



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Repüléstudományi és Hajózási Tanszék
Tudományos Diákköri Konferencia 2023**

Haszongépjármű-szélturbina koncepciójának előzetes energetikai vizsgálata

Készítette:

Somogyi Bence, járműmérnöki szak (BSc)

Konzulens:

Dr. Veress Árpád

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	2
2.	Korábbi kutatások	4
3.	A kutatás módszerei	5
4.	Modell bemutatása	7
4.1.	Turbina	7
4.2.	Egyszerűsített haszonjármű modell	9
4.3.	A turbina és a jármű összeépítése	9
5.	Energia tárolása.....	10
6.	Elméleti számolások	11
7.	Szimuláció	12
7.1.	Hálózás (meshing).....	12
7.2.	Határréteg számolás	12
7.3.	Bemenő paraméterek megadása setupban	14
8.	Eredmények és kiértékelés	17
8.1.	Aerodinamikai fejlesztések	17
8.2.	Villamosenergia-termelés	22
8.3.	Értékelés és Jelentőség	22
8.4.	Előzetes megtérülés számítás.....	23
9.	Konklúzió és javaslatok	29
10.	Irodalomjegyzék	30
	Tudományos folyóiratcikkek	30
	Szabadalmak	30
	Weboldalak	31
	Letölthető elektronikus dokumentumok.....	32
	Ábrajegyzék	32

Jelölésjegyzék

Latin betűk, jelölések:

- A – terület [m^3]
- C_d – légellenállási együttható [-]
- C_f – fali csúsztató feszültség együttható
- d – téglatest magassága [m]
- F – erő [N]
- M – nyomaték [Nm]
- n – fordulatszám [1/min]
- P – teljesítmény [W]
- p – nyomás [Pa]
- R – egyetemes gázállandó [J/kgK]
- Re – Reynolds szám [-]
- T – hőmérséklet [K]
- t – hőmérséklet [$^{\circ}C$]
- t – idő [h]
- U_t – fali nyírási sebesség [m/s]
- v - jármű haladási sebessége; szél sebesség [km/h]
- y_H - határréteg első rétegének vastagsága [m]
- y_p - határréteg első cella magjának faltól vett távolsága [m]
- y^+ - dimenziótlán falvastagság [-]

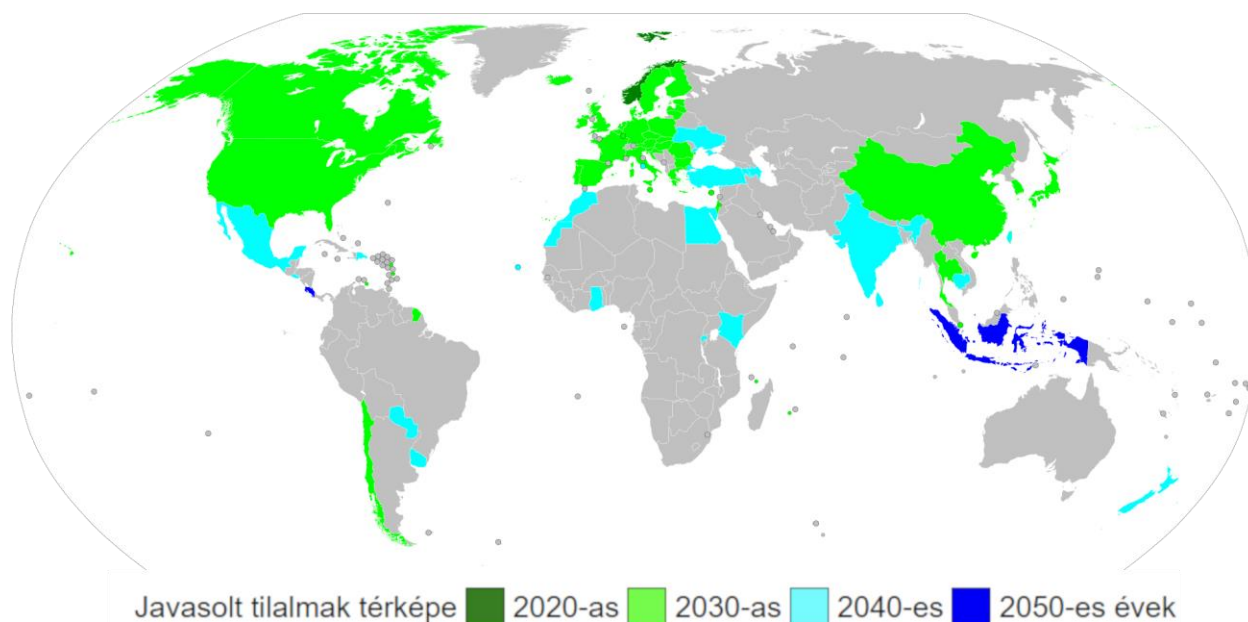
Görög betűk, jelölések:

- δ_{99} - határréteg vastagsága [m]
- μ – dinamikai viszkozitás [kg/ms]
- ν – kinematikai viszkozitás [m^2/s]
- ρ – sűrűség [kg/m^3]
- τ_w – fali csúsztató feszültség [kg/ms^2]
- ω – szögsebesség [rad/s]

1. Bevezetés

A közlekedés egy alapvető része mindennapi életünknek, de egyben hatalmas kihívásokat is rejteget a fenntarthatóság terén. A lejobban elterjedt közlekedési eszközök belső égési motort alkalmaznak a meghajtásukhoz. Az ilyen motorok működése során kibocsátott üvegházhatású gázok nemcsak károsak az emberi szervezetre, de jelentősen hozzájárulnak a klímaváltozáshoz, ráadásul az üzemanyagok kimerülése is egyre inkább fenyegetővé válik.

Mindezek a tényezők rávilágítanak a közlekedési szektor szükségességére, hogy alternatív, fenntartható megoldásokat találjon az energiahatékonyság és az üzemanyagfogyasztás csökkentése érdekében. Az elektromos járművek területén megfigyelhető áttörések következtében egyre növekszik útesteken számuk, ezzel együtt az igény az elektromos járművek hatótávjának növelésére és a hagyományos töltőinfrastruktúra függőségének csökkentésére. Ezt az átállást segíti az egyes EUs államok törvényükkel és pénzügyi ösztönzésükkel (adómentesség, visszatérítés, ingyenes parkolás és töltési lehetőségek) [18][19]. Jó néhány ország tervezi a jövőben a belső égésű motorok tilalmát (lásd 1. ábra).



1. ábra: Belső égésű motorok tilalmát tervező országok [8]

Mivel a közlekedés előreláthatólag még sokáig kulcsfontosságú marad az ember életében, és az akkumulátorhoz szükséges akkumulátorok alapanyagainak ellátása néha nem kiszámítható és olykor egyetlen disztributáló ország függvényévé válhat, hatékonyabb EV-kre (Electric Vehicle, elektromos jármű) van szükségünk.

Az Európában szállító teherautók által kibocsátott üvegházhatású gázok körülbelül a közúti közlekedés kibocsátásának 20%-ért felelősek [11]. Üzemük közben nagy entalpiával rendelkező közeg hirtelen neki ütközik a teherautó szerkezeti elemeinek nagy irányeltérítéssel. Ez nagy ellenállásérőt képez. Hogyha a rendszerbe integrálunk egy szélturbinát, ami hasznos energia termelése során elnyeli a munkavégző képességét a levegőnek, emellett a kisebb energia kisebb torlóponyi nyomása és áramvonalasabb geometriája kisebb ellenállásérőt jelenthet. Ezért ebben a kutatásban megvizsgáltam a szélturbina technológia integrációjának lehetőségét elektromos és hibrid járművekbe. Ez az innovatív megközelítés új perspektívát nyithat a fenntartható közlekedés terén, ahol a szélenergia felhasználása a járművek működése során hozzájárulhat a hatótávolság és hatékonyság növeléséhez.

Az előzetes kutatások eredményei arra utalnak, hogy a szélturbinák integrálása az elektromos járművekbe nyújthat előnyöket azonban még mindig fennállnak bizonyos kérdések, amelyeket alaposan meg kell vizsgálni annak érdekében, hogy valós előrelépést érjünk el ezen a területen.

2. Korábbi kutatások

Számos kísérlet volt szélenergiát felhasználó jármű építésére. 2008-ban a Stuttgart egyetem hallgatói építették a Ventomobilt, de ennek alakja nem hasonlítható teljesen egy mai gépjárműhöz, inkább egy három kerekű biciklihez. Azonban képes volt kifejezetten szél energián 'futni'. 2010-ben Amszterdamban épült Spirit nyerte meg a wind-powered járművek versenyét, a Racing Aeolus competition-t, ahol 80 km/h-ás szélben 24 km/h-val tudott haladni. Ugyanebben az évben a Blackbird a szél sebességének majdnem háromszorosát érte el. Ez még mindig nem döntötte meg a Greenbird 202.9 km/h-ás rekordját, ami a szélenergiával hajtott földi maximális sebességre vonatkozik. 2015-ben megjelent az Eolo nevű teljesen elektromos jármű, amely rendkívül különleges tulajdonsággal rendelkezik: két nagy csatorna a gépjármű elején, amelyek egy szélturbinát működtetnek. A jármű hatótávolsága 110 km, és ennek a hatótávolságnak az 8%-át a szélturbina biztosítja. [10]

A prototípusok mellett számos tudományos cikket is írtak a témáról. Amikor 2 mikró-szélturbinát 2 generátorral egy gépjármű csomagtartó hátuljára szerelnek fel [1], akkor 50 mph (80 km/h) sebesség fölött már 0.2A mérhető. 80 mph-nál (129 km/h) a maximum értékek, 0.65A és 18.91V, jelentek meg amikor 6 izzó hozzá volt kötve. CFD-vel (Computational Fluid Dynamics) is konfirmáltak egy elhanyagolható mennyiségű légellenállás erőt. Nagyobb jármű esetén a rakodóterére egy nagyobb turbina fér és már 200 W teljesítményre is képes 80km/h haladási sebességnél [2] HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine, vízszintes tengelyű szélturbina) esetén. VAWT (Vertical Axis Wind Turbine, függőleges tengelyű szélturbina) ugyanannyi tömeg és költség mellett nem képes hasonló nyomatékra a kisebb ütközési felülete miatt. Teljesen egy gépjármű tetején elhelyezkedő HAWT esetén 12.5 mérföld (20 km) után egy 10 12V elemből álló rendszerből 8 amperórával kevesebbet használt egy gépjármű, mint a töltés nélküli üzemiállapotában. [3] leírta, hogy bár egy kis mértékben növeli az ellenállás-erőt, ennél több energiát nyer. A hűtő mögé közvetlen is be lehet építeni egy 100 W-os turbínát. Ezzel bizonyítottan megnőtt a hatótáv 6,4 kilométerrel, és mivel a hűtő mögött van, nem okoz kedvezőtlen hatást az ellenállás szempontjából [4]. Több megújuló energiát nyerő rendszerrel is végeztek kutatást egyben. Solár PV (Photovoltaic), szél és extra tápegységgel ellátott gépjármű összesen 19.6 km távolságot nyert [5]. Ugyanígy hibrid rendszer esetén a plug-in hibrid elektromos jármű lehetséges utazási távolságán a szélturbina egyedül 6.3 km-t növelt [6].

Akik csak szimulációt végeztek azok a következő eredményekre jutottak. Napelemes rendszerrel és mikro turbinával 13.1V töltési feszültséget volt képes előállítani [7]. A töltés 2 m/s szélesség mellett kezdődött a turbina esetén. [8] számításai szerint érdemes a szélből energiát kinyerni főleg mozgó testekkel. Egyes vonalú egyenletes mozgást végző vonatok esetén egy év alatt 27299.69 kW-tal segítene az energia krízisen.

Még, ha a szabadalmakat is megvizsgáljuk, legjobb tudomásom szerint nem létezik olyan kialakítás, amely egy nagyobb jármű elé építene be járókereket energiatermelés céljából.

3. A kutatás módszerei

A vizsgálatokat először szimulációs szoftverekkel végeztem el. Az Ansys 2021 R2 szoftvert, és az azon belüli Fluid Flow CFX analízis rendszert használtam, ami rendkívül hatékonyan kezeli a turbulenciát és a forgás hatásait, lehetővé téve a pontos és megbízható szimulációkat. Széleskörűen alkalmazható mind állandósult, mind tranziens szimulációk esetén, és lehetővé teszi a valóság hű hűtadás és áramlás modellezését. Ezáltal hozzájárulhat egy turbina kellő pontosságú megtervezéséhez.

Az Ansys analízis rendszere megmutatja az áramvonalakat és nyomáseloszlásokat, amelyek segítenek az eredmények értelmezésében, illetve látványos és könnyen érthető ábrákat mutat a lefutott szimulációról. Továbbá számolt adatokat, mint ellenállásereket és nyomatékokat is képes megjeleníteni, amelyek alapján kvantitatív konklúziókat lehet levonni.

Az autópályán történő vezetést imitáljuk. Az első eset a Magyarországon (és legtöbb európai országban [20][21][22]) érvényes 80 km/h-ás sebességkorlátot, használja fel bemenő adatnak (lásd 2. ábra). Ez egy hasonlítási alapul szolgál. A második eset ugyanez, csak turbinával felszerelve a teherautó modell elejére.



2. ábra: Európai országok melyekben teherautóknak autópályán a sebességhatár 80km/h

A szimulációban egy egyszerűsített teherautó modellt használok, amit a Solid Edge 2023-ban készítetek elő és erre építem az áramot generáló turbínát. A szélturbina egy 1 méter átmérőjű felnagyított, leginkább turbófeltöltő turbínájára hasonlító járókerék-geometria, amibe axiálisan áramlik be a levegő és félaxiálisan hagyja el.

Célunk, olyan szélturbinát létrehozni, amely:

- jobb aerodinamikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint a jármű légellenállás szempontjából nem előnyös eleje. Ez megoldható homlokfelület növelése nélkül, ha egyből a teherautó elé rakjuk. Elterelje a beáramló levegőt úgy, hogy kikerülje a teherautót és így rá kisebb ellenállásérő hasson.
- tengelye forgatásával tudjon külön sebességváltó nélkül a hozzá kötött generátor áramot generálni.

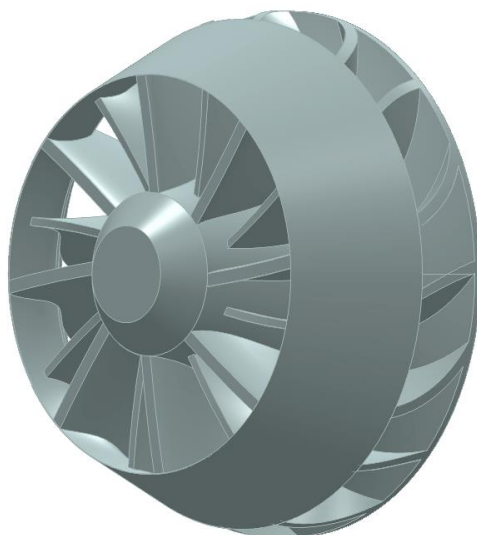
Az eredményeknél nem feltétlenül elvárás a kisebb ellenállásérő, de összességében hatékonyabb járművet várunk. A kiértékelésnél figyelembe kell venni a szélturbina nélküli alapesettől különböző ellenállásérőket. Ezentúl az áram generálásához a turbínára ható nyomaték

nagysága és turbina szögsebessége szükséges. A turbina szögsebessége és a turbinára ható nyomaték szorzatával a teljesítményt kiszámíthatjuk egyes jármű haladási sebességekre.

A szélturbina iparban első kérdés tervezésekor, hogy hova lehet rakni, hol fúj a legerősebb szél a napban leghosszabb ideig. Egyes területeken ezért egyáltalán nem alkalmaznak szélturbiákat akkor is, ha a világban a második legtöbbet kinyert megújuló energiaforrás a szél [16]. Ebben a bemutatott kialakításban nem kell ezzel foglalkozni ameddig halad a jármű.

4. Modell bemutatása

4.1. Turbina



3. ábra: Szimulációban felhasznált turbina modell

A turbina alapvetően nagyon hasonlít az autóiparban már nagy mértékben elterjedt turbinákhoz, amelyek például a turbótöltőkben megtalálhatók (3. ábra). Ezt már régóta alkalmazzák az autóiparban, és jelentős százalékban megtalálható modern gépjárművekben. Ez a modell két részből tevődik össze.

A ház, egyben aerodinamikus, egyben tereli a beáramló levegőt a megfelelő helyre, ezzel létrehozva áramcsöveket a lapátok között, ahol nyomáskülönbség alakul ki és kinyerhető lesz a levegő mozgási energiája. A forgó turbina-lapátok kialakításánál fontos, hogy azok végei a lehető legközelebb legyenek az álló házhoz, mivel ez növeli a hatékonyságot, és minimalizálja az energiavesztéseket a turbina működése során.

A ház külső felülete törés nélküli, eleje pedig letört, hogy lehető legzavartalanabban tudjon áramolni a levegő. Mivel ez a jármű elején van ez igen fontos kialakítási szempont. Ennek a résznek nem kell feltétlenül mechanikailag szilárdnak lennie, mivel ez a része nem felelős semmilyen további alkatrész hordozásáért, csak a levegőnek kell tudnia ellenállni elterelés közben. Ez nagyon fontos mert itt felhasználható költséghatékony és könnyű anyag. A súly végig központi kérdés.

A ház másik fontos feladata/szerepe, hogy a járműre való felszerelésre lehetőséget adjon, illetve biztosítson stabil szerkezetet a járókeréknek.

A járókerék a másik része a turbinának. A 16 hátra hajló lapátja (8 központi, 8 elosztó) úgy van kialakítva, hogy a levegő beleütközés során el tudja fordítani hirtelen irányváltoztatások nélkül, hiszen itt még mindig cél az alacsony ellenállásérő.

Elosztó lapátok használatának célja a légáram szabályozása és a járókerék hatékonyságának növelése. Az ilyen lapátok elrendezése növeli az áramlási sebességet és csökkenti az energiaveszteséget. Emellett segítik az áramlást az optimális irányba terelni, és minimalizálják a visszaverődéseket és turbulenciákat, csökkentve a vibrációt és a zajszintet még magas fordulatszámokon is. A kevés lapát kisebb súrlódási veszteséget jelent.

Még fontos megjegyezni, hogy a kilépő csatorna szándékosan úgy tereli a levegőt, hogy ne a teherautó nagy homlokfelületébe ütközzön bele, hanem kitérítse, hogy kikerülje a teherautót.

Ezzel a berendezéssel lehet megvalósítani azt, hogy egyrészt csökkenti az áramló közeg energiáját, ezáltal kisebb lesz az ellenállásérő, másrészt kitéríti az áramlást, áramvonalasítja a tompa test előtt, illetve még energiát is termel.

A járókeréknek dinamikusan kiegyensúlyozottnak kell lennie, hogy a turbina magas fordulatszámokon is hatékonyan működhessen károsodás és komolyabb lengések nélkül. A többi hasonló berendezésben előforduló lökéshullámokkal nem kell itt foglalkoznunk az alacsony, hangsebességtől távoli, sebességek miatt. A járókerék súlya számos dolgot meghatároz. Könnyebb járókerekek gyorsabban tudnak igazodni a szél sebességéhez és már alacsony sebességeknél elkezdni a forgást (cut-in speed, indítási sebesség). Ez a kialakítás hatékonyabb is, mint a nehéz járókerekek, mert ugyanazt az energiát tudja termelni kisebb súly mellett. A forgó berendezésnek a befoglaló méretei $\varnothing 1000 \times 455$. Térfogata $0,135 \text{ m}^3$.

Az áramlást nem befolyásoló és kívülről nem látható részek, mint a generátor, kábelek, elektronikai komponensek, tengely, csapágyak nem lettek bemodellezve. Majd a későbbiekben látható teherautó modell is egyszerűsítve lett. Ennek fő oka a pontosság. Napjainkban használt szimulációs szoftverek nem képesek a turbulens áramlás pontos útvonalának meghatározására. Mivel ez mindig pontatlanságot visz be a számolásba egyszerűsítésekkel átalakítottam az alkatrészeket, amelyeknél turbulens áramlás kialakulhat. Egyszerűsítés egy modellen belül lehet még más okok miatt is. A számolás eredményei nem befolyásoló részek megnövelhetik a számítási kapacitás szükségletet és a futtatási időt, kevesebb időt hagyva a probléma vizsgálatára. Mivel mi most főleg a gépjármű egy bizonyos részével foglalkozunk, más (esetek között nem változó) részeknél elvégezhetünk egyszerűsítéseket, amelyek ebben a kutatásban nem lényegesek.

4.2. Egyszerűsített haszonjármű modell

A kutatás haszongépjárműveket vizsgál. Ennek a fogalomnak a behatárolása nem egyszerű kérdés, még egyes jogszabályok is eltérően határozzák meg. Mivel léteznek már 5,5 méter hosszú kialakítások is [9], modellem hossza 6 m hosszú. Utánozva az európai stílusú teherautók [15] alakjait a teherautót egy téglatest fogja képviselni. Természetesen ez is egyszerűsítést jelent (visszapillantó tükrök törlése, lökhárító szimplifikálása), pontosabb modellek esetén azonban természetesen újra el kell végezni a számításokat.

4.3. A turbina és a jármű összeépítése

Az imént bemutatott két modellnek több egymáshoz képesti lehetséges elrendezési kombinációja van. Most azzal az esettel foglalkozom, amikor a turbina a teherautó előtt helyezkedik, mégpedig úgy, hogy a kettő között nincsen légrés. Ez a rendszerfelépítés megoldható napjainkban használt teherautókon (4. ábra).



4. ábra: Turbina elhelyezkedése haszonjárművön

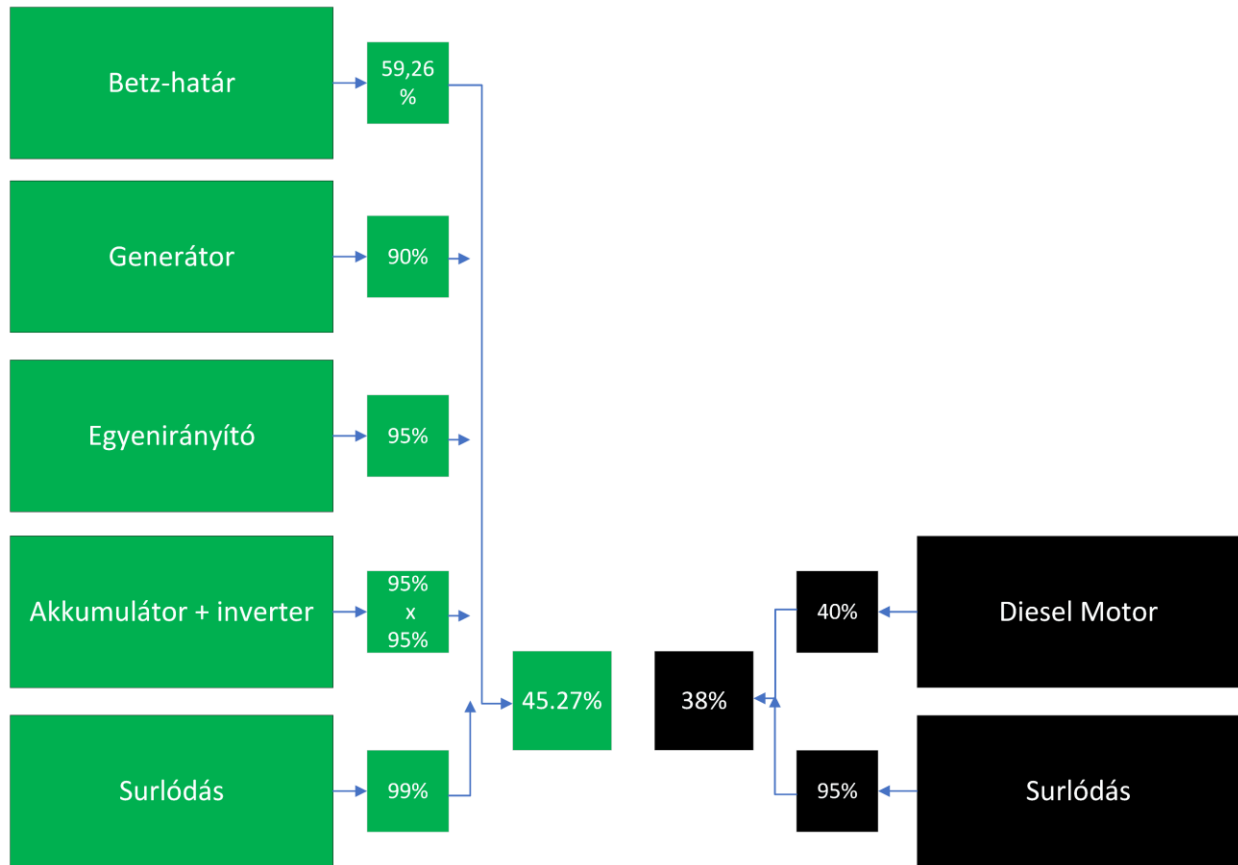
Láthatóan elférne még legalább egy turbina, de kutatásunk célja először az alapeistet megvizsgálni.

5. Energia tárolása

A járókereket egy tengely csatlakoztatja a generátorhoz. Mielőtt a generátor által termelt áramot el tudjuk tárolni és fel tudjuk használni megfelelő állapotba kell hozni a vele való akkumulátor töltése előtt. Mivel a generátor AC (Alternating Current, váltakozó áram) áramot képes előállítani, akkumulátor pedig DC (Direct Current, egyenáram) áramot tárol, szükség van egy átalakító eszközre, amely az AC áramot DC árammá alakítja. Erre a szándékra AC-DC egyenirányítót alkalmazunk.

Mivel a forgási sebesség nem lesz mindig azonos, a jármű sebesség ingadozásai miatt, töltésvezérlő egységet is kell alkalmazni az egyenirányító után a megfelelő működéshez. Ezenfelül szabályozza az energiaáramlást és megakadályozza az akkumulátor túltöltését és károsodását.

A valóságban mindegyik felhasznált komponens veszteséggel jár. Abból a célból, hogy össze tudjuk hasonlítani egy belső égésű motorral (5. ábra), az akkumulátor és az energia felhasználásakor releváns inverter hatásfokát is figyelembe kell vennünk [11].



6. ábra: Belső égésű gépjármű és kutatott jármű hatásfok összehasonlítása

6. Elméleti számolások

A szélenergia átalakító rendszer működési elve a szélenergia átalakítása elektromos energiává. A szél megforgatja a lapátokat, hogy forgó kinetikai energiát hozzon létre, amely utána egy generátort forgat meg, hogy áramot állítson elő. A szélből kivett teljesítmény:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * c_p ,$$

ahol ρ a levegő sűrűsége, $A=r^2*\pi$ a szélturbina lapátjai által átsöpört terület forgás közben (swept area), v a szél sebessége és c_p a turbina teljesítmény tényezője [27].

Forgó tömegek esetén használható teljesítményképlet:

$$P = M * \omega ,$$

ahol M a forgó részre ható nyomaték, $\omega=2*\pi*n$ a járókerék szögsebessége.

Mivel ennek a kutatásnak fő célja az, hogy légellenállás csökkenése mellett tudjunk energiát is kinyerni, célszerű a légellenállást kiszámolni:

$$F_{lég} = \frac{1}{2} * \rho * A * c_d * v^2,$$

ahol ρ a levegő sűrűsége, A a homlokfelület, c_d a légellenállási együttható, v a járműsebesség. Ezzel a számítással verifikálhatjuk a később bemutatott eredményeket. A számolással tudni fogjuk, hogy nagyságrendileg milyen értékeket kell várnunk a szimulációtól, hogy elfogadható legyen:

$$F_{lég} = \frac{1}{2} * 1,2 * (3 \times 3) * 0,8 * 22,222^2 \approx 2133N$$

Ezek szerint a turbinával még nem felszerelt teherautó légellenállása körülbelül 2480 N.

7. Szimuláció

7.1. Hálózás (meshing)

A már említett geometria importálása, és az enclosure (áramlási tér) elkészítése és illesztése a geometriához után el lehet kezdeni a hálózást (meshing). Ez egy kulcsfontosságú rész, mert nem megfelelő háló készítés esetén pontatlan eredményt kapunk. Minden felületre érdemes egy külön hálóméretet definiálni a komplexitás, mérete és fontossága alapján. A tartományok (domain) érintkezésüknél (interface) egyforma nagyságú felület (face sizing) hálót használok a minél pontosabb eredmény érdekében.

A test felülete mellett sok változás történhet rövid távolságon belül például leválás vagy súrlódás okozta sebességprofil változás. Alkalmazott ilyenkor egy infláció (inflation) parancs. Ez létrehoz a test felülete mellett sűrűbben elhelyezkedő hálókat szabályos szintekből felépülve. Ez a határréteg segít kiszámítani a pontos történéseket a levállások során a falhoz közeli tartományban.

7.2. Határréteg számolás

Az áramlási sebesség ismert.

$$v \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{v \left[\frac{km}{h} \right]}{3,6} = \frac{80}{3,6} = 22,222 \left[\frac{m}{s} \right]$$

A szimulációban a levegő hőmérséklete 25°C

$$T[K] = t[°C] + 273,15 = 25 + 273,15 = 298,15 K$$

A levegő sűrűsége (feltételezve, hogy a specifikus gázállandó $R=287 \text{ J/kgK}$)

$$\rho = \frac{p}{R * T} = \frac{101325}{287 \cdot 293,15} = 1,20433 \frac{kg}{m^3}$$

A levegő kinematikai viszkozitása (feltételezve, hogy a levegő dinamikai viszkozitása 25°C-on $\mu=0,00001849 \text{ kg/m*s}$):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1,849 * 10^{-5}}{1,20433} = 1,53529 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

A Reynolds-szám egy dimenzió nélküli szám, amelyet a folyadékok vagy gázok áramlásának jellemzésére használnak.

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu} = \frac{1,20433 * 22,222 * 6}{1,849 * 10^{-5}} = 8,68446 * 10^6$$

A fali csúsztató feszültség együtthatója [12] alapján:

$$C_f = [2 * \log_{10}(Re) - 0,65]^{-2,3} = [2 * \log_{10}(8684463,36) - 0,65]^{-2,3} = 0,00263392$$

A fallal párhuzamos fali csúsztató feszültség ilyenkor:

$$\begin{aligned} \tau_w &= 0,5 * C_f * \rho * v^2 = 0,5 * 2,63392 * 10^{-3} * 1,20433 * 22,222^2 \\ &= 0,783221 \frac{kg}{m * s^2} \end{aligned}$$

A fali nyírási sebesség:

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{0,783221}{1,20433}} = 0,806435 \frac{m}{s}$$

Dimenziótlan falvastagságnak az $y^+ = 100$ értéket vettem. Ennek és a fentiek ismeretében a határreteg első cella magjának és a fal távolsága:

$$y_p = \frac{y^+ * \nu}{U_\tau} = \frac{100 \cdot 1,53529 * 10^{-5}}{0,806435} = 1,9038 * 10^{-3} m$$

A határreteg első rétegének vastagsága egyenlő az első cella magasságával. Ezt adja a fent megkapott első cella magjának és a fal távolságának érték kétszerese:

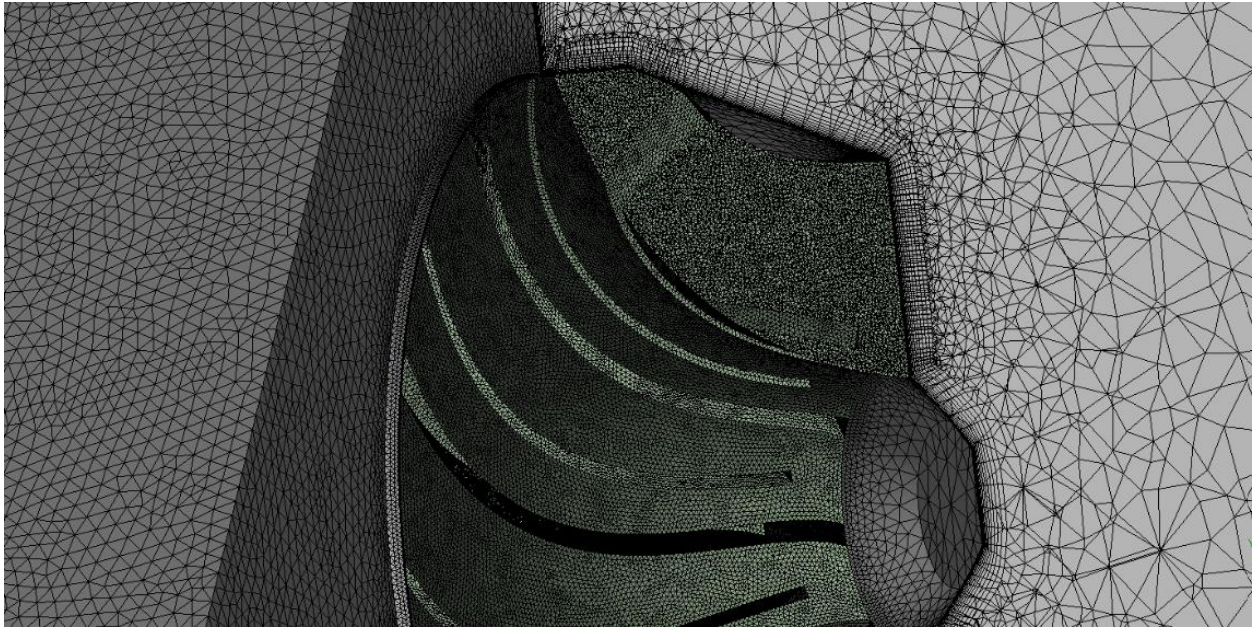
$$y_H = 2 * y_p = 2 * 1,9038 * 10^{-3} = 3,8076 * 10^{-3} m = 3,8076 mm$$

A határréteg vastagsága tapasztalati úton kapott összefüggéssel kiszámítható [13]:

$$\delta_{99} = \frac{4,91 * d}{\sqrt{Re}} = \frac{4,91 * 6}{\sqrt{8,68446 * 10^6}} = 9,99681 * 10^{-3} m = 9,99681 mm$$

Ezeket az értékeket ismerve ki lehet választani a szoftverben a megfelelő értékeket az első réteg magasságnak (first layer height), maximum rétegek számának (maximum number of layers), növekedési ütemnek (growth rate).

A határréteg a felületen végig állandó értékekkel van megadva. A háló a 6. ábrán látható.



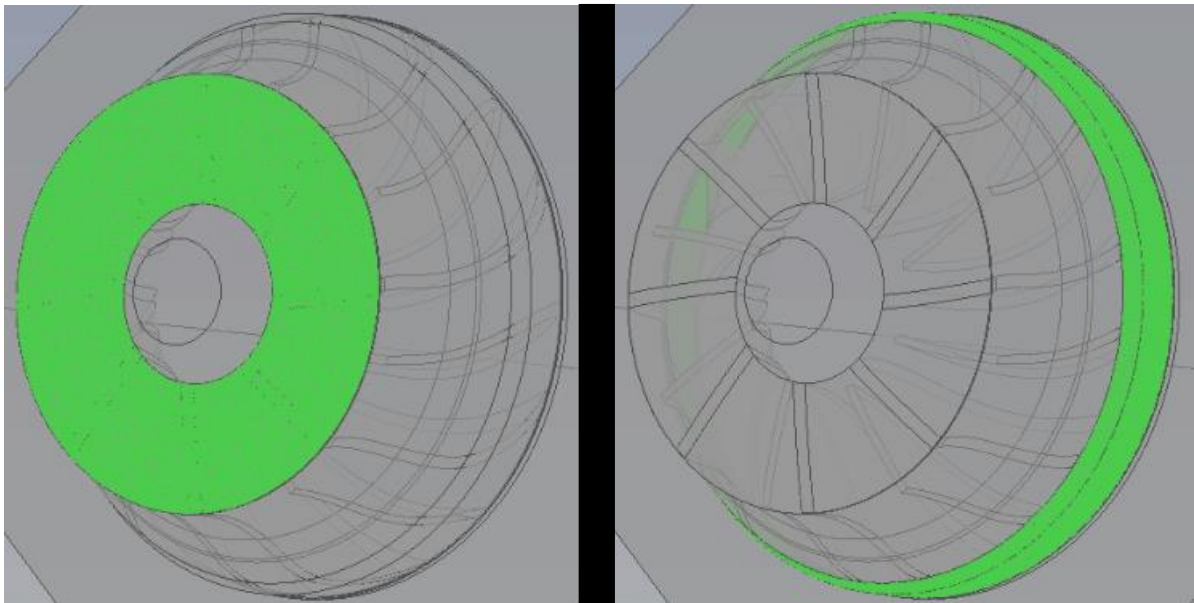
6. ábra: Turbina, jármű és áramlási tér hálója inflációval

7.3. Bemenő paraméterek megadása „setup”-ban

A setupban a korábban említett domainekeket és interfaceket illetve bemenő paramétereket állítjuk be. Domainből kettő van. Egyiket gyakran stationary (álló) domainnek nevezik el a statikus állapota miatt. Ennek ellentéte a rotating (forgó) domain, ami a turbina áramlási terét foglalja magába (lásd 7. ábra). Ez fog forogni és itt fog nyomatékhoz vezető erő hatni. Setup során nekünk kell a forgás szögsebességét beállítani. Mivel ezt még nem tudjuk és szorosan függ a geometriától, ezt egy módszerrel kell megoldani az Ansysen belül, amit paraméterezésnek hívnak. Ennek lényege, hogy elején egy tetszőleges (lehetőleg valós értékhez közeli becslőt) értéket veszek fel és szimulációt addig futtatjuk míg nulla lesz a rá

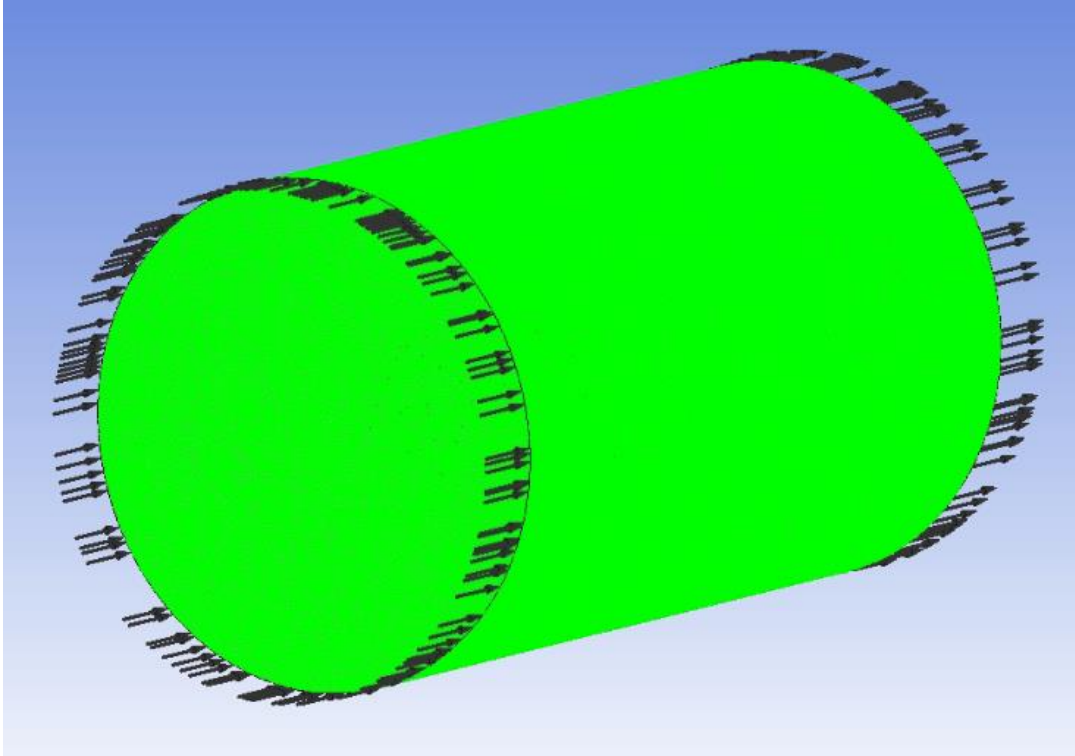
ható nyomaték. Ez azért működik, mert, ha túl nagy fordulatszámot állítunk be akkor ezt jelzi nekünk a program azzal, hogy negatív (alapértelmezett koordináta rendszer szerint) forgatónyomaték hat a turbina lapátokra, vagyis a szél próbálja lassítani. Ennek fordítottja amikor a lapátokra ható nyomaték pozitív. Ekkor még nem érte el a turbina az adott szélsébségre a szögsebességét, a szél gyorsítja. Amikor ez éppen egyensúlyban van, nem hat nyomaték a lapátokra, akkor forog a szélsébséghez tartozó fordulatszámmal, de ekkor természetesen nincs energiatermelés sem.

Ezt a folyamatot fel lehet gyorsítani paraméter definiálással, melyekre különböző értékeket állítunk be előre. Így nem kell megvárni és jelen lenni minden futtatás végén, hanem egyszer beütni az értékeket és hagyni futni a szoftvert, esetleg később korrigálni, ha szükséges.



7. Ábra: Rotating domain – stationary domain interface elől és oldalt

Az enclosure nem megfelelő definiálásával is nagyon pontatlan lehet a számolás. Ez adja meg hol áramolhat a közeg. Erre gyakran hivatkoznak számítási tartományként (computational domain) és a folyadékáramlás, hőátadás és egyéb jelenségek itt szimulálódnak. Megfelelő nagynak kell elkészíteni, hogy a külső falai ne zavarják az áramlást. Ezért elég nagy távolságot hagyok a testek és a külső fal között. Ezeket a setupban falként definiáltam.



8. ábra: Enclosure boundary condition-ekkel

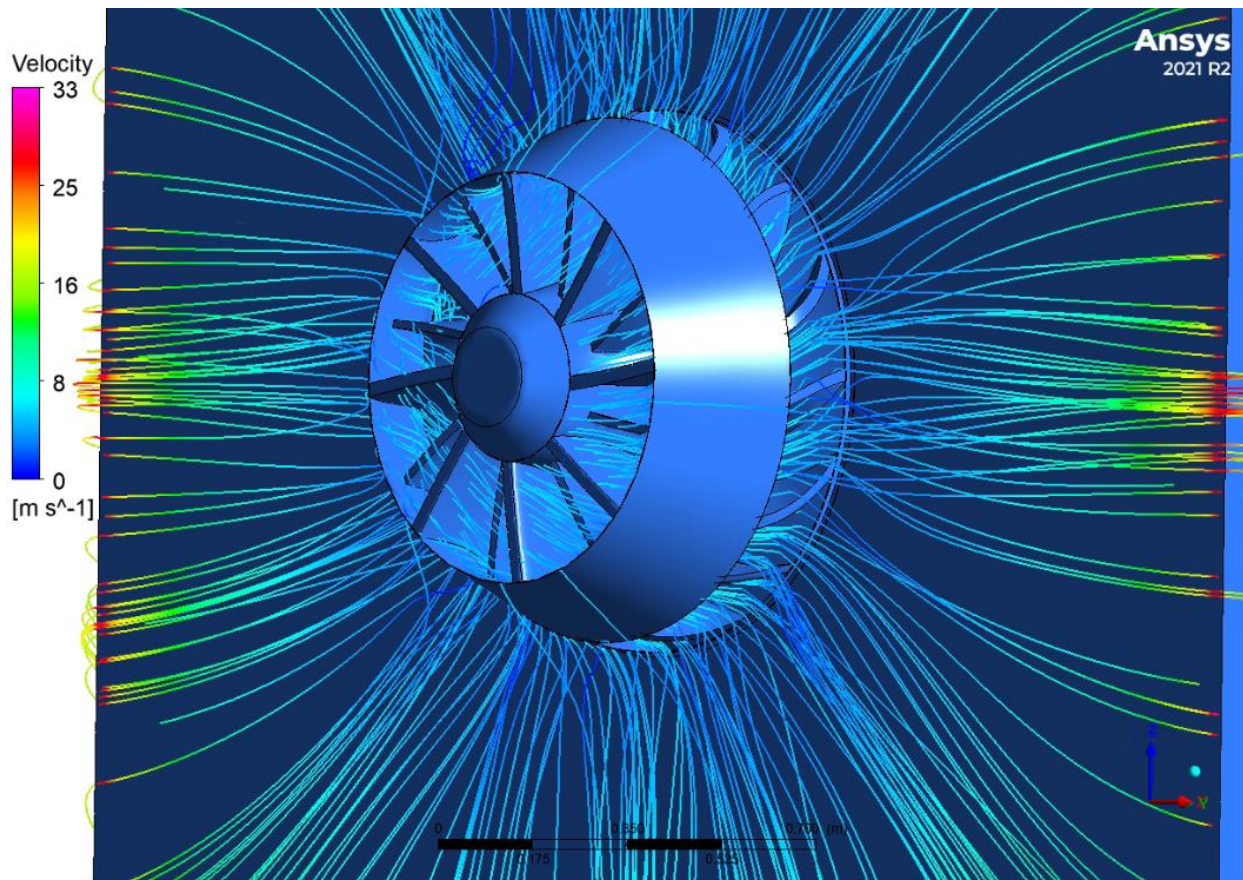
Az enclosurere kell definiálni a határ feltételeket (boundary conditions). Esetünkben ez az a beáramló (inlet) részhez tartozó sebesség nagysága és iránya, turbulenciája és statikus hőmérséklete. Kiáramló csatornához (outlet) a relatív nyomás értékét rendelhetjük. A setupban még meg kell adni az anyagjellemzőket vagy kiválasztani, hogy most levegővel szeretnénk számolni.

8. Eredmények és kiértékelés

A CFD szimuláció eredményei átfogó betekintést nyújtanak a szélgenerátor integráció hatására a teherautó aerodinamikájára és a becült elektromos energia-termelésre különböző feltételek mellett. Ez a szakasz részletesen ismerteti az eredményeket és azok jelentőségét.

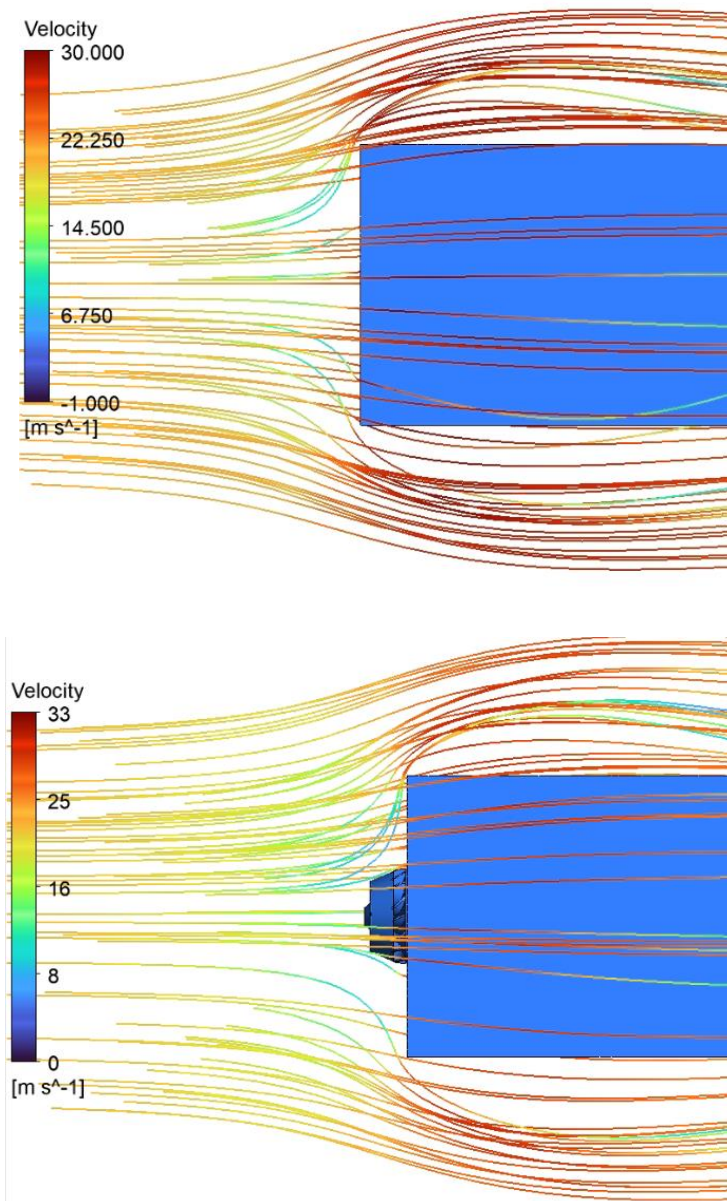
8.1. Aerodinamikai fejlesztések

A szélturbina integrálásának egyik célja a teherautó aerodinamikájának javítása volt, főleg a légellenállás csökkentésével. Ez azért fontos, mert a valós gépeknél megjelenő veszteségekkel való számolás után látjuk, hogy üzeme közben a jármű energiaforrása legnagyobb részét a levegő ellenállásának leküzdésére fordítja. A 9. ábrán látható, ahogyan az áramvonalak kilépnek a turbinából.

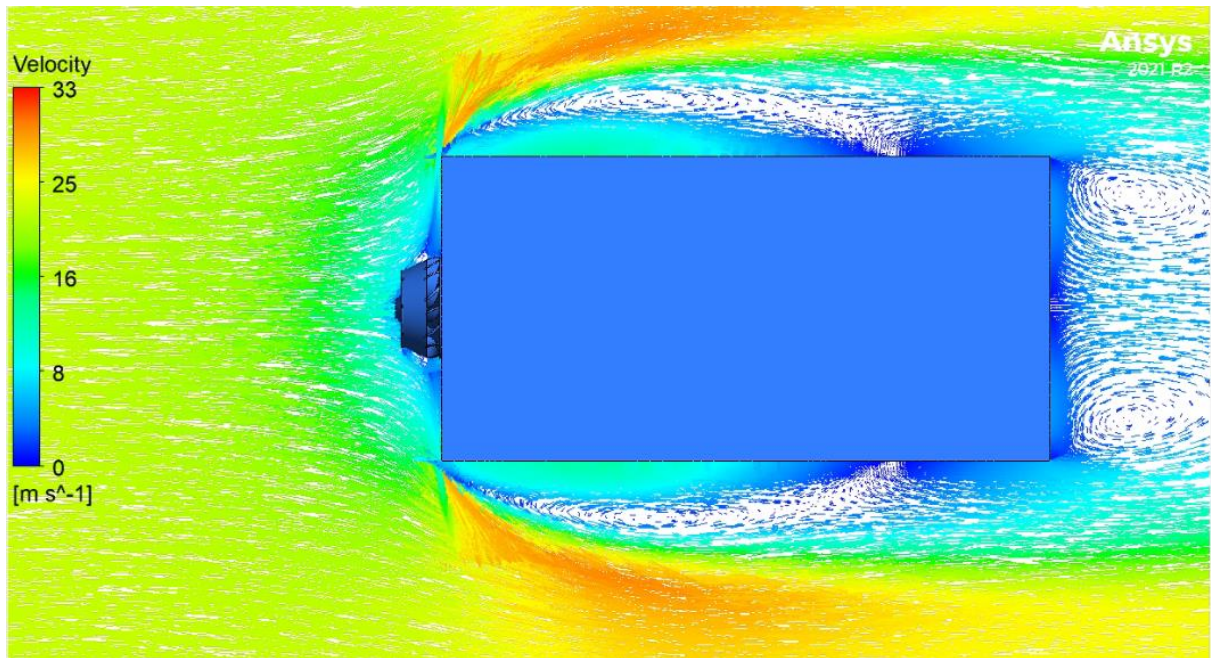
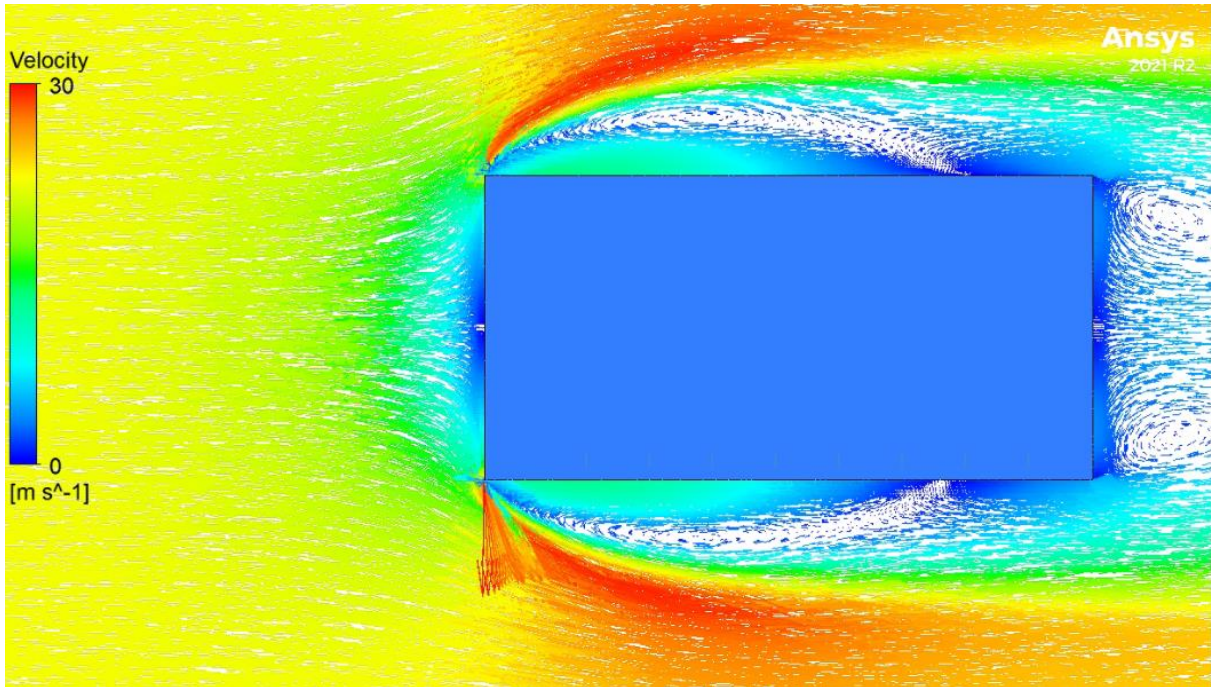


9. ábra: levegő kiáramlása a turbinából

A következő ábrák (10.-13. ábra) vizuális ábrázolást mutatnak a légáramlásról a teherautó körül a szélturbinával és anélkül. Az eredményekből megfigyelhető, hogy a szélturbina használata javította a teherautó aerodinamikai tulajdonságait. A szélturbina áramvonalas tervezése csökkentette a légellenállást (2480 N-ról lecsökkent 2464 N-ra) azáltal, hogy egy részt csökkentette az áramlás energiáját, másrészt átirányította a levegőáramot a jármű körül. Ennek eredményeként a légellenállási együttható csökkent, ami javulást eredményezett az összesített aerodinamikai hatékonyságban. Az áramlás balról jobbra halad.

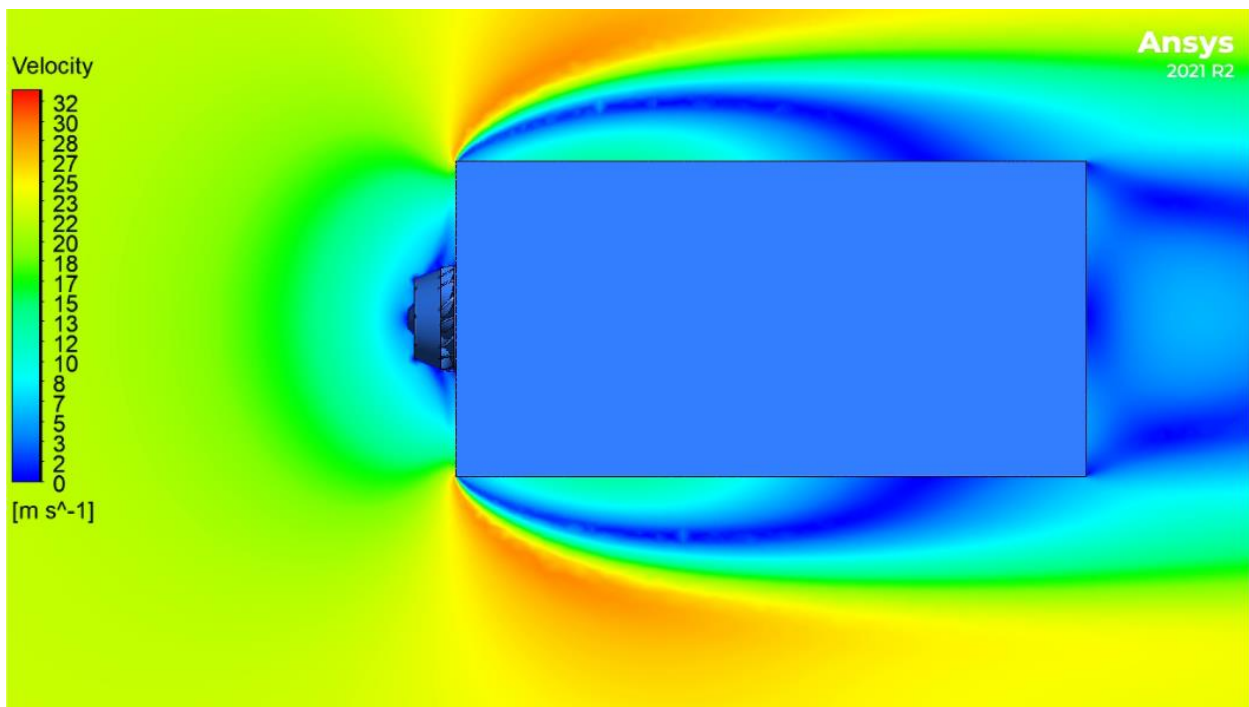
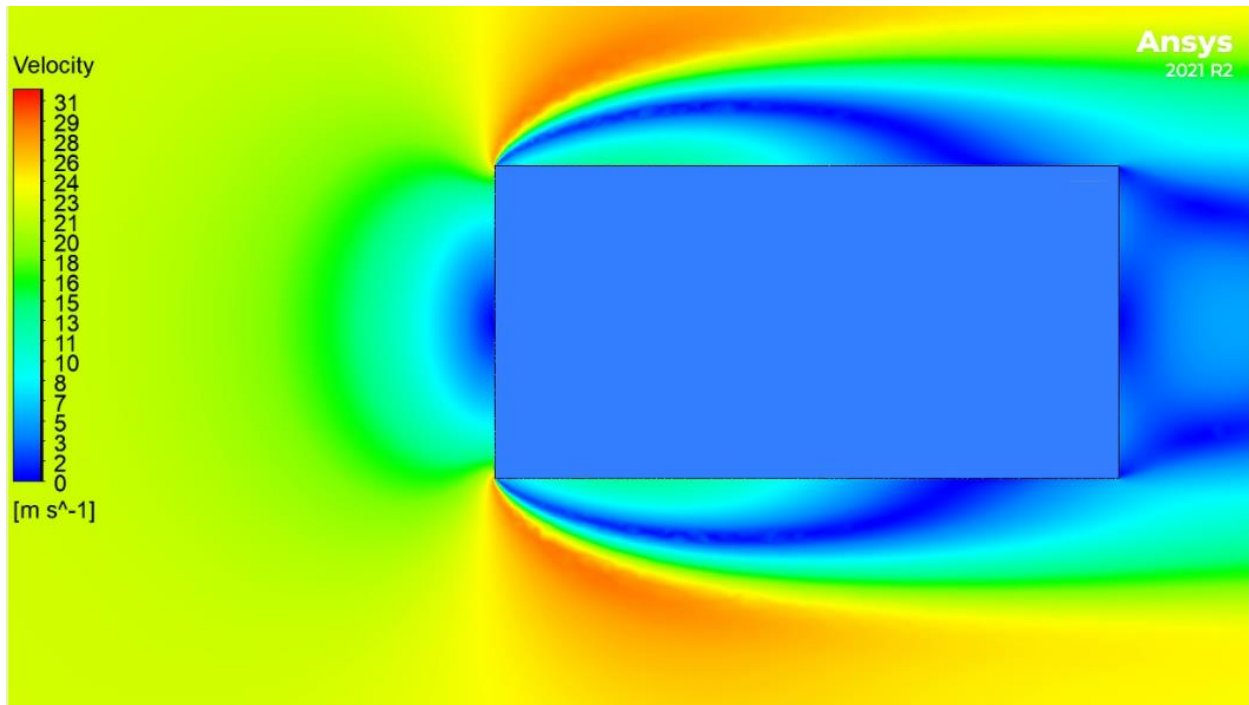


10. ábra: Áramlásvonalak összehasonlítás

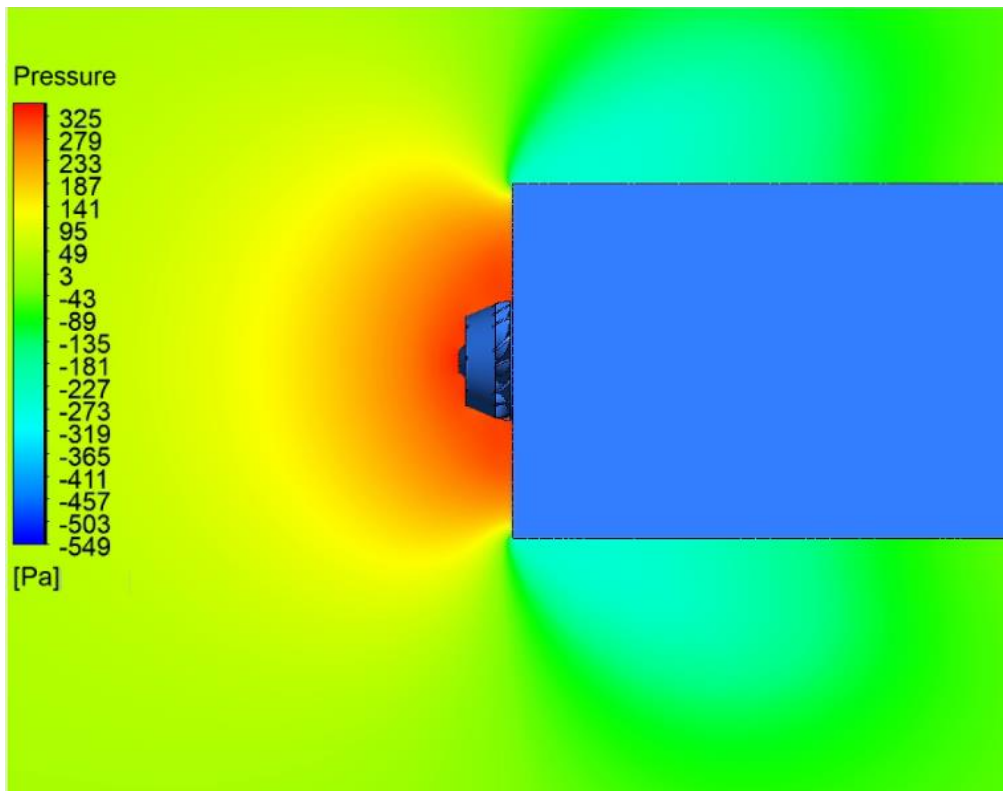
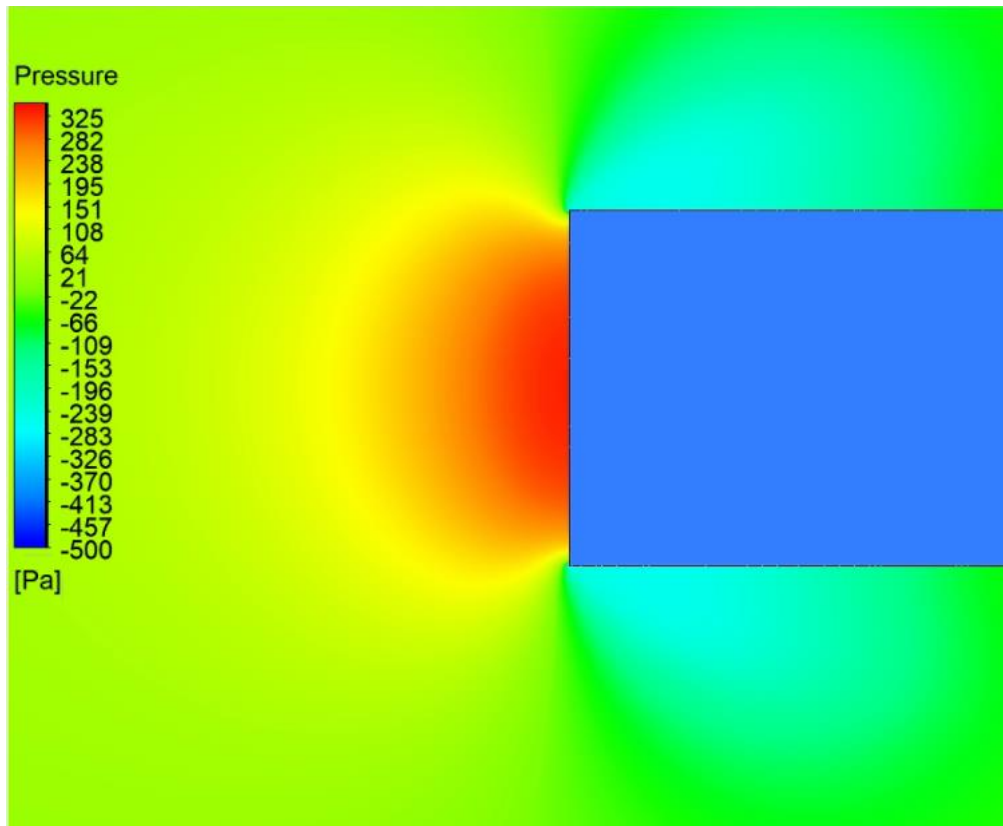


11. ábra: Sebesség vektorok összehasonlítása

Ahogy említettük, a szimuláció kimutatta a légellenállás csökkenését, ami üzemanyagfogyasztás-csökkenéshez vezet autópálya sebességeken. Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a szélturbina integrációja gyakorlati megoldást kínál az energiafogyasztás csökkentésére a hosszú távú autópályás közlekedés esetén.



12. ábra: Sebesség kontúr összehasonlítása



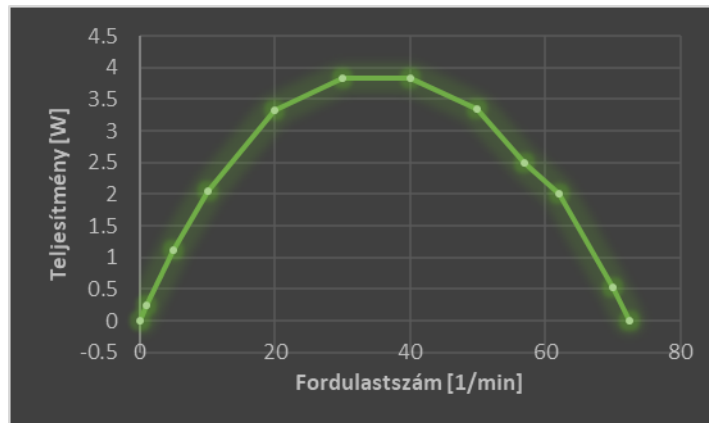
13. ábra: Nyomás kontúr összehasonlítása

8.2. Villamosenergia-termelés

Az aerodinamika javítása mellett a beépített szélturbina másik képességét is bemutatta, hogy működés során energiát tud termelni, bár ennek mértéke igen csekély volt a jelen esetben. A szélturbina lapátjai, főleg a jármű előrehaladásakor, forgásra kényszerülnek, átalakítva a kinetikai energiát elektromos energiává.

Az előállított elektromos energia mennyisége a jármű sebességétől és az aktuális szélviszonyoktól függ. Ez az energia egy beépített generátoron keresztül lett átalakítva és tárolva a teherautó akkumulátoraiban.

A 14. ábra bemutatja a járműsebesség és az elektromos energia-termelés közötti összefüggést. Egyértelmű, hogy ahogy a jármű sebessége növekedett, a szélgenerátor által kibocsátott elektromos teljesítmény is arányosan nőtt. 36 fordulat/perc után ez visszaesik.



14 ábra: Elektromos energia-termelés járműsebesség grafikon

A tárolt elektromos energia két fő célt szolgált. Először is, támogathatja a járművek kiegészítő rendszereit, mint például a világítást és a klímavezérlést, csökkentve a terhelést a fő akkumulátoron. Másodsor, a felesleges elektromos energia felhasználható az elektromos jármű fő akkumulátorának újra töltésére. Ez a regeneratív tulajdonság hatékonyan növelheti a jármű hatótávolságát az autópályavezetés tipikus körülményei között.

8.3. Értékelés és Jelentőség

A CFD szimuláció eredményei előzetesen alátámasztották, hogy a szélturbinák integrálásának lehet életképesége a teherautókon. Az aerodinamikai javulások, ideértve a légellenállás

csökkenést és az energiaforrás fogyasztás csökkenését, hangsúlyozzák a működési költségek és a szén-dioxid kibocsátás csökkentésének potenciálját a hosszútávú teherautózási üzletágban.

Emellett a beépített szélturbina elektromos energiatermelő képessége egyedi megoldást kínál az elektromos teherautók hatékonyságának és hatótávolságának növelésére. Az előállított további elektromos energia nemcsak a járműrendszereket támogatja, hanem hozzájárul az újra töltési gyakoriság és kiesési idő csökkentéséhez, a fenntartható közlekedés előmozdításához.

Ezen kutatás eredményeinek jelentős következményei vannak a közlekedési iparág számára, különösen a fenntarthatóság és az energiatakarékosság szempontjából. További, pontosabb számítások, valós, javított geometria alkalmazása és optimalizálás, illetve a számítási eredmények mérésrel történő igazolása mindenképpen szükséges, annak ellenére, hogy az elsődleges CFD szimulációk ígéretes eredményt mutatnak a szélturbinákkal integrált haszongépjárművek esetén.

8.4. Előzetes megtérülés számítás

A következő számításokhoz egy korszerű BEV teherautó adatait használjuk fel, a Scania 4x2 Battery electric truckot. [23] Gyártója szerint 100% kibocsátásmentes működésű PTO (Power Take-off) rendszerét is beleértve. Reklámozott akkumulátor kapacitása 624 kWh, hatótávolsága 350 kilométer utánfutóval 40 tonnás össztömeggel. Teljes töltése CCS2 375 kW-tal megoldható 90 perc alatt.

Elosztva az akkumulátor kapacitását a jármű hatótávjával megadja hány kWh-át használ fel kilométerenként.

$$\frac{624 \text{ [kWh]}}{350 \text{ [km]}} = 1,78 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right]$$

Többlet hatótávolság kifejezetten légellenállás különbségből:

$$\begin{aligned} & \frac{\text{légellenállás turbina nélkül [N]}}{\text{légellenállás turbinával [N]}} * \text{eredeti hatótáv [km]} - \text{eredeti hatótáv [km]} \\ & = \frac{2480}{2464} * 350 - 350 = 2,2 \text{ [km]} \end{aligned}$$

Turbina nélküli eset

Egy évben felhasznált kWh:

$$\frac{\text{éves teherautó megtett távolsága} \left[\frac{km}{\text{év}} \right]}{\text{eredeti hatótávolság} [km]} \\ = \frac{160\,000}{350} = 457,14 \left[\frac{1}{\text{év}} \right] \text{töltési ciklus}$$

$$\text{töltési ciklusok száma évente} \left[\frac{1}{\text{év}} \right] * \text{akkumulátor kapacitás} [kWh] \\ = 457,17 * 624 = 285\,257,14 \left[\frac{kWh}{\text{év}} \right]$$

Egy évben, kizárólag a töltésre költött pénzösszeg:

$$\text{Egy évben felhasznált áram} \left[\frac{kWh}{\text{év}} \right] * \text{áram ára} \left[\frac{Ft}{kWh} \right] \\ = 285\,257,14 * 15 = 4\,278\,857 \left[\frac{Ft}{\text{év}} \right]$$

A teherautó élettartalmával megszorozva 64 182 857 Ft

Töltés miatt kiesési idő évente:

$$\text{töltési ciklusok száma évente} \left[\frac{1}{\text{év}} \right] * \text{töltési idő ciklusonként} [h] \\ = 457,17 * 1,5 = 685,7 [h]$$

Turbinával felszerelt eset

Egy évben felhasznált kWh:

$$\frac{\text{éves teherautó megtett távolsága} \left[\frac{km}{év} \right]}{\text{légellenállás különbségből új hatótávolság} [km]} \\ = \frac{160\,000}{352,27} = 454,19 \left[\frac{1}{év} \right] \text{töltési ciklus}$$

$$\text{töltési ciklusok száma évente} \left[\frac{1}{év} \right] * \text{akkumulátor kapacitás} [kWh] \\ = 454,19 * 624 = 283\,416,77 \left[\frac{kWh}{év} \right]$$

Egy évben, kizárólag a töltésre költött pénzösszeg:

$$\text{Egy évben felhasznált áram} \left[\frac{kWh}{év} \right] * \text{áram ára} \left[\frac{Ft}{kWh} \right] \\ = 283\,416,77 * 15 = 4\,251\,252 \left[\frac{Ft}{év} \right]$$

A teherautó élettartalmával megszorozva 63 768 774 Ft

Töltés miatt kiesési idő évente:

$$\text{töltési ciklusok száma évente} \left[\frac{1}{év} \right] * \text{töltési idő ciklusonként} [h] \\ = 454,19 * 1,5 = 681,29 [h]$$

Egy teherautó körülbelül 160000 kilométert tesz meg évente [24]. Ez több mint 457 töltést jelent évente a cégnek. A több mint 685 óra kiesési idő mellett, amikor töltésre van kényszerítve a cég és nem tud hasznot termelni gépjárművével, negyed millió kW-ot kell biztosítania a töltésre. Egy akkumulátor csak egy véges számú töltési ciklust bír nullától száz százalékig, sőt kapacitását is csökkentheti. Ezért ezt praktikus minimalizálni. [25] Egy teherautó élettartalma körülbelül 15 év. A teherautó várt élettartalma alatt, egyedül a töltésre egy cégnek 64 000 000.- HUF-hoz közeli összeget kell kiadnia a jelen számítás szerint. Innen látható mennyire fontos az energia takarékosabb vezetési lehetősége, továbbá mekkora nagy lehetőség van csökkenteni ezt a végösszeget. Kis mértékben a légellenállási együttható csökkentésével, és gördülési ellenállás

elhanyagolásával, közel fél millió forint (jelen esetben 414 083.- Ft) takarítható meg teherautónkként életük során.

Ennél még több megtakarításra is képes egy felhasználó a teherautó előtti szélturbina energiatermelési képességének köszönhetően.

Egy töltéssel eltölthető közlekedési idő:

$$\frac{\text{légellenállás különbségből új hatótávolság [km]}}{\text{sebességhatár } \left[\frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}$$

$$= \frac{352,27}{80} = 4,4 \text{ [h]}$$

Járókerék és egyben generátor teljesítménye:

$$P = M \text{ [Nm]} * \omega \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$= 0,4 * 5,97 = 2,497 \text{ [W]}$$

Óránként leadott teljesítménye:

$$P \text{ [W]} * t \text{ [h]}$$

$$= 2,497 * 1 = 2,497 \text{ [Wh]} = 0,0025 \text{ [kWh]}$$

Egy út (egy töltés) alatt leadott teljesítmény:

$$P \text{ [kW]} * \text{egy töltéssel eltölthető közlekedési idő}$$

$$= 0,0025 * 4,4 = 0,011 \text{ [kWh]}$$

Egy út (egy töltés) alatt termelt többlet távolság:

$$\text{egy út alatt leadott teljesítmény [kWh] / teherautó tulajdonsága } \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right]$$

$$= 0,011 / 1,78 = 0,0062 \text{ [km]}$$

Új szükséges töltési idő évente:

$$\frac{\text{éves teherautó megtett távolsága} \left[\frac{km}{\text{év}} \right]}{\text{eredeti hatótávolság} [km] + \text{Egy út alatt termelt többlet távolság} [km]}$$

$$= \frac{160\,000}{350 + 0,0062} = 457,13 \left[\frac{1}{\text{év}} \right] \text{töltési ciklus}$$

$$\text{töltési ciklusok száma évente} \left[\frac{1}{\text{év}} \right] * \text{akkumulátor kapacitás} [kWh]$$

$$= 457,13 * 624 = 285\,252 \left[\frac{kWh}{\text{év}} \right]$$

Egy évben, kizárólag a töltésre költött pénzösszeg:

$$\text{Egy évben felhasznált áram} \left[\frac{kWh}{\text{év}} \right] * \text{áram ára} \left[\frac{Ft}{kWh} \right]$$

$$= 285\,252 * 15 = 4\,278\,782 \left[\frac{Ft}{\text{év}} \right]$$

A teherautó élettartalmával megszorozva 64 181 726 Ft

Töltés miatt kiesési idő évente:

$$\text{töltési ciklusok száma évente} \left[\frac{1}{\text{év}} \right] * \text{töltési idő ciklusonként} [h]$$

$$= 457,13 * 1,5 = 685,7 [h]$$

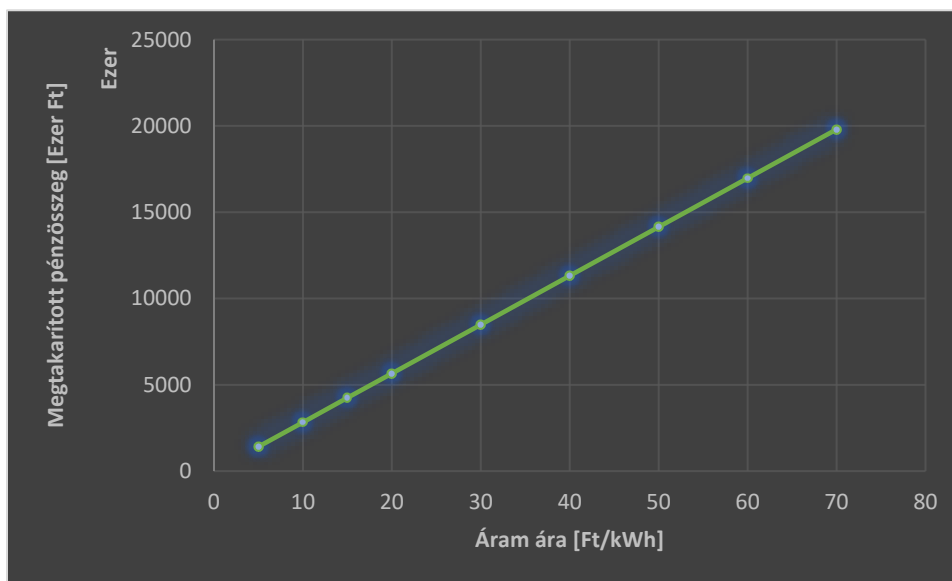
Mivel egy töltéssel kb. 4,4 óráig tudunk haladni, ezért ennyi idő áll rendelkezésre a turbina részére, hogy töltsen az akkumulátorokat. Kifejezetten az újra töltésből származó megtakarított pénzösszeg 1.131.- Ft jelenen esetben a teljes élettartam alatt, ami kevésnek tűnik, de fontos megjegyezni, hogy ez egy előzetes vizsgálat, amelyben nem történt optimalizálás. Ez által a töltőnél szükséges eltöltött idő rövidíthető és használható fel munkavégzésre. Egyedül a javított áramlási tulajdonság felelős több mint 0,08%-kal nagyobb hatótávolságért. De, mint már bemutattam, az idő nyereségből is származik emelt hatótávolsági érték, hiszen nem a töltőnél kell parkolnia a járműnek.

A számolások során észrevehető, hogy a profitált összeg számottevő része a berendezés aerodinamikusabb alakjából fakad. Hogyha a generált és légellenállás csökkentéséből megtakarított áramot összeadjuk kijön, hogy majdnem fél millió forint takarítható meg. A számolásból hiányzik a felszabadított idő, de mivel változóan használható fel ez az idő ez a kutatás ezzel most nem számít pontos értéket. A számítási eredmények összefoglalása a 15. ábrán látható táblázatban található.

	Turbina nélkül	Turbinával	Különbség
Adatok	624 kWh; 350 km; 1.78 kWh/km; 15 Ft/kWh		
Légellenállás [N]	2 480	2 464	-16
Légellenállásból			
Hatótávolság [km]	350	352,27	+2,27
Töltési ciklus jármű életében [db]	6 857,14	6 812,9	-44,24
Kiesési idő jármű életében [h]	10 285,71	10 219,35	-66,36
Kifejezetten töltésre költött összeg [Ft]	64 182 857,1	60 354 453,7	-3 828 403,46
Generált áramból			
Hatótávolság [km]	350	350	0
Töltési ciklus jármű életében [db]	6 857,14	6 857,02	-0,12
Kiesési idő jármű életében [h]	10 285,71	10 285,53	-0,18
Kifejezetten töltésre költött összeg [Ft]	64 182 857	64 181 726	-1 130,88
Osszes megtakarított pénzösszeg [Ft]			415 214

15. ábra: Összefoglaló táblázat

A fenti számolás egy idealizált eset, amely nem veszi figyelembe az emelkedőkből vagy környezettől és talaj minőségtől eredő ellenállásokat vagy a használt berendezések hatásfokait. A



16. ábra: Áram ára megtakarított pénzösszeg grafikon

számolási képletekben található áram ára a cikk írásakor vett adat [26] ami változhat. Az értékek a vezetés során kapott átlagok. A turbina mérete szándékosan kicsi, hogy a vezetőt még véletlenül se zavarja vezetés közben. Dupla ekkora turbina megfelelő elhelyezéssel se zavarná a sofőr látását és esetekben nagyobb nyomatékot és kevesebb ellenállásért szolgáltat. A

A 16. ábra látható az elektromos áram kilowattóránkénti költsége, illetve az ehhez tartozó megtakarítás.

9. Konklúzió és javaslatok

Az eredmények mutatják, hogy tervezett módon működik a teherautó elejére helyezett turbina. A turbina eltereli a levegőt olyan módon, hogy a teljes rendszerre kevesebb ellenállás ér, mint a turbina nélküli esetben. Ezenfelül a levegő megforgatja a járókereket, ezzel energiát termel.

A kettő kitzűzött cél kielégítésével kimondhatjuk, hogy az elektromos haszonjárművek (vagy PHEV, HEV, EREV, FCEV) nemcsak hosszabb táv teljesítésére képesek megállás és hálózati újra

töltés nélkül, hanem újra töltéskor kevesebb áramot kell felvenniük a hálózathoz, a vállalatnak költséget megtakarítva.

A kutatás csak az alapesetet vizsgálta, hogy érdemes-e ezzel a jövőben foglalkozni. További számításokra és mérésekre van szükség ahhoz, hogy meg lehessen bizonyosodni a módszer működőképességéről. Továbbá, a turbina bekerülési és üzemeltetési költségét is meg kell határozni később a befektetés megtérülésének meghatározására.

Ahogy már fent említettem lehet több turbinát is alkalmazni ugyanazon a járművön. Ezek elrendezéseinek több variációja van. Ezentúl egy turbinát is lehet máshogyan elhelyezni a jármű elé, messzebb a lökhárítótól vagy a másik irány esetében, a lökhárító szellőző nyílásai és a hűtőtest közé.

Ez a kutatási cikk még egy érvet ad az elektromos járművek átállása mellett. Ahogy egyre több járműgyártó tervezi, hogyan lehet megvalósítani egy modern elektromos teherautót az üvegházhatású gázok kibocsátási célok eléréséhez [14][17], egyre több helyen befolyásolhatja pozitívan ez az ötlet a világot.

10. Irodalomjegyzék

Tudományos folyóiratcikkek:

[1] Chaudhary, Y.; Bangi, V.; Guduru, R.; Aung, K.; Reddy, G. **Preliminary Investigation on Generation of Electricity Using Micro Wind Turbines Placed on A Car.** *Int. J. Renew. Energy Dev.* 2017, 6, 75–81. <https://media.neliti.com/media/publications/135725-EN-preliminary-investigation-on-generation.pdf>

[2] Awal, M.R.; Jusoh, M.; Sakib, M.N.; Hossain, F.S.; Beson, M.R.C.; Aljunid, S.A. **Design and implementation of vehicle mounted wind turbine.** *ARN J. Eng. Appl. Sci.* 2015, 10, 8699–8860. http://www.arnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2015/jeas_1015_2783.pdf

[6] Fathabadi, H. **Possibility of Utilizing Wind Turbine to Recover a Portion of the Kinetic Energy Losses of a Car.** *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2019, 68, 8663–8670. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8777177>

[7] *A. Saleem, Nain Liu, Huang Junjie, A. Iqbal, Muhammad Aftab Hayyat* **A Novel Based Wind/Solar Electric Vehicles for Green and Clean Environment**
https://www.researchgate.net/publication/348239259_A_Novel_Based_WindSolar_Electric_Vehicles_for_Green_and_Clean_Environment

[10] *Francisco Rubio, C. Llopis-Alberto* **Analysis of the Use of a Wind Turbine as an Energy Recovery Device in Transport Systems.** *Instituto de Ingeniería Mecánica y Biomecánica, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. 15 September 2021.*
<https://doi.org/10.3390/math9182265>

[11] *Thomas Earl, Lucien Mathieu, Stef Cornelis, Samuel Kenny, Carlos Calvo Ambel, James Nix* **Analysis of long haul battery electric trucks in EU** *European Federation for Transport and Environment (T&E). Graz, 17-18 May 2018*

Szabadalmak:

[3] *Damron, P.C.; Damron, J.L.; Philip, C.D.; Jane, L.* **Propeller Wind Charging System for Electrical Vehicle.** *U.S. Patent No. 5,920,127, 6 July 1999.*
<https://patents.justia.com/patent/5920127>

[4] *Yu, X.* **Portable Wind Power Apparatus for Electric Vehicles.** *U.S. Patent No. 6,897,575,24 May 2005.*
[https://patents.google.com/patent/US6897575B1/en?q=\(Portable+Wind+Power+Apparatus+for+Electric+Vehicles\)&inventor=Yu%2c+X.&scholar&oq=Yu%2c+X.+Portable+Wind+Power+Apparatus+for+Electric+Vehicles](https://patents.google.com/patent/US6897575B1/en?q=(Portable+Wind+Power+Apparatus+for+Electric+Vehicles)&inventor=Yu%2c+X.&scholar&oq=Yu%2c+X.+Portable+Wind+Power+Apparatus+for+Electric+Vehicles)

[5] *Tirapu-Manero, J.R.* **Generador eólico para vehículos.** *Patent U 201000802.*
<https://patents.google.com/patent/ES104375U/es>

[27] *Tóth Bertold: Függőleges tengelyű szélturbina egyszerűsített numerikus áramlástanai vizsgálata, BSc Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, Repüléstudományi és Hajózási Tanszék, 2023*

Weboldalak:

- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-out_of_fossil_fuel_vehicles (hozzáférés: 2023.11.07)
- [12] https://www.cfd-online.com/Wiki/Skin_friction_coefficient (hozzáférés: 2023.11.07)
- [13] <https://www.fluidmechanics101.com/pages/tools.html> (hozzáférés: 2023.11.07)
- [14] <https://ratings.freightwaves.com/upcoming-electric-semi-truck-companies/>
(hozzáférés: 2023.11.07)
- [16] <https://education.nationalgeographic.org/resource/electricity-generation-renewable-energy-sources/> (hozzáférés: 2023.11.07)
- [17] https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/electric-truck-market-221011937.html?gclid=CjwKCAjws9ipBhB1EiwAccEi1GyWnNoRLEo1BXhkUibn7tmRJuS_HrDj2en5OKCF99DdnRxUIKrvvhBoCqakQAvD_BwE (hozzáférés: 2023.11.07)
- [18] <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/paris-agreement/>
(hozzáférés: 2023.11.07)
- [19] https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en (hozzáférés: 2023.11.07)
- [20] <https://trip.studentnews.eu/s/4086/77068-Heavy-goods-vehicles-over-35-t-standard-speeds-limits-in-Europe.htm> (hozzáférés: 2023.11.07)
- [21] <https://forum.truckersmp.com/index.php?/topic/101802-european-truck-speed-limits-overview-revival/> (hozzáférés: 2023.11.07)
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_limits_by_country (hozzáférés: 2023.11.07)
- [23] <https://www.scania.com/uk/en/home/products/trucks/battery-electric-truck.html>
(hozzáférés: 2023.11.07)
- [24] <https://hdstruckdrivinginstitute.com/blog/semi-trucks-numbers/> (hozzáférés: 2023.11.07)
- [25] <https://motoroomph.com/how-long-do-semi-trucks-last/> (hozzáférés: 2023.11.07)

Letölthető elektronikus dokumentumok:

- [9] <https://cdn.group.renault.com/ren/hu/pdf/brochure/master-brochure.pdf>
(hozzáférés: 2023.11.07)

[15] <https://www.te.com/content/dam/te-com/documents/industrial-and-commercial-transportation/global/ict-hivonex-illustration-truck.pdf> (hozzáférés: 2023.11.07)

[26] <https://www.mvmnext.hu/aram/servlet/download?type=file&id=15754>

(hozzáférés: 2023.11.07)

Ábrajegyzék:

- 1. ábra:** Belső égésű motorok tilalmát tervező országok
- 2. ábra:** Európai országok, ahol teherautóknak autópályán a sebességhatár 80km/h
- 3. ábra:** Szimulációban felhasznált turbina modell
- 4. ábra:** Turbina elhelyezkedése haszonjárműn
- 5. ábra:** Belső égésű gépjármű és kutatott jármű hatásfok összehasonlítása
- 6. ábra:** Turbina, jármű és áramlási tér hálójá inflációval
- 7. Ábra:** Rotating domain – stationary domain interface elő és oldalt
- 8. ábra:** Enclosure boundary conditionekkel
- 9. ábra:** Levegő kiáramlása a turbinából
- 10. ábra:** Áramlásvonalak összehasonlítás
- 11. ábra:** Sebesség vektorok összehasonlítása
- 12. ábra:** Sebesség kontúr összehasonlítása
- 13. ábra:** Nyomás kontúr összehasonlítása
- 14. ábra:** Elektromos energia-termelés járműsebesség grafikon
- 15. ábra:** Összefoglaló táblázat
- 16. ábra:** Áram ára megtakarított pénzösszeg grafikon