

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**Energy Harvesting rendszerek kutatása
és fejlesztése**

című

PhD értekezés

Készítette:

Sarvajcz Kornél

okleveles mechatronikai mérnök

Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola

Iskolavezető:

Szigeti Jenő, DSc, dr. habil

egyetemi tanár

Tudományos vezető:

Czap László, PhD, dr. habil

egyetemi tanár

Miskolc 2024

Ábrajegyzék

2-1. ábra: Az Energy Harvesting rendszer általános blokkvázlata [4]	12
2-2. ábra: Rádiófrekvenciás energia szűret berendezés blokk diagramja [16]	15
2-3. ábra: Vevő jelerőssége Friis-modellt használva WiFi átvitelhez $f=2,4$ GHz és $f=5$ GHz-en [18]	16
2-4. ábra: Termoelektromos modul felépítése [22]	17
2-5. ábra: A Seebeck-effektus és a Peltier-effektus szemléltetése [23]	17
2-6. ábra: Az egyes technikákkal kinyerhető energia [42]	20
2-7. ábra: Az Energy Harvesting és a teljesítmény elektronika közötti szinergia [43]	21
3-1. ábra: Soros hibridhajtás energiavesztesége [94]	26
3-2. ábra: Egy tipikus termoelektromos generátor hulladékhővisszanyerő rendszer elrendezése HEV-ben [94]	28
3-3. ábra: Az OBD-II csatlakozó lábkiosztása [70]	30
4-1. ábra: Termoelektromos generátor elvi felépítése [95]	35
4-2. ábra: Comsol szimulációs eredmények a 20-80 °C hőmérséklet különbségeken	39
4-3. ábra: Termoelektromos generátor üresjárási feszültségének szimulált eredménye	40
4-4. ábra: Alumínium közdarabok tervdokumentációja	41
4-5. ábra: mérő és vezérlő berendezés felépítése	42
4-6. ábra: mérő és vezérlő berendezés	42
4-7. ábra: mérő és vezérlő berendezés	43
4-8. ábra: Mérő és vezérlő program	46
4-9. ábra: Termoelektromos generátor mért üresjáráti feszültségei	47
4-10. ábra: TEG belső ellenállás gyári értékei [125]	48
4-11. ábra: TEG munkaponti méréseinek eredménye	48
4-12. ábra: TEG2 munkaponti méréseinek eredménye	49
4-13. ábra: TEG belső ellenállásának meghatározása	53
4-14. ábra: TEG kapocsfeszültségének meghatározása	54
4-15. ábra: A termoelektromos generátor validációs eredményei	56
5-1. ábra: A forgórész tekercselése, és az állórész előlnézete	57
5-2. ábra: A forgórész hornya és az állórész pólusa	58
5-3. ábra: Villamos motor kész modellje az RMXprt modulban.	59
5-4. ábra: A villamos motor 3D „félmodellje” MAXWELL-ben.	60
5-5. ábra: A kapcsolt fizikai vizsgálat Workbench projektje	62

5-6. ábra: Az ANSYS Mechanical programablak térhálózást beállító felülete.....	62
5-7. ábra: A hőterhelések importálása.....	63
5-8. ábra: A beállított hőátadás	64
5-9. ábra: Steady-State Thermal vizsgálat.....	65
5-10. ábra: Transient Thermal vizsgálat.....	66
5-11. ábra: Választott felület	67
5-12. ábra: Felszerelt TEG modul	67
5-13. ábra: Felszerelt TEG modul	68
5-14. ábra: Tesztelés útvonal terve.....	68
5-15. ábra: Mért eredmények	69
5-16. ábra: A mérés összeállítása	72
5-17. ábra: Felfogató rendszer 3D modellje.....	72
5-18. ábra: Felfogató rendszer.....	73
5-19. ábra: mérő rendszer blokk diagramja.....	73
5-20. ábra: A TEG által termelt teljesítmény a hőmérsékletkülönbség függvényében.....	74
6-1. ábra: Az adatok rögzítéséhez alkalmazott program	76
6-2. ábra: A rögzített paraméterek.....	76
6-3. ábra: Az adatok rögzítése.....	77
6-4. ábra: A rendszerben felhasznált eszközök beszerelve az autóba	77
6-5. ábra: A motor percenkénti fordulatszáma.....	79
6-6. ábra: A gépjármű pillanatnyi sebessége.....	79
6-7. ábra: GPS adatok megjelenítése.....	80
6-8. ábra: Áttekintő felület	80
6-9. ábra: A gps adatok megjelenítő felülete.....	81
6-10. ábra: Az STFU és az oxigén szenzor értékének összehasonlítása	82
6-11. ábra: Az STFU és az oxigén szenzor értékének különbsége	82
6-12. ábra: A túl magas fordulatszám ábrázolása	83
6-13. ábra: A túl magas sebesség ábrázolása	83
6-14. ábra: A sebességértékek gyakoriságának eloszlása	84
6-15. ábra: A fordulatszám és a töltőfeszültség közötti kapcsolat	84
6-16. ábra: A fordulatszám, légáram és pillangószelep pozíciójának összefüggése.....	85
6-17. ábra: A katalizátor hőmérsékletváltozása	86
6-18. ábra: A motorba áramló és a hűtését szolgáló levegő hőmérsékletváltozása	87

6-19. ábra: Általános diagnosztikai információk	87
7-1. ábra: A járművezetők hibájából bekövetkezett halálos kimenetelű személysérüléssel közúti közlekedési balesetek száma az előidéző okok szerint [115].....	90
7-2. ábra: Nappali képeken látható objektumok eloszlása az adathalmaz strukturálása alapján	91
7-3. ábra: Éjszakai képeken látható objektumok megoszlása az adathalmaz strukturálása szerint	92
7-4. ábra: Pontosság és gyorsaság összehasonlítása különböző algoritmusok esetében [117]	92
7-5. ábra: Nappali betanítás hibafüggvényének változása az iterációk függvényében	94
7-6. ábra: Éjszakai betanítás hibafüggvényének változása az iterációk függvényében	95
7-7. ábra: Gyalogosfelismerés tesztelése nappal.....	97
7-8. ábra: Gyalogosfelismerés tesztelése szürkületben, este.....	98
7-9. ábra: Objektumok előfordulási gyakorisága méretarányok szerint.....	101
7-10. ábra: Gyalogátkelőhelyek felismerése	102

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	9
2	Energy Harvesting rendszerek	11
2.1	Energy Harvesting fogalma	11
2.2	Energy Harvesting források.....	13
2.3	Fényenergia Energy Harvesting módszerei	13
2.4	Elektromágneses energia Energy Harvesting módszerei.....	14
2.5	Termikus energia Energy Harvesting eszközei	16
2.6	Mechanikai energia Energy Harvesting eszközei.....	18
2.7	Az Energy Harvesting technikák és a hozzájuk kapcsolódó technológiák összehasonlítása	19
3	Gépjárművekben használt Energy Harvesting rendszerek.....	22
3.1	Az autódiagnosztikai rendszerek kialakulása és fejlődése	29
3.2	Vezetéstámogató rendszerek fejlesztésével kapcsolatos kutatások.....	31
3.3	Napjaink legfrissebb kutatási eredményei a Termoelektromos generátorok alkalmazásával kapcsolatosan	33
4	Termoelektromos generátor szimulációja	35
4.1	Termoelektromos generátor mérő és vezérlő berendezés.....	40
4.1.1	TEG mérő és vezérlő berendezés szoftvere	44
4.2	A TEG paraméter identifikációja	49
4.2.1	A bakteriális memetik algoritmus rövid áttekintése	50
4.2.2	A Termoelektromos generátor belső ellenállásának meghatározása.....	51
4.2.3	A Termoelektromos generátor kapocsfeszültségének a meghatározása	53
4.2.4	A Termoelektromos generátor méréseinek a validációja	54
5	Villamos motor hővesztéseinek vizsgálata.....	57
5.1	A modell létrehozása	57
5.1.1	A modellezett villamos motor	57

5.1.2	RMXprt	58
5.1.3	Mechanical-thermal szimuláció	62
5.2	Hővisszanyerő rendszer alkalmazási lehetőségei	66
5.2.1	A hővisszanyerő rendszer.....	70
6	Vezetést elemző rendszer fejlesztése	75
6.1	A rögzített adatok feldolgozása	78
6.1.1	Adatok importálása NI DIAdem programba	78
6.1.2	Áttekintő felület elkészítése	78
6.1.3	Helyzetinformációk elemzése	80
6.1.4	A motor keverékillesztésének elemzése.....	81
6.1.5	A sebesség és fordulatszám értékének vizsgálata	82
6.1.6	A generátor teljesítményének vizsgálata.....	84
6.1.7	Menetdinamikai és hőmérséklet értékek elemzése	85
6.1.8	Általános diagnosztikai információk.....	87
7	Kamera alapú vezetést támogató rendszer fejlesztése mesterséges intelligenciával.....	89
7.1	Gépjárművezetést támogató rendszer tervezése	89
7.1.1	Célkitűzések	90
7.2	Rendszer megvalósítása és tesztelése	90
7.2.1	Pre-trained neurális háló kiválasztása	92
7.2.2	SSD MobileNet 300x300 betanítása PyTorch-al	93
7.2.3	Modell validációja.....	95
7.2.4	Rendszer tesztelése valós körülmények között	96
7.2.5	Tesztelés nappal	97
7.2.6	Éjszakai üzemmód tesztelése	98
7.3	Rendszer optimalizációja.....	98
7.3.1	Tanító adathalmaz konfigurálása	99
7.3.2	Optimalizálás adat-augmentációval	99

7.3.3	Optimalizálás egyedi keresődobozok használatával	101
7.3.4	TensorRT modell validációja	102
7.4	A vezetést támogató rendszerrel elért eredmények	103
8	Összefoglalás.....	104
9	Summary	105
10	Továbbfejlesztési lehetőségek.....	106
11	Köszönetnyilvánítás	107
	Saját publikációim.....	108

1 Bevezetés

A kutatási témám Energy Harvesting (energia szűret) rendszerek kutatása és fejlesztése. A kutatómunkám kezdetén célul tűztem ki magam elé, hogy megvizsgálom a felhasznált energia veszteségeinek újrahasznosítási lehetőségeit, összehasonlítom a módszereket különféle paraméterek alapján és alkalmazási lehetőségeket dolgozok ki gépjárművekben történő felhasználásra.

A PhD disszertációm első fejezetében részletesen bemutatom az Energy Harvesting rendszereket. Kitérek a Harvesting rendszerekben található szenzorokra és aktuátorokra. Számba veszem a mechanikai energiából, termikus energiából, sugárzó és biokémiai energiából kinyerhető energiának az eszközeit. Energiasűrűség szempontjából összehasonlítom a lehetőségeket.

A következő fejezetben a gépjárművekben használt Harvesting rendszereket, vagy más néven energiavisszanyerő rendszereket fogom bemutatni. Ebben a fejezetben is sorra veszem és részletesen bemutatom a különféle fizikai paraméterekből nyerhető energiákat és azok rendszereit.

Az irodalomkutatás részt a vezetéstámogató rendszerek irodalmának feldolgozásával zárom, ahol sorra veszem a legfontosabb szakirodalmi eredményeket.

Az irodalomkutatás részt lezárva a dolgozatban rátérek a termoelektromos jelenségekből visszanyerhető energiák elemzésére. A dolgozatom fő kutatási vonala az Energy Harvesting rendszereken belül a termoelektromos energiavisszanyerő rendszerek alkalmazása gépjárművekben.

A termoelektromos Harvesting rendszerek elemzését a Termoelektromos generátorok (TEG) megismerésével és elemzésével kezdtem. Végesem szimulációt készítettem a generátorok működéséről, mely szimuláció alkalmas volt arra, hogy különböző hőmérsékleti feltételek mellett a generátor kimeneti villamos paramétereit tudjam vizsgálni. A szimulációt kibővítettem másféle anyagösszetételű generátorral is. A szimuláció eredményeit több tudományos publikációban közzé tettem.

A szimuláció elvégzése után szükségesnek éreztem, hogy valóságos mérésekkel validáljam a szimulációs eredményeimet. A mérések elvégzése érdekében terveztem egy Termoelektromos generátor mérő és vezérlő berendezést. A berendezés képes különböző méretű TEG modulok fogadására, a meleg és hideg oldali hőmérsékletet szabályozni, és a szabályzással azonos időben hőmérsékleteteket és villamos paramétereket mérni. A berendezés részletes felépítését,

szabályzó és mérőszoftverét, valamint a berendezéssel végzett mérési eredményeket több tudományos folyóiratban publikáltam.

A termoelektromos generátorok szimulációs és valóságos mérései után arra koncentráltam, hogy a TEG modulon alapuló hőmérséklet visszanyerő rendszerem gépjárművön belül milyen paraméterekkel tudna működni. Fejlesztettem egy gépjárműdiagnosztikai szoftvert, amely képes a gépjármű működése közben menetdinamikai adatokat mérni és elemezni. A mérőrendszert kiegészítettem egy GPS modullal is, amely a menetdinamikai adatok mellett domborzati és sebesség adatokkal is kiegészíti a mért adatok halmazát. A mérőrendszer komplexitását egy menetrögzítő kamerával bővítettem, amely látható és hallható információkkal egészíti ki a rendszert. A mérőrendszer tesztelésekor a tesztgépjármű motorterébe rögzítettem a fejlesztett hővisszanyerő rendszert és egy időben mértem a gépjármű működéséből adódó hőveszteség újrahasznosítási paramétereket, a gépjármű menetdinamikai tulajdonságait, a GPS koordinátákat és a megtett útról készített kameraképet. Az adatok egyidejű feldolgozását és kiértékelését követően hővisszanyerési információkat tudtam megállapítani. A mérőrendszerem fejlesztését követően több vezetési stílusban teszteltem a rendszert. Gyűjtöttem adatokat lassú, csúcsidőben történő városi közlekedésből, valamint dinamikus vezetési stílusból is. Az adatok feldolgozásánál arra fókuszáltam, hogy összefüggést találjak a visszatermelt villamos teljesítmény és a vezetési stílus között. Az eredményeket folyóiratban publikáltam.

A vezetést elemző rendszert egy vezetés támogató rendszerrel egészítettem ki, amely képes mesterséges intelligencia segítségével, valós idejű képfeldolgozással gyalogosokat, gyalogátkelőhelyet és közlekedési táblákat detektálni, és az emberi reakcióidőt meghaladó sebességgel jelzést adni a sofőrnek.

Összességében elmondható, hogy a PhD kutatómunkám során fejlesztett rendszerek nagymértékben hozzájárulhatnak az e-mobilitás fejlődéséhez és a biztonságosabb közlekedéshez. A kutatásom eredménye egy komplex Energy Harvesting rendszer fejlesztése volt.

2 Energy Harvesting rendszerek

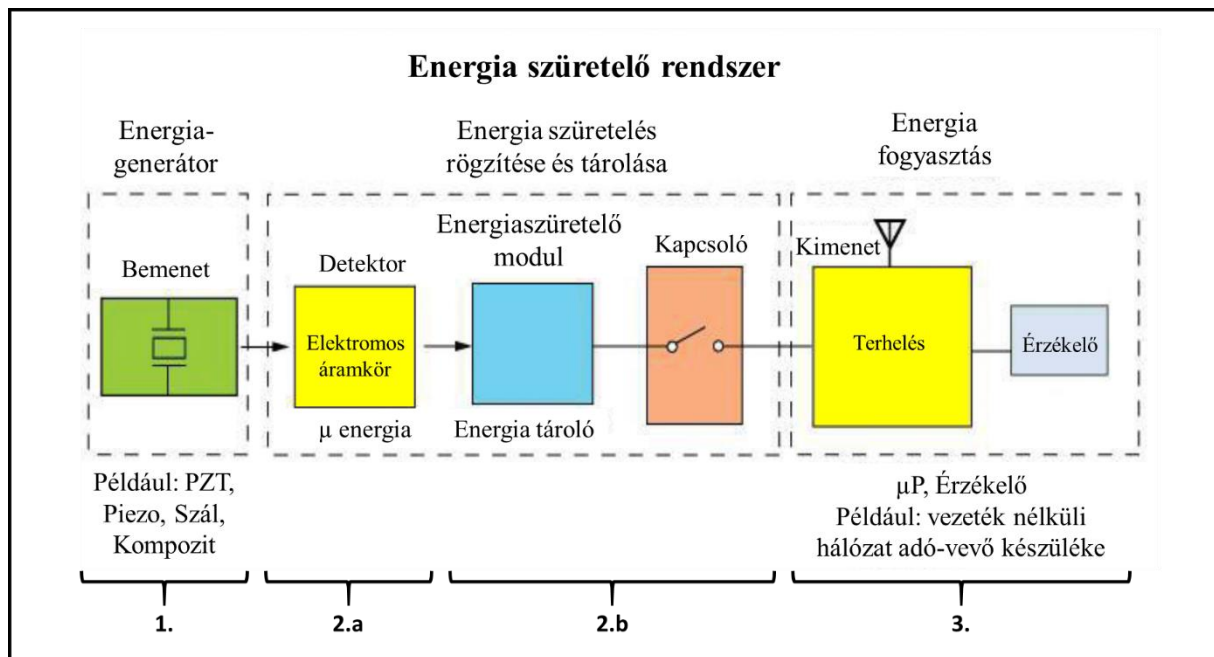
Jelen fejezetben bemutatásra kerül az Energy Harvesting, azaz az energia szüretelés fogalma, a lehetséges források, módszerek, valamint eszközök.

2.1 Energy Harvesting fogalma

Bolygónk korlátozott fosszilis tüzelőanyaggal rendelkezik, és ezek minden pillanatban egyre csak fogynak, ezt az aggodalomra utaló helyzetet a kutatók is megjósolták[1][2]. E tekintetben hangsúlyt kapott a zöld és alternatív energiamegoldások felkutatása. Ez egyhamar nem fog megtörténni, de ennek ellenére óvintézkedésekre van szükség ahhoz, hogy proaktívak legyünk, cselekedjünk, amíg nem késő. Egy másik dolog, amely még kritikusabbá teszi a helyzetet, az akkumulátorok kimerülése, elöregedése; néhány év használat után az akkumulátorokat cserélni kell, ami ismét nagy kihívást jelent. Ugyanis a közlekedésben az elektromos és hibrid járművek folyamatosan fejlődnek, egyre többet adnak el a világon és mindegyik jármű energia tárolója az akkumulátor.

Az Energy Harvesting, vagy más néven energia szüret egy olyan folyamat, amelynek során a környezetből származó környezeti energiaforrásokat elektromos energiává alakítják, amely tárolható és felhasználható autonóm eszközök táplálására [3]. Leginkább a napelemes technológiában és az elektrodinamikában való használata miatt igen népszerű, azonban a digitális trendeknek és mechanikának köszönhetően többféle formában és innovatív módon is használható. Ez a technológia a globális felmelegedés és a klímaváltozás során felmerülő kihívásokat is támogatja az újrafelhasználhatóság, azaz a felhasznált energia veszteségeinek átalakítása miatt. Az energiát különböző forrásokból és többféle módon lehet befogni, ami különféle mechanizmusokat foglal magában, az elektromos energia használható formában történő előállítása érdekében.

Bármilyen energiagyűjtő rendszer kiépítéséhez szükségünk van néhány fő alkatrészre, hogy olyan megújuló rendszert fejlesszünk ki, amely folyamatosan képes táplálni az elektronikai eszközöket. A rendszer felépítéséhez egy általános prototípus készült, amelyet a **2-1. ábra.** szemlélteti [4]. Egy tetszőleges energiagyűjtő (energia szüret) rendszer (EHS) alapvető elemeit, valamint a benne lévő főbb alkatrészeket mutatja.



2-1. ábra: Az Energy Harvesting rendszer általános blokkvázlata [4]

Valamennyi Energy Harvesting rendszeren belül több alrendszer működik összhangban egymással, amelyek az alábbiakat foglalják magukban:

1. A környezeti energia begyűjtő forrását, amelyet energiaátalakító vagy energiagenerátor elemként fogunk fel.
- 2.a. Egy elektromos áramkört, amely energiagazdálkodási rendszert tartalmaz, például AC-DC, DC-DC konverterek és PMIC-k.
- 2.b. Energiatárolók, például újratölthető akkumulátorok.
3. A szükséges energiát fogyasztó célalkalmazás, azaz szenzorcsomópontok, hordozható eszközök stb.

2.2 Energy Harvesting források

A kutatókat évtizedek óta foglalkoztatja az energia szüret technológiája és az, hogy milyen energiaforrásokat lehet „szüretelni”. Az alábbiakban a különböző lehetséges Energy Harvesting források kerülnek felsorolásra: [5]

- Mozgás, rezgés vagy mechanikai energia: padlók, lépcsők, tárgyak mozgása, energia átvitele a motorról az akkumulátorra fékezés közben stb. Az elektromechanikus átalakító lehet elektromágneses, elektrosztatikus vagy piezoelektromos.
- Elektromágneses (RF): Bázisállomások, vezeték nélküli internet, műholdas kommunikáció, rádió, TV, digitális multimédiás műsorszórás stb.
- Termikus.
- Radioaktív reakciók által generált lendület elektromos energiává.
- Nyomás gradiensek.
- Mikrovízáramlás (pl. csaptelep).
- Napenergia és fény.
- Biológiai.

Egy másik osztályozási lehetőség szerint azt vizsgáljuk, hogy ki vagy mi biztosítja az átalakításhoz szükséges energiát: az első típust emberi energiaforrásnak nevezik. Az energiát emberek vagy állatok tevékenysége biztosítja. A második típus az energiagyűjtő forrás, amely energiáját a környezetből nyeri [6]. A terhelésre átvitt teljesítményt korlátozza a nyers energia rendelkezésre állása, valamint a jelátalakító és az átalakító áramkör hatékonysága.

Az energiagyűjtés szakaszos jellege hatással van az energiagyűjtéssel meghajtott elektronikus eszközök működésére. Elvileg két helyzetet különböztethetünk meg:

1. A készülék energiafogyasztása alacsonyabb, mint az átlagos betakarított teljesítmény. Ebben az esetben az elektronikus eszköz folyamatosan működhet.
2. A készülék energiafogyasztása nagyobb, mint az átlagos betakarított teljesítmény. A készülék működése nem folyamatos, és a működések közötti idő a készülék által tárolt energiától függ [6].

2.3 Fényenergia Energy Harvesting módszerei

A napenergia-kinyerés tekinthető az egyik legelterjedtebb megújuló energiaforrásnak, amely bőségesen rendelkezésre áll és ingyenes. A Föld felszínén elérhető átlagos nappól kinyerhető energia körülbelül 10^{18} kWh/év, a felszíni teljesítménysűrűség pedig körülbelül 1353 kW/m^2

[7]. A környezeti megvilágításból nyert energia azonban 100 mW/cm^2 és 100 W/cm^2 között mozog [8], attól függően, hogy a közvetlen napfényről (előbbi) vagy a mesterséges beltéri világításról (utóbbi) van-e szó.

A közvetlen napfény bőségesen elérhető szinte a világon, és fényelektromos technikákkal átalakítható [9]. Ezt fényelektromos cella (PV - photovoltaic cell) néven ismert napelemcellával lehet elérni. Ezeket a cellákat félvezető anyagból gyártják, és a fényelektromos hatás miatt a cellára érkező fény elektromos energiává alakul át. Potenciálkülönbség keletkezik, amikor a napfény hatására a PN átmenetben keletkező szabad elektronok az N-típusútól a P-típusú félvezető felé mozognak.

A napelem teljesítményének meghatározásához és más cellákkal való összehasonlításához a leggyakrabban használt paraméter a napelem átalakítási hatékonysága. Az átalakítási hatásfok a cellából származó átalakított kimenő teljesítmény és a nap bemeneti teljesítményének aránya [10]. Ezen kívül a teljesítményt a beeső fény intenzitása, a spektruma és a cellán mérhető hőmérséklet alapján határozzák meg.

A hatásfok kiszámítására szolgáló egyenlet a következőképpen definiálható [11]:

$$\eta(\%) = \frac{P_{Max}}{P_{in}} = \frac{U_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{in}} * 100, \quad (1)$$

ahol az U_{oc} a napelem üresjáratú feszültsége, az I_{sc} a rövidzárlati áram, és az FF a kitöltési tényező.

A kitöltési tényezőt a napelemcella maximális teljesítményből, üresjáratú feszültségéből és zárlati áram értékéből lehet kiszámolni.

A kitöltési tényező (FF) egyenlete a következőképpen definiálható [11]:

$$FF = \frac{P_{Max}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{U_{Max} \cdot I_{Max}}{U_{OC} \cdot I_{SC}}. \quad (2)$$

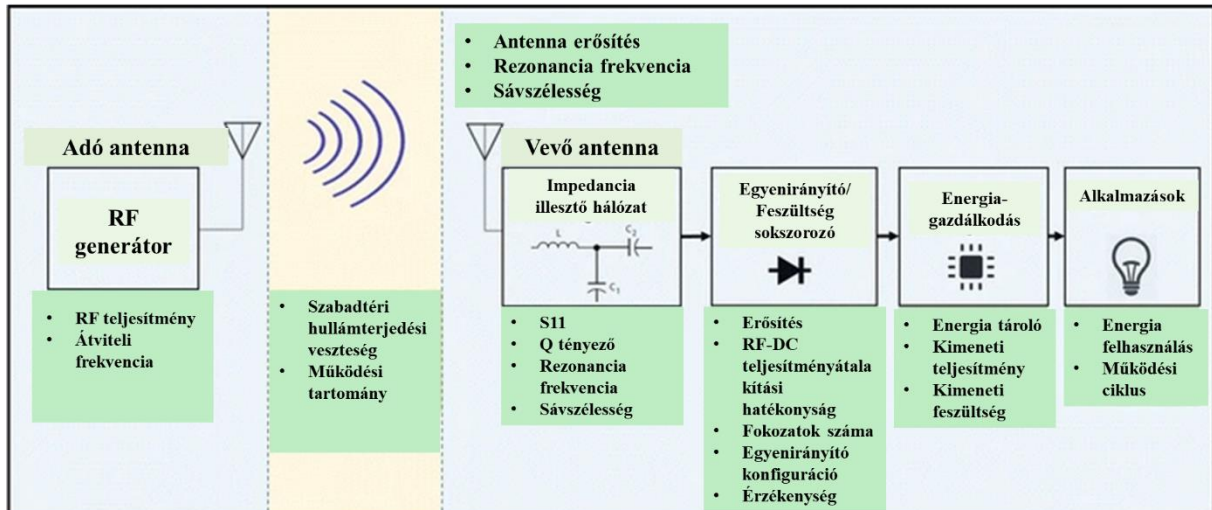
A PV cellák hatékonysága nagymértékben függ a felhasznált anyagtól és típustól, ezek alapján a PV cellák három kategóriába sorolhatóak; szilícium, félvezető vegyületek és újfajta anyagok [12]. Ezen túlmenően energia szüret technikákra is szükség van a lehető legnagyobb teljesítmény kinyerésére, mint például a maximális teljesítménypont-követő (MPPT) algoritmusokra, amelyek kulcsszerepet játszanak a PV cella maximális teljesítményre való illesztésében [13].

2.4 Elektromágneses energia Energy Harvesting módszerei

A rádiófrekvencia (RF) az elektromágneses hullámok széles frekvenciasávja, amely 3 kHz-től 300 GHz-ig terjed. Ezek az elektromágneses (EM) hullámok hatalmas mennyiségben elérhetők

a környezetünkben, és olyan forrásokból gyűjthetők össze, mint a TV (41-250 MHz, 470-950 MHz); rádió AM sávja (526,5 – 1705 kHz); FM (87,5 – 108 MHz); GSM (850/1900 vagy 900/1800 MHz); WiFi (2,45/5,0 MHz), 3G, 4G 2400 MHz [14],[15].

A rádiófrekvenciás jelek gyűjtésére antennák szolgálnak, melyeket általában egy jelátalakító egység követ, amely villamos paraméterre alakítja a rádiófrekvenciás jelet. A rendszer blokk diagramját a 2-2. ábra szemlélteti. Ami ezt a forrást kedvezővé teszi, az az, hogy független az olyan környezeti feltételektől, mint az időjárás, a hőmérséklet és az éghajlat.



2-2. ábra: Rádiófrekvenciás energia szűret berendezés blokk diagramja [16]

Ami az energiaátvitelt illeti, az RF betakarított teljesítmény 1 μ W és 189 μ W között van a dedikált RF adók segítségével 900 MHz frekvencián, nagyon rövid, körülbelül 5 m és 4,1 km közötti távolságon belül [15]. A kivont teljesítmény mennyisége azonban nagymértékben függ az áramforrástól és a sugárzási távolságtól. A vevőantenna által összegyűjtött teljesítmény a Friis-képlettel számítható ki adóra és vevőre.

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi R)^2}, \quad (3)$$

ahol a P_R a vett teljesítményt, P_T a továbbadott teljesítményt, a G_T az adó antenna erősítését, a G_R a vevőantenna erősítését jelöli, a λ az adóhullámhullámhossza, míg az adó és a vevő antenna közötti távolság az R .

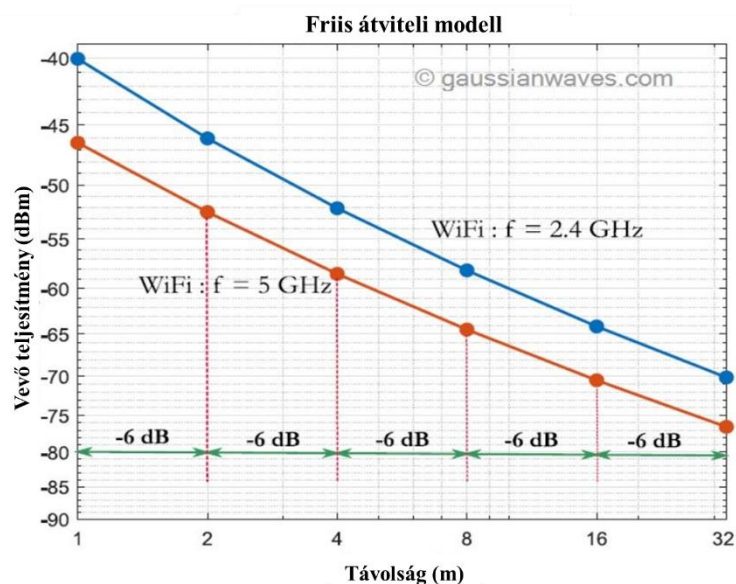
A terjedési veszteséget a következő képlet adja meg:

$$P_L = \frac{(4\pi R)^2}{G_T G_R \lambda^2} = \frac{(4\pi f R)^2}{G_T G_R C^2}, \quad (4)$$

$$P_L(\text{dB}) = 32,44 + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}(R) - G_T - G_R,$$

ahol P_L a terjedési veszteség szabad térben, f az átviteli hullám frekvenciája [17].

Az átvitt teljesítmény és a távolság közötti összefüggést mutatja be a 2-3. ábra a Friis-modell tükrében WiFi átvitelhez.



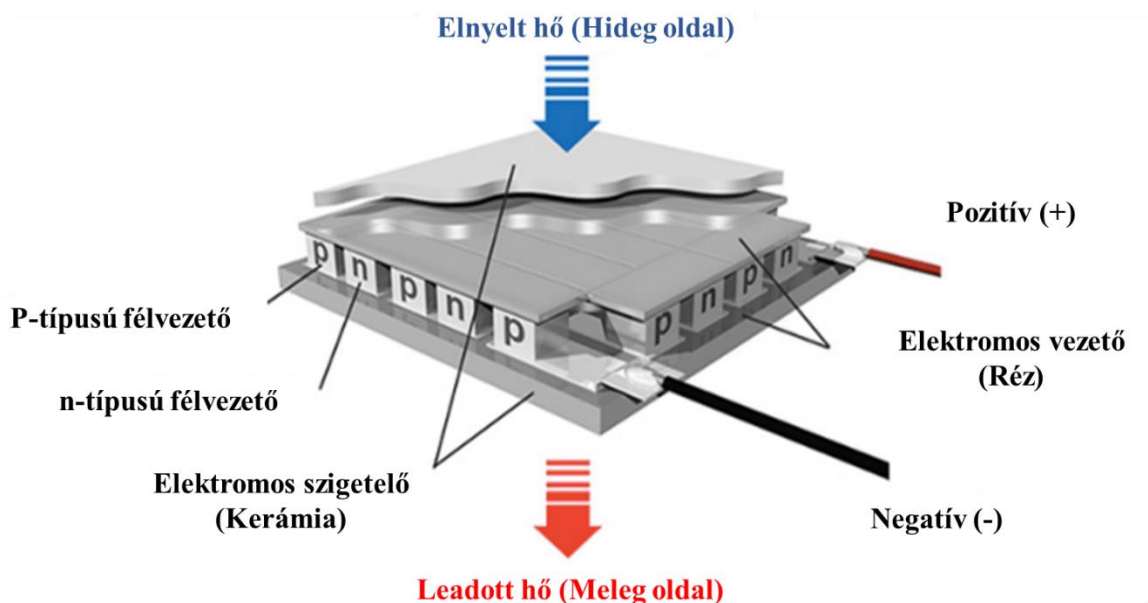
2-3. ábra: Vevő jelerőssége Friis-modellt használva WiFi átvitelhez $f=2,4\text{ GHz}$ és $f=5\text{ GHz}$ -en [18]

2.5 Termikus energia Energy Harvesting eszközei

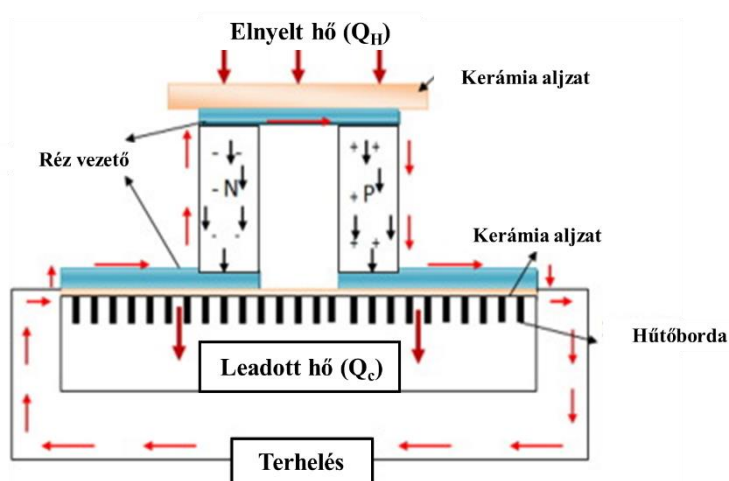
Hőenergiát nyerhetünk a környezetben rendelkezésre álló hőből, valamint bármely folyamat során keletkező hőből, amelyet hulladékhőnek neveznek. A hőenergiát a termoelektromos vagy piroelektromos hatás előnyeit kihasználva lehet kinyerni. A termoelektromos hatások Peltier, Seebeck és Thomson kategóriába sorolhatóak, ezek hozzájárulhatnak az energiatermeléshez, ha rendelkezésre áll hő [19]. A hőenergia kinyeréséhez olyan termikus gradiensre van szükség, amely a környezet és a hőforrás közötti hőmérséklet-különbségtől, valamint a jelátalakító konverziós hatásfokától függ. A hőenergia-gyűjtés a termikus gradiensnek elektromos teljesítménnyé alakítását jelenti. Nagy vonalakban a termoelektromos teljesítmény két fizikai hatás segítségével állítható elő. Ezek a Seebeck-effektus és a Peltier-effektus. A termikus gradiensből eredő energiatermelést Seebeck-effektusnak nevezzük [20]. A fordított állapot a Peltier-effektus, mely során az áramot a termoelektromos modulra (TEM) vezetik, ami az egyik csomópontonál hőelnyelést, a másikon pedig hőleadást eredményez [21]. A termoelektromos modul (TEM) felépítését a 2-4. ábra, míg a Peltier és Seebeck-effektusok működési jelenségét a 2-5. ábra szemlélteti.

A termoelektromos eszköz dinamikáját tekintve két elsődleges csomópontból áll, amelyek P-típusú (magas pozitív töltéskoncentráció) és N-típusú (magas negatív töltéskoncentráció)

elemekként ismertek. A szorosan egymásra helyezett termoelektromos párok elektromosan sorba vannak kötve ahogyan a 2-5. ábra szemlélteti.



2-4. ábra: Termoelektromos modul felépítése [22]



2-5. ábra: A Seebeck-effektus és a Peltier-effektus szemléltetése [23]

A kompakt méretüknek, robusztusságuknak és megbízhatóságuknak köszönhetően ideálisak a megújuló technológiákban való alkalmazásra, mint például egy hőenergiavisszanyerő rendszerbe. A TEG teljesítményének elemzésére különféle kutatásokat végeztek a TEM-ek hatékonyságának javítására, mivel hatásfokuk már 12 százalékos. A Seebeck-egyenlet a következőképpen definiálható:

$$U = \alpha(T_h - T_c), \quad (5)$$

ahol U a termoelektromos feszültség, α a Seebeck-együttható, és $(T_h - T_c)$ a termikus gradiens vagy hőmérséklet-különbség a csomópontok között.

A termoelektromos generátorok hatásfokának elemzéséhez egy jósági tényező (ZT) nevű paramétert használnak, amely a termoelektromos generátor anyagától függ. Ez alapvetően különféle együtthatók függvénye, amelyeket a következő egyenlet jelöl:

$$ZT = \frac{\sigma \alpha^2 T}{\kappa}, \quad (6)$$

ahol az elektromos vezetőképességet σ jelöli, a Seebeck-együtthatót α , a T az átlagos üzemi hőmérsékletet, a κ pedig a hővezető képességet.

Az egyik fontos szempont, amelyet itt figyelembe kell venni, hogy a TEG magasabb jósági tényezője magasabb hatékonyságnak felel meg [24]. A kutatók azonban számos lehetőséget javasoltak számos ipari és energiával kapcsolatos alkalmazás eredményének javítása érdekében. A termoelektromos eszköz fizikai paraméterei közül a legfontosabb az anyaga. A TEG-ben általánosan használt anyag a Bi_2Te_3 (bizmuttellurid) 1954 óta ismert, alacsony hővezető képessége és magasabb elektromos vezetőképessége miatt kedvelt, amely szobahőmérsékleten körülbelül 0,7-0,8 ZT -t ad [25]. A Bi_2Te_3 -on kívül más termoelektromos anyagokat is bemutatnak, mint például a SiGe [26], CoSb_3 [27], PbTe [28], Mg_2Si [29] és BiSbTe_3 [30].

A termoelektromos „szüretelő” eszközök életképes megoldást jelenthetnek biztonságuk, tartósságuk és nagy stabilitásuk miatt, de van egy olyan tulajdonságuk, amely korlátozza ezt a technológiát, mint az alacsony hatásfok, amely a termoelektromos energiagyűjtés hátránya.

2.6 Mechanikai energia Energy Harvesting eszközei

A mechanikai energia különféle formákban elérhető a környezetünkben, például rezgésben, emberi mozgásban, mechanikus forgásban, szélfújásban, járművezetésben. Ez a fajta energia átalakítható elektromos áramtermeléssé alacsony fogyasztású eszközök számára.

A mechanikai energiát hasznosító „Energy Harvesting” technikák közé tartoznak az elektrodinamikus, piezoelektromos és triboelektromos elven működő energiát szüretelő berendezések [31]. A piezoelektromos energiagyűjtés továbbra is a legszélesebb körben kutatott begyűjtési módszer, köszönhetően az egyszerű alkalmazhatóságnak, a nagyfeszültségű kimenetnek, amely nem igényel utófeldolgozást [32], ezért ebben a részben erre helyeztem a fókuszot.

Általánosságban elmondható, hogy a piezoelektromosság az a folyamat, amely során a mechanikai energiát elektromossággá alakítják a kristályok belső polarizációjának felhasználásával. A kristályszerkezet deformálódik, amikor a piezoelektromos anyagra nyomó vagy húzó erőt fejtenek ki, ami az elektromos töltések mozgását eredményezi [33].

A piezoelektromos modul belsejében használt anyagok piezoelektromos kerámiák és polimerek lehetnek [33][34]. A polarizációs töltéssűrűséget a következő egyenlettel mérjük:

$$\rho = dX, \quad (7)$$

ahol ρ a polarizációs töltéssűrűséget jelenti, a piezoelektromos együtthatót d jelöli, X pedig az alkalmazott feszültséget.

Ez a töltéssűrűség elektromos mezőt és potenciál különbséget hoz létre, amelyet a következőképpen adunk meg:

$$E = \frac{\rho}{\epsilon}, \quad (8)$$

ahol az elektromos térerősséget E adja meg, ρ a töltéssűrűség, ϵ pedig a permittivitás.

A piezokerámia anyagok hatásfoka sokkal magasabb, ami vezető technológiává teszi az ipari és a kutatási területeken. A piezopolimereket széles körben használják szenzorokban, különösen orvosi biológiai érzékelőkben a hajlíthatóság, és kis tömegük miatt, de hatásfokuk alacsonyabb a piezokerámiákhoz képest [35].

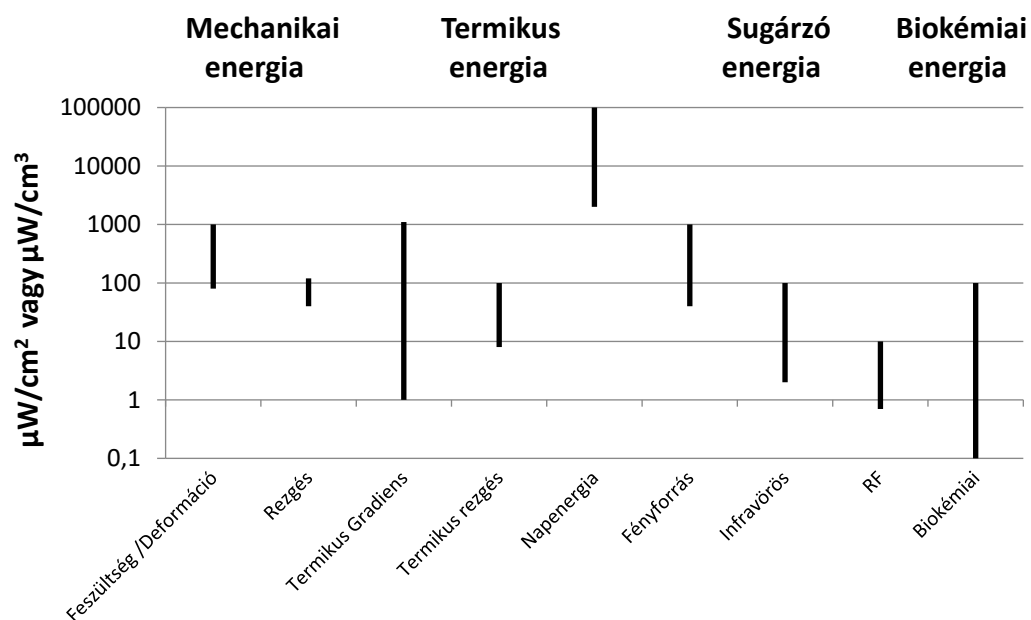
A piezoelektromos eszköz nagyobb hatékonyságának elérése érdekében a nanoanyagok tanulmányozására fektették a hangsúlyt a piezoelektromos nanogenerátorok (PENG) megjelenése után [36]. Ez a technológia a későbbiekben nagy figyelmet kapott, és a legújabb fejlesztések, vizsgálatok ebből születtek. A PENG szerkezetétől, mint például függőlegesen növesztett PENG [37], oldalirányban hozzárendelt PENG [38], nyújtott típusú PENG [39] stb., egészen a különböző félvezető anyagok, mint például a CdS [40], GaN [41] elemzéséig.

Mindezen erőfeszítések ellenére a piezoelektromos anyagok idővel leromlanak, és ez alacsonyabb hatásfokhoz vezet.

2.7 Az Energy Harvesting technikák és a hozzájuk kapcsolódó technológiák összehasonlítása

A különböző forrásokból nyerhető energiák igen sokszínűek. Ennek okán az Energy Harvesting technikák, valamint a hozzájuk kapcsolódó technológiák szintén változatosak, melyek az alábbiakban kerülnek összefoglalásra.

- Gépek, eszközök
 - Motorok, kompresszorok rezgése, mozgása
 - Hidak, épületek mozgása, lengése
 - Gépek által termelt hő
 - Szellőző berendezések levegő áramlása
 - Szerkezeti elemek ütközése, súrlódása, elmozdulása
- Természeti
 - Napsugárzás
 - Levegőáramlás
 - Vízmozgás, vízszintváltozás
 - Magas hőmérsékletű pontok
 - Elektromágneses sugárzás
- Emberi forrás (biomechanikai)
 - Mozgás
 - Testhőmérséklet



2-6. ábra: Az egyes technikákkal kinyerhető energia [42]

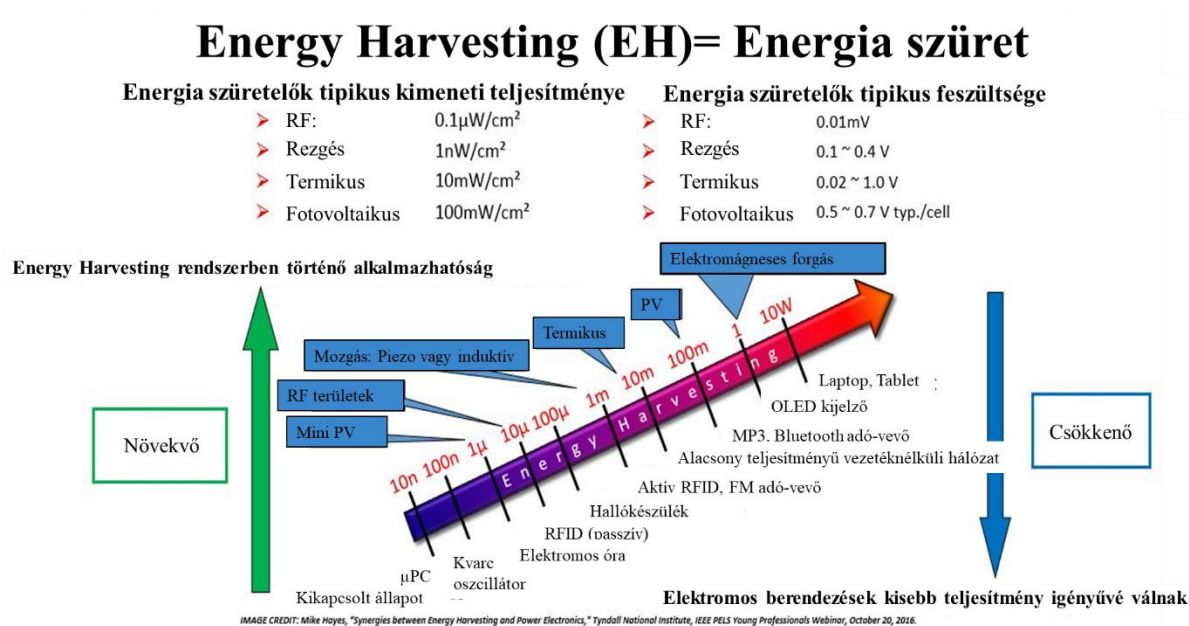
A 2-6. ábra illusztrálja az egyes technológiákon alapuló kinyerhető energiákat erőforrásonként csoportosítva, a [42] számú irodalom alapján.

Az 1. táblázat tartalmazza a Harvesting módszerekkel kinyerhető jellemző teljesítményeket és az ezekhez szükséges eszközöket előállító vállalatokat.

1. táblázat: A különböző harvesting módszerekkel kinyerhető teljesítmények [42]

Harvesting módszer	Jellemző energiasűrűség	Vállalatok
Napelemes	beltér: $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ kültér: $100\text{mW}/\text{cm}^2$	Cymbet, EnOcean, Infinite Power Solutions, MicroStrain, Linear Technology, Texas Instruments
Piezoelektromos	$330 \mu\text{W}/\text{m}^2$	Cymbet, MicroStrain, Linear Technology, INNOVATECH, Channel Technologies Group, Steminc
Rezgési	$100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Arveni, Cymbet, EnOcean, Infinite Power Solutions, Perpetuum
Termikus	$1\text{-}10 \text{mW}/\text{cm}^2$	Cymbet, EnOcean, Infinite Power Solutions, Micropelt, MicroStrain, Nextreme
Elektromágneses	GSM $0.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ WiFi $0.001 \mu\text{W}/\text{cm}^2$	Cymbet, Infinite Power Solution

A 2-7. ábra egy összefoglaló képet ad az Energy Harvesting és a teljesítményelektronika közötti szinergiáról. Néhány Energy Harvesting rendszer jellegzetes kimeneti teljesítmény és feszültség értékét foglalja össze, továbbá betekintést nyújt a szüretelhető energia lehetőségének tárházába.



2-7. ábra: Az Energy Harvesting és a teljesítmény elektronika közötti szinergia [43]

3 Gépjárművekben használt Energy Harvesting rendszerek

A népesség növekedésével nőtt az energiafogyasztás, ami minden eddiginél fontosabbá teszi a tiszta energiák felkutatását. Minthogy a közlekedési ágazat az egyik legnagyobb fogyasztók közé sorolható, ezért a közlekedési szektorban nagy hangsúlyt érdemes fektetni a környezetbarát megoldások lehetőségeinek felkutatására. A mai közúti járművek üzemanyag-energiájának nagy része elvész, ezért soha nem hasznosul. Egy számpéldával élve egy 13,4 m/s sebességgel haladó személygépkocsinál megközelítőleg 200 W értékű energia vész el csak a jármű felfüggesztési rendszerében.

Számos különböző módszer létezik az energia átalakítására. Zhang Jin-qiu [44] kutatásai során különböző elektromágneses regeneratív felfüggesztéseket hasonlít össze. A lineáris elektromágneses generátort alkalmazó felfüggesztési rendszerre példa a közvetlen hajtású elektromágneses felfüggesztés [45], amely a rezgések által okozott lineáris mozgást átvitelt nem igénylő elektromos energiává alakítja. A golyóscsavaros és fogasléc-fogaskerekes elektromágneses felfüggesztések viszont a lineáris mozgást mechanikus erőátvitellel forgó mozgássá alakítják át. Ez a forgási energia azután elektromos energiává alakul egy forgó elektromágneses generátor segítségével. Nakano [46] saját meghajtású golyóscsavaros aktív rezgésszabályozás alkalmazását javasolta teherautó kabinjaiban, és szimulációt is végzett ezzel. A szimuláció szerint a kabin lengéscsillapítói 87,02 W értékű rezgésenergiának voltak kitéve, melyből 31,63 W regenerálható és tárolható. Ez azt jelenti, hogy a rendszer hatásfoka 36%, ami bizonyítottan elegendő a rendszer önellátásához. Zhang Jin-qiu [47] arra a következtetésre jutott, hogy az önhajtású magnetoreológiai (MR) lengéscsillapító és a hidraulikus átviteli elektromágneses (HTE) felfüggesztés a leghatékonyabb. Az MR lengéscsillapító olyan lengéscsillapító, amely úgy működik, hogy egy elektromágneses mező fut át a csappantyú MR vezetőjén, és ezáltal szabályozza a csappantyúk szilárdságát. Ez a folyamat elektromos energiát igényel, és ezért nagymértékben javítja, ha egy elektromágneses indukciós (EMI) eszközt integrálnak a csillapítórendszerbe. Ennek a szerkezetnek az a hátránya, hogy a csappantyú nem tud teljes hatékonysággal működni a regenerációs folyamat során, így főként félaktív lengéscsillapító rendszerekben alkalmazható hatékonyan.

A HTE felfüggesztés a hidraulikus hajtómű és az elektromos motor kombinálásával működik. A kerék elmozdulása a felfüggesztés belsejében lévő dugattyút mozgásra kényszeríti, és mozgásba hozza a hidraulikus folyadékot. A folyadék viszont forog a motorban, és elektromos energiát termel. Az önhajtású MR lengéscsillapítóhoz hasonlóan a HTE felfüggesztés

regenerációs folyamata is csak félaktív állapotban működik, és az önhajtású MR lengéscsillapítóhoz hasonlóan a visszatáplált energia fő felhasználása a lengéscsillapító rendszer meghajtása. Mind a HTE, mind az MR lengéscsillapító aktív csillapítórendszer, amely aktívan csillapítja a rezgéseket. A Levant Power Corp. [48] kifejlesztett egy HTE felfüggesztést, a GenShock-ot, amely állításuk szerint akár 6 százalékkal csökkenti a katonai járművek üzemanyag-fogyasztását.

Az elektromágneses energiagyűjtő lengéscsillapítóhoz képest Q. Wang [49] alternatívaként bemutatta a kettős tömegű piezoelektromos energiagyűjtő lengéscsillapítót (PESHA). A kettős tömegű PESHA fő kialakítása egy rugóból, egy karból, egy csuklópántból és egy piezoelektromos rúdból áll. Amikor a piezoelektromos anyag (PZT-4) deformálódik, egy elektromos mezőt hoz létre, amely átirányítható és az elektromos energia tárolható. Annak ellenére, hogy ez a piezoelektromos energiagyűjtő viszonylag új felhasználási területe, vannak más javasolt rendszertervek is. Hyeoung Woo Kim [50] kutatásában a piezoelektromos "cintányér" átalakítót úgy tervezték, hogy kevésbé terhelje a piezoelektromos rudat, és ezáltal növelje élettartamát.

Fontos, hogy a rendszer mechanikailag strapabíró legyen, mivel nagy ciklikus igénybevételnek van kitéve. Hongseok Lee [51] egy piezoelektromos rendszert javasolt, amely két párhuzamos lemezből áll, amelyek egy jármű lengéscsillapítójába vannak integrálva. Amikor terhelésnek van kitéve, a lengéscsillapító belsejében lévő dugattyú összenyomja a csillapító folyadékot, és nyomást hoz létre, amely viszont deformálja a beépített piezoelektromos lemezeket, így a mechanikai energiát elektromossá alakítja. Bár a kísérleti eredmények mérsékelten kis mennyiségű megtermelt energiát mutattak, megvitatták, hogy ez annak köszönhető, hogy a legyártott rendszer egy valós alkalmazás méretének megközelítőleg 1/10-e volt.

A disszipált energia hasznos elektromos energiává történő újrahasznosítás ötlete már egy ideje létezik, és gyakran a rezgésekből adódó hőenergia formájában disszipálódnak. Az ötlet az, hogy a kinetikus energiát felhasználják, és elektromos energiává alakítsák át. Ennek elérésére a három legelterjedtebb módszer az elektrosztatikus, piezoelektromos és elektromágneses módszer. Az elektrosztatikus átalakítók úgy működnek, hogy a polarizált kondenzátor két elektródája közötti átfedési távolság megváltozik, amikor a rendszert vibráció éri. A bevezetett mozgás hatására a kondenzátor belsejében a feszültség megváltozik, és így áramot hoz létre, amely külső áramkörrel kinyerhető. A piezoelektromos átalakítók külső rezgések segítségével deformálják a piezoelektromos kerámiát, ami feszültséget hoz létre a kondenzátorban, és ezáltal

elektromos energiát termel. Végül az elektromágneses átalakítók a mágnes és a tekercs közötti relatív mozgást használják a mágneses fluxus megváltoztatására a rendszerben. Ez váltakozó áramot és feszültséget generál a tekercsen.

Bár a mechanikai energia elektromossá alakításának piezoelektromos módszere nagyon hatékonynak bizonyult [49], a járműfelfüggesztési rendszerekben való alkalmazását még alaposan tesztelni kell. Úgy tűnik, hogy a piezoelektromosság tudománya terén a legnagyobb előrelépés a mikroszkopikus alkalmazásokban, például a MEMS kifejlesztésében érhető el [52]. Ugyanezt állítja Beeby [53] az elektrosztatikus generátorok kapcsán is, ezek a legalkalmasabbak MEMS alkalmazásokhoz is. A piezoelektromos és elektrosztatikus felhasználási módokhoz képest sok szakirodalom foglalkozik a jármű felfüggesztési rendszereiben alkalmazott elektromágneses átalakítók alkalmazásával. A már elismert rendszerek között olyanok szerepelnek, mint a gömbcsapos és fogasléces fogaskerék felfüggesztési rendszer, a hidraulikus átviteli elektromágneses rendszer, a lineáris elektromágneses rendszer és a regeneratív magnetorheológiai (MR) lengéscsillapító rendszerek.

A környezetvédelmi kérdések, mint például a fosszilis tüzelőanyagok kimerülése, a súlyos légszennyezés és a globális felmelegedés, az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb figyelmet kaptak az emberi egészségre és a fenntartható fejlődésre jelentett veszély miatt. Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége szerint 2018-ban a közlekedési ágazat az Egyesült Államok teljes üvegházhatású gázkibocsátásának 28,2%-át tette ki, azaz a legnagyobb szennyező volt [54]. A járművek üzemanyag-fogyasztása az ÜHG-kibocsátás fő forrása világszerte, és a közlekedési ágazatban felhasznált üzemanyag több mint 90%-a benzin és gázolaj [55]. Az ÜHG-kibocsátás csökkentése és a primer energiaforrások megőrzése érdekében egyre nagyobb figyelmet kapnak az egyéb energiaforrásokkal hajtott járművek, mint például az akkumulátoros elektromos járművek. Az elektromos járművek esetében azonban mindenképp megemlítést érdemelnek hátrányos tulajdonságai is mint például a korlátozott hatótávolság, az extra töltési idő és a túlterhelt akkumulátorok.

Így a belső égésű motort elektromos motorral kombináló hibrid elektromos járműveket fejlesztették ki széles körben, mivel egyesítik az elektromos járművek és a belsőégésű motorok előnyeit. A belső égésű járművekhez képest a hibridek kevesebb fosszilis tüzelőanyagot fogyasztanak, és alacsonyabb károsanyag kibocsátást eredményeznek; míg az elektromos járművekkel összehasonlítva a hibridek átlépi a távolsági korlátot a belső égésű motorok és az

öntöltő akkumulátorok szinergiája miatt [56]. A főként elektromos meghajtást használó plug-in hibrid elektromos járművekkel ellentétben a hibrideket nem lehet közvetlenül a hálózatról tölteni, és két hajtásláncra támaszkodnak a teljesítmény optimalizálása érdekében [56]. Ha alacsony az energiaigény, a hibridek elektromos meghajtást alkalmaznak, amely városi területekre alkalmas és a károsanyag kibocsátás csökkenéséhez vezet. Ha nagy az energiaigény, a hibridek a belső égésű motort használják meghajtásra [57]. A hajtáslánc típusa alapján a hibrideket soros, párhuzamos és soros-párhuzamos hibridekre oszthatjuk [58].

A soros hibridek esetében a kerekeket csak az elektromos motor hajtja, és a belső égésű motort, amely általában kisebb, mint a párhuzamos hibridekben, az akkumulátorok töltésére vagy az elektromos motor táplálására használják [59]. Párhuzamos hibridek esetén az elektromos motor és a belső égésű motor is képes mechanikai erőt továbbítani a hajtott kerekekre. A soros-párhuzamos hibridek egyesítik a párhuzamos és a soros hibridek tulajdonságait, és összességében hatékonyabbak, mivel a soros hibridek nagyobb hatékonysággal rendelkeznek alacsony sebesség esetén, a párhuzamos hibridek pedig nagy sebességű haladás esetén [60]. Chau és társai arra a következtetésre jutott, hogy a hibridek nemcsak átmeneti megoldást jelentenek az elektromos járművek fokozott használatára, hanem a szuper-ultraalacsony kibocsátású járművek alkalmazásában is megvalósíthatók [61]. Kebriaei és társai áttekintették a hibrideket, különös tekintettel az osztályozásra, a járműtípusokra, az előnyökre és hátrányokra, valamint az energiagazdálkodási stratégiákra [62]. Azt jósolták, hogy a hibridek nagyobb érdeklődést fognak felkelteni az autóipar és a komoly környezetvédelmi aggályokkal küzdő fogyasztók körében [61]. A hibridek tervezése során azonban kihívásokat jelent az energiaforrás-kezelés, az akkumulátor és a motor méretének optimalizálása, valamint a komplex hibrid hajtáslánc tervezése [56].

Mivel a hibridek belső égésű motorokkal és villanymotorral is meghajthatók, az energiagyűjtési és emisszió-csökkentési módszerek mind tüzelőanyag-tüzelés, mind akkumulátor (energiatárolás) szempontból megvalósíthatók. Az energia-visszanyerő és a kibocsátás-csökkentési technológiák lehetőségeit az alábbiakban foglalhatjuk össze:

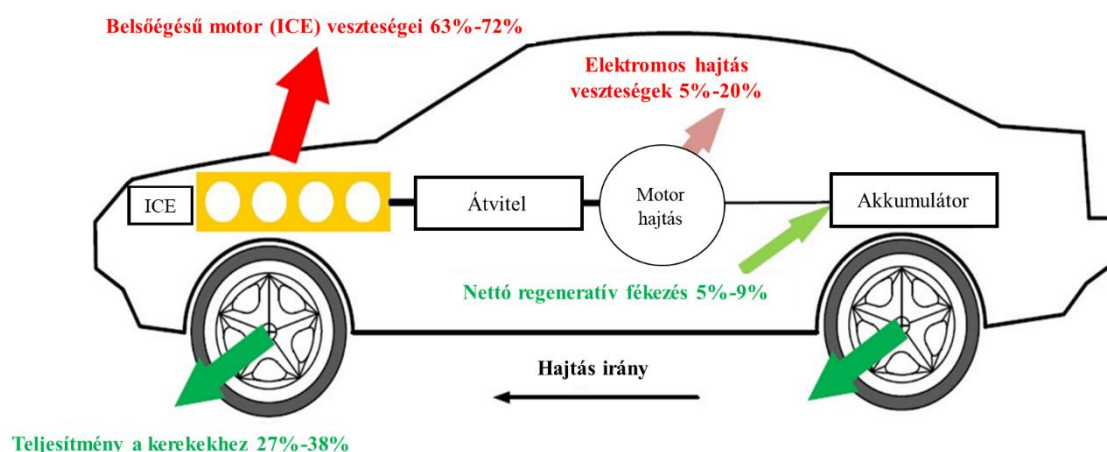
- 1) a belső égésű motorból származó hulladékhő-visszanyerés,
- 2) a vibrációból és fékezésből származó mechanikai energia-visszanyerés,
- 3) az üzemanyag-felhasználás hatékonyságának növelése és az alternatív üzemanyagok és
- 4) a megújuló energia integrálása.

Egy soros elvű hibrid modellben például 63-72 %-os az energiaveszteség egy belső égésű motorban és 5-20 %-os az energiaveszteség az elektromos hajtásban, amit a 3-1. ábra

szemléltet.[94] A hosszabb hatótáv, az alacsonyabb üzemanyag-fogyasztás és az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának csökkentése érdekében:

- minimalizálni kell és/vagy vissza kell nyerni az elpazarolt energiát,
- javítani kell a tüzelőanyag elégetéséből származó energiafelhasználás hatékonyságát,
- alternatív tüzelőanyagok bevezetésének vizsgálata
- hasznosítani kell a mechanikai energiát, mivel a járműben a vibrációból és a fékezésből adódó energia visszanyerhető.

Kifejlesztettek néhány módszert, mint például a Seebeck-effektust használó termoelektromos generátorokat (TEG) a kipufogógázok hőenergia-visszanyerésére [63], a piezoelektromos effektust alkalmazó rezgéscsillapítókat [64], az alternatív üzemanyagokat és a megújuló energia integrálását az üvegházhatású gázokkibocsátásának csökkentése érdekében.



3-1. ábra: Soros hibridhajtás energiavesztése [94]

A termoelektromos generátorokat csendes működésük és a mozgó alkatrészek hiánya miatt általában az egyik legígéretesebb módszernek tartják a hulladékhő visszanyerésében [65]. Agudelo és társai és Stevens és társai a kipufogógáz-energia-visszanyerés lehetőségeit és egy bizonyos kipufogórendszer elméleti határait vizsgálták. Eredményeik azt mutatták, hogy a kipufogódob képviseli a legnagyobb energiavesztést hő tekintetében, így alkalmas hely a hulladékhő visszanyerésére [66][67]. Ezen túlmenően előnyös az energia begyűjtése lökés, vibráció és fékezés közben majd az akkumulátorokban való tárolása.

Abdelkareem és társai áttekintették az energiafelhasználáson alapuló járműfelfüggesztést, és azonosították a regeneratív energiaalapú felfüggesztés két előnyét: 1) akár 3%-os vagy 0,3–0,5 literes becsült üzemanyag-megtakarítás 100 kilométerenként; 2) kényelmesebb utazás elérése saját meghajtású felfüggesztéssel, kevesebb károsanyag kibocsátással [68].

Összefoglalva, a HEV-ek általános energiagyűjtési és emisszió-csökkentési technológiáit a 2. táblázat sorolja fel, és néhány, ezekkel a módszerekkel működő járműmodell a 3. táblázatban található (néhány csak prototípus).

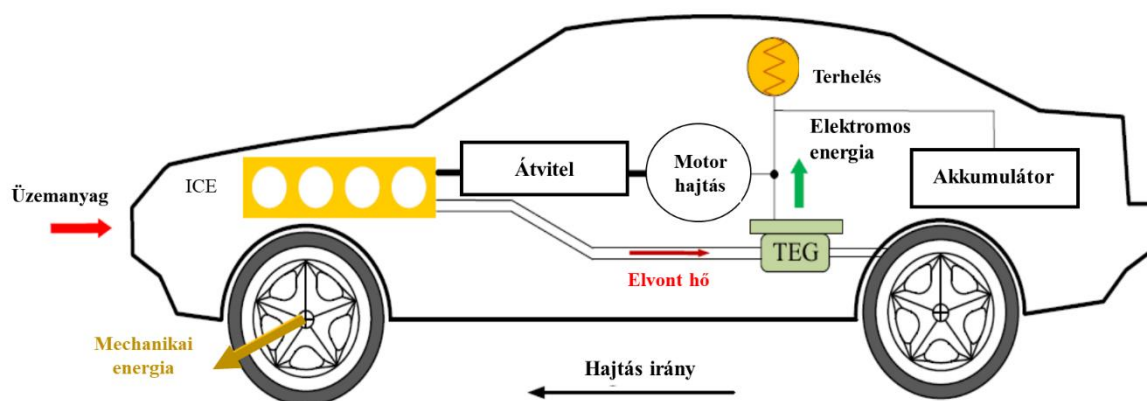
2. táblázat: HEV-ek általános energiagyűjtési és emisszió-csökkentési technológiái

<i>Technológia</i>	<i>Energiaforrás</i>	<i>Becsült javulás</i>
Hulladékhő visszanyerése		
TEG	kipufogógázból származó hőenergia	energiamegtakarítási lehetőség 1-5%
RC	hőenergia a kipufogógázból és a hűtőkörből	energiamegtakarítási lehetőség 10%
Turbófeltöltő	kipufogógázból származó hőenergia	30-50%-os üzemanyag-megtakarítás és 5-20%-os motortérfogat-csökkentés
Turbo-compound	kipufogógázból származó hőenergia	üzemanyag-takarékossági előny 3-10%
Mechanikai energiavisszanyerés		
Piezoelektromos rezgéscsillapító	vibráció és ütések	12V-os ólom-savas akkumulátor töltése
Flywheel	fékezés	20-30%-os üzemanyag-megtakarítás
Mozgási energia visszanyerése		akár 40%-os üzemanyag-megtakarítás
Biokémiai energia visszanyerése		
Üzemanyag kezelés	rejtett kémiai energia az üzemanyagokban	különböző tényezőktől függ
Alternatív üzemanyagok	tiszta üzemanyagok	akár 27,6%-os ÜHG kibocsátás csökkentés
Nap- és szélenergia		
Napelemes tető	napenergia	akár 30%-os energiamegtakarítást is elérhet, de különböző tényezőktől függ
Szélturbina	szélenergia	különböző tényezőktől függ

3. táblázat: Járműmodellek energiagyűjtési és kibocsátáscsökkentési módszerekkel

<i>Gyártó (modell)</i>	<i>Technológia</i>	<i>Jellemzők</i>
BMW	TEG	Eléri a ~750 W teljesítményt
Honda	TEG	~500W teljesítményt termel 32 TEG modullal egy HEV-ben
Ford	TEG	~400W-ot termel 4,6 kg termoelektromos anyaggal
Renault	TEG	~1kW teljesítményt termel egy dízelmotorral
Flybrid Systems	Flywheel	25%-kal növeli az üzemanyag-hatékonyságot
Porsche (911 GT3 R hibryd)	Flywheel	pörgési lendületet generál, amikor a vezető sebességet vált
Legtöbb HEV	Regeneratív fékezés	visszanyeri, tárolja és újrafelhasználja a fékezési energia egy részét az üzemanyag-hatékonyság vagy a hatótávolság növelése érdekében

Vattenfall solar team (Nuna series)	<i>napelem</i>	akár 34%-os hatékonyságot érhet el gallium-arzenid napelemekkel és LiPo akkumulátorokkal
Toyota (Prius plug-in hibryd solar)	<i>napelem</i>	gy emutatóban 860 W-ot termel, a napelemek átalakítási hatékonysága eléri a 34%-ot
Hyundai (Sonata hibryd)	<i>napelem</i>	sorozatgyártású napelemekkel az akkumulátor 30-60%-át tölti fel naponta
Lightyear (Lightyear One)	<i>napelem</i>	előrevetített ~12 km hatótáv 1 óra napelemes töltés után
Sono Motors (Sion)	<i>napelem</i>	1,2 kW csúcsteljesítményt termel 248 napelemmel, hetente akár 245 km-es hatótávolsággal



3-2. ábra: Egy tipikus termoelektromos generátor hulladékhővisszanyerő rendszer elrendezése HEV-ben [94]

Az elvégzett irodalomkutatásból arra lehet következtetni, hogy a gépjárművekben alkalmazható Harvesting rendszerekből a mechanikai energiát felhasználó rendszerek már kiforrott technológiát képviselnek. A hőenergia visszanyerésnek talán az egyedüli berendezése a termoelektromos generátor, mely felhasználását leggyakrabban a belső égésű motor kipufogó rendszerére méretezték, hiszen ott áll rendelkezésünkre a legmagasabb hőmérséklet.

A disszertációm további részében részletesen foglalkozom a termoelektromos generátorok működésével, karakterisztikaival és megvizsgálom a hibrid és elektromos járművek egyéb elemeinél történő hőenergiavisszanyerés lehetőségeit.

3.1 Az autódiagnosztikai rendszerek kialakulása és fejlődése

Az autók fejlesztéséhez elengedhetetlen a már létező járművek folyamatos vizsgálata és elemzése. Kezdetben a jármű tömege, sebessége és a megtett útból számított fogyasztása volt elérhető. Ez később speciális értékekkel bővült, mint a légellenállás vagy a kerekek tapadási súrlódásának mérése. Ezen értékek csak speciális eszközökkel mérhetők, amelyek általában az autógyárakban és kutatóközpontokban találhatók meg.

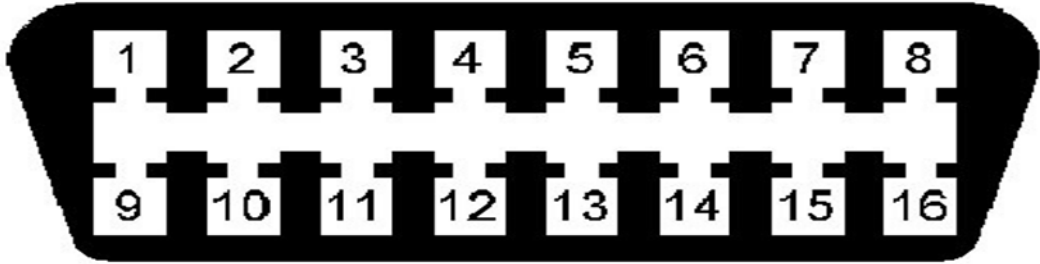
A digitális technika és számítógépek elterjedésével, az autók menetdinamikai jellemzőinek mérése általános, mindenki számára elérhető közelségbe került. A fedélzeti diagnosztikai rendszerek segítségével, a legtöbb menetdinamikai adat rögzítésre kerül, amelyet utólagosan is kiolvashatunk az autónk fedélzeti számítógépéből.

Az On-Board Diagnostics (OBD) az 1980-as évektől megjelenő, majd a 2000-es évek után széles körben alkalmazott diagnosztikai rendszer, amely a gépjármű szenzoraiból érkező jelek feldolgozását szolgálja. Az első, kezdetleges rendszer egészen 1968-ig nyúlik vissza, amelyet a Volkswagen mutatott be a Type 3 modellben. Ezt követően a gyártók sorra mutatták be saját fejlesztésű megoldásaikat.

Az OBD-I rendszer elsőként az USA Kalifornia államában tették kötelezővé 1988-ban. Ezt követően egyre több helyen elfogadott és kötelező szabvánnyá vált. A diagnosztikai csatlakozó nem volt szabványosított, a hibakódok gyártófüggőek voltak. A motort ellenőrző rendszerek és visszajelző lámpák szintén eltérést mutattak. Az OBD-I előírja, hogy minden olyan rendszert ellenőrizni kell, amely emisszió korlátozó feladatot lát el. A rendszer csak hibafelismerési kötelezettséget ír elő, a felismert hibát az irányító egység memóriájában kell eltárolni. A tényleges hiba azonosítása MIL (Malfunction Indicator Light) jelzőlámpán keresztül vagy soros porton kiolvasható [69].

Az OBD-II bevezetése az 1994-es évtől kezdődött. Európai megfelelője az EOBD, amely megfelel az OBD-II követelményeinek. Az Európai Unióban a benzines gépjárművekben 2001-től, a gázolajos járművekben 2004-től kötelező ilyen rendszert alkalmazni. Ez a rendszer már szabványosított csatlakozóval és protokollal rendelkezett, a hibakódokat és az emisszió ellenőrző rendszert is egyértelműsítették. A mai napig az OBD-II rendszer található a gépjárművekben.

Az új rendszer képes az egyes részelemek és funkciók hibás állapotán kívül, a romlás mértékét is azonosítani. Hiba bekövetkezésénél a paraméterkörnyezet is rögzítésre kerül. A MIL lámpa már képes villogó jelzésre. A hibák kiolvashatók számítógépek segítségével szabványosított módon.



Pin	Leírás	Pin	Leírás
1	Eladói opció	9	Eladói opció
2	J1850 Bus +	10	J1850 Bus
3	Eladói opció	11	Eladói opció
4	Alvázföldelés	12	Eladói opció
5	Jelföldelés	13	Eladói opció
6	CAN (J-2234) Magas	14	CAN (J-2234) Alacsony
7	ISO 9141-2K-Vonal	15	ISO 9141-2 Alacsony
8	Eladói opció	16	Akkumulátorteljesítmény

3-3. ábra: Az OBD-II csatlakozó lábkiosztása [70]

Bizonyos kivezetések előre meghatározott szabványt követnek, míg léteznek a gyártók által szabadon felhasználhatók is. Ezeket a fedélzeti irányítóegységekkel való soros kapcsolatra használhatják. Ilyen irányítóegységek közé tartozik a légzsák, a hajtómű vagy a blokkolásgátló fékrendszer.

Az ISO 15031 szabvány definiálja az OBD-II rendszerben használt üzemmódokat, adatformátumokat és funkciókat. A 4. táblázat szemlélteti az OBD-II által támogatott 10 üzemmódot.

4. táblázat: Az ISO 15031 által definiált üzemmódok

Mód (hex)	A választott mód leírása
01	Rendszer-diagnosztikai adatok
02	Környezeti paraméterek kiolvasása
03	Hibakód lekérdezés
04	Hibatároló törlése
05	Lambda szonda tesztertékek kijelzése
06	Nem folyamatosan felügyelt rendszerek vizsgálata
07	Szporadikus hibák kiolvasása
08	Beavatkozó teszt
09	Járműspecifikus adatok
0A	Állandó diagnosztikai hibák

A hibák megjelenítése és tárolása kódolva történik. A DTC (Diagnostic Trouble Codes), azaz hibakódok 4 információ egységből és 5 karakterből állnak.

- 1. karakter: jármű alrendszer
- 2. karakter: kód-illetékesség
- 3. karakter: alrendszer, alkatrészcsoporth
- 4. és 5. karakter: rendszerelem azonosító

A B0, C0 és P0 hibakódokat szabvány definiálja, amelyek minden gyártóra nézve kötelezők. A B1, B2, C1, C2, P1 és P2 azonosítása a gyártók számára csak ajánlás.

3.2 Vezetéstámogató rendszerek fejlesztésével kapcsolatos kutatások

A folyamatosan fejlődő technológia jobbnál jobb lehetőségeket nyújt a kutatók számára, ezáltal egyre több tanulmány készül a vezetéstámogató rendszerek fejlesztésével kapcsolatban, melyekről az alábbiakban egy összefoglalást adok.

Amit Choksi fejlesztése olyan rendszert mutat be, mely képfeldolgozó algoritmusok segítségével segíti a gépjárművezetőt a megfelelően felfestett és kitáblázott útvonalakon. A kamera érzékeli a sávokat, továbbá van egy szervomotor, amely a kormánykerék vezérlésére szolgál annak érdekében, hogy az autót a saját sávjában tartsa. A képfeldolgozó kód OpenCV-ben íródott és egy Raspberry PI egykártyás számítógépen fut, mely a kormánykerék vezérléséért felelős, a kamera által szolgáltatott bemenőjelek alapján. [71]

Luis Barba-Guaman és társai tanulmányukban egy gyalogos- és gépjárműfelismerő alkalmazást fejlesztenek ki, mely egy dedikált GPU-val rendelkező beágyazott rendszeren, egy NVIDIA Jetson Nano-n fut. Az objektumfelismerés mély neurális hálók által valósul meg. A kutatásban öt különböző előtanított hálót használnak: PedNet, MultiPed, SSD-MobileNet v1 és v2, illetve SSD-Inception v2. A felsorolt neurális hálókat összesen 7150 db képen tesztelték, gyalogosfelismerésre a PedNet és MultiPed modellek nyújtották a legjobb pontosságot, míg gépjárműdetektálásra az SSD-MobileNet v2 és az SSD-Inception-v2 háló. [72]

A számítógépes látáson alapuló vezetéstámogató rendszerek egyik legnagyobb kihívása a dinamikusan változó látási körülmények kezelése. Koray Ozcan és társai olyan algoritmuson dolgoznak, mely képes érzékelni kamerakép alapján az útburkolat állapotát és az éppen aktuális időjárást. A látási viszony érzékelése egyedi betanított neurális háló által valósul meg. Ehhez több ezer képet készítettek az utakon, melyek a neurális háló (VGG16) tanító adathalmazát képezik. A betanítás után a modell háromféle látási körülményt képes érzékelni: száraz, nedves és havas. [73]

Egyre több tanulmány készül az intelligens felügyeleti rendszerek fejlesztéséről is. Ilyen például a fáradtság-, éberségfigyelő rendszer. A mai világban sokkal több álmos sofőr vezet, mint ahogy gondolnánk. Ezen kívül a mai társadalomban a szállítás, a fuvarozás, mind nélkülözhetetlen logisztikai folyamat, melyek mindennapi életünk részét képezik. Azok a személyek, akiknek ez a megélhetésük, naponta több órát vezetnek és meg kell küzdeniük a fáradtsággal. Sajnos rengeteg baleset tulajdonítható a sofőrök figyelmetlenségének, melyet a kialvatlanság okoz. V. Sanjay Kumar és társai kutatásukban olyan rendszer fejlesztésével foglalkoznak, mely egyszerre három, egymással összekapcsolt modulból áll: gépjárművezető fáradtságészlelése, alkoholtartalom érzékelés és baleset detektálás. A rendszerben a fáradtságérzékelés számítógépes látás által van detektálva, mely az álmoság jeleire irányul, mint például az ásítás, gyakori pislogás vagy a fejrázás. A második modul, az alkoholtartalom-érzékelő mechanizmus, az elektrokémia fogalmain alapul. A gázérzékelő (MQ3) belsejében lévő elektródán, alkoholgázmolekulák hatására, elektrokémiai reakció megy végbe, mely eredményeként feszültség keletkezik és információként kerül kiküldésre a rendszerben használt Raspberry PI számítógépnek. Az utolsó modul a piezoelektromos koncepción alapszik. Amikor egy autó balesetet szenved, azt hatalmas mechanikai energia éri, melyet a prototípus piezoelektromos érzékelője elektromos energiává alakít át. Előállítja a szükséges feszültséget, majd továbbítja a Raspberry PI miniszámítógépnek. Legvégül, ez a rendszer IoT alapú, ezáltal

képes értesíteni a kijelölt személyeket GSM modulon keresztül internetes hívás és üzenet által. [74]

Ahmad Aljaafreh kutatómunkájában egy olyan rendszeren dolgozik, mely a gépjárművezető fiziológiai és pszichológiai állapotát monitorizálja számítógépes látás és neurális háló segítségével. Az algoritmus a járműben lévő kamerán keresztül folyamatosan figyelemmel kíséri a sofőr tevékenységét, hogy észlelje a rendellenes vezetési magatartást, illetve kiszűrje azokat a pillanatokat, amikor a gépjárművezető figyelmét eltereli valami az úttestről. Ehhez a sofőr fejpózát és a szemének forgási vektorát vizsgálja az alkalmazott ESN (Echo State Network) neurális háló, mely egy NVIDIA Jetson Nano-n fut. A rendszer 98%-os pontossággal képes kiszűrni a gépjárművezető gyanús, szokatlan viselkedéseit. [75]

A fentebb említett kutatómunkák mindegyike a digitális képfeldolgozáson és számítógépes látáson alapszik.

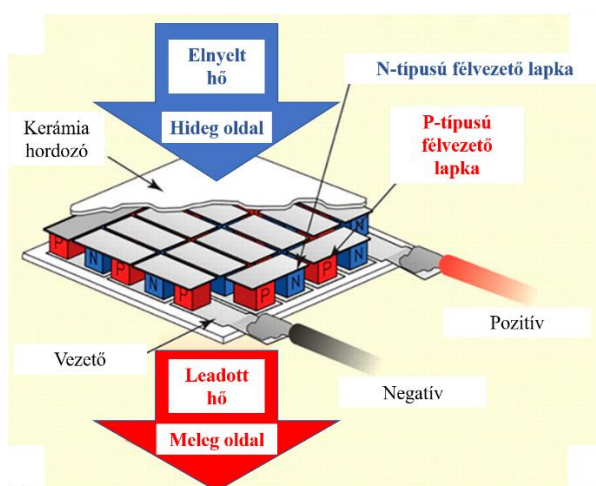
3.3 Napjaink legfrissebb kutatási eredményei a Termoelektromos generátorok alkalmazásával kapcsolatosan

A következő tanulmány egy olyan módszert ír le, amely két kritérium alapján egy optimalizált termoelektromos generátor (TEG) illesztését teszi lehetővé egy elektromos járműhöz. Ennek alapján a TEG elektromos terhelési ellenállását és konfigurációját optimalizálták, ami 11,6%-os nettó teljesítménysűrűség-növekedést eredményezett az előzetesen tervezett TEG-hez képest [76]. Lan és társai egy TEG prototípus teljesítményét hasonlítják össze szimulációs és valós teszt eredményekből, egy hagyományos belsőégésű járművön és egy elektromos járművön [77]. Nader egy megnövelt hatótávolságú hibrid elektromos jármű üzemanyag-megtakarítási lehetőségeit vizsgálja [78]. Mohamed és társai egy tesztrendszer alapján felállítottak egy szimulációt, amely az alacsony minőségű hulladék hő hasznosítására szolgál [79]. Luo és társai egy új fluid-termikus-elektromos multifizikai numerikus modellt mutatnak be, egy autóipari hulladékhő visszanyerésben alkalmazott termoelektromos generátorrendszer teljesítményének előrejelzésére [80]. Abbasi és társai egy rugalmas mérőrendszert mutatnak be, ami a mért értékeket egy számítógépnek továbbítja. A rendszer méri a jármű hőmérsékletét különböző pontokon vezetés közben [81]. Sousa és társai bemutatnak egy olyan hőmérséklet-szabályozott termoelektromos generátor-koncepció optimalizálását és értékelését, amelyet egy nehéz haszongépjárműben kívánnak alkalmazni [82]. Coulibaly és társai egy új megközelítést alkalmaznak az elektromos autók fékezésekor keletkezett hő hasznosítására. Szimulált eredményeket mutatnak be, ahol több szituációt tesztelnek [83]. Aljaghtham és társai a

belsőégésű járművek olaj tartájának a hőveszteségét használták ki, ehhez egy kiterjedt multifizikai szimulációs keretrendszer vezeték be a hő villamos energiává történő átalakításának pontos szimulálására [84]. Atmajaya és társai egy termoelektromos generátor fejlesztésébe kezdtek, ami kimondottan diesel motorok hőveszteségeit kívánja újrahasznosítani [85]. Olabi és társai tanulmányukban a termoelektromos rendszerek más technológiákkal való integrációját mutatják be a környezetbarát energiatermelés érdekében [86]. Khoshnevisan és társai dinamikusan terveztek és modelleztek egy termoelektromos generátorral ellátott hibrid elektromos járművet [87]. Kumar és társai a belsőégésű járművek kipufogó hőveszteségének felhasználhatóságát vizsgálták [88]. Omar és társai egy Honda típusú motorkerékpáron vizsgálták meg a termoelektromos generátorok energiavisszanyerő hatását [89]. Yanez és társai a hőforrások hőgazdálkodására összpontosítanak a termoelektromos generátorok tervezésénél, valamint konkrét energiaforrások és prototípusok értékelésére szolgáló módszereket mutatnak be [90]. Zhu és társai egy kétszintű energiakitermelési stratégiát dolgoztak ki a kipufogógáz energiájának hatékony visszanyerésére dinamikus vezetési ciklusok esetén [91]. További releváns tudományos összefoglalók a következő tanulmányokban olvashatók [92][93][94].

4 Termoelektromos generátor szimulációja

A villamos berendezések működtetése közben a veszteségek szinte kizárólag hőenergia formájában távoznak a berendezésből. Az elektronikai gyártó cégek gigantikus összegeket költenek a berendezések ideális hűtésének kifejlesztésére. A termoelektromos generátor (TEG) hőmérséklet különbség hatására villamos energiát állít elő, ezzel nagymértékben hozzájárul az elektronikai berendezések hőleadási képesség növeléséhez, hiszen hőt von el és még energiát is termel. A TEG-ok kialakításában három fő alkotóelem vesz részt: egy n-típusú félvezető, egy p-típusú félvezető és egy réz vezető, amely kontaktus felületet biztosít az egymást követő félvezetőknek. A leggyakrabban alkalmazott félvezető a Bizmut Tellurid (Bi_2Te_3). Az elemet 2 szigetelő felület fogja közre, amely leggyakrabban kerámia (Al_2O_3) anyagú. [95]



4-1. ábra: Termoelektromos generátor elvi felépítése [95]

A TEG-ok működés közben termoelektromos jelenségek zajlanak le, amelyeket három összefüggő jelenség ír le: a Seebeck, a Peltier és a Thomson effektus. A Seebeck hatás kimondja, hogy elektromos feszültség keletkezik, ha két különböző fém különböző hőmérsékleten tartott illesztései találkoznak. A Peltier hatás a Seebeck hatás ellentettje, azaz, ha kétféle anyagból álló hőelektromos elemen át áramot vezetünk, az érintkezési helyek felmelegszenek, vagy lehűlnek, aszerint, hogy az áram milyen irányban halad keresztül. A Thomson hatás pedig leírja, hogy a változó hőmérsékletű vezetőben a rajta átfolyó áram hatására az anyagtól és az áramiránytól függően hőelvonás vagy hőfejlődés jelentkezik. Ahhoz, hogy következtetni tudjunk a TEG működési mechanizmusára, pontosan meg kell oldani a

termoelektromos téregyenleteket. A jelenségek megértésére és kezelésére szimulációt végeztem a COMSOL Multiphysics® végelem szoftverrel.

A szimulációs program összeállításához meg kellett állapítani a megfelelő termoelektromos egyenleteket. [96]

Az áram egyensúlyi egyenlete:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0, \quad (9)$$

ahol:

σ : elektromos vezetőképesség [S/m]

V : elektromos potenciál [V]

Hőenergia egyensúlyi egyenletei:

$$\begin{aligned} \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q &= Q, \\ q &= -k \nabla T + \underline{\underline{PJ}}, \end{aligned} \quad (10)$$

ahol

ρ : sűrűség [kg/m³],

C_p : hő kapacitás [J/(kg·K)],

T : hőmérséklet [K],

q : hőáram [W/m²],

k : hővezetés [W/(m·K)],

P : Peltier koefficiens [V],

J : áramsűrűség [A/m²],

$Q = j \cdot (-\nabla V)$: Joule hő [W/m²].

A Thomson koefficiens a Seebeck (S) és a Peltier (P) koefficiensből számolható:

$$P = -ST. \quad (11)$$

Az energia egyenlet egyszerűbb alakra hozásához megszorozzuk az egyenlet mindkét oldalát egy T_{test} függvénnyel és integráljuk Ω szerint:

$$\int_{\Omega} \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} d\Omega + \int_{\Omega} (\nabla \cdot q) T_{test} d\Omega = \int_{\Omega} Q T_{test} d\Omega. \quad (12)$$

Vektor azonosságot felhasználva:

$$\nabla \cdot (T_{test} \cdot q) = q \cdot \nabla T_{test} + T_{test} \nabla \cdot q. \quad (13)$$

A 12. egyenletbe behelyettesítve:

$$\int_{\Omega} \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} d\Omega + \int_{\Omega} [\nabla \cdot (T_{test} \cdot q) - q \cdot \nabla T_{test}] d\Omega = \int_{\Omega} Q T_{test} d\Omega. \quad (14)$$

Alkalmazzuk a Gauss tételt:

$$\int_{\Omega} \nabla \cdot (T_{test} \cdot q) = \int_{\partial\Omega} T_{test} \cdot q \cdot n d\Omega, \quad (15)$$

ahol az n egység merőleges az Ω tartomány $n\Omega\partial$ határára, akkor a (15) egyenlet a következőképpen alakul:

$$\int_{\Omega} \rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} d\Omega + \int_{\partial\Omega} T_{test} \cdot q \cdot n d\Omega - \int_{\Omega} q \cdot \nabla T_{test} d\Omega = \int_{\Omega} Q T_{test} d\Omega. \quad (16)$$

A hőáramot a következőképpen adjuk meg:

$$q = -k\nabla T + PJ, \quad (17)$$

$$0 = \int_{\Omega} \left[-\rho C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} T_{test} + (-k\nabla T) \cdot \nabla T_{test} + (PJ) \cdot \nabla T_{test} + Q T_{test} \right] d\Omega - \int_{\partial\Omega} (q \cdot n) T_{test} d\Omega \quad (18)$$

A Peltier egyenlet egyszerűsítése:

$$\begin{aligned} (PJ) \nabla T_{test} &= PJ_x \frac{\partial T_{test}}{\partial x} + PJ_y \frac{\partial T_{test}}{\partial y} + PJ_z \frac{\partial T_{test}}{\partial z} = \\ &= P \cdot J_x \cdot test(Tx) + P \cdot J_y \cdot test(Ty) + P \cdot J_z \cdot test(Tz), \end{aligned}$$

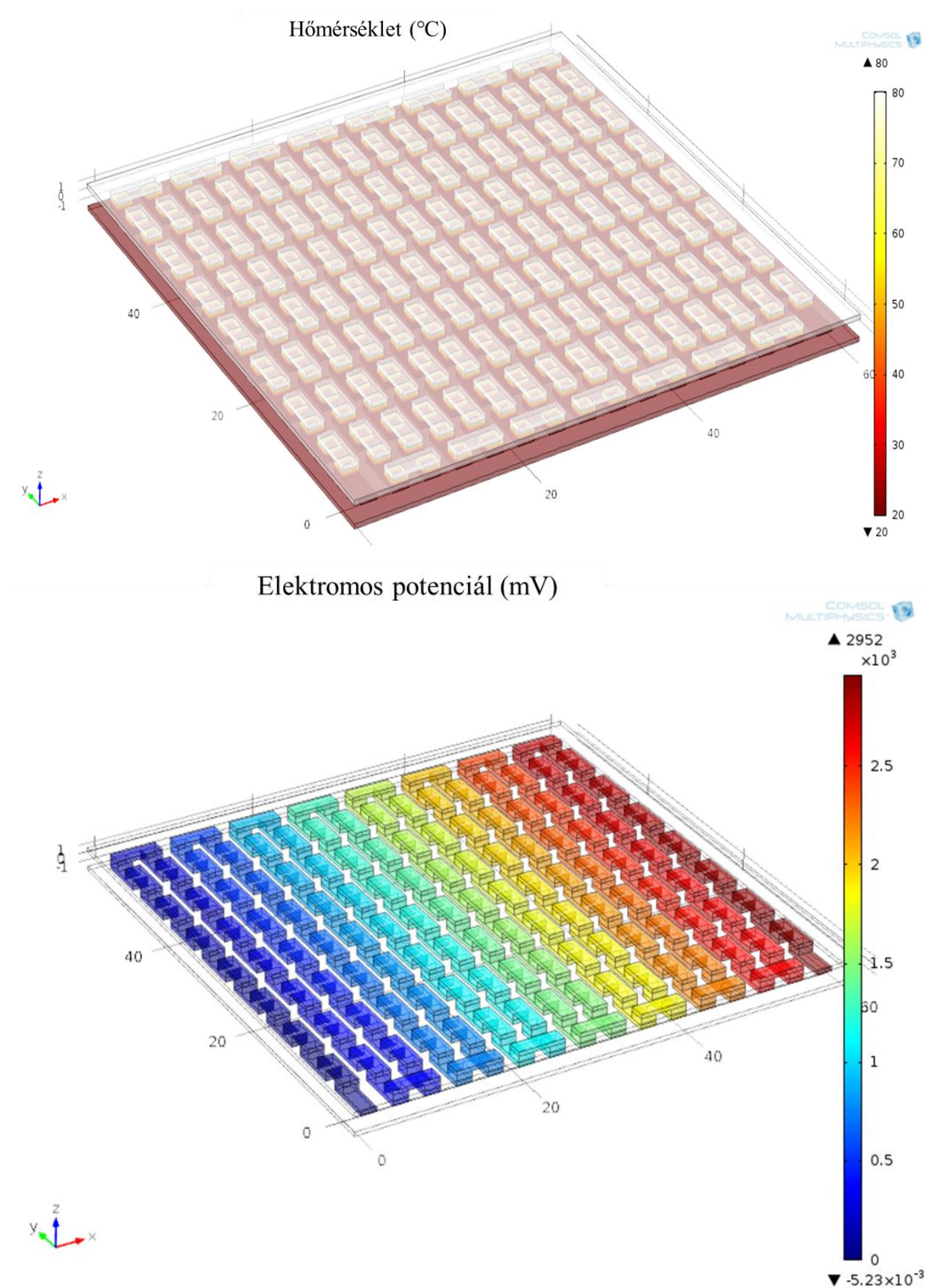
ahol $T_{test} = test(T)$ és $\frac{\partial T}{\partial x} = Tx, \frac{\partial T}{\partial y} = Ty, \frac{\partial T}{\partial z} = Tz$ igazodva a COMSOL program változóihoz.

A szimuláció során a (18) számú egyenletet számolja ki a program minden egyes geometriai pontban. A szimulációs modell létrehozásánál elsődleges szerepet játszott, a megvásárolt TEG modul, amely a kutatás egyik fő alkotóeleme. A szimulációs programban a geometriai és az anyagválasztási paramétereket a rendelkezésre álló TEG modul alapján határoztam meg.

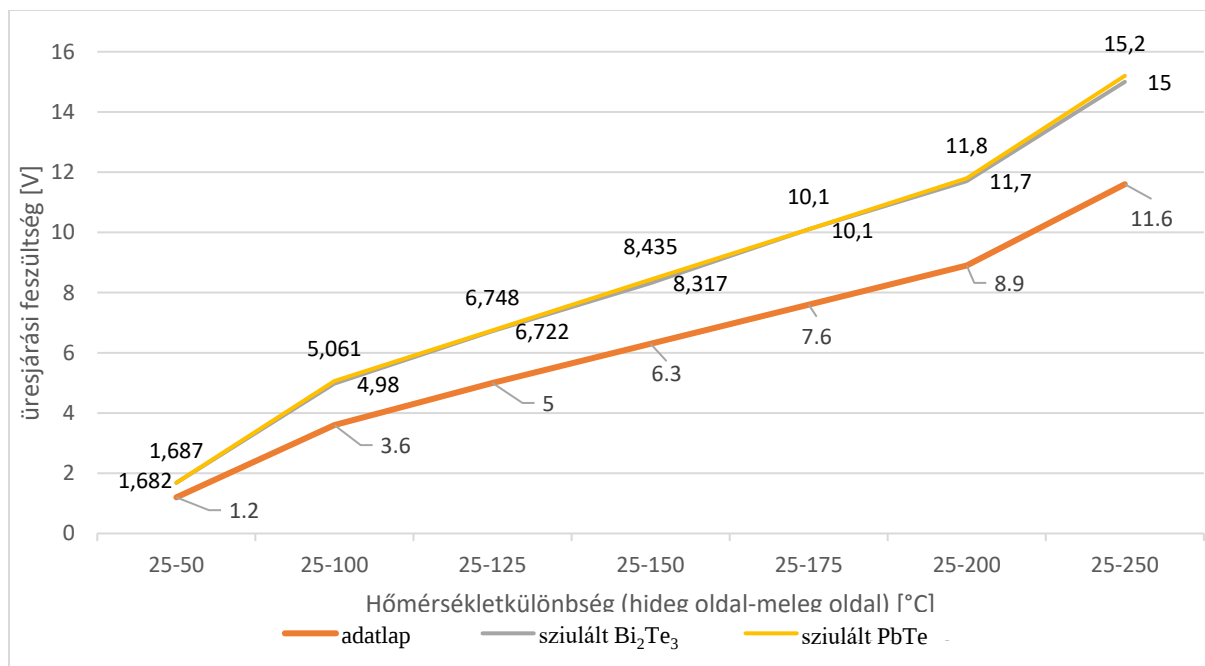
5. táblázat: Szimulációs elemek anyagjellemzői [96]

	Bizmut Tellurid	Ólom Tellurid	Réz	Alumínium Oxid
Seebeck koefficiens [V/K]	p: $200 \cdot 10^{-6}$ n: $-200 \cdot 10^{-6}$	p: $187 \cdot 10^{-6}$ n: $-187 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	-
Elektromos vezetőképesség [S/m]	$1,1 \cdot 10^5$	$6,0976 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^7$	$1,502 \cdot 10^{-7}$
Hővezető képesség [W/mK]	1,7	1,46	400	35
Hőkapacitás [J/kgK]	554	151	385	730
Sűrűség [kg/m ³]	7700	8160	8800	3965

A szimuláció során a 2 villamos szempontból szigetelő elemnek határoztam meg a hőmérsékletét, és vizsgáltam a TEG kivezetésein az üresjáratú feszültséget. Különböző hőmérséklet különbségeket vizsgáltam. A meleg oldalt 50°C -ként léptetve 300°C -ig vizsgáltam. A hideg oldalt pedig változatlanul 25°C -on hagytam. A TEG gyári adatai alapján maximum 300°C hőmérséklet különbséget képes elviselni. A szimuláció során a kerámia szigetelő külső felületére definiáltam az adott hőmérsékleteket. A vizsgálat célja, hogy adott hőmérséklet különbség hatására hogyan viselkedik a TEG villamos paraméterek szempontjából. Az elem egyik kontaktus felületét állandó 0V potenciálra állítottam és ehhez képest vizsgáltam a másik kontaktus felület értékét. A szimulációs hőmérsékleti értékeket kiegészítettem egy olyan hőmérsékleti értékpárral, amely legközelebb áll egy villamos berendezés üzemi és környezeti hőmérsékletéhez. Ez a 2 hőmérsékleti értékpár a $20\text{-}80^\circ\text{C}$ értékpár lett, melyhez kapcsolódó szimulációs eredményeket a 4-2. ábra mutatja be.



4-2. ábra: Comsol szimulációs eredmények a 20-80 °C hőmérséklet különbségeken



4-3. ábra: Termoelektromos generátor üresjárási feszültségének szimulált eredménye

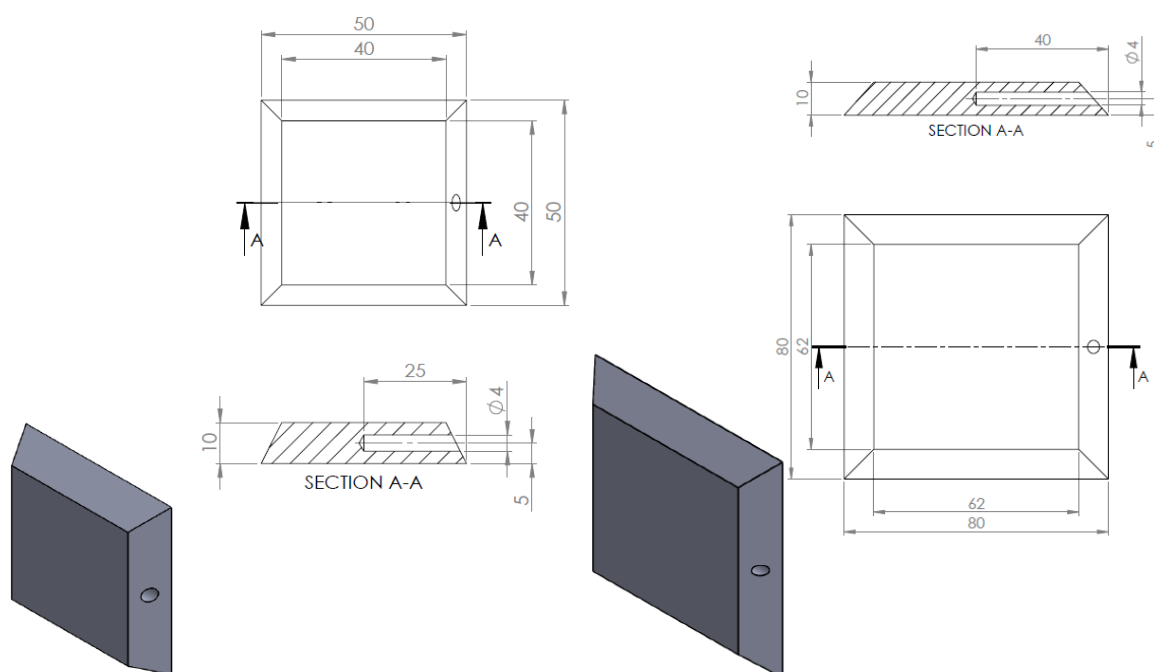
A szimulációs eredményeket grafikon formájában ábrázoltam melyet 4-3. ábra szemléltet. Leolvasható a grafikonról, hogy a Bi₂Te₃ anyagösszetételű TEG üresjárási feszültsége nagyobb, mint a PbTe anyagösszetételű változaté. 25-250°C hőmérséklet különbség esetén 15V üresjárási feszültség mérhető egy modul kimenetén. A szimulációs eredmények magasabb értékeket mutatnak, mint a TEG adatlapjában szereplő értékek, de meredekségük megegyezik. Ez a különbség abból adódhat, hogy a valóságos TEG félvezető elemei nem tisztán Bi₂Te₃ anyagból készültek, hanem valamilyen %-ban szennyező anyagot tartalmaznak, mely ront a modul hatásfokán. A szimulációk pedig tiszta, szennyeződés mentes Bi₂Te₃ anyagra lettek elvégezve. Összegezve, az adatok elemzését követően kijelenthető, hogy a szimulációs eredmények elfogadhatóak és sikeres volt a TEG szimulációja.

4.1 Termoelektromos generátor mérő és vezérlő berendezés

A Termoelektromos generátor végeelem szimulációját követően szerettem volna ellenőrizni, hogy a szimulációs eredmények mennyire valóságosak. Ahhoz, hogy ezt meg tudjam tenni, megfelelő feltételeket kellett biztosítani a TEG teszteléséhez. Az alapvető kiindulási paraméterek azok voltak, hogy a TEG-nek biztosítani kell meleg és hideg oldali vezérelt hőmérsékletet, 0-300 °C tartományban, érintésvédelmi szempontokat is figyelembe véve el kell szeparálni a melegoldali területeket. Biztosítani kell a meleg és hideg oldali hőmérsékletmérést, azzal egy időben a hőmérsékletszabályzás kimeneti jelét és a TEG-n mérhető villamos paraméterek mérését és feldolgozását. A paramétereket figyelembe véve terveztem egy olyan

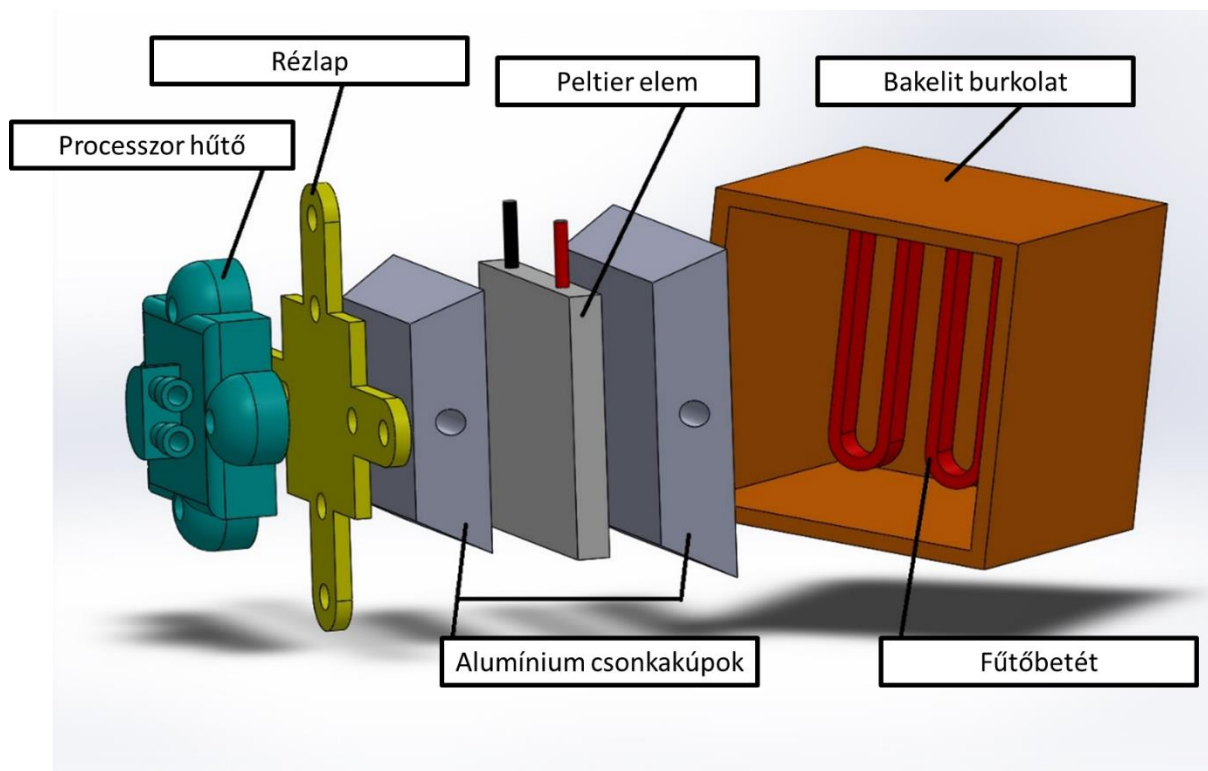
berendezést, amely képes különböző méretű TEG-k fogadására, hőmérséklet különbség szabályozásra a meleg és a hideg oldal között, valamint a TEG kimenetén villamos paraméterek mérésére és feldolgozására.

A fűtött oldal egy duplán szigetelt 12 mm vastagságú bakelitból készített dobozban elhelyezett 450W Infrared Top Ceramic Heater fűtőegységgel van felszerelve. Minden méretű TEG-hez modulárisan cserélhető alumínium közdarabot terveztem, amely magába foglal egy M4-s furatot. A furatban foglal helyet a K típusú hőelem, amely méri a meleg oldal hőmérsékletét. Az alumínium közdarab biztosítja a TEG modul teljes felületén az egyenletes hőmérséklet eloszlást.

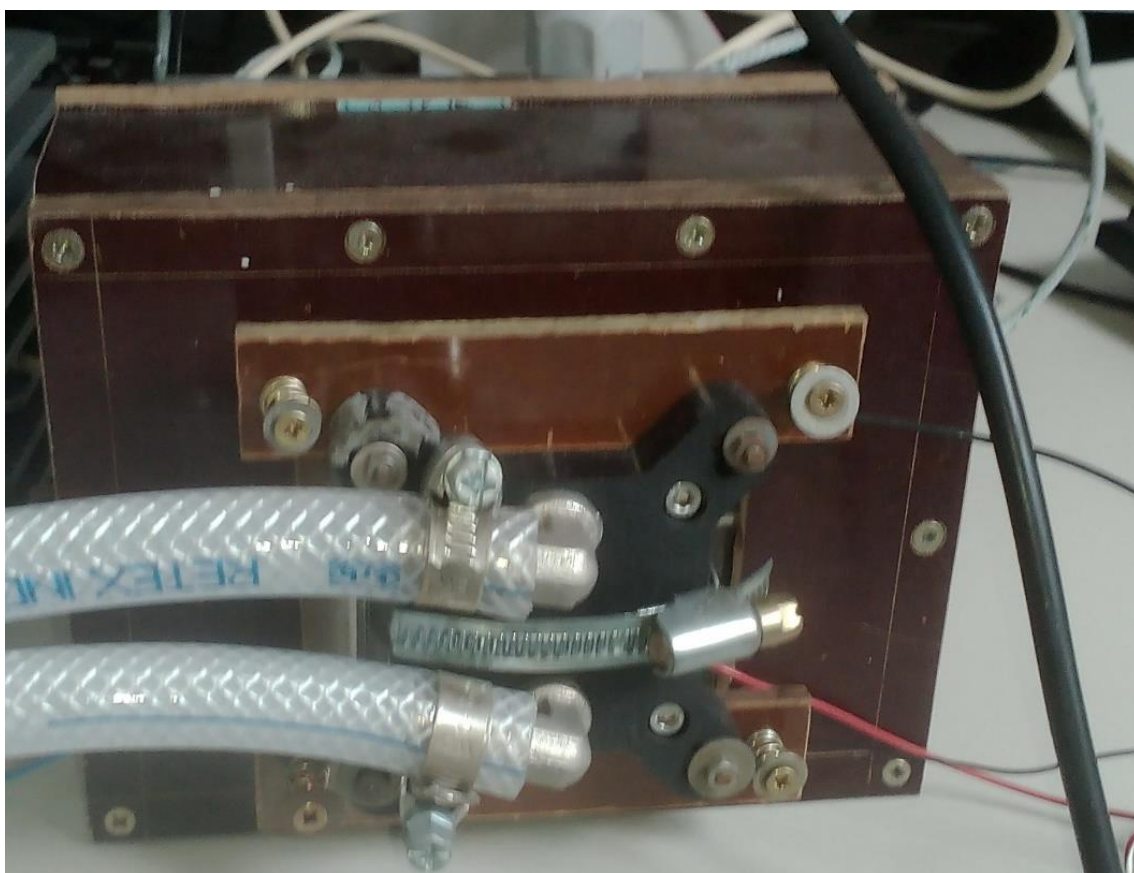


4-4. ábra: Alumínium közdarabok tervdokumentációja

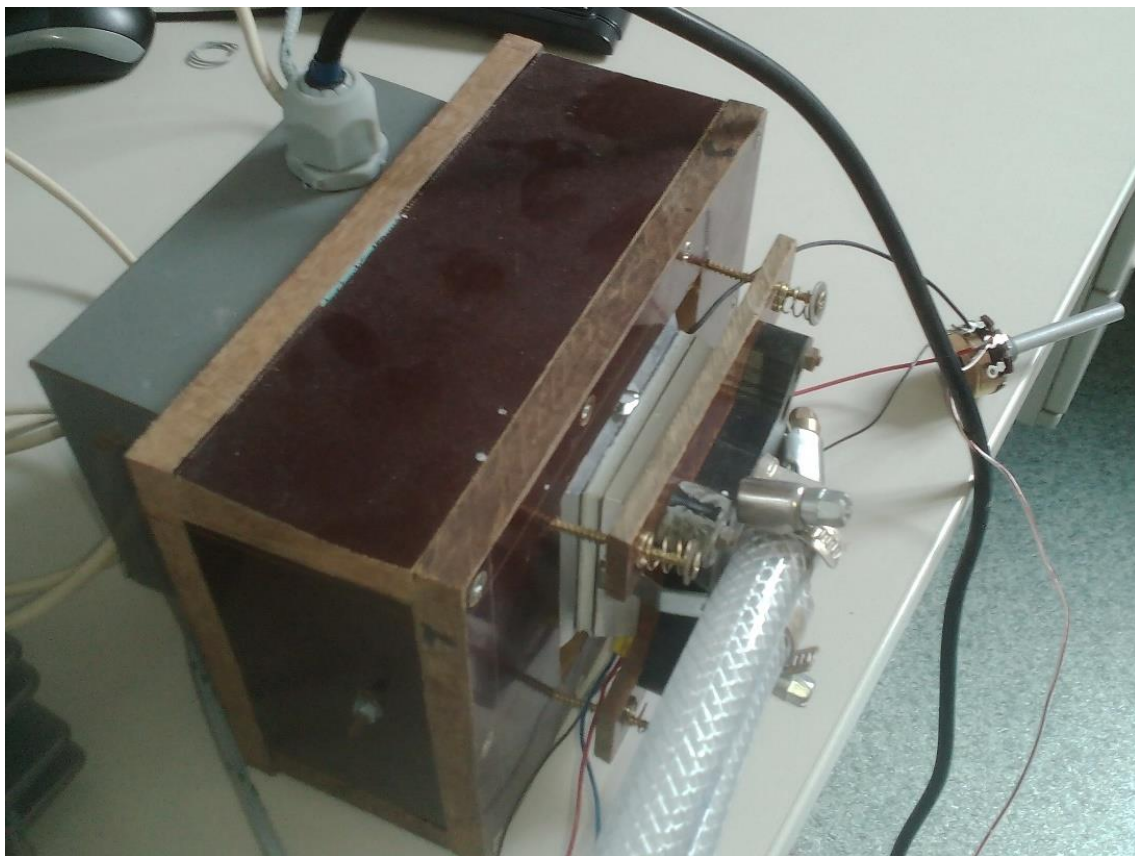
A hideg oldalt egy átfolyós hűtőbetéttel hűtöm, amely hálózati hidegvíz csatlakozással rendelkezik. A hűtő és a TEG modul között szintén található egy alumínium közdarab M4 furattal. A hideg oldal hőmérsékletét szintén K típusú hőelemmel mérem. Minden szabványos méretű TEG modulhoz terveztem 1-1 alumínium közdarabot, amely biztosítja a teljes felületen az egyenletes hőmérséklet eloszlást.



4-5. ábra: mérő és vezérlő berendezés felépítése



4-6. ábra: mérő és vezérlő berendezés



4-7. ábra: mérő és vezérlő berendezés

A mérő és vezérlőrendszer megtervezésekor több szempontot is figyelembe kellett venni. Több típusú mérő jelet kell egyszerre azonos időben mérni, és vezérlő jelet vezérelni. A mérendő jelek közül 2 db K típusú hőelem kimeneti jelét, a TEG kimenetén mérhető feszültség és áram értékek jeleit szükséges mérni, valamint a meleg oldali fűtőbetét fokozatmentes szabályozójelét kell biztosítani. A felsorolt paramétereket figyelembe véve, a feladatra talán leinkább alkalmas National Instruments Compact szériás, modulárisan felépíthető rendszerét választottam. A mérő és vezérlő rendszer központi egységét egy cRIO-9030 vezérlő adja, amely 1,33 GHz Dual-Core CPU, 1 GB DRAM, 4 GB Storage, Kintex-7 70T FPGA modult, és további 4 szabad slot-ot tartalmaz a további bővíthetőség érdekében. A modulon Display port, USB, RS 232, RS 485, LAN csatlakozási lehetőség van, valamint SD kártya foglalat. Tápellátása 9-30 V_{DC} feszültséget igényel, maximum 40W fogyasztással. Az első bővítő modul egy hőmérsékletmérő modul NI-9213, amely 16 csatornás nagy pontosságú, 24bit-s felbontású hőelemmérő modul, amely hidegpontkompenzációval van ellátva. Ezzel a modullal történik a kalibráló berendezés hideg és meleg oldali hőmérsékletmérése. A második bővítőmodul egy analóg bemeneti modul

(AI) amely NI-9201, ± 10 V, 500 kS/s, 12-Bit, 8-csatornás feszültség bemeneti modul. Ezzel a modullal mérem a Termoelektromos generátor kimeneti feszültség értékét. A harmadik bővítő modul szintén egy analóg bementi modul (AI) NI-9227, 50 kS/s/ch, 0-5 A_{rms}, 24-Bit, 4 csatornás árammérő modul, amely a TEG kimenetén mérhető áramértéket méri.

Az utolsó, negyedik bővítő modul egy analóg kimeneti modul (AO) NI-9269, 100 kS/s/ch Szimultán, ± 10 V, izolált, 4 csatornás kimeneti modul, amely a hőmérséklet szabályozó kimeneti vezérlő jelét állítja elő.

A fűtőbetét szabályzó rendszere egy triak-os vezérlés, amelybe egy opto-triakos galvanikus leválasztást terveztem a vezérlő kimeneti modul védelme érdekében.

A fűtőegység vezérlés tervezésénél a triak gyújtásszöghasítás módszerét használtam. A fűtőegység 230 V_{AC} hálózati feszültségről van meg táplálva és triakkal vezérelve. A triak vezérlő jelét egy szoftveresen előállított 50 Hz-re szinkronizált hőmérséklet különbségre szabályzó jellel rendelkező PID modul állítja elő. A PID szabályzó jele egy PWM modulált négyszögjel, amely egy opto-triak galvanikus leválasztó közbeiktatásával vezérli a triak-ot.

4.1.1 TEG mérő és vezérlő berendezés szoftvere

A mérő és vezérlő szoftvert a National Instruments által fejlesztett LabVIEW grafikus programozási környezetben fejlesztettem. Összesen 4 db bementi jel mérését és 1 db kimeneti jel vezérlését kellett megvalósítanom. Az analóg jelek mérését DAQ-MX taskokból felépített adat beolvasási folyamatával valósítottam meg. A folyamat áll egy csatorna létrehozásból, ahol definiálni kell a mérőeszközt, a mérő csatornát és a mérési tartományt. A következő elem az időzítő, hol a mintavételi frekvenciát és mintaszámot lehet definiálni. A soron következő elem elindítja a folyamatot, utána lévő kiolvasa a mérésadatgyűjtő modul bementére érkező értéket. A kiolvasásnál előre definiálni kell, hogy folyamatos kiolvasást szeretnénk, vagy véges mintaszámút, továbbá, hogy 1 vagy több csatornán történjen a kiolvasás, illetve 1 vagy több mintát akarunk kiolvasni a rendszerből. A task sorozat vége 2 elemből áll, a folyamat leállító elemből és a törölő elemből, amely kitörli a memóriából az ideiglenes adatokat. Ezt a folyamatot minden típusú beolvasásnál paraméterezni kell, a mérendő jel típusához.

A TEG mérő és vezérlő programban 2 db hőmérséklet jelet kell mintavételeznem amelyet egy K típusú hőelemmel mérek, 1 db feszültséget és 1 db áramértéket.

A hőmérséklet mérés taskon belül be kellett állítanom a hidegpont kompenzációs funkciót, a hőelem típusát, illetve, hogy °C-ba szeretném kiolvasni az értékeket. A meleg és hideg oldali hőmérsékletből hőmérséklet különbséget számolok és a meghatározott értéket továbbítom a

PID szabályzó bemeneti paramétereként. A PID szabályzó hangolása Ziegler-Nichols módszerrel történt.

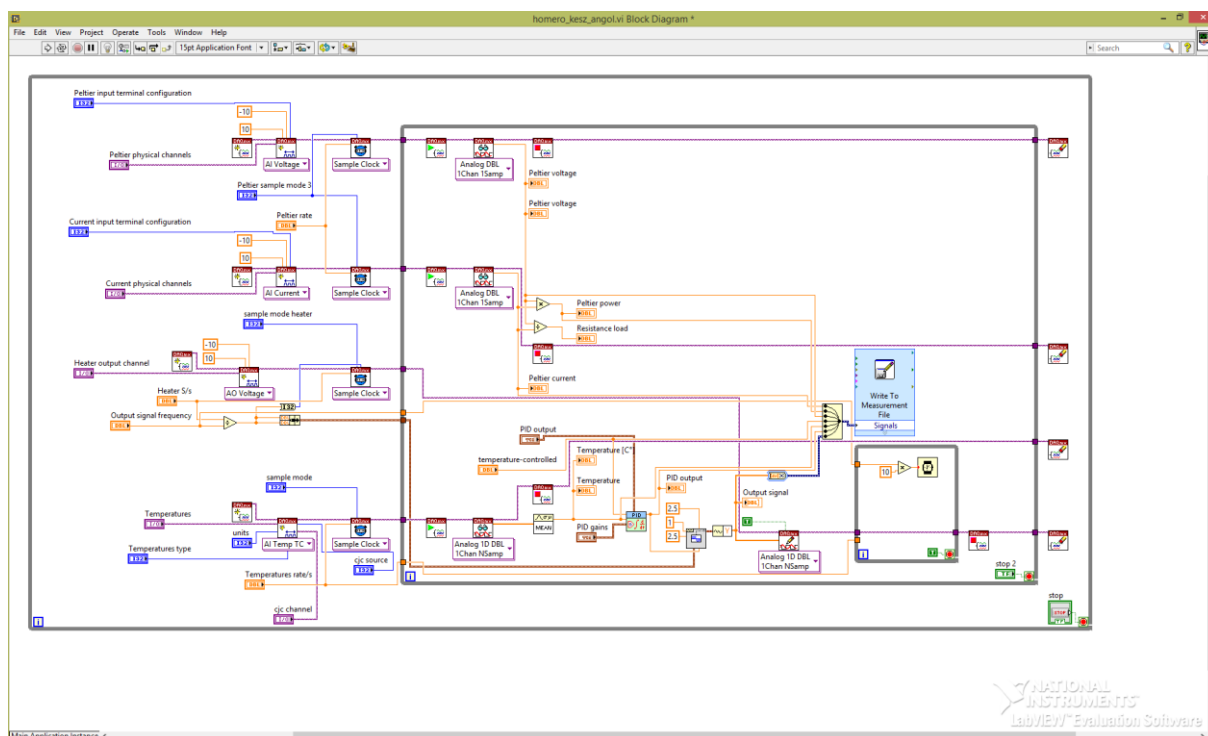
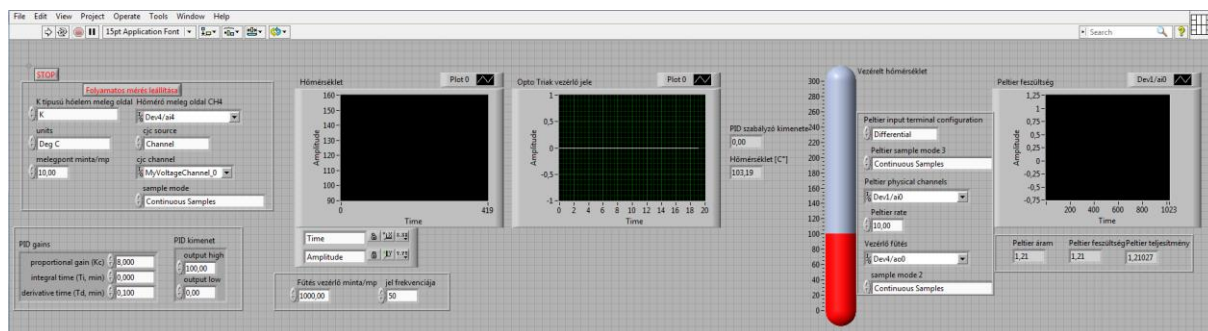
A Ziegler-Nichols módszert csak olyan folyamatoknál lehet alkalmazni, amelyeknél a technológia megengedi, hogy a szabályozási kört a stabilitás határán működtessük. A hangolási módszernél nem szükséges ismerni a rendszer válaszát. A hangoláshoz a szabályozási körből kiiktatjuk az integráló és deriváló csatornát a ($T_i=\infty$, $T_d=0$ paraméterezéssel). Így a szabályozó egy erősítésre redukálódik (P szabályozó). A szabályozó K_p erősítését nulláról kell növelni addig, amíg a zárt rendszer eléri a stabilitás határát. A stabilitás határán állandósult állapotban a folyamat kimenete szinuszosan leng az alapjel körül. Jelölje K_{pkrit} a kritikus erősítést, vagyis a szabályozó erősítését a konstans amplitúdójú lengések bekövetkeztekor. Jelölje T_{krit} a kritikus periódust, a konstans amplitúdójú lengések periódusát. A szabályozó hangolása ezen értékek alapján történik.

A hangolás előnye, hogy nincs szükség az egységugrásra adott válasza, az egyetlen paraméter, amit a folyamatról ismerni kell a T_{krit} . A hátránya egyrészt, hogy a szabályozási rendszert el kell vinni a stabilitás határára, másrészt, hogy ha az irányított folyamat lassú, a hangolás időigényes.

A PID szabályzóval PWM modulált jelet hoztam létre, amely a triakos elektronika vezérlőjele. A PWM modulációt úgy oldottam meg, hogy létrehoztam egy négyszögjelgenerátort, amely $\pm 2,5$ V amplitúdóval 1 Hz frekvenciával generál négyszög jelet, mely kitöltési tényezőjét a PID szabályzó kimenete állítja. A vezérelt négyszög jelet a mérő és vezérlő rendszer analóg kimeneti moduljára továbbítottam, amely végzi a vezérlést. A kimeneti modul frissítési frekvenciáját úgy határoztam meg, hogy 50Hz legyen a vezérlő jel frekvenciája, hiszen a triac hálózati frekvenciájú jelet vezérel.

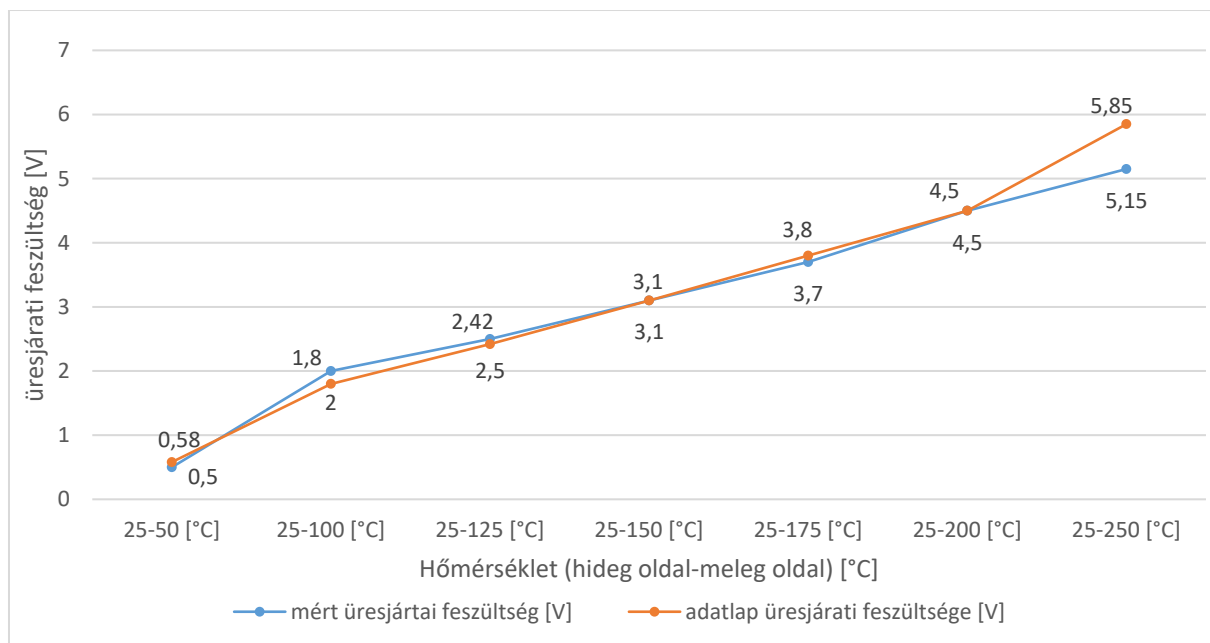
A mérőprogram további csatornái az analóg bemeneti csatornák, amelyek a TEG kimeneti áram és feszültség értékeit mérik, terhelés vagy terhelés mentes állapotban. A mért adatokból szoftveresen számolom vissza a terhelő ellenállás értékét, illetve a megtermelt villamos teljesítményt. A mért és számolt értékeket egy *.lvm állományba mentem a későbbi felhasználás érdekében.

Az 4-8. ábra mutatja a mérő és vezérlőprogram felépítését.



4-8. ábra: Mérő és vezérlő program

A termoelektromos generátor mérő és vezérlő berendezés kivitelezése, illetve a mérő és vezérlő szoftver fejlesztése után validációs méréseket készítettem különböző TEG-on. A validálás elvégzéséhez a TEC1-24118T125 TEG-t választottam alapul. 241 db Bizmut Tellurid félvezető és alumínium oxid szigetelő alkotja. A mérési eredményeket a 4-9. ábra mutatja. A mérő és vezérlő berendezéssel pontosan beállítottam azokat a hőmérséklet különbség értékeket, melyet a szimuláció során kaptam eredményül. A mért üresjáratú feszültségek hasonlóak, mint az adatlapban feltüntetett értékek.



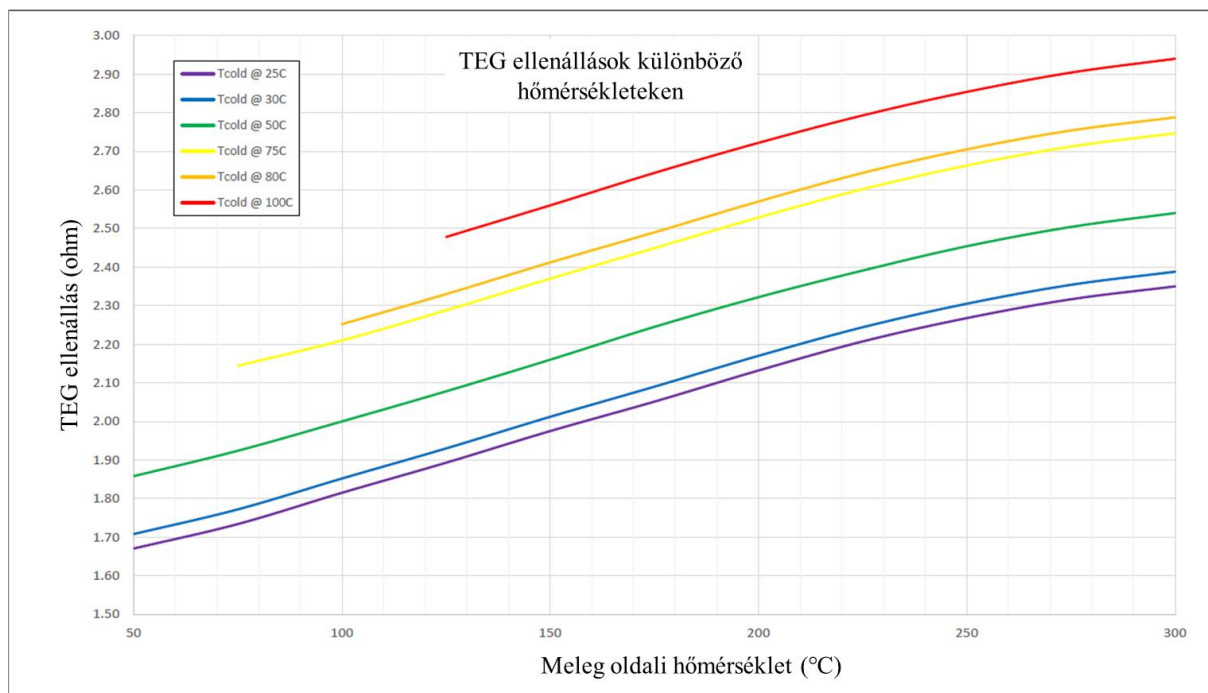
4-9. ábra: Termoelektromos generátor mért üresjárat feszültségei

6. táblázat: Termoelektromos generátor mért üresjárat feszültségei táblázatos formában

	25-50 [°C]	25-100 [°C]	25-125 [°C]	25-150 [°C]	25-175 [°C]	25-200 [°C]	25-250 [°C]
mért üresjárat feszültség [V]	0,5	2	2,5	3,1	3,7	4,5	5,15
adatlap üresjárat feszültsége [V]	0,58	1,8	2,42	3,1	3,8	4,5	5,85
adatlaphoz viszonyított relatív hiba [%]	-13,79	11,11	3,31	0,00	-2,63	0,00	-11,97

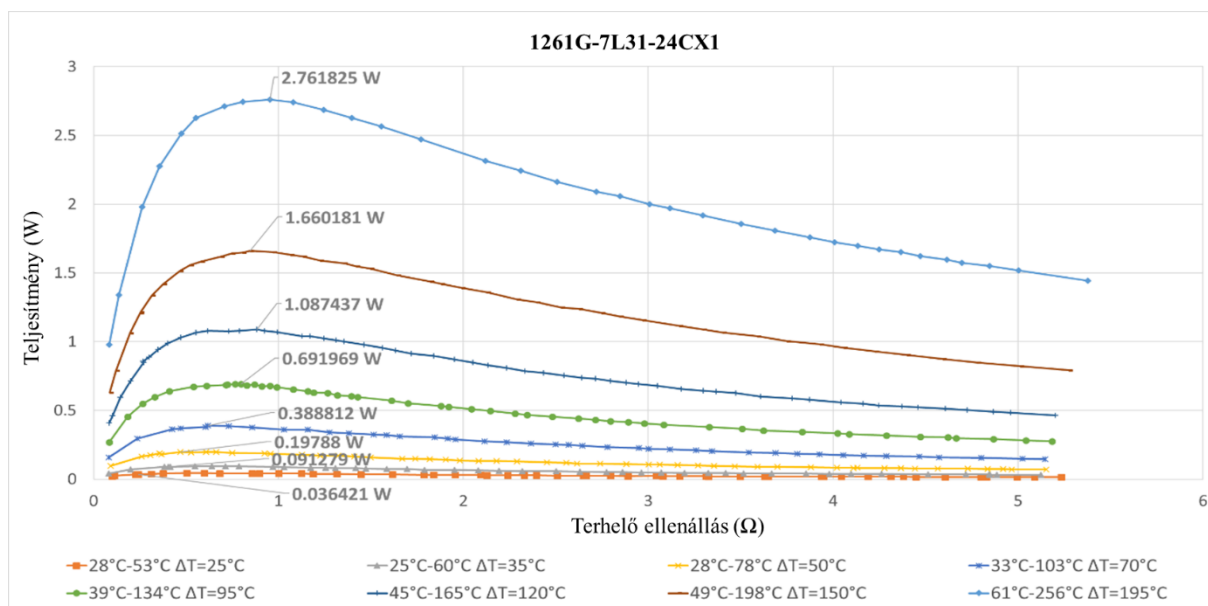
Az üresjárási paraméterek vizsgálata után munkapont meghatározási méréseket terveztem. Akkor működik a termoelektromos generátort munkaponti állapotba, mikor belső ellenállása megegyezik a rá kapcsolt terhelő ellenállás értékével. A munkaponti paraméterek meghatározásához először a TEG belső ellenállás értékét kell tudni.

A TEG gyári adatlapjában az szerepel, hogy 27°C-on 1,75 Ω a belső ellenállás, illetve grafikon formájában szemléltetik a belső ellenállás változást a hőmérsékletváltozás hatására.

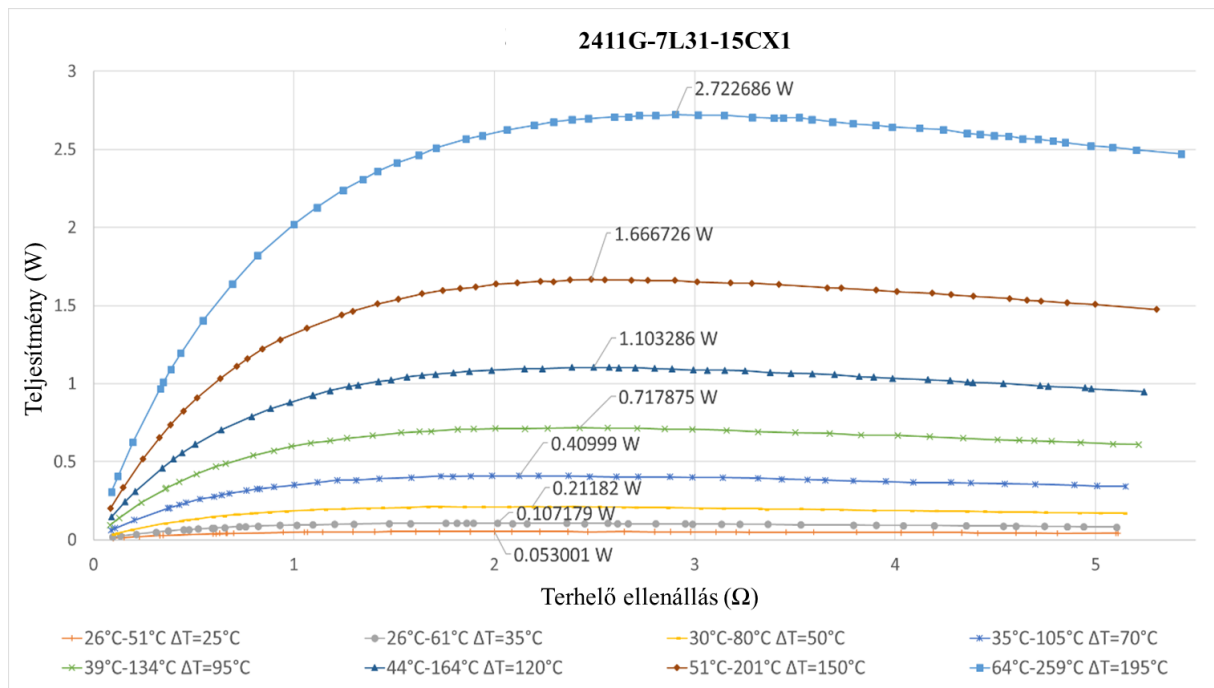


4-10. ábra: TEG belső ellenállás gyári értékei [125]

A modul teljes megismerése érdekében validációs méréseket készítettem, ahol a mérő rendszer változatlan volt, csak a TEG kimeneti kapcsaira egy precíziós, nagy teljesítményű potenciométert kapcsoltam, amely 0-5,5 Ω között képes változtatni az ellenállását. A méréseket 0,1 Ω lépésenként végeztem el, pontosan tartott hőmérséklet különbségek esetén. A munkapont elemző vizsgálatot két külön típusú TEG modullal végeztem el, amely a 1261G-7L31-24CX1 és 2411G-7L31-15CX1 típusjelzéssel rendelkeznek. A mérés eredményeit a 4-11. ábra szemlélteti. [125]



4-11. ábra: TEG munkaponti méréseinek eredménye



4-12. ábra: TEG2 munkaponti méréseinek eredménye

A grafikonokból leolvasható, hogy a különböző moduloknak különböző értékek között változnak a belső ellenállás értékei, amiből az következik, hogy más felhasználási területre érdemes alkalmazni a különféle típusokat. A vizsgálat eredményéből leolvasható, hogy egy modulból közel 200°C különbség hatására körülbelül 2,7 W villamos teljesítmény termelhető. A TEG befoglaló méretei: szélessége 56 mm, hosszúsága 56 mm, vastagsága 4,45 mm. 0,86 [W/cm²] a négyzetcentiméterre vonatkoztatott villamos teljesítmény értéke.

4.2 A TEG paraméter identifikációja

Az adatok közötti mélyebb összefüggést vizsgáltam, hogy egy zárt formulában fel tudjam írni a belső feszültség és belső ellenállás értékeket a meleg és hideg oldali hőmérsékletek függvényében. A gyári adatlap alapján mindegyik görbe önmagában exponenciális függvénnyel közelíthető, annak érdekében, hogy egy olyan közelítést kapjunk, amely minden hőmérsékleten igaz, egy több paraméterű leírási módszert kerestem. A paraméterek relatívan nagy száma miatt, célszerű gépi tanulási algoritmust alkalmazni a paraméterek megvalósítására. A választott gépi tanulás a bakteriális memetikus algoritmus (BMA) volt. Az algoritmus részletes bemutatását a 4.2.1 fejezetben tárgyalom. Ezt a paraméteres leírást a gyártói adatlapon szereplő több karakterisztikára és az általam elkészített mérési adataira alkalmaztam.

4.2.1 A bakteriális memetikus algoritmus rövid áttekintése

Bakteriális memetikus algoritmus: Számos evolúciós optimalizálási algoritmust fejlesztettek ki, amelyek képesek nemlineáris és nem folytonos jellemzőkkel rendelkező problémák [97],[98] megoldására és kvázi optimalizálására. A bakteriális evolúciós algoritmus (BEA) [99] egyike azon lehetőségeknek, amelyek inkább a bakteriális, mint az eukarióta evolúciót utánozzák. Minden egyes baktérium az eredeti probléma megoldását jelenti. A bakteriális mutációs és génátviteli műveletek során a baktériumok génjeik darabjait osztják meg, ahelyett, hogy a kromoszómák közötti tiszta keresztezést hajtanák végre, ami az eukariótákra jellemző. A klasszikus evolúciós algoritmusok fő hátránya az alacsony konvergenciasebesség, így a hosszú futási idő. Azonban a gradiens alapú helyi keresési módszerekkel való kombinálásukkal mindkét módszer előnyeit kihasználhatóvá válnak az optimalizálási folyamatban. Ez a hibridizáció memetikus algoritmusokhoz vezet [100]. A Bakteriális Memetikus Algoritmus (BMA) [101] egy memetikus algoritmus, amelyben a klasszikus genetikai algoritmus helyett a bakteriális technikát alkalmazzák, helyi keresésként pedig a Levenberg-Marquardt (LM) módszert [102],[103]. A BMA versenyképes teljesítményt nyújt az optimalizálás [104],[105] és a felügyelt gépi tanulás [105] során a genetikai algoritmussal (GA) és a részecske raj optimalizálással (PSO), valamint ezek memetikus változataival szemben. Ezt már alkalmazták számos kombinatorikus optimalizálási problémában [104], [106] folyamatos optimalizálási feladatokban [107], valamint felügyelt gépi tanulási feladatokban, mint például a fuzzy szabálybázis kinyerése [101] és a fuzzy neurális hálózatok képzése [108].

Számos sikeres optimalizálási módszer gradiens alapú, melyeket általában lokális módszerként írnak le. Ez a lokális jellegzetesség az előnyük és a hátrányuk fő forrása. Konvergenciájuk gyors, de előfordulhat, hogy megrekednek a lokális optimumban. Az evolúciós algoritmusokat (EA) összetett és nem lineáris problémák megoldására szolgálják. Az összes evolúciós algoritmus közös jellemzője, hogy több lehetséges megoldás versenyez a túlélésért a populációban. Globálisan vizsgálódnak, de az optimum közelében a konvergencia lassú. Azonban a velük kapcsolatos korlátok miatt [110] számos hibrid számítási technikát fejlesztettek ki, amelyek globálisak maradnak és nagy keresési tereket tárnak fel, a helyi keresés pedig növeli a konvergencia sebességét. A legtöbb evolúciós algoritmus fő lépései a szelekció, a keresztezés és a mutáció.

A memetikus algoritmusok egyesítik az evolúciós algoritmusok és a lokális keresési módszerek előnyeit. Utóbbiak az EA-hurkon belül működnek. Ezt nevezik "memetikus algoritmusoknak",

amelyeket Moscato [100] vezetett be. A lokális keresés egyfajta élethosszig tartó tanulásnak tekinthető.

A Bakteriális Memetikus Algoritmus terminológiája némileg eltér a legtöbb EA-ban használt terminológiától. A mutáció bakteriális típusú. A keresztezést a génátvitel helyettesíti, amelyet a többszörös fertőzéssel valósítanak meg.

A BMA működése a kezdeti populáció létrehozásával kezdődik, Nbact véletlen egyedet generálva, ahol Nbact a baktériumok száma az egyes generációkban. Az algoritmus iterációs fázisában a baktériummutáció, a lokális keresés és a génátvitel műveletei addig folynak, amíg el nem érjük a szükséges generációk számát (Ngeneráció).

Minden értékelés a hiba négyzetének integrálján alapul. Ebben az esetben a BMA a mért képzési adatok kimenete és az egyes baktériumokban kódolt paraméterekkel rendelkező modell kimenete közötti kumulatív hibát minimalizálja. Ezeket a metaparamétereket a probléma méretének megfelelően választjuk ki, hogy egyensúlyt teremtsünk a szükséges számítási idő és a becslés maradék hibája között. A paraméterbeállításokat az előzetes kísérletekből vezettük le, a BMA korábbi, más problémákra történő alkalmazásából származó tapasztalatok alapján [101], [107],[108].

4.2.2 A Termoelektromos generátor belső ellenállásának meghatározása

A TEG belső ellenállás egyenletének meghatározásához a gyártói adatlapon megadott grafikonból indultam ki. Leolvasásos módszerrel meghatároztam a grafikonon feltüntetett értékeket. A belső ellenállásnak van egy hőmérséklettől független konstans része: R_{B0} . A belső ellenállásnak van egy olyan része, amelyik a melegoldali hőmérséklettől is és a hideg oldali hőmérséklettől is lineárisan függ és ez a két függőség a karakterisztikán egy-egy egyenessel ábrázolható. A melegoldali lineáris függőségre rásuperponálódik egy enyhe telítődés, amelyet legegyszerűbben egy exponenciális taggal modellezhető. E koncepciót leíró paraméteres egyenlet a következő

$$R_{TEG_számított} = R_{B0} + mRT_m \cdot (1 - e^{(R_{Texp} \cdot T_{meleg})}) - mRT_h \cdot T_{hideg} \quad (19)$$

ahol a paraméterek:

$R_{TEG_számított}$: A számított Termoelektromos generátor ellenállása

R_{B0} : A belső ellenállás hőmérséklettől független konstans része

mRT_m : A belső ellenállás hideg ponttól való hőmérséklet függését lineárisan modellező egyenes meredekségét meghatározó paraméter

R_{Texp} : A belső ellenállás hőmérséklet függésének exponenciális függvénnel leírt telítődését meghatározó paramétere

mRT_h : A belső ellenállás meleg ponttól való hőmérséklet függését lineárisan modellező egyenes meredekségét meghatározó paraméter

A bemenő (mérésből nyert) változók:

T_{hideg} : Hideg oldali hőmérséklet

T_{meleg} : Meleg oldali hőmérséklet

A melegoldali, hidegoldali hőmérséklet és az $R_{belső}$ értékek a BMA algoritmus bemeneti paramétereként szolgáltak. A 3 bemenő adatból 4 paramétert határozott meg a BMA. Ezzel az eredménnyel sikeresen meghatároztam a TEG belső ellenállásának a parametrikus hőmérséklet függését.

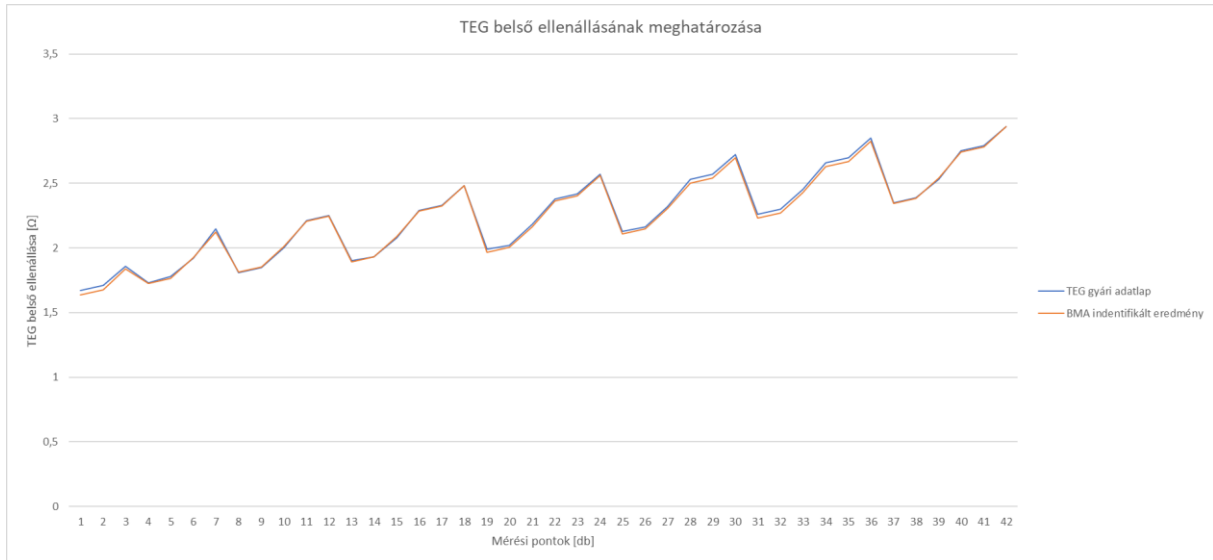
Először a paramétereket az adatlapról közelítőleg leolvasott értékek alapján identifikáltam egy BMA algoritmus segítségével. A fitness funkció:

$$\left(R_{TEG_leolvasott} - R_{TEG_számított}\right)^2 \quad (20)$$

Erre az identifikációra azért volt szükség, hogy meghatározzuk azt a tartományt, ahol a saját méréseim alapján keresnem kell a valós rendszert kísérletileg leíró egyenlet paramétereit. Az adatlapról leolvasott értékekre legjobban illeszkedő görbesereg paraméteres egyenlete:

$$R_{TEG_számított} = 1,25 + 1,92 \cdot \left(1 - e^{(-0,0079 \cdot T_{meleg})}\right) - (-0,0021) \cdot T_{hideg} \quad (21)$$

Az egyenlet meghatározása után ellenőrző összehasonlítást végeztem a gyári adatlapon szereplő és az általam meghatározott egyenlet eredményeként kiszámolt adatok összehasonlításával. Az eredményeket a 4-13. ábra szemlélteti.



4-13. ábra: TEG belső ellenállásának meghatározása

Az eredmények összehasonlítására az R^2 függvényt használtam, amely a Pearson-féle szorzatmomentum korrelációs együtthatójának négyzetét számítja ki. A TEG belső ellenállásánál az R^2 függvény: 0,998561199, azaz 99,86% azonosságot mutat. A közelítést az R^2 függvény eredményének figyelembevételével megfelelőnek tekintem. A szokásos modell alapú leírás helyett adatvezérelt modellt alkalmaztam és nem a fizikai modellből, hanem a mért adatokból indultam ki. Mivel a mért adatok a teljes működési tartományt lefedik, ezért ez a modell a teljes működési tartományban alkalmazható.

4.2.3 A Termoelektromos generátor kapcsolófeszültségének a meghatározása

A TEG belső ellenállásának meghatározása után a paraméter identifikációkat a TEG belső feszültség meghatározására is hasonló módon alkalmaztam.

$$U_{TEG_számított} = U_{B0} + UbT_m \cdot (1 - e^{(UbT_{exp} \cdot T_{meleg})}) - UbT_h \cdot T_{hideg} \quad (22)$$

ahol a paraméterek:

$U_{TEG_számított}$: A számított termoelektromos generátor üresjárási kapcsolófeszültsége

U_{B0} : A generátor feszültség hőmérséklettől független konstans része

UbT_m : A kapcsolófeszültség meleg ponttól való hőmérséklet függését lineárisan modellező egyenes meredekségét meghatározó paraméter

UbT_{exp} : A kapcsolófeszültség hőmérséklet függésének exponenciális függvénnyel leírt telítődését meghatározó paramétere

UbT_h : A kapocsfeszültség hideg ponttól való hőmérséklet függését lineárisan modellező egyenes meredekségét meghatározó paraméter

A bemenő (mérésből nyert) változók:

T_{hideg} : Hideg oldali hőmérséklet

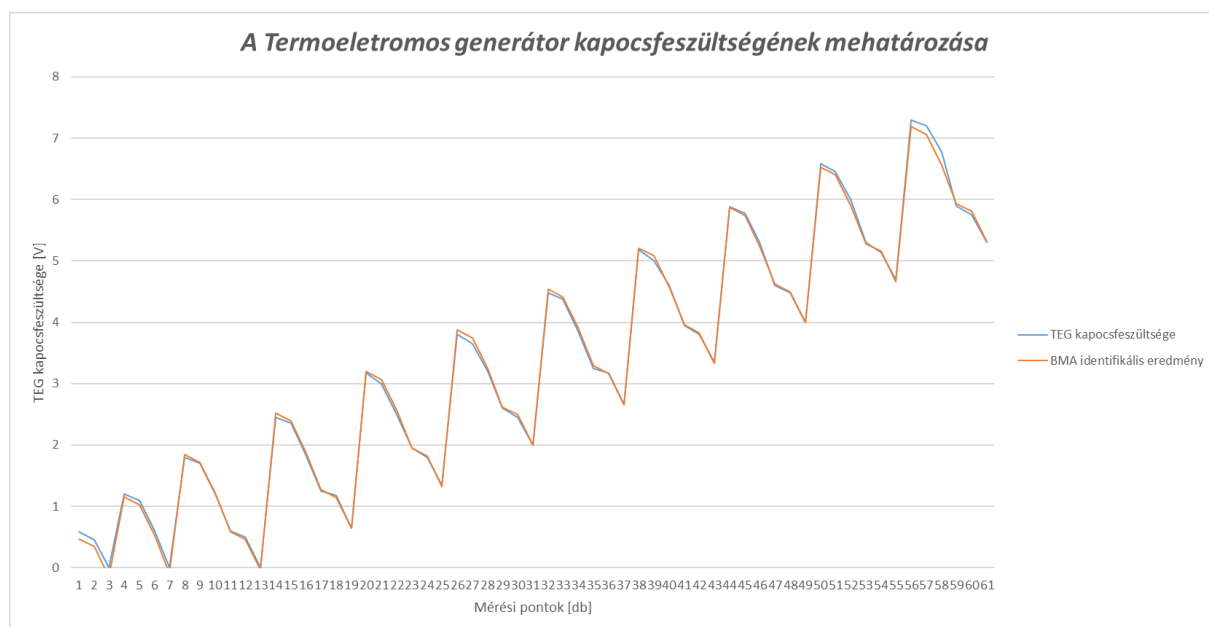
T_{meleg} : Meleg oldali hőmérséklet

A fitness funkció:

$$(U_{TEG_leolvasott} - U_{TEG_számított})^2 \quad (23)$$

A BMA algoritmussal meghatározott paraméterek:

$$U_{TEG_számított} = -0,293069 + 134,616382 \cdot (1 - e^{(-0,00021 \cdot T_{meleg})}) - 0,025004 \cdot T_{hideg} \quad (24)$$



4-14. ábra: TEG kapocsfeszültségének meghatározása

Az adatsorok összehasonlítására jelen esetben is az R^2 függvényt használom, melynek az értéke: 0,99902962, azaz 99,9%. Az illesztést a kapocsfeszültségek esetében is megfelelőnek tekintem.

4.2.4 A Termoelektromos generátor méréseinek a validációja

A termoelektromos generátor gyári adatlapján szereplő karakterisztikák elemzése után a 4.2.2 és a 4.2.3 fejezetekben meghatározott paraméteres egyenletek felhasználásával elvégeztem a 4-12. ábra értelmében a mérési eredmények validációját.

A saját méréseknél csak a kapocsfeszültséget és a terhelő áramot tudtam mérni, így a termoelektromos generátor üresjárási kapocsfeszültségét és a belső ellenállást csak együttesen tudtam meghatározni a következő fitness funkció segítségével:

$$(U_{k_mért} - U_{k_számított})^2 \quad (25)$$

A validációs egyenletem:

$$U_{k_számított} = U_{B0} + UbT_m \cdot (1 - e^{(UbT_{exp} \cdot T_{meleg})}) - UbT_h \cdot T_{hideg} - I \cdot (R_{B0} + mRT_m \cdot (1 - e^{(RT_{exp} \cdot T_{meleg})}) - mRT_h \cdot T_{hideg}) \quad (26)$$

ahol a paraméterek:

$U_{TEG_számított}$: A számított termoelektromos generátor üresjárási kapocsfeszültsége

U_{B0} : A generátor feszültség hőmérséklettől független konstans része

UbT_m : A kapocsfeszültség meleg ponttól való hőmérsékletfüggését lineárisan modellező egyenes meredekségét meghatározó paraméter

UbT_{exp} : A kapocsfeszültség hőmérsékletfüggésének exponenciális függvénnyel leírt telítődését meghatározó paramétere

UbT_h : A kapocsfeszültség hideg ponttól való hőmérsékletfüggését lineárisan modellező egyenes meredekségét meghatározó paraméter

R_{B0} : A belső ellenállás hőmérséklettől független konstans része

mRT_m : A belső ellenállás hideg ponttól való hőmérsékletfüggését lineárisan modellező egyenes meredekségét meghatározó paraméter

RT_{exp} : A belső ellenállás hőmérsékletfüggésének exponenciális függvénnyel leírt telítődését meghatározó paramétere

mRT_h : A belső ellenállás meleg ponttól való hőmérsékletfüggését lineárisan modellező egyenes meredekségét meghatározó paraméter

A bemenő (mérésből nyert) változók:

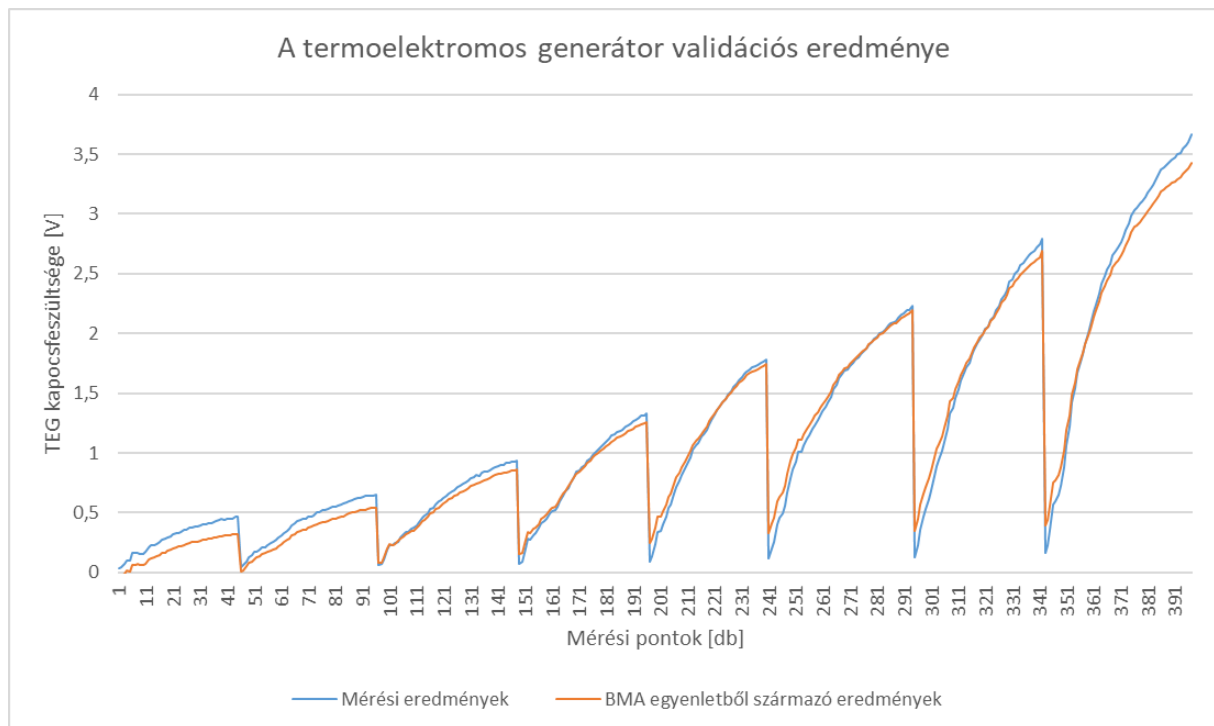
T_{hideg} : Hideg oldali hőmérséklet

T_{meleg} : Meleg oldali hőmérséklet

I : A generátor áramerőssége

A validációs egyenlet a behelyettesített paraméterekkel:

$$U_{k_számított} = -0,293069 + 134,616382 \cdot (1 - e^{((-0,00021) \cdot T_{meleg})}) - 0,025004 \cdot T_{hideg} - I \cdot (1,25 + 1,92 \cdot (1 - e^{((-0,0021) \cdot T_{meleg})}) - (-0,0079) \cdot T_{hideg}) \quad (27)$$



4-15.ábra: A termoelektromos generátor validációs eredményei

A 4-15.ábra szemlélteti a termoelektromos generátor validációs eredményeit. Az ábrából leolvasható, hogy a gyári adatlapról identifikált parametrikus egyenletből előállított eredmények nagyon szépen követik a valóságos mérésekből származó karakterisztikát. Az adatsorok összehasonlításához az R^2 függvényt használtam, melynek értéke: 0,990270233, azaz 99%. Az értékek elemzését követően az alábbi tézist mondom ki:

Tézis 1: A mérési eredmények alapján a hideg és meleg oldali hőmérsékletekből kiindulva az üresjárási kapocsfeszültség a következő egyenlettel közelíthető:

$$U_{k_{számított}} = U_{B0} + UbT_m \cdot (1 - e^{(UbT_{exp} \cdot T_{meleg})}) - UbT_h \cdot T_{hideg} - \\ - I \cdot (R_{B0} + mRT_m \cdot (1 - e^{(RT_{exp} \cdot T_{meleg})}) - mRT_h \cdot T_{hideg})$$

Az egyenletben 8 paraméter van, amelyeknek az értékei gépi tanulással megtanulhatóak. A TEG gyári adatlapján szereplő karakterisztikákból Bakteriális Menetikus Algoritmus (BMA) alkalmazásával identifikált egyenletek nagyobb mint 99%-os egyezéssel közelítik a mért értékeket.

5 Villamos motor hőveszteségeinek vizsgálata

5.1 A modell létrehozása

5.1.1 A modellezett villamos motor

A villamos motor hőveszteségeinek vizsgálatára egy 4kW-os egyenáramú motort választottam. A kiválasztott motor egy elektromos hajtású versenyautó vontatómotorjaként üzemelt. A hővisszanyerő rendszer működésének elemzésére végesem szimulációt készítettem az egyenáramú motorról. A szimuláció első lépéseként a motor modelljét kell elkészíteni. Ehhez szükséges a motor műszaki adatainak ismerete, hogy a valóságnak megfelelő tulajdonságú modellt készíthessünk. Azokat a paramétereket melyek nem álltak rendelkezésemre, méréssel pótoltam.



5-1. ábra: A forgórész tekercselése, és az állórész előlnézete.

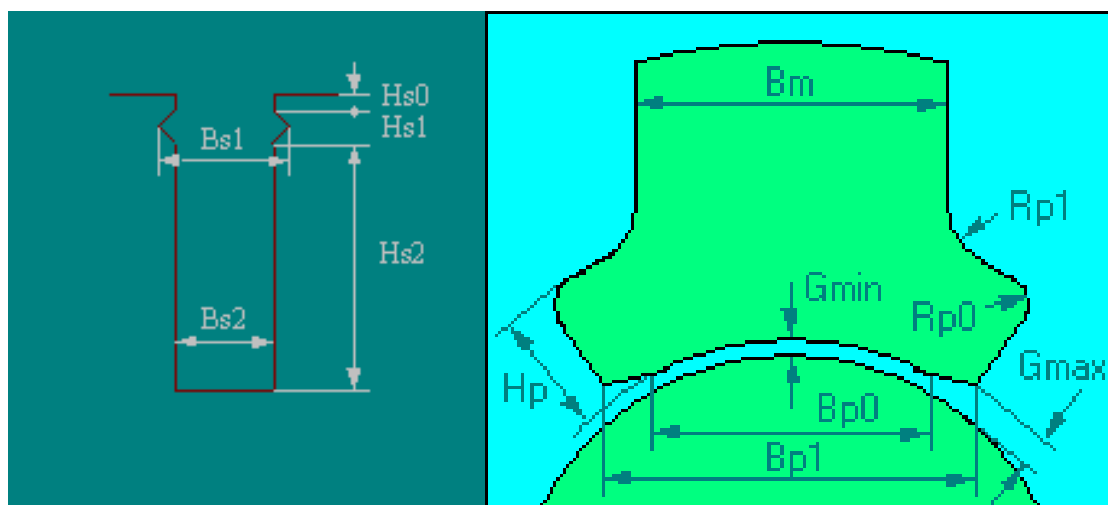
A helyes modell létrehozása érdekében a motor különféle paramétereinek megmérésére volt szükség. Az adatok között, amire szükségem volt a modell megalkotásához, például a befogó méretek, a tekercselésre vonatkozó információk vagy a különböző alkatrészekhez felhasznált anyagok szerepelnek. A gép adattábláján található információkat pedig a 7. táblázatba foglaltam össze.

7. táblázat: A motor adattábláján található névleges értékek

Mennyiség	Érték	Mértékegység
Áram	103	A
Feszültség	48	V
Teljesítmény	4000	W

Fordulatszám	1200 (max. 4000)	fordulat/perc
Forgatónyomaték	14,7	Nm

Szükség volt az állórészen található pólusok méreteinek felvételére, a rajtuk található tekercselés menetszámának és a vezetőhöz felhasznált sodort szálak megszámlálására. A forgórészen a hornyok megszámlálására, a hornyok mélységének és szélességének mérésére, a tekercselés mintájának (hogyan helyezkednek el a vezetők a kommutátoron, illetve a forgórész magján), és a szénkefék számának, méreteinek és elhelyezésének meghatározására.

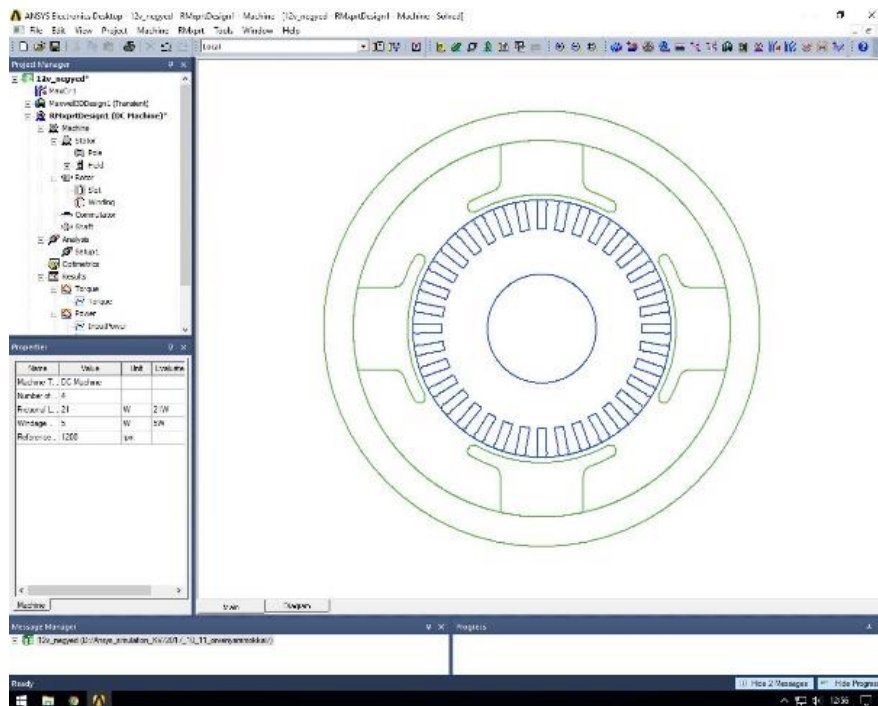


5-2. ábra: A forgórész hornya és az állórész pólusa.

A pólusok száma a vizsgált motor esetében 4, a szénkefék kiosztása illeszkedik a pólusok elhelyezéséhez. 4 szénkefét találunk a kommutátoron, 90 fokkal eltolva egymástól, a pólusok elhelyezésének megfelelően. Az állórész pólusain a tekercselést 1,75 mm átmérőjű kör keresztmetszetű huzalból sodort 8 szál as vezető alkotja 1,5 menettel pólusonként. A forgórészen 36 horony található, amiben hullám mintázattal helyezkedik el a tekercselés. Ehhez 0,8 mm vastag és 4 mm széles lapos huzalt használtak fel két-két szállal vezetónként.

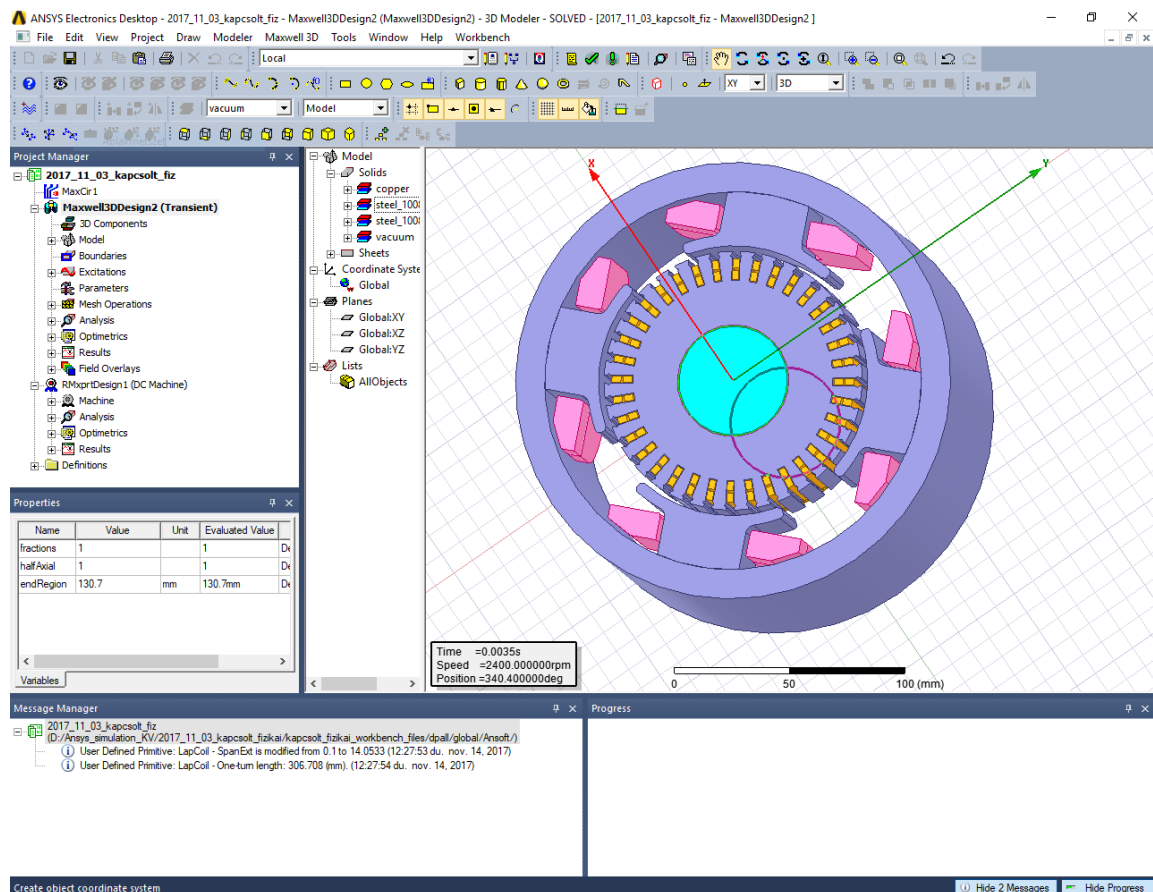
5.1.2 RMXprt

Az ANSYS villamos gépekkel foglalkozó moduljai közé tartozik az RMXprt. Lehetőséget nyújt villamos motorok modelljének gyors megalkotására műszaki paraméterek alapján, majd a névleges teljesítmény kiértékelésére és a működés vizsgálatára. A program előre betáplált sablonok alapján készíti el a motor modelljének egy metszetét a megadott méretek és a motorra jellemző paraméterek alapján. A villamos motor jellemzőinek és geometriai elhelyezkedéseknek a megadása után a program legenerálta a villamos gép 2D-s sugárirányú metszetét. A tekercselés kirajzolása további modulok használatával lehetséges.



5-3. ábra: Villamos motor kész modellje az RMXprt modulban.

Minthogy az RMXprt modul csupán statikus analízis elvégzésre képes, az időfüggvényben történő dinamikusanalízis elvégzéséhez az elkészült egyszerűsített modellt a programon belül át kell adni a MAXWELL modulnak, amely komplexebb elemzést tesz lehetővé.



5-4. ábra: A villamos motor 3D „félmodellje” MAXWELL-ben.

Az RMXprt-ban használt 2D metszeti modellből felállítható egy 3D modell, az erőforrásigény csökkentése érdekében a MAXWELL nem teljes geometriával dolgozik. Tengelymenti sugárirányú félmetszetet készít, illetve a keresztmetszet egy szeletének a vizsgálatára is van lehetőség. Az így használt fél, negyed vagy nyolcad modellek eredményeit a program visszavezeti a teljes geometriára. Ebben a modulban már lehetőségünk van tranziens analízist végezni, vagy a villamos kapcsolást szerkeszteni.

Miután exportáltam a motort az RMXprt-ból a MAXWELL 3D modulba, az 5-4. ábra látható eredményt kaptam. Mivel itt már teljes körű villamosságtani vizsgálatra van lehetőségünk, a program elkészítette a motorhoz tartozó kapcsolási rajzot is. A kapcsolási rajz alapján a modell elemeit és a hozzájuk tartozó gerjesztő áramokat is egymáshoz rendeli a program.

Ezután az anyagtulajdonságok ellenőrzése és módosítása következik, ha szükséges. Az importált modell megtartja az elemek anyagbeállításait az RMXprt projektből. Viszont a veszteségek modellezése és vizsgálata miatt további paraméterek megadására lehet szükség.

Ha a hőveszteségeket és a vezetők melegekedése következtében fellépő ellenállásváltozást is szeretnénk vizsgálni, akkor szükség van rá, hogy engedélyezzük a „Thermal Modifier” opciót. Ekkor jelennek meg a melegeedésre vonatkozó módosító függvények. A réz vezetők

vonatkozó változtató függvény a következő (a „Bulk Conductivity” – azaz vezetőképesség tulajdonságra vonatkozóan);

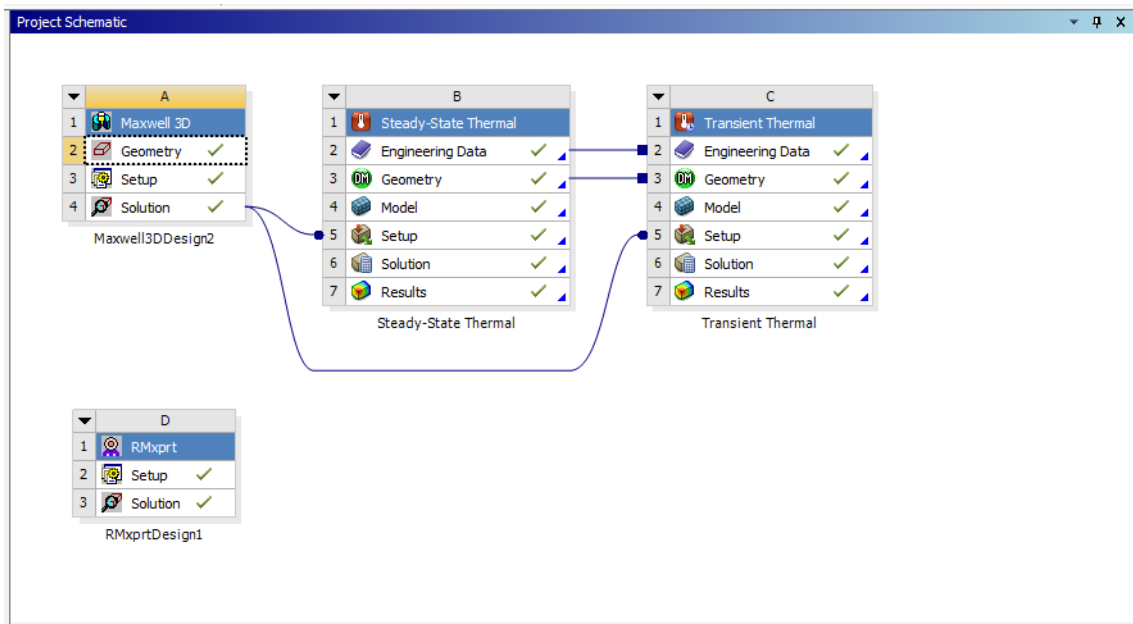
$$\sigma' = \sigma \frac{1}{1+0.0039*(T-22)}, \quad (28)$$

ahol σ - vezetőképesség, σ' - módosított vezetőképesség, T – a vezető hőmérséklete. Ezen felül lehetőségünk van a vasveszteségek („Core Loss Model”) beállítására is, ha az állórész vagy a forgórész anyag tulajdonságait választjuk. Az anyagokat tartalmazó könyvtár tartalma bőséges, a leggyakrabban használt anyagokat megtalálhatjuk benne. Viszont arra is lehetőségünk van, hogy új anyagokat adjunk hozzá.

A Maxwell felületen különféle elektromos és elektromágneses analíziseket lehet elvégezni, illetve a modellt és modellezési paramétereket személyre szabni.

A MAXWELL modell létrehozásánál megadott hőveszteségi tényezők megadása után a különböző elemeken eső hőveszteséget is kiszámítja a program. Ezt a „Steady-State Thermal” vagy „Transient Thermal” hőtani modulokkal vizsgálhatjuk. A „Steady-State” vizsgálat időben állandónak veszi a hőterhelést, ezt maximum értékek és túlhevülés vizsgálatára használtam. A „Transient” modul pedig időben változó hőterheléssel végez számításokat, ezzel a normál üzem alatti melegedést figyeltem meg.

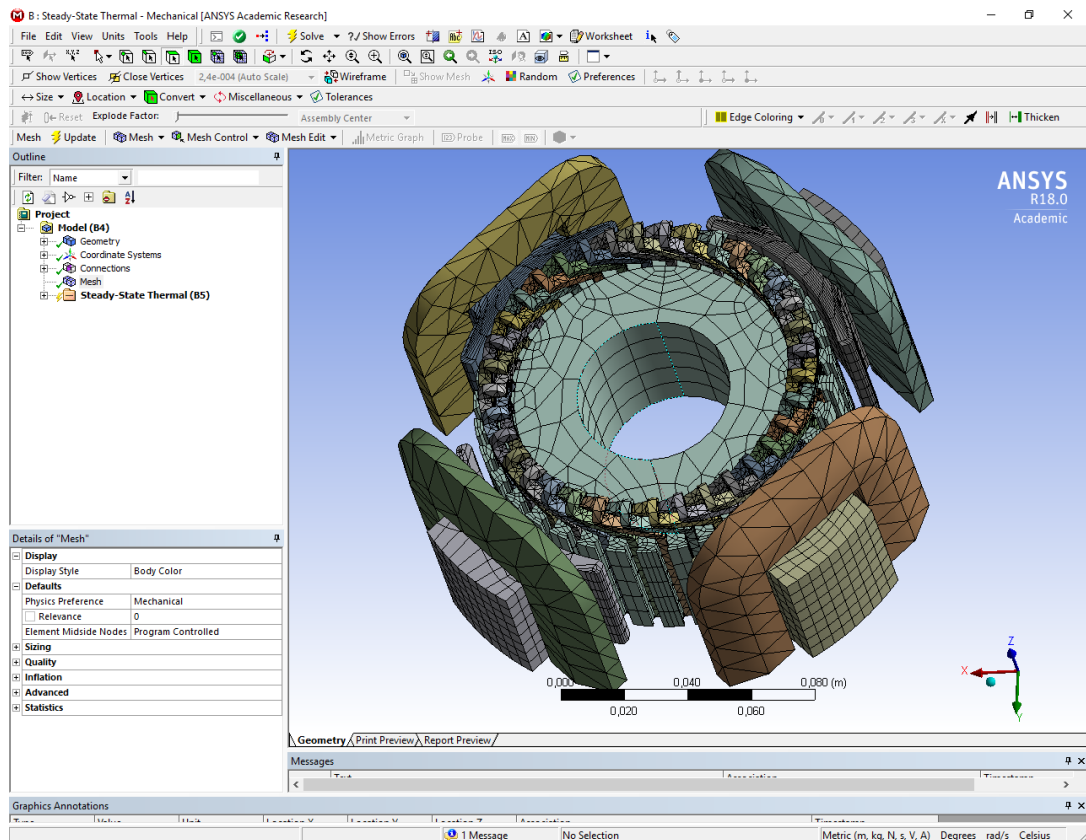
A munkablakban látható, hogy az RMXprt és a MAXWELL 3D modulok nincsenek összeköttetésben. Ennek az oka, hogy az RMXprt eredményeit exportálva hozza létre a program a 3D modellt, nincs szükség a különböző elemek összekötésére, mint más modulokban. A MAXWELL 3D modul „Solution” eredményét a „Steady-State Thermal” és a „Transient Thermal” modulok „Setup” beállítás elemével összekötjük, akkor veszi figyelembe a program az említett hőveszteségeket. A két hőtani modul „Engineering Data” és „Geometry” elemei az egyszerűség miatt állnak összeköttetésben, hogy a modell és a beállítások mindkét vizsgálat során megegyezzenek. Az anyagbeállítások az „Engineering Data” elemben szerepelnek, a „Geometry” elemben pedig a modell geometriája található.



5-5. ábra: A kapcsolt fizikai vizsgálat Workbench projektje

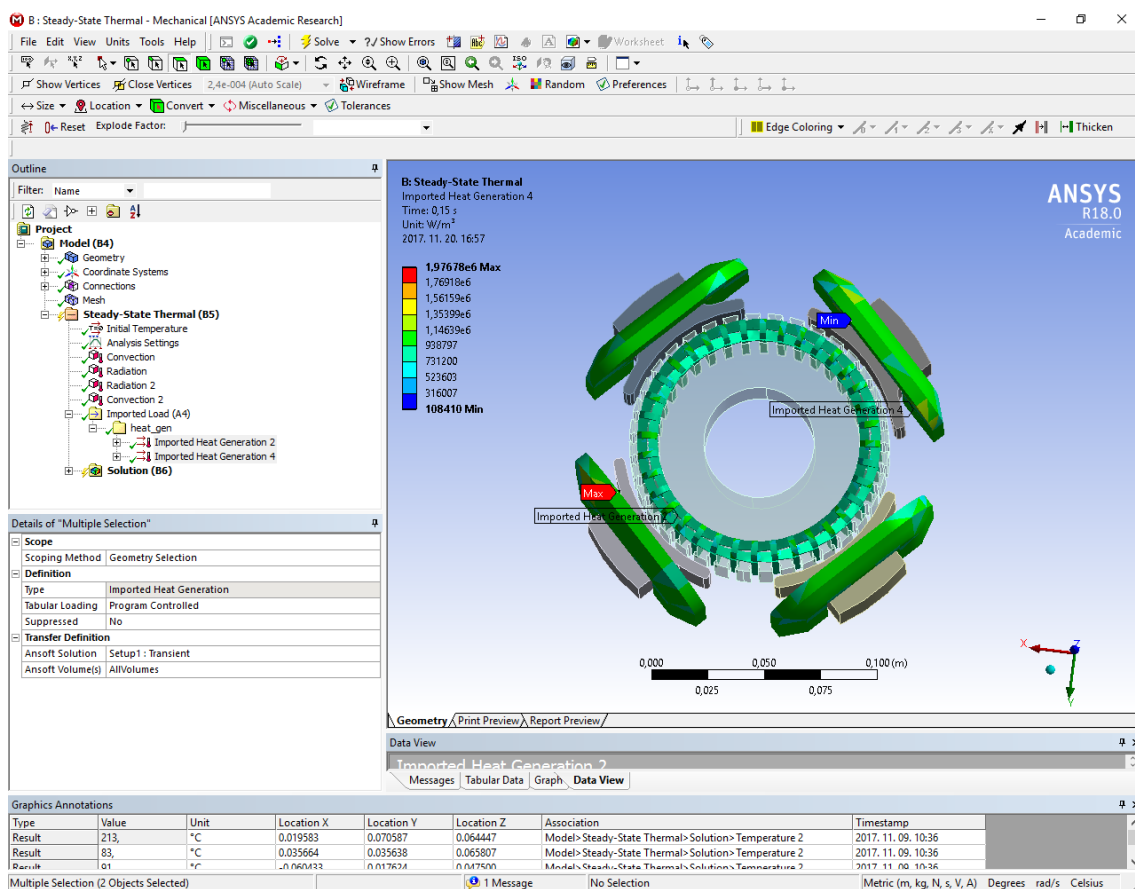
5.1.3 Mechanical-thermal szimuláció

A hőtani vizsgálatok az ANSYS Mechanical moduljaiban érhetők el.



5-6. ábra: Az ANSYS Mechanical programablak térhálózást beállító felülete

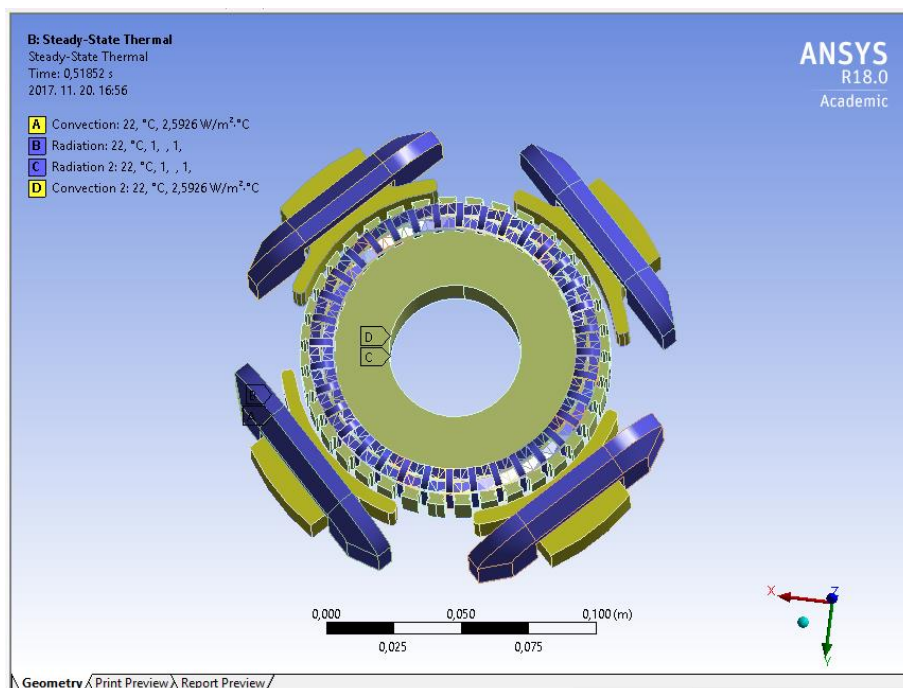
Az 5-6. ábra szemlélteti az elkészült térhálót, ami a vizsgálat elvégzéséhez szükséges. Az Electronics Desktoptal ellentétben itt nem történik automatikus háló készítés, manuálisan kell létrehoznunk azt.



5-7. ábra: A hőterhelések importálása

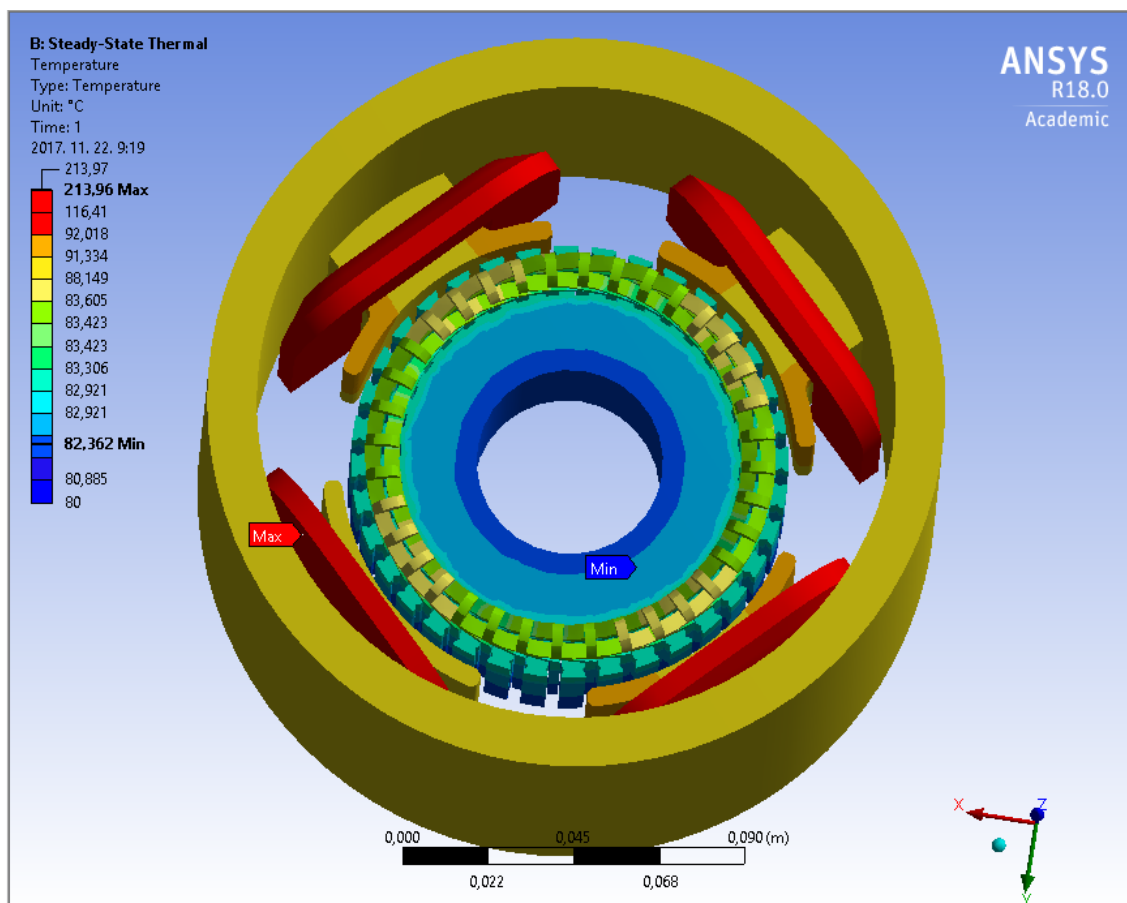
Ha az 5-7. ábra szerint a „Steady-State Thermal (B5)” elemet választjuk, az eszköztárak átváltak a hőtani analízis elemeire. Itt az „Imported Load (A4)” elembe adhatjuk hozzá a MAXWELL által számolt hőveszteséget, amit hőtermelés formájában jelenít meg a program a vizsgálatban. A pólusok és az armatúra tekercselést külön-külön hőtermelőnek állítottam be. A hőveszteségeket a MAXWELL vizsgálat időléptéke szerint van lehetőségünk figyelembe venni. Akár a kiindulási 0 [s] időpillanattól a teljes időtartamon keresztül, vagy kisebb manuálisan meghatározott időtartományban.

Az 5-8. ábra szerint a hőátadás különböző típusainak a geometriához rendelése. Én hőszugárzást (Radiation) és hővezetést (Convection) határoztam meg a geometria elemei között. A fő hőleadók a tekercselés elemei, de a forgórész és az állórész is képesek hőátadásra. A modellt a hozzárendelt hőátadási beállításokkal az 5-8. ábra szemlélteti, ahol kék szín jelöli a hőszugárzást, sárga a hővezetést.



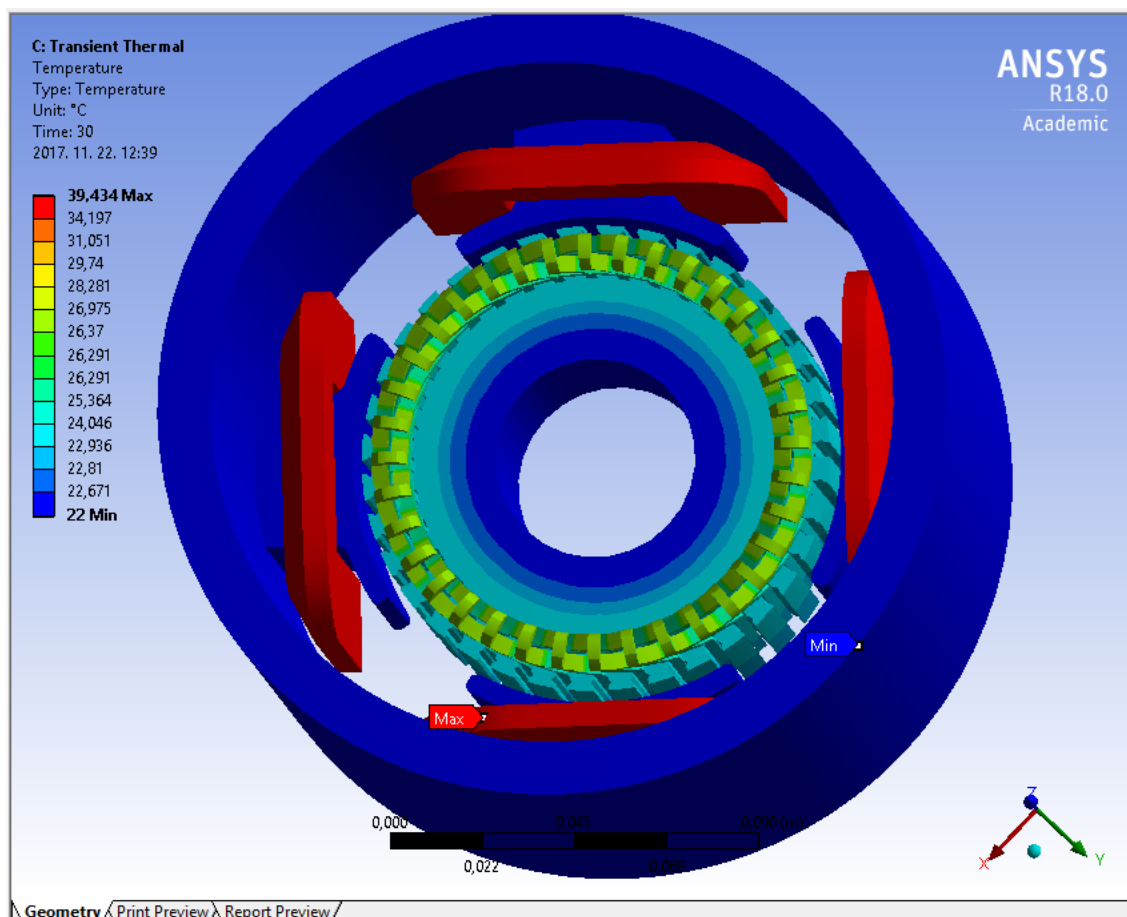
5-8. ábra: A beállított hőátadás

A hőtani vizsgálat eredményei az 5-9. ábra és 5-10. ábra szemlélteti. A „Steady-State” vizsgálatban konstansnak tekintjük a hőterhelést, a legnagyobb csúcsértékkal vesszük figyelembe a hőterhelést. Ezért lényegesen magasabb hőmérsékletet érnek el az elemek, mint a motor tényleges működése alatt. A gerjesztő tekercs hőmérsékleti csúcsa 213,96 °C, ami feltűnően magas érték. Ilyen hőmérséklet mellett a vezetõn már jelentõs ellenálláscsökkenést tapasztalunk, illetve a motor meghibásodásának is fent áll a veszélye. Ennek az oka, hogy ez a vizsgálati beállítás nem veszi figyelembe a forgó mozgást, illetve a hőterhelés időbeli változását. Valamint a motor szerkezetéhez hozzátartozik egy hűtő ventilátor a forgó tengelyen, amit a modell nem tartalmaz.



5-9. ábra: Steady-State Thermal vizsgálat

Az 5-10. ábra szemlélteti a „Transient Thermal” vizsgálatban a hőterhelést időben változónak tekintjük, a motor működésének megfelelően. Ebből adódóan a felmelegedés mértéke kisebb, mint az előző vizsgálatnál. A csúcserték 39,434 °C a gerjesztő tekercselésen 30 s időtartamú üzemeltetés esetén. A motor adattábláján található adatok alapján a szigetelés és a hőterheléssel szembeni tűrőképessége F besorolású. Ez azt jelenti, hogy a külső hőmérséklet max. 40 °C, a motor üzemeltetése alatt a maximum hőmérséklet, aminél még nem következik be károsodás 155 °C. A maximum megengedhető hőemelkedés 105 °C. Tehát a szimulációban alkalmazott körülmények között ez meg sem közelíti a motorra veszélyes értékeket. Természetesen egy hosszabb időintervallumon történő vizsgálat más eredményeket is mutathatna. A hőtani modell viselkedése viszont megfelel a valós működésnek a fizika törvényei szerint. Először a tekercsek melegednek fel a rajtuk átfolyó áram miatt, majd a velük érintkező acél elemek átveszik a hőt és emelkedik a hőmérsékletük.



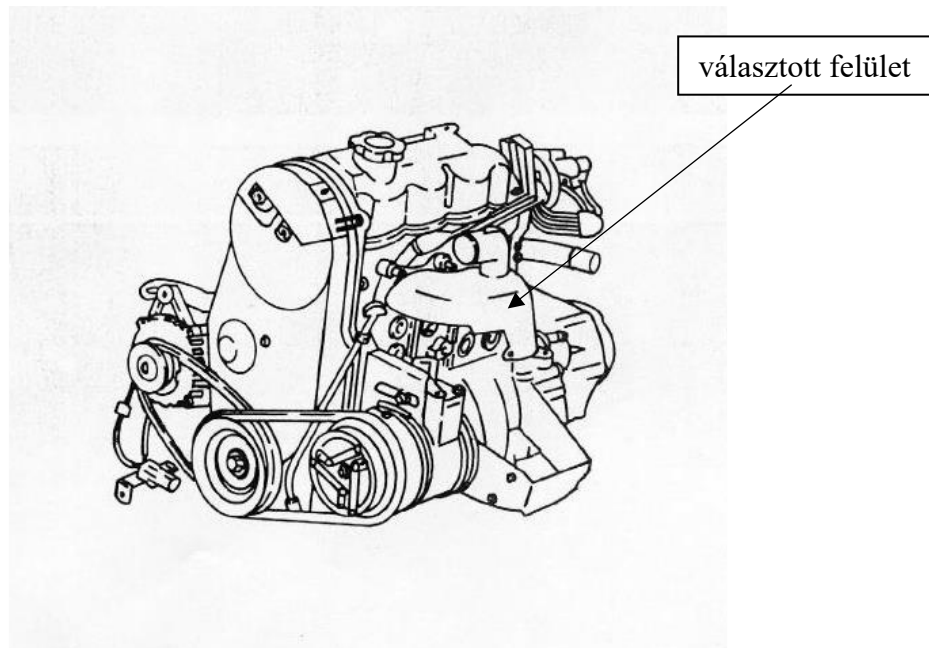
5-10. ábra: Transient Thermal vizsgálat

A végeelem szimuláció eredményeiből látható, hogy milyen mértékben melegszik egy villamos motor palástfelülete. Ezekből a szimulációs eredményekből, illetve a TEG mérési eredményekből könnyen következtetni lehet egy adott specifikációjú villamos hajtás felületéről visszanyerhető villamos teljesítményre.

5.2 Hővisszanyerő rendszer alkalmazási lehetőségei

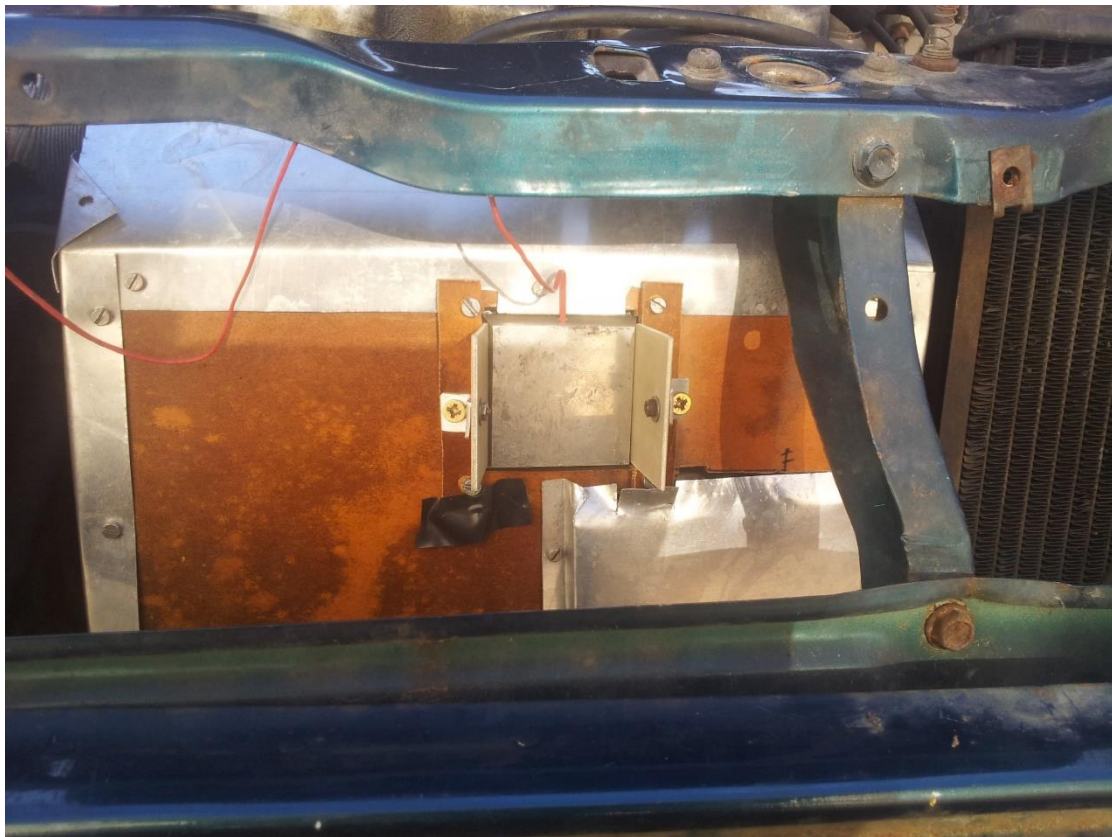
A hipotézist, miszerint gépjármű normál közlekedési üzemállapotából villamos energia állítható elő hővisszanyerő rendszer segítségével, két egymástól független módon bizonyítottam.

Az első kísérletet egy belső égésű, benzin motoros gépjármű motorterébe helyezett hőenergiavisszanyerő rendszer segítségével valósítottam meg. A motor térben méréseket végeztem és olyan felületet kerestem, amely körülbelül 200 °C-ig melegszik fel normál használat mellett.



5-11. ábra: Választott felület

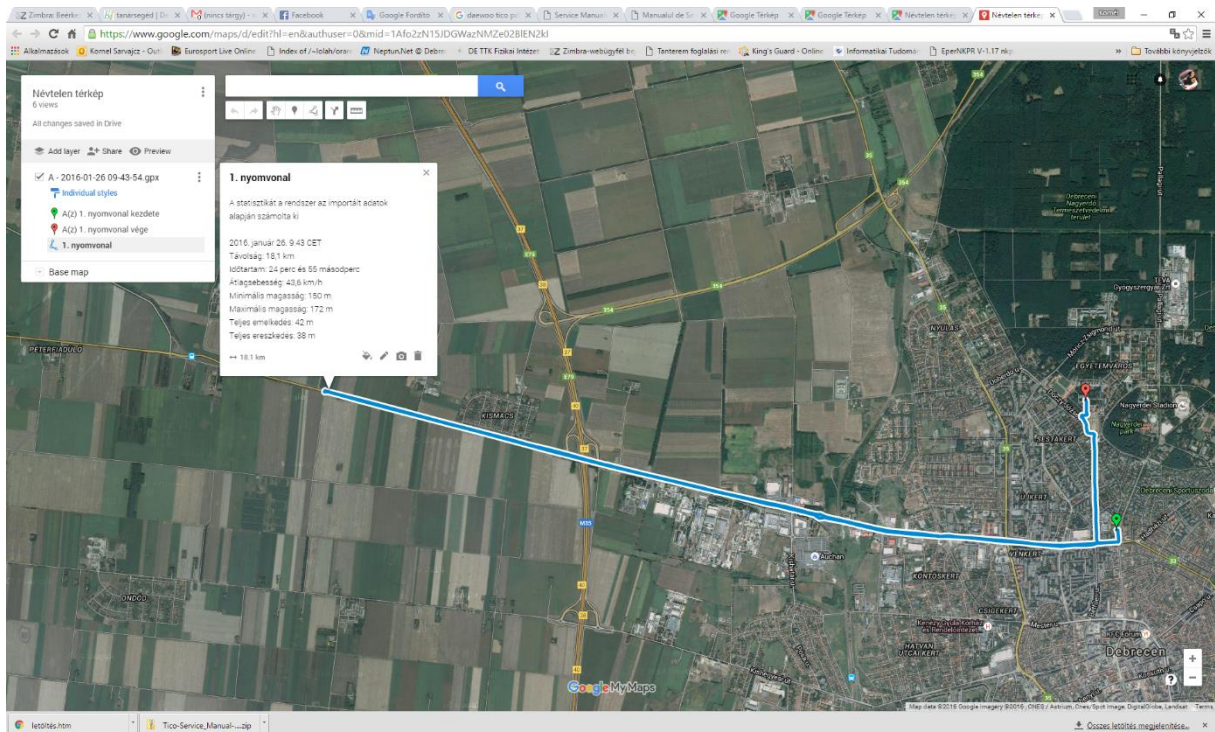
A választott felület a motor leömlő nyílásának a hővédő lemezére esett. Méréseim alapján a felület maximális hőmérséklete nem haladta meg a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ -t, felülete egyenes, amely biztosítja a TEG modul felületén az egyenletes hőmérséklet eloszlást, és megfelelő dinamikával követi a motor hőmérséklet változását a felület.



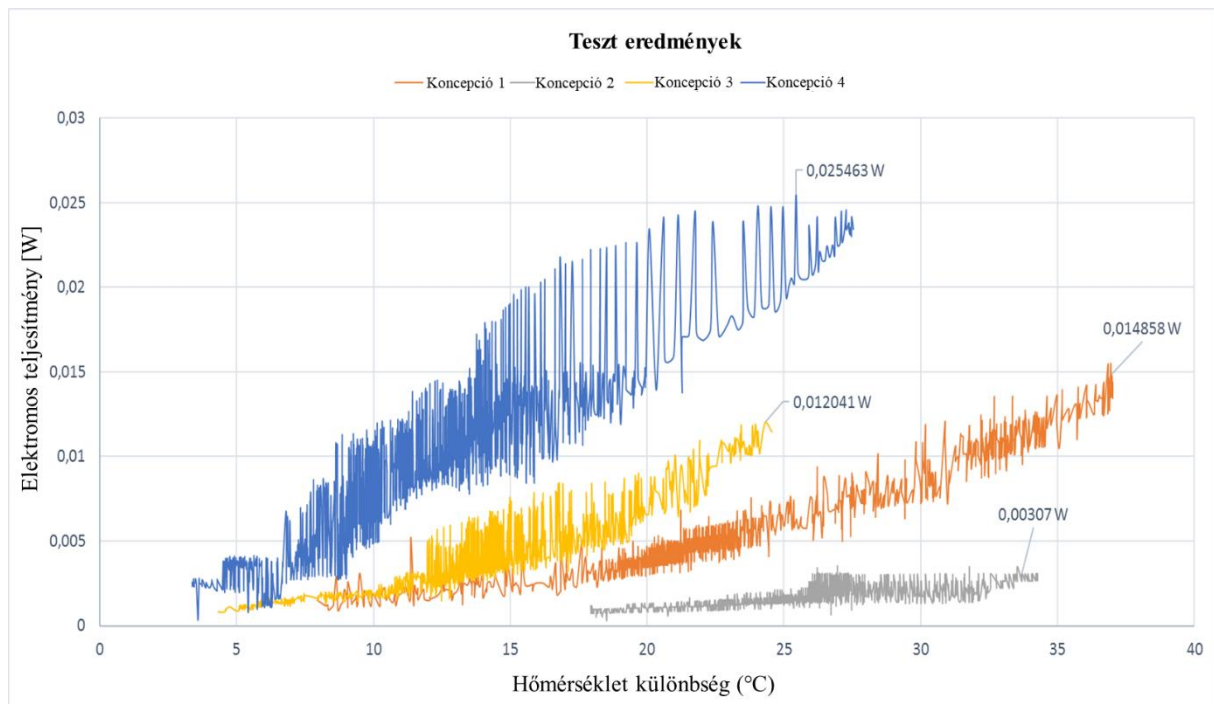
5-12. ábra: Felszerelt TEG modul



5-13. ábra: Felszerelt TEG modul



5-14. ábra: Tesztelés útvonal terve



5-15. ábra: Mért eredmények

A mérőrendszer megegyezik az 4.1 *Termoelektromos generátor mérő és vezérlő* berendezés fejezetben bemutatott mérő és vezérlő szoftver mérést végző részével. Összesen 4 paramétert mérek, 2 db hőmérséklet értéket és a TEG kimenetén mérhető feszültséget és áram értéket. A mérési eredményeket az 5-15. ábra mutatja. A grafikon X tengelyén a hővisszanyerő rendszer két oldalán mért hőmérsékletből számolt hőmérséklet különbség látható, míg az Y tengelyen a megtermelt villamos teljesítmény. A mérési eredmények teljes mértékben feldolgozás mentesek, semmilyen adatkonverziót nem tartalmaznak, annak érdekében, hogy a mérési eredmények dinamikáját is elemezni tudjam.

A diagramon négy különböző mérési módszerrel végzett mérés eredménye látható.

1. Az első koncepcióban a TEG meleg és hideg oldali felületére egy alumíniumból készített hasábot helyeztem, amely az egyenletes hőeloszlást volt hivatott biztosítani. A rendszer szélterelő nélküli verzió volt.
2. A második koncepcióban a meleg és a hideg oldalon az alumínium hasábokat rézből készült hasábokra cseréltem, mert az alumínium hővezetési tényezője: 210 W/mK, ellenben a rézé 386 W/mK. Ebben a koncepcióban a szélterelőt is használtam.
3. A harmadik koncepcióban sem hővezető hasábokat, sem szélterelőt nem használtam.
4. A negyedik verzióban a meleg oldalon alumíniumból készült hasábot, míg a hideg oldalon sárgarézből készült hasábot használtam. A szélterelőt nem alkalmaztam ebben az esetben.

A hővisszanyerő rendszer tesztelése során minden esetben hideg üzemállapotú gépjárművel kezdtem meg a tesztelést, és minden alkalommal az 5-14. ábra szemléltetett útvonalat jártam be, amely 18,1 km hosszúságú volt, 43,6 km/h átlagsebességgel, amely tartalmazott városi és országúti szakaszokat is.

A harmadik koncepció nyújtotta a legnagyobb megtermelt villamos teljesítményt, amely 25,46 mW-t jelent.

A kísérletet sikeresnek tekintem, mert sikerült termoelektromos generátor alkalmazásával egy hővisszanyerő rendszert készíteni, amely normál közlekedési viszonyok mellett, villamos energiát termelt a belső égésű motor hőveszteségéből. A mechanikai kialakítás javításával a megtermelt villamos teljesítményt lehet növelni.

A második számú kísérlet a hővisszanyerő rendszer bizonyítására, hogy egy 4kW-s egyenáramú motor palást felületére egy termoelektromos generátort tartalmazó hővisszanyerő rendszert terveztem, és a motor üzemeltetése, valamint különböző terhelési állapotokba történő üzemeltetése közben mértem a hővisszanyerő rendszer által termelt villamos paramétereket.

5.2.1 A hővisszanyerő rendszer

A kiválasztott hővisszanyerő eszközhöz szükséges volt egy felfogató rendszert tervezni.

A rendszer 5 részből áll:

1. motorra illeszkedő réz lap,
2. TEG,
3. a hűtésre illeszkedő alumínium lap,
4. hűtőrendszer,
5. felfogató.

Mivel a motor henger alakú, tervezni kellett rá egy illesztő lemezt, amelyet úgy kellett kialakítani, hogy az alsó része ráilleszkedjen a motor házának görbületesi sugarára, a teteje pedig tökéletesen sík legyen, hogy illeszkedjen a termoelektromos generátor felületéhez. Az elkészítéséhez megmértem a motor átmérőjét, így megkaptam a palást sugarát. A TEG szélességét megmérve már meg lehetett tervezni az alkatrészt. A harmadik változó a lemezvastagság volt. Ez nagyon lényeges méret, hiszen, ha túl vastag, több hőt ad le környezetének a közdarab, ha túl vékony, a megfelelő furatok nem férnek el benne. A tervezés és rajzolás után legyártattam, a furatokba menetet fúrtam, így akár külön rögzítésre is van lehetőség, és a hőelem által a furatban könnyen mérhető a meleg oldal hőmérséklete. A lemez

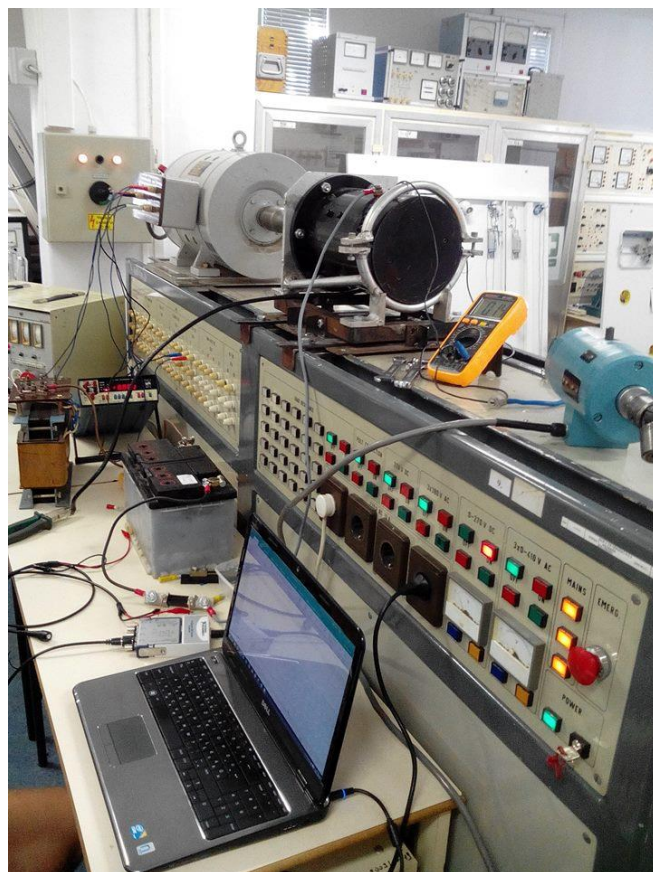
rézről készült el, amelynek hővezetési tényezője $386 \frac{W}{m \cdot K}$ ezáltal nagyon jól biztosítja a hővezetést a motor palástja és a TEG között.

Az alumínium közdarab a hűtőrendszer hőátadó felülete és a TEG méreteltéréseit küszöböli ki, valamint a benne található furatok a hőelem elhelyezésére szolgálnak, így a hideg oldal hőmérsékletének mérése is könnyen kivitelezhető. Természetesen az alumínium hővezető képessége $221 \frac{W}{m \cdot K}$ is megfelel az alkalmazási célra.

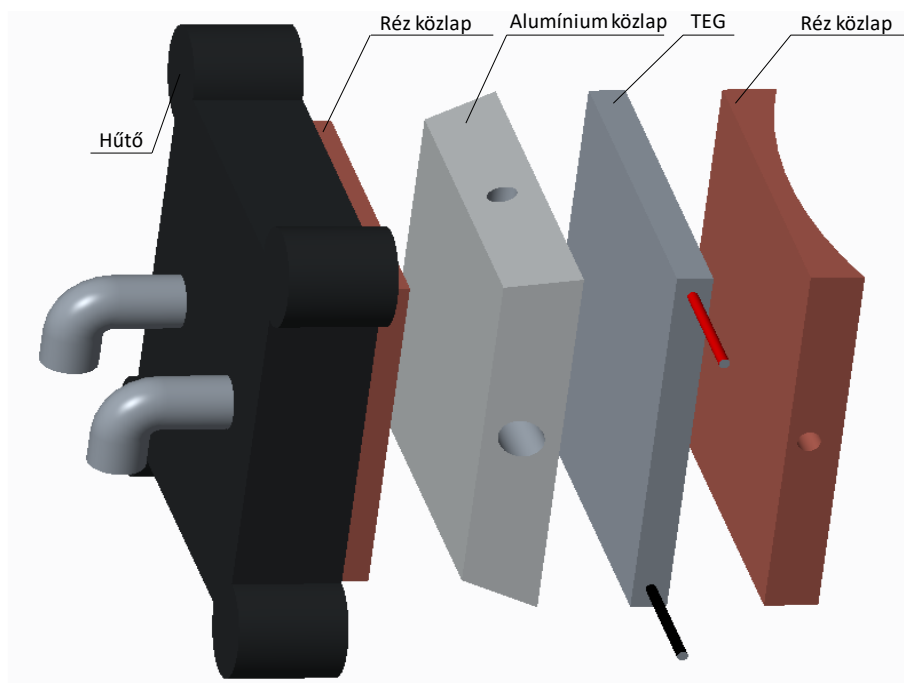
A hűtéshez vízhűtést alkalmaztam. Egy „tartályban” lévő jégömbökkel hűtött vizet egy szivattyú segítségével keringettem. A hőátadást egy réz lap biztosította, amely egy műanyag üreges közlapra van felfogatva. Két kivezetés található rajta, ahová csatlakoztatni tudjuk a hűtés csővezetékeit, és az ezen átfolyó víz közvetetten hűti a TEG hideg oldalát.

Mivel a motorban nem akartam furatokat elhelyezni, így külső felfogatás megtervezésére volt szükség. A választás kereskedelmi forgalomban kapható úgynevezett Awab csőbilincsekre esett. Mivel nem tudtam a motor méretéhez szükséges bilincseket beszerezni, a kerületét kiszámolva 2 bilincset raktam össze, amelyek tökéletesen rászorítják a hűtő és mérőrendszert a motorra, és a működése során fellépő rezgéseknek is ellenáll. A felhelyezés után a bilincset egy csillag csavarhúzóval tudjuk beállítani a megfelelő méretre.

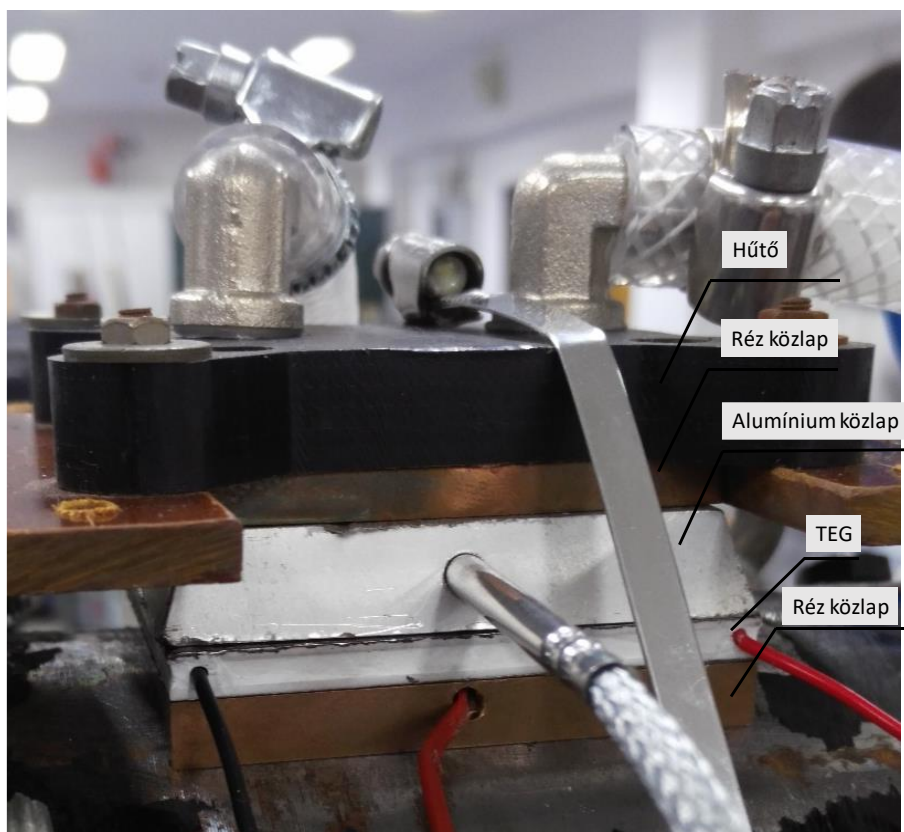
A felfogató rendszer háromdimenziós modelljét, és az összeépített rendszert az 5-16. ábra, 5-17. ábra és 5-18. ábra szemlélteti.



5-16. ábra: A mérés összeállítása

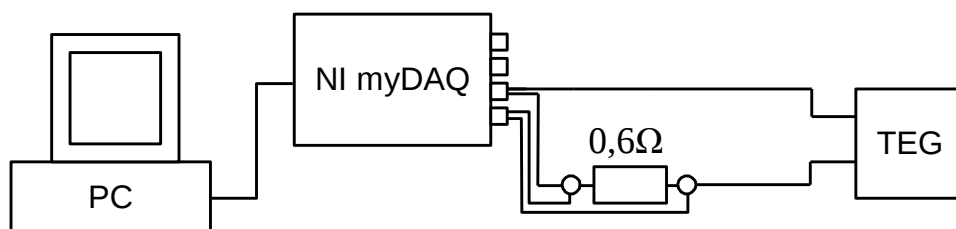


5-17. ábra: Felfogató rendszer 3D modellje



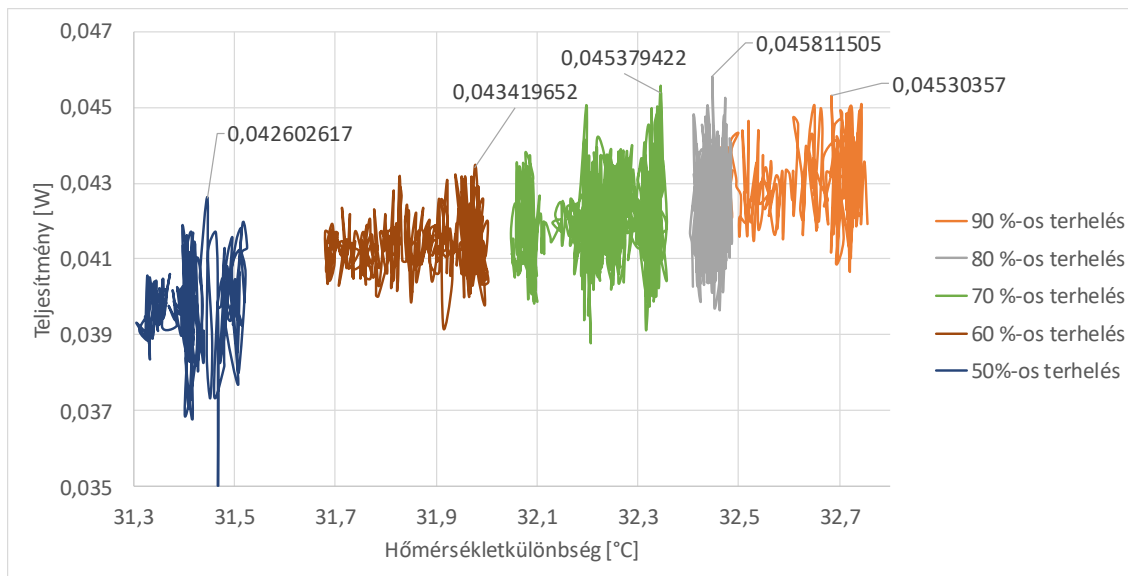
5-18. ábra: Felfogató rendszer

A mérőrendszer blokk diagramja:



5-19. ábra: mérő rendszer blokk diagramja

A hővisszanyerő rendszer mérési eredményeit az 5-20. ábra szemlélteti. Itt a termoelektromos generátor által termelt villamos teljesítményt ábrázoltam, a meleg és a hideg oldalán levő hőmérsékletkülönbség függvényében.



5-20. ábra: A TEG által termelt teljesítmény a hőmérsékletkülönbség függvényében

A mérések során egyre jobban terheltem a motort a vele tengelykapcsolatban lévő generátorral, ezáltal növekedett a motor üzemi hőmérséklete. Látható, hogy nem alakult ki nagy hőmérséklet különbség a TEG 2 oldala között, ami azt eredményezte, hogy nem tudott sok energiát termelni a TEG. Ennek oka, a motor öntött vas háza, amely lassan melegszik fel, és a benne levő ventilátor, amely az áramló levegővel hűti. 5-20. ábra leolvasható, hogy a legnagyobb pillanatnyilag termelt teljesítmény 45,8 mW volt. A TEG felülete 56x56 mm, azaz 3136 mm², a motor palástjának hasznosítható felülete nagyjából 120.000 mm². Ez azt jelenti, hogy a motoron legalább 30 termoelektromos generátort el tudunk helyezni, amelyeket felhasználásuktól függően sorba vagy párhuzamosan köthetünk a nagyobb energiakinyerés érdekében.

A második számú kísérlet is sikeresen zárult. Bebizonyítottam, hogy villamos motor üzemi működése közben is lehetséges villamos energiát termelni hővisszanyerő rendszerrel.

Tézis 2: Villamos motorok hűtésének és veszteségi energia visszanyerésének új módszerét dolgoztam ki és ennek működőképességét mérésekkel és szimulációval igazoltam. Villamos motor palástfelületéről termoelektromos generátorral veszteségi energiát lehet visszanyerni. Az új eljárással akár 1,5mW/cm² energiasűrűség érhető el.

6 Vezetést elemző rendszer fejlesztése

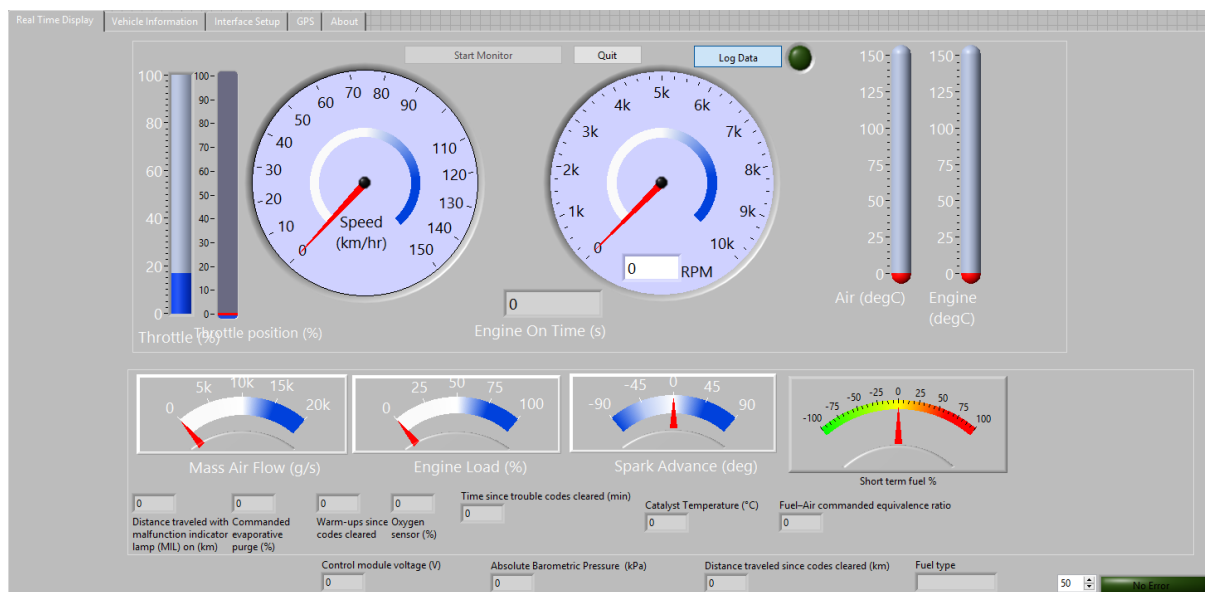
A termoelektromos folyamatok, generátor és hővisszanyerő rendszer elemzését, tervezését és működésének bizonyítását követően egy olyan komplex vezetést támogató rendszert fejlesztettem, amely vezetés közben mintavételezi a gépjármű menetdinamikai adatait, kamera képet rögzít, valamint GPS helymeghatározó rendszerrel van ellátva. A berendezés alkalmazásának célja, hogy elemezze a vezetési stílust, és kapcsolatot keressen az emberi viselkedés vagy vezetési stílus és a visszatáplált energia között. Az elmúlt években számos kutatócsoport és gépjármű fejlesztő cég foglalkozott a vezetést támogató rendszerek kutatásával és fejlesztésével.

A vezetést támogató rendszer alapja egy gépjármű dinamikai elemző szoftver, amely a gépjármű diagnosztikai csatlakozóján keresztül, (OBD-II szabványú csatlakozó) menetdinamikai adatokat tud kiolvasni a gépjármű központi CAN kommunikációs csatornájáról.

A diagnosztikai adatok rögzítéséhez egy LabVIEW fejlesztő környezetben készült diagnosztikai szoftvert fejlesztettem. A program a LabVIEW fejlesztő környezetben készült, amelyet szintén a National Instruments fejleszt. A támogatottság és kompatibilitás egységes, így a két rendszer párhuzamos használata nem okoz problémát.

A fejlesztett program képes a gépjárművek diagnosztikai rendszeréből kinyert adatok valós idejű feldolgozására és lementésére. Az állományok rögzítése egy CompactRio Controller (cRIO-9030) segítségével történik. A kontrollerbe illeszthető kiegészítő modul (CAN Interface modul NI-9862) segítségével jön létre a kommunikáció. Ezt az eszközt speciálisan a High Speed CAN rendszerekhez fejlesztették ki, így minden területen alkalmazható, ahol a magas sebességű megoldást használják.

Az adatok, amelyek rögzítésre kerülnek, nyomon követhetők egy laptop segítségével. Így látható minden pillanatban az aktuális fordulatszám, sebesség és a legtöbb vezetést aktívan befolyásoló tényező. A program több részegységre bontható, amelyek közül a legfontosabb a diagnosztikai adatok megjelenítése.



6-1. ábra: Az adatok rögzítéséhez alkalmazott program

A szoftver képes az összes szabadon hozzáférhető OBD PID (On-Board diagnostics Parameter IDs) kiolvasására és tárolására. Ezen paraméterek száma bővíthető, de ahhoz speciális gyártói jogosultság szükséges. A rögzített PID-ek a 6-2. ábra láthatók.

Engine RPM
Throttle Position (%)
MAF Rate (g/s)
km/hr
Timing Advance (°)
Intake Air Temp (DegC)
Engine Coolant Temp(°C)
Engine Load (%)
Time Since Engine Start (s)
Short term fuel trim (%)
Throttle position (%)
Oxygen sensor (%)
Distance traveled with malfunction indicator lamp (MIL) on (km)
Commanded evaporative purge (%)
Warm-ups since codes cleared
Fuel type
Time since trouble codes cleared (min)
Fuel-Air commanded equivalence ratio
Control module voltage (V)
Catalyst Temperature (°C)
Absolute Barometric Pressure (kPa)
Distance traveled since codes cleared (km)

6-2. ábra: A rögzített paraméterek

A mintavételezés valós körülmények között történt. A menetdinamikai állományok mellett GPS adatok is, valamint kamera alapú menetvideó is rögzítésre kerültek.



6-3. ábra: Az adatok rögzítése



6-4. ábra: A rendszerben felhasznált eszközök beszerelve az autóba

A vezetéstámogató rendszer feldolgozásához *.avi formátum szükséges, amelyet a berendezés biztosít számomra.

6.1 A rögzített adatok feldolgozása

6.1.1 Adatok importálása NI DIAdem programba

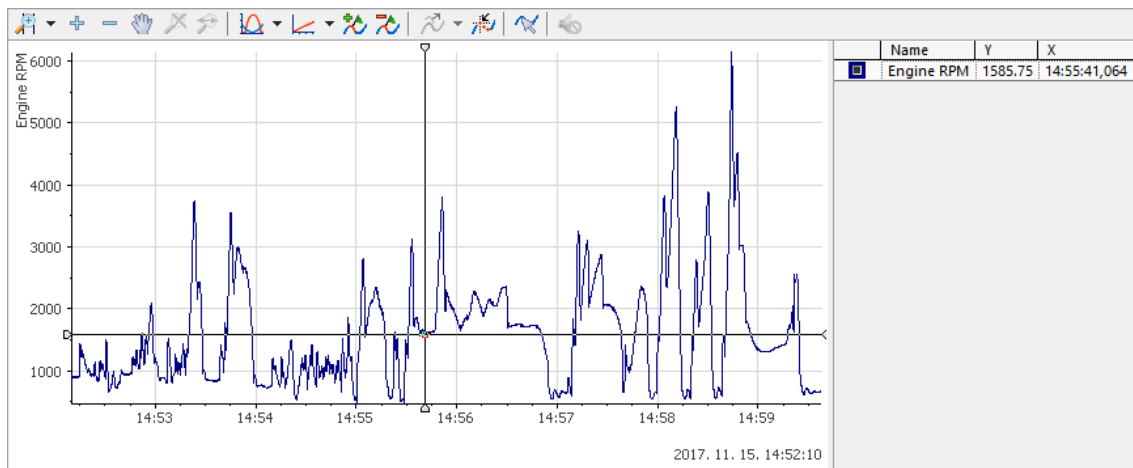
A rögzített adatok eltérő fájlokban találhatók. A gépjármű diagnosztikai rendszeréből lementett adatok LVM (LabView Measurement), a helymeghatározáshoz szükséges adatok GPX (GPS eXchange Format) és az elkészített videó AVI (Audio Video Interleave) kiterjesztéssel rendelkezik. Az NI DIAdem programban az eltérő forrásokból származó adatok egy új fájlformátumban tárolódnak, ez a TDM (Technical Data Management) kiterjesztés. Az új formátumot bármikor bővíthetjük más forrásokból származó adatokkal, így utólagosan is szerkeszthető. Az állomány sajátossága a struktúráltság, amely az összevonás után is megmarad. Az egyes elemek szabadon átnevezhetők, szerkeszthetők. Új csoportokat hozhatunk létre, rendezhetjük és szétválaszthatjuk állományainkat.

Az adatok megjelenítése több területen is történhet, amelyek száma és mérete módosítható.

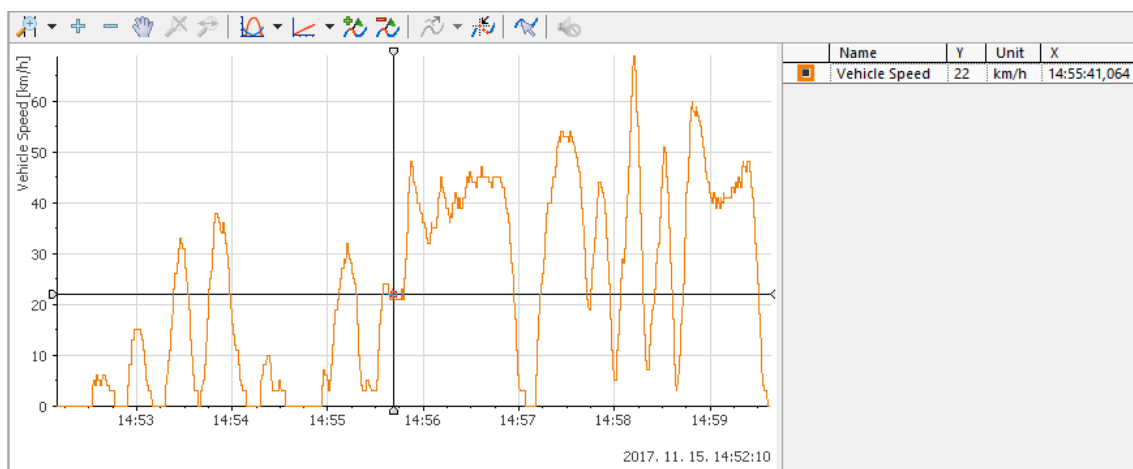
A maximálisan egyidőben megjeleníthető eltérő modulok száma nem limitált, de az átláthatóságukat a megjelenítő felület nagysága korlátozza. Nagy mennyiségű adatot célszerű eltérő oldalakon megjeleníteni. Az idő szerinti szinkronizálás csak az adott oldalra vonatkozik, az eltérő lapokon felépített felületek szinkronizált futtatása nem lehetséges. A megjelenítő felületek kiterjesztése TDV (Technical Data View), ami az NI DIAdem saját fejlesztésű formátuma.

6.1.2 Áttekintő felület elkészítése

Az adatok feldolgozásához egy áttekintő felületet hoztam létre. Ezen megtalálható a sebesség [km/h] és a motor percenkénti fordulatszáma (RPM). Ez egészül ki egy videó felvétellel és egy térképpel, amelyen az aktuális pozíció látható. A sebesség és fordulatszám értékeket grafikonokon jelenítettem meg az idő függvényében. Egy grafikonon egyszerre több érték is megjeleníthető, a vonalvastagság és a szín megváltoztatható. Kiemelhetünk részleteket, speciális pontokat. A mintavételezés 10 ms volt, így az adatok felhasználhatók diagnosztikai célokra.



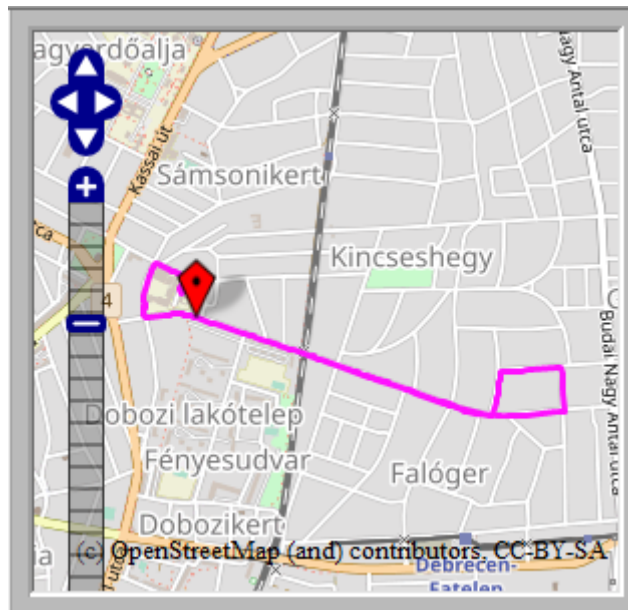
6-5. ábra: A motor percenkénti fordulatszáma



6-6. ábra: A gépjármű pillanatnyi sebessége

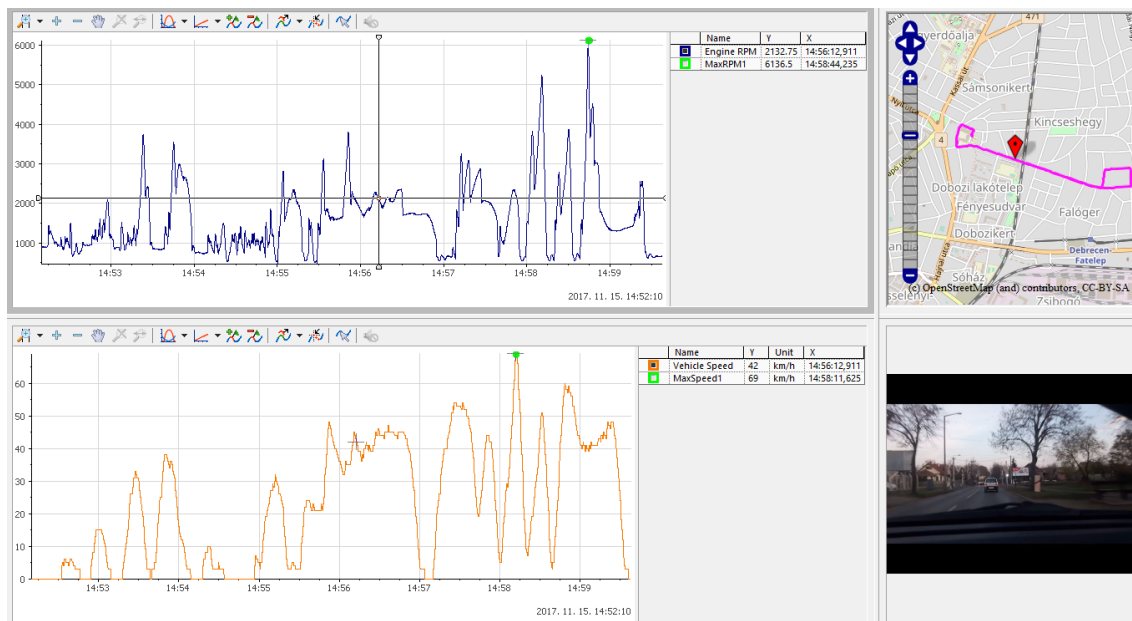
Az NI DIAdem kizárólag AVI és MPEG formátummal rendelkező videók megjelenítését támogatja. A felvétel, amit használtam AVI kiterjesztésű.

A GPS adatok az idő függvényében jelennek meg, a megtett útvonal kirajzolódik a térképen. Az NI DIAdem az OpenSreetMaps és Microsoft MapPoint ingyenes térképein képes megjeleníteni adatokat. A program elkészítése során a Microsoft megoldása nem volt elérhető, így az OpenSreetMaps térképét használtam.



6-7. ábra: GPS adatok megjelenítése

Az NI DIAdemben lehetőségünk van az összes adatot az idő függvényében szinkronizáltan, egyszerre megjeleníteni. Előre beállított sebesség alapján folyamatosan frissülnek az adatok, a kurzorok a grafikonok görbéit követik. A térkép és a menetdinamikai adatoknak azonos szinkronizációs alapot kell biztosítani, csak így lesznek tökéletes összhangban.

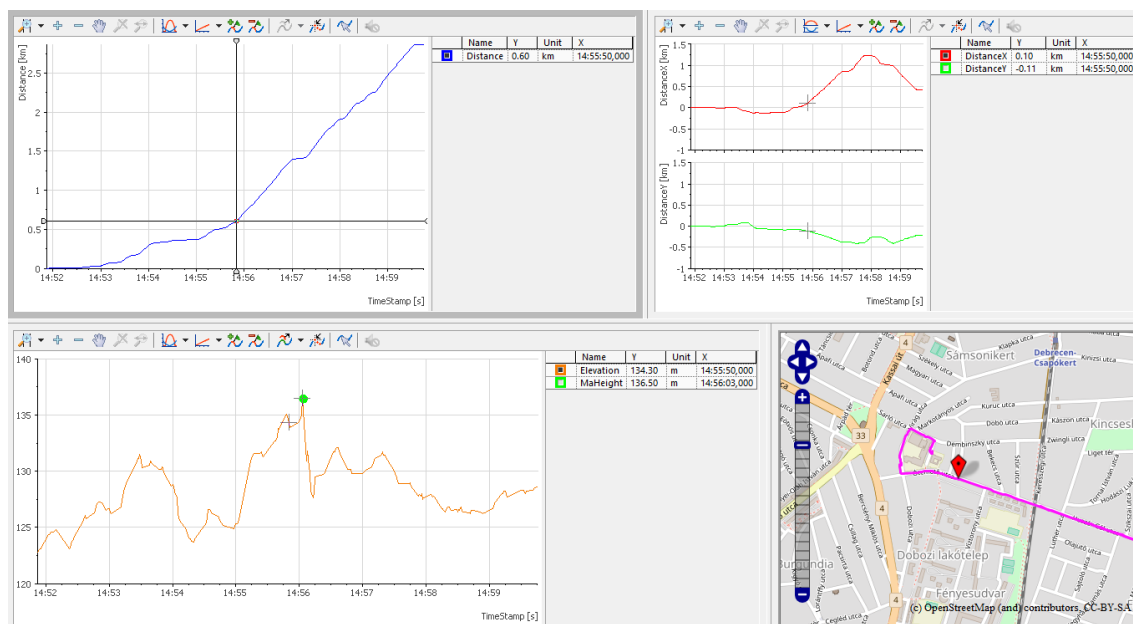


6-8. ábra: Áttekintő felület

A lejátszás sebessége beállítható, alaphelyzetben másodpercenként frissülnek az értékek. Lehetőségünk van manuálisan az ikonok, vagy a grafikonok felületén az egér segítségével a kívánt időponthoz állítani a lejátszást.

6.1.3 Helyzetinformációk elemzése

Az GPS adatok megfelelő feldolgozásához létrehoztam egy speciális felületet. Ezen megtalálható a megtett távolság, a megtett távolság X és Y irányban, az aktuális tengerszint feletti magasság és a térképre illesztett útvonal.



6-9. ábra: A gps adatok megjelenítő felülete

A felület segítségével vizsgálható a választott útvonal, amelyen a gépjármű haladt. A tengerszint feletti magasság vizsgálatával, fogyasztás optimalizálással kapcsolatos következtetéseket vonhatunk le. A legmagasabb tengerszint feletti magasság automatikus kiemelésre kerül a grafikonon.

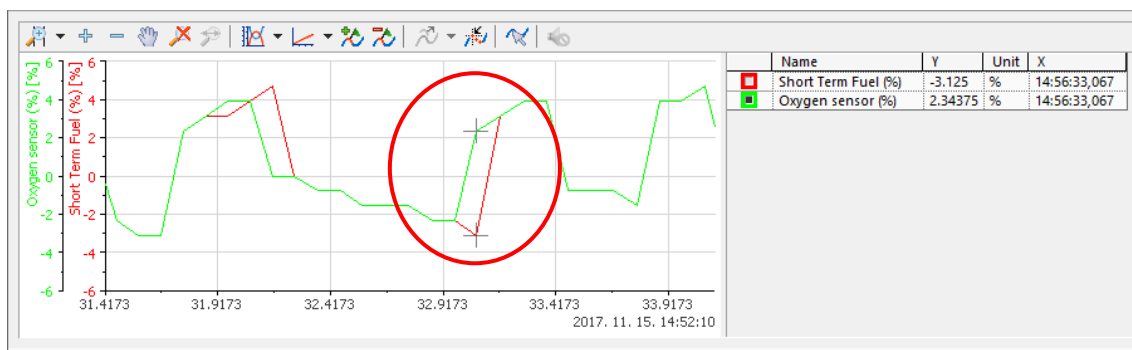
6.1.4 A motor keverékillesztésének elemzése

A motor keverékillesztése határozza meg, hogy az égéstérbe milyen arányban kell üzemanyagot juttatni. A motornak azonos teljesítmény leadására kell képesnek lennie eltérő körülmények között is. A reggeli hidegindítás után, tartós autópálya tempónál vagy emelkedőn történő közlekedésnél, eltérő üzemanyag befecskendezés szükséges. Ezt az ECU (Engine Control Unit) szabályozza, amely a különböző szenzorokból érkező jeleket feldolgozva, létrehozza az illesztés arányát.

Az vezérlőegység a STFT (Short Term Fuel Trim) arányát az oxigénszenzor értéke alapján állítja be. Ha az STFT értéke +/- 10% között található, akkor hibamentes működésről beszélhetünk. Abban az esetben, ha az érték eléri a +/- 25%-ot, a MIL lámpa kigyullad, a hibás értékek tárolódnak a diagnosztikai rendszerben.

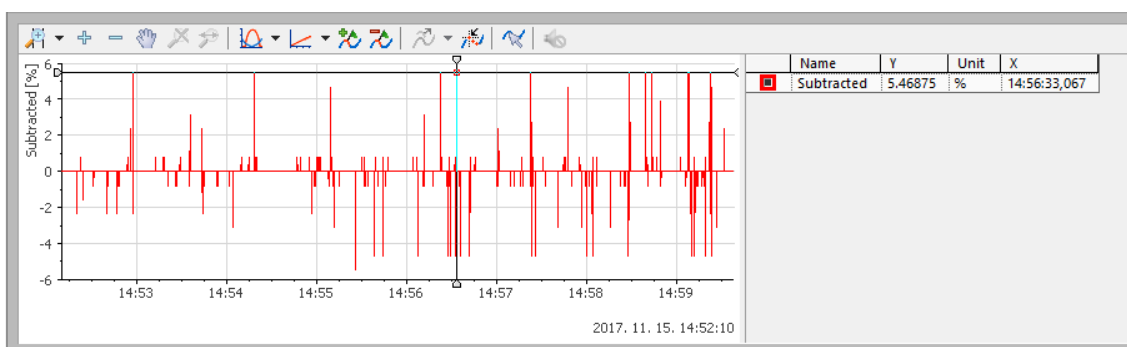
Az STFU és az oxigén szenzorból érkező jeleket összehasonlítva, észrevehető az egyezés. Ennek oka, hogy a kipufogórendszerben található gázok oxigéntartalma alapján történik a

keverékillesztés. Az értékeket alaposabban vizsgálva azonban megfigyelhető, hogy eltérések mutatkoznak. Ez az aktuális és kalkulált értékek közötti eltérés.



6-10. ábra: Az STFU és az oxigén szenzor értékének összehasonlítása

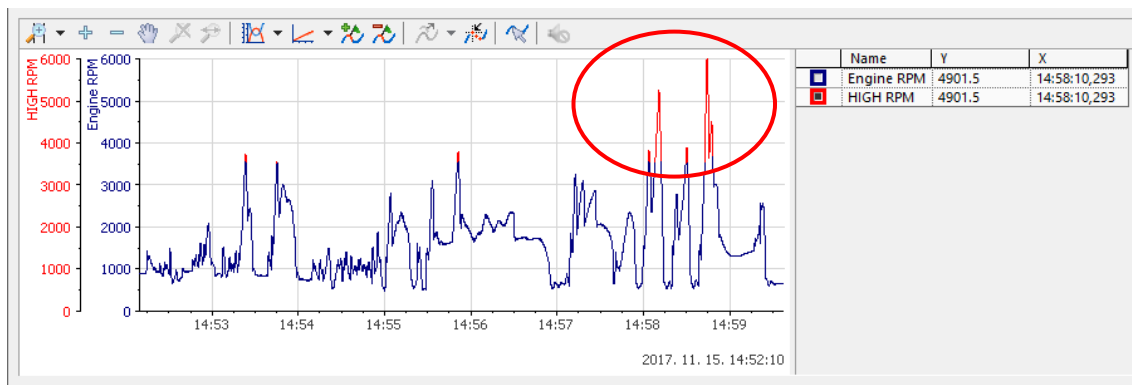
Az értékek százalékosak, így ezeket kivonva egymásból, megkapjuk az abszolút eltérést. Ezen információkat az ECU fejlesztéséhez, illetve a keverékillesztés arányának optimalizálásához használhatjuk fel. Az értékek kivonását a beépített elemző függvények segítségével valósítottam meg. Így minden időpillanatban látható a két érték abszolút különbsége. Az értékeket lehetőségünk van szinkronizáltan, a többi adattal párhuzamosan megjeleníteni.



6-11. ábra: Az STFU és az oxigén szenzor értékének különbsége

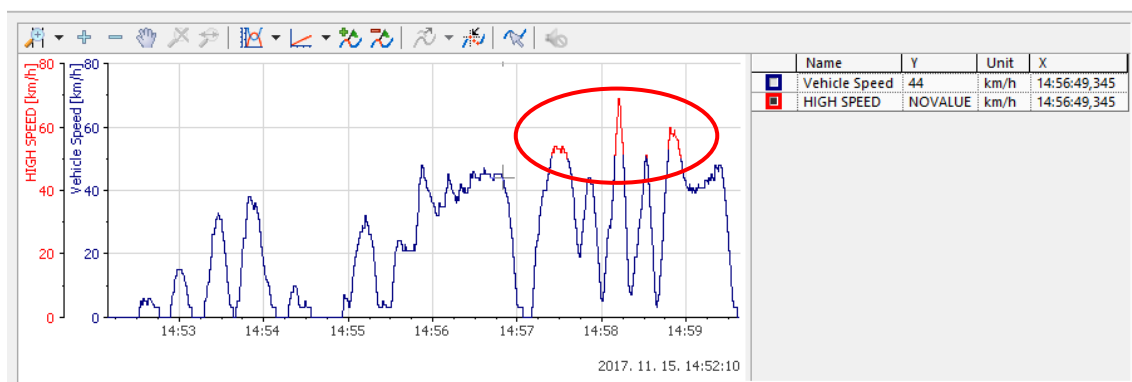
6.1.5 A sebesség és fordulatszám értékének vizsgálata

A jármű sebességének és a motor fordulatszámának vizsgálata megkerülhetetlen, ha a fogyasztást szeretnénk optimalizálni. Általános használat mellett elmondható, hogy a fordulatszám 3500 feletti értéke magasnak tekinthető. A magas fordulatszám a fogyasztás növekedését okozza. Az NI DIAdem beépített elemző funkciójával, az adott érték feletti fordulatszám egyszerűen megjeleníthető.



6-12. ábra: A túl magas fordulatszám ábrázolása

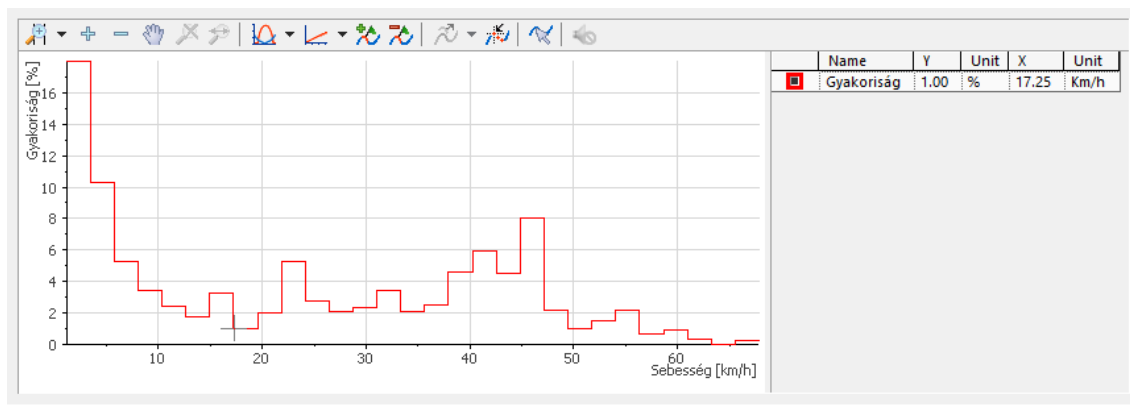
A túl magas fordulatszám eltérő színnel történő jelölésével, láthatóvá válnak a kritikus értékek. Ezen értékek csökkenésével, a gépjármű fogyasztása minimalizálható.



6-13. ábra: A túl magas sebesség ábrázolása

A magasabb sebesség az üzemanyagfogyasztás növekedését okozza. Ezen kívül, a megengedett sebesség átlépése nagyon veszélyes. Az adatok utólagos elemzésével láthatóvá válnak azon területek, ahol a megengedett sebességhatárokat átlépve közlekedtünk. A vizsgálatokat a program automatikusan végzi el, az előre beállított küszöbértékek figyelembevételével.

A sebesség értékeket a beépített függvények segítségével hisztogramokon is ábrázolhatjuk. Így látható a bizonyos értékek gyakoriságának megoszlása. A leggyakoribb tartomány a 0-10 [km/h], ami a jelentős délutáni forgalom következménye. Ezt követi a 40-50 km/h, amely a városi közlekedés megengedett tartománya. Az értékek vizsgálatával a városban közlekedő járművek átlagos sebességére lehet következtetni. Eltérő időtartományban történő mintavételezéssel, a forgalom változása vizsgálható a kritikus időtartományokban.

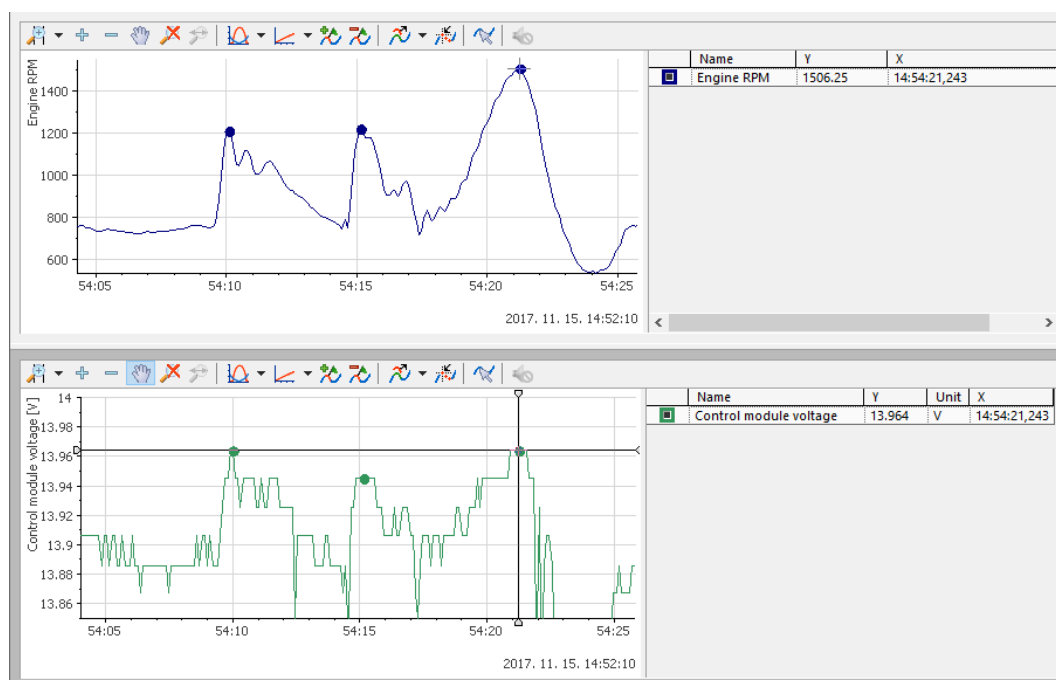


6-14. ábra: A sebességértékek gyakoriságának eloszlása

6.1.6 A generátor teljesítményének vizsgálata

A gépjármű generátorának megfelelő működésére az akkumulátor feszültségállapotából következtethetünk. Így lehetőségünk van a generátor működésének tanulmányozására, speciális eszközök nélkül is. Az OBD-II interfészen keresztül hozzáférhetünk az ECU feszültségállapotához. Az ECU és a gépjármű akkumulátora közötti feszültségkülönbség minimális, így ezen érték is alkalmazható a generátor vizsgálatára.

A generátorok átlagosan 13,5-13,6 [V] töltőfeszültséggel rendelkeznek, ha a motor alapszálláson üzemel. Az alapszállat értéke, egy hétköznapi 4 hengeres benzines belsőégésű motorral rendelkező személygépjárműben 700-800 RPM. A maximálisan megengedhető töltőfeszültség 14,4 [V], amely felett veszélyes buborékképződés alakulhat ki. Az értékek generátor- és gépjármű típusonként eltérhetnek.



6-15. ábra: A fordulatszám és a töltőfeszültség közötti kapcsolat

A 6-15. ábra jól látható a töltőfeszültség és a motor fordulatszámának összefüggése. A két érték jelleggörbéje nagyon hasonló, így a generátor megfelelő működésére következtethetünk. A mért adatok alapján, a legalacsonyabb fordulatszámnál 13,242 [V], a legmagasabbnál 13,964 [V] töltőfeszültség keletkezett.

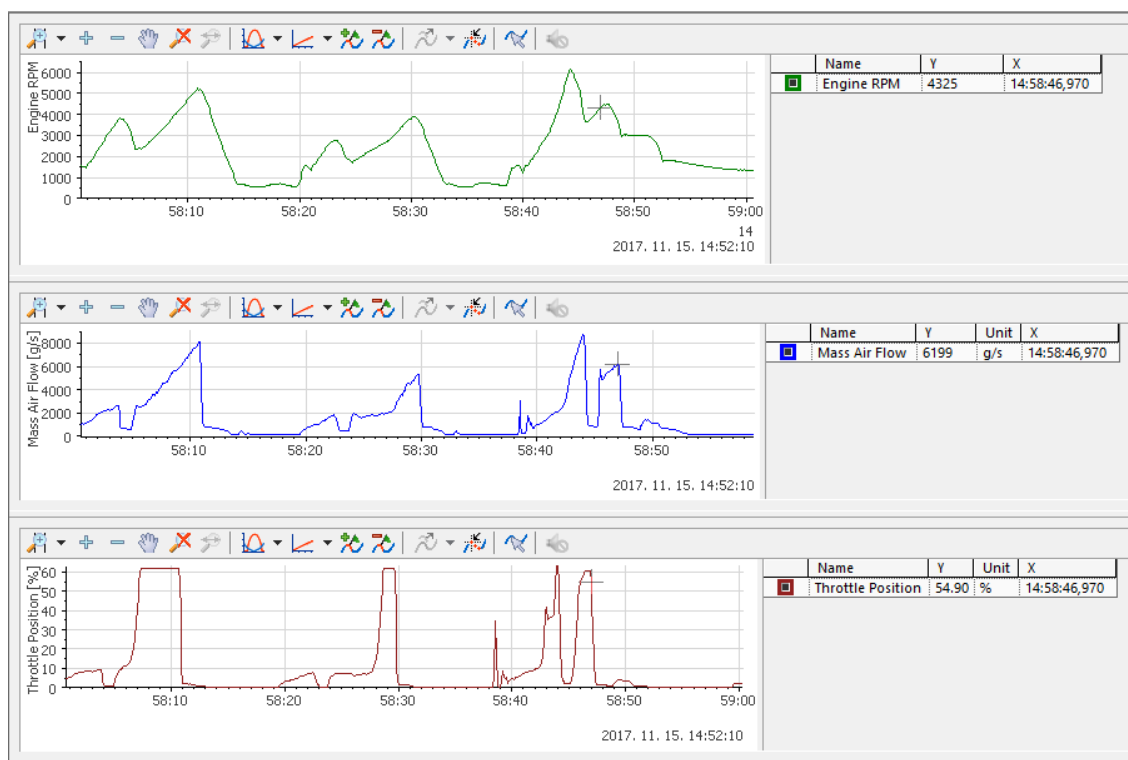
$$x = \frac{13,242 \text{ [V]}}{13,964 \text{ [V]}} = 0,948 \quad (29.)$$

$$y = 100 - (x * 100) \text{ [%]} = 5,17 \text{ [%]} \quad (30.)$$

Az (29.) és (30.) képleteket felhasználva kiszámítható a legmagasabb és a legalacsonyabb fordulatszámhoz tartozó töltőfeszültség százalékos eltérése. Ez az érték a vizsgált értékek alapján 5,17 [%]. A fordulatszám és a generátor teljesítménye között egyenes arányosság nem áll fenn, azonban elmondható, hogy a magasabb fordulatszám értékekhez magasabb töltés társul. Ez egy megfelelően működő generátorra enged következtetni.

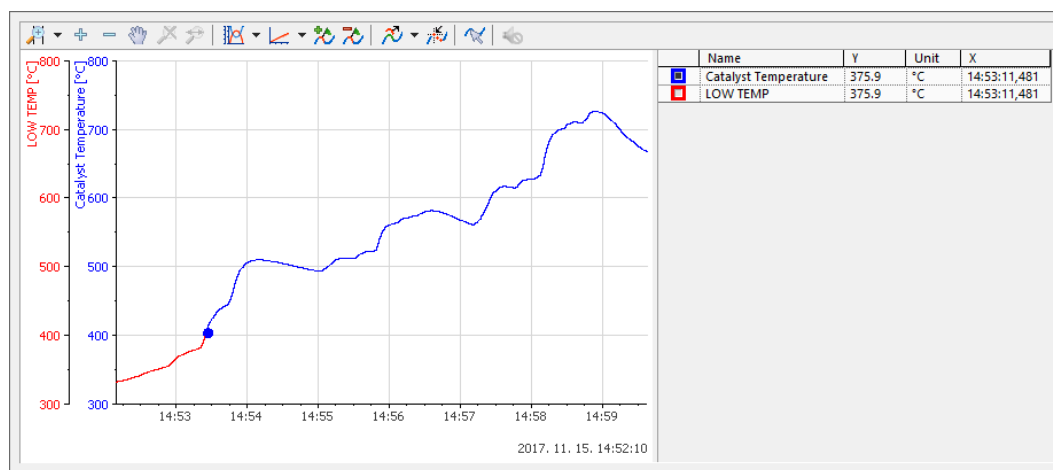
6.1.7 Menetdinamikai és hőmérséklet értékek elemzése

Vezetés közben, ha dinamikus szeretnénk gyorsulni, elkerülhetetlen a gázpedál teljes benyomása. Ilyenkor a pillangószelepek (Throttle Position) jobban kinyílnak, az égéstérbe több üzemanyag jut és a gépjármű gyorsulni kezd. Ez a légáram (Mass Air Flow) és a fordulatszám (Engine RPM) kiugró növekedését okozza. A 6-16. ábra megfigyelhető ezen értékek összefüggése.



6-16. ábra: A fordulatszám, légáram és pillangószelep pozíciójának összefüggése

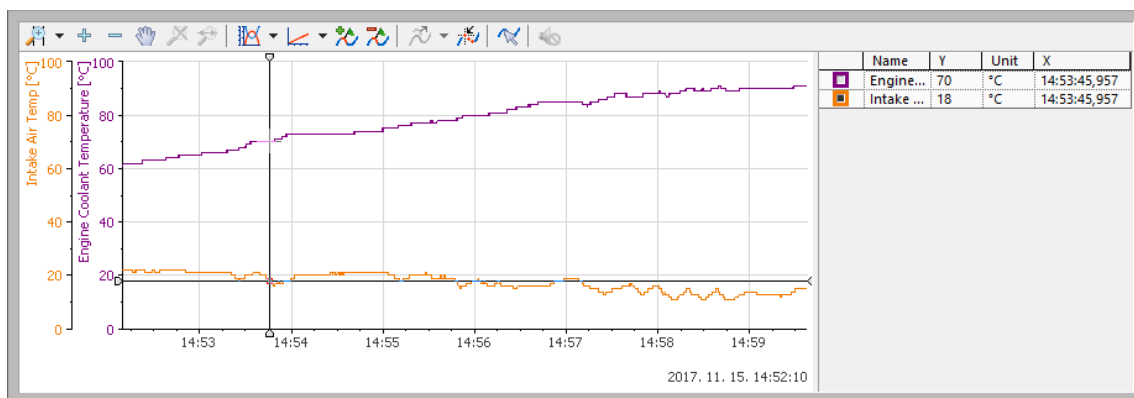
A károsanyag kibocsájtás csökkentésében hatalmas szerepe van a katalizátoroknak. Ez a kipufogóban található eszköz, a gázok károsanyag tartalmát minimalizálja. A három gázkomponensre ható katalizátorok mind a nitrogén-oxidok, a szénhidrogének és a szén-monoxid szintjét jelentősen csökkentik. Ezen eszközökben elhelyezett lambda-szonda méri az oxigénszintet, amely alapján az ECU a motorba juttatott üzemanyag-levegő arányát meghatározza.



6-17. ábra: A katalizátor hőmérsékletváltozása

A megfelelő működéshez 400 °C feletti hőmérséklet szükséges. Alacsonyabb értéknél a katalizátor hatásfoka nem megfelelő, a károsanyag kibocsájtás magas. Az NI DIAdem elemző funkciójával a 6-17. ábra szerint megjelenítettem azon időtartományt, ahol a katalizátor hőmérséklete még nem volt elfogadható. A melegedés idejének gyorsításával, a levegőbe juttatott károsanyag csökkenthető.

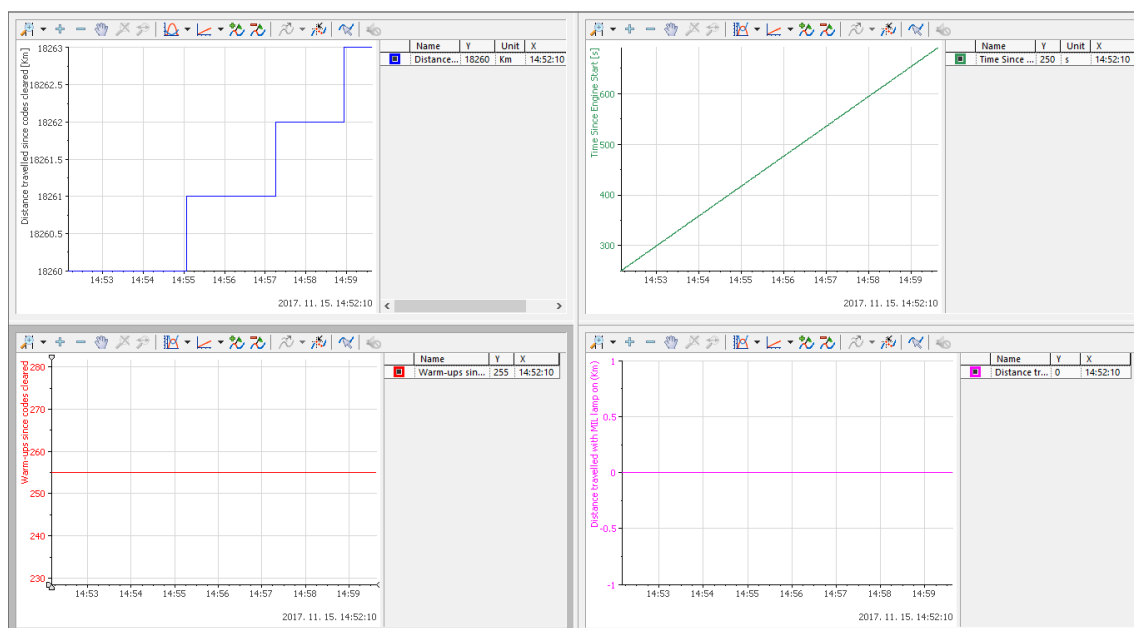
A motorba áramló és a motor hűtését szolgáló levegő vizsgálata, a hővisszanyerő rendszereknél kiemelten fontos. Ilyen rendszerek az elektromos vagy hibrid járműveknél rendszerint megtalálhatók. A belső égésű motor által termelt hő jelentős része veszteségnek tekinthető, hiszen nem kerül felhasználásra. Ezen hőenergiát átalakítva elektromos energiává, javíthatunk autónk hatásfokán. Felhasználhatjuk az akkumulátorok töltésére, illetve egyéb rendszerek felmelegítésére. A belső égésű motor által termelt hő a Harvesting rendszer meleg oldali hőmérsékletével egyenlő, míg a motorba áramló levegő pedig a hideg oldali hőmérsékletet jelenti. A hőmérséklet értékek változását a 6-18. ábra mutatja. A mérési eredményekből és a hőenergiavisszanyerő rendszer karakterisztikáiból levezethető egy adott útszakaszon, adott vezetési stílus mellett megtermelhető villamos teljesítmény.



6-18. ábra: A motorba áramló és a hűtését szolgáló levegő hőmérsékletváltozása

6.1.8 Általános diagnosztikai információk

A gépjármű diagnosztikai rendszeréből általános információkat is kinyerhetünk. A hibakódok törlésétől megtett távolságot, vagy a motorindítástól eltelt időt. Ezen adatokat felhasználva a gépjármű tartós használatát vizsgálhatjuk. A szervizlátogatások közötti időintervallum növelésével költségeket és időt takaríthatunk meg. A motorindítások számát a Start-Stop rendszerek fejlesztéséhez alkalmazhatjuk. Ezen rendszerek segítségével a városi fogyasztás és károsanyag kibocsátás is jelentősen csökkenthető.



6-19. ábra: Általános diagnosztikai információk

Tézis 3: Egy gépjármű emberi viselkedéstől függő vezetési dinamikája befolyásolja a hőenergia visszanyerő rendszer által termelt villamos teljesítményt. Újfajta mérési módszert fejlesztettem ki egy gépjármű vezetési dinamikájának elemzésére, amely valós idejű OBD diagnosztikai, GPS, menetvideó rögzítő adatok alapján és az emberi viselkedést is figyelembe véve automatikus módon elemezi a vezetés dinamikáját, amelyből következtetni lehet a hőveszteség visszatermelésének mértékére. A mérőrendszerrel bizonyítottam, hogy a gépjárművezető viselkedésétől függő vezetési stílus egyértelműen összefüggésben áll a gépjármű hőveszteségéből visszatermelhető villamos teljesítménnyel.

7 Kamera alapú vezetést támogató rendszer fejlesztése mesterséges intelligenciával

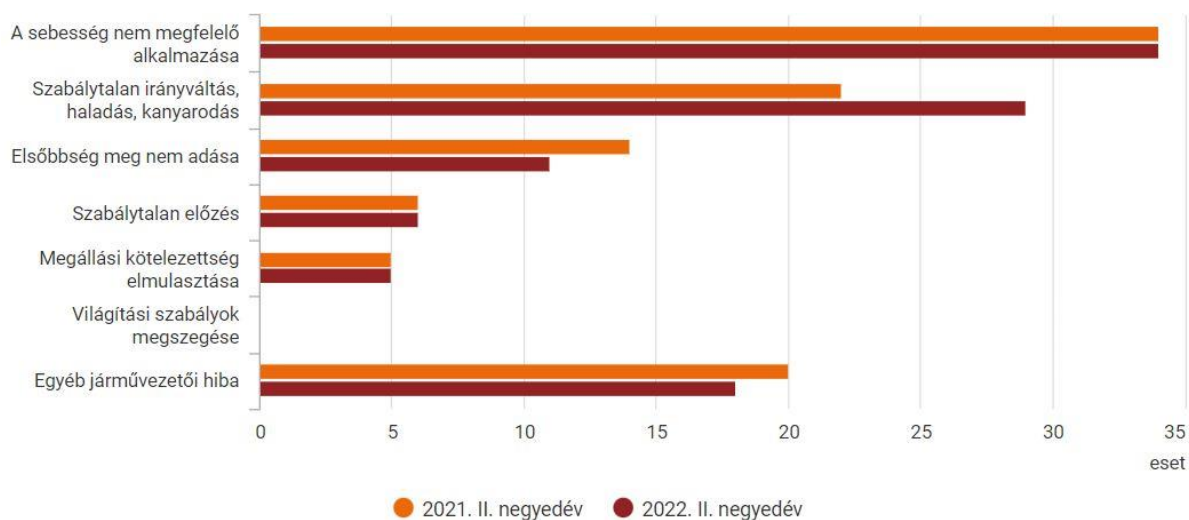
A 7. fejezet egy kamera alapú gépjárművezetést támogató rendszer fejlesztését mutatja be, számítógépes látás és mélytanulás alkalmazásával. A rendszer egy NVIDIA Jetson Nano fejlesztőkészleten fut és képes érzékelni a gyalogátkelőhelyeket, a gyalogosokat, illetve az elsőbbségadásra felszólító KRESZ táblákat, majd a felismerést követően figyelmeztető jelzést küld a gépjárművezető számára, értesítve őt elsőbbségadási kötelezettségéről. A rendszer autóba szerelhető, ezáltal valós időben is használható.

A számítógépes látás saját képek által betanított mély neurális hálózat alkalmazásával valósul meg. Bemutatom a feladat közben, illetve a rendszer használata során felmerülő problémákat, majd ismertetem ezeknek a problémáknak a minimalizálására szolgáló módszereket, optimalizálom a rendszer működését.

7.1 Gépjárművezetést támogató rendszer tervezése

A rendszer célja

A disszertációm záró fejezetének egy olyan témát választottam, mely mindannyiunkat érint, és mindennapjaink részét képezi, mely nem más, mint a közlekedés. A KSH 2022 II. negyedéves adatai alapján a közúti balesetek döntő többsége továbbra is a gépjárművezetők hibája miatt következett be. A leggyakoribb okok a sebesség nem megfelelő alkalmazása, a szabálytalan irányváltás, illetve az elsőbbség elmulasztása volt [115] 7-1. ábra. Véleményem szerint egy olyan rendszerrel, mely felhívja a gépjárművezető figyelmét az elsőbbségadás kötelezettségeire a keresztezésekben, illetve a gyalogátkelőhelyek előtt, csökkenthető lenne az emberi figyelmetlenségből adódó balesetek száma.



7-1. ábra: A járművezetők hibájából bekövetkezett halálos kimenetelű személysérüléses közúti közlekedési balesetek száma az előidéző okok szerint [115]

7.1.1 Célkitűzések

A tervezett rendszer számítógépes látással képes érzékelni a gyalogosokat, a gyalogátkelőhelyeket, illetve az elsőbbségadásra felszólító táblákat, majd ezek után vizuális alapú figyelmeztető jelzést küld a sofőr számára. A kameramodul által rögzített videóból a képkockák tartalmait neurális háló segítségével kerülnek feldolgozásra, legalább 90%-os pontossággal és érzékenységgel, továbbá a felismerés pillanatában egy LCD kijelző fogja értesíteni vizuális úton a gépjárművezetőt elsőbbségadási kötelezettségéről. Arra való tekintettel, hogy éjszaka jelentősen romlanak a megvilágítási viszonyok, a rendszer éjszakai megbízhatóságát egy külön infrakamera használatával és egy sötétben készült képek által betanított neurális hálóval biztosítom.

Jellemző képkockasebességek az ADAS rendszerekben 5 és 60 FPS között mozognak, alkalmazástól függően. Az általam fejlesztett berendezés egyedisége abban rejlik, hogy az ADAS rendszerekben még nem készítettek mozgó gyalogos detektáló rendszert.

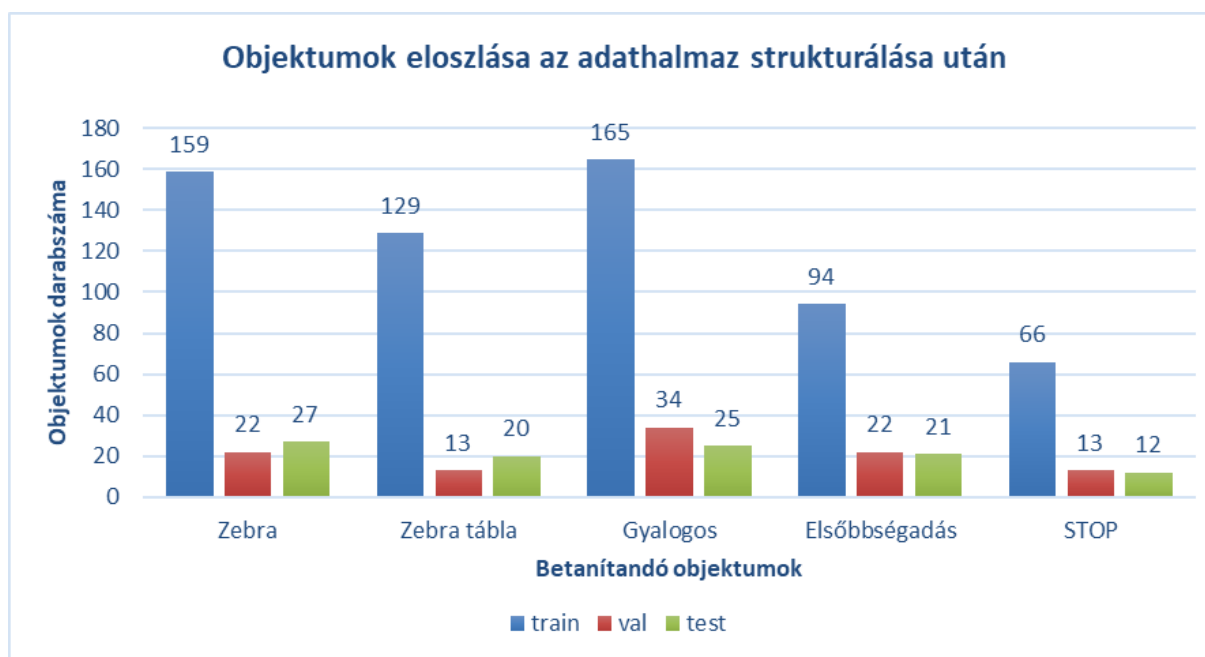
NVIDIA Jetson Nano, Mivel a Jetson Nano B01 verziója két külön CSI bemenettel rendelkezik, ezáltal két kamera is csatlakoztatható hozzá egyidőben. A feladathoz két CSI kameramodult alkalmazok: nappali üzemmódhoz egy PI V2.1 kameramodult (62,2° látómező), míg az éjszakai használatához egy IMX219-160IR kamerát (160°).

7.2 Rendszer megvalósítása és tesztelése

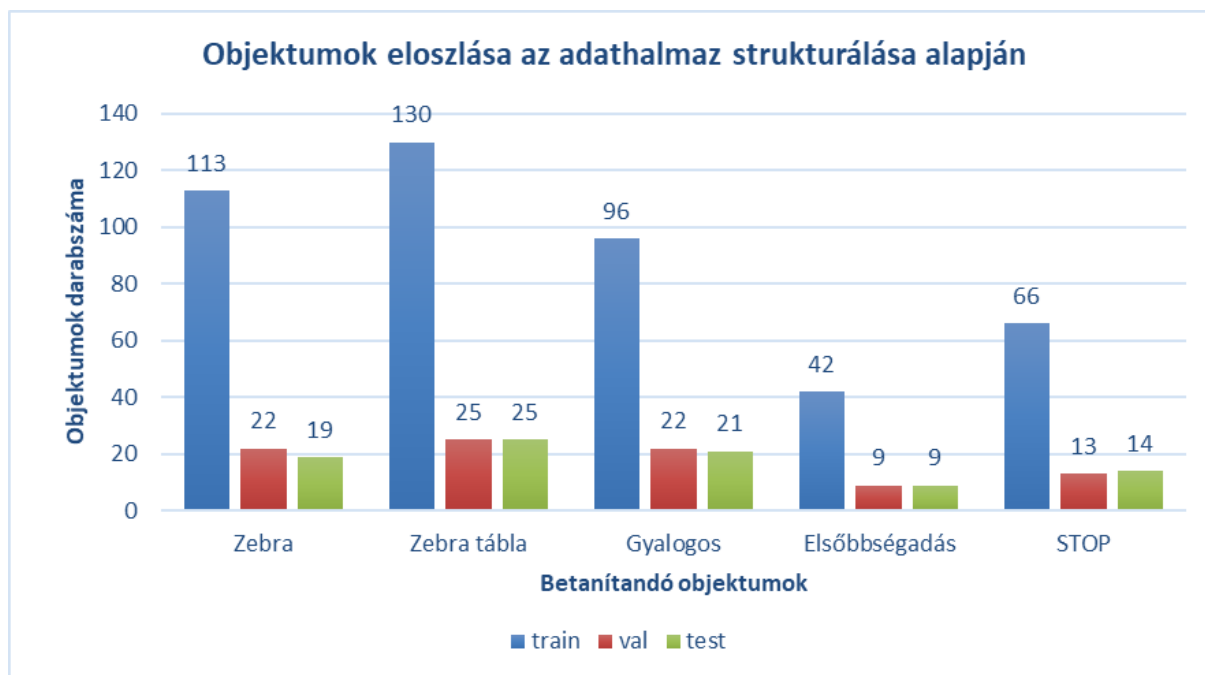
A rendszer fejlesztése alatt 740 képet gyűjtöttem össze a két kamerával: 400 nappali (abból 90 felhős időben, 60 esőben készült) és 340 éjszakai (melyből 60 esőben készült).

A képeket a begyűjtés után egységes méretűre alakítottam (1280x720), majd a CVAT (Computer Vision Annotation Tool) [116] segítségével felcímkéztem a rajtuk látható objektumokat. Az annotációk alapján a tárgyak nevei és koordinátái XML fájlalba kerültek lementésre. Legvégül az adathalmazt, az annotációkkal együtt, Pascal VOC formátumban exportáltam.

Ezt követően az adathalmazt három részre strukturáltam: a képek 70%-át betanításra (ezek képezik a tanulási adatbázist), 15%-át validálásra (minden tanulási iteráció után ezek alapján értékelődik ki a modell), 15%-át tesztelésre (olyan képek melyekkel soha nem találkozott még a tanító algoritmus). A képeken látható objektumok eloszlását az adathalmaz strukturálása szerinti 7-2. ábra és a 7-3. ábra szemlélteti.



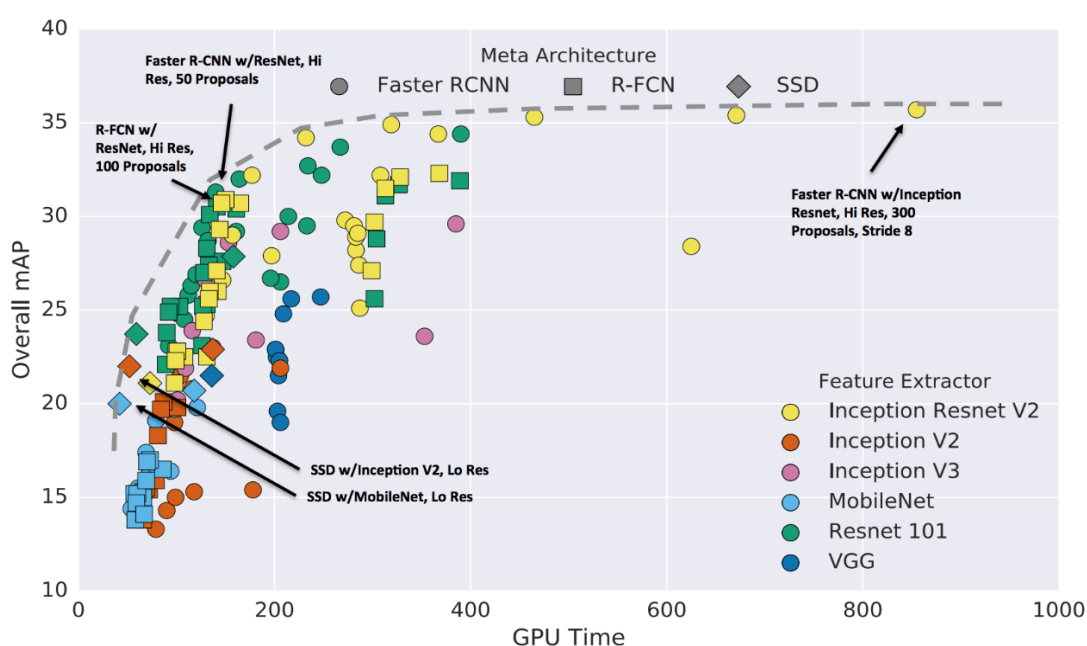
7-2. ábra: Nappali képeken látható objektumok eloszlása az adathalmaz strukturálása alapján



7-3. ábra: Éjszakai képeken látható objektumok megoszlása az adathalmaz strukturálása szerint

7.2.1 Pre-trained neurális háló kiválasztása

Az alkalmazott neurális háló kiválasztásakor nem az a legfontosabb kérdés, hogy melyik modell a legjobb, hanem az adott alkalmazáshoz mely architektúra, milyen konfigurációval biztosítja a legjobb egyensúlyt a pontosság és a gyorsaság között. A 7-4. ábra szemlélteti a precizitás és a sebesség összehasonlítását különböző architektúrák és tulajdonság kinyerő algoritmusok között.



7-4. ábra: Pontosság és gyorsaság összehasonlítása különböző algoritmusok esetében [117]

Látható, hogy a legjobb sebességet az „SSD MobileNet Lo Res” biztosítja egy, a többi algoritmushoz képest, közepes átlagos precizitással (mAP). A megnevezésben a „Lo Res” kifejezés az alacsony képfelbontásra utal, ami jelen esetben azt jelenti, hogy ez a neurális háló 300x300 méretű, 3 csatornás (RGB) képeket fogad el bemenetként. Ezt a típusú neurális hálót kisteljesítményű beágyazott rendszerekre, illetve mobiltelefonokra fejlesztették ki. Ez az architektúra (Single Shot Detection), mint ahogy a neve is mutatja, egy olyan CNN, mellyel csak egy képet kell készíteni ahhoz, hogy a képen belül több tárgyat észleljünk. Egyszerűbb számítások hajtódnak végre benne, ami előnyös a számítógép erőforrásfelhasználása szempontjából. Ebből kifolyólag ez az architektúra nagyobb sebességet nyújt, mint pl. egy Faster R-CNN modell, melynek két képre van szüksége a tárgyfelismeréshez. [118][119]

Mivel a tervezett rendszer valós időben kerül felhasználásra, így a sebességnek adtam nagyobb prioritást, ezáltal az SSD MobileNet 300x300 neurális hálóra esett a választásom.

7.2.2 SSD MobileNet 300x300 betanítása PyTorch-al

Számos mélytanulási kísérlet során vizsgáltam a tanulási ráta és a veszteségfüggvény változásának kapcsolatát. Azt tapasztaltam, hogy minél kisebb a validációs hiba, annál nagyobb tanulási ráta szükséges annak a korrigálásához, viszont a hiba csökkenésével egyidejűleg szükséges a tanulási ráta értékét is csökkenteni. Túl magas tanulási ráta nemkívánatos divergáló viselkedést okoz a veszteségfüggvényében, viszont amennyiben az túl alacsony, feleslegesen elnyújtja a tanulási folyamatot. Tanulási iterációnak vagy epochnak nevezzük azt, amikor a tanító adatbázis összes példáján egyszer végigfutott az algoritmus. A tanító algoritmust két különböző tanulási ütemtervvel futtattam végig. Elsőként manuálisan, lépcsőzetesen csökkentettem a tanulási rátát (Step Decay/Multi Step Learning Rate). A kezdeti tanulási ráta értékét 10^{-3} -ra állítottam be, melyet 50 epoch után 10^{-4} -re, majd ismét 50 epoch után 10^{-5} -re csökkentettem.

Másodjára egy olyan módszert vizsgáltam meg, mellyel a tanulási ráta folyamatosan csökken, a koszinusz függvénynek megfelelően (Cosine Annealing Schedule). A 24. képlet szemlélteti a koszinuszosan változó tanulási ráta változását az iterációk függvényében. [120]

$$LR_i = \frac{1}{2} * LR_{max} * (1 + (\cos \frac{T_i}{T_n} * \pi)) \quad (24.)$$

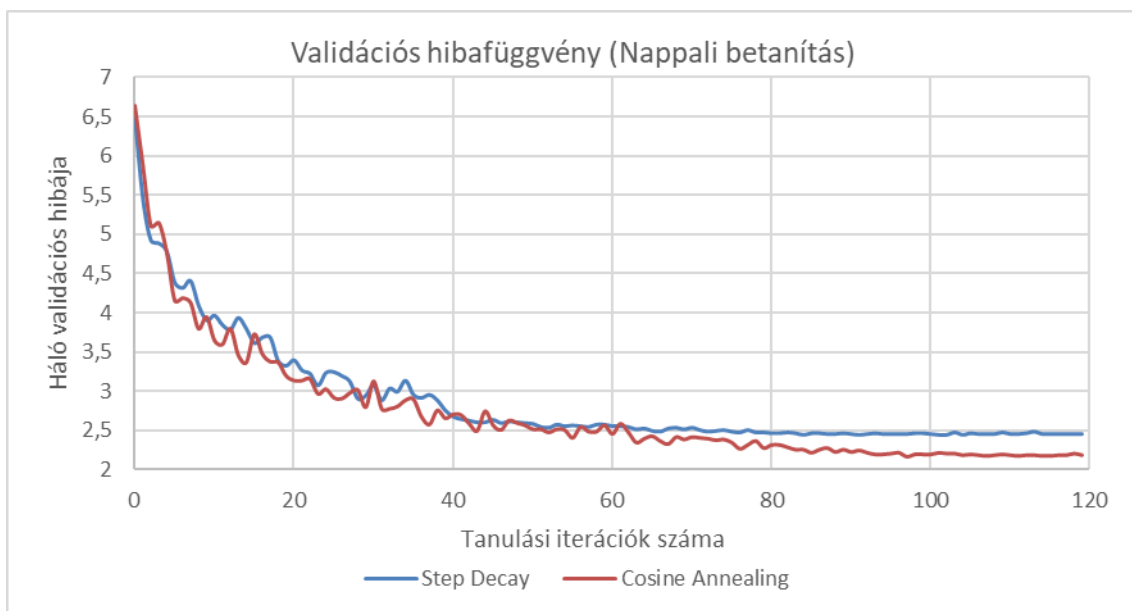
A 24. képlet a koszinusz függvényből származik. LR_i reprezentálja az aktuális tanulási rátát, T_i az aktuális epochot, míg T_n az összes epochot, ezáltal a kettő aránya megszorozva π -vel, a $[0-180^\circ]$ félperiódust adja meg, mely 1 és -1 között vesz fel értékeket. Mivel nem szeretnénk negatív értékeket kapni, ezért 1-et hozzáadva a függvény 2 és 0 között vehet fel értékeket, $\frac{1}{2}$ -

vel beszorozva már csak 1 és 0 között. Amennyiben LR_{max} reprezentálja a kezdeti tanulási ráta értékét (koszinusz amplitúdója), a függvény értékkészlete $[LR_{max}; 0]$ lesz, azaz a tanulási ráta koszinuszosan csökken LR_{max} -tól 0-ig.

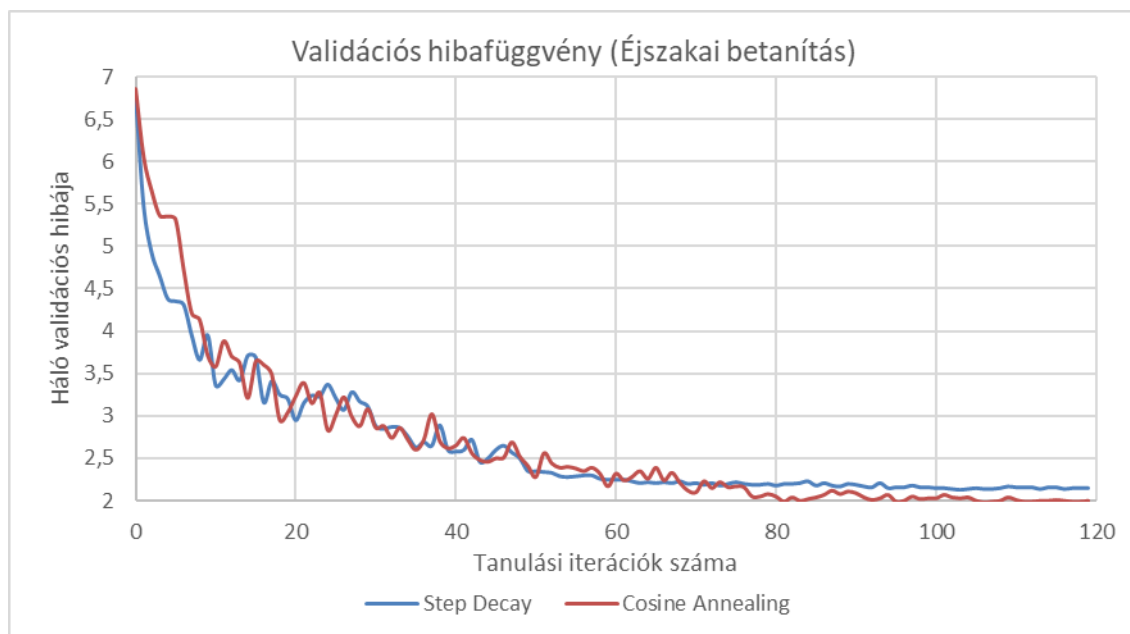
Ezt már egy magasabb értékről, 0,01-ről indítottam, mely 0-ig csökken. Ebben az esetben is 120 epoch-ig futtattam a tanítási folyamatot. Az általam használt tanulási ráta függvényt a 25. képlet írja le:

$$LR_i = \frac{1}{2} * 0,01 * (1 + (\cos \frac{T_i}{120} * \pi)) \quad (25.)$$

A 7-5. ábra és a 7-6. ábra illusztrálja a tanulási folyamat során a hibafüggvény változását, a két különböző tanulási ütemterv alkalmazásával. A validációs hiba a validálásra szánt képek felhasználásával lett meghatározva minden egyes tanulási iteráció végén a program által.



7-5. ábra: Nappali betanítás hibafüggvényének változása az iterációk függvényében



7-6. ábra: Éjszakai betanítás hibafüggvényének változása az iterációk függvényében

A 7-5. ábra és a 7-6. ábra jól szemlélteti, hogy a koszinuszosan csökkenő tanulási rátával jobban sikerült minimalizálni a validációs hibafüggvény értékeit. Véleményem szerint ez annak tulajdonítható, hogy egyrészt a folyamat nagyságrendileg magasabb tanulási rátákat használ, továbbá a Cosine Annealing módszerrel a tanulási ráta folyamatosan csökken az iterációk során, nem lépcsőzetesen és ez azért jelentős, mert minél kisebb a validációs hiba, annál kisebb tanulási ráta szükséges annak a korrigálásához.

7.2.3 Modell validációja

A számítógépes látásban a precizitás és a szenzitivitás népszerű értékelési mérőszámok, melyeket az objektumérzékelésnél alkalmaznak. Az előbbi az előrejelzések pontosságát reprezentálja (26. képlet), azaz, hogy hány százalékban helyesek a predikciók, míg az utóbbi azt ismerteti, hogy hány százalékban ismeri fel a neurális háló az érzékelendő objektumokat (27. képlet). [121]

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (26.)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (27.)$$

A képlet alapján:

- TP (True Positive) – Helyes előrejelzések: a valós és a prediktált kimenet is 1
- FP (False Positive) – Hibás előrejelzések: a valós érték 0, de a modell 1-et prediktált (pl. STOP tábla helyett előzni tilos táblát érzékelt a modell)

- FN (False Negative) – Beazonosítatlan objektumok száma: a valós érték 1, de a modell 0-et prediktált (pl. figyelmen kívül hagyott STOP tábla) [121]

A modell kiértékelése során a pontosság értékek az IoU (Intersect of Union) küszöbértékek alapján vannak számolva, mely a prediktált határolódoboz és a valós határolódoboz közötti lefedést jelenti. Például 0,5 IoU küszöbérték esetében, csak azok a predikciók számítanak igaznak (TP), melyek határolómezőinek metszetének és uniójának aránya legalább 0,5, különben hamisnak veszi őket a program. [122]

A háló kiértékelését a könyvtárban található „*eval_ssd.py*” Python kód által valósítottam meg, mely során a program kiszámolja a tesztelésre szánt képekre (60 nappali és 51 éjszakai) a precizitás értékeket, 0,5 IoU esetében, majd leátlagolja őket. A kódot végigfuttattam minden tizedik checkpoint állományon, melyek a mélytanulás során generálódnak az epoch-ok végén. Ezek az állományok felelnek meg a tanulási folyamat kimeneteinek, melyek a neurális háló aktuális állapotáról tárolnak információt. Ezzel az volt a célom, hogy megtaláljam a neurális hálónak azt az állapotát, mely a legnagyobb precizitással rendelkezik.

A nappali betanítás során a Step Decay módszerrel elért legjobb pontosság 89,74% a 119. epoch-ban, míg a Cosine Annealing Schedule módszerrel sikerült elérni a 92,25% pontosságot a 89. epoch-ban. Az éjszakai betanítás során a Step Decay módszerrel elért legjobb pontosság 93,59% az 59. epoch-ban, míg a Cosine Annealing módszerrel sikerült elérni a 95,15% pontosságot a 112. epoch-ban.

A teszt képeken végrehajtott validáció során arra lettem figyelmes, hogy a rendszer nehezen érzékeli a távolban levő KRESZ táblákat, emellett gyakran figyelmen kívül hagyja a gyalogátkelőhelyeket (leginkább a lekopott felfestésűeket). A nappali modell átlagos szenzitivitása 50%, míg az éjszakaijé: 48,87% lett.

7.2.4 Rendszer tesztelése valós körülmények között

A betanítást követően, az „*onnx_export.py*” Python kóddal exportáltam a két neurális hálót ONNX formátumba (a legnagyobb pontossággal rendelkező checkpoint fájlokat), melyeket ezt követően a „*detectnet.py*” kód segítségével futtattam a teszt képeken, majd élő kamerafelvételen. Az algoritmus létrehozta először a Jetson Nano GPU CUDA magjaira optimalizált. engine fájlt (FP16), majd ezt futtatja a TensorRT keretrendszer által a kamerafelvételen. A neurális háló futása során a modell predikciókat tesz a képkockákon látható objektumok valószínűségére és melyekre ez az érték legalább 50%, azokra visszajelzést küld a felhasználó számára (objektum neve és a határoló téglalap).

7.2.5 Tesztelés nappal

A neurális háló ~43 FPS-el képes feldolgozni a kamera által szolgáltatott képkockák tartalmait (Rögzítési mód: 1280 x 720; 60 FPS). A tesztelés során azt tapasztaltam, hogy a rendszer kiváló pontossággal és megbízhatósággal érzékeli a gyalogosokat, különböző szögekben és helyzetekben is.



7-7. ábra: Gyalogosfelismerés tesztelése nappal

A betanított KRESZ táblákat is pontosan észleli, a 90% feletti átlagos precizitásnak köszönhetően alacsony volt a tévesen beazonosított objektumok előfordulási valószínűsége, viszont már érezhetően kisebb szenzitivitással képes detektálni őket. Ezáltal azt tapasztaltam, hogy mivel a táblák kisebb méretűek, így távolról nem mindig érzékeli őket a rendszer. Véleményem szerint ez annak tulajdonítható, hogy a neurális háló a kamera által rögzített képkockákat 300x300 felbontásra konvertálja, ezáltal jelentős információvesztés történik és így a kisebb tárgyak „elvesznek” rajta. A rendszert teszteltem hajnalban, ugyanakkor naplementében is. A rendszer nagymértékben segíti a gépjárművezetőt a vezetésben, amennyiben őt teljesen elvakítja a nap. A gyalogátkelőhely felfestésekkel adódott többször gond, melyeken a visszaverődő fény gyakrabban megzavarta a rendszert.

Legvégül a rendszert teszteltem alkonyatban is. A rendszer hasonló megbízhatósággal működött, mint az előbbi látási viszonyokban, viszont már jól észrevehetően csökkent az érzékenysége a gyalogátkelőhelyek felismerésében (a lekopott felfestésűekre volt különösen jellemző) a gyengébb fényviszonyoknak köszönhetően.

7.2.6 Éjszakai üzemmód tesztelése

Szürkületben, a fényviszonyok jelentős romlásával már az vehető észre, hogy jelentősen csökken a rendszer megbízhatósága. Tapasztalataim alapján az alkonyat sötétebb szakaszában már jobb megbízhatóságot nyújt az IR-kamera és az éjszakai képek által betanított modell használata. A betanított objektumokat hasonló pontossággal és érzékenységgel érzékelt, nem tapasztaltam romlást a nappali üzemmódhoz képest. Egyetlen gyenge pontja a rendszernek, ismételten a gyalogátkelőhelyek felismerése volt.



7-8. ábra: Gyalogosfelismerés tesztelése szürkületben, este

Legvégül teszteltem a rendszer viselkedését egy éjszakai esős időben is. A rendszer ekkor sem okozott csalódást számomra, a rossz körülmények ellenére sem. Kivilágítatlan utcában, tompított fényszóró használatával, esős szélvédőn keresztül is sikerült érzékeltetni a gyalogosokat, illetve a betanított közúti jelzéseket.

7.3 Rendszer optimalizációja

A betanított modell tesztelése során azt a konklúziót vontam le, hogy a képméret redukálása során jelentős információvesztés lép fel, ami akadályt szül a kisebb méretű objektumok detektálásánál. Ez problémát jelent megbízhatóság szempontjából, mivel a rendszer úgymond csak az utolsó pillanatban figyelmezteti a gépjárművezetőt, amikor már lehet késő a közbeavatkozás szempontjából. A munkám további részében ennek a problémának az orvoslására fókuszáltam.

Ezáltal, a továbbiakban egy olyan neurális hálóval orvosoltam ezt a problémát, mely nagyobb méretű képeket fogad el bemenetnek. Mivel nem érhető el olyan modell, mely nagyobb méretű bemeneti képekkel dolgozik, illetve az előző fejezetben leírtak alapján tanítható be, konvertálható és optimalizálható a Jetson Nanon („jetson-inference” könyvtárral), így más módszert kellett keresnem.

Korábbi kutatómunkámnak köszönhetően minimális tapasztalatot szereztem a Tensorflow használatával kapcsolatban, mely aktuálisan a legnépszerűbb mélytanulási szoftverkönyvtár, emellett számos előtanított háló újratanítását teszi lehetővé, melyek közül választásom az „SSD MobileNet V2 FPNLite 640x640” modellre esett. Ennek oka, hogy az SSD MobileNet architektúrával valósítható meg a legjobb inferencia sebesség, emellett a 640x640 képméret több, mint a négyszerese az előzőekben alkalmazottnak, így várhatóan a modell pontossága és szenzitivitása szignifikánsan optimalizálható. Ez minden bizonnyal a sebesség rovására fog menni, ezáltal közel négyszeres sebességromlásra számítok, a képméretből kiindulva.

Az előtanított modellt a Tensorflow Zoo 2 Model Zoo-ból töltöttem le [123], melyet a Tensorflow szoftverkönyvtár segítségével tanítottam újra, a saját adathalmaz felhasználásával, PC-n, majd a tanítási folyamatokat követően kiértékeltem a modellt, illetve különböző beállítások által (adataugmentáció használata, keresődobozok méretarányainak definiálása) növeltem a modell jóságát, majd legvégül TensorRT-re optimalizálva futtattam a Jetson Nanon.

7.3.1 Tanító adathalmaz konfigurálása

A továbbiakban át kellett struktúrálnom az adathalmazt két részre, a Tensorflow használatából adódóan. Ezáltal, az előző fejezetben validálásra használt képek egy részét, annotációkkal együtt, átcsoportosítottam a tanító adathalmazhoz (320 nappali, 272 éjszakai), a maradékot pedig a teszteléshez használt képekhez (80 nappali, 68 éjszakai), így kialakítva a 80-20%-s eloszlást köztük.

7.3.2 Optimalizálás adat-augmentációval

Az overfitting csökkentésének egyik legjobb technikája a tanító adathalmazban jelen lévő képek számának növelése. A nagymennyiségű adat összegyűjtése fárasztó és időigényes feladat, ezért az új adatok gyűjtése nem járható út. Adat-augmentáció révén tudunk segíteni a tanuló algoritmusnak felismerni azokat a tulajdonságokat, amelyek szignifikánsak. Ez akkor nagyon hasznos, amikor nincs elég tanító képünk vagy nem elég diverz az adathalmazunk, ráadásul nem igényel többletmunkát, nem kell felcímkézni az újabb képeket, azaz nem jár plusz emberi erőforrással. Például készítünk egy másolatot a képről, melyet elforgatunk, tükrözünk,

vagy másik színtérbe helyezünk át, majd ezt is odaadjuk a tanuló algoritmusnak. Elterjedt augmentációs eljárás még a zoomolás (képrészlet kiemelése). Segítségével emelni lehet a képek számát, hogy segítsük a jó általánosítást, viszont mérlegelni kell ennek a fokát, hogy a kép tartalma még értelmezhető legyen. További eljárások közé tartozik még az eltolás, a homográfia, zaj hozzáadása, illetve a fényerő, szaturáció és kontraszt értékek változtatása [124].

Az adathalmaz képeinek számának növelésével sok hasonló képet tudunk generálni és a neurális hálót ugyanazon tárgyszály több példányán tanítjuk be különböző perspektívákból. Mivel egyre több adatot adtunk hozzá, a modell képtelen lesz „bemagolni” a mintákat, így kénytelen általánosítani. A képtöbbszörözési technikákat és azok mértékét a „*pipeline.config*” állományban kell beállítani. Az általam alkalmazott előfeldolgozási műveletek és azok paraméterei a tanító adathalmaz képein az alábbiak:

- Random képrészlet kivágása:
 - Az új képnek legalább egy kereső téglalapot le kell fednie 75% mértékben
 - A vágott kép méretarányainak határai: min. 75% és max. 150%
 - A vágott kép megengedett területaránya az eredeti képhez képest: min. 50% és max. 80%
 - A kivágott határolódobozok minimális átfedési küszöbértéke az eredetihez képest: 50%
 - Az eredeti kép megtartásának valószínűsége: 12,5%
- Fényerő változtatása véletlenszerűen: max. +20%
- Kontraszt változtatása véletlenszerűen: -20% és +20% között
- Szaturáció változtatása véletlenszerűen: -20% és +20% között
- Színárnyalat változtatás véletlenszerűen: max. +1%

A modell kiértékelését követően észrevehető, hogy jelentősen javultak a pontosság és szenzitivitás jellemzők az előző betanításhoz képest:

- AP (IoU=0.50) = 97,1% (+3,6%)
- AP (IoU=0.75) = 83% (+9,9%)
- AP (IoU=0.50:0.95) = 74,2% (+6,5%)
- AR (IoU=0.50:0.95) = 79,5% (+4%)

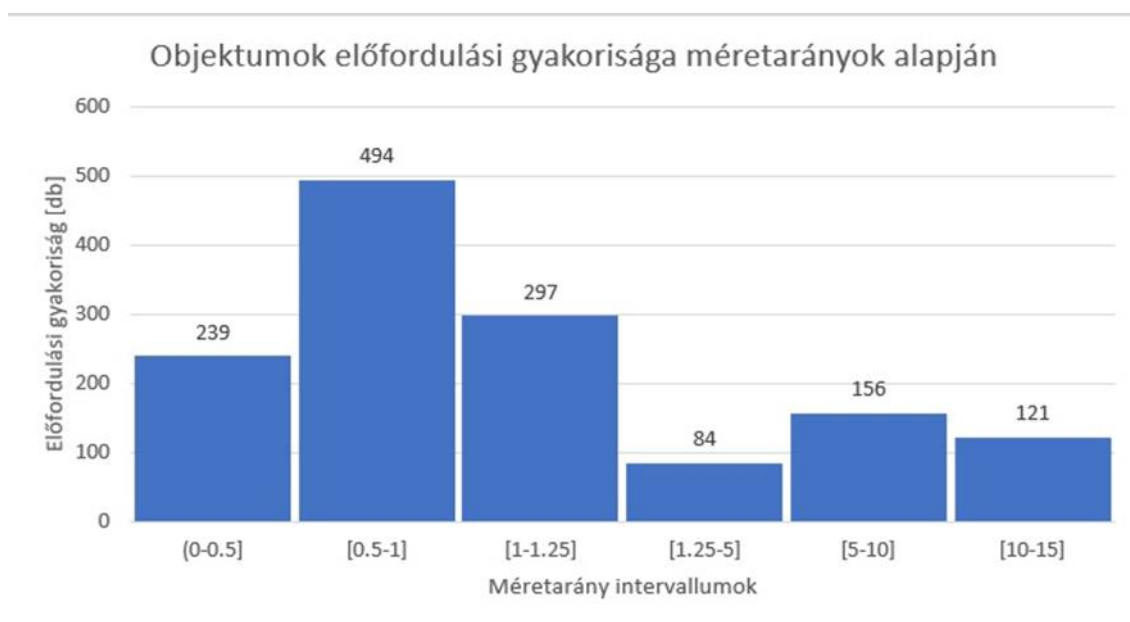
A neurális hálót ismét lefuttattam a teszt képein (IoU=0,5), majd szemügyre vettem őket, hogy vizuális úton is megbizonyosodjak a javulásról. Azt tapasztaltam, hogy szignifikánsan csökkent a téves predikciók száma, emellett érezhetően csökkent a lokalizációs hiba is, mely abban

nyilvánult meg, hogy a jósolt határolódobozok pontosabban illeszkedtek a keresett objektumokra

Egyetlen gyakori hiba a gyalogátkelőhelyek felismerésénél jelentkezett, a modell többször figyelmen kívül hagyta őket (a frissen felfestetteket is). A legszembetűnőbb eltérés a gyalogátkelőhelyek és a táblák között a méretarányukban rejlik. Alaposabban megvizsgálva a „*pipeline.config*” állományban konfigurált mélytanulási paramétereket, arra lettem figyelmes, hogy a keresődobozok méretarányai valószínűleg nem fedik le a gyalogátkelőhely felfestések nagy részét.

7.3.3 Optimalizálás egyedi keresődobozok használatával

Újabb intervallumokat definiáltam, összesen hatot 7-9. ábra, ezeknek megfelelően konfiguráltam be az objektumokat kereső téglalapok méretarányait (0.5, 1, 1.25, 5, 10 és 15) a „*pipeline.config*” állományban, újra lefuttattam a tanító algoritmust majd validáltam a kapott modellt.



7-9. ábra: Objektumok előfordulási gyakorisága méretarányok szerint

A modellt ismét leteszteltem a teszt halmaz képein (IoU=0,5) és jelentős javulást vettem észre az előző állapothoz képest, melyet a 7-10. ábra egyértelműen igazol. Baloldalon látható a modell előző állapota, mely betanításához az alapértelmezett téglalap méretarányokat alkalmaztam, míg a jobb oldalon az általam definiált méretarányokat. Ezáltal sikerült kiküszöbölni azt a problémát is, hogy a háló figyelmen kívül hagyja a gyalogátkelőhely felfestéseket.



7-10. ábra: Gyalogátkelőhelyek felismerése

7.3.4 TensorRT modell validációja

A fenti fejezetekben hasonló módon, validáltam a modellek pontosságát és érzékenységét ugyanazon teszt képek felhasználásával. Az AP és AR értékeket:

- Nappali modell átlagos precizitása (AP): 98,45%
- Nappali modell átlagos szenzitivitása (AR): 87,59%
- Éjszakai modell átlagos precizitása (AP): 100%
- Éjszakai modell átlagos szenzitivitása (AR): 90,68%

A teszt képeken való validációt tekintve, a 7.2.4 fejezetben kapott eredményekhez képest, a TensorRT-re való optimalizációt követően, javulást tapasztaltam, különösen a szenzitivitásban.

7.4 A vezetést támogató rendszerrel elért eredmények

A kutatómunkám elején kitűzött céljaimat sikerült teljesítenem. Az SSD MobileNet v1 300x300 architektúra alkalmazásával egy olyan rendszert valósítottam meg, mely valós időben használható a gépjárműben és reakcióideje ($\sim 45 \text{ FPS} \rightarrow 22,22 \text{ ms}$) jelentősen felülmúlja a kutatás elején kitűzött értéket, továbbá az emberi reakcióidőt. A tesztelés során azt tapasztaltam, hogy a rendszer kiváló pontossággal érzékeli a betanított objektumokat, mind nappal, mind éjszaka, minimális a téves predikció, viszont a rendszer érzékenységének tekintetében már megkérdőjelezhető annak megbízhatósága. A közlekedési táblákat távolról érzékeli, emellett egy másik pontja a gyalogátkelőhelyek felismerése volt, ezért ezeknek a problémáknak a gyökérokát szerettem volna feltárni, majd ezeket eliminálni a rendszerből.

Az SSD MobileNet v2 640x640 FPNLite modellel az elért eredmények nagyon ígéretesek. A nagyobb felbontású bemeneti képeknek köszönhetően redukálódott az információvesztés mértéke, lehetővé téve a kisebb méretű tárgyak detektálását. Az adat-augmentáció és a testreszabott keresődoboz méretarányok használatával tovább tökéletesítettem a neurális hálók precizitását és szenzitivitását, kielégítve a kutatás elején erre vonatkozó célkitűzéseket, majd a céleszközöm hardveres architektúrájára optimalizáltam őket, ezáltal a modellek futtathatók a NVIDIA TensorRT keretrendszeren. A teszt képeken történő validáció alapján, szignifikáns javulás tapasztalható a neurális hálók precizitás és szenzitivitás értékeiben, 50%-os lefedettségű küszöbérték esetében, jelentősen felülmúlva az előbbi architektúrával elért értékeket.

A rendszer felépítését tekintve, kevés helyet igényel, könnyen beszerezhető, a szükséges eszközök elérhető áron beszerezhetők. Az érintőképernyős LCD kijelzőnek köszönhetően a visszajelzés vizuális módon érzékelhető a gépjárművezető által.

Tézis 4: Egy vezetéstámogató rendszer valós idejű képfeldolgozással és SSD MobileNet architektúrájú mélytanulási algoritmus alkalmazásával képes az emberi reakcióidőt felülmúlva detektálni mozgó gyalogost, gyalogátkelőhelyet és közlekedéstáblákat. Valós mérési eredmények bizonyítják, hogy a fejlesztett vezetést támogató rendszer napszaktól és időjárástól függetlenül alkalmas a detektálási funkció ellátására és detektálási ideje és pontossága meghaladja az emberi reakcióidő és észlelési pontosságát.

8 Összefoglalás

A 21. század egyik legnagyobb változása talán a közlekedés területén megy végbe. Robbanásszerűen nőnek az e-mobilitással kapcsolatos tudományos cikkek, szabadalmak, találmányok stb. Napjainkra már minden autógyártó foglalkozik az elektromos közlekedéssel és elektromos hajtásláncú járművet is kínál a fogyasztóknak. Az elektromos közlekedés területén az autógyártók között a legnagyobb versenyt az egy feltöltéssel megtehető menettáv jelenti. A kutatómunkám kezdetén engem is magával ragadott a kérdés, hogyan lehet a megtett úton energiát visszatáplálni és ezért kezdtem el foglalkozni az Energy Harvesting rendszerekkel. A kutatómunkám során hamar körvonalazódott, hogy az energia visszatáplálást az ipar szinte kizárólag mozgási energiából táplálja vissza, ezért a kutatásom fő irányvonala a hőenergia újrahasznosítás lehetőségeinek vizsgálata lett.

A kutatómunkám elején a Termoelektromos generátorok működésével, szimulációjával, illetve terhelt állapotának viselkedésével foglalkoztam. Saját fejlesztésű mérőrendszer segítségével új megállapítást tudtam tenni a TEG munkaponti állapotáról.

A kutatásom következő fejezetében egy hőenergia visszanyerő rendszert fejlesztettem ki, amely villamos motorok palásfelületéről képes hőenergiát elvonva villamos teljesítményt előállítani. A hőenergiavisszanyerő rendszert teszteltem labor és valóságos körülmények között is.

A kutatómunkám harmadik részében azt vizsgáltam, hogy a gépjármű vezetési stílus milyen mértékben befolyásolja a gépjárműben elhelyezett hőenergiavisszanyerő rendszer működését. A vizsgálat lefolytatásához szükségem volt egy olyan mérőrendszer fejlesztésére, amely képes valós időben gépjármű hő és menetdinamikai adatok elemzésére, GPS adatok mentésére és élő kamerakép rögzítésére. A mérőrendszer kifejlesztését követően a mért adatok időbeli szinkronizációját végeztem el, melyet az adatok alapos elemzése és kiértékelése követett.

A PhD értekezésem utolsó fejezetében egy vezetéstámogató rendszert fejlesztettem ki, amely valós időben, kamera segítségével képes gyalogosokat, gyalogátkelőhelyet és forgalmi táblákat detektálni, és az emberi reakcióidőt felülmúlva jelzést adni a gépjárművezetőnek. A fejlesztett rendszer nagymértékben hozzájárulhat a figyelmetlenségekből adódó gyalogos gázolások megelőzéséhez.

Az értekezésben bemutatott eredmények nagymértékben hozzájárulhatnak az e-mobilitás fejlődéséhez és bízom benne, hogy hamarosan az elektromos gépjárművekben megjelennek a regeneratív fékezési módszerek mellett a hőenergiavisszanyerő rendszerek is.

9 Summary

Perhaps one of the biggest changes of the 21st century can be identified in transport. Articles, patents, inventions related to e-mobility are growing explosively. Today, all car manufacturers are involved in electric transport and offer electric powertrains to consumers. In the field of electric transport, the biggest competition between car manufacturers is the travelled distance with one charge. At the beginning of my research, I was fascinated by the question of how to recover energy during the travel distance, that was the reason why I started working on energy harvesting systems. During my research, it soon became clear that energy recovery was almost exclusively based on kinetic energy, so the main focus of my research became investigating the possibilities of thermal energy harvesting.

At the beginning of my research I examined and simulated the operation, and loaded state behaviour of thermoelectric generators. Using a self-developed measuring system, I was able to make a new statement about the working point condition of the TEG.

In the next chapter of my research, I developed a thermal energy recovery system capable of generating electrical power by extracting thermal energy from the shale surface of electric motors. I tested the thermal energy recovery system in both laboratory and real-life conditions.

In the third part of my research, I examined to what extent the driving style of the vehicle affects the operation of the heat energy recovery system installed in the vehicle. In order to conduct the investigation, I needed to develop a measuring system capable of analyzing vehicle thermal and driving dynamics data in real time, saving GPS data and recording live camera images. After the development of the measurement system, I performed the temporal synchronization of the measured data, which was followed by a thorough analysis and evaluation of the data.

In the final part of my PhD thesis, I developed a driving support system that can detect pedestrians, pedestrian crossings and traffic signs in real time, using a camera, and give a signal to the driver, surpassing the human reaction time. The developed system can greatly contribute to the prevention of pedestrians being run over due to inattention.

The results presented in the thesis can greatly contribute to the development of e-mobility, and I am confident that heat energy recovery systems will soon appear in electric vehicles next to regenerative braking methods.

10 Továbbfejlesztési lehetőségek

Továbbfejlesztési terveim között szerepel, hogy a hibrid vagy elektromos közlekedésben használt vontató motorok teljes palástfelületére kiterjedő TEG rendszert alakítsak ki. Ennek a hővisszanyerő rendszernek kettős szerepe lenne, az elsődleges, hogy szabályozott formában hőt tudnánk elvonni a motortól, illetve az elvont hőt újra villamos teljesítménnyé alakítanánk. A palástfelületen lévő generátorok adott közlekedési paraméterek alapján mesterséges intelligencia alkalmazásával változtatható lenne a sorba és párhuzamosan kapcsolt modulok száma. Ezzel a hővisszanyerő rendszert dinamikusan változtathatóvá tenném, amely a vezetési körülményeket figyelembe véve tudná változtatni a kimeneti paramétereit a folyamatos munkaponti paraméterek tartása mellett.

A vezetést elemző rendszert is szeretném továbbfejleszteni. A PhD kutatómunkámat napjainkban a mesterséges intelligencián alapuló vezetéstámogató rendszerek irányába fejlesztettem tovább. A vezetést elemző rendszerbe alkalmazott kamera alapú menetvideó rögzítő rendszert kiegészítettem egy olyan funkcióval, amely valós időben képes detektálni gyalogátkelőhelyeket, KRESZ táblákat, illetve gyalogátkelőhelyen közlekedő gyalogosokat változó időjárási körülmények között. A szoftver mesterséges intelligenciát használ, mélytanulási funkcióval kerültek betanításra a különféle mintaképek és vezetés közben valós időben képes 99% feletti találati aránnyal felismerni a betanított képeket. A PhD kutatómunkám eredményei felkeltették a Debrecenbe érkező BMW mérnökeinek kíváncsiságát is és kezdeményeztek egy szoros együttműködést, melynek kidolgozása folyamatban van.

Szeretném a kutatómunkámat tovább folytatni a BMW fejlesztőcsapával közösen és biztos vagyok benne, hogy a jövő gépjárműveinek az energiavisszatáplálás és vezetéstámogató rendszereinek területén kimagasló eredményt fogunk tudunk elérni.

11 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik biztatásukkal, támogatásukkal, segítségükkel hozzájárultak az értekezésem elkészítéséhez.

Megköszönöm a segítségét tudományos témavezetőmnek, Váradiné Szarka Angélának és Prof. Dr. Czap Lászlónak, akik az évek során nagy figyelmet fordítottak szakmai fejlődésemre, tanácsaikkal és segítőkész hozzáállásukkal aktívan támogattak értekezésem elkészítésében.

Köszönet a Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Mechatronika Tanszék munkatársainak, akik mindig igyekeztek segítségemre lenni. Külön köszönöm meg Prof. Dr. Korondi Péternek és Dr. Balajti Istvánnak, támogatást, amely a tudományos kutatásom előrehaladását segítette.

Külön köszönet illeti meg az NI Hungary Kft.-t, amiért ideiglenesen rendelkezésemre bocsátotta azt a mérőrendszert, amellyel a kutatómunkám mérési és vezérlési feladatait tudtam végrehajtani.

Köszönetet mondok szerető feleségemnek és gyermekeimnek, akik türelmükkel, szeretetükkel és biztatásukkal járultak hozzá értekezésem megírásához. Szüleimnek köszönöm a belém vetett hitet és az értem hozott áldozatokat, amellyel az egyetemi tanulmányaimat lehetővé tették.

Saját publikációim

Q-s besorolású nemzetközi folyóirat cikkek:

- **Kornel Sarvajcz**; Laszlo Ari; Jozsef Menyhart, AI on the Road: NVIDIA Jetson Nano-Powered Computer Vision-Based System for Real-Time Pedestrian and Priority sign detection, APPLIED SCIENCES-BASEL (2076-3417): 14 4 Paper 1. 24 p. (2024)
 - Folyóirat szakterülete: Scopus - Engineering SJR indikátor: Q2
- Sziki Gusztáv Áron; **Sarvajcz Kornél**; Kiss János; Gál Tibor; Szántó Attila; Gábora András; Husi Géza; Experimental investigation of a series wound dc motor for modeling purpose in electric vehicles and mechatronics systems; MEASUREMENT (0263-2241): 109 pp 111-118 (2017)
 - Folyóirat szakterülete: Scopus - Electrical and Electronic Engineering SJR indikátor: Q1
- Sziki Gusztáv Áron; **Sarvajcz Kornél**; Szántó Attila; Mankovits Tamás; Series Wound DC Motor Simulation Applying MATLAB SIMULINK and LabVIEW Control Design and Simulation Module; PERIODICA POLYTECHNICA TRANSPORTATION ENGINEERING (0303-7800 1587-3811): 48 1 pp 65-69 (2020)
 - Folyóirat szakterülete: Scopus - Automotive Engineering SJR indikátor: Q2
- **K Sarvajcz**; A Váradiné Szarka; Development of portable measuring system for testing of electrical vehicle's heat energy recovery system; JOURNAL OF PHYSICS-CONFERENCE SERIES (1742-6588 1742-6596): 772 pp 1-6 (2016); 2016 Joint IMEKO TC1-TC7-TC13 Symposium: Metrology Across the Sciences: Wishful Thinking?. Konferencia helye, ideje: Berkeley (CA), Amerikai Egyesült Államok 2016.08.03. - 2016.08.05.
 - Folyóirat szakterülete: Scopus - Physics and Astronomy (miscellaneous) SJR indikátor: Q3

Angol és magyar nyelvű publikációim

- Sarvajcz Kornél; Váradiné Dr. Szarka Angéla; Végh János; Energy harvesting jelentősége és lehetőségei; Környezettudatos energiatermelés és -felhasználás III. Környezet és Energia Konferencia; Konferencia helye, ideje:: Debrecen, Magyarország 2014.05.08. - 2014.05.09.; Debrecen: MTA DAB Megújuló Energetikai Munkabizottság, pp 147-152 (2014)
- Sarvajcz Kornél; Váradiné Dr. Szarka Angéla; Simulation and calibration test of thermoelectric generators; XXI IMEKO World Congress "Measurement in Research and Industry": Full papers; Konferencia helye, ideje:: Prága, Csehország 2015.08.30. - 2015.09.04.; Prague: Czech Technical University in Prague, pp 1003-1008 (2015)
- Sarvajcz Kornél; Váradiné Dr. Szarka Angéla; Termoelektromos Generátor Szimulációs És Kalibrációs Mérései; MŰSZAKI TUDOMÁNY AZ ÉSZAK-KELET MAGYARORSZÁGI RÉGIÓBAN 2015; Konferencia helye, ideje: Debrecen, Magyarország 2015.06.11.; Debrecen: Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottság, pp 505-510 (2015)
- Sarvajcz Kornél; Váradiné Dr. Szarka Angéla; Termoelektromos generátor szimulációs és kalibrációs mérései: Simulation and Calibration Test of Thermoelectric.; Konferencia helye, ideje:: Arad, Románia 2015.10.08. - 2015.10.11.; Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), pp 124-129 (2015) (Nemzetközi Energetika–Elektrotechnika konferencia 1842-4546)
- Sarvajcz Kornél; Váradiné Szarka Angéla; Termoelektromos generátor szimulációs és kalibrációs mérései; Környezet és energia a mindennapokban; Debrecen: MTA DAB Földtudományi Szakbizottság, pp 271-275 (2016)
- Sarvajcz Kornél; Váradiné Szarka Angela; Development of portable measuring system for testing of electrical vehicle's heat energy recovery system; RECENT INNOVATIONS IN MECHATRONICS (2064-9622): 3 1-2 pp 1-4 (2016)
- Torma Dávid; Sarvajcz Kornél; Husi Géza; Autódiagnosztikai adatok feldolgozása NI DIAdem programmal; RECENT INNOVATIONS IN MECHATRONICS (2064-9622): 5 Klnsz pp 1-7 (2018)
- Balogh Ildikó Julianna; Sarvajcz; Husi Géza; GPS adatok mérése és feldolgozása NI, LabVIEW szoftverrel; RECENT INNOVATIONS IN MECHATRONICS (2064-9622): 5 Klnsz pp 1-7 (2018)
- István Kovács; Kornél Sarvajcz; Modelling and Simulation of a Series Wound Direct Current Motor Using Ansys; Konferencia helye, ideje: Oradea, Románia 2018.05.31. - 2018.06.01.; Oradea: University of Oradea Publishing House, pp 241-244 (2018)
- István Kovács; Kornél Sarvajcz; Modelling and simulation of a series wound direct current motor using ANSYS; MATEC WEB OF CONFERENCES (2261-236X): 184 Paper 02015. 4 p. (2018)

Referenciák:

- [1] P. Gautam, S. Kumar, and S. Lokhandwala, 'Chapter 11 - Energy-Aware Intelligence in Megacities', in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, S. Kumar, R. Kumar, and A. Pandey, Eds. Elsevier, 2019, pp. 211–238.
- [2] E. Stephens et al., 'Future prospects of microalgal biofuel production systems', *Trends Plant Sci.*, vol. 15, no. 10, pp. 554–564, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.tplants.2010.06.003.
- [3] H. Wang, A. Jasim, and X. Chen, 'Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications – A comprehensive review', *Applied Energy*, vol. 212, pp. 1083–1094, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.125.
- [4] '17MAD216_EM - Electronic Products & Technology'. [Online]. Available: https://www.ept.ca/features/energy-harvesting-greener-environment/17mad216_em/. [Accessed: 22-Nov-2019].
- [5] A. Harb, Energy harvesting: State-of-the-art, *Renewable Energy* 36 (2011) 2641-2654, DOI:10.1016/j.renene.2010.06.014
- [6] Mateu Loreto, Moll Francesc. Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics. *Proceedings of the SPIE Microtechnologies for the New Millenium* 2005;5837:359e73.
- [7] P. Hersch, K. Zweibel, and S. E. R. Institute, 'Basic Photovoltaic Principles and Methods', p. 71.
- [8] F. Yildiz, 'Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques', *Journal of Technology Studies*, vol. 35, no. 1, pp. 40–48, 2009.
- [9] S. Galmés and S. Escolar, 'Analytical Model for the Duty Cycle in Solar-Based EH-WSN for Environmental Monitoring', *Sensors (Basel)*, vol. 18, no. 8, p. 2499, Aug. 2018, doi: 10.3390/s18082499.
- [10] J. Halme, P. Vahermaa, K. Miettunen, and P. Lund, 'Device Physics of Dye Solar Cells', *Advanced Materials*, vol. 22, no. 35, pp. E210–E234, 2010, doi: 10.1002/adma.201000726
- [11] M. Aljumaili, A.S. Abdalkafor, Analysis of the Hard and Soft Shading Impact on Photovoltaic Module Performance Using Solar Module Tester, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)* 10(2), DOI:10.11591/ijped.v10.i2.pp1014-1021, June 2019
- [12] T. Ibn-Mohammed et al., 'Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 1321–1344, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.095.
- [13] M. N. Bhukya and V. R. Kota, 'A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions', *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 869–884, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.015.
- [14] A. S. Andrenko, Xianyang Lin, and Miaowang Zeng, 'Outdoor RF spectral survey: A roadmap for ambient RF energy harvesting', in *TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference*, 2015, pp. 1–4, doi: 10.1109/TENCON.2015.7373140.
- [15] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, 'Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey', *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, Secondquarter 2015, doi: 10.1109/COMST.2014.2368999.
- [16] L.-G. Tran, H.-K. Cha, W.-T. Park, 'RF power harvesting: a review on designing methodologies and applications', *Micro and Nano Systems Letters* volume 5, Article number: 14 (2017)

- [17] S. K. Divakaran, D. D. Krishna, and Nasimuddin, 'RF energy harvesting systems: An overview and design issues', *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 29, no. 1, p. e21633, 2019, doi: 10.1002/mmce.21633.
- [18] <https://www.gaussianwaves.com/2013/09/friss-free-space-propagation-model/>
- [19] F. Yildiz and K. L. Coogler, 'Low Power Energy Harvesting with a Thermoelectric Generator through an Air Conditioning Condenser', 2014.
- [20] T. Wu, J. Kim, J.-H. Lim, M.-S. Kim, N.V. Myung, 'Comprehensive Review on Thermoelectric Electrodeposits: Enhancing Thermoelectric Performance Through Nanoengineering', *Frontiers in Chemistry* Volume 9-2021
- [21] H. Kuttarmare et al., 'Fabrication of Peltier Cooling System: Alternative for Refrigeration', *IJARIIIE*, vol. 2, pp. 260–264, May 2016.
- [22] F. Hidayanti, E. Wati, M. Miftahudin, 'Design of Energy Harvesters on Motorcycle Exhaust using Thermoelectric Generator for Power Supply Electronic Device', *International Journal of Renewable Energy Research*, 2020, DOI:10.20508/ijrer.v10i1.10446.g7864
- [23] S. L. Sharma, A. Debbarma, 'Effect of P-Leg material and resistance ratio on a segmented thermoelectric generator', *Materials Today: Proceedings*, Volume 66, Part 3, 2022, Pages 1023-1030, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.825>.
- [24] D. K. Aswal, R. Basu, and A. Singh, 'Key issues in development of thermoelectric power generators: High figure-of-merit materials and their highly conducting interfaces with metallic interconnects', *Energy Conversion and Management*, vol. 114, pp. 50–67, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.01.065.
- [25] H. J. Goldsmid, A. R. Sheard, and D. A. Wright, 'The performance of bismuth telluride thermojunctions', *British Journal of Applied Physics*, vol. 9, p. 365, Sep. 1958, doi: 10.1088/0508-3443/9/9/306.
- [26] A. J. Minnich et al., 'Modeling study of thermoelectric SiGe nanocomposites', *Phys. Rev. B*, vol. 80, no. 15, p. 155327, Oct. 2009, doi: 10.1103/PhysRevB.80.155327.
- [27] W.-S. Liu, B.-P. Zhang, L.-D. Zhao, and J.-F. Li, 'Improvement of Thermoelectric Performance of CoSb₃-xTex Skutterudite Compounds by Additional Substitution of IVBGroup Elements for Sb', *Chem. Mater.*, vol. 20, no. 24, pp. 7526–7531, Dec. 2008, doi: 10.1021/cm802367f.
- [28] T. Ikeda, L. A. Collins, V. A. Ravi, F. S. Gascoin, S. M. Haile, and G. J. Snyder, 'SelfAssembled Nanometer Lamellae of Thermoelectric PbTe and Sb₂Te₃ with Epitaxy-like Interfaces', *Chem. Mater.*, vol. 19, no. 4, pp. 763–767, Feb. 2007, doi: 10.1021/cm062121p.
- [29] J. J. Pulikkotil et al., 'Doping and temperature dependence of thermoelectric properties in Mg₂(Si,Sn)', *Phys. Rev. B*, vol. 86, no. 15, p. 155204, Oct. 2012, doi: 10.1103/PhysRevB.86.155204.
- [30] X. Guo et al., 'Thermoelectric transport properties and crystal growth of BiSbTe₃ bulk materials produced by a unique high-pressure synthesis', *CrystEngComm*, vol. 15, no. 36, pp. 7236–7242, Aug. 2013, doi: 10.1039/C3CE40780B.
- [31] P. Ligeza, On Search for Unconventional Energy Sources for Harvesting, 2024, *Energies* 2024, 17, 1091. <https://doi.org/10.3390/en17051091>
- [32] Elvin, N., & Erturk, A. (2013). Introduction and Methods of Mechanical Energy Harvesting. *Advances in Energy Harvesting Methods*, 3–14. doi:10.1007/978-1-4614-5705-3_1
- [33] H. Kim, Y. Tadesse, and S. Priya, 'Piezoelectric Energy Harvesting', in *Energy Harvesting Technologies*, S. Priya and D. J. Inman, Eds. Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 3–39.

- [34] H. S. Kim, J.-H. Kim, and J. Kim, 'A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration', *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 12, no. 6, pp. 1129–1141, Dec. 2011, doi: 10.1007/s12541-011-0151-3.
- [35] V. E and S. Rajakumar, 'Performance improvement of piezoelectric materials in energy harvesting in recent days – A review', *Journal of Vibroengineering*, vol. 20, Nov. 2018, doi: 10.21595/jve.2018.19434.
- [36] Y.-F. Lin, J. Song, Y. Ding, S.-Y. Lu, and Z. L. Wang, 'Alternating the Output of a CdS Nanowire Nanogenerator by a White-Light-Stimulated Optoelectronic Effect', *Adv. Mater.*, vol. 20, no. 16, pp. 3127–3130, Aug. 2008, doi: 10.1002/adma.200703236.
- [37] M.-G. Kang et al., 'Enhanced piezoelectric properties of vertically aligned single-crystalline NKN nano-rod arrays', *Sci Rep*, vol. 5, p. 10151, May 2015, doi: 10.1038/srep10151.
- [38] G. Zhu, R. Yang, S. Wang, and Z. L. Wang, 'Flexible High-Output Nanogenerator Based on Lateral ZnO Nanowire Array', *Nano Lett.*, vol. 10, no. 8, pp. 3151–3155, Aug. 2010, doi: 10.1021/nl101973h.
- [39] Y. Duan, Y. Huang, Z. Yin, N. Bu, and W. Dong, 'Non-wrinkled, highly stretchable piezoelectric devices by electrohydrodynamic direct-writing', *Nanoscale*, vol. 6, no. 6, pp. 3289–3295, Feb. 2014, doi: 10.1039/C3NR06007A.
- [40] Y.-F. Lin, J. Song, Y. Ding, S.-Y. Lu, and Z. L. Wang, 'Piezoelectric nanogenerator using CdS nanowires', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 2, p. 022105, Jan. 2008, doi: 10.1063/1.2831901.
- [41] C.-T. Huang et al., 'GaN Nanowire Arrays for High-Output Nanogenerators', *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 132, no. 13, pp. 4766–4771, Apr. 2010, doi: 10.1021/ja909863a.
- [42] S. Boisseau, G. Despesse and B. Ahmed Seddik, *Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting, Small-Scale Energy Harvesting*, ISBN 978-953-51-0826-9, Chapter 5, October 31, 2012.
- [43] <https://www.designnews.com/iot/energy-harvesting-low-power-consumption-are-way-forward-iot-wearables>
- [44] Zhang Jin-qiu: "A review on energy-regenerative suspension systems for vehicles". In: *Proceedings of the World Congress on Engineering*. Vol. 3. 2013, pp. 3-5.
- [45] Bart LJ Gysen: "Efficiency of a regenerative direct-drive electromagnetic active suspension". In: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 60.4 (2011), pp. 1384-1393.
- [46] Kimihiko Nakano. "Combined type self-powered active vibration control of truck cabins". In: *Vehicle System Dynamics* 41.6 (2004), pp. 449{473.
- [47] Zhang Jin-qiu et al. "A review on energy-regenerative suspension systems for vehicles". In: *Proceedings of the World Congress on Engineering*. Vol. 3. 2013, pp. 3-5.
- [48] Mar. 2016. url: <http://levantpower.com/>
- [49] X.D. Xie and Q. Wang: "Energy harvesting from a vehicle suspension system". In: *Energy* 86 (2015), pp. 385-392.
- [50] Hyeoung Woo Kim: "Energy harvesting using a piezoelectric „cymbal" transducer in dynamic environment". In: *Japanese journal of applied physics* 43.9R (2004), p. 6178.
- [51] Hongseok Lee: "Design of a piezoelectric energy-harvesting shock absorber system for a vehicle". In: *Integrated Ferroelectrics* 141.1 (2013), pp. 32-44.
- [52] Xiao-ming Wu: "MEMS piezo cantilever for vibration energy harvesting". In: *Journal of Functional Materials and Devices* 14.2 (2008), pp. 467-471.
- [53] S.P. Beeby, M.J. Tudor, and N.M. White: "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications". In: *Measurement science and technology* 17.12 (2006), R175.

- [54] Hockstad L, Hanel L. Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks. In: Environmental system science data infrastructure for a virtual ecosystem; 2018.
- [55] Barker T, Bashmakov I, Bernstein L, Bogner J, Bosch P, Dave R, et al. Contribution of working group III to the fourth assessment report of the IPCC: technical summary. In: Climate change 2007: mitigation contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press; 2009. p. 27–93.
- [56] Rahman I, Vasant PM, Singh BSM, Abdullah-Al-Wadud M, Adnan N. Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;58:1039–47
- [57] Un-Noor F, Padmanaban S, Mihet-Popa L, Mollah MN, Hossain E. A comprehensive study of key electric vehicle (EV) components, technologies, challenges, impacts, and future direction of development. *Energies* 2017;10: 1217.
- [58] Bayindir KÇ, G'ozüküçük MA, Teke A. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. *Energy Convers Manag* 2011;52:1305–13.
- [59] Chan CC. The state of the art of electric and hybrid vehicles. *Proc IEEE* 2002;90: 247–75.
- [60] Xiong W, Zhang Y, Yin C. Optimal energy management for a series–parallel hybrid electric bus. *Energy Convers Manag* 2009;50:1730–8.–
- [61] Chau KT, Wong YS. Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy Convers Manag* 2002;43:1953–68.
- [62] Kebriaei M, Niasar AH, Asaei B. Hybrid electric vehicles: an overview. In: 2015 international conference on connected vehicles and expo (ICCVE). IEEE; 2015. p. 299–305.
- [63] Zhang X, Chau KT, Chan CC. Overview of thermoelectric generation for hybrid vehicles. *Journal of Asian Electric Vehicles* 2008;6:1119–24.–
- [64] Xie X, Wang Q. Energy harvesting from a vehicle suspension system. *Energy* 2015;86:385–92.
- [65] Orr B, Akbarzadeh A, Mochizuki M, Singh R. A review of car waste heat recovery systems utilising thermoelectric generators and heat pipes. *Appl Therm Eng* 2016; 101:490–5.
- [66] Agudelo AF, García-Contreras R, Agudelo JR, Armas O. Potential for exhaust gas energy recovery in a diesel passenger car under European driving cycle. *Appl Energy* 2016;174:201–12.
- [67] Stevens RJ, Weinstein SJ, Koppula KS. Theoretical limits of thermoelectric power generation from exhaust gases. *Appl Energy* 2014;133:80–8.
- [68] Abdelkareem MA, Xu L, Ali MKA, Elagouz A, Mi J, Guo S, Liu Y, Zuo L. Vibration energy harvesting in automotive suspension system: a detailed review. *Appl Energy* 2018;229:672–99.
- [69] Nagyszokolyai Iván, Lakatos István, 'Gépjárműdiagnosztika', 2011 https://oszkdk.oszk.hu/storage/00/00/59/63/dd/1/Nagyszokolyai_Lakatos_Gepjarmudia_gn_1_2.pdf
- [70] B. M. El-den, A. I. AbdelFattah, Mohamed Abdel-Azim Mohamed, Safe Vehicle Driving Using Android Based Smartphones, DOI:10.1007/978-3-319-21206-7_25, June 2015
- [71] P. K. P. D. P. Y. D. Prof. Amit Choksi, „Smart Driver Assisting System using Raspberry PI,” Researchgate, 2018.
- [72] J. E. N. A. O. Luis Barba-Guaman, „Deep Learning Framework for Vehicle and Pedestrian Detection in Rural Roads on an Embedded GPU,” Researchgate, 2020.

- [73] A. S. S. K. J. M. N. H. M. R. Koray Ozcan, „Road Weather Condition Estimation Using Fixed and Mobile Based Cameras,” Researchgate, 2020.
- [74] S. N. A. I. G. S. A. B. E. P. V. Sanjay Kumar, „Smart driver assistance system using raspberry pi and sensor networks,” Sciencedirect, 2020.
- [75] A. Aljaafreh, „Camera-Based Driver Monitoring System for Abnormal Behavior Detection,” Researchgate, 2020.
- [76] S. Lan, R. Stobart and X. Wang, "Matching and optimization for a thermoelectric generator applied in an extended-range electric vehicle for waste heat recovery," *Applied Energy*, vol. 313, 2022.
- [77] S. Lan, R. Stobart and R. Chen, "Performance comparison of a thermoelectric generator applied in conventional vehicles and extended-range electric vehicles," *Energy Conversion and Management*, vol. 266, 2022.
- [78] W. B. Nader, "Thermoelectric generator optimization for hybrid electric vehicles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 167, 2020.
- [79] W. A. N. W. Mohamed, B. Singh, M. F. Mohamed, A. M. Aizuwan and A. B. M. Zubair, "Effects of fuel cell vehicle waste heat temperatures and cruising speeds on the outputs of a thermoelectric generator energy recovery module," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 50, pp. 25634-25649, 2021.
- [80] D. Luo, Z. Sun and R. Wang, "Performance investigation of a thermoelectric generator system applied in automobile exhaust waste heat recovery," *Energy*, vol. 238, 2022.
- [81] V. Abbasi and S. V. Tabar, "Measurement and evaluation of produced energy by thermoelectric generator in vehicle," *Measurement*, vol. 149, 2020.
- [82] C. C. Sousa, J. Martins, Ó. Carvalho, M. Coelho, A. S. Moita and F. P. Brito, "Assessment of an Exhaust Thermoelectric Generator Incorporating Thermal Control Applied to a Heavy Duty Vehicle," *Energies*, vol. 15, no. 13, 2022.
- [83] A. Coulibaly, N. Zioui, S. Bentouba, S. Kelouwani and M. Bourouis, "Use of thermoelectric generators to harvest energy from motor vehicle brake discs," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, 2021.
- [84] M. Aljaghtham and E. Celik, "Design optimization of oil pan thermoelectric generator to recover waste heat from internal combustion engines," *Energy*, vol. 200, 2020.
- [85] A. W. W. Atmajaya and P. Suwandono, "ADD-ON ENERGY HARVESTING OF DIESEL EXHAUST MUFFLER USING THERMOELECTRIC GENERATOR," *Journal of Science and Applied Engineering (JSAE)*, vol. 6, no. 1, pp. 10-21, 2023.
- [86] A. G. Olabi, M. Al-Murisi, H. M. Maghrabie, B. A. A. Yousef, E. T. Sayed, A. H. Alami and M. A. Abdelkareem, "Potential applications of thermoelectric generators (TEGs) in various waste heat recovery systems," *International Journal of Thermofluids*, vol. 16, 2022.
- [87] A. Khoshnevisan, S. Changizian, M. Raeesi, P. Ahmadi and N. Javani, "Thermal analysis of thermo-electric generator systems in hybrid electric vehicles under different operating conditions," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023.
- [88] T. S. K. Kumar, S. A. Kumar, K. K. Ram, K. R. Goli and V. S. Prasad, "Analysis of thermo electric generators in automobile applications," *Materials Today Proceedings* , vol. 45, no. 7, pp. 5835-5839, 2021.
- [89] M. S. Omar, B. Singh and M. F. Remeli, "Motorcycle Waste Heat Energy Harvesting Using," *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, vol. 49, no. 5, 2020.
- [90] P. Fernandez-Yanez, V. Romero, O. Armas and G. Cerretti, "Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery," *Applied Thermal Engineering*, vol. 196, 2021.

- [91] W. Zhu, X. Li, Y. Li, C. Xie and Y. Shi, "Two-level energy harvesting strategy for multi-input thermoelectric energy system," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4359-4372, 2022.
- [92] J. Pei, F. Guo, J. Zhang, B. Zhou, Y. Bi and R. Li, "Review and analysis of energy harvesting technologies in roadway transportation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 288, 2021.
- [93] S. Bentouba, N. Zioui, P. Breuhaus and M. Bourouis, "Overview of the Potential of Energy Harvesting Sources in Electric Vehicles," *Energies*, vol. 16, no. 13, 2023.
- [94] S. Bai and C. Liu, "Overview of energy harvesting and emission reduction technologies in hybrid electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, 2021.
- [95] Dong, Z.; Xu, H.; Liang, F.; Luo, C.; Wang, C.; Cao, Z.-Y.; Chen, X.-J.; Zhang, J.; Wu, X. Raman Characterization on Two-Dimensional Materials-Based Thermoelectricity. *Molecules* 2019, 24, 88. <https://doi.org/10.3390/molecules24010088>
- [96] SP Yushanov, LT Gritter, JS Crompton, and KC Koppenhoefer. Multiphysics analysis of thermoelectric phenomena. In *Seventh Annual Conference on Multiphysics Modeling and Simulation. Proceedings of the 2011 COMSOL Conference*, Boston, USA, 2011.
- [97] T. Bartz-Beielstein, J. Branke, J. Mehnen, and O. Mersmann, "Evolutionary Algorithms," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 4, no. 3, pp. 178–195, May 2014. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1002/widm.1124>
- [98] B. Doerr and F. Neumann, Eds., *Theory of Evolutionary Computation: Recent Developments in Discrete Optimization*, ser. Natural Computing Series. Cham: Springer International Publishing, 2020. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-29414-4>
- [99] N. Nawa and T. Furuhashi, "Fuzzy system parameters discovery by bacterial evolutionary algorithm," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 7, no. 5, pp. 608–616, Oct. 1999.
- [100] P. Moscato, "On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts - Towards Memetic Algorithms," *California Institute of Technology, Pasadena, California, Tech. Rep. C3P Report 826*, 1989, doi: 10.1.1.27.9474. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.27.9474>
- [101] J. Botzheim, C. Cabrita, L. T. Koczy, and A. E. Ruano, "Fuzzy rule extraction by bacterial memetic algorithms," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 312–339, 2009. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/int.20338>
- [102] K. Levenberg, "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares," *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 2, no. 2, pp. 164–168, 1944, publisher: Brown University. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/43633451>
- [103] D. W. Marquardt, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, pp. 431–441, 1963.
- [104] J. Botzheim, Y. Toda, and N. Kubota, "Bacterial memetic algorithm for offline path planning of mobile robots," *Memetic Computing*, vol. 4, no. 1, pp. 73–86, Mar. 2012. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s12293-012-0076-0>
- [105] K. Balazs, J. Botzheim, and L. T. Koczy, "Comparative Investigation of Various Evolutionary and Memetic Algorithms," in *Computational Intelligence in Engineering*, ser. Studies in Computational Intelligence. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, vol. 313, pp. 129–140.
- [106] D. Zhou, Y. Fang, J. Botzheim, N. Kubota, and H. Liu, "Bacterial memetic algorithm based feature selection for surface EMG based hand motion recognition in long-term

- use,” in 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), Dec. 2016, pp. 1–7.
- [107] A. Csik, J. Botzheim, J. Balazs, T. Csoknyai, and J. L. Hontvari, “Energy and cost optimal design for the reconstruction of residential building envelopes by bacterial memetic algorithms,” in The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and The 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems. Kobe, Japan: IEEE, Nov. 2012, pp. 1226–1231. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6505181/>
 - [108] J. Botzheim and P. Foldesi, “Novel calculation of fuzzy “ exponent in the sigmoid functions for fuzzy neural networks,” *Neurocomputing*, vol. 129, pp. 458–466, Apr. 2014. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231213009211>
 - [109] K. N. Gowtham, M. Vasudevan, V. Maduraimuthu, and T. Jayakumar, “Intelligent Modeling Combining Adaptive Neuro Fuzzy Inference System and Genetic Algorithm for Optimizing Welding Process Parameters,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 42, no. 2, pp. 385–392, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9471-4>
 - [110] WHO, „Global status report on road safety 2018,” [Online]. Available: https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2018/en/.
 - [111] K.N. Gowtham, M. Vasudevan, V. Maduraimuthu, and T. Jayakumar, “Intelligent Modeling Combining Adaptive Neuro Fuzzy Inference System and Genetic Algorithm for Optimizing Welding Process Parameters,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 42, no. 2, pp. 385–392, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9471-4>
 - [112] P. Moscato, “On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts - Towards Memetic Algorithms,” California Institute of Technology, Pasadena, California, Tech. Rep. C3P Report 826, 1989, doi: 10.1.1.27.9474. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.27.9474>
 - [113] J. Botzheim, C. Cabrita, L. T. Koczy, and A. E. Ruano, “Fuzzy ‘ rule extraction by bacterial memetic algorithms,” *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 312–339, 2009. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/int.20338>
 - [114] A. Csik, J. Botzheim, J. Balazs, T. Csoknyai, and J. L. Hontvari, “Energy and cost optimal design for the reconstruction of residential building envelopes by bacterial memetic algorithms,” in The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and The 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems. Kobe, Japan: IEEE, Nov. 2012, pp. 1226–1231. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6505181/>
 - [115] „KSH,” [Online]. Available: <https://www.ksh.hu/s/kiadvanyok/szemelyseruleses-kozuti-kozlekedesi-balesetek-2022-ii-negyedev/>.
 - [116] „Computer Vision Annotation Tool,” [Online]. Available: <https://cvat.org>.
 - [117] J. Hui, „Medium,” 28 03 2018. [Online]. Available: <https://jonathan-hui.medium.com/object-detection-speed-and-accuracy-comparison-faster-r-cnn-r-fcn-ssd-and-yolo-5425656ae359>.
 - [118] M. Singhal, „Medium,” [Online]. Available: <https://medium.com/@techmayank2000/object-detection-using-ssd-mobilenetv2-using-tensorflow-api-can-detect-any-single-class-from-31a31bbd0691>.

- [119] S.-H. Tsang, „Towards Data Science,” 03 11 2018. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/review-ssd-single-shot-detector-object-detection-851a94607d11>.
- [120] J. Jordan, 01 03 2018. [Online]. Available: <https://www.jeremyjordan.me/nn-learning-rate/>.
- [121] R. J. Tan, „Towards Data Science,” 24 02 2019. [Online]. Available: <https://towardsdatascience.com/breaking-down-mean-average-precision-map-ae462f623a52>.
- [122] J.Hui, „Medium,” 07 03 2018. [Online]. Available: <https://jonathan-hui.medium.com/map-mean-average-precision-for-object-detection-45c121a31173>.
- [123] GitHub,” [Online]. Available: https://github.com/tensorflow/models/blob/master/research/object_detection/g3doc/tf2_detection_zoo.md.
- [124] C. Goyal, „Analytics Vidhya,” 12 06 2021. [Online]. Available: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/06/complete-guide-to-prevent-overfitting-in-neural-networks-part-1/>.
- [125] https://customthermoelectric.com/media/wysiwyg/TEG_spec_sheets/2411G-7L31-15CX1_20140508_spec_sht.pdf