

Turbófeltöltő illesztése egyhengeres Formula Student motorhoz

Fitting a turbocharger to a single cylinder Formula Student engine

ZSOLDOS Bence, kutatómérnök

Széchenyi István Egyetem, Járműhajtás Technológia Tanszék, 9026 Győr, Egyetem tér 1.tel.: +36 96 613 76,
fax: +36 96 613677, [e-mail:bence.zsoldos@ga.sze.hu](mailto:bence.zsoldos@ga.sze.hu), <https://jhtt.sze.hu/>

Abstract

The aim of the project is to select and fit a suitable turbocharger for a single-cylinder four-stroke motorcycle engine using one-dimensional simulation methods in the context of Formula Student. This paper describes the steps of the turbocharger fitting process, the construction of the one-dimensional model and the comparison with the natural aspirated engine. Finally, the simulation parameters of the turbocharged engine are compared with the parameters measured on the testbench.

Keywords: Formula Student, turbocharging, one-dimensional simulation

Kivonat

A projekt célja a megfelelő turbófeltöltő kiválasztása és illesztése egydimenziós szimulációs módszerekkel egyhengeres négyütemű motorkerékpár motorhoz a Formula Student keretein belül. Ezen dokumentum bemutatja a turbófeltöltő illesztés folyamatának lépéseit, az egydimenziós modell felépítését és a szívómotorral való összehasonlítást. Végül a turbófeltöltött motor szimulációs paramétereit összehasonlításra kerülnek a fékpadon mért paraméterekkel.

Kulcsszavak: Formula Student, turbófeltöltés, egydimenziós szimuláció

1. BEVEZETÉS

A SZEngine Motorfejlesztő Hallgatói csapat a világon egyedülállóan a Formula Student versenysorozatra fejleszt kizárólag belsőégésű motort. A csapat 2008 óta foglalkozik egyhengeres belsőégésű szívómotor fejlesztéssel. A tavalyi szezonban a vezetőség úgy döntött, hogy teljesítmény és hatásfok növelés, illetve tapasztalat szerzés céljából szeretne turbófeltöltött motort fejleszteni. Jelen dokumentum ezt a folyamatot mutatja be.

2. TURBÓFELTÖLTÉS

A turbófeltöltő egy centrifugál kompresszorból és egy vele egy tengelyen lévő turbinából áll, amelyet a motor kipufogó gázai hajtanak meg. Előnye, hogy a fordulatszáma és a töltőnyomás nincs közvetlen kapcsolatban a motor fordulatszámmal. A turbina fordulatszáma nagyobb mértékben függ a kipufogógázok hőmérsékletétől és tömegáramától. Hátránya, hogy a motor számára a turbina változó ellennyomást jelent. [1]

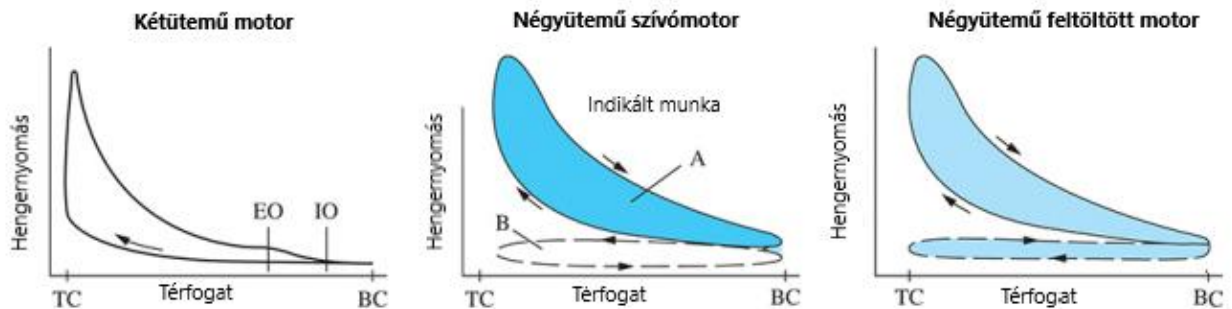
2.1. Turbófeltöltés célja

Egy belsőégésű motor teljesítményét alapvetően az határozza meg, hogy mekkora tömegű levegő marad a hengerben a szívószelep zárása után. A levegő bejuttatása szívómotoroknál igazán nagy kihívás, mivel abban az esetben légköri nyomás áll rendelkezésre. A motor effektív teljesítményét a következő összefüggés határozza meg:

$$P_e = \frac{2}{i} z V_h p_e n$$

Ahol P_e az effektív teljesítmény, i az ütemszám, z a hengerek száma, V_h a lökettérfogat p_e az effektív középnyomás, n a fordulatszám [1]

A teljesítmény növelésére két lehetőség van. Az egyik a fordulatszám növelése, amely azért nem lehetséges jelen esetben, mert a dugattyú középsebesség túlságosan megnövekedne, amely a motor élettartamát jelentősen csökkentené. A másik lehetőség az effektív középnyomás növelése, amely a motor által végzett hasznos munka és a lökettérfogat hányadosát jelenti. Ezt a legegyszerűbb módon úgy lehet megvalósítani, hogy valamilyen feltöltőt alkalmazunk a motorunkon. A feltöltő segítségével nagyobb tömegű levegő juttatható be a hengerbe ennek köszönhetően több energiát tudunk közölni a rendszerrel tüzelőanyag formájában, amely a középnyomás növekedését eredményezi. Az 1. ábrán látható az indikátor diagram, amely a motor hengerében lejátszódó nyomásváltozások regisztrálására szolgál.



1. ábra: Különböző motorok indikátor diagramjai [2]

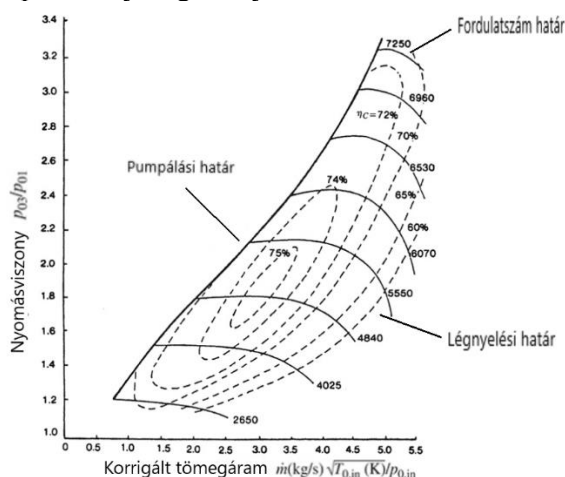
A fenti ábrán a „A” és „B” terület különbsége jelenti egy ciklus indikált munkáját. Az egyszerűség kedvéért bevezették az indikált középnyomás fogalmát, amely az indikált munka és a lökettérfogat hányadosát jelenti. Az indikált és effektív középnyomás közti különbséget a veszteség középnyomás jelenti, amely a motor mozgó alkatrészeinek és segédberendezéseinek működtetéséhez szükséges munkának és a lökettérfogat hányadosa. Az ábrán jelölt „B” terület a töltetcsere veszteséget (pumpálási munkát) jelenti. Feltöltött motoroknál létezik olyan üzemállapot, amelyen a pumpálási munka hasznos munkaként jelenik meg, ezt szemlélteti a fenti ábra jobb oldala. Természetesen ez a jelenség csak bizonyos munkapontokon érvényesül.[2]

2.2.Turbófeltöltő kompresszor jellegmező.

A kompresszor jellegmezője a feltöltő fontos jellemzőit ábrázolja a gyártó által rögzített környezeti viszonyokban. Az áramló levegő a kompresszor kerékbe axiális irányba való belépést követően irányt változtat, majd a feltöltő tengelyéről közölt energiával közel arányosan felgyorsul és megnő a kinetikus energiája. A járókerékből való kilépés után egy bővülő diffúzorban lassulni kezd és a kinetikus energia nyomás energiává alakul át. Áramlás közben a levegő sűrűdik és ütközik, illetve belső sűrűdése is van. A felsorolt veszteségek következtében megnő a hőmérséklete. Alapvetően a sűrítés önmagában hőmérséklet növekedéssel jár, ezért a kompresszor hatásfokát az ideális (veszteségek nélküli) és a valós hőmérséklet növekedés hányadosa határozza meg.

A feltöltő nyomásviszonya szintén fontos jellemző, amely a kompresszor után és előtt mért nyomás hányadosa. A nyomásviszony határozza meg a feltöltés mértékét, amely a járókerék kerületi sebességének növelésével növelhető, azonban ennek mechanikai és áramlástanai korlátai vannak. [1][4]

A kompresszor tömegárama adott nyomásviszony és fordulatszám esetén a kompresszor kerék átmérőjétől és a levegő sűrűségétől függ. A kompresszor jellegmezőjét a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: Kompresszor jellegmező [2]

A jellegmezőt balról határolja a pumpálási határ. Ezekben az üzemiállapotokban a motor töltési foka jóval kisebb, mint amelyet a feltöltő szállít, a nagy nyomásviszony következtében a járókerékről leválik az áramlás, illetve visszaáramlás történhet, amely károsítja a feltöltőt.

A jellegmező jobb oldalán található a légnyelési határ, ezt átlépve a feltöltő nem képes nagyobb tömegáramot szállítani, mivel a legkisebb keresztmetszetben a levegő sebessége elérte a hangsebességet.

A jellegmező tetején található a fordulatszám határ, amely a feltöltő maximális üzemi fordulatszámát adja meg, ezt túllépve mechanikai károsodás léphet fel.[2]

2.3. Turbófeltöltők feltérképezése

A Formula Student lehetőségeit figyelembe véve az első lépés más versenycsapatok motorkonstrukcióinak elemzése volt. Az egyhengeres motorok feltöltésének nehézségei miatt kevés csapat használ feltöltött motort, illetve a gyártók által kínált választék is rendkívül szűkös a 1 liter alatti lökettérfogatú motorokhoz. A lehetőségek feltérképezése után a Garrett gyár által Formula Student versenycsapatoknak kínált MGT1238Z és a Continental SK1 turbófeltöltője került kiválasztásra, amelyeknek az alkalmassága a továbbiakban kerül vizsgálatra szimulációs módszerekkel.

3. EGYDIMENZIÓS TERMODINAMIKA SZIMULÁCIÓ FELÉPÍTÉSE

Az egydimenziós szimulációk lényege, hogy a motor égésterében lejátszódó folyamatok a tömeg és energia megmaradás egyenleteivel írjuk le. Az égésfolyamat modellezése a Vibe függvényel történik. Az áramlástan komponenseket, mint a szívórendszer az áramlástan alapegyenleteinek véges térfogatokra történő diszkrétizálásával lehet vizsgálni. Legnagyobb előnye, hogy egy fejlesztési folyamat időtartamát jelentősen redukálja, illetve a költséghatékonyság. Hátránya, hogy számos egyszerűsítést tartalmaz, így sok esetben szükség van fékpadi mérésekre, illetve tovább lehet pontosítani 3D áramlástan szimulációkkal.[2][3][5]

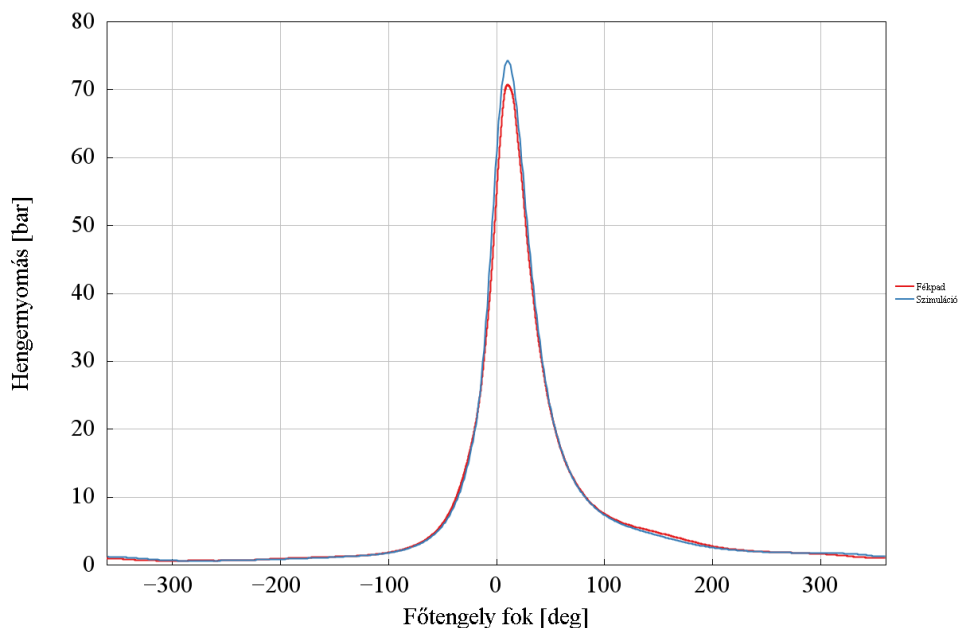
3.1. Alapmodell validálása

Ahhoz, hogy a szimuláció megbízhatóbb legyen fékpadi mérések nélkül, szükség lesz az alaplomotorok egy validált szimulációjára, amely minél nagyobb mértékben megközelíti a fékpadon mért adatokat. Később az alaplomotor égés modelljét kell felhasználni a turbófeltöltős modell konstruálásához. Az alaplomotor paramétereit az 1. táblázat tartalmazza. A szimulációs modell felépítése GT-SUITE szoftverben történt.

Lököt	80 mm
Furat	105 mm
Lökettérfogat	693 cm ³
Kompresszió viszony	14:1

1. táblázat: Az alaplomotor fontosabb paramétereit

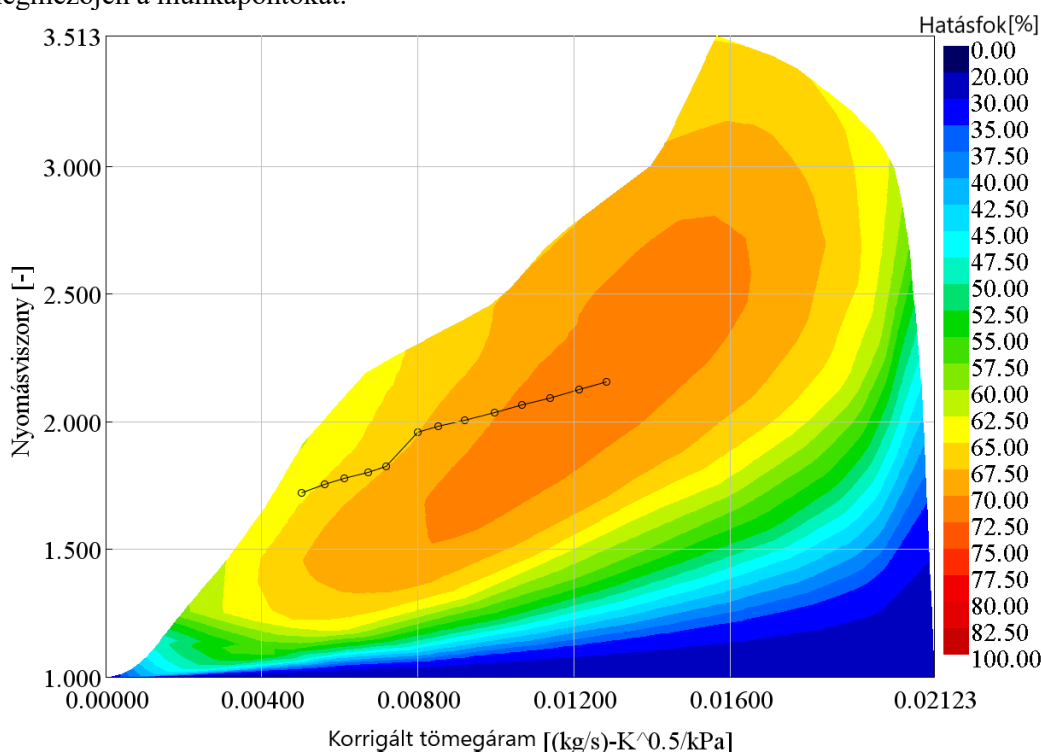
A fékpadon mért hengernyomás lefutás, a szívó és kipufogó rendszerben lévő nyomás ismeretében lehetett finom hangolni a szimulációs modellt. A modell és a valós mérés hengerlefutásának összehasonlítását mutatja be a 3. ábra.



3. ábra: Fékpadi mérés és szimuláció összehasonlítása 8000-es fordulaton teljes terhelésen

4. TURBÓFELTÖLTŐK ÖSSZEHASONLÍTÁS VIRTUÁLIS MOTORBAN

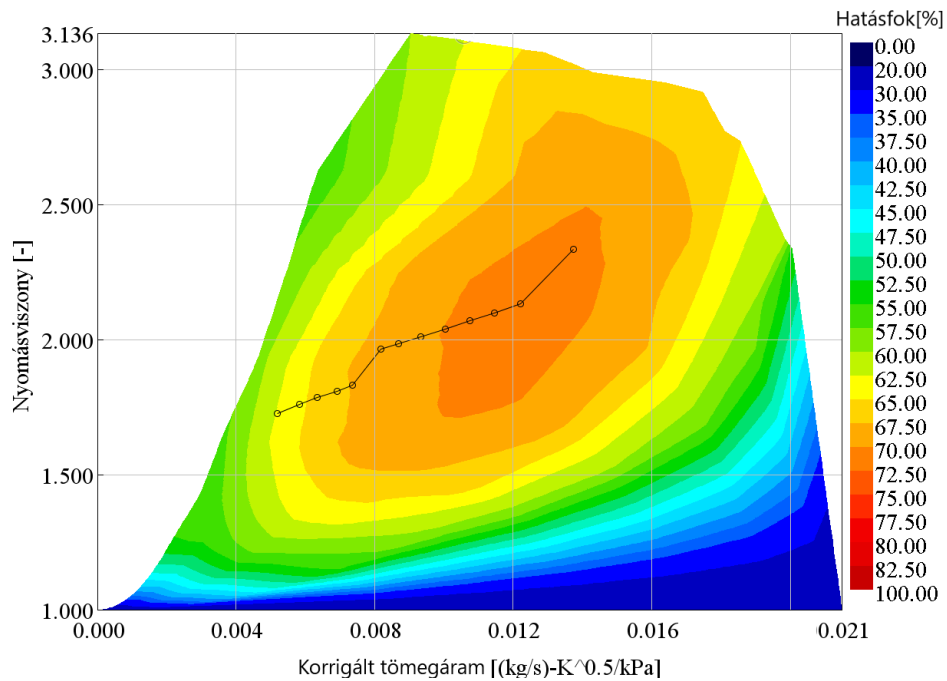
A szimulációs modell felépítéséhez szükséges az adott turbófeltöltők kompresszor és turbina jellegmezője. Ezekhez az adatokhoz Formula Student csapatként könnyedén hozzá lehet jutni, így azok rendelkezésre álltak. A vizsgálat fő szempontja a feltöltők munkapontjainak elemzése és összehasonlítása. A motor vizsgálat szempontjából releváns paramétereinek összehasonlítása. A turbófeltöltő munkapontja adott körülmények között a kompresszor és turbina oldal egyensúlyából adódik, ezért a vizsgált turbófeltöltőknél kizárólag a kompresszor jellegmező kerül elemzésre, mivel több releváns információt biztosít mint a turbina oldal. A fejlesztés fázisban nem állt rendelkezésre fékpadi mérés. ezért a szimulációban kapott teljesítmény és nyomaték görbék irrelevánsak, ezek a fékpadi mérések után kerülnek vizsgálatra. A szimuláció során 3500-9500 fordulatszám [1/min] közt 500-as lépésközzel lettek vizsgálva a munkapontok teljes terhelésen. Fontos megjegyezni, hogy ezek statikus szimulációk, mivel a motor mozgó alkatrészeinek inerciái nem álltak rendelkezésre. A dinamikus viselkedés fékpadi lett megvizsgálva a feltöltő kiválasztása után. A turbófeltöltő használata miatt a motor kompresszió viszonyát csökkenteni kellett a kopogásos égés elkerülése érdekében. Szimulációk segítségével lett meghatározva 10:1 értékre. A 4. ábra szemlélteti az SK1 feltöltő kompresszor hatásfok jellegmezőjén a munkapontokat.



4. ábra: SK1 kompresszor hatásfok jellegmező munkapontjai

A fenti ábrán jól látható, hogy az alacsonyabb fordulatszámú munkapontok kis mértékben megközelítik a feltöltő pumpálási határát, de ez nem jelent veszélyt a működésére. A töltőnyomás szabályzás wastegate szelep segítségével valósul meg, amely a turbina oldalról a kipufogógáz többletet a kipufogórendszer további elemeihez továbbítja a turbinát kikerülve. A szabályzás referencia pontja a hengerfej szívócsatornája előtt található szívócső. A töltőnyomás 3500-5500 fordulat között 1.7 bar 5500-9500 fordulat között pedig 1.8 bar abszolút nyomás. A nyomásviszonyban megfigyelhető, hogy folyamatosan növekszik növekvő motor fordulatszám mellett, annak ellenére, hogy a töltőnyomás két lépésben állandó értékre van szabályozva. Ennek oka a feltöltő kompresszor oldala elé beépített szűkítő, amelyet a versenyszabályzat ír elő. A folyamatosan növekvő levegő tömegáram a szűkítő után csökkenő nyomást eredményez, amelyből adódik a feltöltő növekvő nyomásviszonya. Az alacsony motor fordulatszámú munkapontok kisebb hatásfokon üzemelnek, azonban ezekben a pontokban a motor keveset üzemel. Közepes és magas motorfordulatszámú munkapontok, amelyekben a motor valós körülmények között a legtöbbet üzemel. viszont magas hatásfokú zónákban helyezkednek el. Ennél a feltöltőnél a fordulatszám és légnyelési határnak nincs jelentősége. Összességében elmondható, hogy a vizsgált feltöltő megfelelően illeszkedik a motorra.

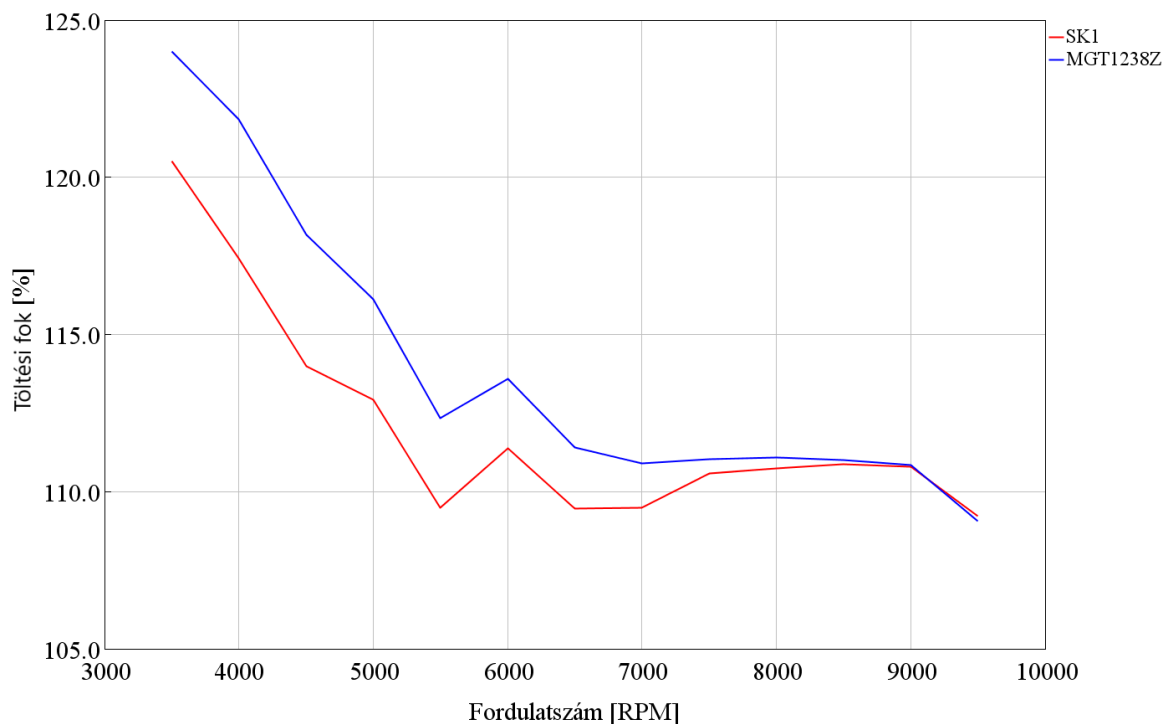
Az MGT1238 turbófeltöltőnek a kompresszor jellegmezője nagymértékű hasonlóságot mutat az SK1-hez viszonyítva, azonban turbina oldalon van nagyobb mértékű eltérés. Az 5. ábrán láthatóak a MGT1238Z kompresszor hatásfok jellegmezőjén a munkapontok.



5. ábra: MGT1238Z kompresszor hatásfok jellegző munkapontjai

Az MGT1238Z munkapontjain megfigyelhető, hogy az alacsony fordulatszámú munkapontok távolabb vannak a pumpálási határtól, mint a fentiekben vizsgált SK1 pontjai. Ennek a feltöltőnek a közepes hatásfokú zónái kisebb területet fednek le, de még így is hasonló hatásfokú pontokban üzemel. A nyomásviszony alakulásában hasonló tendencia figyelhető meg a két feltöltőnél. Az MGT1238Z esetében sincs jelentősége a fordulatszám és légnyelési határnak.

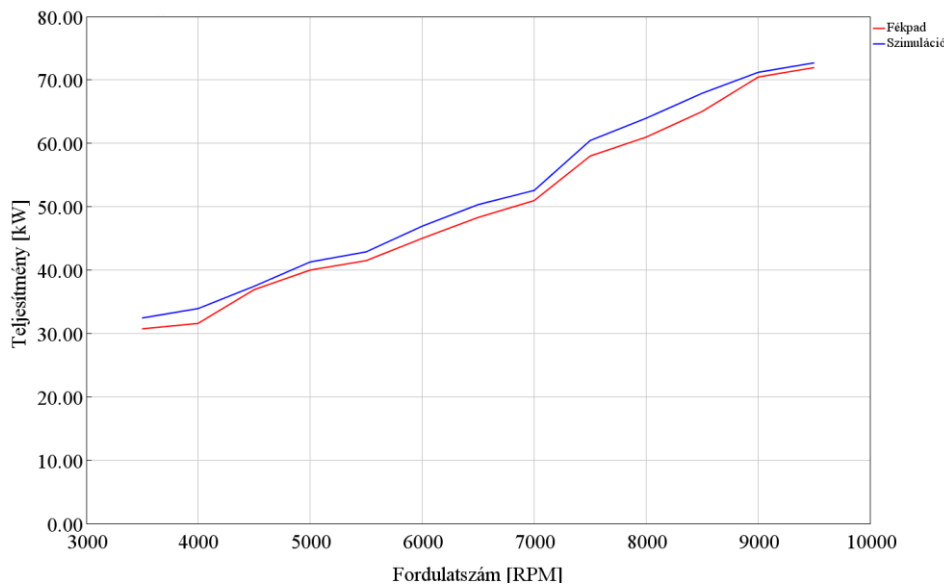
Az összehasonlításból nem egyértelműen eldönthető melyik feltöltő lenne alkalmasabb a motor számára. Ebből az következik, hogy az előzetes választás rendkívül jól sikerült, illetve, hogy további paraméterek összehasonlítására lesz szükség. Az égésfolyamat jellemzése a fejlesztési fázisban nem lehetséges, mivel az égés modellezéshez szükség van fékpádon mért adatokra, ezért egy olyan paramétert kell választani, amelyet nem, vagy csak kis mértékben befolyásol az égésfolyamat. Ez a paraméter a motor töltési fok, amely a motor tényleges tömegáramának és az elméleti tömegáramnak a hányadosa [2]. A szívószelep zárása után a hengerbe jutott levegő tömege befolyásolja a motor teljesítményét így ez a paraméter kiváló összehasonlítási alap. A 6. ábra a két különböző feltöltővel ellátott motor töltési fokát ábrázolja.



6. ábra: Töltési fok összehasonlítás

A töltési fok görbe jelentősen eltér a megszokottól, mivel a fordulatszám növelésével csökkenő tendenciát mutat. Ennek oka, hogy a szelepvezérlés konkrétan a szelepmelési görbék nem lettek megváltoztatva, viszont a motor karakterisztikája lényegesen megváltozott. Azonban a két motor azonos paraméterekkel üzemel leszámítva a feltöltőt. ezért ez a fajta összehasonlítás teljesen releváns. Annak ellenére, hogy a két feltöltő kompresszorának jellegmezője hasonló volt egymáshoz, a turbinák közti eltérés hatása jól látható a fenti ábrán. Az MGT1238Z feltöltő minden munkapontban jobban teljesít, leszámítva a maximális fordulatszámot. Ebből az összehasonlításból egyértelműen megállapítható, hogy az MGT1238Z feltöltő az optimális választás.

A turbófeltöltő kiválasztása után következett a fékpadi applikálás, majd a mérések. Ezek segítségével a modellt megfelelően lehet validálni, amely a következőkben prediktívvá teszi a modellt, illetve különböző paraméterek változtatására pontosabban fog reagálni. A 7. ábra szemlélteti a motor teljesítmény görbéjét összehasonlítva a szimulációs eredményeket a fékpadi mérésekkel.



7. ábra: Teljesítmény összehasonlítás

A fenti ábrán jól látható, hogy validálás után jól megközelíti a fékpadi mért teljesítményt. A vizsgált munkapontok közti eltérés minden esetben kisebb mint 5 százalék, figyelembe véve a fékpadi mérőrendszer hiba határát, amely $\pm 0.5\%$. Azonban az is észrevehető, hogy a szimulációból kapott teljesítmények minden esetben nagyobbak, mint a fékpadi mért értékek. Ebből adódóan a modellt további optimalizálása szükséges.

5. KONKLÚZIÓ

A projekt sikeres zárásával sikerült bebizonyítani, hogy önmagában szimulációs módszerekkel is lehet megfelelően motort fejleszteni. A szívómotor validált modelljéből sikeresen felépítésre került a turbófeltöltött motor virtuális modellje, amelyből sikeres összehasonlítás után kiválasztásra került az optimális turbófeltöltő. A fékpadi applikálás után könnyedén lehetett finom hangolni a modellt, amelynek minden munkapontja 5 százalékos hibahatáron belül maradt a fékpadi mérésekhez képest. A turbófeltöltött motor maximális teljesítménye 20 százalékos növekedést eredményezett, a szívómotor maximális teljesítményéhez viszonyítva szelepvezérlés módosítás nélkül.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Gy. Dezsényi, I. Emőd, L. Finichiu, *Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata*, Nemzeti Tankönyvkiadó Rt., 1989
- [2] J.B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, 1988
- [3] F. Cupo, *Modeling of Real Fuels and Knock Occurrence for an Effective 3D-CFD Virtual Engine Development*, Springer, DOI 10.1007/987-3-658-31628-0
- [4] I. Kalmár, Z. Stukovszky, *Belsőégésű motorok folyamatai*, BME Gépjárművek tanszék, 1998
- [5] Cooney, C., Worm, J., Michalek, D., & Naber, J. Wiebe Function Parameter Determination for Mass Fraction Burn Calculation in an Ethanol-Gasoline Fuelled SI Engine. In *Journal of KONES Powertrain and Transport* (Vol. 15, Issue 3), 2008