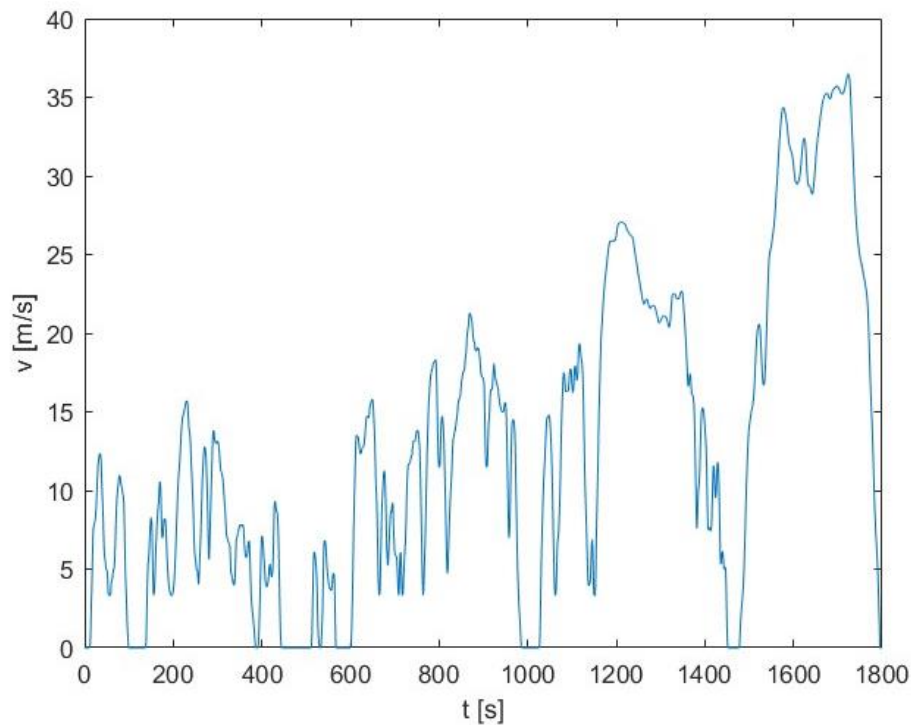


16. ábra: Veszprém időjárás előrejelzése 2022.10.30-ra [34]

A nagy mértékű szabadsággal azonban nagy felelősség és munka is jár. Ugyanis modellünk minden egyes alkatrészét a nulláról kell felépíteni. A fejezet további részében az egyes komponensek modellezéséhez szükséges szempontok és matematikai összefüggések kerülnek levezetésre.

Teljesítményigény levezetése

Egy jármű fogyasztásának meghatározására népszerű módszer az úgynevezett „hátratekintő szimuláció”. Az előretekintő módszerrel ellentétben, ahol a vezető által adott utasítások (gázpedál, fékpedál) alapján határozzuk meg a jármű sebességét, a hátratekintő eljárás a jármű sebességéből (pl: menetciklusból) a kerekektől az energiatárolók felé visszahaladva határozzuk meg az egyes komponensek számára szükséges leadandó teljesítményt, majd az idő múlásával az addig felhasznált energiamennyiséget. A szimuláció alapjául a **WLTC** (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Cycle) menetciklus 3-as típusa lett alkalmazva [41][6][9].



17. ábra: WLTC Class 3 menetciklus sebesség-idő grafikonja [8]

A jármű megfelelő gyorsításához szükséges legyőznünk bizonyos menetellenállásokat, amik mértéke az autó adott paramétereirez kötött, így azokat szükséges definiálni. A szimulált jármű váza és karosszériája egy 2008-as Audi A4 1.8 TFSI-n alapszik.

3. táblázat: Menetellenállásokhoz szükséges adatok [32][26][23]

Név	Érték
Tömeg (m)	1650 kg*
Gördülési ellenállási együttható (μ)	0,007 [-]
Homlokfelület (A)	2,2 m ²
Légellenállási tényező (cd)	0,27 [-]
Gravitációs gyorsulás (g)	9,81 m/s ²
Levegő hőmérséklet (t)	25°C
Levegő sűrűség (ρ)	1,1839 kg/m ³
Lejtő meredekség (α)	0°

A jármű tömegére a hibrid hajtásból adódóan 200 kg plusz lett feltételezve. Az ellenállások, amit a járművel szükséges leküzdeni (teljesítmény): gördülési ellenállás ($P_{görd}$), közegellenállás ($P_{köz}$), lejtőellenállás (P_{lej}) és gyorsulási ellenállás (P_{gyors}) [12]:

$$P_{görd} = m * g * \mu * v$$

$$P_{köz} = \frac{1}{2} * \rho * A * cd * v^3$$

$$P_{lejtő} = m * g * \sin \alpha * v$$

$$P_{gyors} = m * a * v$$

Ahhoz, hogy a jármű adott sebesség mellett adott gyorsulásra legyen képes a következő mértékű teljesítmény szükséges:

$$P = P_{görd} + P_{köz} + P_{lejtő} + P_{gyors}$$

A hajtáslánc erőátvitelének két fontos mérőszáma a *fordulatszám* (n), és a *forgatónyomaték* (M). A fordulatszám a jármű sebességéből a következőképpen számítható:

$$n = \frac{v * 60}{r * 2 * \pi} \quad [rpm]$$

Ahol esetünkben r (keréksugár) 32,9 cm [32]. Ebből a nyomaték a következőképpen számítható:

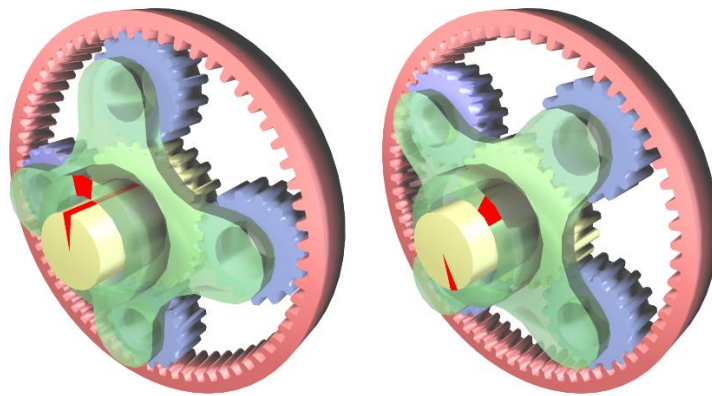
$$M = \frac{P * 60}{n * 2 * \pi} \quad [Nm]$$

A keréktől visszafelé haladva az erőt egy differenciálművön kell átvezetni, aminek áttételezése 4,43. Ez a motorok irányába ennyiszor nagyobb fordulatszámot és ennyiszor kevesebb forgatónyomatékot eredményez. Ezen kívül bizonyos mértékű veszteséggel is számolni kell, ami a differenciálművön belül a fogaskerék kapcsolatoknál a két kerék

egymáshoz képesti megcsúszásából következő mechanikai veszteség következménye. Ennek megfelelően a hajtásnak ennyivel több teljesítményt kell együttesen leadnia. Ebből kaphatjuk meg a bolygómű koszorúkerékén fellépő fordulatszámot és nyomatékot.

Bolygómű

A bolygómű az egy olyan két bemenetből egy kimenetből álló mechanikai rendszer, ahol az egyik bemenet és a kimenet közötti áttételezés dinamikusan módosítható a másik bemenet fordulatszámának szabályozásával.

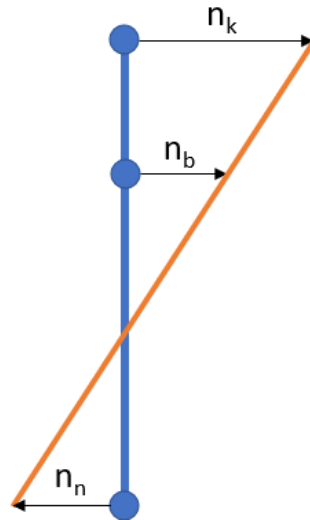


18. ábra: A bolygómű [27]

A belső fogaskereket **napkeréknek**, a középső kerekeket **bolygókerékeknek** (őket egy bolygókeréktartó kapcsolja össze), a külső kereket pedig **koszorúkeréknek** nevezzük. A dolgozatban elkészített modell a Toyota Prius architektúráját követi: a napkerékhez a generátor (MGU2), a bolygókeréktartóhoz a belsőégésű motor, a koszorúkerékhez a kimeneti tengely és vele a villanymotor (MGU1) vannak kötve. Korábbi kutatás által bizonyítottan, működés szempontjából ez a legideálisabb konfiguráció [7].

Bolygóművek esetén két, előre definiált fordulatszám egyértelműen meghatározza a harmadikat [6]:

$$n_n * N + n_k * K = n_b * (N + K)$$



19. ábra: Bolygómű fordulatszám összefüggése

Míg a fordulatszámok esetében 2 változót kellett ismerni, addig nyomatékok esetén egy ismert bemeneti érték (esetünkben a bolygókeréktartón – belsőégésű motor) meghatározza a másik kettő nyomatékot [7]:

$$M_k = \frac{1}{2} * \frac{M_b}{0,5 * (\gamma - 1) + 1} * \gamma$$

$$M_n = \frac{1}{2} * \frac{M_b}{0,5 * (\gamma - 1) + 1}$$

$$\gamma = \frac{K}{N}$$

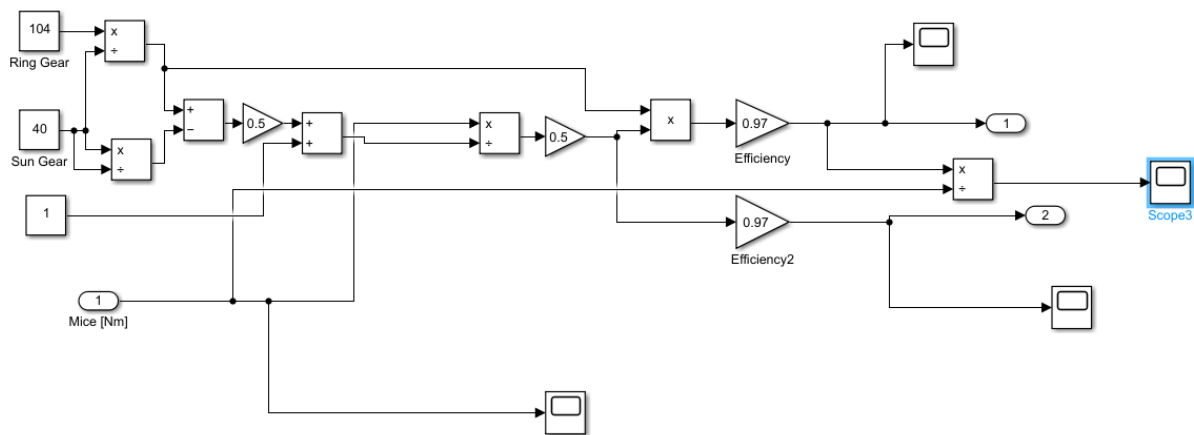
A képletekben N a napkeréknek a sugara, K pedig a koszorúkeréknek a sugara, a modellben $N = 40 \text{ mm}$, $K = 104 \text{ mm}$. A fenti összefüggésekből levezethető, hogy adott geometriájú bolygómű adott arányban osztja szét a nyomatékot, fordulatszámtól függetlenül (de a teljesítményt nem!).

$$\gamma = \frac{104}{40} = 2,6 [-]$$

$$M_k = \frac{1}{2} * \frac{1}{0,5 * (2,6 - 1) + 1} * 2,6 \cong 0,722 \text{ Nm}$$

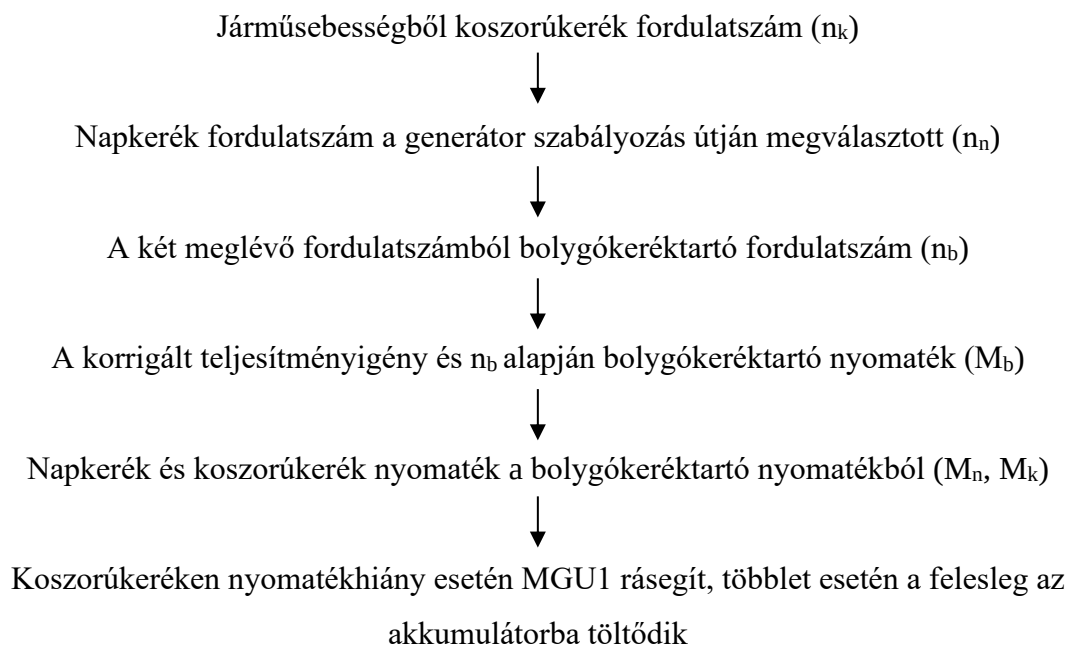
$$M_n = \frac{1}{2} * \frac{1}{0,5 * (2,6 - 1) + 1} \cong 0,277 \text{ Nm}$$

A differenciálműhöz hasonlóan a bolygóműben is lép fel a fogaskerekek megcsúszásából származó mechanikai veszteség, ami a modellben 3% értékű [37]. Így valójában a nyomaték 70%-a megy a kimenő tengelyre és 26,8% a generátorra. A generátor ezt villamos energiává alakítja és vagy a villanymotort táplálja vele, vagy az akkumulátorba tölti.



20. ábra: Nyomatékosztási logika Matlab Simulink-ben

A modell felépítése során az egyes fordulatszámok és nyomatékok a következő gondolatmenet szerint lettek meghatározva:



Villanymotorok

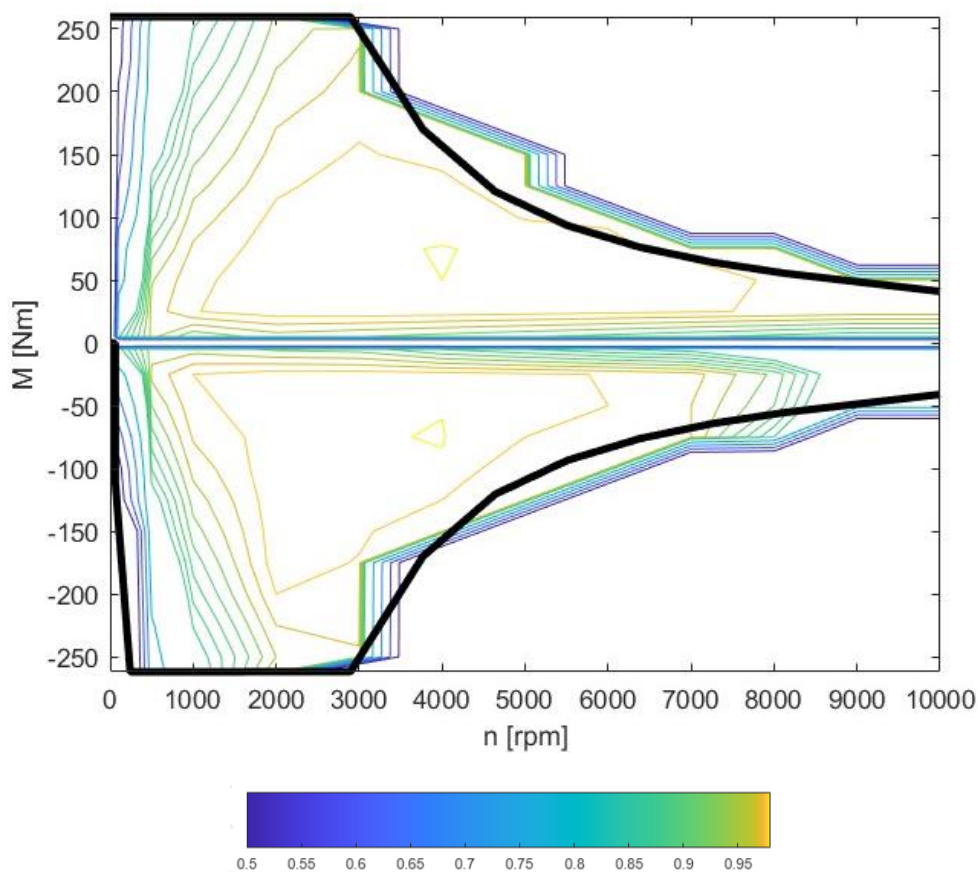
MGU1

A tárgyalt teljesítményosztó hibrid modellben MGU1 (Motor-Generator Unit 1) felel meg a hajtó villanymotornak. A hajtásláncban a bolygómu koszorúkerékéhez kötött kimenő tengelyhez van csatolva egy 1:1 fogaskerék kapcsolattal. Működése során több feladatot is ellát:

- Tisztán elektromos (EV) módban önállóan látja el a hajtás szerepét az akkumulátorból felvett energiából.

- A jármű mozgási energiáját regeneratív fékezés útján elektromos árammá alakítja (minden üzemmódban).
- Hibrid (HEV) üzemmódban a generátor által termelt energiát közvetlenül képes felvenni és azt hajtásra felhasználni (akkumulátor terhelés nélkül)
- Amennyiben a belsőégésű motor nem képes leadni a szükséges teljesítményt MGU1 az akkumulátorból felvett árammal besegít.

A villanymotorok modelljei a **FluxMotor** szoftver segítségével lettek elkészítve.



21. ábra: MGU1 hatásfok diagramja

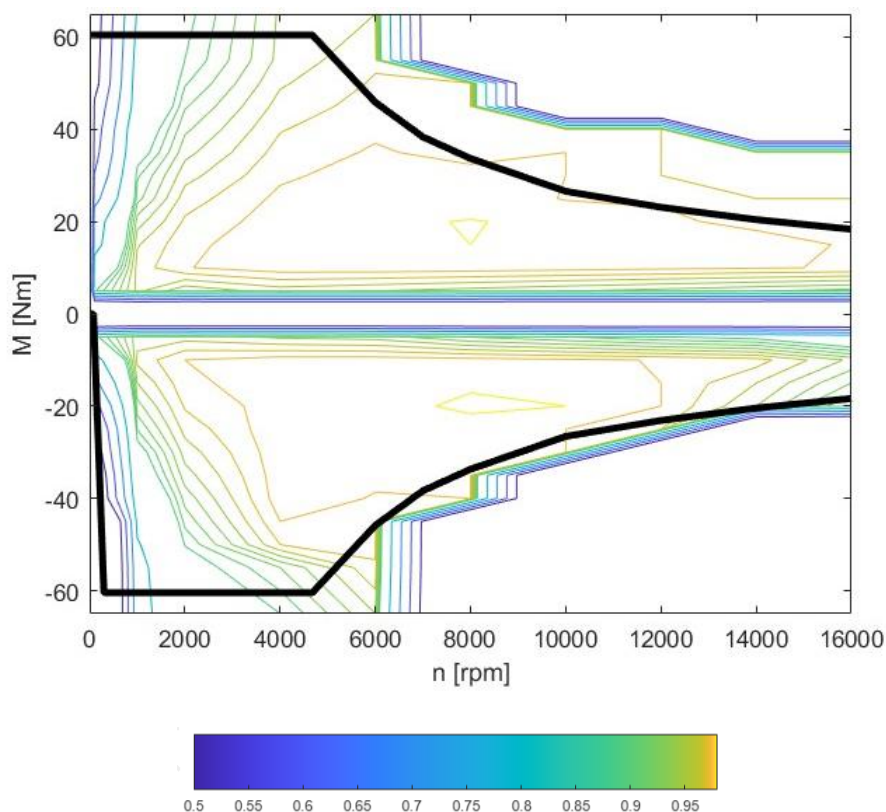
Ahogy a 21. ábra mutatja, motorunk 4000 rpm fordulatszám környékén, 50-80 Nm nyomaték körül működik leghatékonyabban (98%), míg alacsony fordulatszámok mellett a legkisebb a hatásfoka (50%).

MGU2

A hibrid modellben MGU2 (Motor-Generator Unit 2) jelenti a generátort, ami a hajtásláncban a bolygómu napkerekéhez van kötve. Motor módban soha nem használandó, kizárólag visszatöltő módban üzemel. Működési módjai:

- Tisztán elektromos (EV) módban szabadon forog, MGU1-hez képest 2,6-szoros sebességgel ellentétes irányban, nyomatékot nem hoz létre.
- Hibrid módban (HEV) amennyiben a belsőégésű motor nem szolgáltat elég teljesítményt a kimenő tengelyre, akkor a napkerék mozgási energiáját visszanyerve közvetlenül MGU1-nek szolgáltat villamos áramot.
- Hibrid módban (HEV) amennyiben a belsőégésű motor szolgáltat elég teljesítményt a kimenő tengelyre, akkor MGU2 a visszanyert energiát az akkumulátorba táplálja.

HEV módban a generátor fordulatszáma vezérlés által szabályozva van annak érdekében, hogy a belsőégésű motor ideális munkapontban tudjon üzemelni. Fontos megemlíteni, hogy a generátor csak akkor képes energiát visszanyerni, ha a fordulatszáma és nyomatéka azonos előjelű, így HEV módban fontos megakadályozni, hogy a generátor ellentétes irányban forogjon.



22. ábra: MGU2 hatásfok diagramja

Belsőégésű motor

A belsőégésű motor modellje az AVL Boost szimulációs szoftverrel készült.

4. táblázat: A Belsőégésű motor (ICE) jellemzői

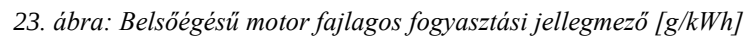
Jellemző	Érték
Típus	Otto (4T)
Lökettérfogat	1286 cm ³
Hengerek	3
Feltöltés	Turbó
Befecskendezés	Szívócső
Üzemanyag	E10
Fordulatszám	7000 rpm
Nyomaték	142 Nm
Teljesítmény	81 kW

A motor egyes komponensei az *AVL Advanced Simulation Technologies Examples* könyvtárban található példamodellek segítségével lettek felépítve.

A motor a tárgyalt hibrid hajtásláncban a következő feladatokat látja el:

- Tisztán elektromos (EV) módban áll, rögzítve a bolygómű bolygókeréktartóját
- Hibrid (HEV) módban a teljesítmény létrehozásáért felel, ami a bolygóműben kétfelé oszlik: egy része mechanikusan megy a kimenő tengelyre, másik része a generátoron keresztül villamos árammá alakul, amit MGU1-nek, vagy az akkumulátornak szolgáltat.
- A motor 5 mp 0 nyomatékkérés után leáll, újabb gázadásra 750 rpm felett újraindul

A szimuláció során az egység által leadott teljesítmény **szabályozott** az akkumulátor töltési igénye, illetve a legnagyobb rendszer összhatásfok szempontjából. Amennyiben az akkumulátor veszteségei miatt a visszanyert energia már nem nyereséges a felhasznált extra tüzelőanyaghoz képest, a teljesítménykérést maximalizálni kell.



31

Akkumulátor

Egy hibrid járműben általában kétfajta akkumulátor található: egy *nagyfeszültségű* (200-500 V), ami a villanymotorok energiaellátásáért és a visszanyert mozgási energia eltárolásáért felel; illetve egy *kisfeszültségű* (12 V), ami a belsőégésű motor indításáért, világításért, vezérlők és egyéb elektronikus eszközök áramellátásáért felel. Utóbbinak energetikai szempontból elhanyagolható jelentősége van, így az nem került lemodellezésre. A továbbiakban az „akkumulátor” szó a nagyfeszültségű akkumulátort jelenti [20].

Az évek során rengeteg különböző akkumulátor technológiával kísérleteztek hibrid járműben való használatra. Választás szempontjából a legfontosabb tulajdonság, hogy adott mennyiségű energiát mekkora méretű akkumulátorból lehet kinyerni.

5. táblázat: : Különböző akkumulátor típusok egységnyi energiára vetített fajlagos tömege [48]

Akkumulátor típusa	100 km megtételéhez szükséges akkumulátor tömege
Ólomsavas	500-600 kg
Nikkel-Metál-Hidrid	300-400 kg
Lítium-ion	100-140 kg
Lítium-polimer	90-150 kg
NaNiCl ₂	200 kg

5. táblázat alapján a lítium alapú akkumulátorok képesek a legkisebb tömeg mellett biztosítani a szükséges energiamennyiséget. Ugyan a lítium-polimer alapú akkumulátorok használata biztonságosabb a folyékony elektrolit hiánya miatt, az ionvezető képessége alulmarad a lítium-ion alapú akkumulátorokhoz képest. Valamint az ideális hőmérsékleti működési tartománya is alacsonyabb, ami megakadályozza a szélesebb elterjedését. Ennek megfelelően a hajtásláncban *Chargex® CX20*, lítium-ion akkumulátor lett lemodellezve [54].

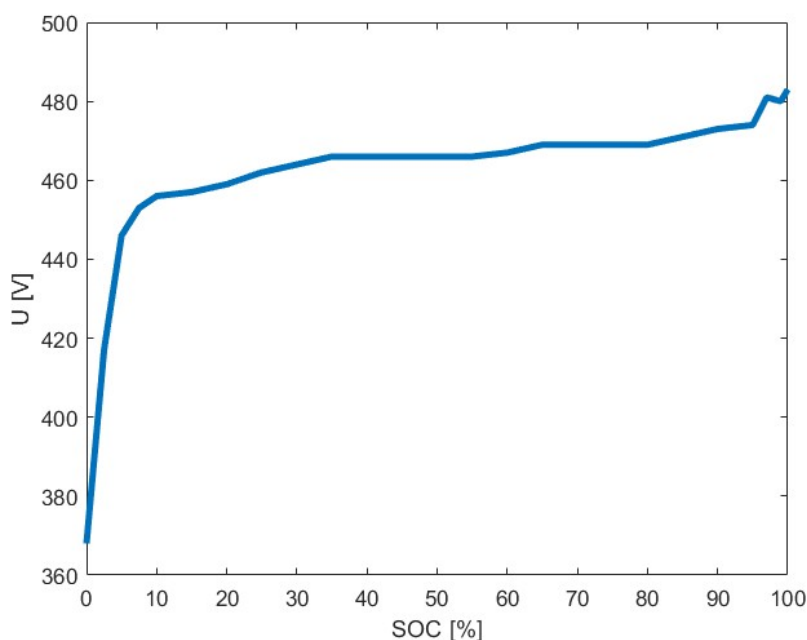
6. táblázat: *Chargex® CX20* jellemzői [35]

Jellemző	Érték
Cellafeszültség	4,1 V
Cellák száma	103
Hálózati feszültség	420 V
Kapacitás	21,6 Ah / 9 kWh
Tömeg	122 kg

Egy szimuláció futása során egy akkumulátor legfontosabb tulajdonsága annak töltöttsége (SOC), ami a következő képlettel számítható ki:

$$SOC(t) = 1 - \frac{\int_0^t P dt}{U * C} \quad [-]$$

Ahol P teljesítmény (W), U hálózati feszültség (V), C kapacitás (As).



25. ábra: Feszültség változása az akkumulátor töltöttség függvényében

Az akkumulátor veszteségei 3 fő forrás irányából lettek megközelítve:

- **Ohm hatások**

Ebben az esetben az akkumulátor belső ellenállása, mint veszteségforrás jelenik meg:

$$P_{akk} = P_{akt} - P_{veszteség} = V_{oc} * I - I^2 * R_{belső}$$

Mivel azonban ezt az ellenállást a gyártók nem adják meg, így máshogy szükséges megközelíteni a problémát. Ez a veszteség meghatározható a felvett áram és töltöttség függvényében a feszültségesésből kisütéskor,

töltéskor pedig a feszültségugrásból. Ezen értékek a gyártói adatlapról leolvashatók és modellezhetőek [51].

- **Coulomb hatások**

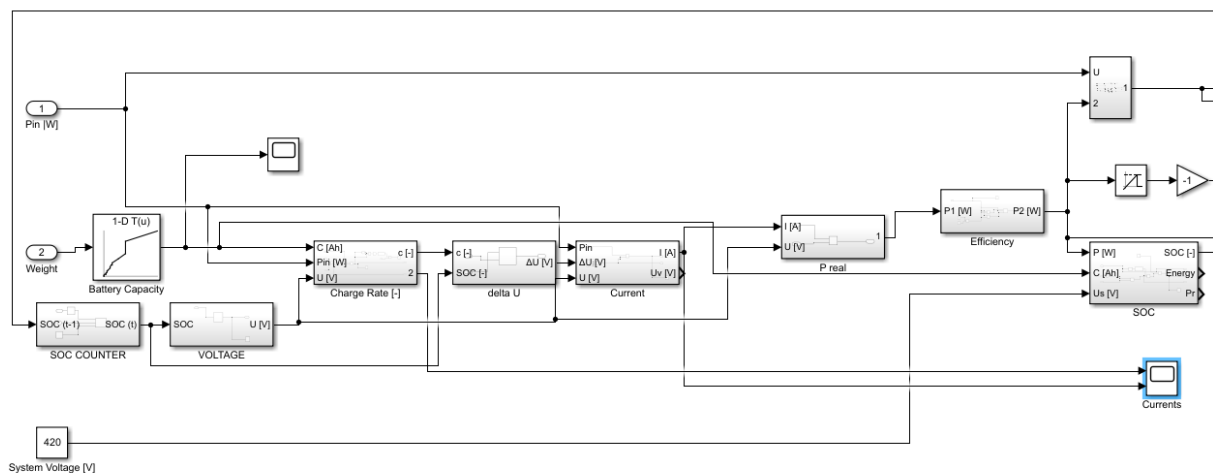
Ez a veszteség az akkumulátorban tárolt kémiai energia villamos árammá alakítása közben alakul ki. Lítium-ion akkumulátorok esetében ez az érték 96% körüli [36].

- **Hőmérséklet függés**

Akkumulátorok esetében az, hogy a valódi kapacitás hány százalékát tudjuk felhasználni, az a hőmérséklet függvénye. A szimulációk 25°C hőmérséklet mellett mentek végbe, ahol a teljes energiamennyiség 98%-a használható fel, azonban -40°C hőmérsékleten már csak a kapacitás 10%-a használható [35].

Az akkumulátor teljes hatásfoka így a következő:

$$\mu_{akk} = \mu_{ohm} * \mu_{coulomb} * \mu_{h\acute{o}m}$$



26. ábra: Akkumulátor modellje Matlab Simulinkben

Fogyasztási adatok (alapmodell)

Mivel hibrid járművekben két különböző formájú energiát használunk fel, így a két fogyasztási érték közvetlenül nem hasonlítható össze. A legegyszerűbb módszer a teljes energiafogyasztás mérése lenne Joule-ban, ahol az egységnyi idő alatt elégetett tüzelőanyag által felszabadított energiát használjuk fel a fogyasztás mérésére. Azonban ez a módszer nem ad megfelelő információt a vásárlónak, hogy milyen sűrűn lesz szüksége megállnia tankolni.

A valóságban az energiát, mint az annak megfelelő térfogatú tüzelőanyag mennyiséget mérjük Metrikus rendszerben „l/100 km” -ként, Imperiális rendszerben „MPG” -ként. A

dolgozat az előbbire fog koncentrálni. Ennek megfelelően a felhasznált villamos energiát úgynevezett „tüzelőanyag egyenértékre” kell átszámítani, amit a következőképpen lehet megtenni [17][52]:

$$f_{vill} = \frac{1}{\mu_{akk}} * E_{vill} * \lambda * \frac{1000}{\rho_{tüz}} \quad [l]$$

Ahol μ hatásfokot, λ a tüzelőanyag fűtőértékét [g/J], ρ pedig a sűrűségét jelenti. Mivel azonban az akkumulátor töltését valójában a belsőégésű motor végzi, így azt gyakorlatilag lehetetlen megmondani, hogy mennyi tüzelőanyagot szükséges elégetni a töltéshez. Ennek megfelelően egy mérés csak akkor lehet valós, ha a menetciklus végén az akkumulátor töltöttsége (SOC) közel megegyezik a kezdeti töltöttséggel. A mérés szabályairól az SAE J1711 szabvány rendelkezik [47] :

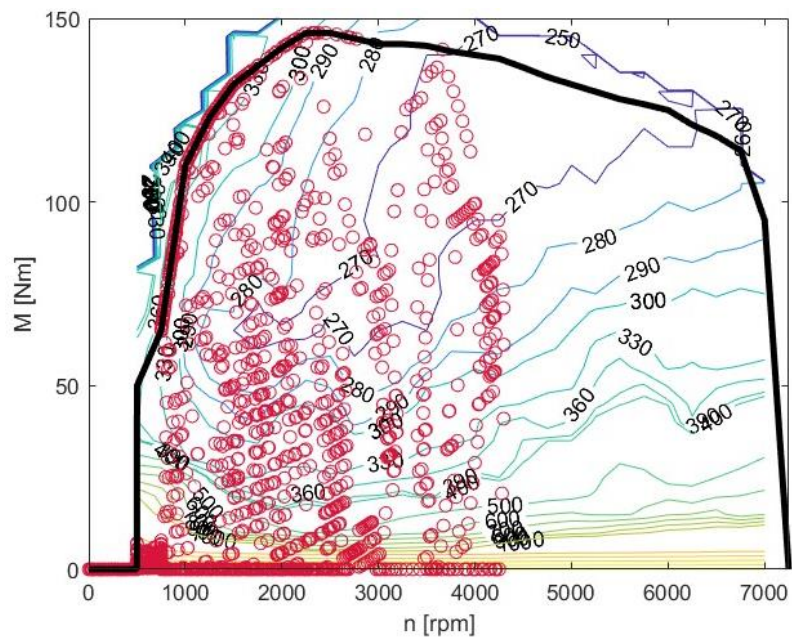
$$\left| \frac{\Delta E_{vill}}{E_{tüz}} \right| < 1\%$$

Tehát a menetciklus alatt felhasznált/visszanyert villamos energia előjeles értéke nem haladhatja meg az 1%-át a felhasznált tüzelőanyag energiájának. Így a szimuláció során úgy kell megválasztani a kezdeti SOC-t, hogy a fenti feltétel teljesüljön.

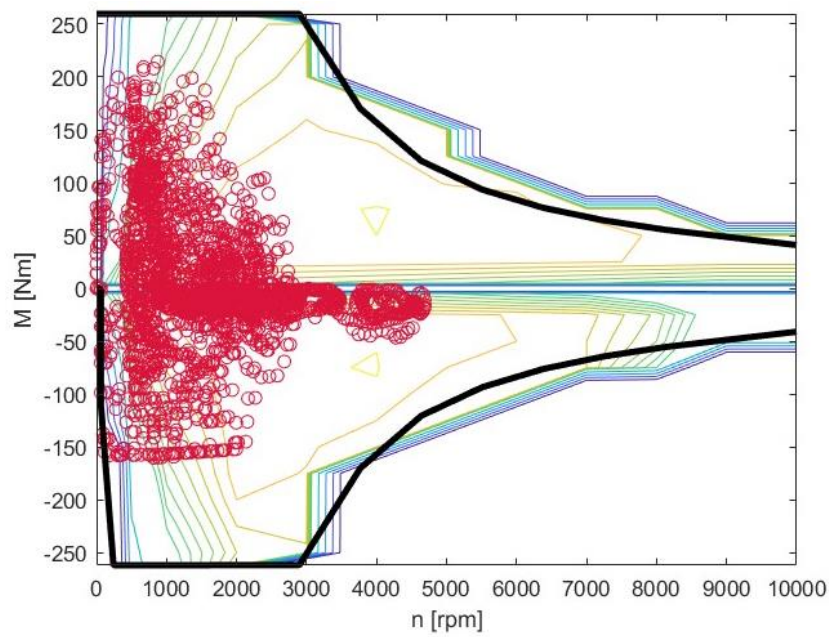
```
SOC = 0.39;
RATE = 1;
while (RATE > 0.01) && (SOC < 0.8)
    SOC = SOC + 0.005;
    disp(SOC);
    FUEL = sim('Hybrid_System_Thesis2_opt_trq').TotalFuel;
    CUR = sim('Hybrid_System_Thesis2_opt_trq').TotalElectric;
    RATE = abs(CUR / FUEL);
    disp(RATE);
end
disp(SOC);
```

27. ábra: Programkód a kezdeti SOC beállítására

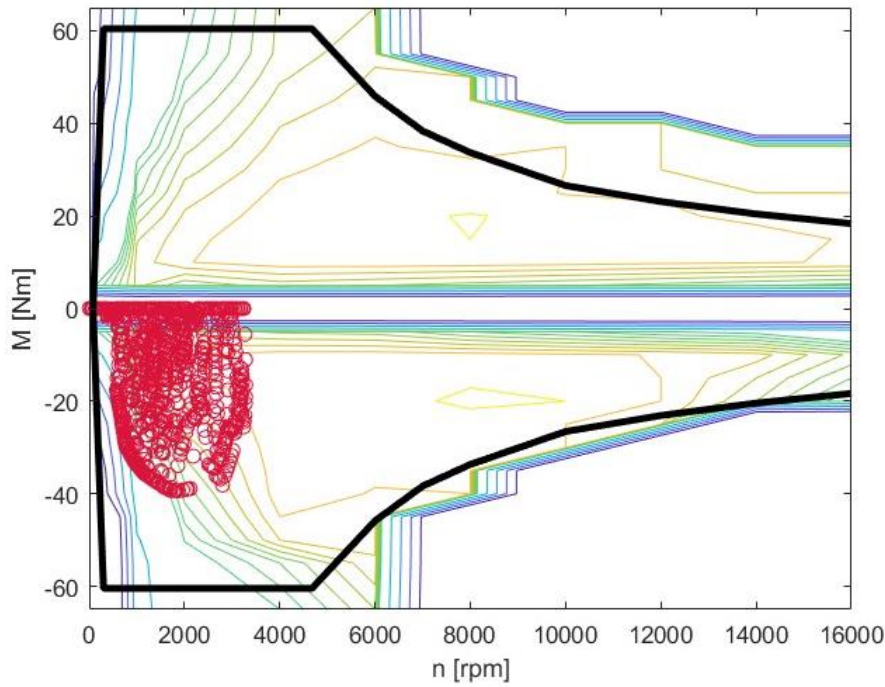
Fogyasztás szempontjából fontos tényező, hogy az egyes komponensek milyen hatásfokú munkapontokban üzemelnek. Az optimalizáció során ezt szükséges rendszerszinten idealizálni a legjobb összhatásfok és a legkisebb energiafogyasztás elérése érdekében.



28. ábra: ICE munkapontjai a WLTC ciklus során (alapmodell)



29. ábra: MGU1 munkapontjai a WLTC ciklus során (alapmodell)



30. ábra: MGU2 munkapontjai a WLTC ciklus során (alapmodell)

Az alapmodellben a generátor a hajtó villanymotorhoz képest 2-szeres sebességgel forog, míg a belsőégésű motor a teljesítménykérés 142%-át adja le.

Az értékelési szempontok definiálása után minden készen áll arra, hogy a szimulációs alapmodell fogyasztási, hatótáv és CO₂ kibocsátási adatait meghatározhassuk:

$$f_{\text{össz}} = 5,48 \text{ l/100km} \quad (\text{WLTC})$$

$$s = 681 \text{ km} \quad (35 \text{ liter})$$

$$\dot{m}(\text{CO}_2) = \dot{m}(\text{C}) + \dot{m}(\text{O}_2) = \frac{751,65 * 5,48 * 0,835 * 3,668}{100} = 126,157 \text{ g/km}$$

Ahol 751,65 az E10 tüzelőanyag sűrűsége [g/l]; 0,835 az E10 szénösszetétele [-]; 3,668 a szén és oxigén összessége (1 g szén égéséhez 2,668 g oxigén szükséges).

A fogyasztás adatokat összehasonlítva egy hasonló teljesítmény adatokkal rendelkező Toyota Prius 4,2 l/100km-es fogyasztásával az alapmodell kevésbé hatékonynak bizonyul. Mindez indokoltá teszi a hibrid rendszer szabályozási stratégiájának kifejlesztését optimalizáló algoritmusok segítségével [57].

Optimalizáció

Belsőégésű motor optimalizációja

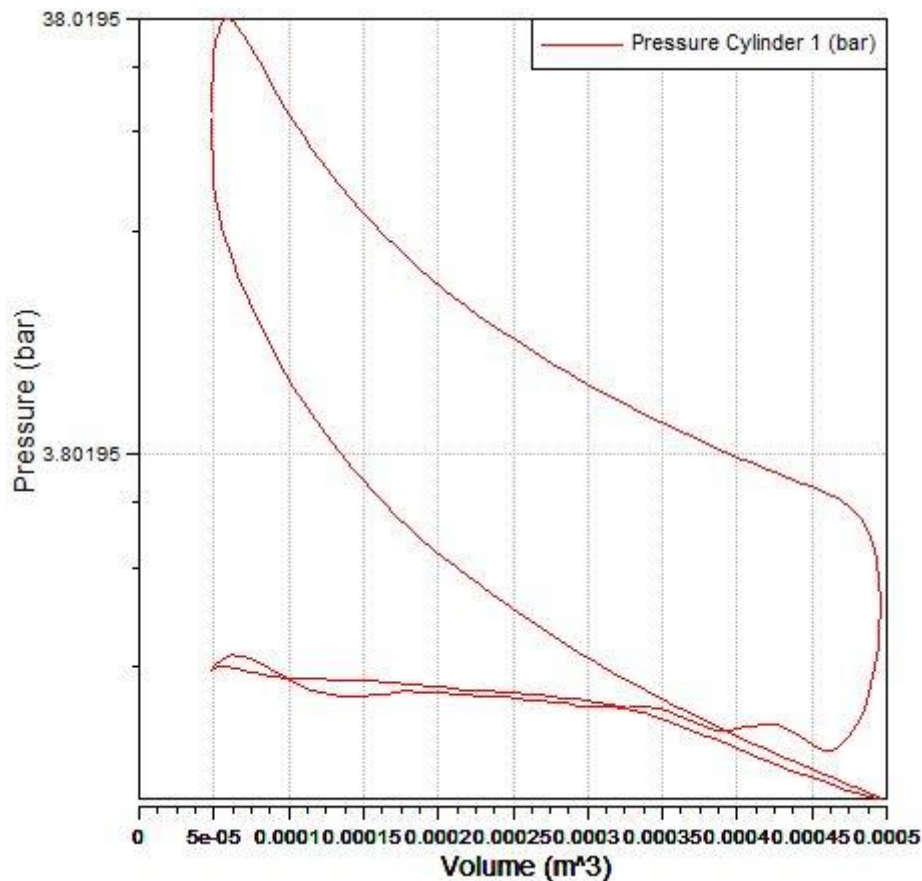
Ebben a fejezetben két fő fejlesztési irány mutatkozik meg a belsőégésű motorok fajlagos fogyasztásának csökkentésére. Ezek a megoldások az elmúlt 15 év trendjein alapulnak, fő céljaik, hogy napjaink autói megfeleljenek a szigorú károsanyag kibocsátási normáknak. Az optimalizálás fő szempontja a fajlagos tüzelőanyag fogyasztás minimalizálása, az elérhető csúcsonyomaték csökkenése nélkül. A fejlesztések megvalósításának költsége **nem** volt szempont.

Szelepvezérlés optimalizációja

Szelepvezérlés optimalizációja során a szívószelepek és kipufogószelepek nyitási és zárási időpontjait (amikor a töltet belép a hengerbe, illetve amikor a kipufogógáz elhagyja a hengert) változtatjuk a főtengely helyzetéhez képest nagyobb teljesítmény, vagy kisebb fogyasztás elérése érdekében.

Atkinson vs Miller ciklus

A Toyota Prius 1997-es bemutatkozásával nem csak az első sorozatgyártású hibrid látott napvilágot, hanem az első Atkinson ciklusú szikragyújtásos belsőégésű motor is [42]. Míg az első Miller ciklusos autók ugyanúgy a 90-es évek végén, a Mazda és a Subaru autóin jelentek meg. A két megoldás lényege, hogy a szívószelep zárását az Otto ciklushoz képest (alsó holtpont környékén) sokkal korábban (Miller), vagy sokkal később (Atkinson) hajtjuk végre. Ennek eredménye ugyan kisebb töltet a hengerben, illetve alacsonyabb kompresszióviszony (kompresszió kezdetén és végén tapasztalható hengertárfogatok aránya); azonban az expanzíós viszony változatlan marad, így a töltetnek több ideje van az égésre, ennek köszönhetően több energiát tudunk kinyerni belőle. Mindez a fajlagos fogyasztás és a NO_x emisszió csökkenéséhez vezet. Ezen ciklusok használatát általában növelt kompresszióviszony mellett hajtják végre (14:1-15:1) [30].



32. ábra: Miller-ciklus indikátor diagramja (hengertérfogat-nyomás)

A 32. ábra mutatja a Miller ciklus működésének alapját: a korai szívószelep zárásnak köszönhetően a szívóütem további részében a henger vákuumot „szív be”. Ez a vákuum a kompresszióütem elején kiegyenlítődik, ilyenkor valódi sűrítés nem történik, ezért a valós kompresszióviszony alacsonyabb lesz, az expanzióviszony viszont változatlan marad.

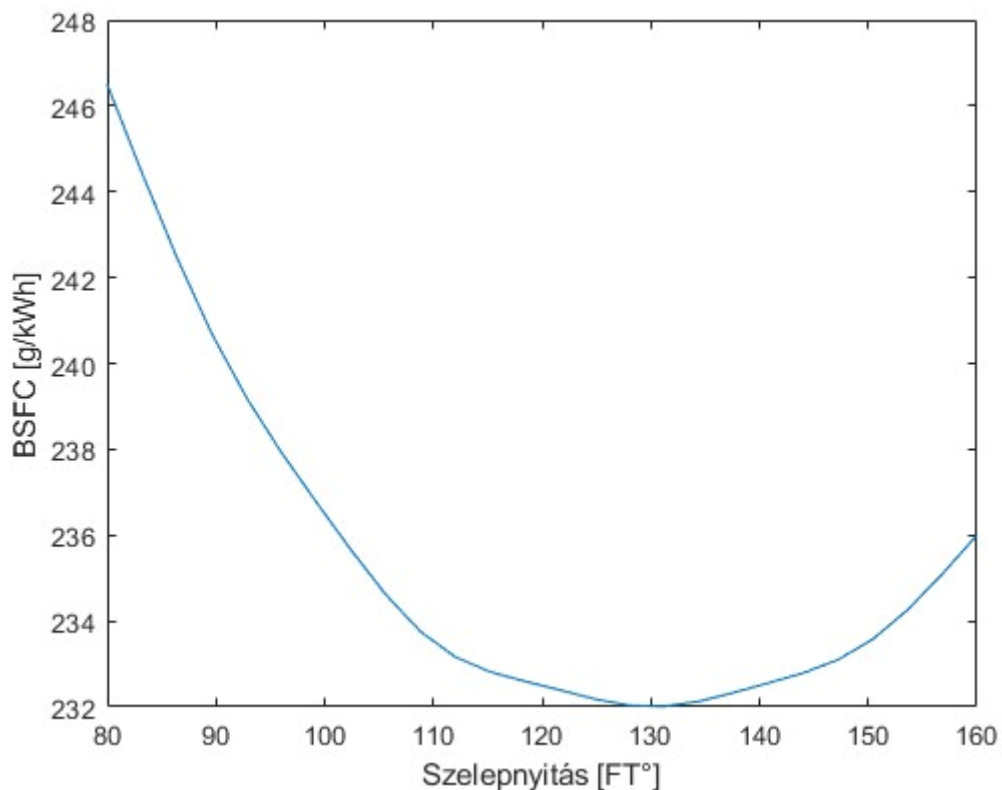
Az Atkinson ciklus esetében nagyobb expanziós munka, így jobb termodinamikai hatásfok érhető el. Azonban az ennek köszönhető nagyobb súrlódási veszteség és beszívási veszteségek (sűrítési ütem elején nyitott szívószelep mellett nagy túlnyomás ellenében kell visszanyomni a töltetet) hátrányként szól a Miller ciklussal szemben. Fontos azt is kiemelni, hogy a Miller ciklus könnyedén kombinálható fojtásmentes terhelésszabályozással, így az optimalizáció során erre esett a választás [42][46].

Fojtásmentes terhelésszabályozás

A fojtásmentes vezérlés lényege, hogy a terhelés mértékét pillangószelep helyett egy fokozatmentesen változtatható szelepvezérlési rendszerrel szabályozzák. Ezzel nagy mértékben csökkenthető a beszívási veszteség részterhelésen a pillangószelep fojtása miatt. Ezzel a

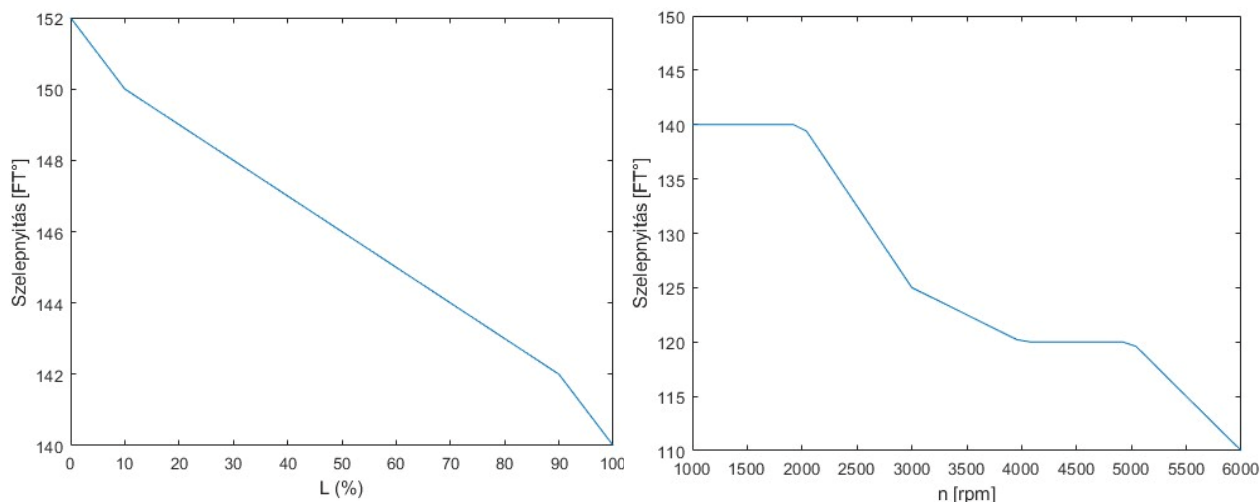
módszerrel a teljesítmény kb. 6%-kal, a bsfc pedig akár 13%-kal is javítható. Ilyen elven működik a BMW Valvetronic, vagy a Nissan VVEL rendszere [13][46].

Egy korábbi tanulmány alapján levezethető egy módszer, ami alapján a teljes szelepvezérlés fojtásmentesen optimalizálható az összes munkapontra: először a kipufogószelep nyitását változtatjuk, hogy minden fordulatszámon minimalizáljuk a kitolási és expansziós veszteségeket; szívószelep nyitásával vezéreljük a terhelés függvényében optimális szelepösszenyitási időtartamot (amikor mindkét szelep egyszerre nyitva van); végül a terhelés mértékét szabályozzuk a szívószelep zárásával. A kipufogószelep zárása konstans marad a teljes folyamat során [13].



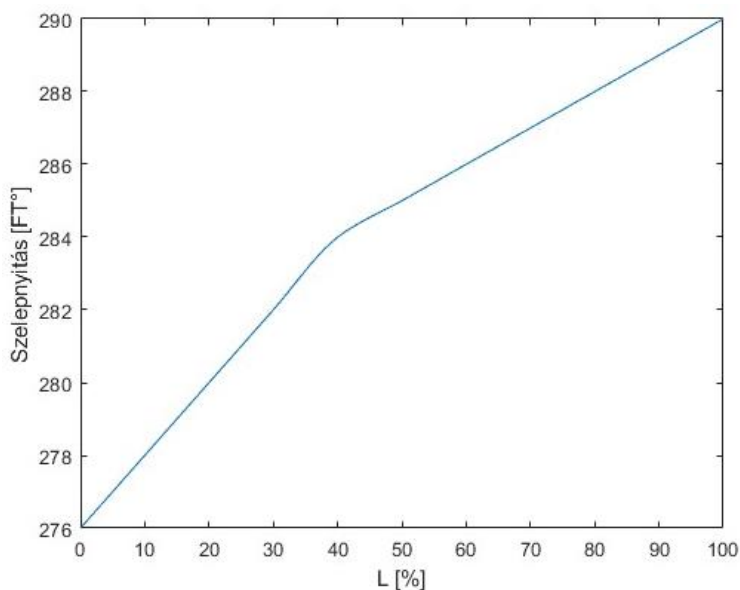
33. ábra: Kipufogószelep nyitás optimalizálása (3000 rpm, teljes terhelés)

Ha ezt több munkaponton megismételjük megkapjuk, hogy adott fordulatszám és terhelés mellett hol a legoptimálisabb a kipufogószelepet nyitni:



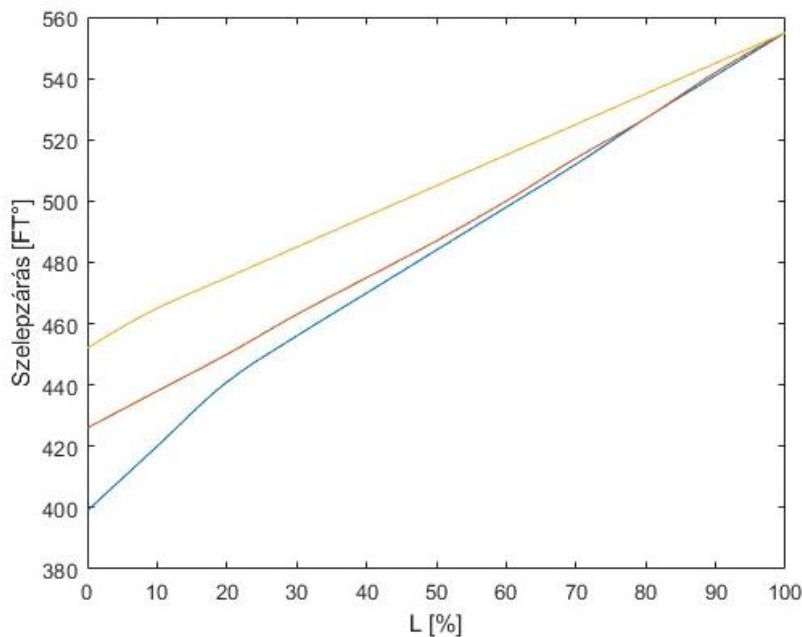
34. ábra: A kipufogószelep ideális nyitási pontjai különböző terhelések (bal) és fordulatszámok (jobb) mellett

A szívószelepnyitás vizsgálata során bebizonyosodott, hogy az optimális nyitási pont a fordulatszámra érzéketlen, így csupán a terhelés függvényében szükséges vizsgálni:



35. ábra: Szívószelep ideális nyitási időpontjai különböző terhelések mellett

Ugyan a szívószelep zárásával a gázpedálállást szabályozzuk, azonban az, hogy adott nyitás mellett mekkora mennyiségű levegő jut a hengerbe az a fordulatszám függvénye is. Így az optimális zárást a teljes fordulatszám tartományon szükséges elvégezni:



36. ábra: Terhelésszabályozás a szívószelep zárási időpontjának változtatásával
2000 rpm (kék), 4000 rpm (piros) és 6000 rpm (sárga) fordulatszámoknál

Részterhelésen a korai szívószelep zárással a Miller ciklus automatikusan alkalmazva lett. Ilyen típusú vezérlés megvalósítására olyan rendszer szükséges, ami egyszerre tudja a szívó és kipufogócső nyitási görbéjét fokozatmentesen változtatni (pl. elektromos aktuálású szelepvezérlő rendszerek).

Befecskendező rendszer optimalizációja

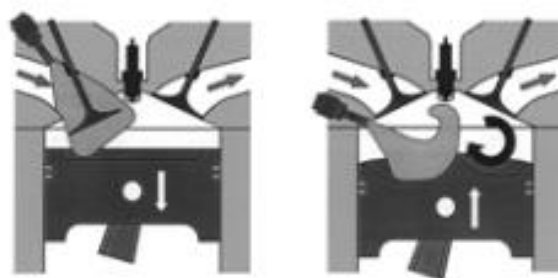
Fogyasztás szempontjából a levegő bevezetése mellett a másik kritikus művelet a tüzelőanyag bevezetése. Otto motorok esetében különböző helyeken és időben történhet a befecskendezés, mindegyik megoldásnak előnyei és hátrányai ismertek. Kezdetben a levegő és a benzin megfelelő keverése *karburátorral*, a motoron kívül zajlott, így egy teljesen homogén elegy érkezett a motortérbe. Ez a rendszer mára elavult, helyette két fő irányzat alakult ki:

- **Szívócső befecskendezés (PFI)**

A keverési folyamat itt már úgynevezett injektorokkal működik, ami nagy nyomáson (3-5 bar) fecskendezi be a szívócsőben található levegőbe, ahol a levegő és benzin könnyen összekeveredik, homogén elegyet képezve, amíg az gyújtásra kerül [28]. Ennek a homogén keveréknek az égésekor a HC képződés nagyon alacsony, korom (PM) képződés közel 0. Hátránya, hogy a befecskendezés és a hengerbe szívás között nagy idő telik el, ami rossz égéshez, adott esetben gyújtáskimaradáshoz vezethet [50].

- **Közvetlen befecskendezés (GDI)**

A befecskendezés ebben az esetben a hengerbe történik a szívóütem, vagy a sűrítő ütem közben, nagyon magas nyomáson (~ 200 bar). Az ötlet lényege, hogy a belső keverékképződés és párolgáshőt von el környezetétől, csökkentve az égési csúcshőmérsékletet és vele a kopogást (több pontú gyújtás) és a NO_x képződést. Így a motor magasabb kompresszióviszonnyal üzemelhet, ami több teljesítményt, vagy szegényebb keverék könnyebb égését jelentheti, jelentősen csökkentve a fogyasztást. A technológia hátránya a nagy HC és PM emisszió a nem-megfelelő keveredés, a nagy nyomás miatti nagyobb terhelés, és a kevésbé hatékonyan működő katalizátor miatt. A GDI használata általában kipufogógáz-visszavezetéssel (EGR) párosul a károsanyag kibocsátás csökkentése céljából (főleg szegény keverékeknel) [50].



37. ábra: Szívócső befecskendezés (bal) vs Közvetlen befecskendezés (jobb) [50]

A motor modell közvetlen befecskendezésűvé alakításával a következő javulást lehetséges elérni:

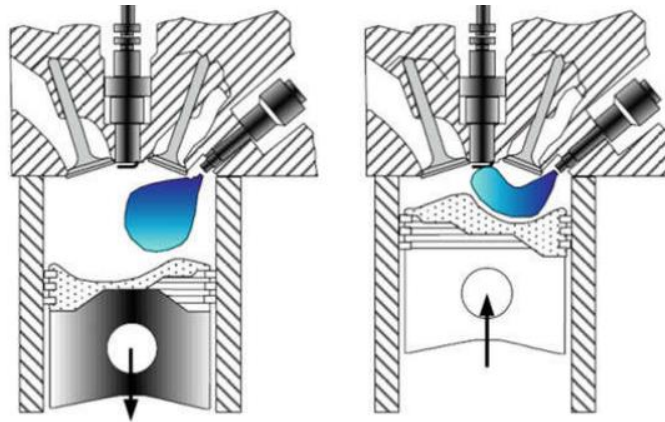
	PFI	GDI	
Nyomaték (Nm)	143,440	145,592	+1,5%
BSFC (g/kWh)	277,499	250,530	-9,02%

38. ábra: Közvetlen befecskendezés javító hatása

A szimuláció során végül a közvetlen befecskendezésű rendszer lett használva a vele elérhető fogyasztáscsökkenés és a növekedett károsanyag kibocsátás kontrollálhatósága miatt.

Közvetlen befecskendezés esetében fontos megkülönböztetni a *homogén* keverékképzést, amikor a benzint a szívóütem alatt juttatjuk a hengertérbe, illetve a *rétegzett* keverékképzést, amikor a befecskendezés a kompresszióütemben, 60-70 fokkal felső holtpont előtt történik. Utóbbi lehetővé teszi, hogy a sűrítés folyamán a gyújtógyertya felé irányítsuk a tüzelőanyag

nagy részét, ami könnyen meggyullad és elindítsa az égést. A késői befecskendezés azonban együtt jár a megnövekedett NO_x, HC és PM emissziókkal, így ez a módszer csak EGR működése mellett használható [4].

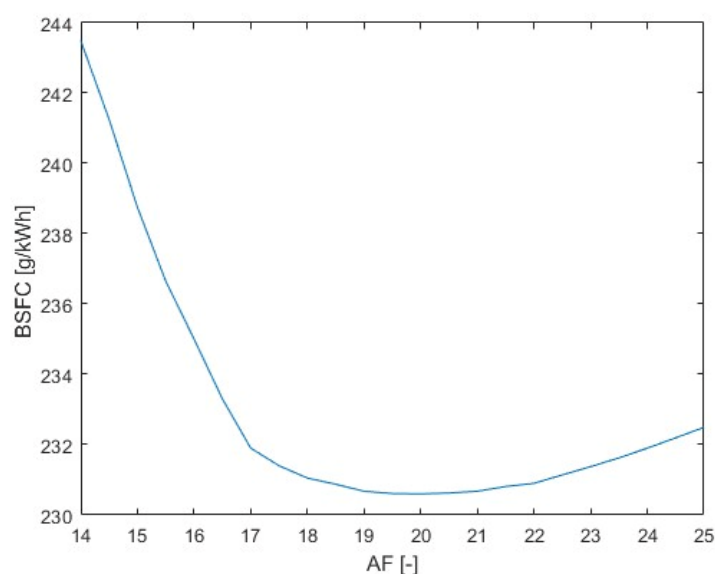


39. ábra: Homogén (bal) vs Rétegzett (jobb) keverékképzés [4]

A keverék dúságának / szegénységének méréséhez definiálnunk kell a légfelesleg tényező fogalmát. Ez gyakorlatilag a hengerben lévő levegő-tüzelőanyag arány osztva a sztöchiometrikus aránnyal (14,7):

$$\lambda = \frac{AF_{henger}}{AF_{sztöch}}$$

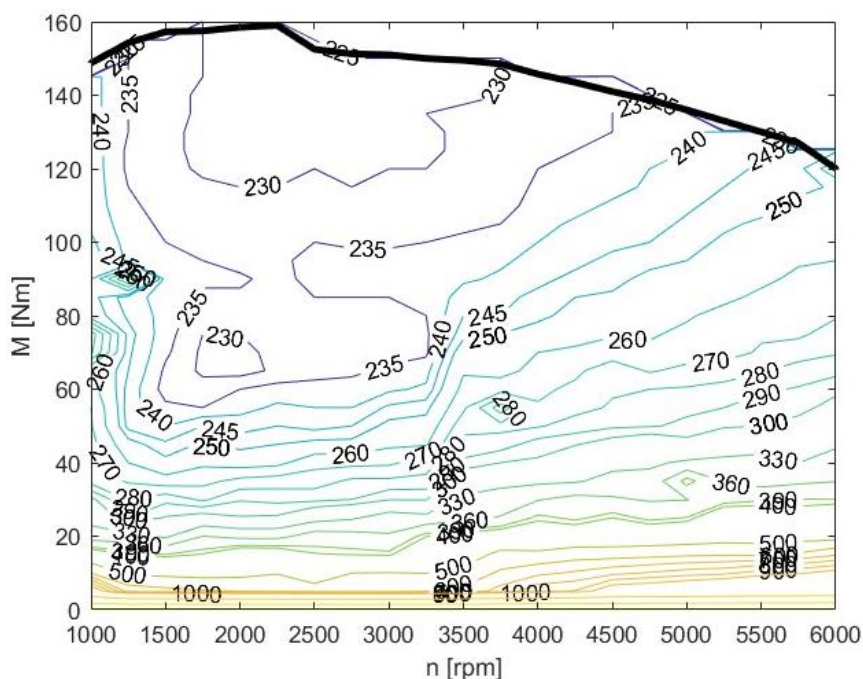
Ha ez az érték 1-nél nagyobb, akkor szegény keverékről, ha 1-nél kisebb, akkor dús keverékről beszélünk. Fogyasztás szempontjából a legideálisabb, ha minél szegényebb keveréket lehet tökéletesen égetni, így szükséges megvizsgálni, hogy milyen lambda esetén tudjuk a legjobb fajlagos fogyasztást elérni:



40. ábra: Fogyasztás optimalizálás keverékképzéssel

A fentiek alapján az optimalizált belsőégésű modellben a következő szabályozás jött létre [4]:

- Rétegzett keverékképzés, szegény keverék
 $\lambda = 1,32$
 Befecskendezés: 650 FT°
 EGR: aktív
 Használat: 35% terhelés és 3000 rpm alatt
- Homogén keverékképzés, szegény keverék
 $\lambda = 1,02$
 Befecskendezés: 410 FT°
 EGR: aktív
 Használat: 35-60% terhelés és 3000-3500 rpm között
- Homogén keverékképzés, dús keverék
 $\lambda = 0,98$
 Befecskendezés: 410 FT°
 EGR: inaktív
 Használat: 60% terhelés és 3500 rpm felett



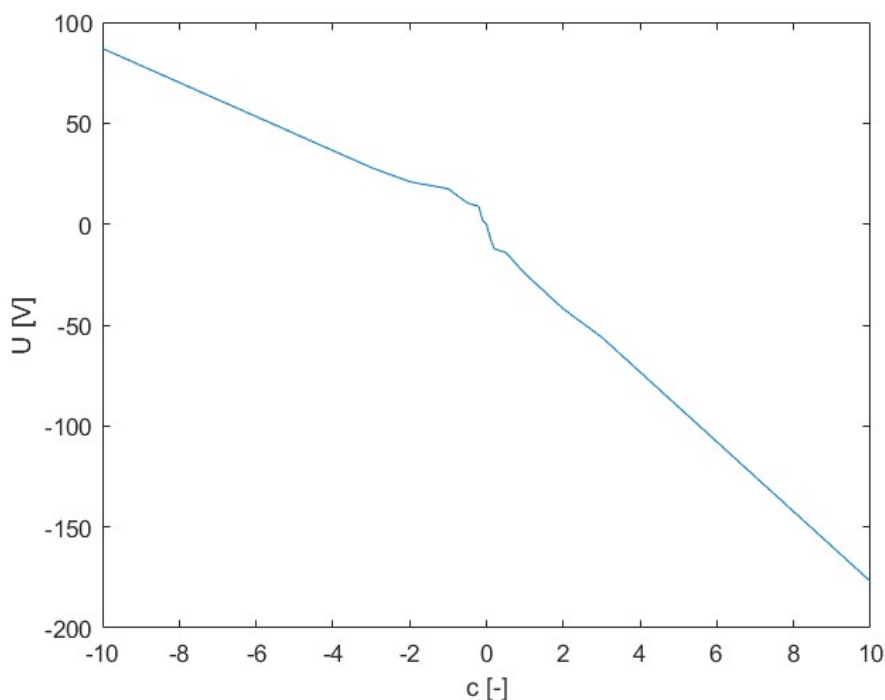
41. ábra: ICE optimalizált modell fajlagos fogyasztás jellegmező

Az új motorral elért fogyasztás javulás:

Optimalizálás során tehát szükséges meghatározni, hogy milyen paramétert szükséges szabályozni, illetve, hogy milyen mérőszám (fogyasztás, hatásfok, egyéb) minimumát/maximumát kell vizsgálni a megfelelő eredmény eléréséhez.

Akkumulátor hatásfok optimalizációja

Ennél az optimalizációs műveletnél azt vizsgáljuk, hogy meddig éri meg a belsőégésű motor teljesítménykérését emelni ahhoz, hogy az elégetett plusz tüzelőanyagot még megérje felhasználni az akkumulátor töltésére.



43. ábra: Akkumulátor veszteségei adott mértékű töltés mellett (SOC = 50%)

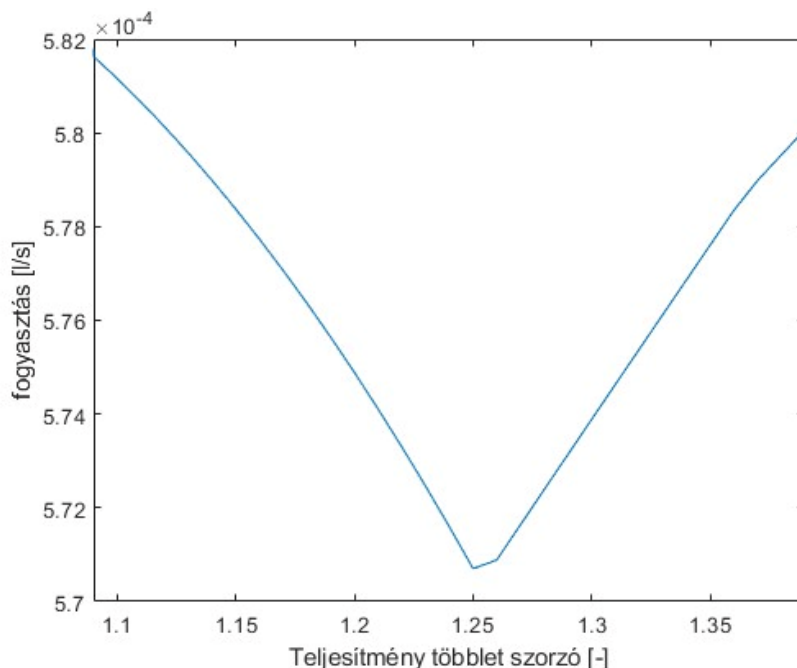
A 43. ábraán „c” azt adja meg, hogy adott töltöttség mellett az akkumulátor hány óra alatt merül le. A negatív érték visszatöltést, a pozitív érték kisütést jelent. „U” pedig az ennek megfelelő feszültség ugrás/esés.

Az optimalizálás során szükséges megkeresni a belsőégésű motornak azt a teljesítményszintjét, ahol a jármű ekvivalens fogyasztása (tüzelőanyag és villamos áram) minimális [58]:

$$f_{ekv} = f_{tüz}(v, P) + \delta * f_{akk} \quad [l]$$

δ a villamos áramfogyasztás súlyozási faktort jelzi, amivel szabályozható az akkumulátor visszatöltés átlagos értéke. Ez az érték tapasztalati úton konstans kettőre lett beállítva, ha szükség van rá δ az akkumulátor töltöttsége (SOC) függvényében változtatható. Az optimalizáció a menetciklus minden időpillanatában lefuttatandó, bemenete a belsőégésű motor

által leadott extra teljesítmény aránya (a kéréshez képest), kimenete a jármű ekvivalens fogyasztása.



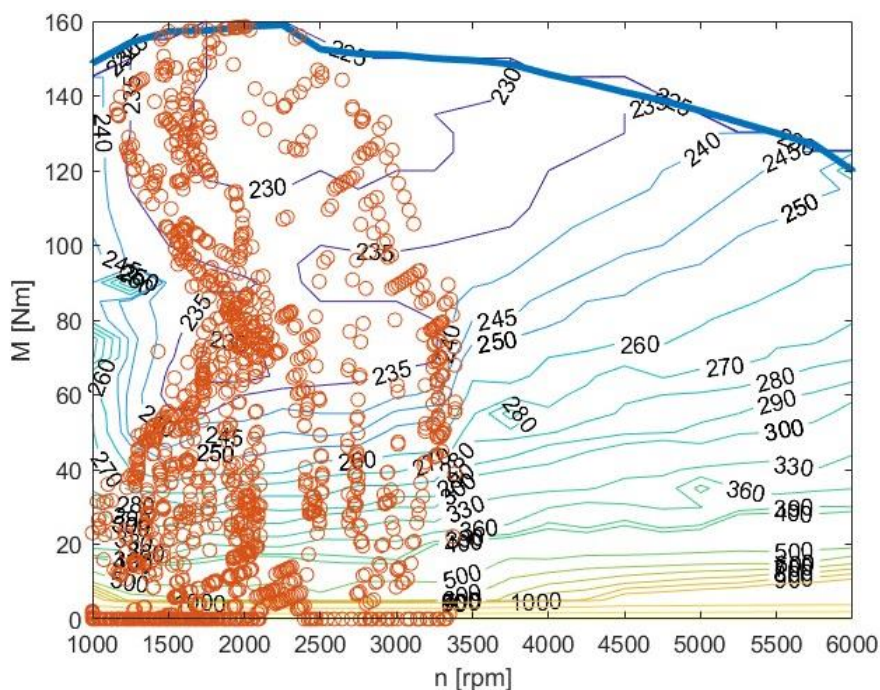
44. ábra: Példa az egységnyi idő alatti ekvivalens fogyasztás optimalizálásra (1,6 m/s, 3 kW kérés)

Belsőégésű motor munkapont optimalizációja

A teljesítményosztó hibridek legnagyobb előnye a többi hibrid hajtással szemben, hogy a belsőégésű motor működése (fordulatszám, nyomaték) dinamikusan testreszabható a kimeneti igényektől függetlenül, miközben a motor mechanikusan össze van kapcsolva a hajtott kerekekkel.

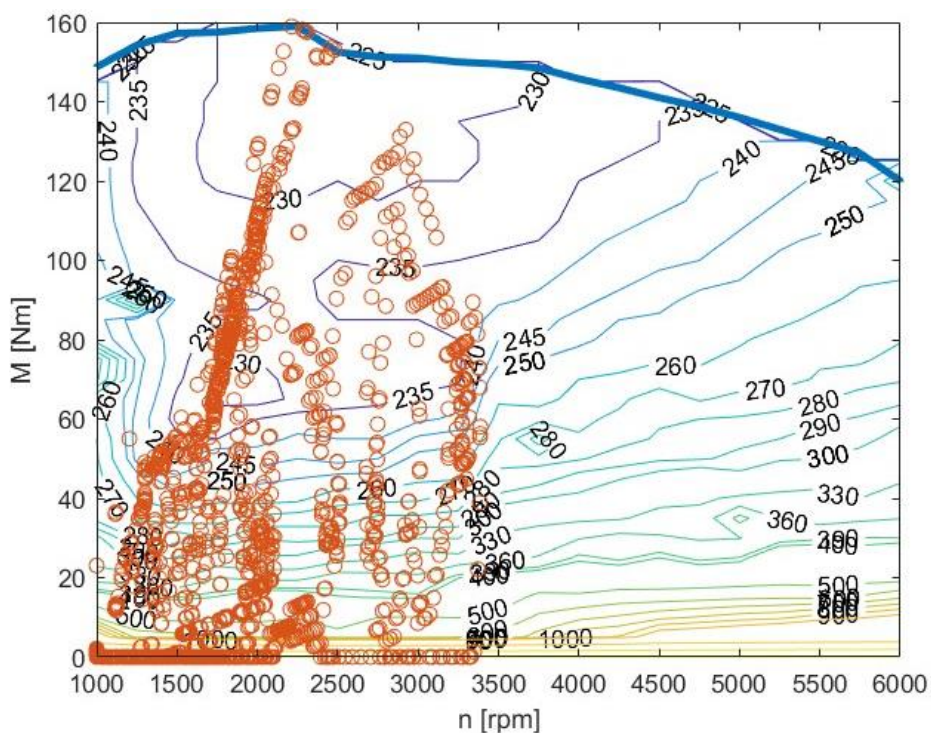
Hatásfok szempontjából a hajtáslánc legkritikusabb pontja is a belsőégésű motor. A szimulációk futtatása során bebizonyosodott, hogy ha csak az ICE minimális fajlagos fogyasztásra történik az optimalizáció, azzal sokkal nagyobb mértékű fogyasztás csökkenést lehet elérni, mint ha az ICE és MGU2 rendszerének összhatásfokát maximalizálnánk.

A szabályzás alapja, hogy a belsőégésű motor minden teljesítmény értékéhez tartozik egy fordulatszám, ahol a fajlagos fogyasztás a legkisebb. Ez a kért fordulatszám az MGU2 szabályzásával jön létre. Az optimalizáció során gátat szab, hogy a generátor fordulatszáma nem mehet nulla alá. Ekkor MGU2 ugyanis ellentétes irányba forogna a belsőégésű motor által átadott forgatónyomatékhoz képest, ami a generátort működésképtelenné tenni, illetve felesleges ellenállást képez a hajtáslánc számára.



45. ábra: Belsőégésű motor optimalizált munkapontjai a WLTC menetcikluson

A 45. ábraán látható, hogy a belsőégésű motor gyorsulás közben leköveti a minimális fajlagos fogyasztású pontokat. Azonban a hajtáslánc jelen állapotban helyenként a terhelés növelésével csökkentené a fordulatszámot. Ezt a vezető a jármű megtorpanásának érzékelheti, aminek hatására erősebben a gázra lép, a fogyasztást rontva. Így az ilyen fordulatszám-visszaeséseket szükséges korrigálni:

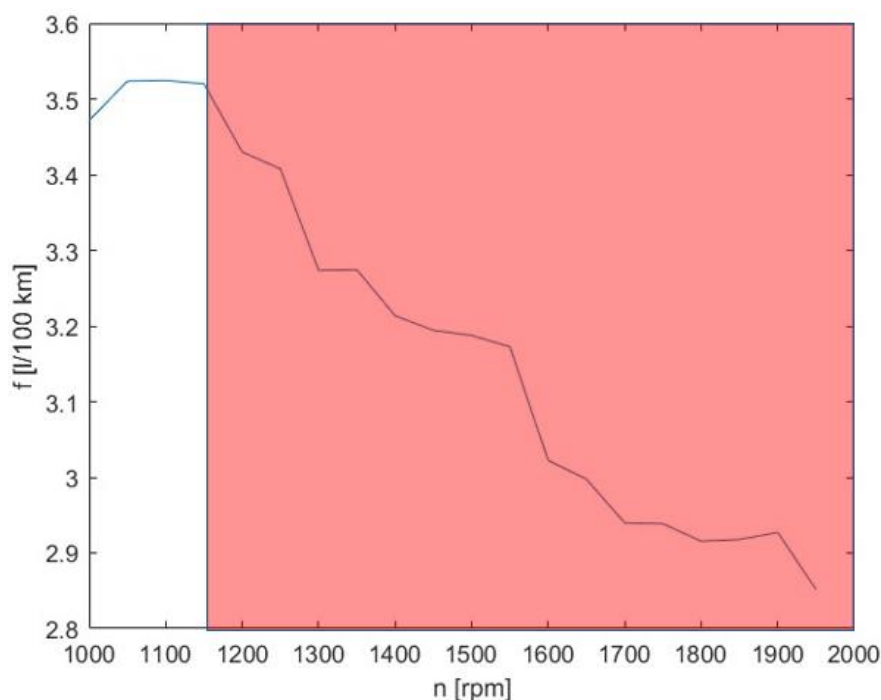


46. ábra: Belsőégésű motor optimalizált munkapontjai a WLTC menetcikluson (javított)

Üzemmódok optimalizációja

A kidolgozott hibrid járműnek két fő üzemmódja definiálható: tisztán elektromos (EV) és hibrid hajtású (HEV). Az üzemmódok közötti váltás megfelelő időzítésével fontos litereket spórolhatunk meg, így ennek optimalizálása kulcsfontosságú. A váltás történhet akkumulátor töltöttség, illetve a kért teljesítmény arányában.

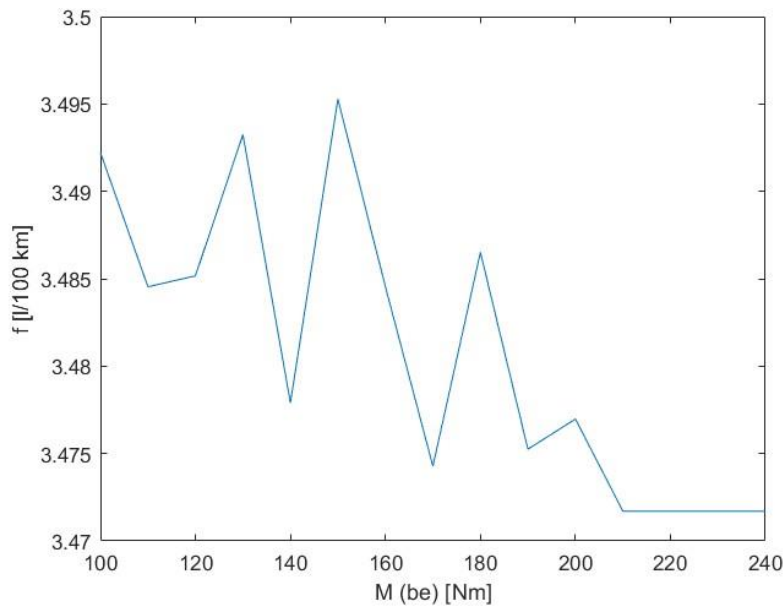
Korábban említésre került, hogy a villanymotor alacsony fordulatszámok mellett sokkal hatékonyabban képes működni, mint a belsőégésű motor. Azonban, ha túl sokat használjuk az akkumulátort alacsony fordulatok mellett, a belsőégésű motor nem képes azt megfelelően visszatölteni. Így definiálandó, hogy HEV módban a belsőégésű motor milyen fordulatszám felett kapcsoljon be.



47. ábra: Fogyasztási adatok a belsőégésű motor bekapcsolási fordulatszám függvényében

A 47. ábraán pirossal az a tartomány van jelölve, ahol a belsőégésű motor már nem képes visszatölteni az akkumulátort, a SOC különbség miatt alacsonyabbnak látszik a fogyasztás. Ezek a pontok nem használhatóak. A belsőégésű motort 1000 rpm fordulatszámon szükséges bekapcsolni.

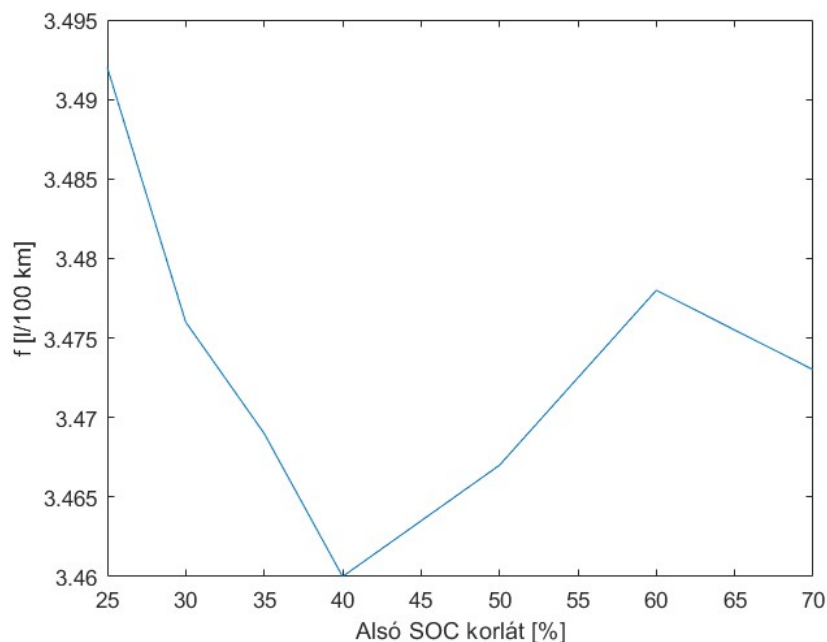
Ezzel szemben nagy terhelések mellett a belsőégésű motor tud jobb hatásfokot felmutatni, ezért az is megvizsgálandó, hogy egy adott terhelés felett EV módban szükséges-e HEV módba váltani. A bekapcsolás a kért nyomaték függvényében lett vizsgálva:



48. ábra: Fogyasztási adatok a belsőégésű motor bekapcsolási nyomaték függvényében

A mérési módszer 1%-os pontatlansága miatt az optimalizáció nem tökéletesen reprezentatív, de a trend, hogy magas nyomaték mellett nem szükséges HEV módba váltani az látszik. Fontos itt megjegyezni, hogy a WLTC menetciklus a konstans magas terhelésen történő fogyasztás mérésére nem igazán alkalmas.

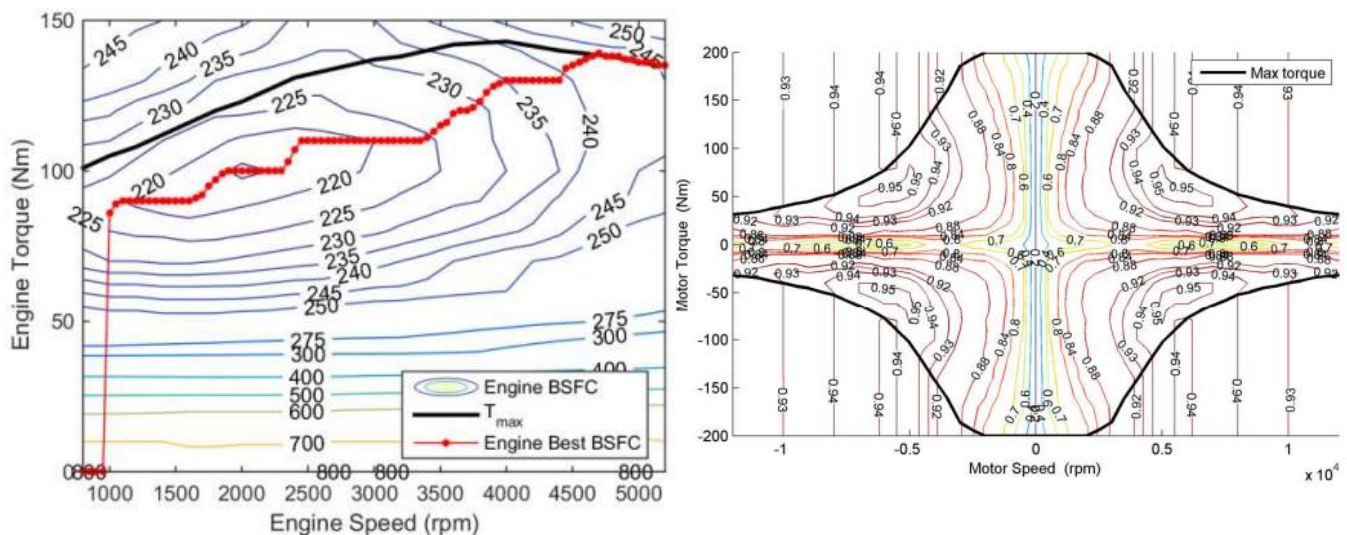
Végül pedig az akkumulátor használati tartományát is szükséges optimalizálni, hiszen az akkumulátor veszteségei a töltöttségi állapottól függenek. A kezdeti SOC konstans 80%-ra lett definiálva, mivel felette nagy feszültségeséseket tapasztalhatunk. A belsőégésű motor bekapcsolási töltöttsége 25-70%-ig lett vizsgálva, a teljes hatótáv átlagfogyasztása alapján.



49. ábra: Fogyasztási adatok az alsó SOC korlát függvényében

Eredmények

Az eredmények kiértékelése előtt szükséges megbizonyosodni a hibrid modell helyességéről. Ennek legegyszerűbb módja, ha egy létező teljesítményszórtó hibrid jármű adatait applikáljuk a felépített vezérlésre, majd a mért fogyasztást összehasonlítjuk a valós adatokkal. A választás a 122 lóerős Toyota Prius XW50-es hibrid járműre esett.



50. ábra: Toyota Prius belsőégésű és villanymotor hatásfok diagramjai [58]

A motor hatásfok diagramjai, tömeg, légellenállás, akkumulátor kapacitás adatai Simulink-be vezetésre került, és a modellen a fent levezetett szabályzási stratégia optimalizáció alkalmazásával a következő fogyasztási adatokat biztosította [43][29]:

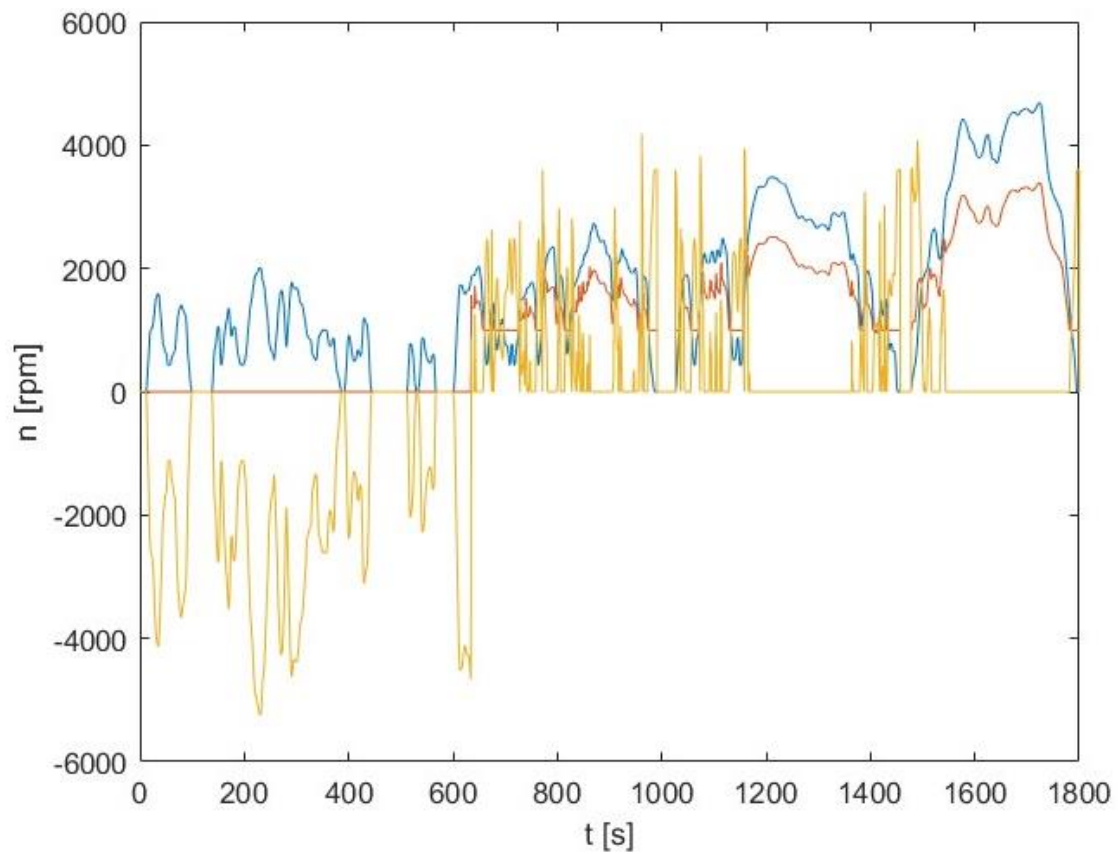
$$f_{\text{össz}} = 4,37 \text{ l/100km (WLTC)}$$

$$s = 1298 \text{ km (43 l)}$$

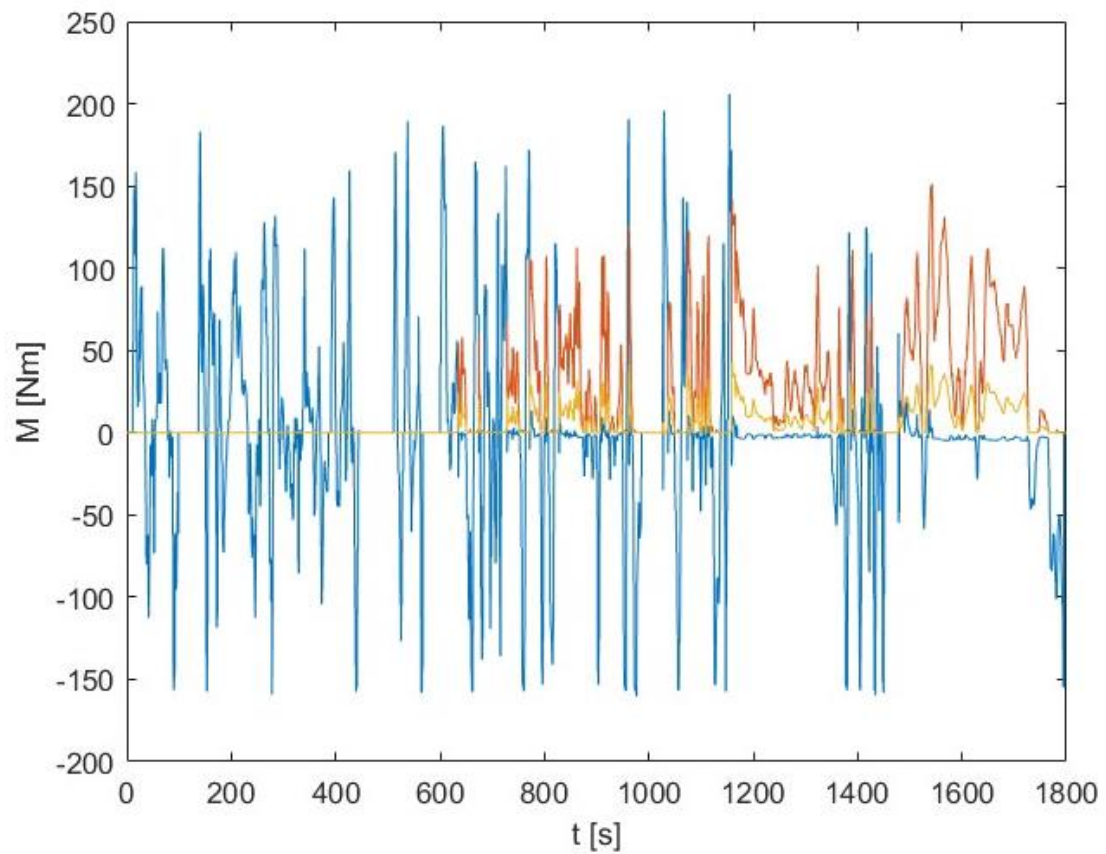
$$\dot{m}(CO_2) = 99,22 \text{ g/km}$$

Az interneten található adatok alapján egy **FHEV** Prius valahol 4,1 és 4,7 liter között fogyaszt 100 km-en, leggyakoribb érték a 4,2 volt. Tekintve, hogy a hajtáslánc összes paramétere nem ismert, így a hibrid modell validáltnak mondható.

Ezek alapján a felépített és optimalizált hibrid modell fogyasztása, hatótávja és szén-dioxid fogyasztása kiértékelhető, illetve összehasonlítható egyéb járművekkel.



51. ábra: Optimalizált modell fordulatszám-viszonyai (kék – MGU1, piros – ICE, sárga – MGU2)



52. ábra: Optimalizált modell nyomaték-viszonyai (kék – MGU1, piros – ICE, sárga – MGU2)

8. táblázat: Fogyasztási adatok optimalizációs lépésenként

Modell	Fogyasztás [l/100km]
Alap	5,43
ICE Optimalizált	4,60
Validáció	4,37
Szabályozás Optimalizált	3,48

9. táblázat: A dolgozat végeredménye (WLTC)

	Alap	Végleges	
Fogyasztás [l/100 km]	5,43	3,48	-56%
Hatótáv (35 l) [km]	681	1057	+55,2%
CO2 emisszió [g/km]	126,16	80,85	-56%

A dolgozat során elkészített véleménykutatás egyik kérdése arra irányult, hogy egy hibrid hajtáslánc egy hagyományoshoz képest mekkora fogyasztás/hatótáv javulást képes mutatni. A válaszadók 73,8%-a szerint a javulás 20-40% közötti. Egy belsőégésű motoros hajtás modell felépítése során (sebességváltóval) megállapítható, hogy a fogyasztás 29,8%-kal csökkent egy hibrid hajtás alkalmazásával. Tehát a modell az elvárásoknak megfelelően teljesített [33].

A dolgozat bemutatta, hogy egy hibrid hajtásláncot és annak belsőégésű motorját hogyan lehet optimalizálni különböző menetdinamikai körülmények mellett. A Matlab Simulink környezet egy hatékony és könnyen kezelhető környezetet adott a szimulációnak, ahol az AVL Boost által adott eredmények integrálhatóak voltak, a várt eredményeknek megfelelő kimenetet adtak. A bemutatott módszerek jól működtek, általános érvényűek, és könnyedén felhasználhatóak egy hibrid jármű tervezése során.

Források

- [1] A. A. Abdel-Rahman: *On the emissions from internal-combustion engines: a review*, International Journal of Energy Research, 1998
- [2] A. Da Costa, N. Kim, F. Le Berr, N. Marc, F. Badin, A. Rousseau: *Fuel Consumption Potential of Different Plug-in Hybrid Vehicle Architectures in the European and American Contexts*, Rueil-Malmaison, France, 2012
- [3] Andrew Nickischer: *Environmental Impacts of Internal Combustion Engines and Electric Battery Vehicles*, D.U.Quark, Vol. 4, Iss. 2, 2020
- [4] Ankur Kalwar, Avinash Kumar Agarwal: *Lean-Burn Combustion in Direct-Injection Spark-Ignition Engines*, Indian Institute of Technology Kanpur, 2021
- [5] Bahram Kamarehie, Mansour Ghaderpoori, Ali Jafari, Mohammadamin Karami, Aliakbar Mohammadi, Khaled Azarshab, Afshin Ghaderpoury, Abdolazim Alinejad, Najaf Noorizadeh: *Quantification of health effects related to SO₂ and NO₂ pollutants using Air quality*, Journal of Advances in Environmental Health Research, 2017
- [6] Chiao-Ting Li, Xiaowu Zhang, Huei Peng: *Design of Power-Split Hybrid Vehicles With a Single Planetary Gear*, Fort Lauderdale, Florida, USA, 2012.
- [7] Csaba Toth-Nagy: *Investigation and simulation of the Planetary Combination Hybrid Electric Vehicle*, West Virginia University, 2000
- [8] Daniel J. Auger (2022). *Driving Cycle (Simulink Block)*, MATLAB Central File Exchange. (2022.10.29.)
- [9] Danil Prokhorov: *Prius Control with a Hybrid Method*, Toyota Technical Center, USA, 2005.
- [10] Dr. Hanula Barna: *Belsőégésű motorok alapjai előadássorozat*, Győr, 2021
- [11] Dr. Hernád Mária, Kugyela Lóránd: *Szén-monoxid mérgezés veszélye a robbantástechnikában*, 2011
- [12] Dr. Tóth-Nagy Csaba: *Alternatív Járműhajtások előadássorozat*, Győr 2022
- [13] E.Sher, T.Bar-Kohany: *Optimization of variable valve timing for maximizing performance of an unthrottled SI engine—a theoretical study*, „Energy”, Vol. 27, 2002
- [14] Égert János Dr. - Jezsó Károly Dr.: *Mechanika (Szilárdságtan)*, Győr: Széchenyi István Egyetem, 2006.
- [15] European Parliamentary Research Service: *Understanding energy efficiency*, European Parliament, 2015

- [16] G. Fraidl, P. Kapus, H. Melde; S. Lösch, W. Schöffmann, H. Sorger, M. Weißbäck; J. Wolkerstorfer: *Variable Compression Ratio – in a Technology Competition ?*, AVL List GmbH, Graz, 2016
- [17] G. Paganelli, S. Delprat, T.M. Guerra, J. Rimaux, J.J. Santin: *Equivalent consumption minimization strategy for parallel hybrid powertrains*, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2002
- [18] Gyarmati Ádám: *A Globális Felmelegedés, mint Komplex Biztonsági Kihívás*, Budapest, 2010. 3. évfolyam 1. szám
- [19] Hisham Khatib: *Energy Efficiency and Electrical Power Generation, Energy Efficiency - A Bridge to Low Carbon Economy*, 2012
- [20] Hoang Vu Nguyen, Dinh-Du To, Dong-Choon Lee: *Onboard Battery Chargers for Plug-in Electric Vehicles With Dual Functional Circuit for Low-Voltage Battery Charging and Active Power Decoupling*, IEEE Access, 2018
- [21] <https://docplayer.hu/211077970-Uveghazhatas-az-uveghazhatas-kovetkezteben-a-xx-szazadban-a-fold-atlaghomerseklete-13-7-o-c-rol-14-7-o-c-ra-emelkedett.html> (2022.10.15.)
- [22] <https://ecoscore.be/en/info/ecoscore/co2> (2022.11.01.)
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air (2022.07.16.)
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards (2022.11.04.)
- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/Oil_reserves (2022.10.15.)
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_resistance#Rolling_resistance_coefficient_examples (2022.07.16.)
- [27] https://hu.wikipedia.org/wiki/Bolygómu#/media/Fájl:Epicyclic_gear_ratios.png (2022.10.29.)
- [28] <https://innospec.com/fuel-additives/understanding-pfi-and-gdi-engines/> (2022.11.01.)
- [29] <https://mag.toyota.co.uk/efficiency-design-aerodynamics-toyota-prius/> (2022.10.12.)
- [30] <https://outbacktravellaustralia.com.au/4wd-mods-tech-torque/atkinson-and-miller-cycle-engines/> (2022.11.01.)
- [31] <https://www.autodata1.com/> (2022.11.04.)
- [32] https://www.automobile-catalog.com/curve/2008/1187510/audi_a4_1_8_tfsi_160_attraction_multitronic.html#gsc.tab=0 (2022.07.16.)
- [33] https://www.caranddriver.com/toyota/corolla/specs/2020/toyota_corolla_toyota-corolla-hatchback_2020 (2022.09.18.)

- [34] <https://www.idokep.hu/elorejelzes/Veszprém> (2022.10.29.)
- [35] <https://www.lithiumion-batteries.com/uploads/files/16400/CX20-Data-Sheet.pdf> (2022.04.12.)
- [36] https://www.pvsyst.com/help/battery_efficiency.htm (2022.09.18.)
- [37] <https://www.topgeartransmission.com/blog/benefits-of-planetary-gearbox/> (2022.08.15.)
- [38] <https://www.youtube.com/watch?v=JQpSaIfknkA> (2022.10.15.)
- [39] <https://x-engineer.org/drivetrain-losses-efficiency/> (2022.07.20.)
- [40] Jan Gutsche, Łukasz Muślewski, Anna Dzioba, Sergiy Matyukh: Identification and analysis of factors influencing climate change in terms of CO₂ emissions, MATEC Web of Conferences, 2021
- [41] Jinming Liu, Huei Peng: *Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle*, University of Michigan, 2008.
- [42] Jinxing Zhao: Research and application of over-expansion cycle (Atkinson and Miller) engines – A review, Applied Energy, Vol. 185, 1. rész, 2017
- [43] Kiarash Ahi: Dynamic modeling and simulation of transmotor based series-parallel HEV applied to Toyota Prius 2004, Faculty of Electrical and Computer Engineering K.N.T University of Technology Tehran, Iran, 2011
- [44] Nagy Milán: Soros hibridjármű szabályozási stratégiájának optimalizációja szimulációs módszerekkel, Győr: Széchenyi István Egyetem, 2017.
- [45] Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember (https://ourworldindata.org/exports/per-capita-electricity-source-stacked-926483bbcd4e54c65af36d6bc5d478_v9_850x600.svg) (2022.10.19.)
- [46] Paulovics László: Belsőégésű Motorok 2 előadássorozat, 2022
- [47] Peter van den Bossche, Joeri van Mierlo, Gaston Maggetto: *Hybrid Vehicle Performance Measurement: a New Challenge in Standardization*, Vrije Universiteit Brussel
- [48] Poloma Levente: Akkumulátor hatásfok karakterisztikájának meghatározása kísérleti módszerrel, Győr: Széchenyi István Egyetem, 2021.
- [49] Ranjeer S Sokhi: World of Atlas Atmospheric Pollution, Anthem Press, 2012
- [50] S.P. Chincholkar, Dr. J.G. Suryawanshi: Gasoline Direct Injection: An Efficient Technology, Mumbai, India, 2015

- [51] Theo Hofman, Roell van Druten, Alex Serrarens, Janneke van Baalen: *A fundamental case study on the Prius and IMA drivetrain concepts*, Technische Universiteit Eindhoven, 2005
- [52] Theo Hofman, Thijs Purnot: *A Comparative Study and Analysis of an Optimized Control Strategy for the Toyota Hybrid System*, Stavanger, Norvégia, 2009
- [53] Vasiliki V.Georgatzi, Yeoryios Stamboulis, Apostolos Vetsikas: *Examining the determinants of CO2 emissions caused by the transport sector: Empirical evidence from 12 European countries*, Department of Economics, University of Thessaly, Volos, Greece, 2019
- [54] Victoria Mikhaylenko, Yurii Kurnikov, Tatiana Nosacheva: *The Use of Lithium Polymer Batteries in Electric Vehicles*, Proceedings of the XVII International Multidisciplinary Conference «Prospects and Key Tendencies of Science in Contemporary World». Bubok Publishing S.L., Madrid, Spain. 2022
- [55] W. Shen, W. Han, T.J. Wallington: *Current and future greenhouse gas emissions associated with electricity generation in China: implications for electric vehicles*, Environmental Science & Technology, 05 Jun 2014
- [56] Weeberb J.Requia, Moataz Mohamed, Christopher D.Higgins, Altaf Arain, Mark Ferguson: *How clean are electric vehicles? Evidence-based review of the effects of electric mobility on air pollutants, greenhouse gas emissions and human health*, McMaster University, McMaster Institute for Transportation and Logistics, United States, 2017
- [57] WLTP fuel consumption guide (<https://www.wltpinfo.com>) (2022.10.02.)
- [58] Xiaowu Zhang: *Design of Power Split Hybrid Powertrains with Multiple Planetary Gears and Clutches*, Michigan, USA, 2015