

# Biturbó és turbóhibrid hajtásláncok energetikai elemzése

## Energetics impact assessment of biturbo and turbohybrid powertrains

LÁNYI Ábel<sup>1</sup>, NYERGES Ádám<sup>2</sup>

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárműtechnológia Tanszék  
Magyarország, 1111 Budapest, Stoczek utca 6.

<https://auto.bme.hu/>

<sup>1</sup>[lanyiabel2@gmail.com](mailto:lanyiabel2@gmail.com), <sup>2</sup>[nyerges.adam@kjk.bme.hu](mailto:nyerges.adam@kjk.bme.hu)

### Abstract

*In the last decade, hybrid powertrains have also appeared in the high-performance sports car category. The latest generation of the Porsche 911 also received a bigger displacement, turbohybrid powertrain instead of the previous biturbo powertrain. The aim of this article is to compare the two powertrains using simulation tools in GT-Suite environment. The turbohybrid powertrain is more efficient and has a faster response time. The article also presents the modeling and validation challenges of powertrains.*

**Keywords:** biturbo powertrain, turbohybrid powertrain, energetics, modelling, simulation and validation.

### Kivonat

*Az utóbbi évtizedben a nagy teljesítményű sportautók kategóriájában is megjelentek a hibrid hajtásláncok. A Porsche 911 legújabb generációja is a korábbi biturbó hajtáslánc helyett egy nagyobb lökettérfogatú, turbóhibrid hajtásláncot kapott. A cikk célja a két hajtáslánc összehasonlítása szimulációs eszközökkel, GT-Suite környezetben. A turbóhibrid hajtáslánc jobb hatásfokú és a reakcióideje is gyorsabb. A cikk bemutatja még a hajtásláncok modellezési és validálási kihívásait is.*

**Kulcsszavak:** biturbó motor, turbóhibrid motor, energetika, modellezés, szimuláció és validáció.

## 1. BEVEZETÉS

A környezetvédelmi előírások és CO<sub>2</sub> kvóták már a kis példányszámban gyártott, nagy teljesítményű járművek kategóriáját is elérték. Remek példa erre a most esedékes generációváltása a Porsche 911-nek is [1]. A korábbi változatban az egyik teljesítménysztyáiban a boxer elrendezésű hat hengeres motorjuk feltöltését két turbótöltővel oldották meg. Az utódmodell hajtásláncában jelentős változtatásokat eszközöltek. A belsőégésű motor lökettérfogatát növelték, a váltóba pedig elektromos hajtást építettek be, ezzel párhuzamos hibrid hajtásrendszert kialakítva. A korábbi, biturbó elrendezés gyors reakcióidejét pedig egy darab, nagyobb méretű turbótöltővel helyettesítették, elektromos hajtással kiegészítve. A gyártó a két hajtáslánc főbb paramétereit, teljesítmény és nyomatékviszonyait jól prezentálta, hogy egyetemi kutatásokban validálható modellt lehessen belőlük készíteni [2].

A kutatás célja a két hajtáslánc modellezése, validálása és energetikai összehasonlítása. Az elvárások, hogy a modernebb hajtáslánc mind stacioner, mint tranzien্স üzemállapotokban jobb performanciával rendelkezik.

A belsőégésű motorok és hajtásláncok modellezéséhez a GT-Suite szoftver számít manapság a leprofesszionálisabb megoldásnak. Egy energetikai szimulációhoz 0D-s égésfolyamatot és 1D-s töltetcsere hálózatot célszerű megvalósítani. A validálásnak a legnehezebb lépése a turbótöltő illesztése (a helyes méret kiválasztása), hiszen a legkorszerűbb feltöltők karakterisztikái egyetemi körülmények között nem érhetők el. Ebben a legfontosabb kiindulópont a validálandó motorok nyomatékkarakterisztikája volt. A modellek csak a belsőégésű motoros hajtásrendszert tartalmazzák, a járművet és a párhuzamos hibrid rendszert nem [3].

Stacioner üzemállapotokban a legfőbb különbség a két feltöltési mód között az energetikában keresendő. Kisebb motorfordulatszámon, amennyiben rendelkezésre áll töltöttség a hibrid rendszer akkumulátorában, az elektromos meghajtású feltöltőt külsőleg is lehet hajtani (ameddig az akkumulátor

töltöttsége engedi). Ezzel a motor maximális nyomatékát már kisebb motorfordulatszámokon is el lehet érni. Nagy teljesítményű munkapontban (nagy motorfordulatszám mellett) a turbófeltöltő már a leszabályozási tartományában üzemel. Hagyományos feltöltés esetén ilyenkor a kisebb feltöltőnyomást úgy lehet elérni, hogy a kipufogógáz entalpiájának csak kisebb hányadát fordítjuk a turbina meghajtására. Elektromos hajtású feltöltő esetén viszont a feltöltő tengelyének a fékezésével is lehet szabályozni a feltöltőnyomást, és ezzel a nagyfeszültségű akkumulátorba energiát is el lehet tárolni [4]. A kutatómunka keretében megvizsgáltuk, hogy milyen turbina és kompresszor méretekkel valósítható meg olyan kompromisszum, hogy a feltöltő elektromos teljesítménye egyik szélsőséges munkapontban sem legyen irreálisan nagy.

Tranziens üzemállapotban a feltöltő elektromos meghajtásának a fő célja a turbó késedelem csökkentése. A feltöltőben az áramlástan gépei a mechanikai teljesítményt nagy fordulatszámokon és kis nyomatékszínt adják át egymásnak, a villamos gépnek ehhez kell alkalmazkodnia. A források alapján a villamos meghajtású feltöltők motorjai mindössze néhány tized Nm nyomaték leadására képesek, ennek megfelelően vizsgáltuk meg a turbókésedelmet [5]. Mivel a GT-Suite modell nem tartalmaz járműmodellt, így a tranziens működés során a motorra ható terhelést egyszerűsítve kell modellezni. Erre a célra egy inerciát kapcsoltunk a motor főtengelyére, amelynek szöggyorsulása az eredményekben összemérhető a jármű gyorsulásával. A modell ugyan a valóságot nem tökéletesen követi le, viszont a két motorváltozat összehasonlítása szempontjából ideális választás. A modellezés ezen részének a legnagyobb kihívása a szabályozók beállítása volt, hogy a szimulációk azonos feltételek mellett kezdjenek el gyorsulni, és az elektromos működtetésű feltöltő is túllendülések nélkül állítsa be a feltöltőnyomást.

A két motorváltozat két szempontból került összehasonlításra: turbó késedelem, energetikai elemzés.

## 2. A HAJTÁSLÁNCOK FŐ MODELLEZÉSI PARAMÉTEREI

A belsőégésű motorok működésének komplexitása nagyon sok termodinamikai és áramlástan paramétertől függ, ennek megfelelően a modellezése nagyon sok részletre kiterjed. A cikkben megfogalmazott célra 1D (akusztikai) töltetcsere hálózatot és 0D (termodinamikai) égésfolyamatot célszerű alkalmazni. A GT-Suite szoftvert eredetileg kifejezetten erre a célra fejlesztették. A modell pontosság szempontjából a legnagyobb hatást a hengerben zajló folyamatok modellezése jelenti. Ezt követi a szelepvezérlés és a turbóillesztés. A hengertől távolabb lévő csatornák hatása lényegesen kisebb a végeredményre. Az 1. táblázat tartalmazza a két motor fő modellparamétereit.

A vizsgált motorok paramétereit [5]

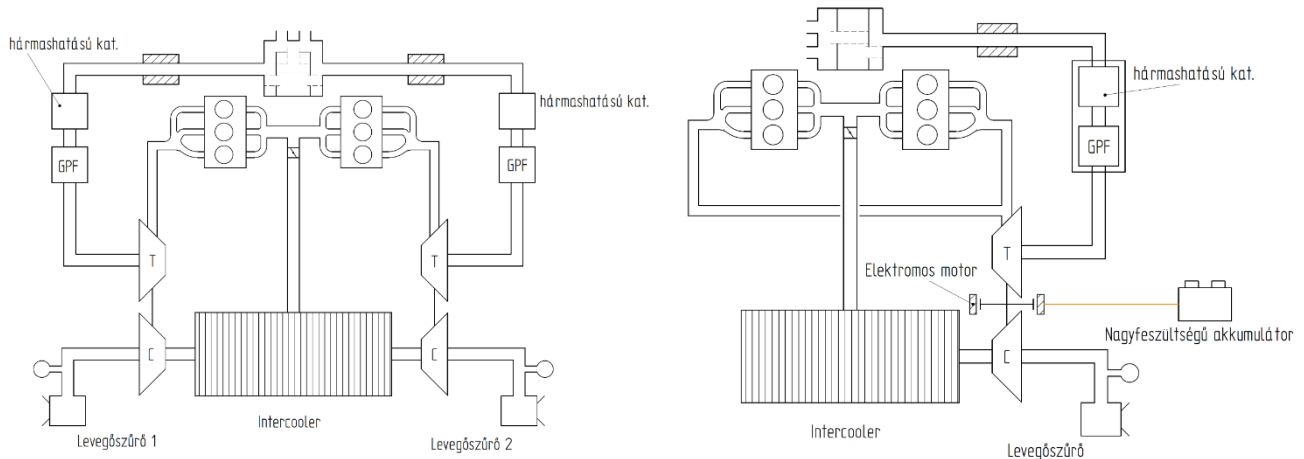
1. táblázat

| Motorváltozat                     | 9A2 EVO              | 9A3                    |
|-----------------------------------|----------------------|------------------------|
| Lökettérfogat                     | 2981 cm <sup>3</sup> | 3591 cm <sup>3</sup>   |
| Hengerek száma, elrendezése       | 6, boxer             | 6, boxer               |
| Gyújtási sorrend, szög            | 1-6-2-4-3-5, 120°    | 1-6-2-4-3-5, 120°      |
| Furat                             | 91 mm                | 97 mm                  |
| Löket                             | 76,4 mm              | 81 mm                  |
| s/D                               | 0,8395               | 0,835                  |
| Kompresszió viszony               | 10,2                 | 10,5                   |
| Maximális fordulatszám            | 7500 1/min           | 7500 1/min             |
| Maximális nyomaték                | 570@2300-5000 1/min  | 570 Nm@1950-6000 1/min |
| Maximális nyomaték e-motorral     | -                    | 610 Nm@1950-6000 1/min |
| Maximális teljesítmény            | 353 kW@6500 1/min    | 357 kW@6500 1/min      |
| Maximális teljesítmény e-motorral | -                    | 398 kW@6500 1/min      |
| Befecskendezés                    | direkt               | direkt                 |
| Feltöltés                         | 1,28 bar, biturbó    | 1,28 bar, eTurbo       |
| Vezérlés                          | DOHC, VarioCam Plus  | DOHC, VarioCam Plus    |

Mivel a motor számos paramétere ismeretlen, ezért a szimulációs modellek beállításához sok kísérlet szükséges. Az ismeretlen paraméterek beállításánál fontos tudni a hatásuknak a hierarchiáját, az elfogadható értékekhez pedig szükséges némi motor modellezési tapasztalat. Az 1. ábrán megtekinthetők a motorok modellezési tartományai. A legfontosabb ismeretlen paraméterek az égésfolyamat lefutása, a szelepvezérlés

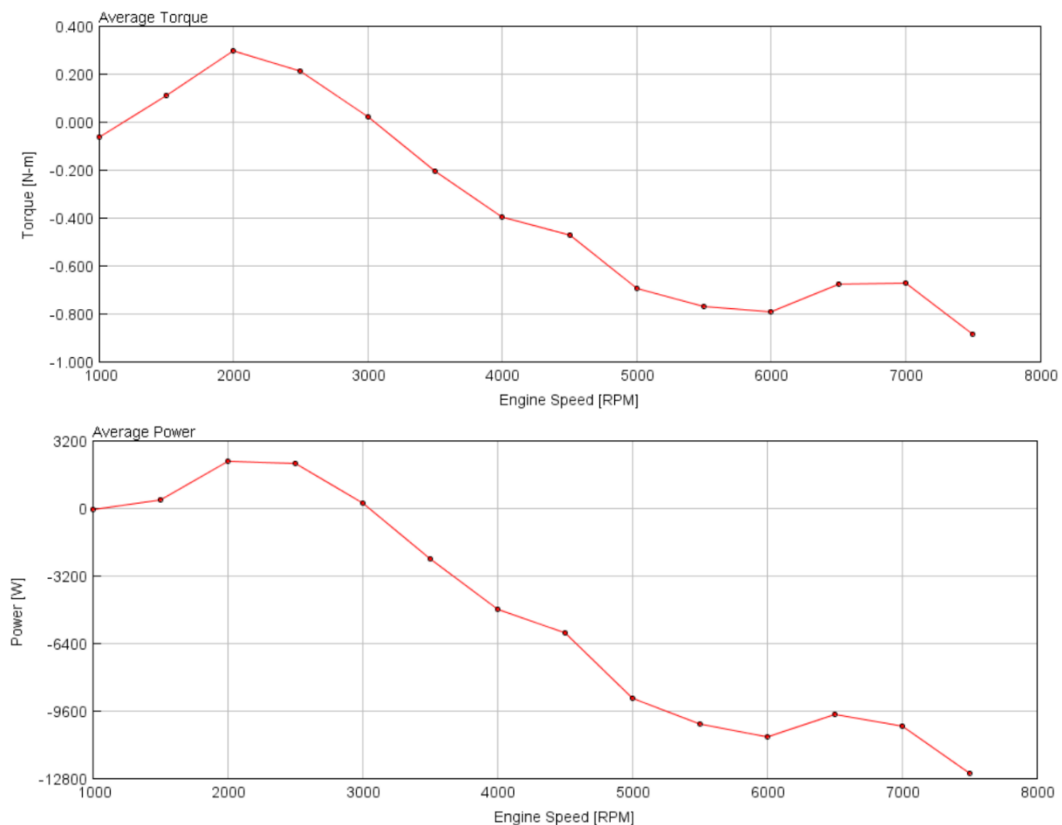
beállítása és áramlási veszteségei, illetve a turbótöltő jellegzői. Előbbi kettő a validációs célnak megfelelően hangolható. Utóbbihoz egy demó jellegzőnek lehet a méret beállításával kalibrálni a modellt.

A validációs cél a motor teljesítmény és nyomaték karakterisztikája. A nagy számú ismeretlen paraméter egy motormodellnél jellemzően nagy szabadságfokot jelent, így a validációs kritérium bátran lehet minimális. A kutatás célja a két motor összehasonlítása, így eltekinthetünk a becsült paraméterek vélhető pontatlanságától (befecskendezés lefutása, szelepnitások, szelepek átfolyási tényező karakterisztikái, pontos szívó és kipufogó csőhálózat, motor súrlódási veszteségei, stb.).



1. ábra. Porsche biturbo és turbóhibrid szívó és kipufogó hálózat egyszerűsített rajza

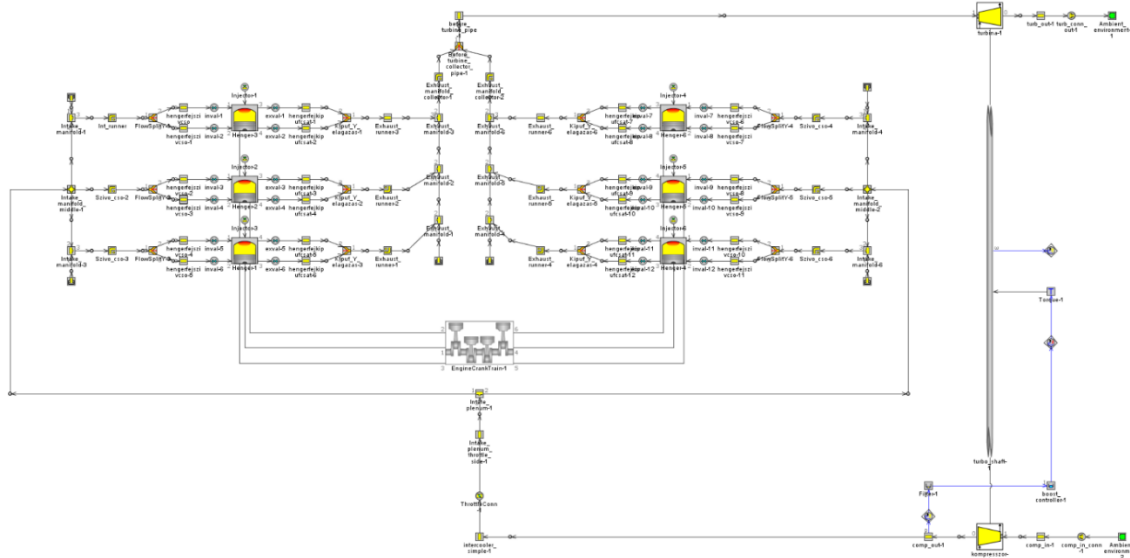
A két motor között a feltöltés módja a legnagyobb eltérés. A biturbo motor változtatható geometriájú turbinával rendelkezik, amivel a feltöltőnyomást tudja szabályozni. A GT-Suite modellben ennek megfelelően több méretű turbina karakterisztikát is be kellett állítani. A turbóhibrid motorban a feltöltőnyomást a feltöltő villamos meghajtása szabályozza. Itt is a turbina méretének helyes megválasztása volt fontos. Kis méretű turbina esetén a villamos meghajtásnak a nagyobb szerepe nagy motorfordulatszámon a feltöltő fékezése visszatáplálással. Így viszont a motor csúcsteljesítménye csökkenhet a légnyelési veszteségek miatt.



2. ábra. 9A3 motor e-Turbo elektromos motorjának nyomatéka és teljesítménye a fordulatszám függvényében

Nagyobb méretű turbina esetén pedig kis motorfordulatszámra a villamos hajtásnak kell segítenie a feltöltést, visszatáplálásra pedig kevesebb lehetőség adódik. Az optimális turbina méretet úgy kellett megválasztani, hogy kis és nagy motorfordulatszámra is kihasználható legyenek a villamos hajtás előnyei.

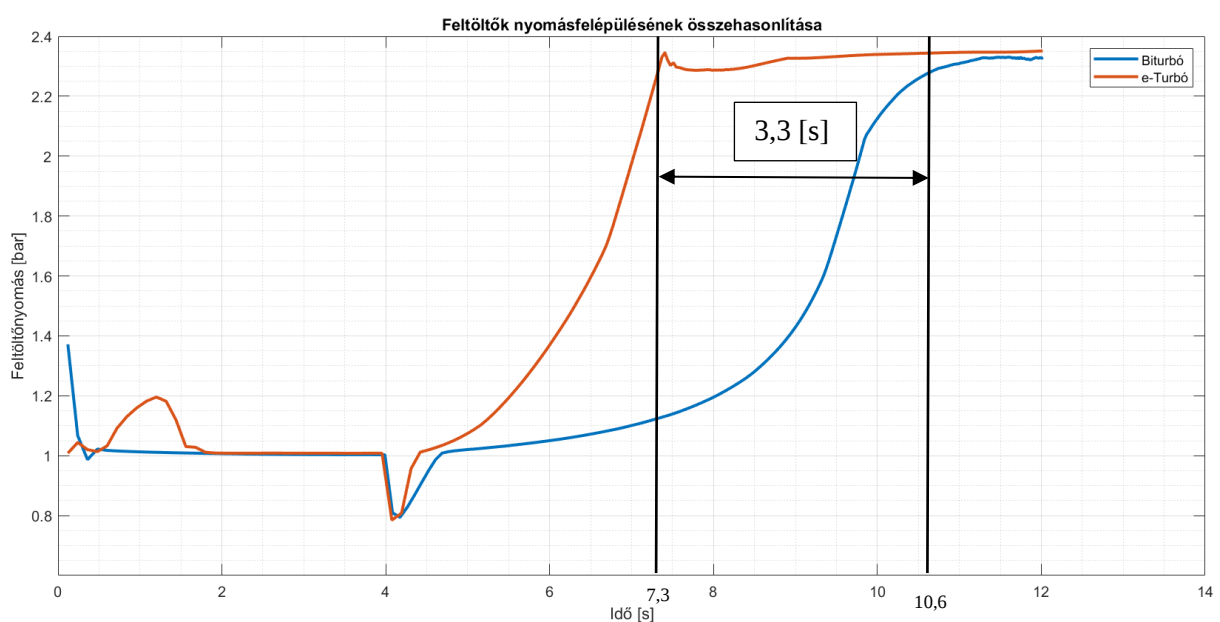
A 2. ábrán a validált turbóhibrid modell elektromos feltöltőjének a nyomatéka és teljesítménye látható a motorfordulatszám függvényében. Figyelembe véve, hogy a feltöltő fordulatszáma 150000 1/min fölötti is lehet, érthető, hogy az őt hajtó villamos gépnek nem szabad nagy átmérőjűnek lennie a szilárdsági határok miatt. Így viszont a leadható nyomatéka sem lesz nagy, jelen esetben 1 Nm-nél is kisebb. A legnagyobb teljesítménye így kevesebb, mint 13 kW-ra adódott, ami meglepően nagy. Ennek az ellenőrzésére adatot sajnos nem találtunk. A 3. ábrán megtekinthető a turbóhibrid motor GT-Suite modellje.



3. ábra. A 9A3 motor GT-Suite modellje

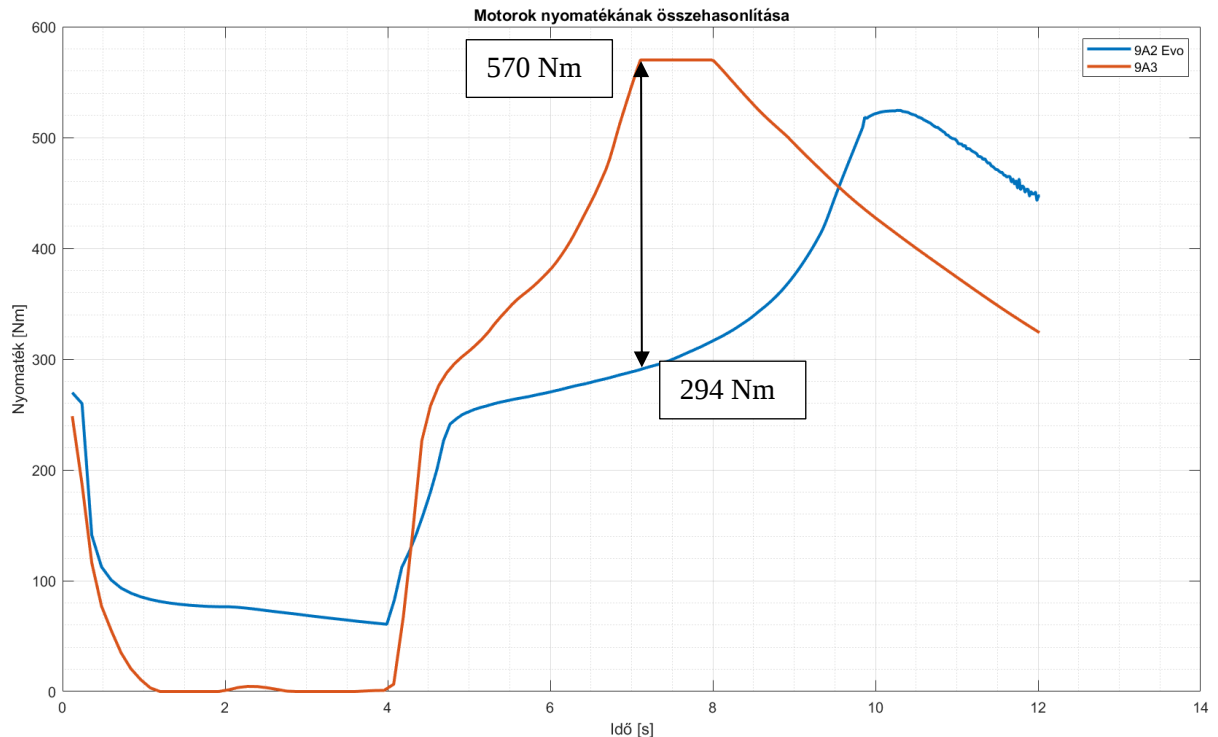
### 3. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

Ahogy már a bevezetésben bemutatásra került, a két hajtáslánc két szempontból kerül összehasonlításra. Az első szempont a feltöltők késedelme. A biturbó kialakítás nagy előnye a kisebb inerciájú járókerekek alkalmazása, ami egyben kisebb turbólyukat is eredményez. A turbóhibrid motorban a nagyobb járókereket a villamos meghajtással igyekeznek kompenzálni. A 4. ábra mutatja az összehasonlításukat.



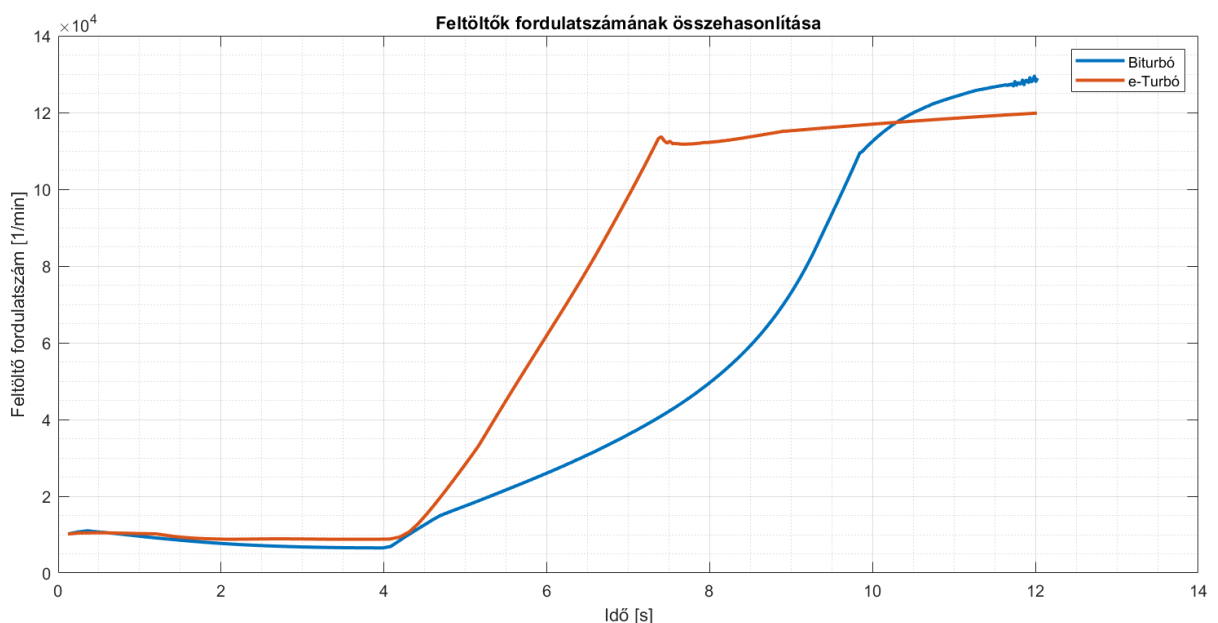
4. ábra. A turbófeltöltők nyomásfelépülésének összehasonlítása

A diagramon látható teszteset egy tranziens szimuláció, melyben a motor alapjáratról indul és egy nagyobb inerciát kell meghajtania, mely a járművet szimbolizálja az egyszerűsített modellben. Az inercia mérete úgy lett beállítva, mintha a jármű a legmagasabb sebességi fokozatában haladna, így a feltöltőnyomás felépülése kifejezetten lassú. A turbóhibrid motor esetén az előny ebben a ciklusban jelentős, a névleges feltöltőnyomást 3,3 másodperccel hamarabb eléri, ez több mint 40%-os javulást jelent. Ugyanez a motor nyomatékának a megjelenésében is megvizsgálható az 5. ábrán.



5. ábra. A motorok nyomatékgörbéinek összehasonlítása

A modellek beállításánál a legnagyobb kihívás a szabályzók hangolása volt. Erre a célra egyszerű PI szabályzók lettek alkalmazva. Az aktuátor a turbót hajtó villamos gép, ennek fontos peremfeltétele a maximális nyomaték. A 4. ábrán a feltöltőnyomás karakterisztikáján, illetve a 6. ábrán a feltöltő fordulatszámának a karakterisztikáján is látható a szabályzó performanciája. A beállási időt a villamos gép nyomatéka határozza meg, mellette kis mértékű túllendülés tapasztalható csupán.



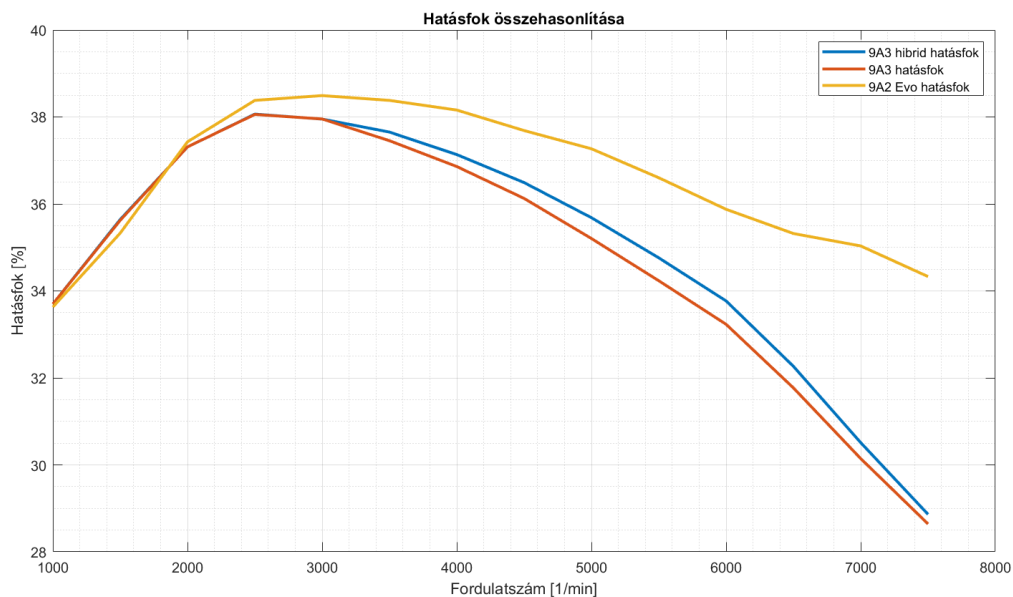
6. ábra. A turbófeltöltők fordulatszámának összehasonlítása

A motorváltozatok effektív hatásfokait mutatja be a 7. ábra. A legjobb hatásfok a régebbi, biturbó motorra adódott. Belemélyedve az eredményke, ennek az oka egyrészt a feltöltő karakterisztikáiban található, a biturbó motor kompresszorai jobb izentrópikus hatásfokkal működnek. Másrészt pedig a turbóhibrid motor súrlódási középnyomása is nagyobb értékre adódott.

Megvizsgálható viszont a villamos hajtású feltöltő hatásfok javító hatása. Ehhez bevezettük a hibrid hatásfokot. Ennek számításához az e-Turbó által generátorüzemben szolgáltatott energiát vontam ki a befektetett energiából. Az alábbi példa számítás 4000 1/min munkapontra érvényes.

$$\eta_{hibrid} = \frac{P_{ki}}{P_{be}} = \frac{P_{motor}}{P_{tüz.a.} - P_{eTurbo}} = \frac{243,64 \text{ kW}}{660,99 \text{ kW} - 4,82 \text{ kW}} = 0,3713 = 37,13\%$$

A 7. ábrán látható, hogy a turbóhibrid motorban a generátor üzemben működő elektromos feltöltő átlagosan fél százalék effektív hatásfok javulást eredményez.



7. ábra. Effektív hatásfokok összehasonlítása

## 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során GT-Suite környezetben végzett motor modellezéssel összehasonlításra került a korábbi Porsche biturbó és turbóhibrid hajtásláncok. A kutatás legfontosabb eredményei:

- Az elektromos meghajtású feltöltő jelentősen csökkenteni tudja turbókésedelmet, ehhez nagy fordulatszámu, de kis nyomatékú villamos gép szükséges.
- Az újabb motorváltozat vélhetően jobb effektív hatásfokát nem sikerült igazolni. Viszont a feltöltőnyomás leszabályozása esetén, generátor üzemben kb. fél százalékkal javítja az e-Turbo a motor effektív hatásfokát.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Scheub, J., Zecchetti, D., Habermann, J. et al. Increased Efficiency and Performance with the Electric Turbocharger. MTZ Worldwide 82, 74–80 (2021). <https://doi.org/10.1007/s38313-021-0711-6>
- [2] Csere Cs. Things You Must Know about Porsche's 911 GTS T-Hybrid Powertrain., Car and Driver. 2024.05.28. <https://www.caranddriver.com/news/a60914997/2025-porsche-911-gts-t-hybrid-engine-details/>
- [3] GT-Suite 7.3 User's manual, Gamma Technologies Inc. 2012.
- [4] Zal P. Automobile Catalog, 2024.09.30. [https://www.automobile-catalog.com/curve/2024/3006800/porsche\\_911\\_carrera\\_gts\\_coupe\\_pdk.html#gsc.tab=0](https://www.automobile-catalog.com/curve/2024/3006800/porsche_911_carrera_gts_coupe_pdk.html#gsc.tab=0)
- [5] Küllei K. Az első 911 hibrid. Autótechnika. 2024.06.4. <https://autotechnika.hu/cikkek/motor-eroatvitel/14509/az-első-911-hibrid>