

SZAKDOLGOZAT

Hallgató neve:
Képiró Donát (WV4RRE)
Gépészmérnök BSc.

2024



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

Műszaki Intézet

Gépészmérnök alapképzési szak

Clearpath A200 Husky járműrobot energetikai és dinamikai vizsgálata

Belső konzulens:

Dr. Kiss Péter
egyetemi tanár

**Belső konzulens
intézete/tanszéke:**

Műszaki Intézet
Járműtechnika Tanszék

Külső konzulens:

Dr. Szabó Ádám
tudományos munkatárs, BME KJK

Készítette:

Képiró Donát

Gödöllő

2024

MŰSZAKI INTÉZET GÉPÉSZMÉRNÖK ALAPSZAK
Járműtechnika specializáció

SZAKDOLGOZAT

feladatlap

Képiró Donát (WV4RRE)

részére

A szakdolgozat címe:

Clearpath A200 Husky járműrobot energetikai és dinamikai vizsgálata

Feladatkiírás:

Foglalja össze és értékelje az autonóm terepi járművekkel és felhasználási lehetőségeikkel kapcsolatos szakirodalmat!

Tervezze meg a Husky járműrobot energetikai és dinamikai vizsgálatát. Vegyen részt a vizsgálatokban és értékelje ki a kapott eredményeket!

Végezze el a szükséges számításokat, foglalja egységes rendszerbe a vizsgálatok eredményeit!

Közreműködő tanszék: Járműtechnika Tanszék

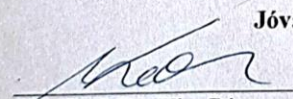
Külső konzulens: Dr. Szabó Ádám, tudományos munkatárs, BME, Közlekedés- és Járműirányítás Tanszék

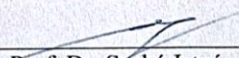
Belső konzulens: Dr. Kiss Péter, egyetemi tanár, MATE, Műszaki Intézet, Járműtechnika Tanszék

Beadási határidő: 2024. november 5. (kedd) 12.00 óra

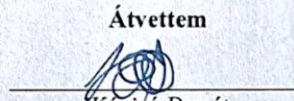
Gödöllő, 2024. június 15.

Jóváhagyom


Prof. Dr. Kiss Péter
tanszékvezető


Prof. Dr. Szabó István
szakfelelős

Átvettem


Képiró Donát
hallgató

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Gödöllő, 2024. november hó 04. nap


(külső konzulens)

Tartalomjegyzék:

1.	Bevezetés, célkitűzés	4
2.	Az ugv járművekkel kapcsolatos szakirodalmak	6
2.1	A vezető nélküli járművek története	7
2.1.1	A vezető nélküli járművek létrejötte	7
2.1.2	Vezető nélküli járművek a háborúk alatt.....	8
2.1.3	Az autonóm vezető nélküli terepjármű megszületése	9
2.1.4	Vezető nélküli járművek a földön túl.....	10
2.2	A vezető nélküli járművek jelene.....	12
2.3	A vezető nélküli járművek jövője.....	16
2.4	Clearpath A200 Husky	19
2.4.1	A gyártó bemutatása	19
2.4.2	Clearpath A200 Husky	20
2.5	A Clearpath A200 felhasználása a kutatásokban.....	22
2.5.1	Clearpath Rosie.....	22
2.5.2	Milliméter-hullám érzékelés magas kockázatú talajviszonyok elkerülésére járműrobotoknak.....	23
2.5.3	IoT irányú több szenzoros robot navigáció a mezőgazdaság internete felé	24
2.5.4	Kísérleti összevetés a reaktív és valószínűségi útvonalképzés között.....	25
3.	Alkalmazott módszerek	27
3.1	Adhéziós határ.....	27
3.2	A motorikus határ	28
3.3	Légellenállás	29
3.4	Gördülési ellenállás	30
3.5	Emelkedési ellenállás.....	31
3.6	Gyorsulási ellenállás	32
3.7	Szlip.....	32
3.8	A járműmozgás differenciálegyenlete	34
3.9	A járműmozgás differenciálegyenletének egyedi felhasználása	35
3.9.1	Légellenállás	36
3.9.2	Gyorsítási ellenállás	37
4.	A mérés felépítése.....	38
4.1	Maximális vonóerő mérése	38
4.2	Gördülési ellenállás mérése	39
4.3	Keréknyomás	39
4.4	A mérések	41

4.5 Mérési tapasztalatok	42
4.5.1 Gördülési ellenállás mérés	42
4.5.2 Vonóerő mérés	42
4.6 A mérés kiértékelése	43
4.6.1 Gördülési ellenállás mérés	43
4.6.2 Maximális vonóerő	45
5. Következtetések és javaslatok.....	48
6. Összefoglalás	50
7. Abstract	51
8. Irodalomjegyzék	53
9. Táblázatok és ábrák jegyzéke	56
10. Köszönetnyilvánítás.....	57
11. Függelék.....	58

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Az elmúlt években, évtizedekben az ipari automatizálás és gépi tanulás vált a műszaki témájú kutatás-fejlesztés és innováció, a kvartener szektor egyik húzóágává. Ezen területek (például: vezető nélküli járművek, egyes gyártási, vagy megmunkálási folyamatok) jelentős biztonsági és életvédelmi kockázatokat tudnak teljesen elhárítani. Az ember egészségére nagy veszélyt jelentő, nehezen megközelíthető és/vagy szűk munkakörnyezetek előidéztek a távolról irányított, vezető nélküli járművek széleskörű felhasználását. Továbbá a számítási kapacitás rohamszintű növekedése lehetővé tette a helyzetfelismerésre és öntanulásra alkalmas autonóm vezérlőszoftverek kifejlesztését, amivel akár teljes emberi beavatkozás nélküli, adaptív, önálló műveleteket elvégző autonóm robotok hozhatók létre. Az űrkutatás területén az adattovábbítás a távolság növekedésével - a fénysebesség korlátossága miatt - egyre hosszabb válaszidővel jár. Ez a valós idejű távirányítást lehetetlenné teszi, így súlyt ad az autonóm működéssel kapcsolatos fejlesztések fontosságának. Véleményem szerint ma már kihagyhatatlan terület a járműtechnikában – vagy bármelyik műszaki területen - az eszközök önálló autonóm működésének fejlesztése. Az akkumulátor fejlesztéssel egyetemben, várhatóan ezen fejlesztési ágak határozzák meg az elkövetkezendő években a járműipar fejlődésének útját. Az egyetemi alap kutatásoknak a tudomány fejlődésében jelentős szerepe van. Ezen kutatások hosszútávú és fenntartható célok kitűzését teszik lehetővé, a minél gyorsabb, eredményorientált alkalmazott kutatásokkal szemben. Az alap kutatások a felhasználás szempontjából beláthatatlan, látszólag céltalan területeken tudnak olyan eredményre jutni, amelyek előre nem látható módon segítik elő a tudomány fejlődését. Ezen kutatások jelentik az alapot az alkalmazott termékfejlesztés és innováció eléréséhez.

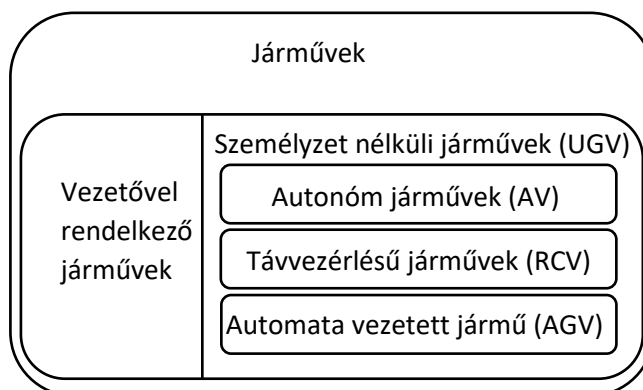
Az egyetemi éveimet megelőzően került a látókörömbe a járműtechnika területe, ennek sokszínű részterületeivel együtt. A közúti és kötöttpályás járművektől elkezdve az autósportok, a hajózás és a repüléstechnika is az érdeklődési területeim részét képezi. A terepjárás és terepi akadályok leküzdése a tanulmányaim alatt keltette fel az érdeklődésemet, ezért is volt szimpatikus számomra ez a téma. Az egyetemi tanulmányaim alatt szívesen végeztem a hasonló dinamikai vizsgálatokat és ezek kiértékelését. Fontosnak tartom, hogy aktuális és hasznos munkát végezhessenek, ebből a szempontból motivál a feladat, mivel egy aktív kutatás részeként készülhet el a dolgozatom.

A dolgozatom célja a vezető nélküli járműrobotok autonóm és távolról vezérelt felhasználásának területével és történelmi fejlődésével kapcsolatos irodalmak összefoglalása.

Célom továbbá a Clearpath gyártó A200-as modelljének bemutatása, annak egyes dinamikai és energetikai paramétereinek vizsgálata. Ehhez megmérjük különböző útfelületeken a jármű gördülési ellenállását és maximálisan kifejthető vonóerejét. A mérések eredményeit kiértékeljük, megállapítjuk a síkúton mérhető maximális vonóerőket. Megállapítjuk a jármű gördülési ellenállását terheletlen és terhelt esetben ugyanezen útfelületek esetében. Ezekből felírjuk a jármű differenciálegyenletét, megállapítva az egyes ellenállások értékét. Megvizsgáljuk a jármű emelkedő-mászó képességét, amit összevetünk a gyártó által meghatározott terepjárási paraméterekkel.

2. AZ UGV JÁRMŰVEKKEL KAPCSOLATOS SZAKIRODALMAK

A vezető nélküli terepjárművek (Unmanned Ground Vehicles, UGV) témaköre egy komplex műszaki részterület. A szerkezetek konstrukciós tervezésén kívül az irányításuk megoldása hasonló súllyal rendelkezik ezen robotok megalkotásakor. A járművek irányítása történhet valóban vezető nélkül, ez esetben a rajtuk futó szoftver megalkotása az informatika területével köti össze a járműtechnika tudományát. Ezek az autonóm járművek. Ha az irányítás nem teljesen vezető nélkül történik, akkor a „vezető nélküli” megnevezés helyesen személyzet nélküli járműre utal, és az ember járművön kívüli vezetékes vagy vezetéknélküli irányítását fedi. Ebben az esetben a járműtechnika a vezetékes vagy vezetéknélküli jeltovábbítás, rádiótechnika területével fűződik össze. Ezek a távvezérlésű járművek. A téma komplexitása miatt az 1. ábrán látható módon részletezem a járművek irányítás szerinti felosztását. Az ábrán a fentebb felsoroltokon kívül szerepel az automata vezetékes járművek csoportja is. Ez a kategória előre kijelölt pályán (például: raktárakban mágnespálya) való autonóm közlekedést fedi.



1. ábra: járművek csoportosítása az irányítás típusai szerint
Forrás: saját szerkesztés

A vezető nélküli járművekkel kapcsolatos szakirodalmat 4 témakörben gyűjtöttem össze. Az első három fejezet az UGV-k múltja, jelenje és jövője. Ezen fejezetekben pontosabb képet kapunk a járművek fejlődéséről, a ma jelenlévő tendenciákról, illetve a jövőben várható fejlődési lehetőségeikről. A 4. részben a szakdolgozat témáját adó Clearpath A200 Husky járműrobot kutatási felhasználásával foglalkozok, ami a kutatás elérhető lehetőségeit bővítheti, illetve a jármű kutatási célra való felhasználásának tapasztalatait, esetleges korlátait fedi fel.

2.1 A vezető nélküli járművek története

2.1.1 A vezető nélküli járművek létrejötte

A vezető nélküli járművek történeti áttekintése igen szerteágazó feladat. A történelmi tények feldolgozásának két fontos szálát ajánlott követni. Az elsődleges teendők meghatározni, hogy az adott feldolgozásba milyen történelmi szálak és történések tartoznak bele, ami relevanciával bír az általunk éppen vizsgált téma szempontjából. A második szál, amit érdemes követni az az általunk vizsgált történelmi szálak egymáshoz viszonyított időbeli lefutása. Ezen két szempont vizsgálatával nem csak a történetek sorával ismerkedhetünk meg, hanem az egymással való kapcsolatukat és az egymásra való hatásukat is megfigyelhetjük. Egy történelmi kutatás kezdete – ha ezt más nem indokolja – mindig az adott történelmi esemény alapjaitól indul és onnan építkezik. A vezető nélküli járművekkel kapcsolatban nehéz meghatározni ezt a kezdőpontot, mivel a járműtechnika szempontjából egy kiváló ágak tekinthető, ugyanakkor a rádiótechnika és az autonóm járműirányítás születésével együtt jött létre a járműrobotok ágazata.

Ha történelmi áttekintést szeretnénk kapni a vezető nélküli járművek témakörében akár a kerék felismeréséig is visszamehetnénk. A járműtechnika teljes áttekintésétől eltekintve ebben a fejezetben azoktól a gondolattól indulnék, amik elindították azt a folyamatot, aminek a végén a járművek az emberektől el tudnak szakadni (Durst et al., 2018).

Ha az embert utánzó gépek gondolatát keressük egészen az időszámításunk előtti második évezredig kell visszautaznunk. Ezekben az időkben találtunk történelmi maradványait időszámításunk előtt 1500 környékén India területén és időszámításunk előtt 1000 környékén Kína területén embert vagy állatot utánzó mechanikus gépekről (Durst et al., 2018).

A reneszánsz nagy feltalálóját Leonardo da Vincit is foglalkoztatták az embert imitáló robotok gondolatai, fennmaradtak automata robotokról szóló tervei, amik fogaskerekek által működtetett szerkezetekről szólnak (Durst et al., 2018).

Az első modern gondolat James Clerk Maxwell skót matematikus és fizikus nevéhez fűződik. Maxwell 1864-ben fogalmazta meg elméletét a Maxwell egyenletek formájában az elektromágnes hullámokról. A tudós munkásságát 1988-ban Heinrich Hertz igazolta mérésekkel, és ő vetette fel annak a lehetőségét, hogy ezt akár kommunikáció szempontjából is lehetne használni (Burrows, 1962).

A rádió felhasználását ezek után több tudós is kutatta. A rádió hangsugárzásra való felhasználására először 1900-ban a Kanadai származású amerikai feltaláló Reginald A. Fessenden készített egy szerkezetet, ami 1906 -ban, karácsony napján sugározta a világ első nyilvános rádióadását (Burrows, 1962).

A századforduló környékén a rádióhullámok irányítás szempontjából való felhasználását kutatók közül nehéz megtalálni azt, akire leginkább a rádióvezérlés felfedezőjeként tekinthetnénk. Az amerikai legfelsőbb bíróság Nikola Teslát nevezte meg akkori asszisztensével Guglielmo Marconival ellentétben. Nikola Tesla szerb-amerikai fizikus, aki 1898-ban alkotta meg az első rádió vezéreltnek tekinthető járművet. Az említett jármű egy hajó, mely elektromágnesesen vezérelt kapcsolókkal volt távolról irányítható. Tesla terve ezzel a rádió vezérelt torpedó ötletének eladása volt a hadsereg számára, ám ez a próbálkozás nem keltette fel a tisztek figyelmét (Marincic, A., 2008).

A rádióvezérlés úttörőjeként Leonardo Torres Quevedo Spanyol feltalálót kell még megemlíteni, aki 1904-ben alkotta meg az első vezető nélkülinek nevezhető földijárművet. A rádió vezérelt Telekino rendszerén 1901-ben kezdett el dolgozni, amit 1903-ban levédetett. A rendszer kifejlesztésének eredeti indíttatása a léghajók ember nélküli biztonságos tesztelése volt. 1904-ben az első vezető nélküli földi jármű pedig egy rádió vezérelt tricikli volt (Ethw, 2022).

2.1.2 Vezető nélküli járművek a háborúk alatt

Az első világháború közben is folytak kísérletek a rádiótechnika területén, viszont felhasználni csak információközlésre tudták. A következő nagyobb lépést az Egyesült Államok serege által fejlesztett, és 1921-ben bemutatott rádió vezérelt háromkerekű „koporsó” jelentette. Ezt a koncepciót fejlesztette tovább 1925-re Francis P. Houdina leszerelt amerikai villamosmérnök, aki egy Chandler Sedan autóra szerelt rá egy vevőegységet, amit az autó mögött közlekedő másik járműből irányítottak. Az American Wondernek keresztelt járműrobot a New York-i Broadway-en tett bemutatója közben sikeresen bemutatta manőverezőképességét, lassított, gyorsított és még a dudáját is tudta működtetni. A Broadway-i utazás sikertelen végét az jelentette, hogy az erős forgalomban egy, az eseményt dokumentáló, fotósokat szállító autóba ütközött. (The free lance-star, 1927)

A robot, mint kifejezés Karel Čapek Cseh író tollából származik, amit a R.U.R (Rossumovi univerzální roboti) 1920-as könyvében használt először. A szó eredete a szláv *robot* szóból ered, ami munkát jelent (Čapek, 1920).

A II. világháború alatt mindkét fél tesztelt rádió vezérelt járműveket, viszont sorozatgyártásba egyik sem került. Az angolok 1941-ben a Matilda II tank alapjaira fejlesztettek „Black Prince” -nek elnevezett rádió vezérelt tankot. A jármű rendeltetése az ellenséges tűz magára vonása lett volna, és 60 darabot meg is rendeltek belőlük, ám ezeket visszavonták a megvalósítás nehézségei miatt (Fletcher, 1994).

A németek által 1942-ben fejlesztett Goliath járműrobot bontási célokra lett létrehozva. Több mint 50 kiló robbanóanyag szállítására és felrobbantására lett volna alkalmas, de néhány prototípus után a németek sikertelennek minősítették a projektet (HTTP8).

2.1.3 Az autonóm vezető nélküli terepjármű megszületése

Az autonóm vezető nélküli járművek katalizátor pontjaként az 1951-es év írható fel. Ebben az évben William Shockley, John Bardeen és Walter Brattain Shockley vezetésével elkészítették az első félvezető alapú tranzisztort, amiért 1956-ban fizikai Nobel díjat kaptak. A tranzisztor megjelenése jelentette a számítástechnika alapkövét (Gage, 1995).

Az autonóm vezető nélküli járművek fejlesztésére egészen a 70's évekig kellett várni. A DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) középpontba helyezte a kutatásaiban az autonóm irányítás témakörét (Durst et al., 2018).

Az első önálló járásra képes autonóm járműrobotjuk a Shakey elnevezést kapta. Ez a robot egy kamerával és egy lézeres távolságmérővel rendelkezett. A kamera fekete fehéren 1 hertz képfrissítés mellett működött. A robot vonalkövetésre volt képes, kontrollált körülmények között, és óránként mindössze néhány méter távolság megtételére volt alkalmas. A szoftver az 1973 és 1980 közötti fejlesztések során képessé vált 30 különálló alaki jellemzőt megkülönböztetni és nyomon követni (Durst et al., 2018).

1985-ben a szoftver az ALV (Autonomus Land Vehicle) nevet kapta. Útkövető algoritmusával a szoftver 1 kilométeres útszakaszon 3 km/h átlagsebességgel tudott végighaladni, ami 1986-ra 3 kilométerre és 10 km/h -ra nőtt. 1987-ben az úton fellépő akadályok felismerését és elkerülését is képes volt megtenni a szoftver. Az ALV egy 8 kerekes terepjáró robotplatformra épült projektautón futott (Durst et al., 2018).

Az ALV szoftver továbbfejlesztett verziója ALVINN (Autonomous Land Vehicle In a Neural Network) már 1998-ban 80 km/h sebességgel haladhatott a sík úton és elsőként terepi körülmények között is el tudta érni a 20 km/h -ás sebességet. Az ALVINN a DEMO II a katonai

HMMWV terepjáró alapjaira épült járművet használt, ami éjjellátásra és ezzel éjszakai közlekedésre is képes volt (Durst et al., 2018).

2.1.4 Vezető nélküli járművek a földön túl

Az 1950-es évek rakétakutatásával biztossá vált az emberiség számára, hogy a Föld vonzáskörzete elhagyható. Ez a lehetőség magával hozta a gondolatot, hogy egy másik égitest is meghódítható lehet. A hidegháború alkotta űrverseny termékeny talajt biztosított a Földön túli kutatások számára. Az 1969-es holdraszállás sikere - ezen kutatások gyümölcseként - tette az Egyesült Államokat az űrverseny nyertesévé. Amikor a Holdon még nem járt az emberiség, a gondolatai és tervei már a meghódításán ténykedtek. 1964-ben lett elvetve annak a magja, hogy a holdon való közlekedés segítésére valamilyen járművet kellene alkotni.

A tervezését követően a Lunar Roving Vehicle (LRV) az 1971-ben felküldött Apollo 15 küldetés rakományai között volt. A Boeing által gyártott 210 kilós elektromos jármű egy nem tölthető akkumulátor csomaggal 97 km-es hatótávval rendelkezett. Kerekenként egy-egy 190 W teljesítményt leadó egyenáramú motort szereltek rá. A járművet az utolsó 3 Apollo küldetés az Apollo 15, 16 és 17 alatt használták az űrhajósok. Ezzel a konstrukcióval az Apollo 17 küldetés alatt már 18 km/h maximális sebességet tudtak elérni. Az Apollo 15 küldetés során 3 órát és 22 percet üzemeltették a gépet, és 12,47 kilométert tettek meg vele. Az Apollo 16-ra vitt jármű 3 óra 26 perc alatt 11,59 kilométert tett meg, az Apollo 17 küldetés rovere pedig 4 órát és 26 percet üzemelt, ami alatt több mint 20 kilométert haladt és a leszálló egységtől 7,6 kilométerre távolodott el (NASA, 1997)

Az első vezető nélküli robotjármű égitest hódítása viszont a Szovjetunióhoz kötődik. Az első sikeres Lunokhod UGV-t 1970-ben küldték fel a hold felszínére (egy 1969-ben útjának indított társa felszállás közben megsemmisült a rakéta meghibásodása miatt). A 756 kg -os jármű a felszínen 301 napot működött a holdat vizsgálva. A második holdjármű 4 hónapon keresztül végzett vizsgálatokat a hold felszínén, ami alatt 37 kilométert utazott. A harmadik tervezett Lunokhod, bár megépítésre került nem járt a hold felszínén anyagi okok miatt (NASA, 2022.)

A NASA tudósai a hold program befejezésével a Vörös bolygó felé fordították tekintetüket. Ezen kutatás eredménye képpen a Sojourner (idegenben) volt az első jármű, ami 1997-ben eljutott a Mars felszínére. A 11 kilogrammos robot a NASA Pathfinder (úttörő) leszállóegységén kapott helyet és percenként 60 centiméteres sebességre volt képes. Teljes élete

során kutatásokat végzett, és e-közben 100 méter utat tett meg. Ez kis távolságnak tűnik Földi léptékben, viszont hatalmas út az űrkutatásban. (HTTP12)

A Sojourner szellemi munkáját a 2004-ben Marsra küldött testvérrobotok a Spirit (szellem) és Opportunity (lehetőség) követték. Mindkét rover 185 kilós tömeggel rendelkezett, ami hétszerese volt a Sojournernek. Egymástól majd hat hónap különbséggel szálltak le a Mars felszínére (2004 január 3. Spirit, 2004 január 24. Opportunity). Küldetésük: élet jelének keresése a planétán.

A Spirit 2010-ig tevékenykedett, ami alatt 7,7 kilométert tett meg. Az Opportunity rover új rekordot állított fel a földön túl megtett távolságok kategóriájában. Élete során 45,16 kilométert tett meg, mellyel a tervezett üzem idejének hatvanszorosát teljesítette. 2018-ban ért véget a munkája (HTTP11).

A testvérrobotok munkáját a 2012-ben Marsra küldött Curiosity (kíváncsiság) rover folytatta. A 899 kilogrammos jármű napjainkig 32,39 kilométert tett meg. A Curiosity munkáját 2021-ben az 1,025 tonnás Perseverance (kitartás) elnevezésű jármű követte, ami mostanáig 28,99 kilométeres távot tett meg (HTTP8).

Az űrversenybe csatlakozó Kína 2021-ben küldött a Mars felszínére egy 240 kilogrammos rovert, amit Zhurong -nak (a tűz istene) nevezett el, és megérkezése óta 1920 métert tett meg a Mars felszínén (HTTP9).

2.2 A vezető nélküli járművek jelene

Az elmúlt években slágertémává vált a robotika minden területe, köztük a járműrobotok témája is. A Covid-19 járvány által előidézett akadályok leküzdését újító járműrobotokkal segítették. Az érintésmentesség fontos kritériumává vált az időszaknak, ezért a gyógyszerek betegeknek való lokális kézbesítésére járműrobotokat fejlesztettek, amik hatékonyan és biztonságosan végezték el a feladatot (Gärtner et al., 2018).

Az elmúlt években a járműrobotok fejlesztése két eltérő csoportra oszlott. Az első csoport az ipari-katonai felhasználás, ami igen költséges, viszont sokoldalúan felhasználható, megbízható járműveket biztosít. A másik az előzőből kiváló ág, a hobbi felhasználók által nőtt ki. Az interneten beszerezhető alkatrészekből állít össze sokszor teljesen nyílt dokumentációval rendelkező robotokat, amik költséghatékonyan képesek elvégezni a feladatukat (Gärtner et al., 2018).

A járműrobotok útvonalképzésnek két modelljét ismerjük. Az első a helyi útvonaltervezés. Ekkor a jármű a rajta lévő érzékelőknek a segítségével alkot pályát a célja irányába. Ez a lokális útvonalalkotás. A másik megoldás a globális útvonalképzés, amikor egy előre letérképezett terepen a robot egy kiszámított pályán való végighaladása történik. Ilyenkor a robot érzékelőit a robot pontos helyzetének meghatározására használja, illetve a modellalkotás óta esetlegesen felmerülő változásokat követi nyomon, amivel az előre kialakított pályát tudja probléma esetén korrigálni (Gärtner et al., 2018).

Az ipari felhasználás fejlesztése az elmúlt időben nagy hangsúlyt fektetett a globális útvonalképzés irányába. A vezető nélküli járművek (UGV) területét a vezető nélküli légi járművek (AGV) területével olvasztja össze, és az AGV-k által képzett modellel segíti a járműrobotok közlekedését (Gärtner et al., 2018).

A hobbi járműrobot fejlesztési ág általában egy megosztott fejlesztési modellt követ. Nyílt forráskódú projekteken belül történnek az irányító szoftverek, vagy a robotok fejlesztései. Ebben a modellben minden egyes fejlesztési lépés a teljes közösséget érinti, és a versengés okozta tudás-megtartóztatás nem jelenik meg. Minden fél hozzáfér a teljes tudástárhoz. Ezzel a modellel mindenki a saját ötleteivel tudja bővíteni a közösség tudását, így energia és költséghatékony módon fejlesztheti a saját, vagy kisipari felhasználásra szánt járművét. Ezen projektek általában Arduino, vagy hasonló (Raspberry Pi etc.) fejlesztőplatformok segítségével végzik az irányítást, és kereskedelmi forgalomban, vagy egyedileg prototípus gyártott alkatrészekből készítik el robotjaikat. Az elmúlt időben a 3D nyomtatás és a lézervágás

elérhetőségének megjelenésével komplex, egyedileg és gyorsan legyártott alkatrészek is bekerültek ezen fejlesztések eszköztárába. A könnyen elérhető félvezetős és PWM-es irányítási módszerek az X-by wire (elektromos úton történő irányítás) elterjedése is segítette a szakemberek lehetőségeit (Gadekar et al., 2023).

Az elmúlt években a vezető nélküli járművek fejlesztése három fő kategóriára oszlott. Az első a járművön helyet kapó szenzorok területe. A minél több és pontosabb adat kinyerése kritikus, mivel a navigálás és környezet manipulálásának pontosságát határozza meg a világ érzékeléséből kapott információhalmaz. A második terület a számítás. Az előre betáplált modellek fejlesztése, illetve az érzékelők által kapott információk feldolgozása és kiértékelése a számítási kapacitás rohamos fejlődésével, eddig nem látottan komplexé tudott válni. A harmadik kategória az energiaellátás témaköre. Bár ennél a témánál a fő fókusz nem a vezető nélküli járművek fejlesztése, hanem a teljes ipar kiszolgálása, viszont erős hatással van a járműrobotok lehetőségeire, hogy mennyi rendelkezésre álló energiája van egy robotnak, illetve az mekkora tömeggel rendelkezik (Gadekar et al., 2023).

A járműrobotok a mai fejlesztésekben a haladó mozgást négy fő kategória szerint végzik:

- Lábbal rendelkező,
- Gumihevederes,
- Lánc talpas,
- Kerekes.

A lábbal rendelkező robotok nagyon különböző terepeken tudnak közlekedni, viszont az egyensúly megtartása magas számítási és pontossági igényeket támaszt, így egyelőre csak kevés robotban jelent meg ez a mozgási forma. A gumihevederes és lánc talpas robotok terepi körülmények között páratlanul teljesítenek, terepi felhasználásuk nagyon elterjedt, nagy pontossággal, jó manőverezhetőséggel, rendelkeznek. Ezen hajtás típus azonban csak alacsony sebesség elérésére képes. A legelterjedtebb mozgási kivitelezés a kerekes járművéké, amivel megfelelő körülmények között magas sebesség is elérhető, és terepen is korlátozottan használható. Az egyenként vezérelhető kerekkel a közúti járművek manőverezhetőségi korlátja is áthidalható, így például helyben forgásra is alkalmas lehet egy ilyen robot (Gadekar, 2023).

Az autonóm járműrobotok közlekedés közben a következő feladatok egyidejű elvégzésére kell, hogy képesek legyenek:

- Térképezés,
- Pályaérzékelés és követés,
- Akadály felismerés,
- Akadályok elkerülése vagy leküzdése.

Az irányítási feladatok elvégzése 4 irányító struktúrával tud történni.

Az első a központi irányítás (centralized control architecture). Ennél a kialakításnál robot által rögzített adatok egy a járműtől távol lévő számítógépen történnek, és ott kerülnek az irányítás fő paraméterei kiszámításra. Ilyen elemek az útvonaltervezés, objektumfelismerés és a mozgáskövetés. Ezek az adatok a robotra vissza kerülnek, és a robot ezek alapján elvégzi a megadott műveleteket. A jármű autonómiája csupán a mozgásfeladatok végrehajtásában, illetve a robot stabilitását megőrző reaktív mozgásoknál történik. Az előnye ennek az irányítási modellnek, hogy a robot meghibásodása esetén a drága számítógép nem károsul, illetve az egyes egységeket könnyű fejleszteni. A modell legnagyobb hátránya, hogy az irányító állomás közelében kell tartózkodni a hatótáv korlátossága miatt, illetve a jelzavarok és jelkésés rontják a robot képességeit (Khaleghiet al., 2014).

A második a szétszórt irányítás (decentralized control architecture). Ennél a modellnél a robot részfeladatok elvégzését végrehajtja, - például a pályakövetést- a központi egységtől csak parancsokat kap. A központi számítógép jelöli ki számára az utat, amin végig kell mennie, viszont az akadályok és a pálya felismerését már a robot végzi. Előnye ennek a rendszernek, hogy a válaszidők drasztikusan lerövidülnek, illetve a jeltovábbítás jelzavarai és szélességi korlátai eltűnnek. A robot már képes részleges autonómiára, ha megszakad a jel a toronnyal, akkor egy bizonyos protokoll szerint tovább tudja folytatni a tevékenységét. Hátránya viszont, hogy a robot kialakítása magasabb költségekkel jár, illetve a robotba épített számítógépek kisebb számítási kapacitással rendelkeznek, így egyszerűbb vezérlőszoftverek futtathatóak csupán. (Khaleghiet al., 2014).

A harmadik megoldás a szétosztott vezérlés (distributed control architecture). Ennél a kialakításnál a robotok teljes autonóm működnek, ha van is központi számítógép, akkor az csupán adattárolásra, vagy feladat kiosztásra van használva. Ennek a modellnek az előnye, hogy

a szétszórt kialakításhoz képest komplexebb számítási feladatokat tud elvégezni a robot számítógépe. Hátránya viszont, hogy ez a legköltségesebb kialakítás és a teljes rendszer kerülhet veszélybe amellet, hogy a rendszerek miatt ennek a legnagyobb a tömege. (Khaleghiet al., 2014).

A negyedik megoldás a hibrid (hybrid control architectures) modell, itt a felsorolt három valamilyen szintű keveredése történik. Ez egyedi felhasználásokat enged meg, viszont magas tervezési komplexitással jár. (Khaleghiet al., 2014).

Az autonóm vagy távvezérelt járműrobotokat a legkülönbözőbb felhasználásokra tudjuk fejleszteni. Ezen területeken más fejlesztési fókusszal készülnek a robotok (Gadekar et al., 2023).

Mezőgazdaságban a felhasználás mintavételezésre kifejezetten alkalmas, továbbá Lidar felmérésekkel termelés előrejelzésre, állapotfelmérésre használják (Gadekar et al., 2023).

A katasztrófavédelemben hangsúlyos ezen robotoknak a felhasználása. A katasztrófával sújtott helyeken túlélőkeresésre, a veszélyzónák feltérképezésére is alkalmas robotokat használnak. A bombák hatástalanítására, radioaktív anyagok kezelésére, határvédelmi feladatok ellátására, vadgazdálkodásban monitorozásra vagy orvvadászat megelőzésére is alkalmas egy ilyen robot (Gadekar et al., 2023).

2.3 A vezető nélküli járművek jövője

Az elmúlt évek tendenciái alapján a vezető nélküli járművek piaca az elkövetkezendő években-évtizedekben egyre nagyobb teret fog hódítani. Akár már az évtized végére a vezető nélküli járművek és légi járművek a mindennapjaink részét tudják majd képezni. A közeljövőben a mindennapi használatba betörő technológiák ma még kutatások részei csupán, viszont ezek megismerésével egy ablakot nyithatunk a jövő átláthatatlan falán, és betekinthetünk a holnap ígéreteibe.

A járműrobotok legégetőbb korlátját ma egyértelműen az energiaellátás témája állítja. A gépjárművek területén általában használt belső égésű motorok a vezető nélküli járművek esetében ritkán használhatóak. A villanymotorok jóval alkalmasabbak ezen felhasználás esetén, mivel egyszerű felépítéssel rendelkeznek, megbízhatóak és egyszerűen karbantarthatóak. Továbbá csendesebbek, nem remegnek, hőterhelésük is kisebb és nincs lokális kibocsátásuk. Jóval magasabb a hatékonyságuk a belső égésű motorokhoz képest, alacsony fordulatszám mellett is magas nyomatékot tudnak leadni és nem feltétlen kell sebességváltót építeni a hajtásláncba. Ezen okok miatt a ma használt járműrobotok nagy hányadánál villanymotoros hajtást alkalmaznak. Az elektromos hajtás esetén viszont igen nagy problémát jelent az energiatárolás. A ma használt akkumulátorok a fosszilis tüzelőanyagokhoz képest jóval kisebb energiasűrűséggel rendelkeznek és nem is lesz könnyebb az azt felhasználó jármű a tárolt energia eltűnésével. A ma lítium-ion technológiás járművek alacsony hatótávval rendelkeznek és az akkumulátorok biztonságos töltése hosszú időt vesz igénybe. Emellett ezen akkumulátorok sérülés esetén erősen tűzveszélyesek és olthatatlanul égnek (Houache et al., 2022).

A ma fejlesztés alatt álló technológiák ígéretesek lesznek a fent említett problémák szempontjából. Az akkumulátorok területén jóval biztonságosabb, magasabb energiasűrűségű és egyszerűbben-olcsóbban előállítható akkumulátorok várhatóak. Az elkövetkezendő években nagy lépcsőt jelenthet a szilárd-cellás akkumulátorok megjelenése (Houache et al., 2022).

Az elektromos energiatárolás másik lehetséges útja a hidrogénben tárolt energia. A hidrogén nagyon magas energiasűrűséggel rendelkezik, viszont tárolása igen nehézkes gáz halmazállapota és kis atomtömege miatt. A hidrogén tüzelőanyagcellás felhasználása csendes és hatékony üzemet biztosít, és az egyetlen mellékterméke az oxidáció során létrejövő víz. A tüzelőanyag cellák viszont nem tudnak egyszerre nagy áramerősséget leadni, ezért valamilyen ideiglenes energiatárolót kell az ilyen konstrukcióba iktatni a hullámzó energiaigény miatt. A

jövő szempontjából a legígéretesebb technológia a szuperkondenzátorok használata. A szuperkondenzátorok középtávon jó energiahordozók lehetnek, mivel nagyon gyors feltöltési és kisütési idővel rendelkeznek, ezért a hirtelen fellépő magas áramigényt is ki tudják elégíteni. A szuperkondenzátoroknak viszont az energiasűrűsége igen rossz, így a hidrogén-tüzelőanyagcellás technológiával ötvözve megfelelő és megbízható konstrukciót tudnak alkotni. A hidrogén felhasználása mellett az előállítása is fejtörést jelent még a jövő kutatói számára, mivel előállításának és tárolásának sem ismerjük még jó technológiáit (Maurer et al.,2016).

Az elektromos motorok a félvezetős technológiáknak köszönhetően sokat fejlődtek. A kefe mentes egyenáramú motorok nagy fordulatszámra alkalmas kopóalkatrész mentes konstrukciója a repülő járművek számára jelentik a hajtás kulcsát. A frekvenciaváltók elterjedésével a közúti járművek és a vezető nélküli járművek részére is felhasználhatóvá vált a kompakt és megbízható háromfázisú villanymotor (Maurer et al.,2016).

Az elmúlt két év hívó szava a mesterséges intelligencia is várhatóan fő alakító ágává válik majd az autonóm irányításnak, akár több helyen, mint először gondolnánk. A legnyilvánvalóbb térképezés és útvonaltervezés gépi mélytanulással való megtámogatása. A gépi tanulás hatalmas adathalmazokban képes megtalálni fontos összefüggéseket, amit az emberi szem, vagy az emberi kéz által írt programok nem is képesek figyelembe venni. A megfelelő adatmennyiség biztosításával önálló adaptív irányító szoftverek fejleszthetők, amik teljes önállóságra képesek a felhasználásuk terén. Ezen túl az egyes járműrobotok tervezésénél is segédkezhet az MI (Maurer et al.,2016).

Nem hagyományos tervezési utakon (például: generatív tervezés) olyan optimális kikönnnyített alkatrészeket gyárthatunk le, amelyek a konstrukció terhelhetőségének megtartásával csökkentik jelentősen az egyes alkatrészek tömegét. De ezeken túl a tervezést és a gyártást is sokban meg tudja támogatni, vagy átvenni a mesterséges intelligencia. Ezek csak ígérek egyelőre és nagyon sok adattal és számítási kapacitással kell megtáplálni még az MI szoftvereket, amíg teljes mértékben megbízható lesz a felhasználásra.

Az autonóm közúti autó fejlesztése, mivel rokon területe az autonóm terepi közlekedésnek kölcsönösen fejlődő területek. Az önvezető autók fejlődése a terepi közlekedés autonómiájára is kihatással lesz, mivel hasonló feladatok hasonló megoldását igényli. A terep és a körülmények, az esetleges veszélyek felismerése, és az azon való áthaladás jelenti mindkét terület gerincfelépítését.

Az autonóm járműrobotok hatékonyan tudják majd felváltani a terepi közlekedésben is az ember által vezetett járműveket. A mindennapi feladatokat hatékonyan fáradás nélkül, minimális szünetekkel lesznek majd képesek ellátni. Az embernél magasabb pontosságot fognak elérni amellet, hogy az ember befogadására alkalmas környezetet ki kellene alakítani bennük. Ez méretbeli és körülményeknek való kitettség szempontjából is korlátokat old fel úgy, hogy emberélet kockáztatása nem történik. Az autonóm légi járművekkel felvett hatalmas adathalmazokkal hatékonyan tudjuk majd a modelljeinket bővíteni, amivel eddig nem látott ütemben, biztonságban és mélységben tudjuk segíteni az emberiség fejlődését.

A járművek fejlődésén kívül a járműrobotokra szerelhető kiegészítők terén is jelentős fejlődés várható az elkövetkezendő évtizedekben. A járművekre szerelhető robotkarok és aktuátorok sokasága áll majd rendelkezésünkre. A felszerelt eszközökkel akár célfeladatok pontos, gyors és hatékony ellátására leszünk képesek, akár átfogó sokcélú segítséget tudunk majd igénybe venni a robotok „személyében”. A fejlett sokszínűen konfigurálható munkagépek és az emberrel együttműködő kobotok többek között rakodásra, bontásra, földmunkákra és mentésre is képesek lesznek. (National Research Council, 2002).

A jövő tendenciái ma még csak célok és tervek formájában vannak jelen. Ilyen az elérhető maximális terhelhetőség növelése, a magasabb elérhető pontosság és az intelligens felismerő és környezetérzékeny irányítószoftverek kialakítása. Ezen célok elérése mellett fontos lesz a robotok megbízhatóságának fejlesztése, mert csak akkor támaszkodhatunk rájuk, ha a lehető legkevesebb hibával tudnak dolgozni és nem okoznak több kárt, mint hasznot.

2.4 Clearpath A200 Husky

A szakdolgozatom témáját adó Clearpath A200 járműrobot egy kereskedelmi forgalomban kapható fejlesztőplatform. A következő fejezetben az ezzel kapcsolatos szakirodalmat szedtem össze.

A fejezetben az irodalmakat két szempont szerint tekintetem át. Az első rész a robottal foglalkozik, amiben először a gyártót mutatom be. Ezek után a gyártó által nyújtott terepjáró járműrobotok kínálatát gyűjtöttem egybe. Majd az általunk használt A200 Husky robot fizikai paramétereit szedtem össze, a kutatásban fontos szerepet játszó részletekre koncentrálva.

A járműrobot már több, mint 10 éve jelent meg, ezért a második pontban a robot kutatásokra való felhasználásával foglalkoztam. A világ különböző egyetemein és intézményein foglalkoztak a vezető nélküli járművek fejlesztésével, aminek gyakorlati alkalmazásánál a Husky-ra esett a választás.

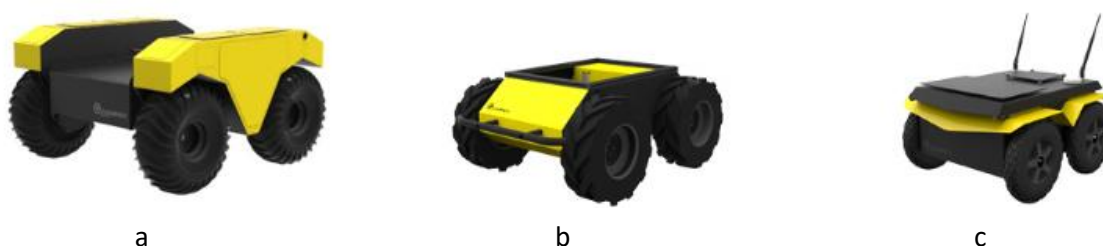
A fejezet második felében ezeket a kutatásokat foglalom össze, amiből képet kaphatunk a robot felhasználási lehetőségeit illetően, illetve esetlegesen megláthatóak némi korlátai is a járműnek. Továbbá a kutatások nyomán bepillantunk az éppen folyó vezető nélküli járműkutatások irányába és eredményeibe. Képet kaphatunk az autonóm vezető szoftverek pillanatnyi tudásáról.

2.4.1 A gyártó bemutatása

A Clearpath Robotics Inc. egy kanadai startup, az országban az egyik legismertebb. 2009-ben Ontarioban a Waterloo Egyetemen alakult meg, négy alapítótagja: Matthew Rendall, Ryan Gariepy, Pat Martinson és Bryan Webb. A cég alapvetően a veszélyes munkák ember helyett robottal való elvégzésének fejlesztésével foglalkozik. Az elmúlt másfél évtizedben, többek között a General Electric, a Caterpillar, a John Deere és a Toyota is partnerkapcsolatban állt a céggel. 2023-ban vásárolta meg a cég tulajdonjogát a Rockwell Automation Inc (HTTP1, HTTP2).

A cég három UGV (Unmanned Ground Vehicle – Vezetőnélküli terepi jármű) családdal rendelkezik:

- **Warthog**, egy nagy méretű föld- és vízen járásra alkalmas platform, kis talajnyomás mellett (2/c. ábra),
- **Husky**, egy közép méretű fejlesztőplatform kutatási célzattal. Open source kódolásra alkalmas (2/b. ábra),
- **Jackall**, egy teljesen integrált vízálló robot (2/a. ábra).



2. ábra: A gyártó terepjáró robotjai a, Jackall b, Husky c, Warthog
Forrás: clearpathrobotics.com

A gyártó ezeken túl beltéri és tanulásra kifejlesztett robottípusokkal is rendelkezik (HTTP3).

2.4.2 Clearpath A200 Husky

Ez volt az első megjelent terepjáró járműrobot, amely ROS támogatással rendelkezik. A Robot Operating System egy open source operációs rendszer. Robotok irányítására lett kifejlesztve. A platformot C++ és Python programozási nyelvekkel lehet fejleszteni.

A jármű 4 kerék meghajtású „karbantartás mentes” elektromos hajtáslánccal rendelkezik, a motorok teljesítménye maximálisan 1000 W, hosszútávon 400 W. A robot oldalanként egy-egy MMP S22-346F-24V GP52-079 keféss 24V egyenáramú motorral szerelt.

Magasság:	390 mm
Szélesség:	670 mm
Hossz:	990 mm
Öntömeg:	50 kg
Teherbírás szilárd felületen:	75 kg
Teherbírás terepen:	20 kg
Maximális sebesség:	1 m/s

1. táblázat: az A200-as robot paraméterei

A terepi járóképesség esetén megkülönböztetésre kerül két fontos jellemző. Az emelkedési képesség (climb grade), és a haladási képesség (traversal grade). Az emelkedési képesség azt adja meg, hogy mekkora emelkedőn képes felmenni a járművünk, amíg a haladási képesség azt állapítja meg, hogy mekkora emelkedőn képes biztonságosan minden irányban közlekedni a jármű. Az emelkedési képességet az általunk vizsgált jármű esetében 45°-ban, a haladási képességet 30°-ban adja meg a gép használati könyve. (HTTP5)

A gyártó a jármű működési hőmérséklet tartományát -10°C és 30°C közé ajánlja, a jármű belső túlhőmérséklet elleni védelme 50°C elérése esetén leállítja a jármű működését. (HTTP5)

A kerekek Carlisle Super Lug 130/70-6-os méretű bordázott profilú terepjáró abroncsok, átmérőjük 330 mm. A guminyomás maximálisan 1.4 bar-ig emelhető (20 PSI) (HTTP5)

A robot a hajtásához, vezérléséhez és a kiegészítők ellátásához szükséges villamos energiát egy 24V-os ólomsavas akkumulátor biztosítja, kapacitása 20Ah. Az akkumulátor a járművet átlagos felhasználás mellett 3 óráig tudja ellátni, ami annak cseréjével, vagy töltésével növelhető meg. A kiegészítőkhöz rendelkezik a szerkezet a villamos kivezetésekkel 5V/12V/24V kivitelben. Ezek a csatlakozók 5A-legnagyobb megengedett áramra vannak biztosítva. A járműhöz vezetékiesen egy RS-232 csatlakozóval lehet csatlakozni, vezeték nélkül Bluetooth és Wifi is használható (HTTP5).

A jármű rendelkezik egy biztonsági vészleállító gombbal, ami azonnal megállítja a robotot (HTTP5).

A Huskyn futtatható a felhasználó által fejlesztett szoftverrel, ami teljesen autonóm működésre teszi képessé. Ha kézzel szeretnénk irányítani a gyártó mellékel vagy egy Logitech F710 -es, vagy egy Sony PS4 Dualshock 4 vezeték nélküli irányítót. A jármű irányítása két sebességi fokozatban történhet, ezeket a motorok szabályzásával éri el a jármű. A lassú

fokozatban a robot teljes haladási sebességének felét éri csak el, ami 0,5 m/s. Gyors sebességi fokozatban a maximális 1 m/s is elérhető (HTTP5).

A két oldali kerék-pár külön vezérelhető, akár egymásnak ellentétes forgásiránnyal forgatható, ami a helyben való forgást lehetővé teszi (HTTP5).

2.5 A Clearpath A200 felhasználása a kutatásokban

2.5.1 Clearpath Rosie

A Clearpath Rosie a Rose-Hulman Institute of Technology, Indiánában található főiskola hallgatóinak projektje volt. A projekt a 2012-es Intelligent Ground Vehicle Competition-re (IGVC) készült. A neves tanulmányi versenyt 1993 óta minden évben Rochesterben Michigan államban rendezik meg.

A csapatot David Mutchler kari tanácsadó vezette. A megalkotott robotot a főiskola neve után Rosie -nak keresztelték. A csapat a projekt alapjául a Clearpath A200 -as modelljét választotta, mivel a robot programozható a ROS (Robot Operating System) segítségével. A járművet a saját felhasználásuk szerint egészítették ki, általuk fejlesztett érzékelőkkel és vezérlőszoftverrel. A kialakított konstrukció a 3. ábrán látható.



3. ábra: Clearpath rosie
Forrás: HTTP13

A robotra az érzékelőket egy alumínium profilból épített vázzal rögzítették fel. A járműroboton helyet kapott három webkamera, -egy az elején és egy-egy a két oldalán-, valamint egy kölcsönzött LIDAR egység, egy GPS modul és egy vezeték nélküli biztonsági leállítórendszer.

A versenyen egy felállított pályán kellett a robotnak végighaladnia, bármi emberi beavatkozás nélkül. A csapat fő navigálási sarokelemeinek a pálya szélét jelző vonalak felismerését, illetve a pálya nevezetes pontjait jelző hordók felismerését jelölte meg.

A csapat a robotot a versenyeken kívül oktatási célokra is használta. Egy szoftverfejlesztő kurzust hirdettek meg a hallgatóknak, amelyen 3 szemeszter alatt 25 hallgató vett részt (HTTP13).

A csapat a 2012 -es és 2013 -as IGVC -re is nevezett, az elsőt a kategóriájukban a 8. helyet, amíg a másodikon 13. helyet értek el (HTTP14).

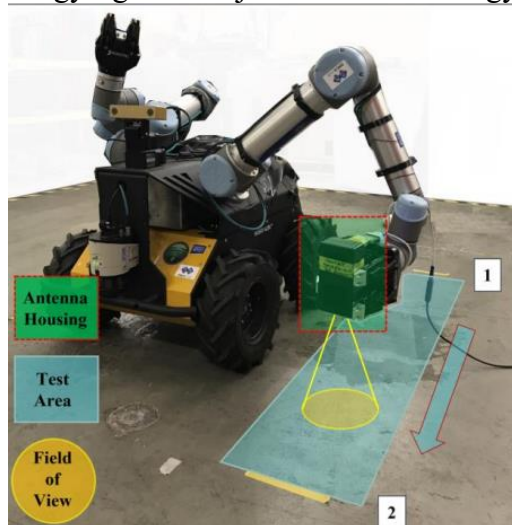
2.5.2 Milliméter-hullám érzékelés magas kockázatú talajviszonyok elkerülésére járműrobotoknak

A 2022 -es IROS (International Conference on Intelligent Robots and Systems) nemzetközi konferenciára Brit és Japán kutatók által készült cikk milliméter-hullámú érzékelők felhasználását tárgyalja a vezető nélküli járművek felhasználási lehetőségeire kitérve.

A kutatás célja a fokozott veszélyességű terepkörülmények felderítésének támogatása. Az emberek előtt elzárt feltehetőleg instabil környezetek felderítésére keres megoldást. A milliméter-hullámok felhasználásával annak a lehetőségét vetik fel, hogy egy, a hagyományos szenzorok alapján bizonytalannak nyilvánított terület felülvizsgálható. Az alternatív szenzortechnológiával felmért kérdéses területen akár biztonságos útvonalat lehet kialakítani. Ennek a fontossága a bonyolult területeken (például: hó, olajjal felöntött terület, sár vagy jég) való biztonságos mozgásnál lehet. A technológiával SLAM (Simultaneous Location And Mapping) módszertan szerint lehetne kártalanítást vagy mentést előkészíteni a fokozottan veszélyes területeken. Továbbá akár egy terület radioaktív szennyezettségéről is képet lehet kapni anélkül, hogy egy emberi életet is kockára tennénk.

Mivel a milliméter-hullámok a felületbe is képesek behatolni – a röntgen technológia használja ezt a tulajdonságát – ezért a vizsgált felület alól is képes adatokat kinyerni a szenzor. Ez hó vagy sár esetén a talaj alsóbb rétegeit is képes megvizsgálni, ami a talaj teher hordóképeségével van összefüggésben. Ezzel a megoldással akár egy előtt haladó könnyebb robotjármű is meg tudná állapítani azt, hogy a többi nagyságrendekkel nehezebb járművek számára járható-e az éppen vizsgált útvonal. A penetrációs hatás másik nagyon hasznos felhasználási területe, ha valamilyen kemény felület például beton emeletek esetén repedésvizsgálatot tud folytatni a robot, amivel képet lehet kapni, hogy az adott emelet biztonságos-e emberek számára. A technológia képes vizet kimutatni homokkőben, homokban vagy betonban is. Továbbá képes az út folytonos vizsgálatával dinamikusan tervezni, és észlelni a talaj felülete alatt uralkodó körülményeket és ezen adatokkal esetlegesen módosítani az útvonalon.

A kutatás gyakorlati részében több robotot is használtak az elmélet alátámasztására, köztük a Clearpath Warthog és A200 modelljét is. A robotra egy mérőplatformot építettek, amin helyet kapott egy LIDAR egység is a tájékozódáshoz és egy robotkarra szerelték fel a



4. ábra: milliméter-hullámú érzékelő az A200-as roboton

Forrás: Blanche et al., 2023

milliméter-hullámú érzékelőt is, amivel a robot maga előtt és mellett is tudott méréseket végezni. Az átalakított robot a 4. ábrán látható (Blanche et al., 2023).

2.5.3 IoT irányú több szenzoros robot navigáció a mezőgazdaság internete felé

A tanulmányban az Új-Zélandi Callaghan Innovation kutatócég a dolgok internetének implementálási lehetőségei kutatta a mezőgazdaság szempontjából. A kutatás célja autonóm robotok fejlesztése a mezőgazdaság számára. A projekt olcsó IoT (dolgok internete) szenzorokat és vezeték nélküli kommunikációra alkalmas modulokat használt a megjelölt pontok közötti navigálásra és az akadályelkerülésre.

A projekt célja olyan mezőgazdasági rutinfeladatok automatizálása, mint a termés ellenőrzés, a termények leszedése, a gyomlálás és kártevő vizsgálat.

A kutatók a projekt során a Clearpath A200-at sokszínű felszerelésekkel és feladatkörökkel látták el, többek között legelőn vizeletvizsgálat elvégzésével (5. a,b Ábra)



5. a ábra: az A200-as robotra felszerelt IoT szenzorcsomag
Forrás: Bourhane, 2021



6. b ábra: az A200-as robotra felszerelt IoT szenzorcsomag
Forrás: Bourhane, 2021

(Bourhane, 2021).

2.5.4 Kísérleti összevetés a reaktív és valószínűségi útvonalképzés között

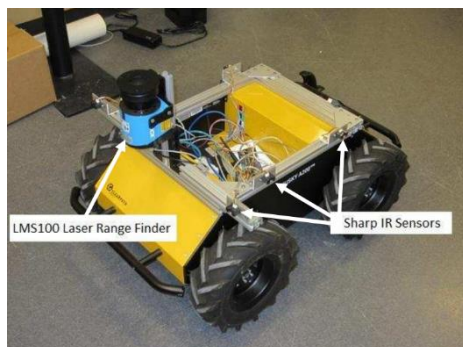
Az ontarioi egyetem mechatronikai és robotikai laborja által a CSME (Canadian Society for Mechanical Engineering) 2014-es konferenciájára készített kutatása gyakorlati összehasonlítást tesz a reaktív és valószínűségi útvonalképzés között.

A reaktív útvonalképzésen alapuló szoftverek a kijelölt vég- vagy köztes pontok közötti útvonalat meghatározva indulnak el a kijelölt útvonalukon. Az algoritmus az indulás után, ha valamilyen akadállyal szembesül, akkor annak egy felületét megtalálva a fallal párhuzamosan elkezd kikerülni az adódó akadályt, ami után lehetőleg visszatér az eredeti kijelölt útvonalára. Az előző fejezetekben lokális útvonalképzésként hivatkoztam erre a módszerre.

A probabilisztikus, vagy valószínűségi útvonalképzés ehhez képest egy előre elkészített térkép alapján elvégzett számításokkal teszi. A fentebbi fejezetekben globális útvonalképzésként hivatkoztam a módszerre.

A publikáció utal arra, hogy az általános gondolkodás probabilisztikus megoldást gondolja hatékonyabbnak, a kutatás célja ennek a kérdésnek a gyakorlattal alátámasztott eldöntése volt.

A kísérletek alatt az A200-as robotot egy lézeres távolságmérővel szerelték fel, a tájékozódáshoz, illetve a jármű saját fedélzeti komputerén futott az egyedi ROS (Robot Operating System) kód. A felszerelt robot a 7. ábrán látható



7. ábra: a kísérletre felszerelt A200-as robot
Forrás: Charabaruk, 2014

A kísérletet lehetőleg egyenlő körülmények között folytatták le, a robotot a maximális sebessége alatt 0,75 és 0,85 m/s sebesség mellett üzemeltették. A mérések eredményeképp minden esetben a probabilisztikus módszertan használata bizonyult gyorsabbnak. (Charabaruk, 2014).

3. ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A járműrobot dinamikai és energetikai vizsgálatát legáltalánosabb formában a járműmozgás differenciálegyenletén keresztül érdemes elkezdni. Az egyenlet különválaszt bizonyos ellenállástípusokat (lég-, gördülési-, emelkedési-, és gyorsítási ellenállás), és azokat hozzá összefüggésbe a jármű által a meghajtás során kifejtett vonóerővel. A meghajtás erejének nagysága a kerék-pálya kapcsolat esetén véges mértékben léphet fel. Ennek mértékét az adhéziós és motorikus határok jellemzik.

A differenciálegyenlet terepjáráskor való felhasználásánál, annak tagjait megfontolva ajánlott integrálni, így a vizsgálatunknak hatékony eszköze lehet. Terepjáráskor a közúti haladással szemben jelentőséget kap a kerékcsúszás (szlip) kérdésköre, ami sokszor a leghangsúlyosabb összetevőjévé válik az egyenletnek.

3.1 Adhéziós határ

Egy jármű adhéziós határa a kerék-pálya kapcsolatnál lép fel. Azt a határt nevezzük adhéziós határnak, amikor a jármű által kifejtett nyomaték növekedése már nem hasznosul effektív vonóerőként, csupán a kerék perdületét növeli. Ez a határ a kerék felfekvési felületén kialakult súrlódási állapottól függ.

Súrlódás: a súrlódás két érintkező felület között lép fel, amely két felület össze van nyomva. A nyomóerővel normális irányokban kifejtendő erőt annak függvényében egy arányosító tényezővel jellemezzük. Ez a súrlódási tényező (μ). Ennek összefüggése az 1. összefüggésben látható.

$$\mu = \frac{F_s}{F_N} \quad [-] \quad (1)$$

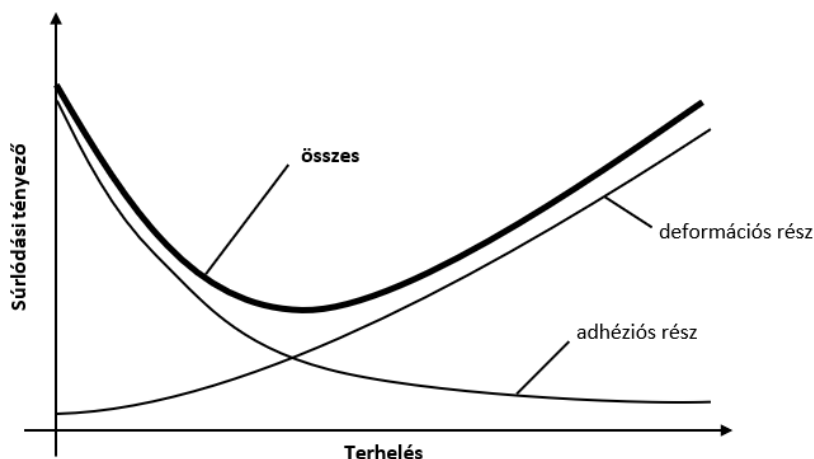
μ – Súrlódási tényező

F_s – Súrlódó erő

F_N – Nyomóerő

A súrlódási állapotot két fő összetevő sebesség- és terhelésfüggő összege alkotja (8. ábra). Az egyik összetevő az adhéziós erőhatás. Ez az érintkező felületek közötti kémiai kölcsönhatás, ami nyírószilárdsággal rendelkezik, így annak bontása erőigénnyel jár. A másik

összetevő a deformációs erőhatás, ami az anyagok felületén fennálló egyenetlenségek kapcsolódásakor „alakzáró” kapcsolatot hoz létre az anyagok között, melynek megszakítása szintén erőigénnyel jár. A két felület relatív elmozdulása közben, alacsony sebességkülönbség esetén az adhéziós összetevő érvényesül, ami ekkor a legmagasabb súrlódási tényezőt alkotja. Ezt nevezzük tapadásnak. Magasabb sebességkülönbség esetén a deformációs összetevő dominál, itt a tapadásnál alacsonyabb súrlódási tényezők érhetőek el, ezt nevezzük csúszásnak.



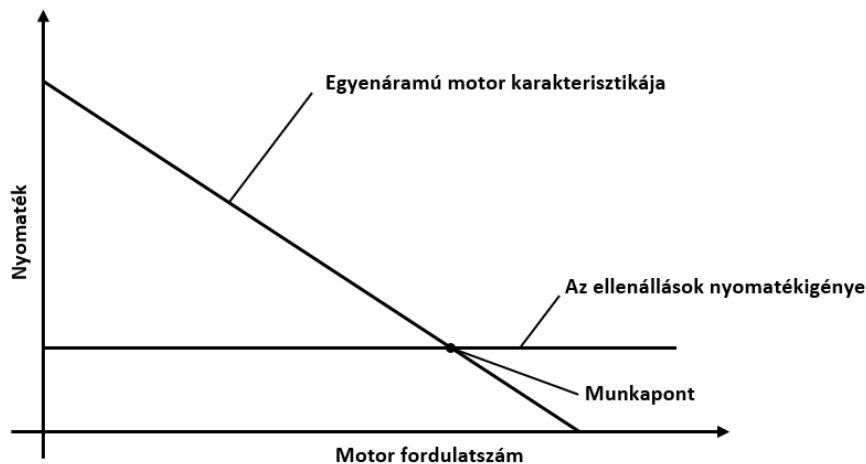
8. ábra: a súrlódási tényező összetevői és összegük a terhelés tekintetében

Forrás: Saját szerkesztés

Az adhéziós határ az, amikor a nyomatékból adódó erő túllépi az adott kapcsolat nyomóerő által biztosított súrlódó erő maximumát, és nem vihető már át több vonóerő. Ha ezt a határt akarjuk növelni, akkor a jármű kialakításán kell változtatnunk (például: nagyobb adhéziós tömeg, jobb tapadást biztosító kerék etc.)

3.2 A motorikus határ

A motorikus határ a hajtáslánc által a keréken kifejthető erő maximumát jellemzi. Az erőforrás által kifejtett maximális teljesítmény függ annak a fordulatszámtól, amit a motor fordulatszám jelleggörbéjével lehet leírni. Ez a jelleggörbe belsőégésű motoroknál egy szűk tartományt tesz járműtechnikai felhasználásra alkalmassá, ezért ezen felhasználás esetén csúsztható tengelykapcsolást és változtatható áttételeket alkalmaznak. Villanymotor esetén a jelleggörbe a belső égésű motorokkal ellentétben a jármű álló állapota esetén is elegendő teljesítményt tud biztosítani a jármű mozgásba hozásához, ezért a tengelykapcsoló elhagyható és mivel sokkal bővebb fordulatszám tartományban tudja az elegendő teljesítményt leadni, így sebességváltóra sincs szükség. Egyenáramú motorok fordulatszám-nyomaték karakterisztikája



9. ábra: egyenáramú villanymotor jelleggörbéje és munkapontja
Forrás: Aaron M. Harrington, saját szerkesztés

negatív meredekségű közel lineáris függvénnyel írható le (9. ábra), ami terepi körülmények között sebességfüggetlennek tekinthető ellenállásokkal összevetve, egy, az adott körülményhez tartozó munkapontban erőegyensúlyt fog elérni, amely pontban a jármű már tovább gyorsulni nem tud. Ez a pont lesz az adott pillanatban vett motorikus határa a járműnek.

3.3 Légellenállás

Egy jármű adott közegben való áthaladása közben a közeget el kell mozgatnia, mivel annak térbeli helyzetét veszi fel. A közeg mozgatásához szükséges erőigényt nevezzük légellenállásnak. A légellenállás erősen függ a közegen áthaladó jármű **homlokfelületétől**, jelentős mértékben a **sebességétől** és a közeg **sűrűségétől**. Az erőigény szempontjából továbbá szerepet játszik a tárgy **alakja**. Az alak és a haladási irány ismeretében meg lehet állapítani az adott haladási iránytól függő légellenállási tényezőt.

$$F_{lég} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot c_w \cdot \Delta v^2 \quad [N] \quad (2)$$

$F_{lég}$ – Légellenállás értéke

A – Jármű homlokfelülete

c_w – Légellenállási tényező

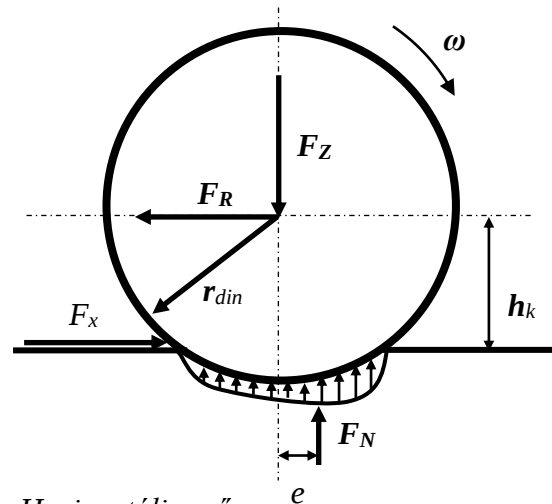
Δv – Jármű és közeg közötti sebességkülönbség

3.4 Gördülési ellenállás

Gördülő hengeres test gördülési állapotba hozása és gördülési állapotának fenntartása erőigénnyel jár. Ez mind a kerék, mind a pálya deformációja függvényében kialakuló erőhatás. A kerék gördülése közbeni erőrendszer eredőjeként lép fel nyomaték formájában mindig a haladás forgásirányának ellentétes értelmében (10. ábra). A gördülési ellenállás energiája a kerék és a pálya deformálásába fektetődik, ezért a jármű szempontjából tiszta veszteségnek tekinthető.

A 10. ábrán megjelenik a vertikális irányú erő létrehozta nyomáseloszlás, ami a gördülés következtében aszimmetrikussá válik. Ennek az eloszló terhelésnek eredője a forgás pontjától e erőkarral jelentkező nyomatékka terheli a rendszert.

A deformáció mértéke arányos a deformációt létrehozó erőhatással, ami a gördülés esetét tekintve az útfelületre merőleges nyomóerő. Ez a nyomóerő általános esetben megegyezik a kerékre eső súlyerővel. A súlyerőt és a gördülési ellenállás erejét arányosító tényezőt nevezzük **gördülési ellenállási tényezőnek** (3. összefüggés).



F_x – Horizontális erő

F_Z – Vertikális erő

F_N – Nyomás eloszlás eredője

F_R – Kerékterhelés

r_{din} – Kerékközéppont magassága deformálatlan talajhoz viszonyítva

r_{din} – Dinamikus keréksugár

ω – Kerék sebessége

f_0 – Gördülési ellenállási tényező

10. ábra: gördülő keréken ható erők.

Forrás: Prof. Dr. Zomotor Ádám, saját szerkesztés

A gördülési ellenállás értéke lejtőn való haladáskor a nyomóerő csökkenése miatt kisebb értékeket vesz fel, ezért a gördülési ellenállás összefüggésének felállítása esetében a lejtő hajlásszögével kell korrigálni annak értékét.

A gördülési ellenállás jelensége remekül párhuzamba hozható a súrlódás jelenségével. A súrlódási állapotban megállapított súrlódási tényezővel összevetve a gördülési ellenállási tényező általában alacsonyabb értékeket vesz fel azonos körülmények mellett.

$$F_g = m \cdot g \cdot f_0 \cdot \cos(\alpha) \quad [N] \quad (2)$$

$$f_0 = \frac{e}{r_{din}} = \frac{F_g}{F_z} \quad (3)$$

F_g – A gördülési ellenállás értéke

m – A jármű tömege

g – A gravitációs gyorsulás

f_0 – Gördülési ellenállási tényező

α – A lejtő hajlásszöge

e – A nyomáseloszlás eredőjének középponti távolsága

r_{din} – Dinamikus gördülési sugár

3.5 Emelkedési ellenállás

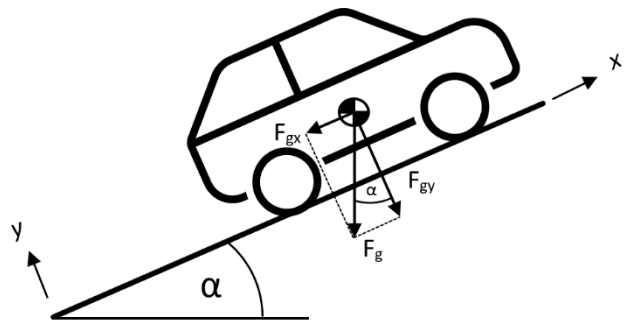
Emelkedőt vagy lejtőt hagyományosan két módon lehet jellemezni. Lehet az emelkedőt a gravitációs gyorsulás iránya által megadott annak normálisával a lejtő által bezárt szögével jellemezni, továbbá ugyanezen szög százalékos megadásával. Egy százaléknyi emelkedő azt adja meg, hogy 100 m alatt az 1 métert emelkedik az út. A két módszer átváltása a 4. összefüggésben látható.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{m}{100} \right) [^\circ] \quad (4)$$

α – A lejtő hajlásszöge

m – A lejtő százalékos emelkedése

Emelkedőn való haladáskor a gravitációs erő irányában végzett elmozduláskor munkavégzés történik. Ha a jármű az emelkedőn felfelé közlekedik, annak kell munkát végeznie, viszont lefelé a gravitáció végez munkát a járművön. A jármű által végzett munka a helyzeti energia növelésére fordul. A helyzeti energia konzervatívan viselkedik, tehát az emelkedőn felfelé végzett- és a lefelé felszabaduló munka azonos mértékű, tehát veszteségnek nem tekinthető, viszont emelkedett nyomatékigénnyel jár. A 11. ábrán látható módon az emelkedőn való haladás



11. ábra: a lejtőn haladó járműre ható súlyerő és komponensei
Forrás: Dr. Vas Attila, saját szerkesztés

esetén egy a lejtő hajlásszögével elfordított koordinátarendszerben írjuk le a haladást. Az elfordított koordinátarendszerben a gravitáció okozta súlyerő α hajlásszöggel jelenik meg. Ebből adódóan a menetirányban is hat a gravitáció hatása, ami a jármű haladása szempontjából ellenállásként jelenik meg az 5. összefüggés alapján a súlyerő és a lejtő hajlásszöge függvényében.

$$F_{em} = \pm m \cdot g \cdot \sin(\alpha) [N] \quad (5)$$

F_{em} – Az emelkedési ellenállás értéke

m – A jármű tömege

g – A gravitációs gyorsulás értéke

α – A lejtő halásszöge

3.6 Gyorsulási ellenállás

A gyorsulási ellenállás annak az erőnek a nagyságát adja meg, ami a jármű gyorsítására fordul. Ez az ellenállás típus valójában nem ellenállás formájában jön létre, hanem a vonóerő az ellenállások leküzdése után megmaradt részét jelenti, ami ezek után a jármű mozgási és forgási tehetetlenségét legyőzve annak gyorsítására fordul.

$$F_{gy} = \delta \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} [N] \quad (6)$$

F_{gy} – Gyorsítási ellenállás

δ – A járműre jellemző tehetetlenségi tényező

m – A jármű tömege

dv – A jármű egységnyi idő alatti sebességváltozása

dt – Egységnyi idő

3.7 Szlip

Gördülő kerekek elméleti modelljének megalkotásakor alapfeltétel, hogy a kerék érintkezési pontjának érintő irányú – kerületi - sebessége és a kerék középpontjának – szállító - sebessége azonos nagyságú és ellentétes értelmű. Ez azt jelenti, hogy a kerék mozgása közben csúszásmentesen gördül. A valóságban viszont mindig van a keréknek csúszása. A kerék csúszás – idegen szóval szlip – azt a különbséget adja meg, hogy a modellben meghatározott érintő irányú sebesség vagy elmozdulás hogyan viszonyul a valóságban megvalósuló értékekkel. A szlip értékét százalékban lehet megadni, az általános fizikai összefüggések

alapján kerékfordulatszám, elmozdulásokkal és sebességekkel is megadható, ezek a 7. összefüggésben találhatók.

$$\delta = \frac{S_0 - S_t}{S_0} = \frac{n_t - n_0}{n_t} = \frac{v_0 - v_t}{v_0} \quad [\%] \quad (7)$$

δ – A kerékcsúszás vagy szlip értéke

S_0 – Elmozdulás csúszásmentes gördüléssel

S_t – A tényleges elmozdulás

n_0 – A kerékfordulatszám csúszásmentes gördüléssel

n_t – A tényleges fordulatszám

v_0 – A kerületi sebesség csúszásmentes gördüléssel

v_t – A tényleges kerületi sebesség

A szlip értéke kerék- és a talajfüggő tényező. Terepi közlekedés esetén válik igen lényegessé, mivel szilárd talajokkal ellentétben a talaj jelentős deformációra képes, így a szlip értéke is jelentősen megnövekedik. A kerékcsúszás értékét a következő paraméterek befolyásolják:

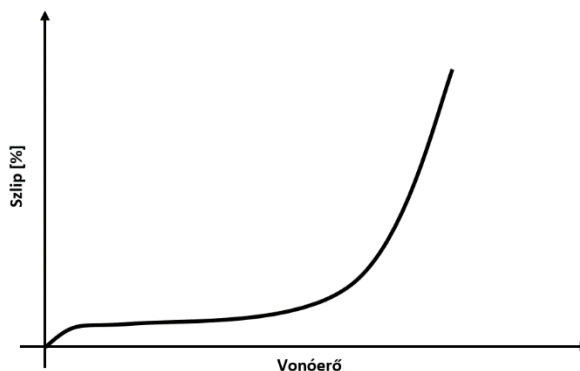
- Vonóerő,
- Talaj kötöttsége,
- A tengelynyomás értéke,
- A kapaszkodóbordák kialakítása,
- A növénytakaró,
- A talaj összetétele.

A szlip egyik szélsőséges értéke hajtott kerekeknél tud fellépni. Ekkor az elméleti elmozduláshoz képest a valós elmozdulás csökken, és a kerék kipörög, Ha a 7. összefüggésben a tényleges elmozdulás értéke az elméletihez képest csökken, akkor a szlip értéke 1 felé kezd el nőni. Amikor a szlip értéke eléri az 1-et - ami a 100%-os szlip - a kerék csak önmagába pörög anélkül, hogy annak bármiféle szállítósebessége lenne.

A szlip másik szélsőséges értéke tolt kerekeknél tud felállni. Ekkor a kerék valós elmozdulása túllépi a forgásból adódó elméleti elmozdulást, és a kerék forgás nélkül csúszik.

Ennek hatására a 7. összefüggésben az elméleti elmozdulás hatása a valós elmozduláshoz képest csökken, így az összefüggés elkezd a negatív végtelen felé konvergálni, annak határértéke a $-\infty$ százalék. Ekkor a kerék forgás nélkül csúszik.

A vonóerő hatása a kerékcúszásra a 12. ábrán látható. A görbén egy kezdeti meredek szakaszt egy mérsékelt meredekségű szakasz követ, amit egy adott pont után egy exponenciális szakasszá válik. A mérsékelt szakasz végét használjuk a terepi körülmények között megengedhető szlip értékek maximumának. Ennek a különböző hajtás típusoknál a megengedett értékei a következők:



12. ábra: a vonóerő hatása a kerékcúszásra
Forrás: Laib, 2002, saját szerkesztés

- kétkerék hajtás 10-16%,
- négykerék hajtás 5-10%,
- lánc talpas hajtás 2-6%.

3.8 A járműmozgás differenciálegyenlete

A járműmozgás differenciálegyenlete a jármű által kifejtett vonóerőt állítja egyensúlyba a jármű haladása során kialakuló menetellenállásokkal. A gördülési-, emelkedési-, lég- és gyorsítási ellenállások a szuperpozíció elve alapján összeadhatóak (8. összefüggés). Terepi felhasználás esetén a szlip, mivel hangsúlyos szerepet kap, korrigálni kell vele annak a kifejtett vonóerőre irányuló hatását. A 9. összefüggés az előzőekben taglalt erőegyensúlyt állítja fel, viszont minden tag a mérések során felvett adattípusokból áll fel, így egy egyszerűen alkalmazható gyakorlati összefüggést alkot. A 9. összefüggés bal oldalán a vonóerő van kifejezve úgy, hogy egy jármű állandó paramétereiből (adott sebességi fokozathoz tartozó és állandó áttétel, hatásfok, keréksugár) és a kifejtett nyomatékból számítható legyen. A 9. összefüggés jobb oldalán az előző fejezetekben taglalt ellenállások kifejtései láthatóak a kerékcúszással kibővítve. A gyorsítási ellenállás differenciális hányadosként szerepel benne, ezért hívjuk a járműmozgás differenciálegyenletének. Az összefüggés felhasználása járműtechnikában képet ad a jármű dinamikai körülményeiről, amivel a teljes szerkezet viselkedését lehet leírni.

$$F_v = F_g \pm F_{em} + F_{lég} + F_{gy} \text{ [N]} \quad (8)$$

$$\frac{M \cdot i_s \cdot i_o \cdot \eta}{r_k} = \frac{m \cdot g \cdot f_0 \cdot \cos(\alpha) \pm m \cdot g \cdot \sin(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot A \cdot c_w \cdot \Delta v^2 + \delta \cdot m \cdot \frac{dv}{dt}}{1 - s} \quad [N] \quad (9)$$

F_v – A jármű által kifejtett vonóerő

F_g – Gördülési ellenállás

F_{em} – Emelkedési ellenállás

$F_{lég}$ – Légellenállás

F_{gy} – Gyorsítási ellenállás

M – A jármű által kifejtett nyomaték

i_s – Az adott sebességi fokozathoz tartozó áttétel

i_o – A jármű állandó áttétele

η – Az erőátvitel hatásfoka

r_k – Keréksugár

m – A jármű tömege

g – Gravitációs gyorsulás

f_0 – Gördülési ellenállási tényező

α – Lejtő hajlásszöge

A – A jármű homlokfelülete

c_w – Légellenállási tényező

Δv – Jármű és közeg közötti sebességkülönbség

δ – A járműre jellemző tehetetlenségi tényező

dv – A jármű egységnyi idő alatti sebességváltozása

dt – Egységnyi idő

s – Szlip

3.9 A járműmozgás differenciálegyenletének egyedi felhasználása

A mérésünk tárgyát képző, Husky fantázianevet kapott terepjáró robot energetikai és dinamikai vizsgálatával a járműmozgás differenciálegyenletét szeretnénk felállítani. A következő részben az összefüggés egyes elemeit vizsgáljuk meg, elemezzük azoknak egyedi felhasználásának részleteit. A jármű által kifejtendő vonóerőt és a gördülési ellenállást méréssel fogjuk meghatározni, amivel a mérést kifejtő fejezetben fogunk foglalkozni.

3.9.1 Légellenállás

A robot, mivel a gyártó által meghatározott maximális sebessége alacsony (3.6 km/h) légellenállása előreláthatólag kis értéket fog felvenni. Abban az esetben, ha ennek a mértéke nagyságrendekkel eltér a többi ellenállás mértékétől, akkor akár a mérési pontatlanság nagyobb lehet, mint a légellenállás mértéke. Így ezt ajánlott elhanyagolhatónak minősíteni, amivel a számításokat tudjuk egyszerűsíteni.

A légellenállás megállapításához ki kell számolnunk a robot haladási irányával normális homlokfelületét. Ehhez az egyszerűség kedvéért a gyártó által megadott magasság és szélességi adatokat fogjuk használni, mivel a legnagyobb, a járművet magába foglaló téglalap alapján van megadva magasabb érték lesz a valódinál, így a számításunkkal a biztonság irányába fogunk tévedni. A gyártó által megadott magasság 390 mm és a szélesség 670 mm. A homlokfelület számítása a 10. összefüggésben található.

$$A = h \cdot w = 0,37 \cdot 0,69 = 0,2691 \text{ m}^2 \quad (10)$$

A – A jármű homlokfelülete

h – A jármű magassága

w – A jármű szélessége

A légellenállás számításához szükséges légellenállási tényező általános járműtechnikai alkalmazás esetén minden esetben 1 alatti értéket vesz fel, ezért szintén a biztonság irányába tévedünk, ha 1 értékkel számítjuk a jármű légellenállásának értékét.

A jármű maximális sebességét, aminél a legnagyobb légellenállás is jelentkezik a gyártó által megadott 1 m/s -os értéket fogjuk használni, feltételezve, hogy kismértékű szél keletkezik.

$$F_{lég} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot c_w \cdot \Delta v^2 \quad [N] \quad (11)$$

$$F_{lég} = \frac{1}{2} \cdot 0,2691 \cdot 1 \cdot 1^2 \quad [N] \quad (12)$$

$$F_{lég} = 0,13455 \quad [N] \quad (13)$$

A számított érték, a későbbiekben megállapított gördülési ellenálláshoz képest, több mint egy nagyságrenddel, a vonóerőhöz képest, négy nagyságrenddel kisebb, így a légellenállás értékét, a jelenlegi felhasználás esetén, elhanyagolhatónak lehet tekinteni.

3.9.2 Gyorsítási ellenállás

A járműrobotot irányító szoftver, mivel terepjárásra lett tervezve, annak megóvása érdekében korlátozza a robot maximális sebességét 3.6 km/h értéknél, ezután a motorok csak a sebesség megtartásához megfelelő nyomatékot adják le. Emiatt a jármű csak az induláskor igényel a gyorsításhoz nyomatéktöbbletet. Mivel a robot motorjainak ereje rövid idő alatt képes a járművet a maximális sebességre felgyorsítani, ezért a járműmozgás differenciálegyenletének gyorsítási ellenállás tagja, a felhasználás idejének magas hányadában zérus. Ezen okokból kifolyólag, a jármű vizsgálatának szempontjából, a gyorsítási ellenállással nem fogunk foglalkozni.

4. A MÉRÉS FELÉPÍTÉSE

A Husky járműrobot energetikai és dinamikai vizsgálatához két méréscsoportot különböztettünk meg. Ezek a gördülési ellenállás és a maximális vonóerő mérése különböző útfelületeken. Az útfelületek típusai a következők voltak:

- Szilárd útburkolat,
- Kemény talaj,
- Laza talaj,
- Növényzettel borított talaj.

A méréseket a járműtechnika tanszék mellett lévő betonfelületen és az egyetem közelében elhelyezkedő terepvizsgálati pályán kialakított terepfelületeken folytattuk le. A kemény talaj kialakításához a talaj felső növényborítását eltávolítottuk, a laza talaj kialakításához a növényzet eltávolítása után ezt a felületet ásóval fellazítottuk. A szükséges útfelületeket 10 méter körüli hosszban alakítottuk ki, ami elegendő mérési időt biztosított a mérés elvégzéséhez.

4.1 Maximális vonóerő mérése

A Husky maximális vonóerejének mérését a robot kikötésével, végeztük. A járművet rögzítettük egy nehéz beton kockához, majd a kötélbe erőmérő cellát iktattunk (13. ábra). Az erőmérő cellát (13. ábrán 1-es számmal jelölve) adatrögzítővel számítógéphez kötöttük, majd a járművet elindítottuk, amíg a kötél meg nem feszült. Ezek után az erőmérő cellában ébredő terhelés értékét regisztrálni kezdtük, miközben a robot megpróbálta elhúzni a betonkockát. A terhelést bizonyos ideig fenntartottuk. A kötélhúzást minden útfelületen, a jármű magas és alacsony sebességi fokozata mellett is elvégeztük, és minden esetben háromszor megismételtük. A mérést a robottal terheletlenül, illetve a gyártó által megállapított terepi maximális 20 kilogrammos terhelés mellett is elvégeztük.



13. ábra: a vonóerőmérés kialakítása
Fényképezte: Hajdu Máté

4.2 Gördülési ellenállás mérése

A jármű gördülési ellenállásának mérését a robot sík útfelületen szabadon járásánál fellépő erőszükséglet mérésével végeztük el (14. ábra). A motor áramfelvételéből, a jármű hajtási és áttételi hatásfokából a robot szoftvere egy, a kerekeken mérhető, oldalankénti össznyomatékokot mér, ami azonos értékű és ellentétes értelmű lesz, mint a gördülési ellenállás. A mérést elvégeztük az útfelületen mindkét irányban, ezt mérési iterációnkként kétszer. Ezekkel felület típusonként 4 mérést végezve. A mérést a robottal terheletlenül, illetve a gyártó által megállapított terepi maximális 20 kilogrammos terhelés mellett. Laza talaj esetén a talajt minden megtett úthossz után visszalazítottuk, a jármű okozta talajtömörítés hatásának elkerülése végett.



14. ábra: gördülési ellenállás mérése
Fényképezte: Hajdu Máté

4.3 Keréknyomás

Egy terepen közlekedő jármű menetdinamikájában jelentős szerepet játszik az abroncsok nyomása. Az alacsonyabb nyomás miatt a kerék nagyobb mértékben tud deformálódni, így nagyobb érintkezési felület jöhet létre az útfelület és a kerék között. Ennek hatására a hajtás adhéziós határa növekszik.

Terepbordás abroncsok esetében a bordák merevsége miatt ez a hatás kevésbé jelentkezik, illetve alacsony adhéziós tömegnél szintén csökken ez a hatás.

A Husky járműroboton végzett előzetes mérés során (15. ábra) a maximális 1.4 bar (20 PSI) nyomásról a kerekeket teljesen leeresztettük, illetve a maximális 20 kilogrammos terhelés felhelyezése mellett a következő következtetéseket tettük:



15. ábra: hasmagasság mérése
Fényképezte: Hajdu Máté

- a robot tengelyeinek magassága és a hasmagasság minimálisan változik, így a keréksugár értékét a megengedett terhelés és keréknyomás tartományokon belül azonosnak tekinthetjük,
- a bordák merevsége az alacsony adhéziós terhelés miatt a jármű felfekvési felülete csekély mértékben növekszik, így a keréknyomás változása nincs jelentős hatással a hajtás adhéziós határára.

A fentebbi megállapítások miatt a méréseket közepes 0.7 bar (10 PSI) nyomással végeztük.

A nyomaték-kifejtett vonóerő átváltást a gyártó által megadott és általunk mért 170 mm-es értékkel számítottuk.

4.4 A mérések

A mérések időpontját előzetesen 2024 május 1. -re jelöltük ki. Az előtte lévő napok nem voltak esősek, így a méréseknél a csapadék tömörítő hatása nem érvényesült. Az időjárás gyenge széllel 20 °C fok körüli értéken állt. A helyszín fák által biztosított árnyékos területen feküdt. A terep (16. ábra) a mérést megelőző napon lett előkészítve, felásva.

A mérés reggel 9 órakor vette kezdetét, amit a fentebb említett tengely- és kerékmagasság mérésekkel kezdtünk. Ezeket követően a kialakított tesztpályán 10 óra 1 perckor elkezdtük a kemény-, laza- és növényzettel borított talajok esetén a terhelésmentes és maximális terhelések esetén a gördülési ellenállás mérését. Minden talajfelület-terhelés iterációnál kétszer mindkét irányban elvégeztük a mérést.



16. ábra: az előkészített próbapálya
Fényképezte: Hajdu Máté

Ezeket követően kialakítottuk a maximális vonóerő méréséhez szükséges kikötési pontot, a robotot kikötöttük és a kötélbe iktattuk az erőmérő cellát. A vonóerő mérést a gördülési ellenállás mérésével azonos sorrendben végeztük el, minden talajtípus-terhelés iterációnál 3-3 mérést végeztünk.

A talajtípusok mérését követően a gördülési ellenállás és a maximális vonóerő mérését elvégeztük szilárd útburkolati felületen is.

A láthatóan hibás méréseket megismételtük.

A mérések közben a járműben egyszer kellett akkumulátort cserélni.

A mérésekkel 13 óra 40 percre végeztünk, ezek után a mérőműszereket letakarítottuk, a helyszínen mindent visszarendeztük, és minden esetleges szennyezést eltakarítottunk.

Az elpakolást követően a helyszín közelében elkezdtek a mérések kiértékelését, felkészülve arra, hogy ha a mérés során bármi problémát érzékelünk, a mérést azonos körülmények között meg tudjuk ismételni.

Az akkumulátorcsere miatt a csere utáni adatok egy technikai probléma miatt nem lettek regisztrálva, ezért az akkumulátor cseréje utáni gördülési ellenállási adatokat kicsivel később, azonos körülmények mellett újra kellett mérnünk.

4.5 Mérési tapasztalatok

4.5.1 Gördülési ellenállás mérés

A gördülési ellenállás mérése közben a jármű, a kialakított terepkörülmények között simán, problémamentesen haladt. A robot irányítása a kerekek oldalanként más sebességgel, vagy ellentétes irányba forgatásával történik. A differenciálkormányzás jellemzője, hogy alacsony felbontással rendelkezik ahhoz, hogy a pályára teljesen egyenesen álljunk be. Ennek következtében a pályán történő haladás érdekében, néhány esetben korrigálnunk kellett a jármű irányán. Emiatt szabad füllel hallhatóan megváltozott a meghajtás. A manőver így más dinamikai körülményeket idézett ugyan elő, ám ezek nem befolyásolták jelentősen a mérés pontosságát. Ezért a későbbiekben nem számoltunk velük.

4.5.2 Vonóerő mérés

Az összes mérés esetén megállapítható, hogy a mérés elkezdése után a robot megindult és a kötelet megfeszítette, ami egy kiugró értéket hozott létre az erőmérő cella mérési adatain. Ezután állt fel csak az egyensúlyi állapot, ami a mérés kiértékelése szempontjából lesz mértékadó szakasz. Egyes mérések során a robot szoftveres védelme megállította a motorokat azok túlterhelés elleni védelme érdekében.

Szilárd útfelület: a szilárd útfelületen való mérés esetén a mérés sikeres volt, mind magas, mind alacsony sebességi fokozat mellett. A kerék kipörgött, a kötel pedig erősen megfeszült.

Kemény talaj: a mérés alatt a kikötött robot kerekének bordázott kialakítása belekapott a földbe, a mérések során minden alkalommal elkezdte elásni magát, ezzel a hasmagassága érzékelhetően csökkent, de a földre egy esetben sem ért le. A mérést az értékelhető eredmény megalkotásához elég ideig tudtuk végezni.

Növényzettel borított talaj: a mérés során - a többi talajfelülettel ellentétben - a robot kerekének bordái gyors sebességi fokozatban nem kapaszkodtak bele a talajba, így a kerekek a növényzeten megcsúszva forogtak. Lassú fokozat mellett ez a probléma nem állt fenn.

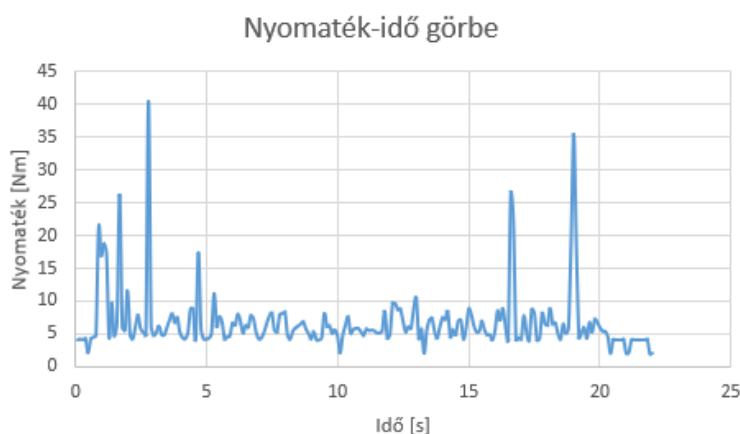
Laza talaj: ezen mérés során a robot lassú sebességi fokozatban szintén elásta magát, mégis elegendő idő maradt arra, hogy értékelhető eredményeket kapjunk. Gyors sebességi fokozat esetében viszont a robot nagyon rövid idő alatt akkora árkot ásott maga alá, ami már megnehezítette a haladást, így a kötel rántása után gyorsabban leállította a szoftver a járművet, mint a mérés kiértékeléséhez szükséges egyensúlyi állapot felállt volna.

4.6 A mérés kiértékelése

4.6.1 Gördülési ellenállás mérés

A járműrobot a motorjai által kifejtett nyomatékot tizedmásodpercenként regisztrálja és oldalanként rögzíti. Mivel a jármű összes kereke azonos méretű, az átszámított vonóerő igény számításakor összeadhatjuk a két oldali kifejtett nyomatékot. A kemény talajon végzett egyik mérés nyomaték-idő diagramja a 17. ábrán látható.

Az ábra kezdeti szakaszában látható kiugrások a robot indulása és a próbapályára való lépése miatt jelentkeznek. A próbapályán való haladás egyensúlyának felállta után egy stabil kiugrás mentes szakasz következik ebben az esetben az 5. másodperctől a 16. másodpercig. Minden útfelület esetén ezekből a kialakult egyenletes szakaszokból lehet következtetni a jármű gördülési ellenállására, ezért ezen szakaszok átlagát képezzük. A mérés kezdetén látható módon a mérés az álló szakaszból 4 Nm körüli értékről indul, ez a mérőeszköz állandó hibája, amit a pontatlanság értékének kivonásával tudunk korrigálni.



17. ábra: nyomaték-idő görbe az egyik kemény talajon
elvégzett mérés esetén
Forrás: saját szerkesztés

Az egy útfelületre vett 4 mérést egyesítettük, és ezen 4 mérés átlagából képeztük a robot arra az útfelületre vett gördülési ellenállásának értékét. A kapott nyomaték értékek felhasználásával, a fentebb taglalt módszertan alapján, a következő módon kapott összefüggéssel lehet megállapítani a gördülési ellenállási együttható értékét:

$$F_{görd} = \frac{M}{r_k} \quad (15)$$

$$F_{görd} = m \cdot g \cdot f_0 \quad (16)$$

$$m \cdot g \cdot f_0 = \frac{M}{r_k} \quad (17)$$

$$f_0 = \frac{M}{r_k \cdot m \cdot g} \quad (18)$$

F_g – A gördülési ellenállás értéke

m – A jármű tömege

g – A gravitációs gyorsulás

f_0 – Gördülési ellenállási tényező

r_k – Keréksugár

A gördülési ellenállás mérési eredményei a 2. táblázatban találhatóak:

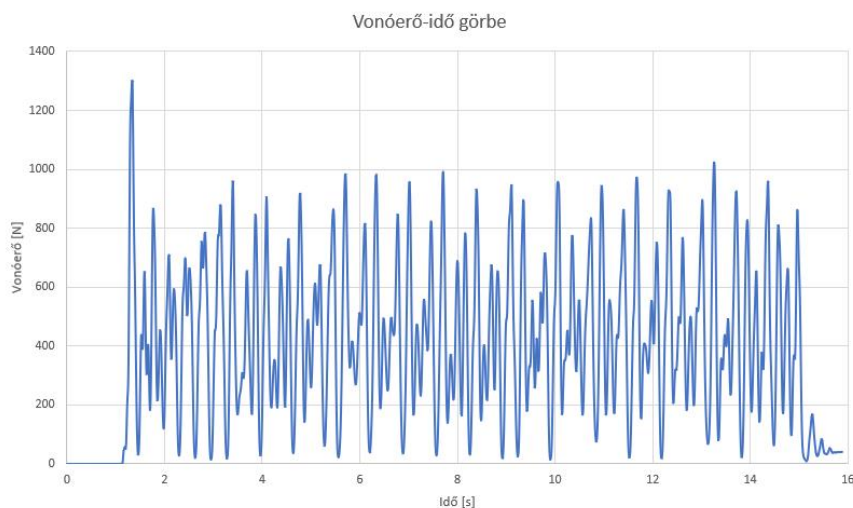
Útfelület típusa	Terhelés [kg]	Nyomaték [Nm]	Gördülési ellenállás [N]	Gördülési ellenállási együttható [-]
Beton	0	1,02	5,98	0,0110
	20	1,14	6,72	
Kemény talaj	0	1,07	6,28	0,0115
	20	1,18	6,95	
Laza talaj	0	1,28	7,51	0,0133
	20	1,31	7,72	
Növényzettel borított talaj	0	1,05	6,17	0,0112
	20	1,15	6,78	

2. táblázat: a gördülési ellenállás mérésének számításai
Forrás: saját szerkesztés

A számított adatok alapján látható, hogy a betonon terhelés nélkül jelentkezik a legkisebb ellenállás. A legnagyobb ellenállást pedig a laza talajon a maximális terhelés mellett mértük. A gördülési ellenállás együtthatójának és az egyes terhelési értékek számításakor az eltérésnél minden esetben magasabb értékű volt a mérési pontatlanság, így ezeknél azok középértékét állapítottuk meg.

4.6.2 Maximális vonóerő

Az erőmérő cella a kőtelben ébredő erőt századmásodpercenként regisztrálja. A mérés kezdetén, a mérőműszer 0 értékről indul, mivel a műszer állandó hibáját már a mérés előtt korrigáltuk. A 18. ábrán a betonon végzett terhelésmentes egyik vonóerő mérés vonóerő-idő diagramja látható.



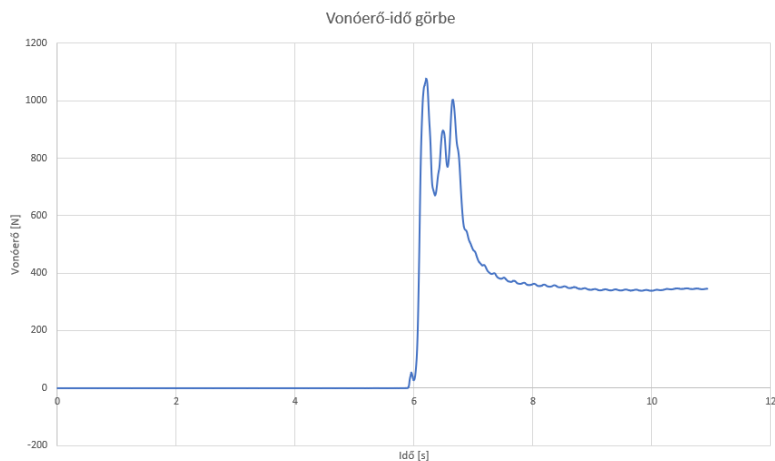
18. ábra: vonóerő-idő görbe az egyik betonon végzett maximális vonóerő mérés esetén
Forrás: saját szerkesztés

A mérés kezdetén látható, hogy a kőtel a földön van, nem jelenik meg benne erő. Ahogy a földről a kőtel elemelkedik és megfeszül egy kiugró értékkel megállítja a járművet. Ezek után a robot feszíti a kötelet a 18. ábrán látható módon. A hajtás jellege miatt megjelenik egy periodicitás a vonóerő kifejtésében. A mérés végén, mivel a kőtel megfeszítve marad egy kis kőtelérő a mérés után is. A kőtel megrántása után a 18. ábrán ábrázolt mérés esetén a 2. másodperc után feláll a fentebb említett periodicitás, ami a mérés végéig a 15. másodpercig fennáll. Ezen mérési pontok átlagából lehet a jármű által maximálisan kifejthető vonóerőt megállapítani.

A laza talajfelületeken magas sebességi fokozatban a 20 kilogrammos terhelés mellett végzett mérések esetén a 19. ábrán látható módon a robot szoftvere olyan gyorsan letiltott, hogy a fentebb tárgyalt periodicitás nem tudott kialakulni, így ennek a mérésnek a kiértékelésekor nagyon magas eredményeket kaptunk, melyek nem tekinthetők mértékadó eredményeknek. Ezen mérések lefolyása alapján nem ajánlanánk a maximálisan megterhelt robot laza talajon való gyors sebességi fokozatban való használatát, mivel bármiféle a közlekedést befolyásoló

akadály esetén a robot gyorsan elásná magát, a szoftver letiltana, minek következtében a robot gyorsan immobilisé válna.

A növényzettel borított talaj esetén, terheléssel, magas sebességi fokozatban hasonló



19. ábra: vonóerő-idő görbe az egyik laza talajon terhelt járművel gyors sebességi fokozatban elvégzett mérésről
Forrás: Saját szerkesztés

probléma lépett fel, így az itt mért adatok sem tekinthetők megfelelőnek.

A maximális vonóerő mérési eredményei a 3. táblázatban találhatóak:

Útfelület típusa	Terhelés [kg]	Sebességi fokozat	Maximális vonóerő [N]
Beton	0	Magas	410,6
		Alacsony	419,1
	20	Magas	423,1
		Alacsony	444,1
Kemény talaj	0	Magas	462,8
		Alacsony	453,3
	20	Magas	477,8
		Alacsony	526,0
Laza talaj	0	Magas	538,3
		Alacsony	588,3
	20	Magas	705,7
		Alacsony	601,8
Növényzettel borított talaj	0	Magas	379,4
		Alacsony	398,8
	20	Magas	652,4
		Alacsony	516,4

3. táblázat: a maximális vonóerő mérés eredményei
Forrás: Saját szerkesztés

A mérés eredményein látszik, hogy minden esetben a nagyobb terhelés mellett a maximálisan kifejthető vonóerő, a magasabb adhéziós tömeg miatt magasabb értéket vett fel. Ez a hatás betonon jelentkezik a legkevésbé, mivel a szilárd felület miatt a nagyobb tömeg

esetén sem tud jobban behatolni a kerék. A legnagyobb különbséget viszont a növényzettel borított talajon tapasztaljuk, ahol nagyon jól látszott, hogy a terhelés nélküli mérés esetén a jármű nem tudott belekapni a bordáival a talajba, amíg a maximális terhelés mellett bele tudott kapaszkodni, így jóval magasabb vonóerőt tudott kifejteni.

A mérési eredményeket ezek után a projektben fogják felhasználni.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

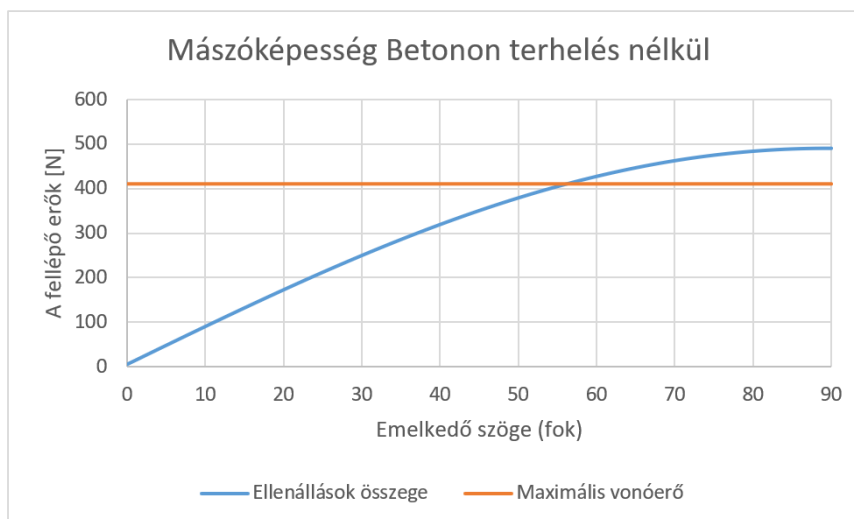
A mérések eredményeit, ha behelyettesítjük a járműmozgás általunk redukált differenciálegyenletébe, akkor néhány ismeretlen függvényévé válik az egyenlet (10. összefüggés).

$$F_v = \frac{m \cdot g \cdot f_0 \cdot \cos(\alpha) \pm m \cdot g \cdot \sin(\alpha)}{1 - s} [N] \quad (10)$$

Az egyenletben a gördülési ellenállás értékét 0 fok hajlásszögű lejtőre – sík terepre – megmértük. Ezen túl a vonóerőt is ismerjük a méréseink alapján. Ezen adatok ismeretében az egyenlet két tényező függvénye marad. Ezek a lejtő hajlásszöge, illetve a szlip értéke.

Ezek alapján egy 3 dimenziós függvény által kijelölt felületen fog mozogni a jármű munkapontja.

A szlip értéke minden esetben csak mérhető elméleti tényező és a kapott szögfüggvények által meghatározott függvényt tolja el lineárisan, mivel az értéke 0 és 1 között változik a hajtott kerekek miatt. Ha felvesszük elméleti maximális szlipmentes esetet, akkor képet kaphatunk a jármű vonóerejéből ideális körülmények között adódó mászóképeségéről (20. ábra).



20. ábra: mászási görbe
Forrás: saját szerkesztés

A 20. ábrán látható módon, az emelkedő hajlásszögének növekedésével, az ellenállások értéke egy elnyújtott szinuszgörbe első emelkedő alakját veszi fel, annyi különbséggel, hogy nem 0 értékről indul, mivel gördülési ellenállás sík talajon is van. Ha ábrázoljuk az ábrán a

maximális vonóerőt is, akkor a két egyenes metszeténél megállapítható, az adott terepkörülmények között ideálisan legmagasabb megmászható emelkedő hajlásszöge.

Az általunk által vizsgált körülmények közül a legkisebb megmászható hajlásszögű lejtő a növényzettel borított talajon, terhelés nélkül történő közlekedés közben léphet fel. Az ezen adatokkal felvett függvény ábrázolása után leolvasott maximális emelkedő érték 49° -os hajlásszögű lenne. Ezek alapján a gyártó által megadott 45° -os emelkedési képesség némi szlip értékkel együtt helytálló állításnak bizonyul.

A különböző terepkörülmények között alakult görbék a függelékben találhatóak.

A lefolytatott mérések alapján felírható a járműmozgás differenciálegyenlete, viszont a fellépő szlip értékéről, akár sík talajon való haladáskor, akár lejtőn vagy emelkedőn való haladáskor nem kaptunk képet ezen változók alakulásáról. Ezen tényezők alakulásáról a különböző terepkörülmények közötti méréssel való vizsgálata a projekt ezen részének érdekes további folytatása lehetne. A fellépő szlip értékének mérése különböző terep körülmények és emelkedők-lejtők között is egy hasznos kutatási terület lehetne a projekthez.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A szakdolgozatom egy egyetemek közötti projekt részeként készült el. A projekt egy Clearpath A200 -as „Husky” modellel végez kutatást a terepjárás területén. A munka első részében a téma szakirodalmi áttekintését végeztem el. Összeszedtem a vezető nélküli földi járművek (UGV) múltját, jelenét és jövőjét. Végül az A200 -as járműrobot paramétereit szedtem össze, és a robot, kutatásokban való felhasználásával foglalkoztam.

A dolgozat középpontja a Husky dinamikai és energetikai vizsgálata. A vizsgálat gerinceként a járműmozgás differenciálegyenletének felállítását választottuk. Ezek után a mérések alapfizikai háttérével foglalkoztam. Összeszedtem a dinamikai korlátokat. Ezek az adhéziós és motorikus határok. Foglalkoztam differenciálegyenlet egyes elemeivel, amik a lég-, gördülési-, emelkedési- és gyorsulási ellenállások, továbbá a szlip témakörét és a differenciális összefüggés egyedi terepi felhasználását fejtettem ki.

A légellenállás a mérés során a fellépő ellenállásokhoz és a vonóerőhöz képest nagyságrendekkel kisebb. Továbbá a gyorsítási ellenállás a jármű haladási idejének magas hányadában nincs jelen. Ezek miatt ezeket az ellenállási tényezőket elhanyagoltuk.

A projekten belül szükséges volt a gördülési ellenállás és a maximális vonóerő mérése, amik indokoltak voltak a modell felállításához. Ezen méréseket négy különböző útfelület-típuson végeztük. Betonon, növényzettel borított-, kemény- és fellazított talajon. Továbbá a méréseket terheletlenül, illetve a robotra illesztett 20 kilogrammnyi (ez a gyártó által megadott maximális terhelés értéke) teherrel is elvégeztük. A gördülési ellenállás mérését a járművel való üresjárással a jármű belső mérőegységével végeztük. A maximális vonóerő mérését a robot kikötése, és kötélhúzás útján, a kötélbe iktatott erőmérő cellával végeztük.

A mérést 2024. május 1. -én végeztük el. A napot a keréknyomás eredményre való hatásával kapcsolatos kísérlettel kezdtük. Megállapítottuk, hogy nincs jelentős hatással az eredményekre a guminyomások értéke. Ezek után a három talajfelületen végeztük el a gördülési ellenállások méréseit, majd a maximális vonóerő mérését. A mérés végén a betonon való mérést végeztük el. Az eredményeket még aznap kiértékeltek és megállapítottuk a járműre jellemző gördülési ellenállások és a maximális vonóerők értékét.

A mérés alapján megállapítottam, hogy a gyártó által megállapított maximális kapaszkodási szög a legnagyobb ellenállással rendelkező talajtípus esetén is helytálló. Ideálisabb körülmények között a mászási képesség jóval magasabb értéket is felvehet.

A mért és számított értékek a kutatás részeként kerülnek majd felhasználásra.

7. ABSTRACT

My thesis is part of an inter-university project. The project involves research into off-road driving using a Clearpath A200 "Husky" model. In the first part of the thesis I conducted a literature review of the topic. I summarized the past, present and future of unmanned ground vehicles (UGV). Finally, I collected the parameters of the A200 vehicle robot and discussed its use in research.

The focus of this thesis is the dynamic and energetic analysis of the Husky. For the backbone of the investigation, the differential equation of vehicle motion was chosen.

After that I dealt with the basic physics of the measurements. I summarized the dynamic constraints. These are the adhesion and motoric limits. I dealt with some elements of the differential equation, which are the air-, rolling-, lift- and acceleration resistances, and I discussed the slip and the specific field applications of the differential relation. I have found that the drag and acceleration drag are negligible for the measurement.

Within the project, I was involved in two measurements, which are important for the model. These are the measurement of rolling resistance and maximum traction. These measurements were carried out on four different types of road surface. Those were concrete, vegetated-, hard- and loosened soil. In addition, the measurements were also carried out without any load and with a load of 20 kg (the maximum load value specified by the manufacturer) attached to the robot. Rolling resistance was measured with the vehicle idling with the vehicle's internal measuring unit. The maximum traction force was measured by tying the robot and pulling the rope with a load cell inserted into the rope.

The measurement was carried out on 1 May 2024. We started the day with an experiment on the effect of wheel pressure on the result. We found that there was no significant effect of the value of the tire pressures on the results. Then, measurements of rolling resistance were made on the three ground surfaces, followed by measurements of the maximum traction force. At the end of the measurement, the measurements on the concrete were carried out. The results were evaluated on the same day and the values of the rolling resistance and the maximum tractive forces for the vehicle were determined.

The measurements showed that the maximum grip angle established by the manufacturer was correct for the soil type with the highest resistance. Under more ideal conditions, the climbing ability can be much higher.

The measured and calculated values will be used as part of the research.

8. IRODALOMJEGYZÉK

Aaron M, H., Christopher, K. (2013): Characterization of Small DC Brushed and Brushless Motors. dtic.mil. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/tr/ADA577582>

Blanche, J., Mitchell, D., West, A., Harper, S., Groves, K., Lennox, B., Watson, S., & Flynn, D. (2023): Microwave sensing for avoidance of high-risk ground conditions for mobile robots. 2023 IEEE International Conference on Omni-Layer Intelligent Systems (COINS), 1–7. <https://doi.org/10.1109/coins57856.2023.10189266>

C. R. Burrows (1962): "The History of Radio Wave Propagation up to the End of World War I," in Proceedings of the IRE, vol. 50, no. 5, pp. 682-684, May 1962

Čapek, K. (1920): R. U. R.: Rossum's Universal Robots: Kolektivní drama O vstupní komedii a třech aktech. Aventinum.

Charabaruk, Nicholas, Nokleby, Scott. (2014): An Experimental Comparison Between Probabilistic Map-Based Navigation and Reactive Behaviour Based Navigation. 10.13140/2.1.2066.7204.

Dr. Laib Lajos. (2002): Terepen Mozgó Járművek: Tankönyv. Szaktudás.

Dr. Vas Attila (2019): *Általános géptan* Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó Nonprofit Kft.

Durst, P. J., Anderson, D. T., Bethel, C. L., Carruth, D. W., & Monroe, G. (2018): A history and overview of mobility modeling for Autonomous Unmanned Ground Vehicles. Autonomous Systems: Sensors, Vehicles, Security, and the Internet of Everything, 17. <https://doi.org/10.1117/12.2309570>

Durst, Phillip; Anderson, Derek; Bethel, Cindy; Carruth, Daniel; Monroe, John. (2018): *A History and Overview of Mobility Modeling for Autonomous Unmanned Ground Vehicle*.

Ethw. (2022): Milestones: early developments in remote-control, 1901. ETHW. https://ethw.org/Milestones:Early_Developments_in_Remote-Control,_1901

Fletcher, D., Sarson, P. (1994): Matilda Infantry Tank, 1938-1945. Osprey.

Gadekar, Abhijit; Kataria, Kaajal; Aher, Jaideep; Deshmukh, Prathamesh; Fulsundar, Sakshi; Barve, Dr. Shivprakash; Patel, Vibha. (2023): Recent developments in modular unmanned ground vehicles: A review. 29. 11. 10.14456/apst.2024.1.

Gage, D. W. (1995): UGV HISTORY 101: A Brief History of Unmanned Ground Vehicle (UGV) Development Efforts. Unmanned Systems Magazine, 13(3).

Gärtner, A. C., Ferriero, D., Bayrak, A. E., ; Papalambros, P. Y. (2018): Integrated system design of a modular, autonomous, aerial and Ground Vehicle Fleet for disaster relief missions - A case study. Design Conference Proceedings, 15, 735–746. <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0477>

Hernerson, J. (2021): Tesla's remote-controlled boat. The Model Yacht magazin 2021 Ősz.

Houache, M., Yim, C.-H., Karkar, Z., ; Abu-Lebdeh, Y. (2022): On the current and future outlook of battery chemistries for Electric Vehicles—Mini Review. Batteries, 8(7), 70. <https://doi.org/10.3390/batteries8070070>

Kadmiry, Bourhane (2021): IoT-oriented Multi-sensor Mobile Robot Navigation for the Internet of Agricultural Things.

Khaleghi, A.M.; Xu, Dong; Minaeian, Sara; Li, M.; Yuan, Yifei; Liu, Jian; Son, Young-Jun; Vo, Christopher; Mousavian, Arsalan; Lien, J.-M. (2014): A comparative study of control architectures in UAV/UGV-based surveillance system. 3455-3464.

Liu, J., Liu, J. (2018): Intelligent and connected vehicles: Current situation, Future Directions, and challenges. IEEE Communications Standards Magazine, 2(3), 59–65.
<https://doi.org/10.1109/mcomstd.2018.1700087>

Maurer, M., Gerdes, J. C., Lenz, B.,; Winner, H. (2016): Autonomous Driving Technical, legal and social aspects. Springer Berlin Heidelberg. Marincic, A., Budimir, D. (2008): Tesla's multi-frequency wireless radio controlled vessel. 2008 IEEE History of Telecommunications Conference.
<https://doi.org/10.1109/histelcon.2008.4668708>

NASA (1997): Lunar roving vehicle. EG-1997-10-116-HQ. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2009/07/180576main_etm.roving.vehicle.pdf?emrc=9a4d06

NASA (2022): Luna 21/lunokhod 2 - the NSSDCA.
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1973-001A>

National Research Council (2002): Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10592>.

Prof. Dr. Zomotor Á. (2006): *Gépjármű menetdinamika* Budapest: Maróti Könyvkereskedés és Könyvkiadó Kft.

The free lance-star. (1927): The free lance-star. Google News Archive Search.
<https://news.google.com/newspapers?id=PthNAAAAIBAJ&sjid=yYoDAAAAIBAJ&pg=6442%2C387901Z>

Tian, H., Zhang, T., Jia, Y., Peng, S.,; Yan, C. (2021, May 26): Zhurong: Features and mission of China's first Mars Rover. Innovation (Cambridge (Mass.)).
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8456422/>

HTTP1: Wikimedia Foundation. (2024, július 31): *Clearpath robotics*. Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/Clearpath_Robotics

HTTP2: *About clearpath - world leading robotics company*. Clearpath Robotics. (2024, július 26).
<https://clearpathrobotics.com/about-clearpath-story/>

HTTP3: *Research robotics platforms*. Clearpath Robotics. (2024, március 17).
<https://clearpathrobotics.com/robots/>

HTTP4: Clearpath Robotics Inc. (2024, április 07). *Husky A200* clearpathrobotics.com
https://www.clearpathrobotics.com/wp-content/uploads/2013/02/HUSKY_A200_UGV_2013_TEASER_email.pdf

HTTP5: Clearpath Robotics Inc. (2024, május 22). *Husky*. Husky User manual.
<http://www.clearpathrobotics.com/wp-content/uploads/2013/08/Husky-A200-UGV-UserManual-0.20.pdf>

HTTP6: Products, M. M. (2009). Model: MMP S22-346G-24V GP52-04.3 BR-005 DC Gearmotor. midwestmotion.com. <https://midwestmotion.com/newrel/pr113009.html>

HTTP7: Jon Guttman (10/24/2024) Goliath Tracked Mine: The Beetle That Started the ROV Craze. HistoryNet Retrieved from <https://www.historynet.com/goliath-tracked-mine-the-beetle-that-started-the-rov-craze/>.

HTTP8: NASA. (2024, október 21.). Curiosity rover science - NASA science. NASA. <https://science.nasa.gov/mission/msl-curiosity/science/>

HTTP9: NASA. (2024, október 21.). Perseverance rover components - NASA science. NASA. <https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/rover-components/>

HTTP10: NASA. (2024, október 21.). Opportunity - NASA science. NASA. <https://science.nasa.gov/mission/mer-opportunity/>

HTTP11: NASA. (2024, október 21.). Spirit - NASA Science. NASA. <https://science.nasa.gov/mission/mer-spirit/>

HTTP12: NASA. (2024, október 21.). Basics of space flight - solar system exploration: NASA science. NASA. <https://solarsystem.nasa.gov/basics/Spacecraft-Information-Sojourner/>

HTTP13: Derek Heeger, Chad Jones, Dongyang Li, Chenqi Cao, Tayler Burns, Rain

Dartt, Tayler Berns, Aaron Golliver (2024, október 21.). Rosie CLEARPATH - IGVC. Rose-Hulman <https://igvc.secs.oakland.edu/design/2013/Rose-Hulman%20-%20ROSIE%20CLEARPATH.pdf>

HTTP14: IGVC (2024, október 21.) <https://igvc.secs.oakland.edu/results.htm>
<http://www.igvc.org/design/2013/Rose-Hulman%20-%20ROSIE%20CLEARPATH.pdf>

9. TÁBLÁZATOK ÉS ÁBRÁK JEGYZÉKE

Ábrajegyzék:

1. ábra: járművek csoportosítása az irányítás típusai szerint Forrás: saját szerkesztés.....	6
2. ábra: A gyártó terepjáró robotjai a, Jackall b, Husky c, Warthog	20
3. ábra: Clearpath rosie Forrás: HTTP13.....	22
4. ábra: miliméter-hullámú érzékelő az A200-as roboton	24
5. a ábra: az A200-as robotra felszerelt IoT szenzorcsomag Forrás: Bourhane, 2021	25
5. b ábra: az A200-as robotra felszerelt IoT szenzorcsomag Forrás: Bourhane, 2021	25
7. ábra: a kísérletre felszerelt A200-as robot Forrás: Charabaruk, 2014	26
8. ábra: a súrlódási tényező összetevői és összegük a terhelés tekintetében	28
9. ábra: egyenármú villanymotor jelleggörbéje és munkapontja Forrás: Aaron M. Harrington, saját szerkesztés.....	29
10. ábra: gördülő keréken ható erők. Forrás: Prof. Dr. Zomotor Ádám, saját szerkesztés	30
11. ábra: a lejtőn haladó járműre ható súlyerő és komponensei Forrás: Dr. Vas Attila, saját szerkesztés.....	31
12. ábra: a vonóerő hatása a kerékcúszásra Forrás: Laib, 2002, saját szerkesztés.....	34
13. ábra: a vonóerőmérés kialakítása Fényképezte: Hajdu Máté	38
14. ábra: gördülési ellenállás mérése Fényképezte: Hajdu Máté	39
15. ábra: hasmagasság mérése Fényképezte: Hajdu Máté	39
16. ábra: az előkészített próbapálya Fényképezte: Hajdu Máté	41
17. ábra: nyomaték-idő görbe az egyik kemény talajon elvégzett mérés esetén Forrás: saját szerkesztés.....	43
18. ábra: vonóerő-idő görbe az egyik betonon végzett maximális vonóerő mérés esetén Forrás: saját szerkesztés.....	45
19. ábra: vonóerő-idő görbe az egyik laza talajon terhelt járművel gyors sebességi fokozatban elvégzett mérésről Forrás: Saját szerkesztés	46
20. ábra: mászási görbe Forrás: saját szerkesztés.....	48

Táblázatjegyzék:

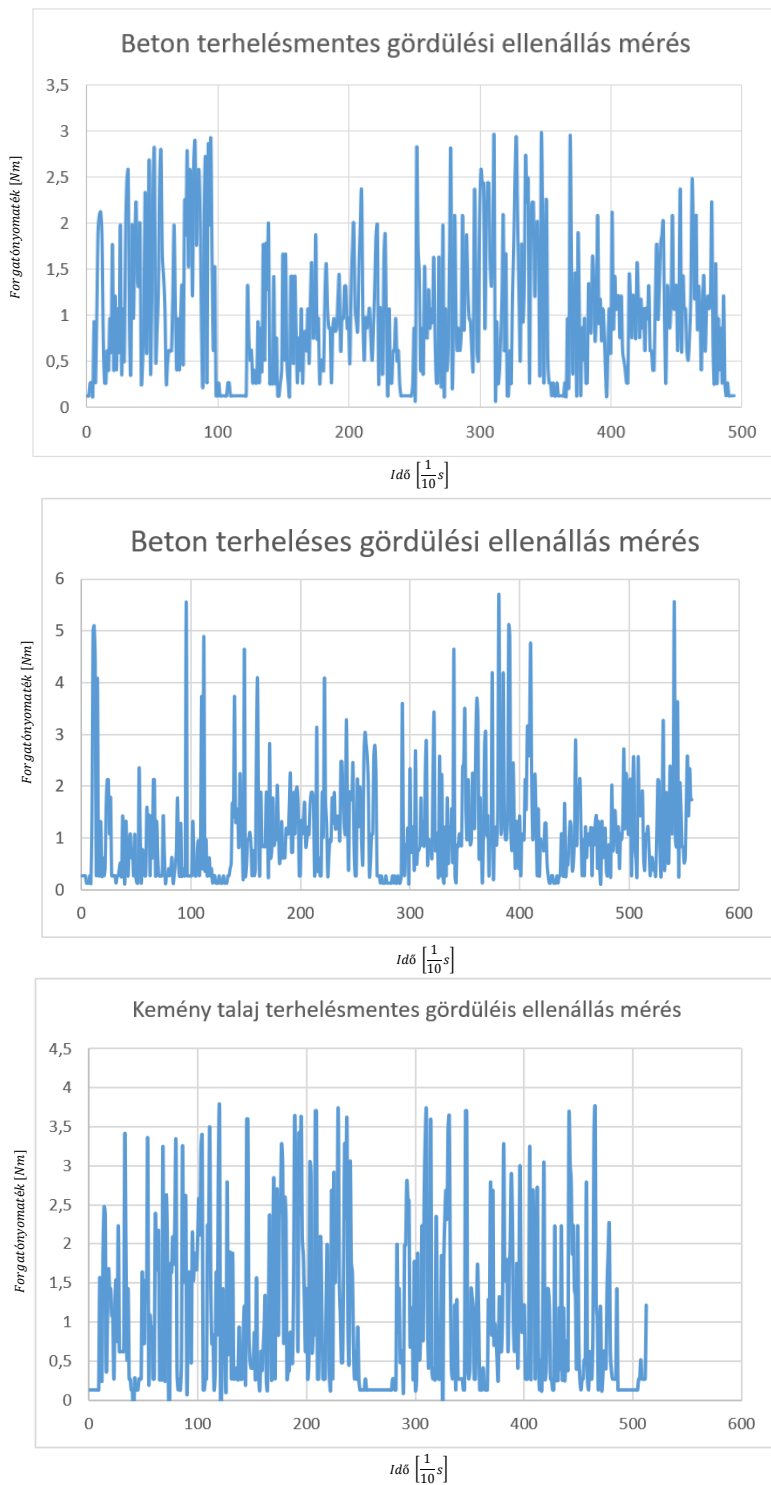
1. táblázat: az A200-as robot paraméterei.....	21
2. táblázat: a gördülési ellenállás mérésének számításai Forrás: saját szerkesztés	44
3. táblázat: a maximális vonóerő mérés eredményei Forrás: Saját szerkesztés	46

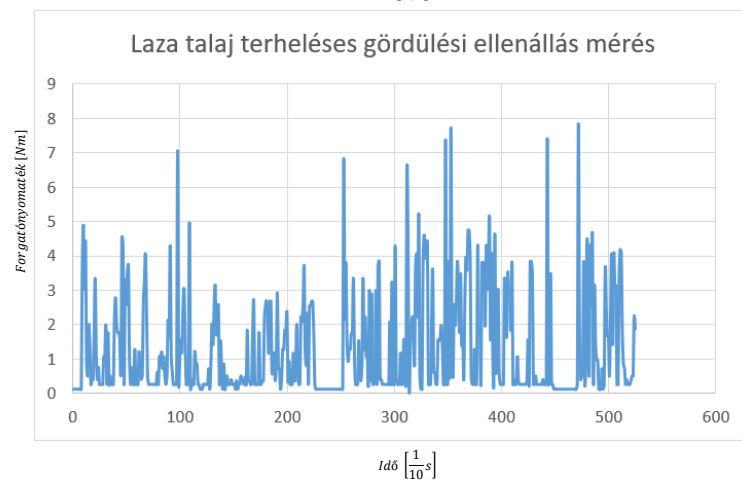
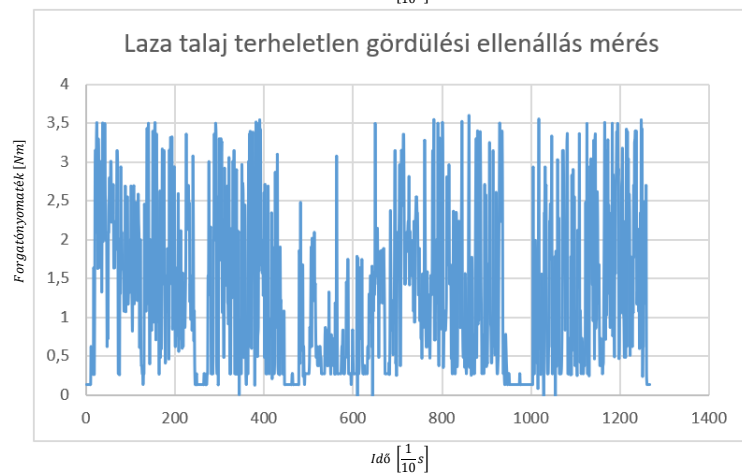
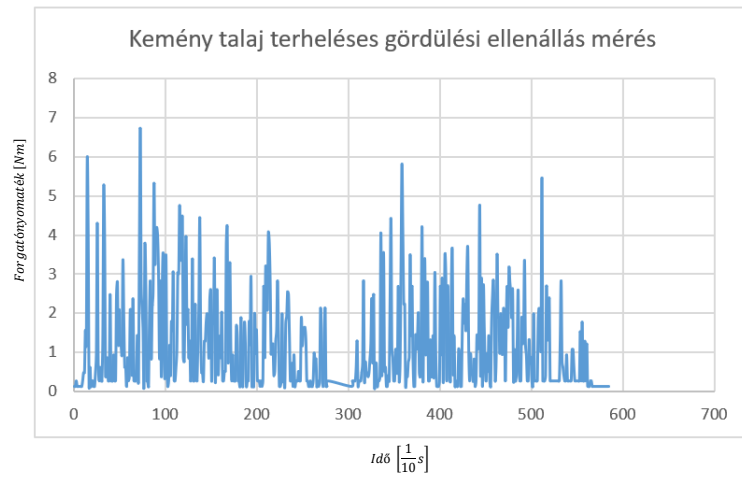
10. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

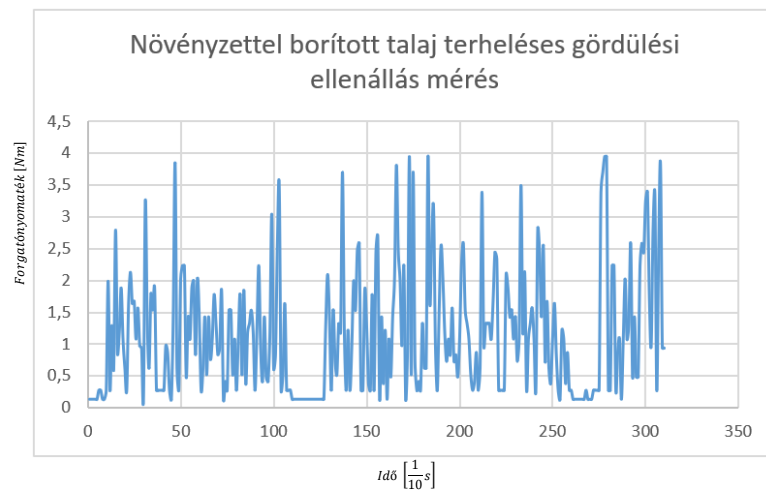
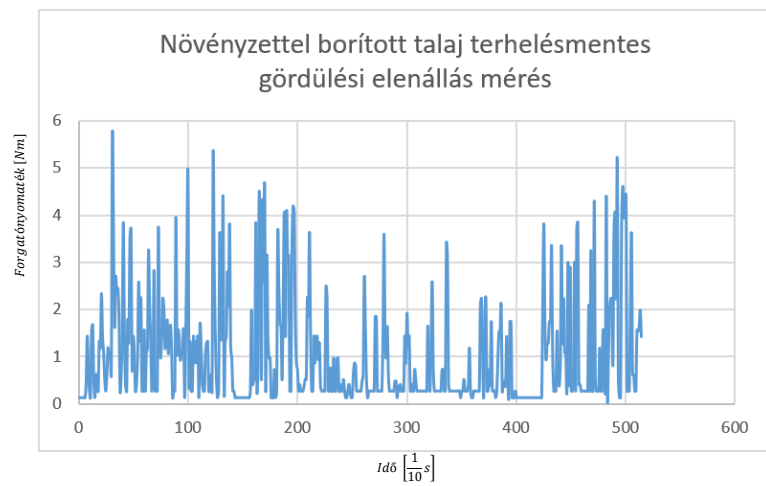
A dolgozat elkészültében segítőknek szeretném megköszönni a munkáját! Először is köszönöm Dr. Kiss Péternek a belső- és Dr. Szabó Ádámnak a külső konzulensi tevékenységét. Bércesi Gábornak a mérések- és azok kiértékelése alatt való segítségéért, Körmöczi Dávidnak, Hajdu Máténak és Bognár Zoltánnak a kísérletben való segédkezésért. Továbbá Rada Ilonának a munka átnézéséért és javaslataiért. Továbbá a Járműtechnika Tanszék munkatársainak.

11. FÜGGELEK

A gördülési ellenállások grafikonjai (a három mérés egymás mellett szerepel a grafikonban):





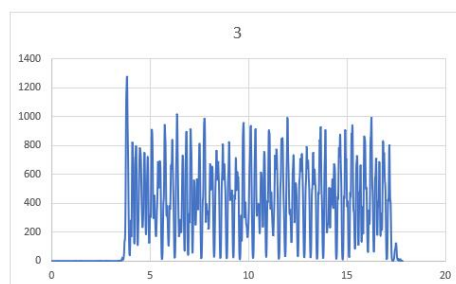
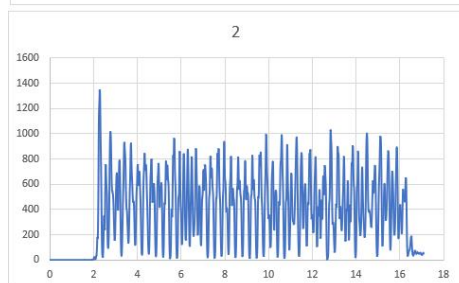
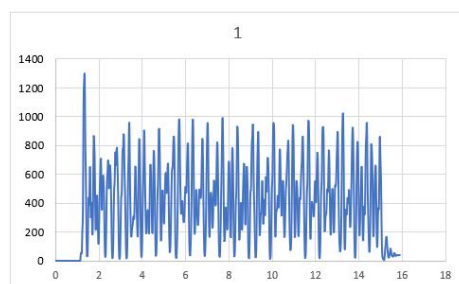


A vonóerőmérések grafikonjai:

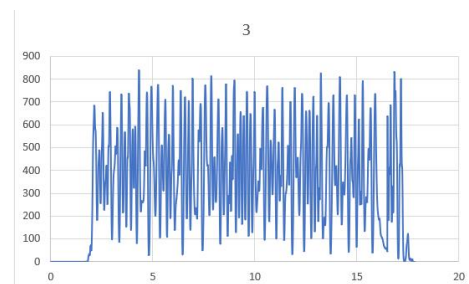
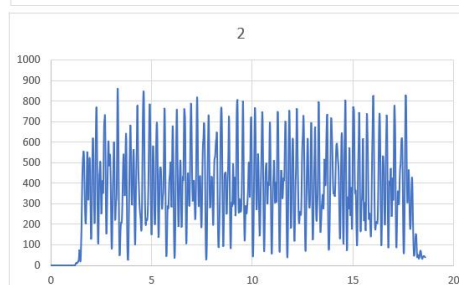
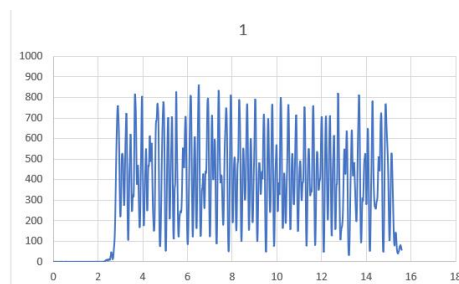
A grafikonok x tengelye az idő másodpercben, y tengelye a vonóerő newton-ban.

- Beton

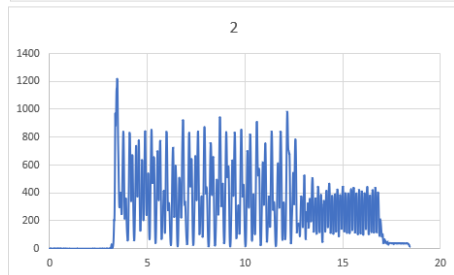
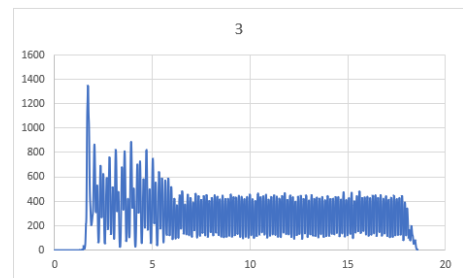
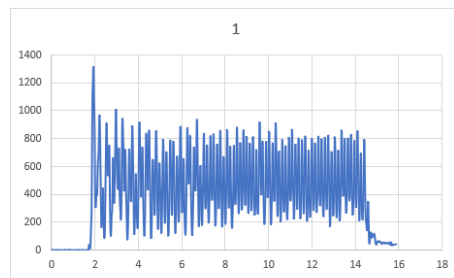
- Terhelésmentes magas sebességi fokozat:



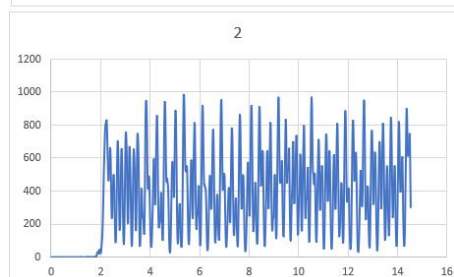
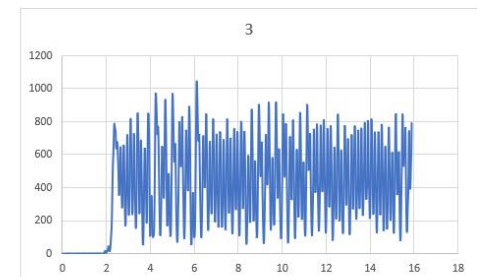
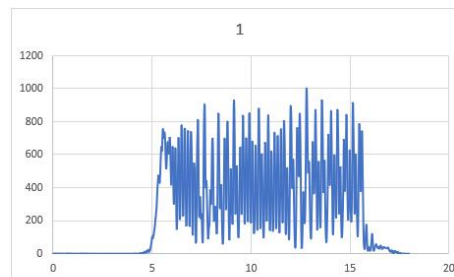
- Terhelésmentes alacsony sebességi fokozat:



- Terheléses magas sebességi fokozat:

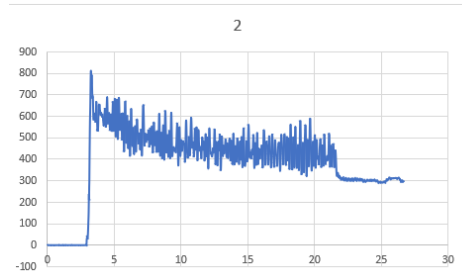
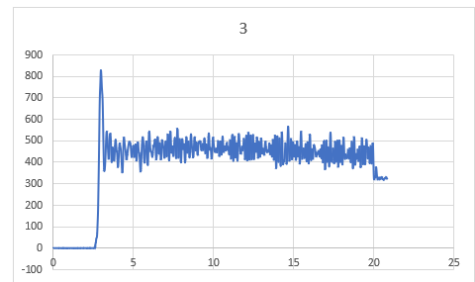
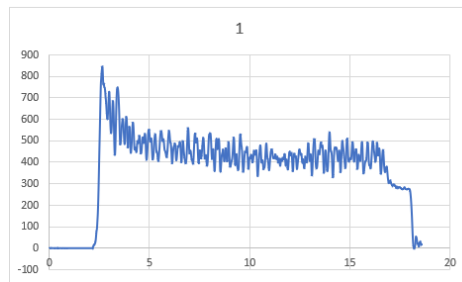


- Terheléses alacsony sebességi fokozat:

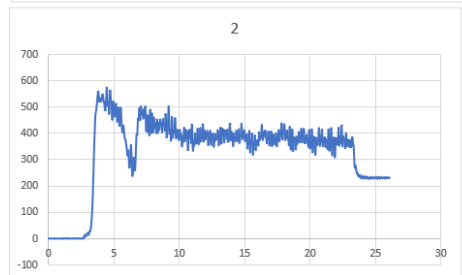
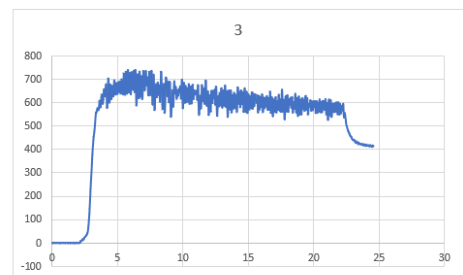
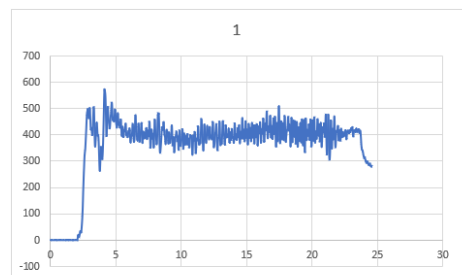


- Kemény talaj

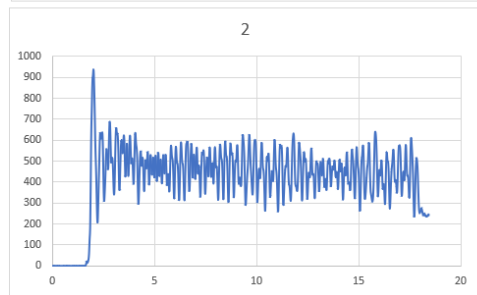
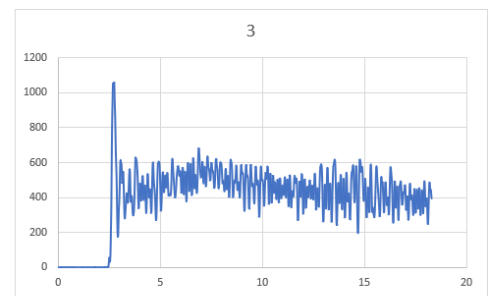
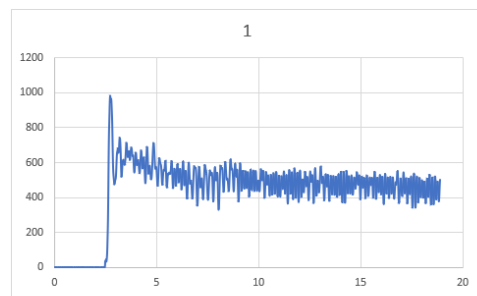
- Terhelésmentes magas sebességi fokozat:



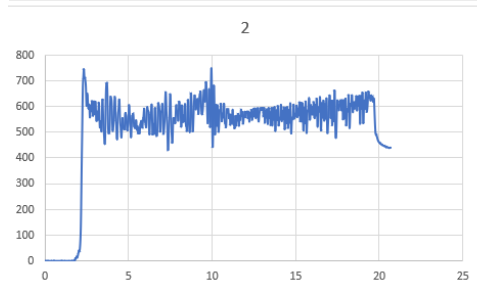
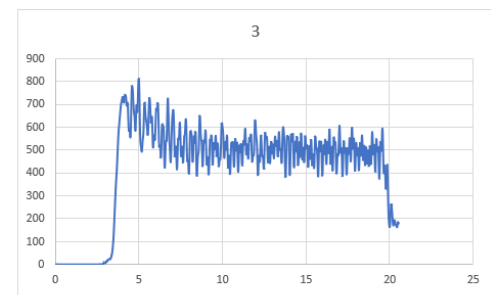
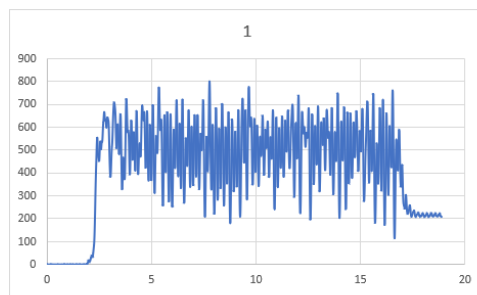
- Terhelésmentes alacsony sebességi fokozat:



- Terheléses magas sebességi fokozat:

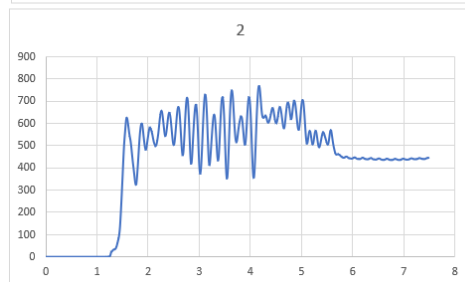
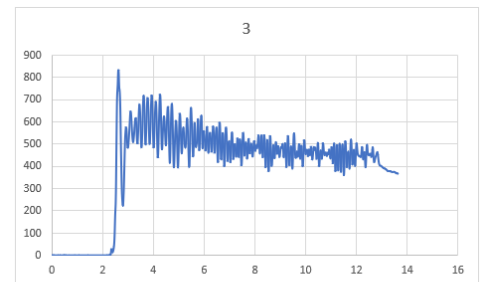
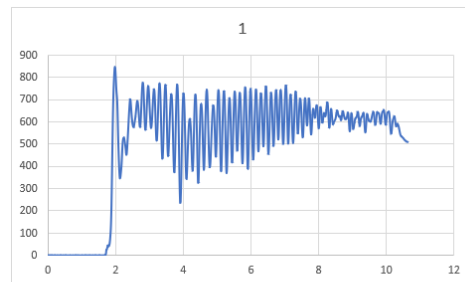


- Terheléses alacsony sebességi fokozat:

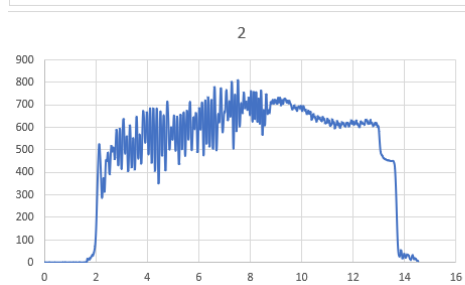
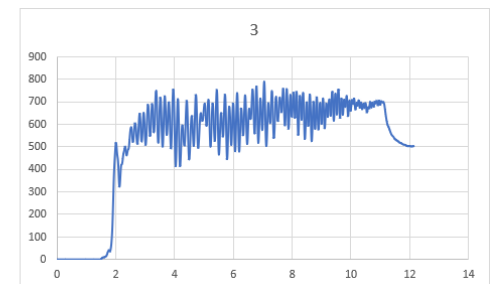
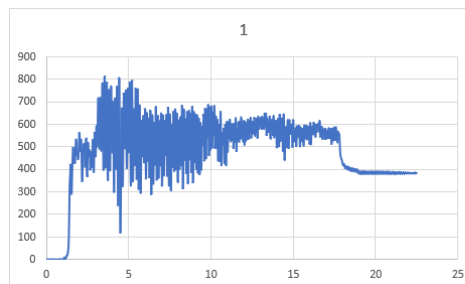


- Laza talaj

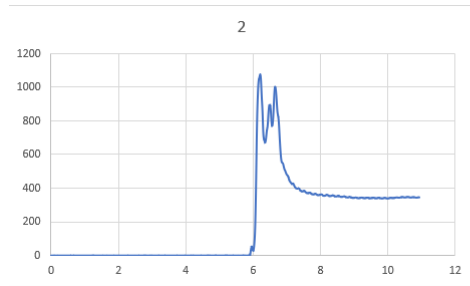
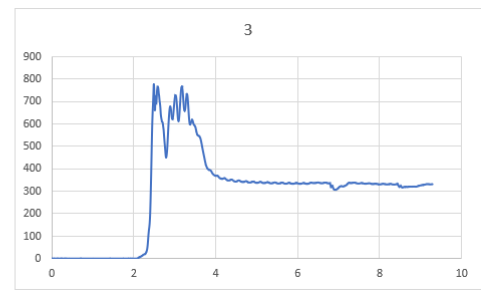
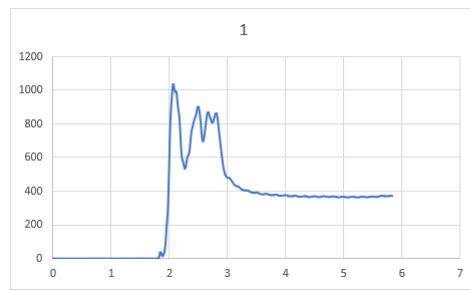
- Terhelésmentes magas sebességi fokozat:



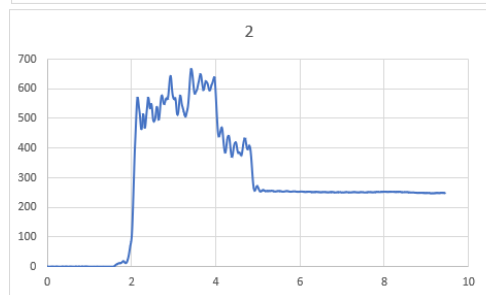
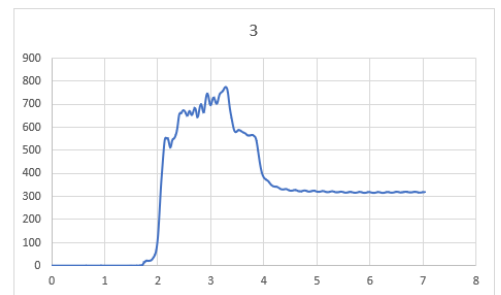
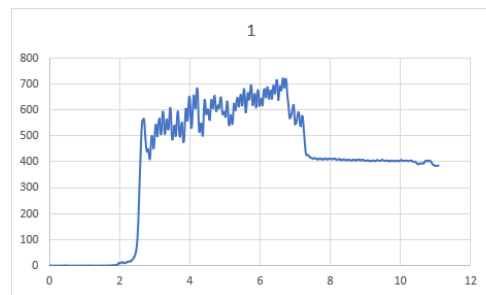
- Terhelésmentes alacsony sebességi fokozat:



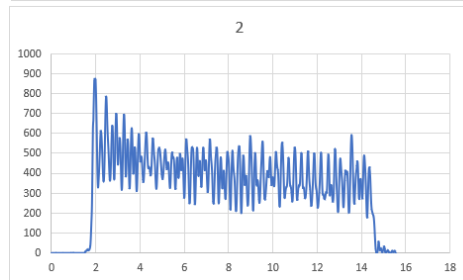
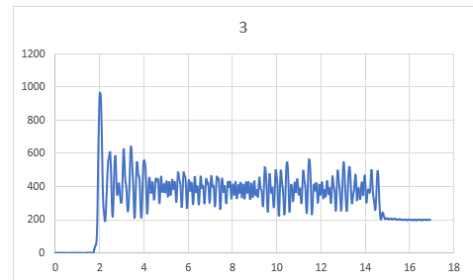
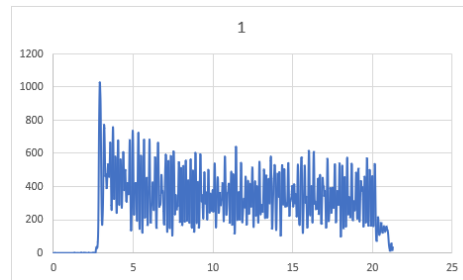
- Terheléses magas sebességi fokozat:



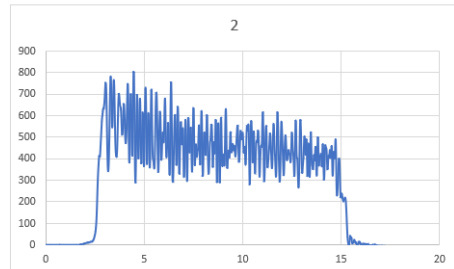
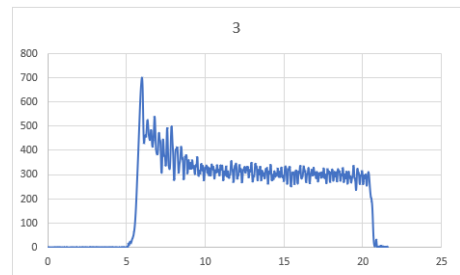
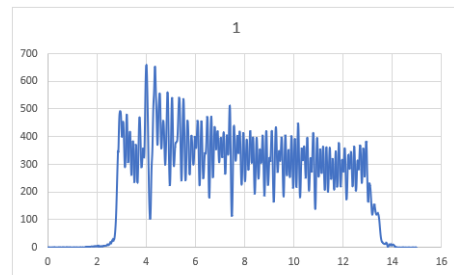
- Terheléses alacsony sebességi fokozat:



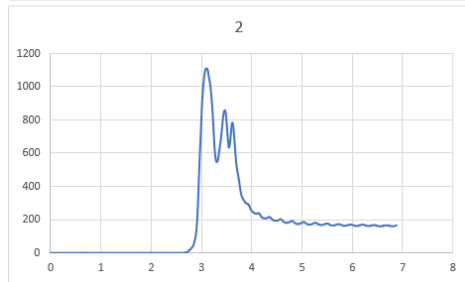
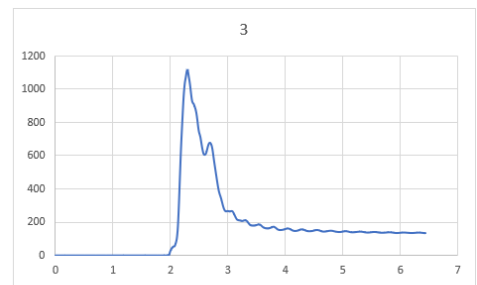
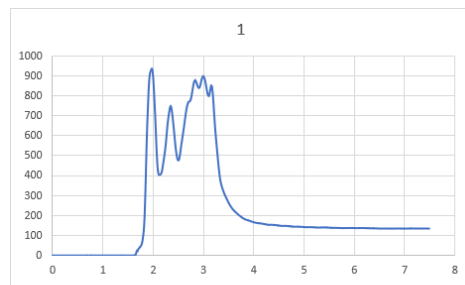
- Növényzettel borított talaj:
 - Terhelésmentes magas sebességi fokozat:



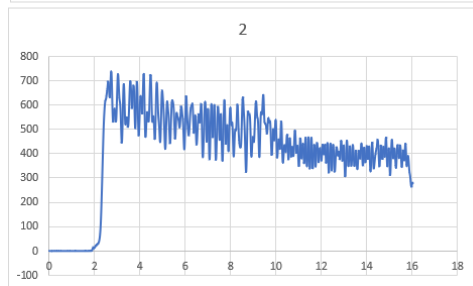
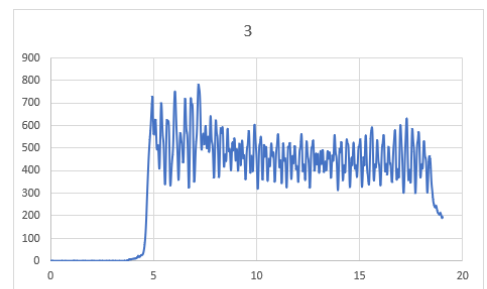
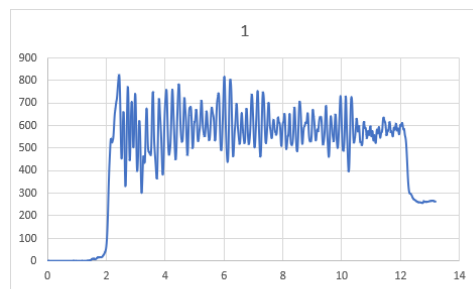
- Terhelésmentes alacsony sebességi fokozat:



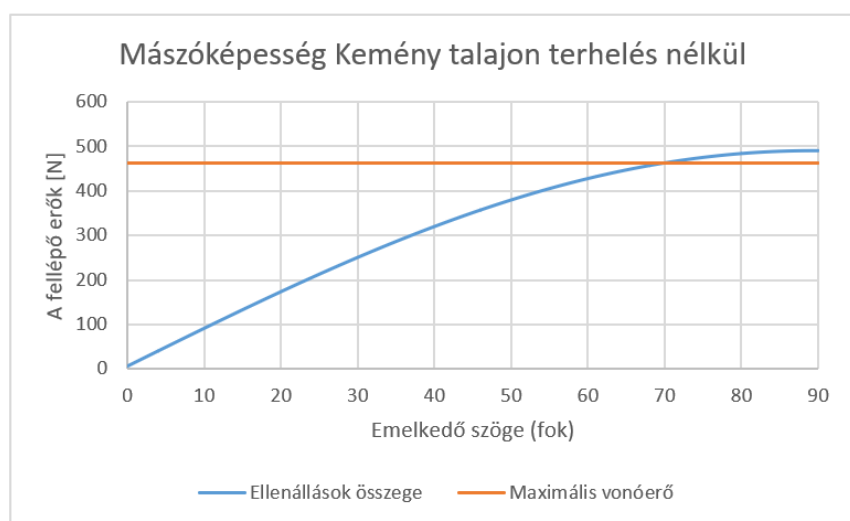
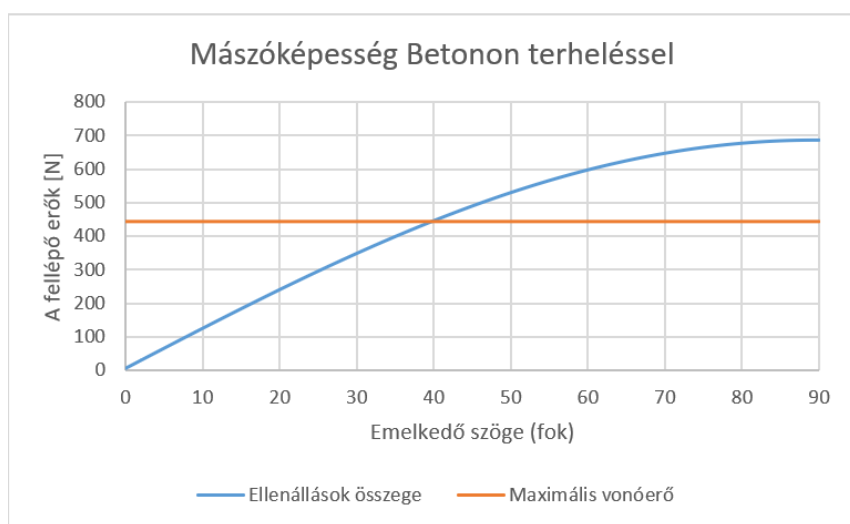
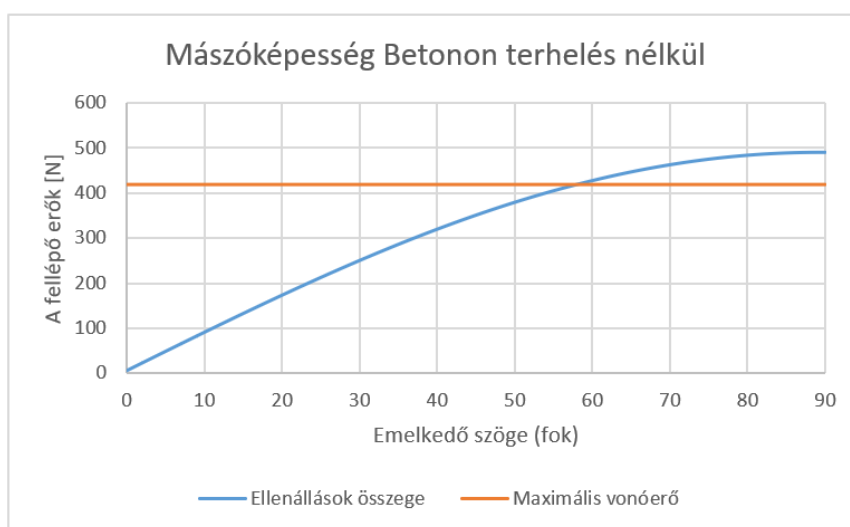
- Terheléses magas sebességi fokozat:

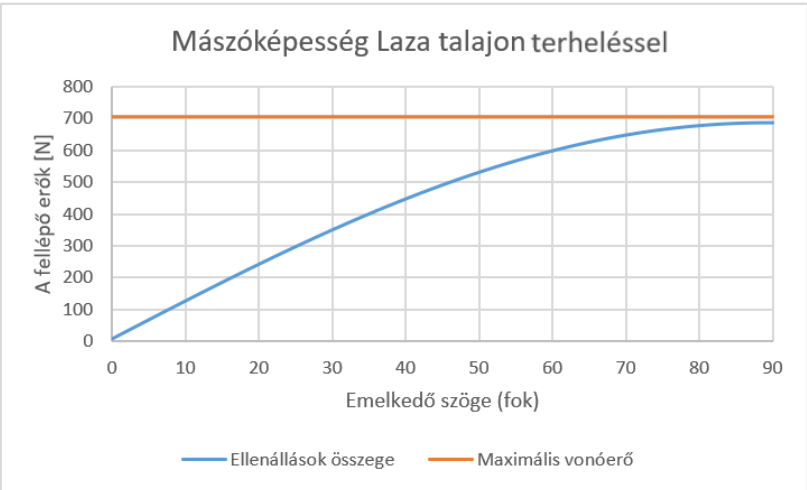
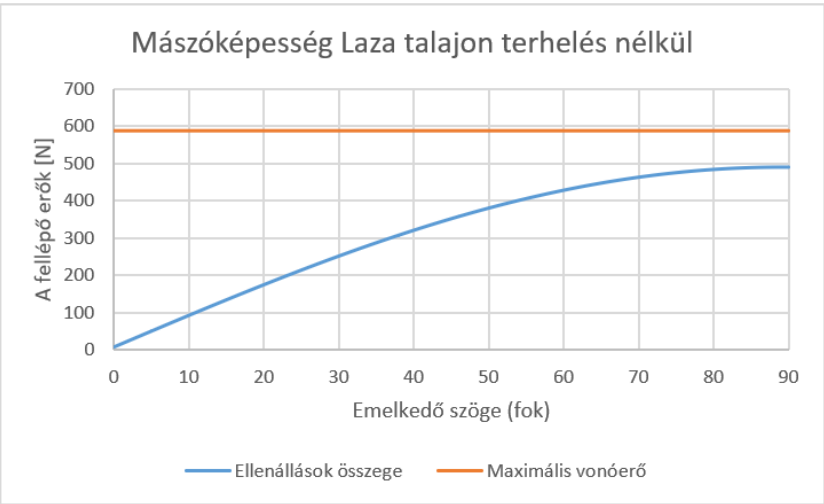
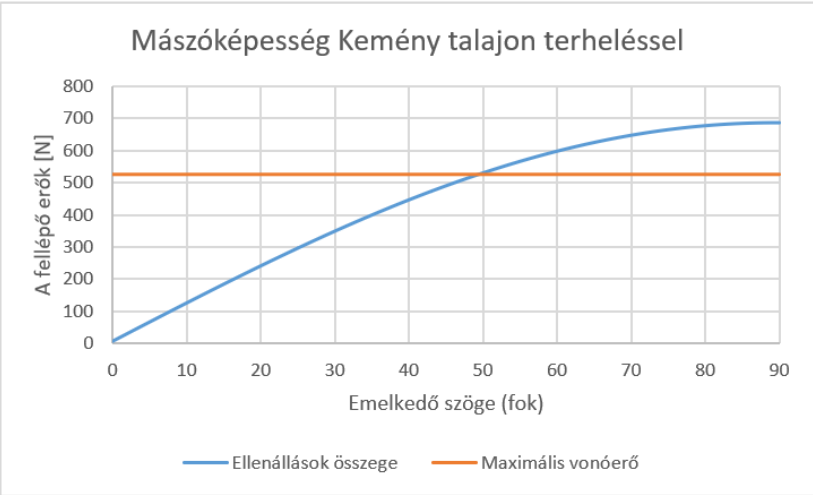


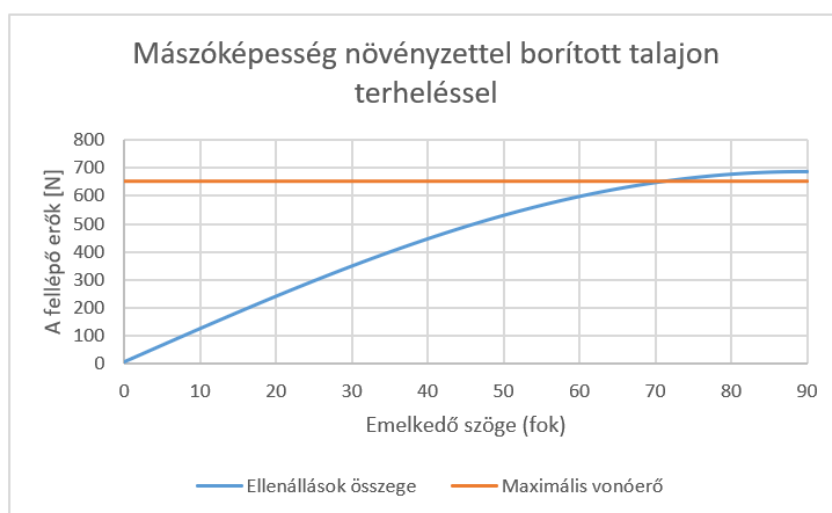
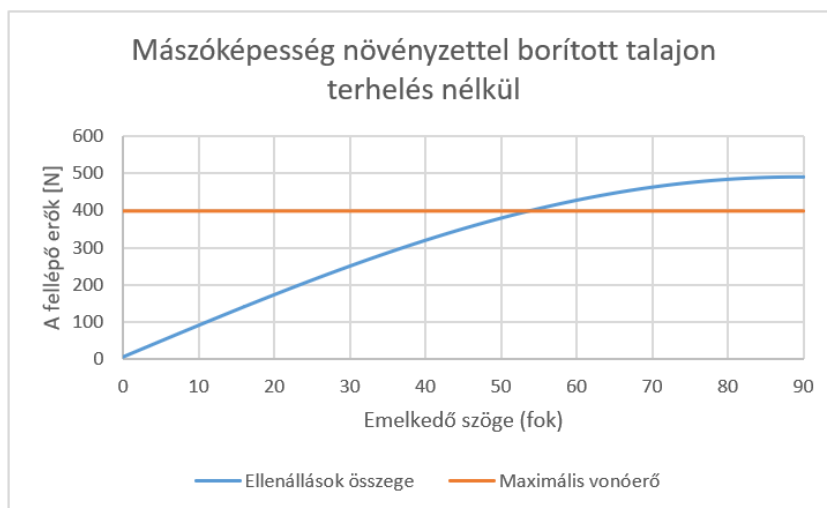
- Terheléses alacsony sebességi fokozat:



A mászási görbék:







NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Képiró Donát
A Hallgató Neptun kódja: WV4RRE
A dolgozat címe: Clearpath A200 Husky járműrobot energetikai és
dinamikai vizsgálata
A megjelenés éve: 2024
A konzulens intézetének neve: Műszaki intézet
A konzulens tanszékének a neve: Járműtechnika Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlant állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemitulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumba. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumban.

Kelt: 2024 év November hó 4. nap


Hallgató aláírása

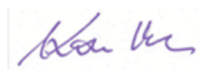
NYILATKOZAT

Képiró Donát (hallgató Neptun azonosítója: WV4RRE) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót¹ áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A záródolgozatot/szakdolgozatot/diplomadolgozatot/portfóliót a záróvizsgán történő védésre javaslom / nem javaslom².

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem³

Kelt: 2024. 11. 04.



belső konzulens

¹ A megfelelő dolgozattípus meghagyása mellett a többi típus törlendő.

² A megfelelő aláhúzendő.

³ A megfelelő aláhúzendő.