

DIPLOMADOLGOZAT

Fekete Nimród
Agrár-műszaki rendszermérnöki MSc
levelező tagozat

Gödöllő
2025



**Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus Gödöllő
Műszaki Intézet
Járműtechnika Tanszék
Agrár-műszaki Rendszermérnöki Szak**

A talaj színének, nedvességtartalmának és hordképességének kapcsolata

Belső konzulens:	Dr. Kiss Péter egyetemi tanár
Belső konzulens intézete/tanszéke:	Műszaki Intézet Járműtechnika Tanszék
Külső konzulens:	Dr. Kotroczy Krisztián egyetemi adjunktus, BME
Készítette:	Fekete Nimród BLCPU2

**Gödöllő
2025**

MŰSZAKI INTÉZET, AGRÁR-MŰSZAKI RENDSZERMÉRNÖK MESTERSZAK

DIPLOMADOLGOZAT

feladatlap

Fekete Nimród

részére

A szakdolgozat címe:

A talaj színének, nedvességtartalmának és hordképességének kapcsolata

Feladatkiírás:

Foglalja össze és értékelje a talajmechanikával és terepjárással kapcsolatos szakirodalmat. Tervezzon méréseket a talaj spektrális és mechanikai tulajdonságainak feltárására. Végezze el és értékelje ki a vizsgálatokat. A vizsgálati eredmények alapján keressen összefüggést a talaj színe, nedvességtartalma és teherbíró képessége között.

Közreműködő tanszék: Járműtechnika Tanszék

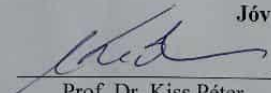
Külső konzulens: Dr. Kotroczy Krisztián, egyetemi adjunktus, BME

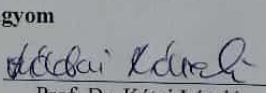
Belső konzulens: Dr. Kiss Péter, tanszékvezető, MATE, Műszaki Intézet, Járműtechnika Tanszék

Beadási határidő: 2025. 11. 04.

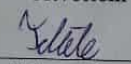
Gödöllő, 2024. november 15.

Jóváhagyom


Prof. Dr. Kiss Péter
tanszékvezető


Prof. Dr. Kátai László
szakfelelős

Átvettem


Fekete Nimród
hallgató

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

Gödöllő, 2025. 10. hó 30 nap


(külső konzulens)

Tartalom

1. Bevezetés, célkitűzés.....	5
2. A talajmechanika és a terepi járműmozgás szakirodalma	7
2.1 A talajmechanika	7
2.2 A talajfizikai jellemzők csoportosítása.....	8
2.3 A talajok osztályozása, minősítése	9
2.4 Alkalmazott talajmechanika	11
2.5 Terepi járműmozgás.....	12
2.6 A távérzékelés használata és lehetőségei az autonóm terepi járművek mozgásban	15
2.7 Szenzorfüziós megoldások a talajmechanikában.....	19
2.8 A talajnedvesség távérzékelésének fontossága a terepjárásban.....	25
3. Anyag és módszer	27
3.1 Talajminta vétel.....	27
3.2 A talajmechanikai tulajdonságok mérése.....	29
3.2 A vizsgálat eszközei.....	31
3.3 A kapott adatok kezelése és analízise.....	35
4. Eredmények és értékelésük	36
4.1 A talajmechanikai mérések eredményei	36
4.2 A spektrális mérések eredményei	43
5. Következtetések és javaslatok	45
6. Összefoglalás	48
7. Summary	49
8. Köszönetnyilvánítás	50
9. Irodalomjegyzék.....	51
10. Nyilatkozatok.....	54

1. Bevezetés, célkitűzés

A motoros terepjárművek a 20. század eleje óta széles körben elterjedtek a világ számos részén, különösen a mezőgazdaságban, az építőiparban, a terepi logisztikában és a hadászatban. A talajmechanikai kutatások az önjáró, pilóta nélküli járművek fejlesztésében évről évre növekvő mértékben nyújtanak lehetőséget az automatizálás alkalmazására a mezőgazdaságban. A mezőgazdasági termelés hatékonysága és fenntarthatósága érdekében az ilyen fejlesztések kulcsfontosságúak. A talajra gyakorolt hatás, a gépek terhelésének optimalizálása és az emberi munkaerő csökkentése mind olyan tényezők, amelyek indokolják a talaj mechanikai tulajdonságainak részletes vizsgálatát. Ezen kutatások eredményei közvetlen hatással lehetnek a jövő mezőgazdasági gépeinek tervezésére, amely a precíziós mezőgazdaság számára is elengedhetetlen.

A talaj színének, nedvességtartalmának és teherbíró képességének kapcsolata kulcsfontosságú információkat szolgáltathat az önjáró, pilóta nélküli terepi járművek fejlesztéséhez, amelyek a modern mezőgazdasági technológiák részeként jelentős előrelépést hozhatnak a munkafolyamatok hatékonyabbá- és fenntarthatóbbá tételében. A témaválasztásom célja, hogy a talajmechanikai ismereteket egyre inkább elterjedő, precíziós mezőgazdasági alkalmazásokban hasznosítható formában vizsgáljam.

A Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem agrár-műszaki rendszermérnök mesterszakos hallgatójaként a mezőgazdasági rendszerek technológiai fejlesztése és az automatizálás iránti érdeklődésem vezetett ez a téma felé. A mezőgazdasági gépek tervezése és működése szoros kapcsolatban áll a talaj állapotával, különösen az önjáró járművek esetében, amelyek a talaj különböző mechanikai jellemzőinek figyelembevételével kell, hogy működjenek.

Dolgozatom célja, kilenc, Magyarországon legjellemzőbb talajtextúra színének és nedvességtartalmának meghatározása, valamint a hordképességre vonatkozó adataik közti összefüggések vizsgálatának megtervezése és elvégzése. Alapfeltételezésem az, hogy a nedvességtartalom változását a talajok színének változásával össze lehet kapcsolni, ami pedig a hordképesség indikátora lehet. Ezt először a terepjárással és talajmechanikával kapcsolatos szakirodalmak összefoglalásával és értékelésével, majd a talajtípusok mechanikai és spektrális tulajdonságainak feltárásával fogom tenni. Az ezáltal kapott eredményeket rendszerbe foglalni és értékelni fogom.

A téma időszerűsége nemcsak a tudományos kutatás szempontjából van meg, hanem a globális élelmiszertermelés fenntarthatósága érdekében is. A változó éghajlati körülmények, a talajminőség romlása és az erőforrások csökkenése mind olyan kihívások, amelyekkel a mezőgazdaságnak szembe kell néznie. Az önjáró járművek és a precíziós mezőgazdaság alkalmazása ezekre a problémákra választ adhat, miközben a talaj mechanikai jellemzőinek pontos ismerete segíthet a megfelelő döntéshozatalban ezen autonóm tevékenység során.

2. A talajmechanika és a terepi járműmozgás

2.1 A talajmechanika

A talaj, műszaki, mérnöki vonatkozásban a földkéreg azon legfelsőbb rétege, amire a mérnöki létesítmények kerülnek vagy lépnek kölcsönhatásba. A talaj kihat a viselkedésükre, működésükre, van, hogy azoknak építő anyaga. Ez a legkülső takaróréteg egy laza üledék, ami a mállott részecskéiből áll a felaprózódott szilárd kőzeteknek. Minden gép és építmény ennek adja át hasznos terhét és összsúlyát, tartóssága és munkájának hatásfoka pedig nagyrészt attól függ, hogy sikerült-e kialakítani a szerkezet és a talaj között helyesen a kapcsolatot.

Az a tudomány, ami ehhez hozzásegít az a talajmechanika. Ez egy alkalmazott tudomány, vagyis a kémia, fizika, hidraulika és mechanika által nyújtott alapokon a talajok tulajdonságait vizsgálva, egyszerűsítő feltevéseket tesz. Ezek alapján elméleteket dolgoz ki, majd az azokból kinyert törvényeket az olyan mérnöki problémák megoldására használja, amik a talajjal kapcsolatosak. (Csobó, 1984)

A talajmechanika, a talajnak és azzal kapcsolatban álló testeknek (járművek vagy épületek) mechanikai és fizikai kölcsönhatásait, valamint a földből, talajból készült létesítmények (pl. gátak) tulajdonságait és viselkedését vizsgáló tudomány. (Vertse, 1957)

A talajmechanika eredetileg a talajok fizikai tulajdonságainak leírására geológiából, talajtanból átvett jellemzők alapján. Különböző kísérletek által lehet megismerni az anyag összetételét, állapotát jellemezni, valamint a külső hatásokkal szembeni viselkedését leírni. Mindezen talajfizikai jellemzők alapján hasonlóan sok szempontból lehet a talajokat osztályozni. Ilyen sok tulajdonság tisztázására még a legegyszerűbb, leghomogénebb talajoknál is sok kísérlet szükséges. (Szilvágyi, 1955)

A már említett tudományágak mellett a pedológiával is közeli rokonságban áll. Ezen tudományágak között nem csak hogy nehéz, de nem is nagyon kell éles határt húzni. Legfontosabb kiemelendő közös tulajdonságuk ezen tudományoknak a talajmechanikával, hogy nem az élő talaj biológiai tulajdonságaival foglalkozik, mivel az már a mezőgazdasági talajtan témakörébe esne. A talajmechanika a talajjal, mint holt, nyers anyaggal foglalkozik. Viszont sem a talajnak, sem a kőzetnek nem foglalkozik morfológiájával, vagy statigráfiájával, mivel az már az említett geológiához tartoznak kizárólag.

A talajmechanika a vele rokonságban lévő tudományokból sok közös tulajdonságot vizsgál, mint például a szemszerkezet vagy a konzisztencia-határok. Lassan egy évszázada a tudományág folyamatos fejlődésének köszönhetően egy talajmechanikai tulajdonságra akár több vizsgálati eljárást is sikerült kidolgozni. Így adott és megszabott körülmények között a megnevezett tulajdonságra egyértelmű értéket lehet kapni, meghatározni azt. (Jáky, 1933)

A talajmechanika tulajdonképpen két főbb részre osztható. Az első része, az úgy nevezett talajfizika. A második pedig az alkalmazott talajmechanika.

2.2 A talajfizikai jellemzők csoportosítása

Fizikai tulajdonságok alapján három csoportba oszthatók be a talajok. A talaj állapotától független tulajdonságok tartoznak az első csoportba. Ezek csak a talajt alkotó szemcsék eloszlásától, ásványi összetételétől és méretétől függenek. Ezeket a tulajdonságokat petrográfiai tulajdonságoknak is nevezik, és akár nem természetes állapotú, úgy nevezett zavart mintából is megállapíthatóak. Szubjektív elemek kizárásával, tárgyilagosan jellemezhetjük ezen számszerű értékek alapján. Erre a jellemzésre például akkor lehet szükség, ha az egyik helyszínről (legyen az mg.-i tevékenység helyszíne vagy akár egy építkezés) gyűjtött tapasztalatokat át szeretnénk vinni egy másikra. Ez csak akkor tehető meg, ha mindkét helyen a talaj kimutathatóan azonos jellemzőket birtokol. Erről való megbizonyosodásban segítenek a talajok fizikai jellemzői, amik segítségével meg tudjuk állapítani azonosságukat, különbözőségüket, valamint osztályozni azokat.

A második csoport a talajok állapotára vonatkozóan ad számszerű értékeket. Ezzel az első csoporttól egy lépéssel tovább haladva, a talajok bizonyos szempontok szerinti minősítésére ad lehetőséget. Ezek a szempontok lehetnek például a kötött talajoknál azok konzisztenciája, ami az anyagi összefüggésük mértéke; vagy a homoktalajoknál a homoktalajok tömörsége.

Ezt az első két csoport a talajt külső behatásokra való tekintet nélkül, önmagában vizsgálja. Ezen vizsgálatok eredményei meghatározott számadatokként jelentkeznek. Így ezeket együtt, statikus talajfizikai jellemzőknek lehet hívni. (Kézdi, 1952)

A statikus talajfizikai jellemzők lehetnek a talaj állapotától függetlenek, mint például a kémiai tulajdonságok, a szilárd részek fajsúlya, a szemcsék nagysága és eloszlása, valamint a

szerves alkotórészek mennyisége. Ezeket a talajok azonosítására és osztályozására lehet felhasználni.

Emellett a talaj statikus fizikai jellemzői tükrözhetik az állapotát, kifejezhetik a benne lévő levegőt és vizet számszerűsíthetően. Ezek lehetnek a víztartalom, a konzisztencia határok, a térfogatsúly, a relatív nedvesség vagy telítettség, relatív tömörség, hézagterfogat, valamint a hézagtenyező. (Csobó, 1984)

A harmadik csoportot dinamikus talajfizikai jellemzőknek nevezzük. Itt a talajokat az őket érő, különböző hatások következtében beálló változásaikban vizsgálja. Emellett, ezen minőségi és mennyiségi változások időtenyezőjét is figyelembe veszi ez a csoport. Ezek a külső hatások lehetnek a vízmozgás, amit gravitációs és kapilláris erők okoznak, valamint a hőmérséklet, kémiai hatások és az egyik legfontosabb, a terhelés, ami következtében deformáció jöhet létre a talajon. Ezen csoport vizsgálatainak eredményeit általában csak empirikus görbékkel, függvénykapcsolatokkal lehet megjeleníteni. (Kézdi, 1952)

Ezek a dinamikus fizikai tulajdonságai a talajnak lehetnek szilárdsági jellemzők, mint például a nyomó- és nyírószilárdság, amiket stabilitási problémák megoldásánál tudunk hasznosítani. Az alakváltozást jellemzők az összenyomhatóság, a roszakadás, duzzadás és a zsugorodás, amik az alakváltozás problémáihoz kapcsolódnak. A hidraulikai jellemzők a kapilláris emelkedés, az áteresztőképesség, valamint a vízmozgások a gravitációs erő, a kapillaritás, az elektromos áram és a hőmérséklet hatására. Ezek pedig a víztelenítés, fagyás, az áthaladó vízmennyiség és az összenyomódás időbeli lefolyásának mérésére szolgálnak. (Csobó, 1984)

Azok a talajfizikai tulajdonságok, amelyek a harmadik csoportba tartoznak, mérnöki munkák tervezéséhez és végzéséhez csakis akkor használhatóak fel közvetlenül, ha a talaj amire vonatkoznak, természetes állapotú. Ezért a harmadik csoportba tartozó tulajdonságok meghatározásához úgy nevezett magminták szükségesek, vagyis zavartalan állapotú talaj. (Kézdi, 1952)

2.3 A talajok osztályozása, minősítése

A talajok eltérő méretű és összetételű szilárd alkotóelemekből, gázokból és híg oldatok keverékéből állnak. Így a talaj inkább egy nyílt, mintsem zárt rendszer. Rendszerezésük nélkülözhetetlen, ha bonyolult összetételüket tanulmányozni kívánjuk. Ennek az osztályozásnak az a célja, hogy a természetben előforduló talajokat úgy csoportosítsuk, hogy

tulajdonságaik könnyebb felismerésével a velük kapcsolatos tevékenységeknél azokat a legmegfelelőbbben tudjuk hasznosítani. Egy ilyen talajosztályozási rendszerrel lehetőség nyílik arra, hogy egy mérnök a munkavégzés közben munkatársainak a talaj jellemzőire vonatkozó információkat adhasson át, részletes elemzések vagy fárasztó leírások nélkül. (Petrasovits, 1975)

Ennek érdekében gondosan vigyázni kell arra, hogy ezek a különböző osztályozások csakis a valóban közölni akart tapasztalatokon kívül mást ne is tartalmazzanak. Ezzel ellenben, az sem helyes, hogy egy, a talajon közlekedő gép, vagy azon nyugvó épület tervezésénél kizárólagosan a talajosztályozást vesszük alapul, hiszen bizonyos esetekben azon szerkezetekre olyan tényezők is hathatnak, amiket nem vettünk figyelembe.

A talajok heterogén keverékek, amelyek kialakulásukat befolyásoló természeti adottságok miatt rendkívül változatosak. Ahogy azt már említettem, osztályozásukhoz kevés, de jellegzetes tulajdonságot kell figyelembe venni, hogy hasonló szerkezetű és viselkedésű talajok kerüljenek egy csoportba. Ehhez nagyon fontos, hogy egyszerű és költséghatékony vizsgálatokat használjunk. (Kézdi, 1952)

A talajosztályozásnak azért kell logikus és könnyen alkalmazható rendszerre épülnie, hogy gyors és megbízható helyszíni azonosítást tegyen lehetővé. A laboratóriumi vizsgálatokhoz csak reprezentatív mintákat kell elemezni, így a terepi osztályozás hatékonyan mutathatja a talaj általános tulajdonságait és mérnöki alkalmazhatóságát. Ezáltal is minimalizálva az idő- és költségárfordítást. Természetesen léteznek előre megírt szabványok, amik alapján a legkönnyebb- egyszerűbb és olcsóbb osztályozni a talajokat. (Kádár, 2011)

Az osztályozási rendszerek változatossága a talajok különböző szempontból való tanulmányozásából adódik. Ez azt is jelenti, hogy a szempontoktól eltérő lehet mit tekintünk egyszerűnek, gyorsnak és gazdaságosnak. Lehet osztályozni a talajokat az állandóbb szemcsejellemzők alapján, vagy a, habár változékonyabb, de a talaj műszaki viselkedését jobban befolyásoló halmazjellemzők alapján. A szemcseméret alapján való határozás könnyebb, így elterjedtebb, viszont finomszemcsés talajok esetén nem mindig tükrözi a mérnöki szempontból lényeges fizikai tulajdonságokat.

Az osztályozásra felhasznált talajszemcse tulajdonságok lehetnek a szín, a szemeloszlás és graduáltság, vagy a szemcsék alakja. Az ásványi összetétel alapján is lehet osztályozni talajszemcse tulajdonság szempontjából, ha a báziscserélődési kapacitást figyeljük meg. Lehet még a szag, szervesanyag tartalom, vagy a talaj szilárdanyagainak fajsúlya alapján is.

Plaszticitás alapján is lehet, amit a folyási határ, plasztikus határ- és index, valamint a zsugorodási arány és határ jellemez, amik alapján még hasonló szemeloszlási görbék esetén is különböző konzisztenciahatárokat mérhetünk eltérő talajoknál. Emellett az osztályozás történhet a kémiai összetétel, pH érték, dilatáció és a keménység alapján is. (Csobó, 1984)

A talajhalmaz tulajdonságok alapján való osztályozás történhet a szerkezet, a természetes víztartalom, a hézagtérfogat vagy porozitás alapján is. Történhet még a sűrűség vagy térfogatsúly, a vízáteresztőképesség és kapillaritás, valamint az egyirányú nyomószilárdság által jellemezhető konzisztencia alapján. Emellett a felhasznált talajhalmaz tulajdonságok lehetnek az érzékenység és tixotrópia vagy a száraz térfogatsúly és optimális víztartalom. A szilárdság alapján való osztályozáshoz vizsgálni kell a kohéziót, a belső súrlódási szöget, a CBR (kaliforniai teherbíróképességi tényező) értéket és a földellenállási modulust. Ha a penetrációval szembeni ellenállás alapján akarjuk osztályozni a talajt, akkor a standard penetrációs értéket kell kiszámolni. A rugalmasság és összenyomhatóság alapján történő osztályozáshoz az összenyomódási vagy duzzadási mutatót kell kikalkulálnunk. (Petrasovits, 1975)

2.4 Alkalmazott talajmechanika

Az alkalmazott talajmechanika a leegyszerűsített talajfizikai tulajdonságok alapján kidolgozott talaj-munkagép kölcsönhatási elméleteket felhasználva oldja meg a talajjal kapcsolatos mérnöki feladatokat. Ezek a feladatok a feszültségeloszlás, az abból adódó süllyedés, rézsűk állékonyságának, földnyomásnak, földmunkáknak és a vízzárás problémáival foglalkoznak. Ezek viszont csak akkor oldhatók meg, ha a talajt kellőképpen feltárva mintát vettünk és azt laboratóriumi vizsgálatoknak vetettük alá. (Csobó, 1984)

Azok az iparágak, amelyek terepen közlekedő gépek gyártásával és üzemeltetésével foglalkoznak, több milliárd dolláros üzletágak. Ha figyelembe vesszük a mezőgazdaságban használt traktorok és talajművelő eszközök számát, az építőiparban alkalmazott földmunkagépek mennyiségét, a terepszállítási iparágban használt közúton kívüli teherautók számát, valamint a katonai logisztikai és harci járművek mennyiségét, akkor könnyen belátható, milyen széles körű alkalmazási lehetőségei vannak a talajmechanikának.

A talajmechanika, rendszerelemzési megközelítéssel párosítva, jelentős szerepet játszhat a terepen közlekedő gépek fejlesztésében és értékelésében egy adott feladatra és környezetre vonatkozóan. A rendszerelemzés egy olyan módszertan, amely kvantitatív és

szisztematikus módon értékeli a világosan meghatározott kérdéseket és döntési alternatívákat a döntéshozók számára. A talajmechanikai ismeretek közvetlenül vagy közvetve alkalmazhatók a következők fejlesztésére, értékelésére vagy kiválasztására:

- járműkonceptiók és konfigurációk, formájuk, méretük, tömegük és teljesítményük szerint definiálva;
- a jármű futóműve (vagy a talajjal érintkező elemei);
- a jármű kormányzási rendszere;
- a jármű felfüggesztési rendszere;
- a jármű hajtáslánca és erőátviteli rendszere;
- a jármű teljesítménye, kezelhetősége és menetkényelme. (Wong, 2010)

A talajmechanika, mint alkalmazott tudomány, alapvető szerepet játszik a mérnöki létesítmények és gépek biztonságos és hatékony működésében. A szakirodalom részletesen bemutatja a talaj, mint nyers, szilárd-folyékony-gáznemű rendszer vizsgálatának különböző aspektusait: statikus és dinamikus fizikai jellemzőit, osztályozási lehetőségeit, valamint ezek mérnöki felhasználását. Különösen értékesnek tartom a háromlépcsős megközelítést (állapottól független, állapotra jellemző, valamint dinamikus jellemzők), mivel ez lehetőséget ad a talaj komplex viselkedésének megértésére és előrejelzésére. A talajok osztályozásának célirányossága és egyszerűsítése szintén kulcsfontosságú az építési és mezőgazdasági gyakorlatban, főleg, ha a gyors helyszíni döntéshozatalról van szó. Összességében a talajmechanika nemcsak alapot biztosít a földdel kapcsolatos műszaki feladatokhoz, hanem közös nyelvet is teremt a különböző mérnöki területek között. Véleményem szerint ez a tudományág elengedhetetlen része bármely olyan projektnek, amely kölcsönhatásba lép a természeti környezettel, és az egyik legfontosabb híd a természetes anyag és a mérnöki struktúra között.

2.5 Terepi járműmozgás

A talajmechanika egyik fő célja a jármű teljesítményének vizsgálata a terepkörnyezet függvényében. Ennek része a talaj viselkedésének modellezése, a talajtulajdonságok mérése, a jármű teljesítményét befolyásoló paraméterek meghatározása, valamint a jármű és a talaj kölcsönhatásának elemzése. A végső cél, hogy olyan tudásbázist hozzunk létre, amely segíti a terepjárművek tervezésének fejlesztését. (Wong, 2010)

A kerék–pálya kapcsolat négy modellre osztható: az első merev kerék és merev pálya, a második merev kerék és deformálódó pálya, a harmadik deformálódó kerék és merev pálya, és végül a deformálódó kerék és deformálódó pálya. A gördülési ellenállás mértéke ezekben a modellekben változó, a legnagyobb a negyedik esetben. A lánc talpas járművek esetén hasonló kapcsolat figyelhető meg, kialakításuktól függően lehetnek merevek vagy rugózó elemekkel ellátottak. A terepjáráseleméleti kutatások eredményeit különböző területeken alkalmazzák, például mezőgazdasági, erdőgazdasági, katonai és bányászati járműveknél. A mezőgazdasági járműveknél kiemelt szempont a talajkárosítás csökkentése is. (Kiss et al, 2021)

A terepen a jármű mozgását három fő tényező befolyásolja: a terep, a jármű és a vezető. A terep tulajdonságai – például a lejtőszög, akadályok, növényzet és talajmechanikai jellemzők – jelentősen hatnak a jármű sebességére. (Kiss et al, 2022b)

Mivel a terepi járművek és a talaj közti kölcsönhatás bonyolult és nehezen modellezhető, empirikus módszereket dolgoztak ki, amelyek terepi tesztekre és egyszerű mérésekre épülnek. Az eredményeket tapasztalati úton kapcsolják össze, például a „kúpos index” alapján, amelyet eredetileg katonai célra fejlesztettek ki. Bár ezek a módszerek hasznosak lehetnek ismert körülmények között és hasonló járművek esetén, nem megbízhatóak új járműtervek vagy ismeretlen terepek vizsgálatára, különösen, ha sok változót kell figyelembe venni. Ezért más, általánosabb modellezési megközelítések is szükségessé váltak.

A számítógépes technológia fejlődésével elterjedtek a számításgépes véges elem (FEM) és diszkrét elem (DEM) módszerek a jármű–talaj kölcsönhatás vizsgálatában. Ezek lehetővé teszik bizonyos mechanikai jelenségek részletes elemzését, főként egyszerűbb abroncsok vagy talajművelő eszközök esetén, és eredményeik gyakran összhangban vannak a kísérleti adatokkal. Összetettebb rendszerek, például lánc talpas járművek esetén azonban a sok befolyásoló tényező (pl. felfüggesztés, kerékelrendezés, láncfeszítés) miatt a modellezés erősen leegyszerűsített formát igényel, ami pontatlanná teszi az előrejelzést. Emellett a FEM feltételezi, hogy a talaj folytonos közeg, így nem alkalmas nagy, szakaszos deformációk szimulálására, amelyek terepen gyakoriak.

Az empirikus és számítógépes módszerek korlátai miatt matematikai modelleket fejlesztettek ki terepjárók paraméteres elemzésére. Később számítógépesen támogatott módszerek jelentek meg, amelyek figyelembe veszik a jármű összes fontos tervezési jellemzőjét és a terep mechanikai tulajdonságait (pl. nyomás–süllyedés, nyírás, ismételt terhelésre adott válasz). Ezeket terepi adatok is alátámasztják. Külön modellek léteznek lánc talpas (NTVPM,

RTVPM) és kerekes (NWVPM) járművekre. A módszerek hasznosak a tervezés optimalizálásában, különböző járművek összehasonlításában és új fejlesztések támogatásában – világszerte használják ipari és állami szervezetek is. A talajmechanika mára nemcsak földi járművek, hanem holdi és marsjárók fejlesztésében is fontos szerepet kapott. (Wong, 2010)

A terepen a jármű lejtőmászó képessége kiemelt tervezési szempont, mivel itt nincs a közutakhoz hasonló lejtéskorlátozás. Emelkedőn a hátsó, lejtőn pedig a mellső kerekek terhelődnek. A lejtővel párhuzamos erők befolyásolják a stabilitást, és különösen veszélyesek kanyarodáskor, mert összeadódhatnak. A jármű stabil marad, amíg az eredő erő hatásvonala a felfekvési felületen belül van. Ha ez kívülre kerül, a jármű felborulhat, ha a tapadás nem elegendő az oldalirányú erő ellensúlyozására.

A 0,25 m-nél nagyobb egyenetlenségeket makroakadályoknak nevezzük, mint például sziklák, árkok és kidőlt fák. A jármű geometriája, például a mellső és hátsó kinyúlás vagy a szabad hasmagasság, meghatározza, hogy mekkora akadályokat képes leküzdeni. A mikroakadályok, vagyis a terepprofil a talajfelszín érdekességét jelöli, amely lehet deformálatlan vagy a jármű áthaladása után deformált. A terepprofil befolyásolja a jármű lengéseit és stabilitását, szélsőséges esetben boruláshoz vezethet. Mivel a lengések a vezetőre is hatnak, a terepen megengedett maximális sebességet az ő tűrésképesége korlátozza. (Kiss et al, 2021)

A terepjáró járművek kétféle terhelést okoznak a talajon: nyírási igénybevételt, amelyet a hajtott kerekek csúszása okoz a vonóerő kifejtésekor, és normál igénybevételt, amely a jármű súlyából adódó talajbenyomódás. Ennek megfelelően a terepjáráselmélet a talaj teherbíró képességét és nyírószilárdságát vizsgálja. (Kiss et al, 2022a)

A terepi járművek teljesítménye azt jelenti, hogy mennyire képesek leküzdeni a mozgási ellenállást, vontatni, emelkedőn haladni vagy gyorsulni. A teljesítmény értékelése a jármű típusától és felhasználási céljától függ. Mezőgazdasági járműveknél (pl. traktorok) a vontatási képesség a lényeg, amit például a vonóerő–tömeg arány, vonóteljesítmény vagy hatásfok mutat. Szállítójárműveknél (pl. bányászati teherautók) a szállítási sebesség és hatékonyság fontos, míg katonai járműveknél a két pont közti maximális haladási sebesség számít fő szempontnak. (Wong, 2010)

Kiss et al. (2022c) által folytatott vizsgálatok alapján a jármű terepen való mozgása során a következő jelenségek figyelhetők meg: A kerekek besüllyednek, keréknyom és talajdeformáció alakul ki. A hajtott kerekek csúsztató hatást fejtenek ki vízszintes irányban. A talajnyomás és nyírás nemcsak a felszínen, hanem mélyebb rétegekben is hat. A talaj teherbíró

képessége korlátozza a kerékterhelést; ha ezt meghaladja, a jármű elsüllyedhet. A talaj nyírószilárdsága határozza meg a maximális kerületi erőt; túllépés esetén a kerekek kipörögnek, akadályozva a haladást. A nedvességtartalom befolyásolja a talaj mechanikai tulajdonságait: szemcsés talajoknál növelheti a tapadást, finomszemcsés talajoknál csökkentheti a nyírószilárdságot, növelve a csúszásveszélyt. A mikroakadályok lengéseket idéznek elő, amelyek módosítják a jármű dinamikáját, növelve a balesetveszélyt. A talaj süppedékenysége és inhomogenitása szintén baleseti tényező lehet. A nedves gyeptakaró fokozza a csúszásveszélyt.

Mára, már számos módszert dolgoztak ki a terepi járművek mozgékonyságának vizsgálatára, az empirikus megközelítésektől az analitikus modellekig. A választott módszert több tényező befolyásolja:

Célok szerinti megkülönböztetés: más és más módszerre van szüksége egy fejlesztőmérnöknek a jármű optimalizálásához, mint például egy beszerzési vezetőnek a járművek összehasonlításához, vagy egy kezelőnek a géppel való munkavégzéshez. A cél meghatározza a szükséges részletességet és pontosságot.

Környezeti, gazdasági és működési korlátok: A talaj mechanikai tulajdonságainak vizsgálatakor – például távoli területeken, a tengerfenéken vagy más bolygókon – a környezeti és gazdasági tényezők döntően befolyásolhatják a módszerválasztást. (Wong, 2010)

2.6 A távérzékelés használata és lehetőségei az autonóm terepi járművek mozgásban

A terepi járművek mozgásának vizsgálata komplex és többtényezős problémakört ölel fel, amelyben a talajmechanikai ismeretek kiemelt szerepet játszanak. A szakirodalom alapján világossá válik, hogy a jármű–talaj kölcsönhatás modellezése nemcsak mechanikai, hanem gyakorlati és környezeti szempontokat is figyelembe vesz. A különböző modellezési megközelítések – az empirikus módszerektől kezdve a számítógépes szimulációkon át a fejlett paraméteres modellekig – lehetőséget adnak a járművek teljesítményének elemzésére különféle terepviszonyok között. Ugyanakkor a módszerek korlátai – például az erősen leegyszerűsített feltételezések, vagy a talaj inhomogenitása – komoly kihívást jelentenek, főként új járműtervek esetén. Különösen érdekes, hogy az ehhez kapcsolódó kutatások a klasszikus mezőgazdasági és katonai alkalmazásokon túl már a bolygófelszíni járművek tervezésében is meghatározóak. A terepi járműmozgás elméletének gyakorlati jelentőségét jól tükrözi, hogy a teljesítmény

értelmezése is alkalmazásfüggő: más szempontok dominálnak egy traktor, mint egy katonai szállítójármű esetén. Az utóbbi időben külön figyelmet fordítanak a talajkárosítás mérséklésének és a jármű stabilitásának kérdésére is, így ez a forrás kiváló alapot nyújt a témám elméleti háttéréhez. A terepen mozgó autonóm járművek működésének alapja a korszerű érzékelőtechnológiák alkalmazása, amelyek lehetővé teszik a környezet pontos észlelését és a biztonságos navigációt heterogén talajviszonyok között. A leggyakrabban alkalmazott szenzorok közé tartoznak a LiDAR rendszerek, a kamerák, a radarok és az ultrahangos érzékelők, amelyek eltérő erősségeik és korlátjaik miatt jellemzően kombinált formában, szenzorfüziós megközelítésben kerülnek felhasználásra. Az ilyen integrált rendszerek képesek megbízható információt szolgáltatni a felszín szerkezetéről és állapotáról, ami közvetlenül hozzájárul a talaj mechanikai tulajdonságainak és művelhetőségének vizsgálatához. A környezetérzékelésben rejlő lehetőségek különösen fontosak a talajnedvesség és a teherbírás összefüggéseinek értékelésekor, mivel az autonóm platformok által gyűjtött adatok a precíziós mezőgazdaságban és a talajmechanikai kutatásokban egyaránt felhasználhatók.

1. LiDAR (Light Detection and Ranging)

Működés: lézersugarakat bocsát ki, majd a visszaverődési idő alapján háromdimenziós pontfelhőt készít a környezetről.

Előny: nagyon pontos térbeli információ, nagy felbontás.

Hátrány: érzékeny porra, esőre, ködre; drága technológia.

2. Kamerák (optikai érzékelők)

Működés: látható vagy infravörös tartományban készít képeket.

Előny: gazdag vizuális információ (színek, textúrák, jelzések).

Hátrány: fényviszonyokra erősen érzékeny, rossz látási körülmények között bizonytalan.

3. Radar (Radio Detection and Ranging)

Működés: rádióhullámok segítségével méri az objektumok távolságát és mozgását.

Előny: robusztus esőben, ködben, poros környezetben is.

Hátrány: alacsonyabb felbontás, nehezebb pontos térképezés.

4. Ultrahangos szenzorok

Működés: hanghullámokat bocsát ki, majd a visszaverődés idejéből határozza meg a távolságot.

Előny: egyszerű, olcsó, jól működik kis távolságon.

Hátrány: hatótávolsága korlátozott, pontossága gyenge nagyobb távolságban.

5. GPS és RTK GPS

Működés: műholdas helymeghatározás, az RTK (Real-Time Kinematic) korrekcióval centiméter pontosságot is elér.

Előny: pontos pozíciómeghatározás terepen.

Hátrány: elvesztés fák, épületek, domborzat miatt.

6. IMU (Inertial Measurement Unit)

Működés: gyorsulásmérő, giroszkóp és gyakran magnetométer kombinációja, amely méri a jármű gyorsulását és dőlésszögét.

Előny: folyamatos mozgáskövetés GPS-jel nélkül is.

Hátrány: hosszú távon pontatlan lehet a hibák felhalmozódása miatt (drift).

(Balestrieri, et al, 2021)

Az autonóm terepi járművek működésének egyik legkritikusabb eleme a talajmechanikai viszonyok pontos érzékelése és feldolgozása, amely közvetlenül meghatározza a járművek mozgásképeségét és stabilitását. A fejlesztések középpontjában a szenzortechnológia áll, amely lehetővé teszi a környezet részletes feltérképezését és a jármű állapotának nyomon követését. A LiDAR- és radarrendszerek például a terep egyenetlenségeinek és akadályainak nagy pontosságú azonosítását szolgálják, míg a kameraalapú megoldások kiegészítő információkat nyújtanak a talajfelszínről és a mozgásirányokról. A proprioceptív érzékelők, mint az IMU vagy a GNSS, a jármű helyzetének és dinamikájának meghatározását biztosítják, ami különösen fontos változó talajviszonyok mellett. A különböző érzékelők kombinált alkalmazása, azaz a szenzorfüzió, elengedhetetlen a terepi autonóm rendszerek megbízható működéséhez, mivel így növelhető a környezeti és talajmechanikai adatok pontossága, és csökkenthető a hibás érzékelésből eredő kockázat (Liu et al., 2020a).

Az autonóm járművek érzékelőrendszerei nemcsak a környezet észlelésében, hanem a járművek döntéshozatali folyamataiban is alapvető szerepet töltenek be. A proprioceptív érzékelők – például az IMU vagy a GNSS – a jármű belső állapotáról szolgáltatnak adatokat, míg az exteroceptív szenzorok a külső környezet feltérképezését teszik lehetővé. Bár a LiDAR és a radar működési elveit a szakirodalomban már széles körben tárgyalták, a kutatások kiemelik, hogy önmagukban egyik technológia sem képes minden helyzetben megbízható és pontos adatokat biztosítani. Emiatt egyre hangsúlyosabb a különböző szenzorok kombinált alkalmazása, amely lehetővé teszi a környezeti adatok megbízhatóbb feldolgozását, a változó időjárási és talajmechanikai körülményekhez való jobb alkalmazkodást, valamint a komplex akadályok azonosítását. A szenzorfüzió így kulcsfontosságú elemmé vált az autonóm rendszerek fejlesztésében, mivel képes egyesíteni a különböző érzékelők eltérő erősségeit, és csökkenteni az egyedi korlátokból fakadó bizonytalanságot (Ignatious et al., 2022).

Az autonóm terepi járművek biztonságos és megbízható navigációjának egyik kulcskérdése a járható felületek pontos felismerése, valamint a pozitív és negatív akadályok detektálása. Az „on-road” rendszerekkel ellentétben az „off-road” környezet strukturálatlansága miatt a talajmechanikai tényezők és a változó környezeti körülmények sokkal nagyobb kihívást jelentenek. A LiDAR- és kameraalapú érzékelők kombinált alkalmazása lehetőséget nyújt a terep és a talajfelszín pontosabb leképezésére, ugyanakkor a vegetáció, a nedves talaj és a fényviszonyok jelentősen befolyásolják az észlelés megbízhatóságát. A pozitív akadályok – például sziklák vagy kiemelkedő tereptárgyak – felismerése jellemzően kevésbé problémás, míg a negatív akadályok, mint a gödrök vagy árkok, az adathiányból fakadóan komoly kihívást jelentenek. A kutatások rámutatnak, hogy a szenzorfüziós megközelítések és a mélytanulási módszerek integrálása javíthatja a környezetérzékelést, ezáltal közvetve a járművek terepi mozgékonyágát és a talaj mechanikai állapotához való alkalmazkodóképességét is (Islam et al., 2022).

A terepbejárhatósági elemzés (Terrain Traversability Analysis, TTA) kulcsszerepet játszik az autonóm terepi járművek biztonságos és hatékony navigációjában heterogén, strukturálatlan környezetben. A legújabb szakirodalom három fő megközelítést különböztet meg: megjelenés-alapú, geometriai és hibrid módszerek, melyek kiegészülnek a mélytanuláson és megerősítéses tanuláson alapuló „end-to-end” megoldásokkal. A kutatások szerint a szenzorfüziós megközelítések – a LiDAR, radar, kamera és IMU adatok kombinált felhasználásával – megbízhatóbb környezetérzékelést és költségalapú útvonaltervezést biztosítanak. Ez különösen fontos a változó tapadási viszonyok és a terep bizonytalansága miatt,

amelyek jelentős hatással vannak a járművek mozgékonyására és energiafelhasználására. A vizsgálatok arra mutatnak rá, hogy a vegyes (vizuális és geometriai) jellemzőket egyaránt figyelembe vevő és gépi tanulással támogatott módszerek ígéretes irányt jelentenek a precíziós mezőgazdaság, a bányászat és a katonai logisztika autonóm rendszereinek fejlesztésében (Beycimen et al., 2023).

2.7 Szenzorfüziós megoldások a talajmechanikában

Az autonóm járművek terepi alkalmazása során kiemelt jelentőségű a talajmechanikai és környezeti tényezők hatásának figyelembevétele. A sűrű növényzet, a talaj nedvességtartalma és teherbírása, valamint a szezonális változások – például a tavaszi csapadék miatti megnövekedett gördülési ellenállás – mind befolyásolják a járművek tapadását, manőverezőképességét és energiagazdálkodását. E tényezők hatással vannak az érzékelő rendszerek teljesítményére is, mivel a vegetáció árnyékhathatásai és a talajfelszín változó stabilitása megnehezíthetik az akadályok pontos felismerését és a járható útvonal meghatározását. A szakirodalom szerint a szenzorfüziós megoldások és a gépi tanuláson alapuló adatfeldolgozás alkalmazása javíthatja a környezetérzékelés megbízhatóságát, különösen heterogén terepi viszonyok között (Nowakowski & Kurylo, 2023). Az ilyen integrált megközelítések lehetővé teszik, hogy az autonóm platformok pontosabb képet alkossanak a talaj mechanikai állapotáról és a környezeti akadályokról, ami elengedhetetlen a precíziós mezőgazdaságban és a katonai-logisztikai műveletekben egyaránt.

A terepi autonóm járművek mozgékonyását jelentősen befolyásolja a sár és a nedves talajfelületek jelenléte, mivel ezek csökkentik a tapadást és növelik az elakadási kockázatot. A kutatások szerint a passzív érzékelők – például a multispektrális kamerák és polarimetrikus szenzorok – hatékonyan használhatók a nedves, sáros területek előzetes detektálására, mivel képesek különbséget tenni a talaj nedvességi állapotai között anélkül, hogy aktív megvilágítást igényelnének. A multispektrális adatok lehetővé teszik a felület reflektancia-jellemzőinek kiértékelését, míg a polarimetrikus mérések információt nyújtanak a felület textúrájáról és vízfilm jelenlétéről. Ezen érzékelési módszerek kombinációja lehetőséget teremt a járművek előrejelző mozgástervezésének javítására, csökkentve az elakadások számát és optimalizálva az energiafelhasználást. Az ilyen technológiák integrálása a szenzorfüziós rendszerekbe hozzájárulhat a biztonságosabb és hatékonyabb autonóm navigációhoz nedves, sáros terepeken is (Rankin et al., 2010).

A LiDAR-alapú akadályészlelés hatékonyságát nagymértékben befolyásolja a pontfelhők zajtartalma és a felszín változó visszaverődési tulajdonságai, amelyek torzíthatják a terepmodell pontosságát. A valós idejű feldolgozás érdekében elengedhetetlen a zajsűrés, a földpontok elkülönítése és a klaszterezés alkalmazása, amelyek javítják a terep geometriájának rekonstrukcióját és csökkentik a számítási terhelést. A környezetérzékelés megbízhatósága tovább növelhető a szenzorfüzióval, amikor a LiDAR adatokat kameraképekkel és inerciális mérőegységek jeleivel kombinálják. Ez a megközelítés különösen hatékony a heterogén, strukturálatlan terepeken, mivel lehetővé teszi az akadályok pontosabb azonosítását és a dinamikus változó környezethez való adaptív alkalmazkodást, ami kulcsfontosságú az autonóm mezőgazdasági járművek és terepi robotok biztonságos navigációjában (Park et al., 2024).

Az autonóm robotikai platformok a precíziós mezőgazdaságban kulcsszerepet töltenek be, mivel lehetővé teszik a talajparaméterek helyszíni, automatizált mérését és az adatok valós idejű gyűjtését, amely alapot ad a gazdálkodás optimalizálásához és a hozamok növeléséhez. Egy, az AgriOne névre keresztelt földi robotplatform célja a talaj nedvességtartalmának pontos meghatározása heterogén terepi körülmények között. A rendszer alapját egy Husky A200 típusú autonóm jármű képezi, amelyre egy volumetrikus víztartalom-szenzort (TEROS 12) szereltek, RTK (real-time kinematic) GPS-szel és fedélzeti számítógéppel kiegészítve. A mérőegységet egy lineáris aktuátor mozgatja, amely lehetővé teszi a talajba való közvetlen behatolást, míg a fejlesztett „surface aware” adatgyűjtő keretrendszer biztosítja a mérések érvényességét azáltal, hogy kiszűri a hibás adatpontokat. Ez a megközelítés különösen értékes a talajmechanikai vizsgálatok szempontjából, mivel megbízhatóbb, térben differenciált nedvesség adatokat szolgáltat, amelyek a talaj hordképességének és mechanikai tulajdonságainak értékeléséhez is felhasználhatók. (Tsimpidi et al., 2025)

A mélytanulás-alapú megközelítések az autonóm járművekben nemcsak a környezetészlelés, hanem a döntéshozatal és az útvonaltervezés szempontjából is meghatározóvá váltak. A korábbi moduláris rendszerekben a percepció, a tervezés és a mozgásirányítás különálló blokkokként működtek, míg az újabb kutatások egyre inkább az end-to-end architektúrák felé mozdulnak el, ahol az érzékelői adatok közvetlenül vezérlési parancsokká alakulnak. A konvolúciós (valószínűség számításban használt művelet) és rekurzív (önmagára hivatkozó rendszer) neurális hálózatok mellett a megerősítéses tanulás adja az egyik legígéretesebb irányt, mivel lehetővé teszi a jármű számára, hogy szimulációs környezetben tapasztalat alapján fejlessze vezetési stratégiáit. Ugyanakkor a valós közlekedési helyzetek

komplexitása továbbra is kihívás elé állítja ezeket a rendszereket, különösen a biztonság és a generalizálhatóság terén. A tanulmány hangsúlyozza, hogy a jövőbeli fejlesztéseknek nemcsak a tanulási architektúrák hatékonyságára, hanem a megbízhatóságra, a tanítóadatok sokféleségére és a hardveres követelmények optimalizálására is figyelmet kell fordítani (Grigorescu et al., 2020).

A nagyméretű nyelvi modellek (LLM-ek) és a multimodális érzékelési rendszerek integrációja új lehetőségeket nyit az autonóm járművek valós idejű döntéstámogatásában. A legújabb kutatások szerint a nyelvi modellek képesek összetett szenzoradatokat – például LiDAR-pontfelhőket, képeket és GPS-információkat – egységes reprezentációvá alakítani, amelyet magasabb szintű tervezési és navigációs feladatokhoz lehet felhasználni. Ez a megközelítés lehetővé teszi, hogy a jármű ne csak észlelje a környezetét, hanem kontextusfüggő következtetéseket is levonjon, például az útvonal megválasztásakor figyelembe vegye a terep nehézségi fokát vagy a jármű energiatűzét. Az LLM-ek használata továbbá javíthatja a heterogén szenzoradatok feldolgozását és a hibás, hiányos információk kezelését, ami kritikus tényező a strukturálatlan, dinamikusan változó környezetben végzett autonóm navigáció során (Deng et al., 2023).

Az autonóm járművek működésében a környezetészlelés, az útvonaltervezés és a mozgásirányítás mellett egyre hangsúlyosabbá vált a kiberbiztonsági tényezők kezelése, mivel a hálózatba kapcsolt rendszerek új támadási felületeket nyitnak. A szakirodalom szerint a különféle érzékelők – amelyekről korábban már részletesen esett szó – csak akkor képesek valóban megbízható adatokat biztosítani, ha azokat robusztus feldolgozó algoritmusok egészítik ki. Ebben kulcsszerepet játszanak a mélytanuláson alapuló eljárások, mint például a YOLO vagy az RCNN, amelyek lehetővé teszik a gyalogosok, akadályok és forgalmi jelek gyors és pontos felismerését. A szimultán lokalizáció és térképezés (SLAM) alkalmazása szintén kiemelt fontosságú, mivel elősegíti a járművek önálló helymeghatározását és a dinamikusan változó környezethez való alkalmazkodását. A mozgásirányítás területén pedig a prediktív vezérlési módszerek és a megerősítéses tanulási algoritmusok kínálnak ígéretes lehetőségeket a biztonságos manőverezéshez. Ugyanakkor a tanulmány rámutat arra is, hogy a fogyasztói bizalom hiánya és az autonóm rendszerek elfogadottsága továbbra is komoly akadályt jelent, így a technikai fejlesztéseket társadalmi szempontú vizsgálatokkal kell kiegészíteni (Parekh et al., 2022).

A multimodális érzékelés a legújabb kutatások szerint kulcsszerepet játszik az autonóm járművek környezetészlelésében, különösen a tárgyfelismerés és a szemantikus szegmentálás

pontosságának javításában. A különféle szenzorok – amelyek közül a korábbi szakirodalom már részletesen tárgyalta a legfontosabbakat – együttes alkalmazása azért vált meghatározóvá, mert önmagukban egyik technológia sem képes minden körülmény között megbízható eredményt nyújtani. A kutatások középpontjában az áll, hogy a fúzió mely szintjén célszerű az adatokat integrálni: az adatszintű, jellemzőszintű és döntési szintű megközelítések egyaránt eltérő előnyöket és kihívásokat hordoznak. A szerzők kiemelik, hogy bár a kamera és a LiDAR kombinációja bizonyult eddig a leghatékonyabbnak, a radaradatok integrálása még kevésbé feltárt lehetőségeket rejt. A tanulmány hangsúlyozza továbbá a nyílt forrású adatkészletek korlátait, hiszen ezek gyakran nem fedik le kellő változatossággal a valós környezeti viszonyokat, ami nehezíti a mélyhálózatok általánosíthatóságát. A jövőbeli kutatások szempontjából a robusztus fúziós architektúrák és a bizonytalanságkezelés megoldása jelenthet előrelépést, kiegészítve olyan módszerekkel, amelyek a hiányos adatok pótlására vagy a szenzorhibák kompenzálására is alkalmasak (Feng et al., 2020).

A talajnedvesség becslésére alkalmazott hiperspektrális mérések a látható és az infravörös közeli tartományban a legújabb vizsgálatok szerint ígéretes lehetőségeket kínálnak, ugyanakkor jelentős korlátokat is hordoznak a légköri hatások és a spektrális zaj miatt. A hagyományosan használt indexek, mint az NSMI (normalized soil moisture index) és a WISOIL (water index soil), érzékenyek a vízgőz elnyelési sávjaira, ami pontatlanságot eredményezhet terepi körülmények között. A kutatás új, spektrális viselkedésen alapuló módszereket, köztük az NINSOL (Normalized Index of Nswir domain for Smc estimation from Linear correlation) és NINSON (Normalized Index of Nswir domain for Smc estimation from Non linear correlation) indexeket, valamint az ISER (Inverse Soil semi-Empirical Reflectance) modellt mutatja be, amelyek célja a légköri bizonytalanságok hatásának mérséklése és a becslés pontosságának javítása. Az eredmények alapján az ISER modell bizonyult a legrobusztusabbnak, mivel képes a különböző talajtextúrák és nedvességi szintek mellett is alacsony hibával működni, szemben a hagyományos indexekkel, amelyeknél a hibaarány gyakran meghaladja a 20%-ot. Ez a megközelítés hozzájárulhat a távérzékelte talajnedvesség-adatok megbízhatóságának növeléséhez, és közvetve a talajmechanikai modellek pontosításához is, különösen autonóm terepi járművek alkalmazásában, ahol a talaj állapotának előrejelzése alapvető fontosságú (Fabre et al., 2015).

A látható és az infravörös közeli tartományban végzett reflektancia-spektroszkópia egyre elterjedtebb eszköz a talaj tulajdonságainak gyors és költséghatékony meghatározására, különösen a vízmegtartó képesség szempontjából. Leone és munkatársai (2019) eredményei

szerint a PLSR (partial least squares regression) analízissel kombinált vis-NIR spektrumok alkalmasak a mezei vízkapacitás és a hervadási pont, valamint a talaj textúrájához és szervesanyag-tartalmához kapcsolódó paraméterek becslésére. A módszer előnye, hogy nondestruktív, nagy mennyiségű minta vizsgálatát teszi lehetővé rövid idő alatt, és jó prediktív teljesítményt mutatott a homok-, agyag- és szervesanyag-tartalom esetében, míg a vályogfrakció becslése gyengébb eredményt adott. Az így nyert adatok hatékonyan alkalmazhatók az öntözési menetrendek optimalizálásában és a precíziós mezőgazdasági gyakorlatokban, miközben közvetve hozzájárulnak a talajmechanikai modellezéshez és az autonóm rendszerek működésének megbízhatóbb előrejelzéséhez is (Leone et al., 2019).

A talajnedvesség távérzékelésére kidolgozott módszerek közül az infravöröshöz közeli és az infravörös tartományban végzett spektrális vizsgálatok különösen ígéretesek, mivel a reflektancia közvetlenül összefügg a talaj víztartalmával. Zhan és munkatársai (2007) egy új megközelítést mutattak be, amely a NIR–red spektrális tér háromszög alakú eloszlására építve határozza meg a felszíni talajnedvességet. A módszer előnye, hogy egyszerűen kivitelezhető, mivel csupán a két spektrális sáv reflektanciaértékeire van szükség, ugyanakkor a terepi adatokkal való validáció magas korrelációt mutatott az 5 cm-es rétegben és a 0–20 cm-es átlagmélységben is. Bár a vegetációs borítottság és a talajtípusok változatossága korlátozhatja a pontosságot, a megközelítés jól illeszthető a talajnedvesség-monitoring gyakorlati alkalmazásaihoz, és kiegészítő adatforrásként hasznos lehet a talajmechanikai vizsgálatokban és az autonóm terepi rendszerek modellezésében is (Zhan et al., 2007).

A hiperspektrális távérzékelés az egyik legígéretesebb módszer a talajnedvesség meghatározására, mivel a spektrális reflektancia közvetlenül összefügg a talaj víztartalmával. Yuan és munkatársai (2019) a Kubelka–Munk elméletre építve dolgoztak ki egy félig empirikus modellt, amely az abszorpció és szórás együtthatók változásán keresztül kapcsolja össze a talajnedvességet a reflektancia-értékekkel. A modell nagy pontosságot ért el különböző talajtípusoknál, ahol az R^2 érték jellemzően 0,85 felett volt, a predikciós hibák pedig alacsonyak maradtak. Eredményeik megerősítik, hogy a közeli és rövidhullámú infravörös tartomány különösen érzékeny a nedvességtartalom változásaira, így a módszer jól illeszthető a hidrológiai és agronómiai modellezéshez, valamint hozzájárulhat a talajmechanikaalkalmazások és autonóm rendszerek működésének pontosabb előrejelzéséhez is (Yuan et al., 2019).

A LiDAR pontfelhők feldolgozása az autonóm járművek környezetészlelésében egyre nagyobb jelentőséget kap, mivel lehetőséget ad a háromdimenziós objektumok pontos szegmentálására, detektálására és osztályozására. A legújabb kutatások a mélytanulás-alapú

megközelítésekre összpontosítanak, amelyek képesek kezelni a zajos, hiányos és hatalmas adatmennyiséget, ugyanakkor kihívást jelent számukra az adatok rendezetlensége és az eltérő sűrűségű ponteloszlások. A különféle adat-reprezentációk – például voxel-, pontfelhő-, graf- vagy nézet-alapú modellek – mind más előnyökkel és korlátokkal bírnak, és a jövőbeli fejlesztések egyik kulcskérdése, hogy ezek kombinációja miként valósítható meg hatékonyan. A tanulmány rámutat arra, hogy a robusztus mélyhálózati architektúrák kidolgozása és a bizonytalanságok kezelése elengedhetetlen a valós idejű alkalmazásokban, különösen akkor, amikor a járművek változó talajmechanikai környezetben mozognak. A szenzoradatok hatékony integrációja, valamint a skálázható és erőforrástakarékos megoldások jelenthetik a következő lépést a megbízható autonóm rendszerek irányába (Li et al., 2020)

A legújabb kutatások szerint a szenzorfüzió kulcsfontosságú szerepet játszik az autonóm járművekben, mivel egyetlen érzékelő önmagában nem képes minden körülmény között megbízható eredményt szolgáltatni. A különféle szenzorok, például a kamera, a LiDAR vagy a radar – amelyekről a szakirodalom korábban már részletesen szólt – kombinációja lehetővé teszi a környezet pontosabb érzékelését és az akadályok biztonságos detektálását. A tanulmány kiemeli, hogy a klasszikus fúziós algoritmusok mellett a mélytanulás-alapú módszerek, különösen a konvolúciós neurális hálózatok, egyre hatékonyabban alkalmazhatók a gyalogos-, jármű- és útburkolat-felismerésben. Emellett a szenzorfüzió nemcsak a lokális érzékelést, hanem a globális lokalizációt és térképezést is támogatja, például SLAM rendszereken keresztül. A jövőbeli fejlesztések egyik legfontosabb iránya a valós idejű feldolgozás és a különböző fúziós szintek – adatszintű, jellemzőszintű és döntési szintű – összehangolása, amelyek lehetővé teszik a robusztusabb és megbízhatóbb autonóm működést változatos környezeti feltételek mellett (Fayyad et al., 2020).

A látható–infravöröshöz közeli tartományban végzett talaj-spektroszkópiai mérések a legújabb kutatások szerint hatékony eszközt jelentenek a talajtulajdonságok gyors és költséghatékony meghatározására. A módszer különösen a precíziós mezőgazdaságban bír nagy jelentőséggel, mivel lehetővé teszi a talajállapot helyszíni és azonnali felmérését, amely alapot ad a differenciált tápanyag-gazdálkodásnak és a fenntartható művelési stratégiáknak. Ugyanakkor a terepi alkalmazás során komoly kihívást jelent a talajnedvesség és a felszíni viszonyok hatása a spektrális jelekre, amelyek jelentősen torzíthatják az eredményeket. A laboratóriumban létrehozott spektrális könyvtárak és a különféle korrekciós algoritmusok alkalmazása hozzájárulhat a pontosság növeléséhez, de a megbízható előrejelzés érdekében a terepi és laboratóriumi adatok összehangolása továbbra is elengedhetetlen. A vizsgálatok

rámutatnak, hogy bár a módszer egyedi pontossága nem minden esetben éri el a hagyományos vizsgálatokét, a szélesebb tér- és időbeli lefedettség révén értékes kiegészítést nyújt a talajmechanikai és agronómiai elemzésekhez (Piccini et al., 2024).

2.8 A talajnedvesség távérzékelésének fontossága a terepjárásban

A talajnedvesség meghatározása a távérzékelés segítségével kulcsfontosságú a hidrológiai és agronómiai modellezésben, ugyanakkor a hagyományos mérési módszerek korlátozott tér- és időbeli lefedettséget nyújtanak. Az újabb kutatások azt mutatják, hogy a multispektrális UAS-felvételek és a digitális domborzatmodellekből származtatott topográfiai változók, valamint hidrológiai tényezők – mint a csapadék és a potenciális evapotranszspiráció – hatékonyan kombinálhatók gépi tanulási algoritmusokkal a felszíni talajnedvesség térbeli eloszlásának előrejelzésére. A vizsgálatokban a döntési algoritmus-fákon alapuló módszerek, különösen a random forest és a boosted regression trees mutatták a legjobb teljesítményt, ami rávilágít arra, hogy a topográfiai változók – például a topográfiai pozíciós index és a görbületi jellemzők – kiemelt szerepet játszanak a talajnedvesség heterogenitásának leírásában. Az eredmények alapján a precíziós mezőgazdaságban és a terepi járművek mozgásának modellezésében a gépi tanuláson alapuló megközelítések jelentős előrelépést hozhatnak, mivel képesek nagy felbontásban és valós időben integrálni a különböző adatforrásokat (Araya et al., 2021).

A látható fény és infravörshöz közeli tartományban végzett multispektrális mérések egyes vizsgálatok szerint alkalmasak a talajnedvesség lineáris becslésére bizonyos nedvességtartományokban. McGuirk és Cairns (2022) kimutatták, hogy a 400–2500 nm közötti hullámhosszok közül a 1720, 1782, 2140 és 2240 nm környékén rögzített reflektancia értékek erősen korrelálnak a talaj 5–25% közötti nedvességtartalmával, ami lehetővé teszi egyszerű lineáris modellek felállítását. A módszer előnye, hogy a Landsat műholdak által gyűjtött adatokra is alkalmazható, így nagy területek nedvességeloszlása gyorsan és költséghatékonyan térképezhető. Bár a 25% feletti nedvességtartományban a kapcsolat már nem lineáris, a vizsgálat eredményei alátámasztják, hogy a multispektrális mérések fontos kiegészítő eszközei lehetnek a talajnedvesség-monitoringnak, hozzájárulva a hidrológiai modellekhez és a talajmechanikai alkalmazásokhoz egyaránt (McGuirk & Cairns, 2022).

Az infravörshöz közeli spektroszkópia eredményei szerint a talaj reflektanciája a nedvességtartalom növekedésével csökken, különösen az 1400 és 1900 nm körüli sávokban. A

kapcsolat többnyire nem lineáris, és egy bizonyos nedvességszűb felett telítődés figyelhető meg, ami megnehezíti a nagy víztartalmú talajok pontos becslését. A módszer ugyanakkor jól alkalmazható az 5–25% közötti nedvességtartományban, ahol lineáris modellek is megfelelő eredményt adnak, így értékes kiegészítést nyújt a talajparaméterek távérzékeléses meghatározásához (McGuirk & Cairns, 2024).

A talajnedvesség térbeli és időbeli változásának pontos meghatározása kulcsfontosságú a hidrológiai modellezésben és a mezőgazdasági alkalmazásokban, ugyanakkor a hagyományos talajmintavételi módszerek idő- és munkaigényessége miatt egyre nagyobb szerepet kap a távérzékelés. A Liu et al. (2020b) tanulmánya egy módosított talajhőtehetetlenségi (STI) modellt mutatott be, amely kifejezetten a vegetációval fedett területek kihívásaira kínált megoldást. A modell újdonsága, hogy a pixeleket három komponensre – csupasz talaj, növényzettel borított talaj és árnyékos talaj – bontja, ezáltal figyelembe veszi a növényzet által vetett árnyékok hatását is. Az ASTER műholdképek alapján végzett vizsgálatok igazolták, hogy a módosított modell szignifikánsan javítja a talajnedvesség becslésének pontosságát a hagyományos megközelítésekhez képest.

Az eredmények szerint a javasolt módszer a hibaarányt több mint 60%-kal csökkentette, különösen a sűrű növényzettel fedett területeken, ahol a korábbi modellek pontatlanul működtek. A diszkrét hullámtranszformáció (DWT) alkalmazása lehetővé tette a hőmérsékleti adatok finomabb, 15 méteres felbontásban való előállítását, ami részletesebb térképezést eredményezett, bár az általános pontosság javulása nem minden esetben volt szignifikáns. A tanulmány hangsúlyozza, hogy a modell robusztus alkalmazásához elengedhetetlen a terepi mérésekkel való kalibráció, ugyanakkor a megközelítés ígéretes lehetőség a jövőbeni, nagy területekre kiterjedő talajnedvesség-monitoring rendszerek számára.

A kutatás eredményei arra is rámutattak, hogy a talajnedvesség pontosabb becslése közvetlenül hozzájárulhat a talajmechanikai modellek megbízhatóságának növeléséhez, valamint az autonóm terepi járművek mozgásának előrejelzéséhez, hiszen a nedvesség jelentősen befolyásolja a talaj teherbírását és tapadási jellemzőit (Liu et al., 2020b).

3. Anyag és módszer

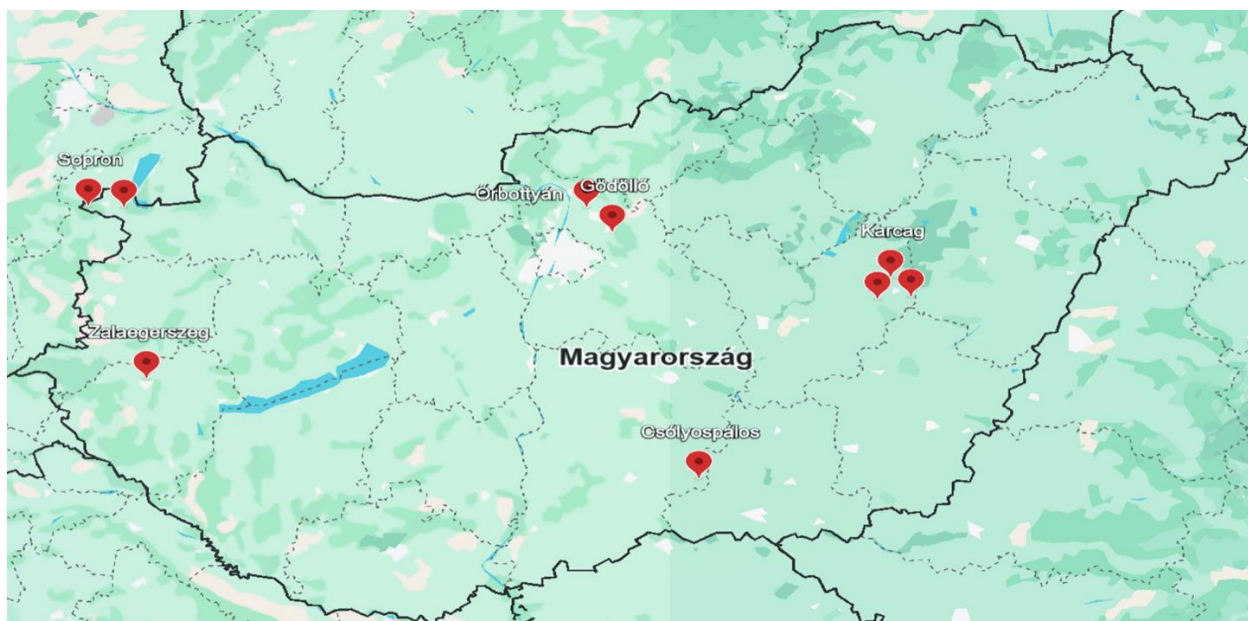
Az elvégzett kutatás során kiemelt figyelmet kapott a vizsgálatok pontos megtervezése és a megfelelő mérési módszerek kiválasztása, mivel csak így volt biztosítható a különböző talajtípusok közötti összehasonlíthatóság és az eredmények megbízhatósága. Az anyag és módszer fejezet célja, hogy részletesen bemutassa a felhasznált talajminták jellemzőit, a mérési eszközöket és eljárásokat, valamint azt a kísérleti rendszert, amelynek segítségével a talaj mechanikai és spektrális tulajdonságai vizsgálhatók voltak.

3.1 Talajminta vétel

A méréseket kilenc, Magyarországon leggyakoribb talajtípusokon végeztem el. Ezek a MATE Járműtechnika Tanszék által lettek összegyűjtve és tárolva, így az ott található műszerszobában tudtam elvégezni a méréseket. A talajok listája, főbb tulajdonságaik és az országon belüli származási helyük az 1. táblázaton 1. ábrán láthatók.

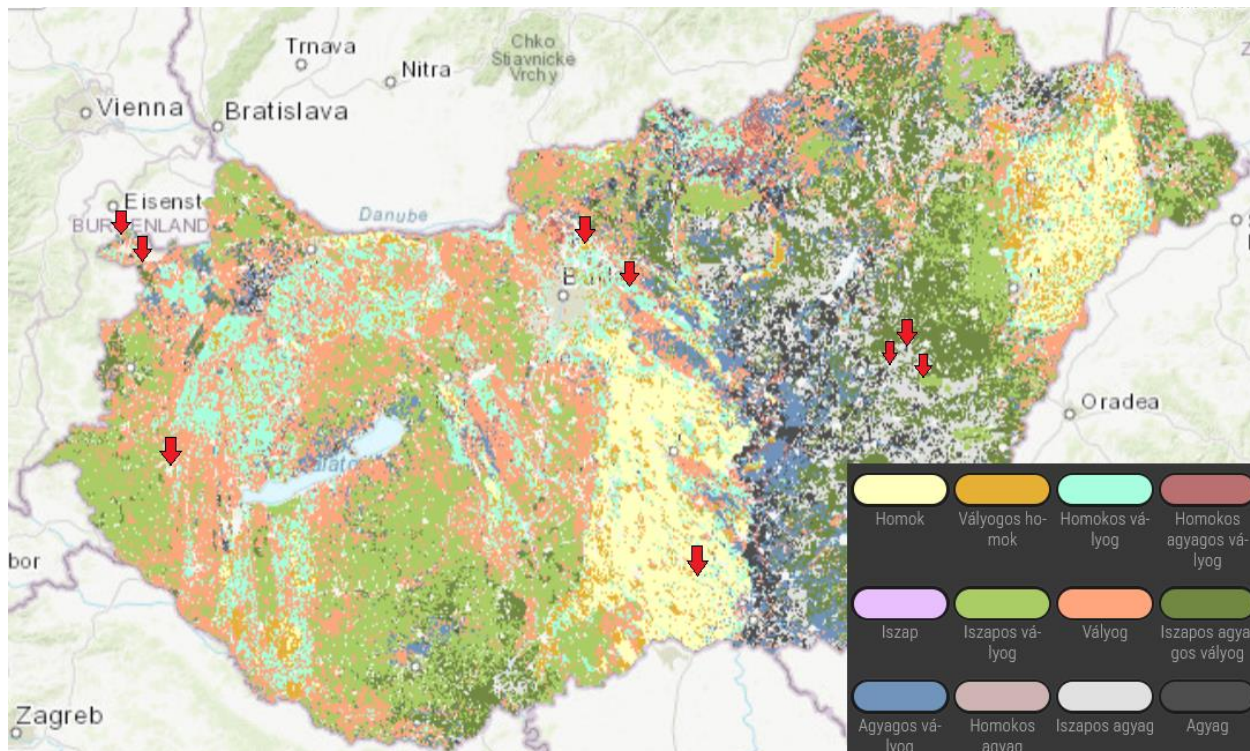
Sorszám	Mintavételi hely	Agyag, iszap, homok tartalom (%)	Textúra
1	Karcag	55,56; 31,28; 13,16	Agyag
2	Sopron	28,53; 40,70; 30,77	Agyagos vályog
3	Sopron	19,03; 49,67; 31,29	Vályog
4	Karcag	44,61; 52,05; 3,34	Iszapos agyag
5	Karcag	26,18; 62,18; 11,63	Iszapos vályog
6	Órbottyán	5,77; 12,10; 82,13	Vályogos homok
7	Gödöllő	11,86; 16,52; 71,62	Homokos vályog
8	Csolyospálos	2,21; 2,12; 95,68	Homok
9	Zalaegerszeg	45; 43; 12	Iszapos agyag

1. Táblázat: A vizsgált talajminták és tulajdonságaik.



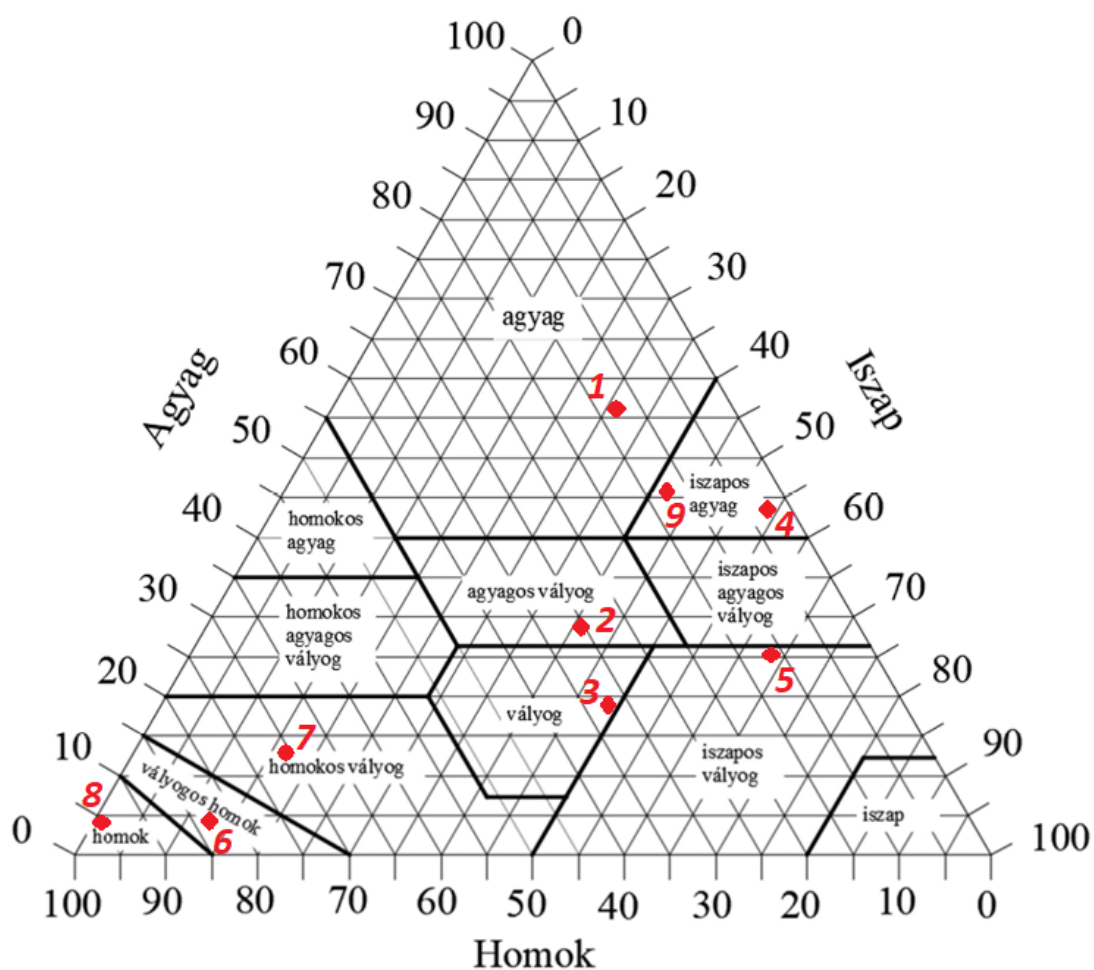
1. Ábra: A talajminták származási helyei Magyarország térképén.

A második ábrán lehet látni a textúra alapján kategorizált talajtípusokat jelölő Magyarország térképét. Itt jobban lehet érzékelni, hogy az általam vizsgált kilenc minta valójában mennyi különböző és az országot mekkora területen lefedő talajtípustokat képvisel.



2. Ábra: A talajminták textúra alapján való hovatartozását szemléltető térkép.

Az egyes talajmintákat, miután kiszedtem a tárolókból, egy 0,25mm-es lyukméretű szitával biztosítottam, hogy csakis homogén, száraz és porított talaj kerüljön felhasználásra. A leszitált talajt ezután egy üveg csészébe helyeztem, ahonnan a vizsgálatok alatt szórtam ki a szükségesnek vélt mennyiséget. A 3. ábrán lehet látni a talajminták szemcseméret eloszlását az Atterberg diagramon ábrázolva. A minták számozása az 1. táblázattal megegyezően a következő: 1. karcagi agyag, 2. soproni agyagos vályog, 3. soproni vályog, 4. karcagi iszapos agyag, 5. karcagi iszapos vályog, 6. őrbottyáni vályogos homok, 7. gödöllői homokos vályog, 8. csólyospálosi homok, 9. zalaegerszegi iszapos agyag.



3. Ábra: A talajminták szemcseméret eloszlása

3.2 A talajmechanikai tulajdonságok mérése

A talaj teherbírásának vizsgálatához egy összetett módszert alkalmaztam. Ehhez meg kellett állapítanom minden talajtípus sodrási plastikus határát (W_p), folyási határát (W_{fh}), plastikus indexét (P_i), valamint a relatív konzisztencia indexét (K_i).

A **plasztikus (sodrás) határ** (W_p) talajnak az az állapota, amikor képlékeny állapotból merev állapotba megy át, vagyis gyúrható állapotból töredezőbe. Meghatározási módja alapján a **plasztikus határ** az a víztartalom, amely mellett a talaj 3 mm vastag szálakká sodorható. Homoktalajoknál nem lehet sodrás határt mérni, így az ebből kiszámolható többi adat sem elérhető ezeknél a talajtípusoknál.

A **folyási határ** (W_{fh}) meghatározása a Casagrande-készülék vagy kúpos penetrométer segítségével történik. Ez jellemzően 35 és 120% között mozog, és szoros összefüggésben áll a talaj típusával, valamint a szemcse-víz kapcsolattal. A folyási határ fizikai alapja az a víztartalom, amelynél a talaj egy adott munkára adott válaszként meghatározott deformációt mutat. A Casagrande-készülék ütőszámát vagy a penetrométer behatolási mélységét egy grafikonon, a vizsgált talajminta víztartalmával összefüggésben tudjuk megjelölni.

A folyási határ még pontosabb kiszámolására is van lehetőség. A behatolási mélységet vagy ütőszámot, valamint a minták nedvességtartalmát ábrázoló diagram trendvonalát meg kell szerkeszteni. Ezen trendvonal egyenletébe kell behelyettesíteni a 25 ütőszámot vagy a 10 mm mélységet.

$$W = -0,002 \cdot n + 0,498 \quad (1)$$

$$W_{fh} = -0,0027 \cdot 25 + 0,4982 \cong 43,07\% \quad (2)$$

Az **plasztikus index** (P_i) a folyási határ (W_{fh}) és a **plasztikus határ** (W_p) víztartalmi különbsége.

$$P_i = W_{fh} - W_p \quad (3)$$

A **relatív konzisztencia index** (K_i) azt fejezi ki, hogy a talaj aktuális víztartalma hol helyezkedik el a folyási és a **plasztikus határ** között.

$$K_i = \frac{W_{fh} - W}{W_{fh} - W_p} = \frac{W_{fh} - W}{P_i} \quad (4)$$

3.2 A vizsgálat eszközei

Ahogy már fentebb is említettem, a folyási határ (W_{fh}) megállapítása a 4. ábrán látható Casagrande géppel történik. A csészébe elhelyezett talajba egy formakéssel árkot kell húzni, majd a csészét egy kis mozgató kar segítségével, szabványos magasságból ütögetni kell, amíg az árok 10-12 mm hosszúságban össze nem folyik. Ekkor meg kell mérni a talaj víztartalmát, majd a mérést ismételve, különböző ütésmennyiségeknél kell meghatározni a víztartalom és az ütés számának kapcsolatát. Ezen adatok alapján meg lehet állapítani azt a víztartalmat, amelynél 25 ütés hatására ~1 cm hosszú árok alakulna ki.



4. Ábra: A Casagrande-készülék, a benne elhelyezett talajmintával, valamint az abba húzott árokkal.

Homoktalajoknál inkább a 5. ábrán látható kúpos penetrométer használata célravezető, mivel pontosabb, használható adatokat szolgáltat a kis plaszticitású talajtípusokról is. Ebben a vizsgálatban azt kell meghatározni, hogy egy szabványos méretű kúp 5 másodperc alatt milyen mélyre hatol be a talajmintába. Itt a W_{fh} az a víztartalom, amelynél a behatolás éppen 10 mm. Ezt hasonló módon, mint a Casagrande-vizsgálatnál, meg lehet állapítani, a kúp behatolási mélységét és a talajminta víztartalmát ábrázoló diagramon.



5. Ábra: A penetrométer, előkészített talajmintával.

Ezt a vizsgálatot az 6. ábrán látható Konica Minolta gyártmányú CM-700d eszközzel végeztem. Ez egy hordozható spektrofotométer, amelyet színek pontos mérésére használnak különféle anyagokon, beleértve a talajt is. Ezt úgy teszi, hogy a megvilágított talajról reflektált fényt rögzíti és a 400 és 700 nm közötti különböző tartományban elemzi azokat. Egy beépített xenonlámpával és gombelrendezésével diffúz megvilágítást biztosít, ami azért fontos mert így a vizsgált anyag felületi egyenetlenségei nem torzítják a színmérést, valamint a mérések reprodukálhatók, megismételhetők lesznek. Két féle mérést végezhetünk, az egyik az SCI (Specular Component Included) ami magában foglalja a felületi fényt, így az anyag belső színeit méri és SCE (Specular Component Excluded) ami pedig kizárja a visszatükröződő fényt, ami közelebb áll az emberi szem érzékeléséhez. Én az SCE mérési módot alkalmaztam.



6. Ábra: A fotospektrométer kijelzője (a) és a mintákat vizsgáló optikája (b).

Egy mintavétel három mérésből állt, amik eredményeinek átlagából alkottam meg a dolgozatban feltüntetett spektrális görbéket. Először mintát vettem a leszitált, teljesen száraz talajmintából. Ezután egy, az általam mért legmagasabb nedvesség tartalmú mintából is, valamint a kettő között, az átmenetet és különbséget jól szemléltetőből is.

A talajminták nedvességtartalmának megállapítására a Mettler Toledo Moisture Analyzer HE73 230V (Ld. 7. ábra) nedvességmérő műszert használtam. Ezen gép a mintákat fűtőlemezekkel szárítja, a teljesen kiszáradt tömegből kivonja az eredeti tömeget, majd a különbséget osztva az eredeti tömeggel, megszorozza azt 100-zal.



7. Ábra: Nedvességmérő műszer és tartozékai.

A mintát a Casagrande-készülékkel, vagy a penetrométerrel elvégzett mérés után egyből, az összezárult árok, vagy a kúp benyomódásának helyéről vettem, azonnal, hogy a minták az eszközök által vizsgált nedvességtartalmat ne veszítsék el, így torzítva a kapott adatokat. A vízzel elkevert, majd az eszközökbe helyezett talajminták tömege 2 g és 5 g között változott.

Egy, az egyetem tanműhelyében készült kézi bevaméterrel vizsgáltam a talajmintákat, a hordképességük megállapításának céljából. Itt nagyobb tárolókat használtam, így a vizsgált, terhelésnek kitett talajminta méretei 210x150 mm voltak, az eszköz talajjal érintkezésbe lépő nyomólapja pedig 50x10mm volt. A 11. ábrán is látható eszközre tetszés és szükség szerint lehet 1, 2, 5 és 10 kg tömegű súlyokat felhelyezni. Így az különböző mértékű benyomódást tud eredményezni. Én megközelítőleg 1 bar nyomást eredményező, 20 kg-ra állítottam be ezt az eszközt, 17 kg felhelyezésével, mivel az eszköz saját tömege 3 kg. Az eszköz a 8. ábrán látható.

Minden egyes alkalommal miután az eszköz nyomot hagyott a mintán, egy mérőszalaggal megmértem a benyomódást és mintát vettem a nedvességtartalom megállapításához.



8. Ábra: A kézi bevaméter.

3.3 A kapott adatok kezelése és analízise

A fotospektrométerrel vett mintákat egy, az eszközhöz használt, CM700 Exporter V110 nevű exportáló programmal olvastam be és töltöttem fel a számítógépre, ahol Excel táblázat formájában tudtam kezelni azt. Ahogy már fentebb említettem, egy mintavétel három mérésből állt, ezek adatait átlagoltam, majd ábrázoltam szintén az Excel program segítségével grafikonokon. A bemutatott eszközökkel és módszerekkel összesen több mint 285 vizsgálatot végeztem.

A nedvességtartalommal és teherbírással kapcsolatos adatokat is egy Excel táblázatban vezettem, valamint használtam a további számolásokhoz. Ezekből az adatokból pedig diagramokat készítettem, amik a dolgozatban is láthatóak.

4. Eredmények és értékelésük

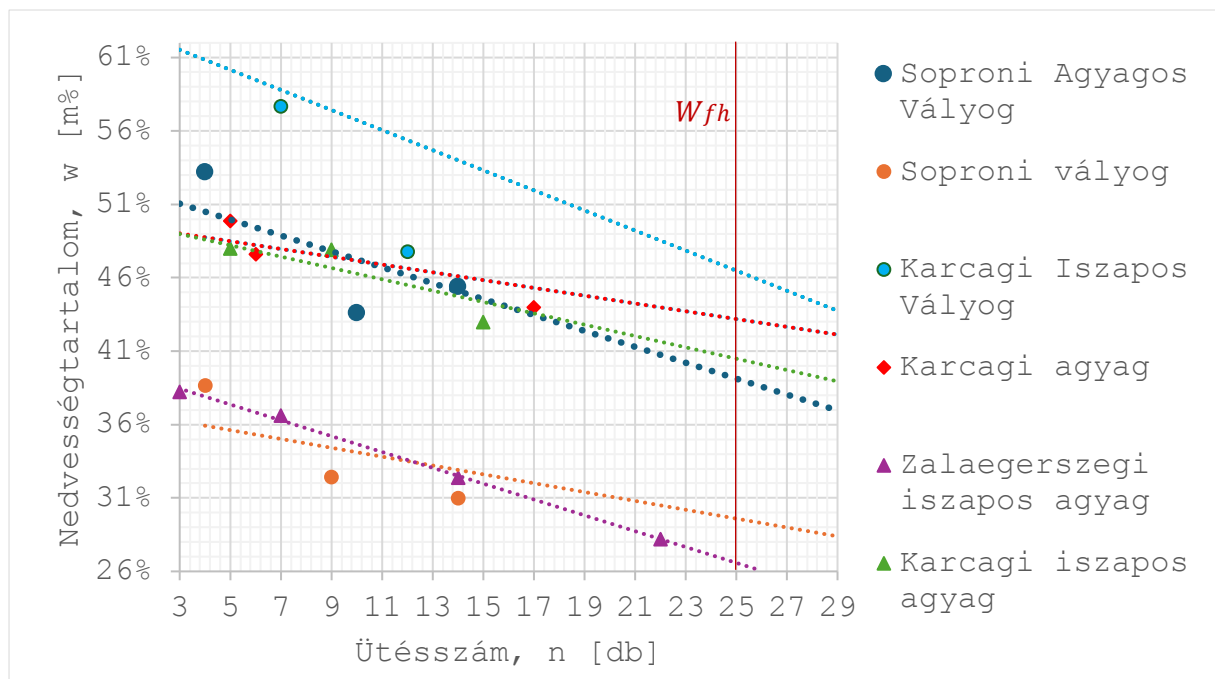
4.1 A talajmechanikai mérések eredményei

A talajmechanikai mérések eredményei a 2. táblázatban láthatóak, mint a konzisztencia határok. Ezek a számok határozzák meg, hogy melyik talajtípus hogyan viselkedik egy adott nedvességtartalmon, valamint mikor és hogyan változik. Lényegében ezeket az adatokat kell megfelelően értelmezni, vizualizálni és felhasználni a kutatásom céljának eléréséhez, a dolgozatom sikeres megírásához.

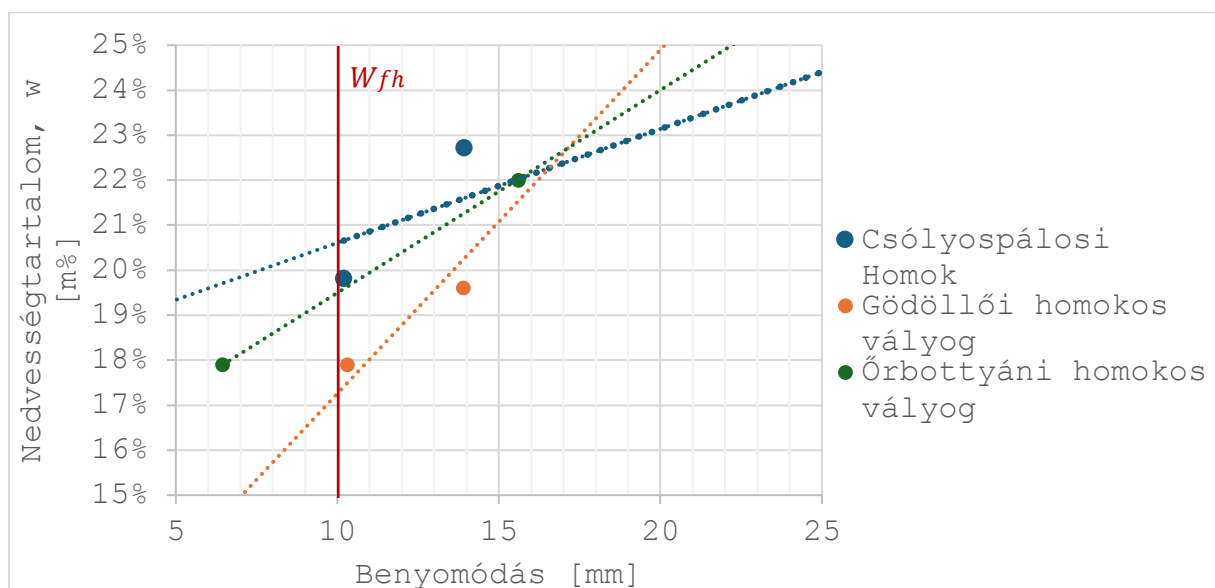
A vizsgált talajminta neve	W_p [MC%]	W_{fh} [MC%]	Pi
1. Karcagi agyag	35,5	43,1	7,5
2. Soproni agyagos vályog	30,9	39,0	8,1
3. Soproni vályog	21,9	29,63	7,7
4. Karcagi iszapos agyag	31,7	40,3	8,6
5. Karcagi iszapos vályog	35,2	46,5	11,3
6. Őrbottyáni homokos vályog	/	19,5	/
7. Gödöllői homokos vályog	/	17,2	/
8. Csólyospálosi homok	/	21,3	/
9. Zalaegerszegi iszapos agyag	21,5	26,5	5,0

2. Táblázat: A vizsgált talajminták konzisztencia határai.

A 9. Ábrán láthatóak a Casagrande készülékkel mért talajminták folyási határai, piros függőleges vonallal jelölve. A 10. ábrán pedig a plaszticitásuk miatt csak a penetrométerrel mérhető homoktalajok folyási határa, szintén egy függőleges piros vonallal jelölve.



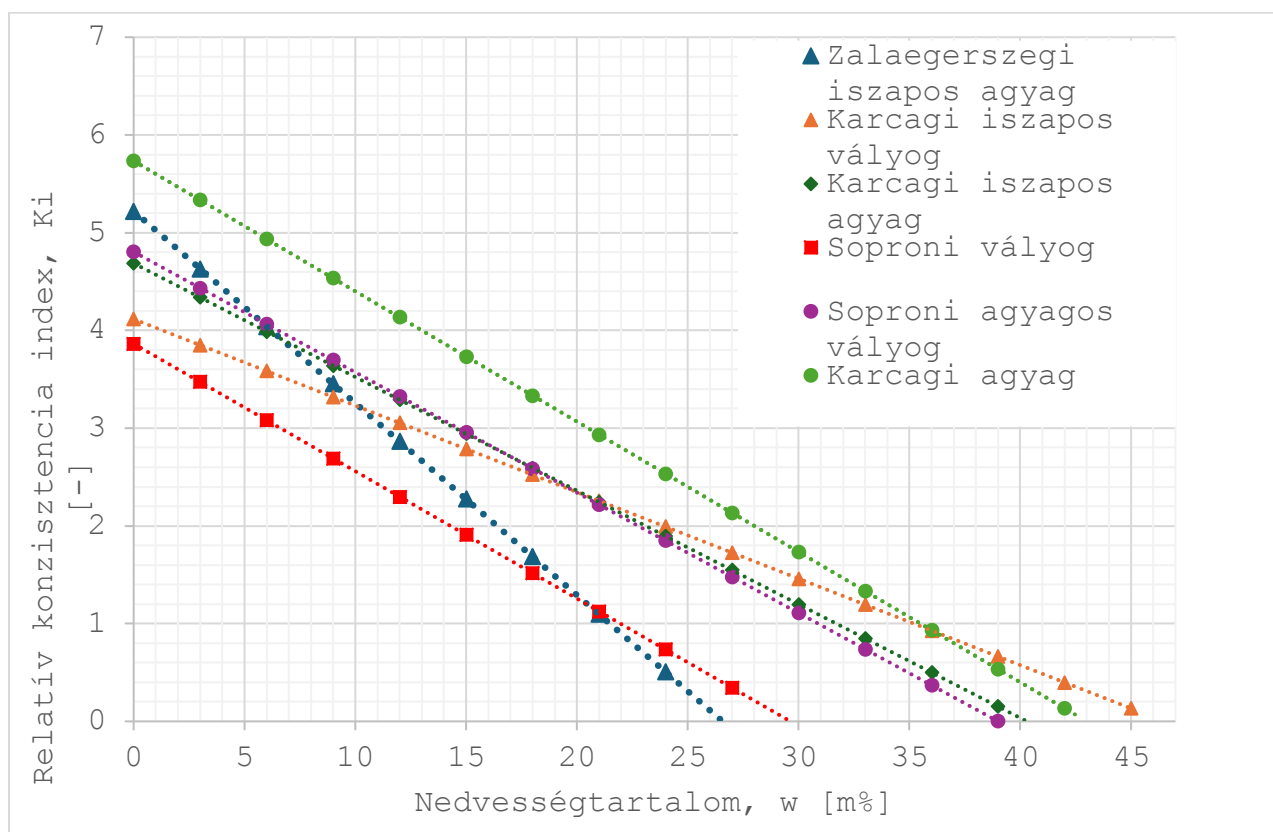
9. Ábra: A Casagrande készülékkel mért folyási határok.



10. Ábra: A kúpos penetrométerrel vizsgált talajminták folyási határai.

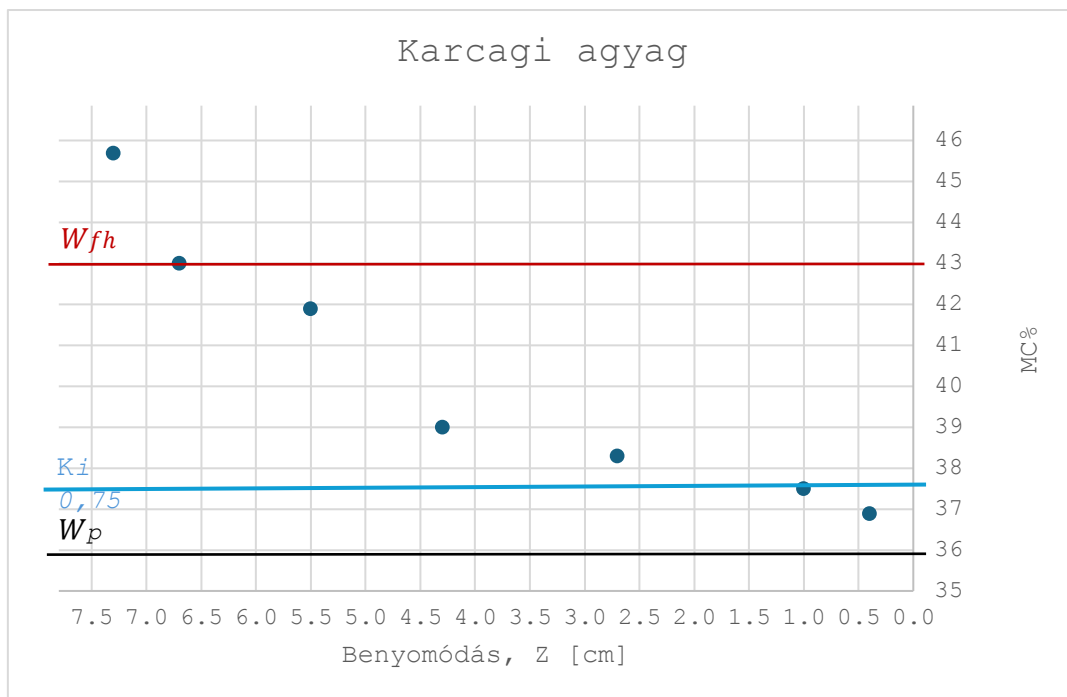
A talajmechanikai mérések eredményei a 11. ábrán a relatív konzisztencia indexként vizualizálva jól mutatják a különböző talajtípusok eltérő, csoportonként jellemző tulajdonságait. Az ábrán azért van csak hat talajtípus feltüntetve a vizsgált kilencből, mert amint azt már az előző tartalmi részben is tárgyaltuk, a homoktalajok sodrási plasztikus határa (W_p) nem mérhető, így a relatív konzisztencia indexük (K_i) sem számolható ki. Ennek ellenére ezen talajoknak is meg lehet mérni és kiszámolni a folyási határát (W_{fh}), ami a többi talaj

görbájének a 0 konzisztenciát érintő pontja a 11. ábrán. Természetesen nem csak az vonható le ebből a grafikonból, hogy talajtípusra jellemzően és megkülönböztethetően viselkednek más és más nedvességtartalomnál, hanem hogy emellett mégis körül-belül mindössze 30%-nyi tartomány (a homoktalajokkal együtt, ahol a legalacsonyabb nedvességtartalom a folyási határnál a 17,21%) az, ahol az összes vizsgált talajtípus eléri a nulla konzisztenciát, vagyis ez az a bizonyos sáv, ami a legtöbb figyelmet igényli a dolgozat és a kutatás szempontjából is.

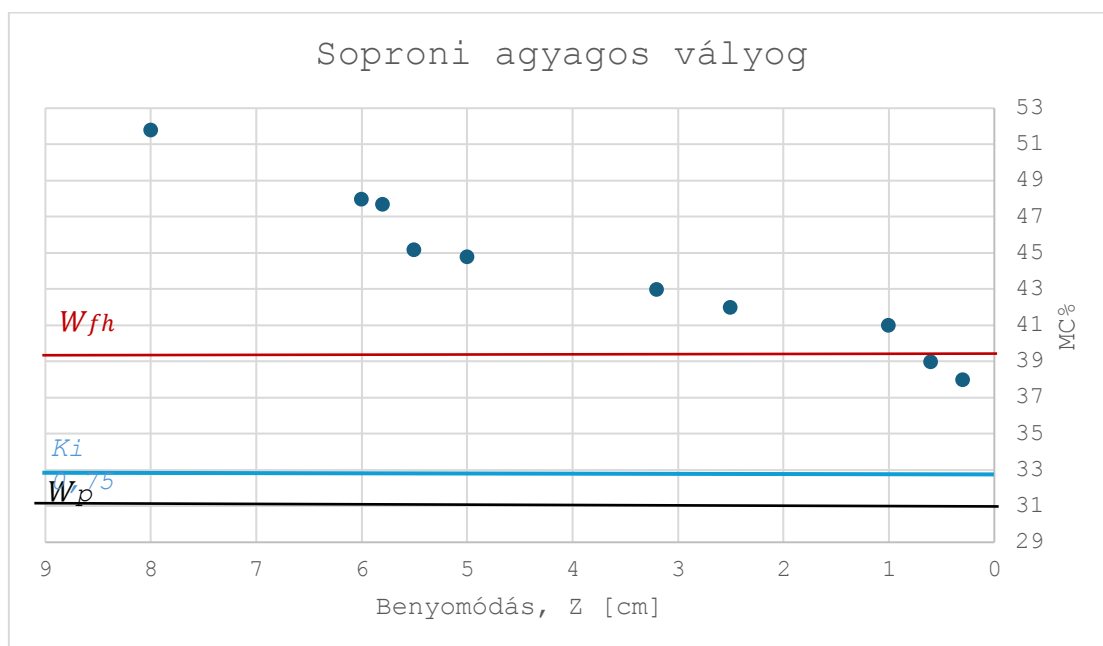


11. Ábra: A vizsgált talajminták relatív konzisztencia indexei.

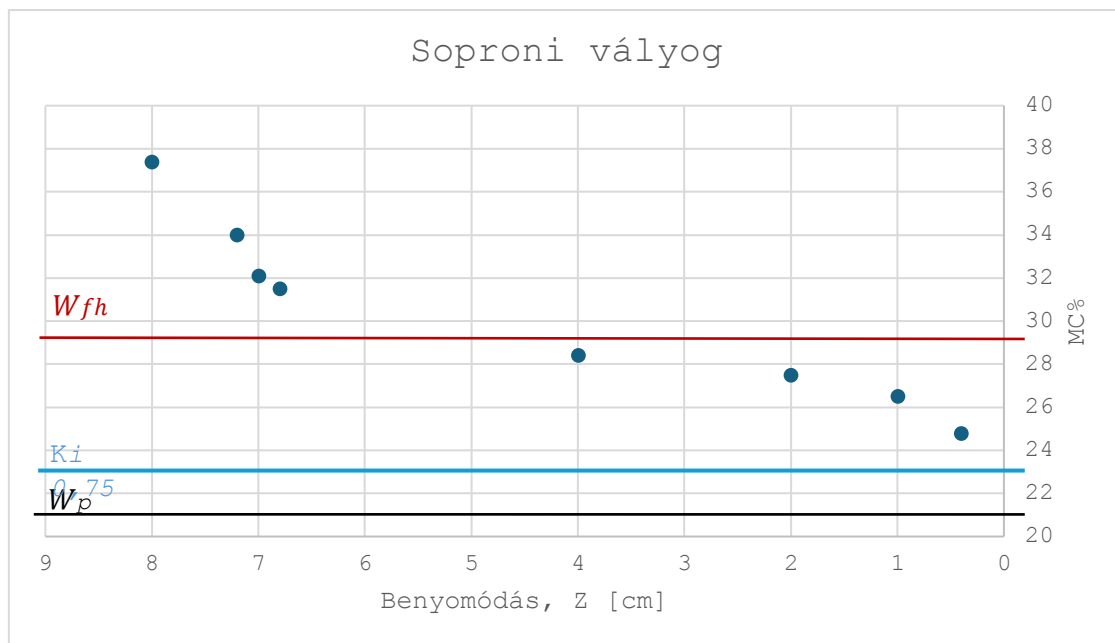
A hordképesség további megállapítása céljából a talajmintákra 1 bar nyomást gyakorló kézi bevaméterrel folytatott mérések eredményei a következő ábrákon láthatók. Ezekből azt tudjuk levonni, hogy a 0 cm benyomódást kivétel nélkül a folyási határ nedvességtartalma alatt, és a plasztikus sodrási határ feletti (amelyik talajtípusnak van plaszticitása) nedvességtartalmon éri el. Erre példák a 12-17. ábrákon láthatók. Vagyis, a két konzisztencia határ közti tartományban található az a pont mindig, ahol eléri azt a nedvességtartalmat, amihez az az állapot köthető, ahol a hordképessége eléri az 1 bar-t.



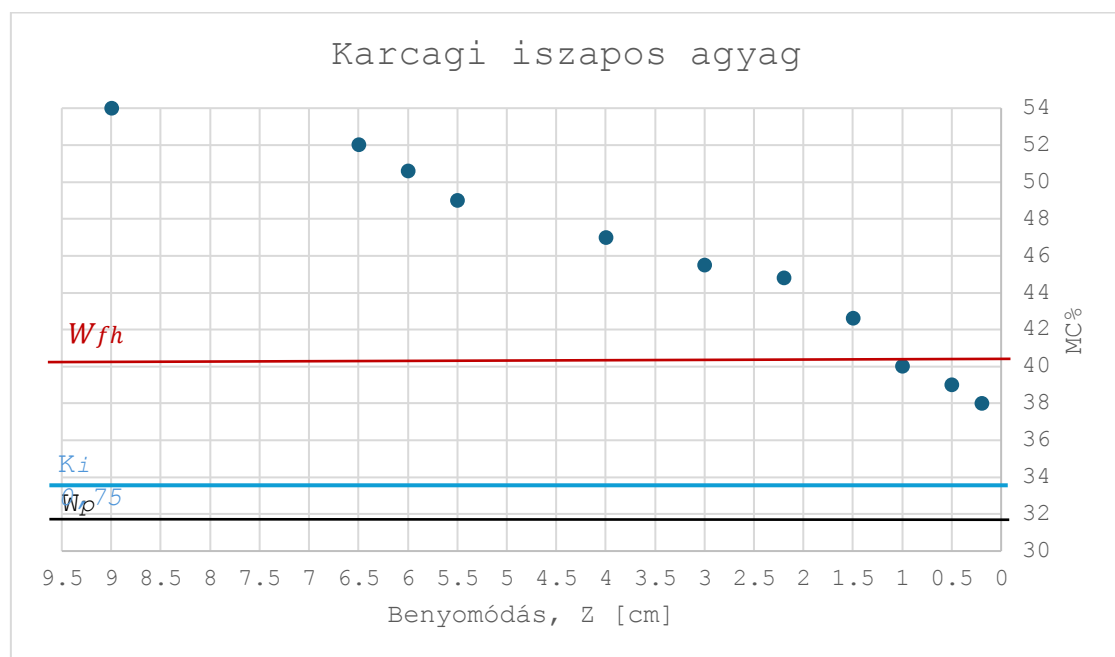
12. Ábra: A karcagi agyag bevaméteres vizsgálatának eredménye.



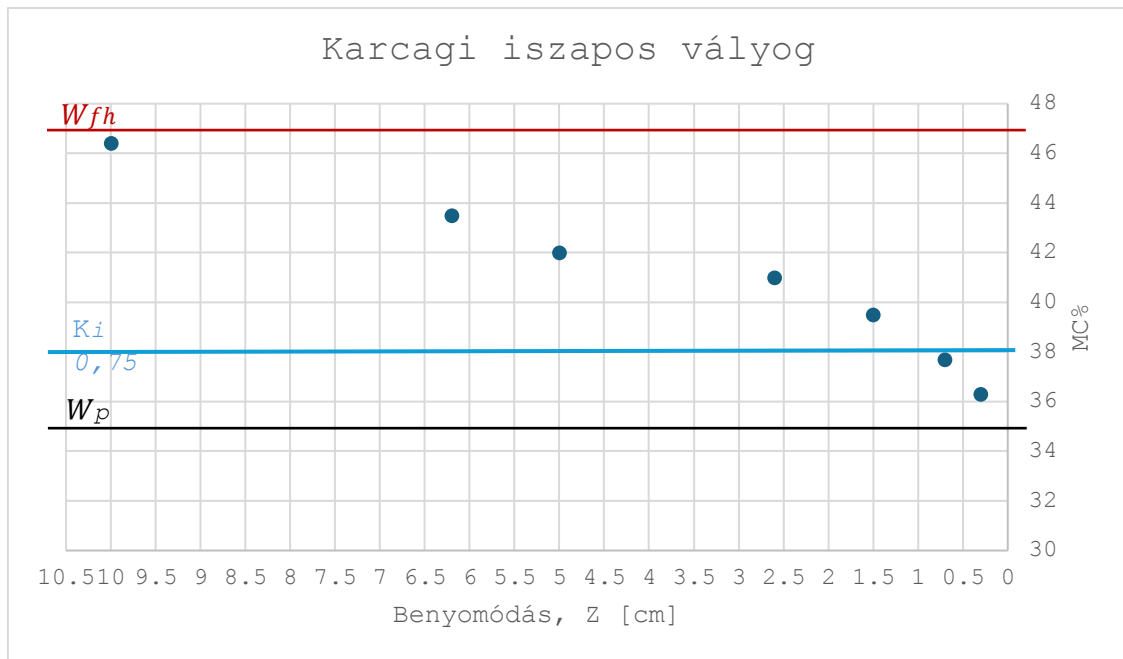
13. Ábra: A soproni agyagos vályog bevaméteres vizsgálatának eredménye.



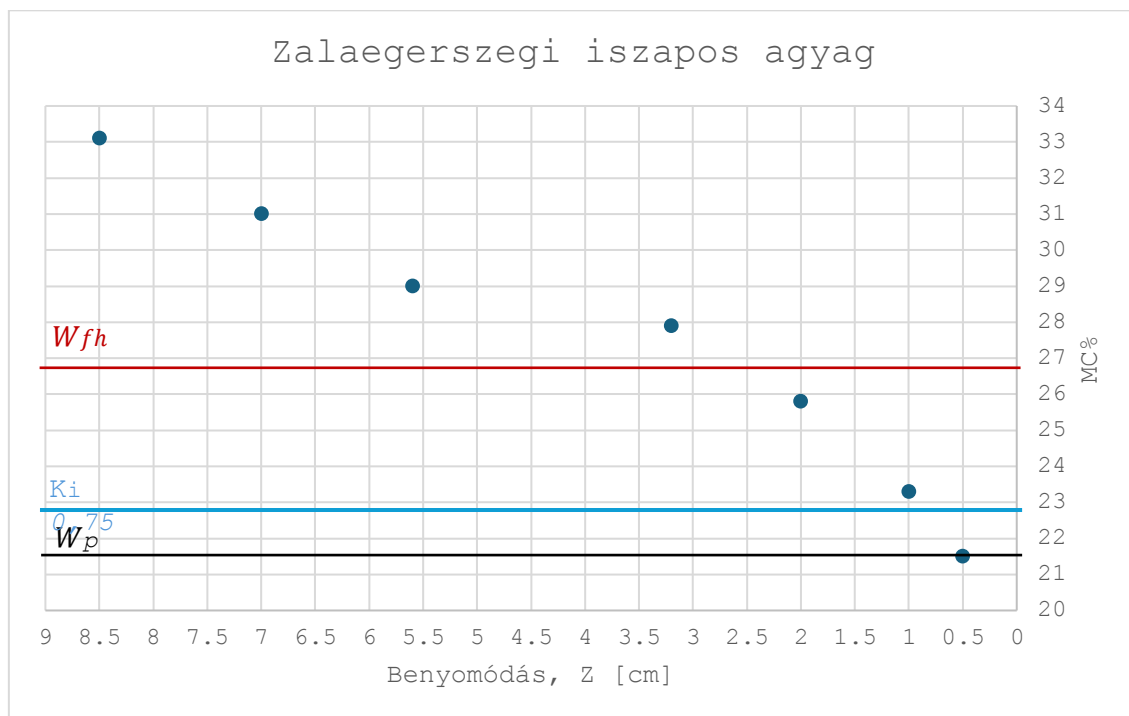
14. Ábra: A soproni vályog bevaméteres vizsgálatainak eredménye.



15. Ábra: A karcagi iszapos agyag bevaméteres vizsgálatainak eredménye.

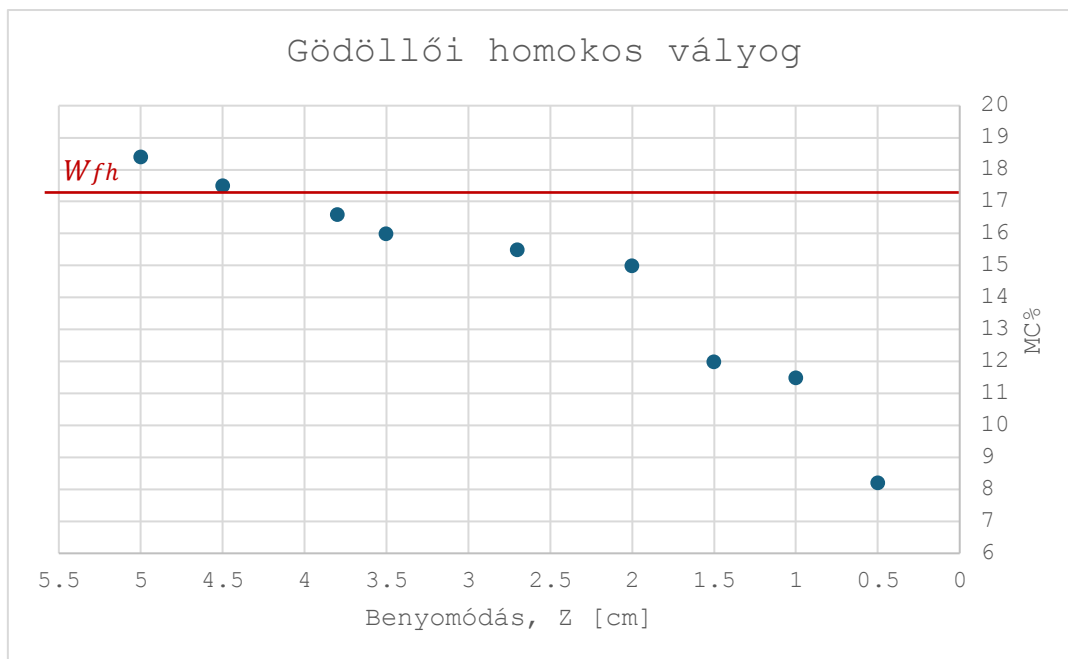


16. Ábra: A karcagi iszapos agyag bevamételes vizsgálatainak eredménye.



17. Ábra: A zalaegerszegi iszapos agyag bevamételes vizsgálatainak eredménye.

A homoktalajok, amik nem rendelkeznek kiszámítható pasztikus sodrási határral, annyiban egyeznek meg a fent leírtakkal, hogy attól még ugyanúgy, a folyási határ nedvességtartalma alatt érik el ezt a pontot a hordképességükkel. Ezt a 18. ábrán látható példa jól szemlélteti.



18. Ábra: A gödöllői homokos vályog bevamételes vizsgálatainak eredménye.

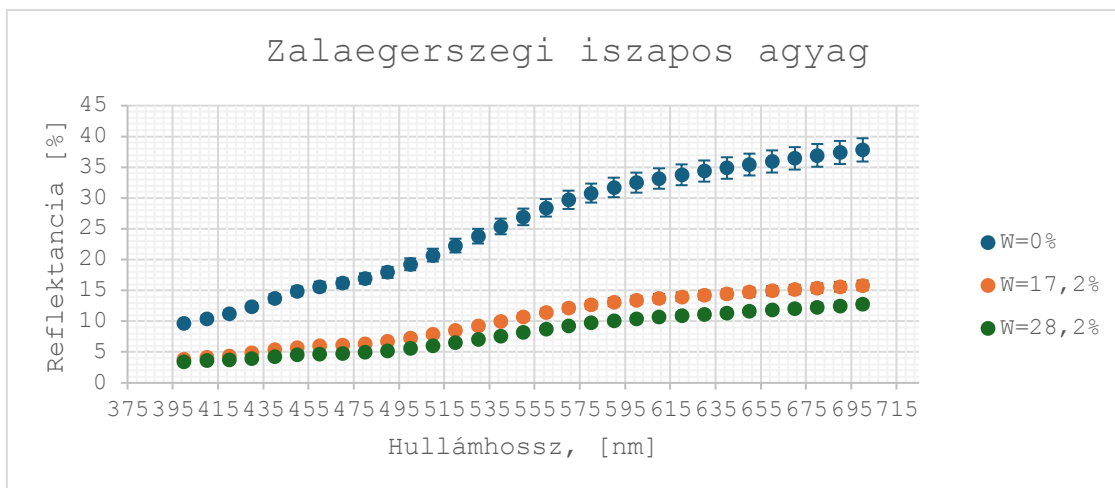
Az adott talajon végzett nyomólapos vizsgálat alapján, ahol az 50 mm átmérőjű korong 1 bar (100 kPa) nyomás hatására 1 cm süllyedést mutatott, meghatározható volt a talaj teherbírásának nagyságrendje és az ebből következő süllyedési viselkedés egy valós méretű kerék esetében. A 185/65 R15 méretű gumibroncs geometriai jellemzőit figyelembe véve (effektív futószélesség $b=0.185$, sugár), a felfekvő hossz (L) a süllyedés függvényében a $L=\sqrt{2Rz}$ összefüggéssel becsülhető. Ennek alapján azonos, $p=1$ bar átlagos talajnyomás mellett a kerék süllyedése várhatóan 1,3–2,0 cm közé esik, ami a korong által mért érték 1–2-szerese. A növekedés oka, hogy a kerék nagyobb futószélessége miatt a k_c/b kohéziós tag hozzájárulása csökken, így az egyensúlyi nyomásszint eléréséhez nagyobb süllyedésre van szükség. A számított felfekvő felület ennek megfelelően 0,016–0,021 m² (≈ 160 –210 cm²) tartományba esik. Ekkora felületen 1 bar nyomás mintegy 1,7–2,1 kN erőnek, vagyis 170–210 kg statikus kerékterhelésnek feleltethető meg. Ez azt jelenti, hogy a vizsgált talaj ezen nedvességi és konzisztenciaállapotában egy személyautó kereke körülbelül 200 kg terhet képes hordani úgy, hogy az átlagos talajnyomás nem haladja meg az 1 bar értéket. Az eredmény jól szemlélteti a nyomólapos laboratóriumi vizsgálatok és a valós járműterhelések közötti kapcsolatot: a kis felületű koronggal mért süllyedés–nyomás összefüggés alapján a terepi viszonyok megbízhatóan előre jelezhetők, ami a talaj hordképességének, illetve a járművek mozgáskéességének becslésében fontos módszertani eszközt ad.

Ha a 50 mm-es nyomólap 1 bar mellett már nem süllyed, akkor a 185/65 R15 kerék 1 bar átlagos talajnyomás mellett annyi terhet hord, amennyihez a gumi saját deformációja (nem a talajé) létrehozza a szükséges felfekvő felületet. Ilyenkor a talajhoz képest „kemény” állapotot tekinthetünk, és a kontaktus geometriáját főleg az abroncs karkaszának rugalmassága határozza meg. Mérnöki becsléssel egy ilyen méretű személyautó-abroncs érintkezési hossza kemény/félig kemény alátámasztáson jellemzően $L \approx 7\text{--}10\text{ cm}$, az effektív futószélesség kb. $b \approx 0,185\text{ m}$. Ekkor a felfekvő felület $A = b L \approx 0,013\text{--}0,0185\text{ m}^2 (\approx 129\text{--}185\text{ cm}^2)$. Az átlagos talajnyomást $p = 1\text{ bar} = 100\text{ kPa}$ rögzítve a hordható terhelés $W = pA = 100000 \cdot A \Rightarrow W \approx 1,30\text{--}1,85\text{ kN} (\rightarrow 130\text{--}185\text{ kg})$.

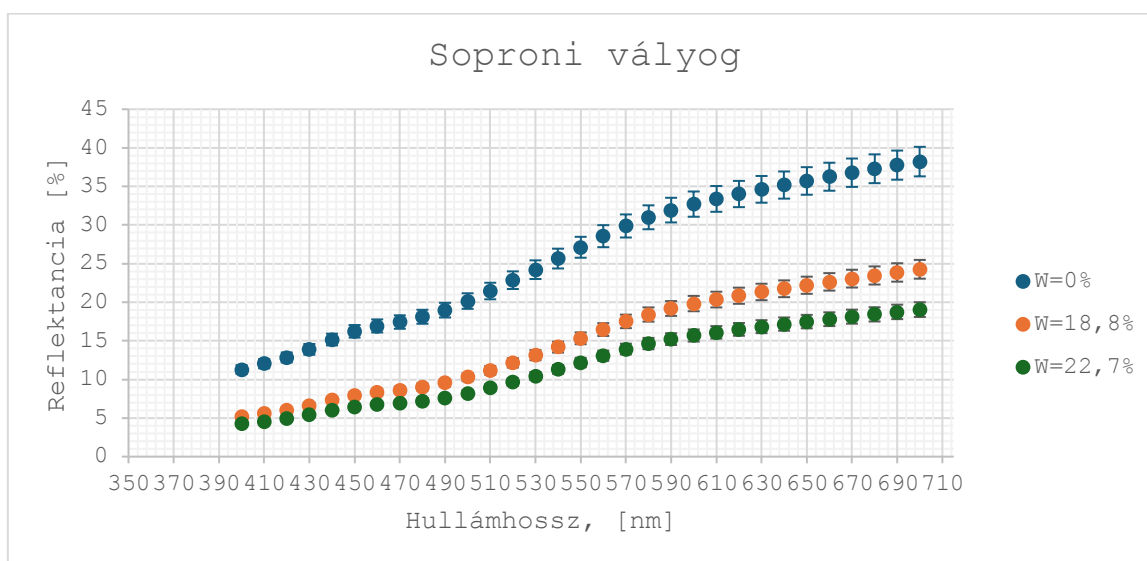
Jó „névleges” középértéknek adódik $\sim 160\text{ kg/kerék}$ (pl. $L \approx 8,5\text{ cm} \rightarrow A \approx 0,0157\text{ m}^2 \rightarrow W \approx 1,57\text{ kN} \rightarrow 160\text{ kg}$). Érdekes megjegyezni, hogy ha megengedünk kis mértékű süllyedést (pl. 1–2 cm), a kontaktushossz nő ($\approx 9\text{--}11\text{ cm}$), és a hordható tömeg $\sim 170\text{--}210\text{ kg}$ -ra emelkedik ugyanazon 1 bar átlagnyomás fenntartása mellett. Ez jól mutatja, hogy „nem süllyedő” talajon a terhet főleg a gumi saját alakváltozása hordja, míg puhább talajon a szükséges felfekvést részben a talaj süllyedése idézi elő.

4.2 A spektrális mérések eredményei

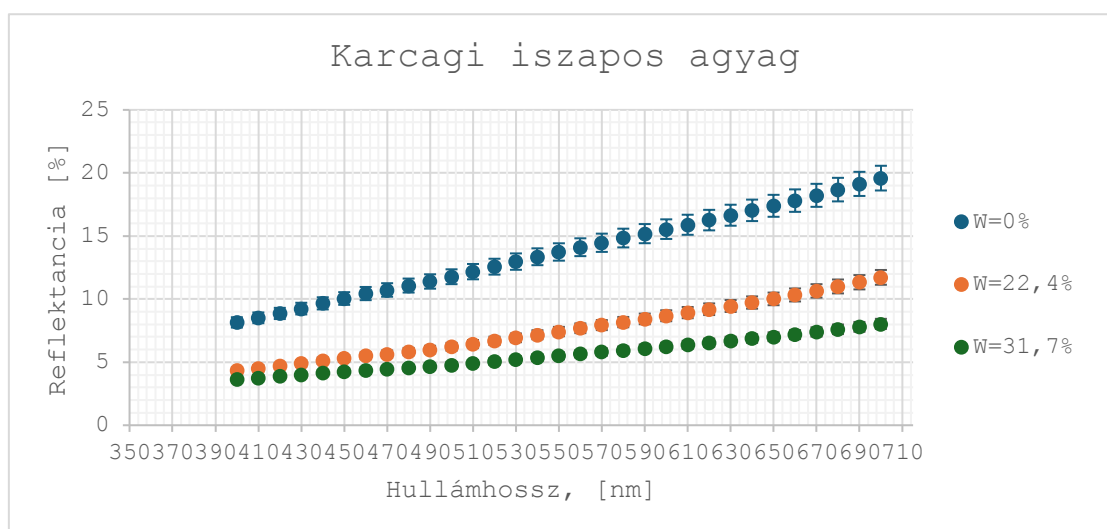
A fotospektrométerrel készült mérések eredményei a 19., 20., és 21. ábrákon láthatók. Ezekből több dolog is kitűnik. Az első az, hogy ahogy azt szabad szemmel is lehet látni egyes esetekben, a nedvességtartalomtól függően, a talajtípusra jellemző szín változik. A másik, hogy ezek a görbék a legjobban az 550 és 700 nm tartományban különülnek el egymástól, így a különbség ott állapítható meg a legjobban. Vagyis, a 600-700 nm körüli tartományban lehet a legjobban szemléltetni és vizsgálni, hogy a spektrális tulajdonságok változása a víztartalommal áll összefüggésben.



19. Ábra: Egy homoktalaj reflektancia mérésének eredménye.



20. Ábra: Egy vályogtalaj reflektancia mérésének eredménye.



21. Ábra: Egy agyagtalaj reflektancia mérésének eredménye.

5. Következtetések és javaslatok

A vizsgálatok eredményei egyértelműen igazolták, hogy **a talajtípusok nedvességtartalmának változása közvetlen és szoros összefüggést mutat mind a mechanikai, mind a spektrális tulajdonságokkal**, vagyis a víztartalom kulcsszerepet játszik a talaj szerkezetének és viselkedésének előrejelzésében.

A konzisztenciahatárok meghatározása során világossá vált, hogy **a hordképesség szempontjából a legnagyobb jelentősége annak a tartománynak van, amely a plasztikus határ és a folyási határ közé esik**, hiszen ebben az intervallumban éri el a talaj azt az optimális állapotot, amelyben képes a rá nehezedő terhelést biztonságosan elviselni. Az **1 bar** nyomásnak megfelelő teherbírás minden talajtípus esetében ebben a zónában jelentkezett, ami azt támasztja alá, hogy **a talaj stabilitása és hordképessége alapvetően a víztartalom nagyságától függ**. Amennyiben a talaj nedvességtartalma túl alacsony (pl. homoktalajok) úgy rideggé és könnyen töredezővé válik. A túl magas víztartalom a folyási határ felett a szemcsék közti kötések fellazulásához és a teherbírás gyors elvesztéséhez vezet. **Ez azt jelenti, hogy a két határérték közötti nedvességtartomány kritikus szerepet játszik** a mezőgazdasági és mérnöki gyakorlatban, mivel ebben az állapotban biztosítható egyszerre a megfelelő művelhetőség, a talajterhelhetőség, ami elengedhetetlen a gépi munkák és az (autonóm) járművek alkalmazása során.

A spektrális vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy **a talaj színe a nedvességtartalommal együtt változik**, és ez a kapcsolat különösen jól megfigyelhető a látható fény spektrumának vörös tartományában, az **550 és 700 nm-közötti**, látható fény hullámhosszán, ahol **a spektrális görbék a legnagyobb eltérést mutatták** a különböző nedvességi állapotok között. Ez azt jelenti, hogy **a talaj színváltozása nem pusztán vizuális jelenség, hanem megbízható, mérhető indikátor is, amely közvetetten utal a talaj víztartalmára és annak állapotára**. A fotospektrométer alkalmazása ezért kiegészítő módszerként kiválóan alkalmas a talaj mechanikai paramétereinek gyors, reprodukálható és roncsolásmentes meghatározására, ami jelentős előnyt jelent a hagyományos, idő- és munkaigényes vizsgálatokkal szemben. Mindez gyakorlati szempontból is értékes, hiszen a talaj színének folyamatos vagy ismételt mérése lehetőséget adhat arra, hogy a precíziós mezőgazdaságban, valamint az önjáró terepi járművek fejlesztésében a talaj állapotáról valós idejű, pontos információk álljanak rendelkezésre, elősegítve a terhelhetőség előrejelzését, a munkafolyamatok optimalizálását és a talaj káros tömörödésének megelőzését.

Az eredmények gyakorlati haszna abban mutatkozik meg, hogy a talaj színének és nedvességtartalmának együttes figyelembevételével a precíziós mezőgazdaságban és az autonóm terepi járművek alkalmazásában jóval pontosabban előre jelezhető a talaj teherbírása és hordképessége, mint kizárólag hagyományos mechanikai mérések alapján. **A színváltozások gyors, roncsolásmentes mérhetősége lehetővé teszi, hogy a terepi körülmények között is folyamatosan monitorozható legyen a talaj aktuális állapota**, így a munkavégzés során időben felismerhetők azok a nedvességi szintek, amelyek a talaj stabilitásának elvesztéséhez vezethetnek. Ez nemcsak a munkafolyamatok pontosabb ütemezését és hatékonyabb szervezését segíti elő, hanem hozzájárul a mezőgazdasági gépek optimális üzemeltetéséhez is: mérsékelhető a túlzott taposási kár és a talaj szerkezetének tartós roncsolódása, csökkenthető a felesleges energiafelhasználás, valamint javítható a gépek üzemanyag-hatékonysága. Mindez hosszabb távon a fenntarthatóbb talajhasználatot, a költséghatékonyság növelését és a modern, automatizált technológiák gyakorlati bevezetésének megbízhatóbb alapjait is biztosíthatja.

További kutatások során célszerű lenne a laboratóriumi eredményeket terepi körülmények között is validálni, hogy a természetes tömörödés, a növényi fedettség és a dinamikus terhelések hatásait is figyelembe lehessen venni. **A spektrális mérések kiterjesztése és az adatok mesterséges intelligencián alapuló elemzése új lehetőséget kínál** a talaj–jármű kölcsönhatás pontosabb modellezésére, valamint az autonóm rendszerek mozgásának adaptív szabályozására. **A spektrális szenzorok járművekbe integrálása** hosszú távon elősegítheti a fenntartható talajhasználatot, a hatékonyabb gépüzemeltetést és a modern precíziós mezőgazdasági technológiák gyakorlati elterjedését.

A kutatás alapján javasolható, hogy a jövőbeni vizsgálatok során:

- a spektrális elemzést célszerű kiterjeszteni szélesebb hullámhossztartományokra,
- a további kutatások során a laboratóriumi eredmények igazolása terepi körülmények között,
- érdemes lenne matematikai modellek és algoritmusok fejlesztése, amelyek a spektrális és mechanikai adatok összekapcsolásával előrejelzési lehetőséget biztosítanak,
- a mezőgazdasági és közlekedési gyakorlatban a talaj színének gyors, in situ vizsgálata integrálható lehetne az önjáró gépek érzékelőrendszereibe, támogatva az azonnali döntéshozatalt,

- ezen algoritmusok és érzékelőrendszerek mesterséges intelligenciával való párosítása az autonóm döntéshozatal következő lépéseként.

Összességében a dolgozat eredményei megerősítik, hogy **a talaj színe és mechanikai tulajdonságai közötti összefüggések gyakorlati szempontból is jelentőséggel bírnak és hasznosíthatók**, különösen a precíziós mezőgazdaság és az autonóm járműtechnológia területén. A vizsgálatok során bebizonyosodott, hogy a talaj nedvességtartalmának változása nemcsak a teherbírást és a konzisztenciahatárokat befolyásolja, hanem a spektrális tulajdonságokban is egyértelműen nyomon követhető, így **a szín objektív indikátorként szolgálhat a talaj állapotának jellemzésében**. Ez lehetővé teszi olyan mérési módszerek kidolgozását, amelyek gyorsak, megismételhetők és terepi körülmények között is alkalmazhatók, támogatva a mezőgazdasági gépek optimális üzemeltetését, a talajkímélő munkavégzést és az energiahatékonyság növelését. A bemutatott módszerek ezért nemcsak tudományos szempontból bővítik a talajmechanikai és spektrális vizsgálatok közötti kapcsolat megértését, hanem **alapot nyújtanak olyan további kutatásokhoz és technológiai fejlesztésekhez** is, amelyek hozzájárulhatnak a fenntartható talajhasználathoz, a termelési költségek csökkentéséhez és a korszerű, automatizált agrártechnológiai megoldások szélesebb körű elterjedéséhez.

6. Összefoglalás

A kutatás célja a különböző magyarországi talajtípusok mechanikai és spektrális tulajdonságainak részletes vizsgálata volt, különös tekintettel a nedvességtartalom változásának hatásaira és annak a talaj színével, valamint hordképességével mutatott összefüggéseire. A laboratóriumi körülmények között végzett elemzések segítségével sikerült feltárni, hogy a talaj fizikai állapotának változása, különösen a víztartalom növekedése, szoros kapcsolatban áll a színárnyalat és a teherbírás módosulásával. A vizsgálatok során kilenc, Magyarország területén jellemző talajtípus került kiválasztásra, amelyek reprezentálják az ország mezőgazdasági szempontból legfontosabb textúrakategóriáit. A minták különböző nedvességi állapotok mellett történő vizsgálata lehetővé tette annak megállapítását, hogy a víztartalom emelkedésével a talaj színe sötétedik, miközben hordképessége fokozatosan csökken. A mérések eredményei egyértelműen igazolták, hogy a színváltozás és a mechanikai tulajdonságok között kimutatható korreláció áll fenn, amely a jövőben alkalmas lehet a talaj teherbíró képességének becslésére optikai módszerekkel is. A spektrális mérések során a látható és a közeli infravörös tartományban mért reflektanciaértékek jól tükrözték a nedvességtartalom változását, így a színparaméterek a talaj fizikai állapotának megbízható jelzőivé válhatnak. A vizsgálat eredményei alátámasztják azt a feltételezést, hogy a talaj színe nem csupán vizuális jellemző, hanem összetett fizikai folyamatok lenyomata, amely a víztartalom és a szemcseközi kölcsönhatások változását is közvetetten tükrözi. A kutatás során kapott adatok lehetőséget nyújtanak olyan empirikus összefüggések meghatározására, amelyek alapján a jövőben gyors, nem invazív becslési módszerek fejleszthetők a talaj mechanikai tulajdonságainak meghatározására. Az eredmények gyakorlati alkalmazása elsősorban a precíziós mezőgazdaság és az autonóm járműrendszerek fejlesztésében jelenthet előrelépést, mivel a talaj színéből és nedvességtartalmából származtatott adatok felhasználhatók a járművek mozgástervezésének és terepviszonyokhoz való alkalmazkodásának támogatására. A kutatás rámutatott arra is, hogy a spektrális vizsgálatok hatékony eszközt biztosítanak a talaj mechanikai jellemzőinek értékelésére, kiegészítve a hagyományos laboratóriumi módszereket, miközben azoknál lényegesen gyorsabb és költséghatékonyabb megoldást kínálnak. Összességében a kutatás megerősítette, hogy a talaj színe, nedvességtartalma és hordképessége között szoros, statisztikailag is értelmezhető kapcsolat áll fenn. Az így feltárt összefüggések gyakorlati hasznosítása elősegítheti a talajmechanikai és távérzékelési adatok integrálását, ami hozzájárulhat a mezőgazdasági termelés hatékonyságának és fenntarthatóságának növeléséhez, valamint a jövő autonóm, precíziós alapú technológiai rendszereinek fejlesztéséhez.

7. Summary

The aim of the research was to conduct a detailed examination of the mechanical and spectral properties of different Hungarian soil types, with particular emphasis on the effects of moisture content variations and their relationship with soil colour and bearing capacity. Through laboratory analyses, it was possible to reveal that changes in the physical condition of the soil, especially the increase in water content, are closely linked to modifications in colour shade and load-bearing capacity. During the experiments, nine soil types characteristic of Hungary were selected, representing the country's most significant texture categories from an agricultural perspective. The examination of the samples under varying moisture conditions made it possible to determine that as the water content increases, the colour of the soil darkens while its bearing capacity gradually decreases. The measurement results clearly confirmed that a detectable correlation exists between colour changes and mechanical properties, which in the future may enable the estimation of soil bearing capacity through optical methods. During the spectral measurements, the reflectance values recorded in the visible and near-infrared ranges accurately reflected the variations in moisture content, meaning that colour parameters can serve as reliable indicators of the physical condition of the soil. The findings support the assumption that soil colour is not merely a visual characteristic but also a manifestation of complex physical processes that indirectly reflect changes in water content and interparticle interactions. The data obtained during the research provide an opportunity to establish empirical relationships that could serve as the basis for developing fast, non-invasive estimation methods for determining the mechanical properties of soils in the future. The practical application of these results could represent a significant advancement in the development of precision agriculture and autonomous vehicle systems, as data derived from soil colour and moisture content can be used to support vehicle motion planning and adaptation to varying terrain conditions. The research also demonstrated that spectral analysis offers an efficient tool for evaluating soil mechanical properties, complementing traditional laboratory methods while providing a much faster and more cost-effective solution. Overall, the study confirmed that there is a close and statistically interpretable relationship between soil colour, moisture content, and bearing capacity. The practical utilization of these findings could promote the integration of soil mechanical and remote sensing data, thereby contributing to improving the efficiency and sustainability of agricultural production, as well as supporting the development of future autonomous, precision-based technological systems.

8. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni hálámat és őszinte köszönetemet témavezetőmnek, Dr. Kiss Péter egyetemi tanárnak, aki szakmai útmutatásával, türelmével és értékes tanácsaival végig támogatta munkám elkészítését. Hálával tartozom Dr. Kotroczi Krisztián egyetemi adjunktusnak, aki külső konzulensi munkájával segítette a dolgozatom elkészülését. Köszönettel tartozom továbbá Dr. Pillinger György egyetemi docensnek a hasznos szakmai észrevételekért, valamint építő jellegű javaslataiért, amelyek nagyban hozzájárultak a dolgozat szakmai színvonalához. Hálás vagyok Török Tamás technikusnak is a gyakorlati segítségnyújtásért és a mérések lebonyolításában nyújtott támogatásért, amelyek nélkül a kutatási folyamat nem valósulhatott volna meg.

9. Irodalomjegyzék

1. Araya, S.N., Fryjoff-Hung, A., Anderson, A., Viers, J.H. & Ghezzehei, T.A. (2021): Advances in soil moisture retrieval from multispectral remote sensing using unoccupied aircraft systems and machine learning techniques. *Hydrology and Earth System Sciences*: 25, pp. 2739–2758. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2739-2021>
2. Balestrieri, E., Daponte, P., De Vito, L. and Lamonaca, F. (2021): Sensors and measurements for unmanned systems: An overview. *Sensors*: 21(4), 1518. <https://doi.org/10.3390/s21041518>
3. Beycimen, Ü., Taş, Ö. & Bayar, G. (2023): Terrain traversability analysis methods for autonomous ground vehicles: A comprehensive survey. *Journal of Terramechanics*: 104, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2023.05.001>
4. Csobó I. (1984): *Talajmechanika*. Budapest: Tankönyvkiadó. 3. p., 12-13. p., 41-45.p.
5. Deng, H., Li, Y., Wu, J. & Zhang, Z. (2023): LLM-AGV: Enhancing autonomous ground vehicle perception and planning with large language models. *arXiv preprint: arXiv:2307.07861*.
6. Fabre, S., Briottet, X. & Lesaignoux, A. (2015): Estimation of Soil Moisture Content from the Spectral Reflectance of Bare Soils in the 0.4–2.5 μm Domain. *Sensors*: 15(2), pp. 3262–3281. <https://doi.org/10.3390/s150203262>
7. Fayyad, J., Jaradat, M.A., Gruyer, D. & Najjaran, H. (2020): Deep Learning Sensor Fusion for Autonomous Vehicle Perception and Localization: A Review. *Sensors*: 20(15), p.4220.
8. Feng, D., Haase-Schuetz, C., Rosenbaum, L., Hertlein, H., Gläser, C., Timm, F., Wiesbeck, W. & Dietmayer, K. (2020): Deep Multi-Modal Object Detection and Semantic Segmentation for Autonomous Driving: Datasets, Methods, and Challenges. *arXiv preprint: arXiv:1902.07830*.
9. Grigorescu, S., Trasnea, B., Cocias, T. & Macesanu, G. (2020): A Survey of Deep Learning Techniques for Autonomous Driving’, *arXiv preprint, arXiv:1910.07738*.
10. Ignatious, F., Arockia, J., Vignesh, R., Baskar, S. & Sudhakar, S. (2022): A review of sensor technology for autonomous vehicles. *Procedia Computer Science*: 200, pp. 739–748.
11. Islam, M.M.M., Nabi, M. & Ball, J.E. (2022): A Comprehensive Survey on Perception Methods for Terrain Traversability of Unmanned Ground Vehicles. *Sensors*: 22(21), p.8463.
12. Jáky J. (1933): *A talajmechanika alapfogalmai és technikai alkalmazásuk*. Budapest: Királyi Magyar Egyetemi Nyomda. 5-7. p.
13. Kádár J (2011): *Talajmechanika, alapozás*. Budapest: Műszaki Kiadó. 31-45. p.
14. Kézdi Á. (1952): *Talajmechanika I*. Budapest: Tankönyvkiadó. 20-21. p., 119-120. p.
15. Kiss P., Kiss B. L., Böröczky A. (2021): A terepi járműmozgást befolyásoló tényezők, I. rész. *Haditechnika*: 55/6, 44-46.
16. Kiss P., Kiss B. L., Böröczky A. (2022a): A terepi járműmozgást befolyásoló tényezők, II. rész. *Haditechnika*: 56/1, 56.
17. Kiss P., Kiss B. L., Böröczky A. (2022b): A terepi járműmozgást befolyásoló tényezők, III. rész. *Haditechnika*: 56/2, 48.
18. Kiss P., Kiss B. L., Böröczky A. (2022c): A terepi járműmozgást befolyásoló tényezők, IV. rész. *Haditechnika*: 56/3, 55-58.

19. Leone, A.P., Leone, G., Leone, N., Galeone, C., Grilli, E., Orefice, N. & Ancona, V. (2019): Capability of Diffuse Reflectance Spectroscopy to Predict Soil Water Retention and Related Soil Properties in an Irrigated Lowland District of Southern Italy. *Water*: 11(8), 1712. <https://doi.org/10.3390/w11081712>
20. Li, Y., Ma, L., Zhong, Z., Liu, F., Cao, D., Li, J. & Chapman, M.A. (2020): Deep Learning for LiDAR Point Clouds in Autonomous Driving: A Review. *arXiv preprint: arXiv:2005.09830*.
21. Liu, Q., Yuan, S. & Li, Z. (2020): A Survey on Sensor Technologies for Unmanned Ground Vehicles. *arXiv preprint: arXiv:2007.01992*.
22. Liu, Z., Zhao, L., Peng, Y., Wang, G. & Hu, Y. (2020) Improving Estimation of Soil Moisture Content Using a Modified Soil Thermal Inertia Model. *Remote Sensing*: 12(11), p.1719. doi:10.3390/rs12111719.
23. McGuirk, S.L. & Cairns, I.H. (2022): Soil Moisture Prediction with Multispectral Visible and NIR Remote Sensing. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*: V-3-2022, pp. 447–453. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-3-2022-447-2022>
24. McGuirk, S.L. & Cairns, I.H. (2024): Soil moisture thresholds in VIS–NIR spectroscopy: implications for soil parameter retrieval. *Geotechnics*: 4(1), pp. 67–82. <https://doi.org/10.3390/geotechnics4010005>
25. Nowakowski, A. & Kuryło, P. (2023): Autonomous navigation of unmanned ground vehicles in forest environments: LiDAR point cloud analysis and traversability estimation. *Applied Sciences*: 13(11), 4892. <https://doi.org/10.3390/app13104892>
26. Parekh, D., Vasavada, S., Panchal, D., Modi, K., Dey, N. & Ashour, A.S. (2022): Autonomous vehicles: perception, decision-making, planning, control, and security. *Electronics*: 11(13), p.2162.
27. Park, H., Kim, J. & Kim, J. (2024): LiDAR-based obstacle detection and environment perception in unstructured outdoor terrains: Challenges and advances. *Sensors*: 24(19), 1909. <https://doi.org/10.3390/s24190909>
28. Petrasovits, G (1975): *Talajmechanika*. Budapest: Magyar Állami Földhivatali Intézet. 6-13. p.
29. Piccini, C., Metzger, K., Debaene, G., Stenberg, B., Götzinger, S., Borůvka, L., Sandén, T., Bragazza, L. & Liebisch, F. (2024): In-field soil spectroscopy in Vis–NIR range for fast and reliable soil analysis: A review. *European Journal of Soil Science*: 75, e13481. <https://doi.org/10.1111/ejss.13481>
30. Rankin, A., Huertas, A. & Matthies, L. (2010): Passive sensor evaluation for unmanned ground vehicle mud detection. *Journal of Field Robotics*: 27(4), 473–490. <https://doi.org/10.1002/rob.20343>
31. Szilvágyi I. (1955): *Korszerű talajmechanikai laboratóriumi vizsgálatok, kézirat*. Budapest: Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat. 3. p.
32. Tsimpidi, I., Tevetzidis, I., Sumathy, V., Nikolakopoulos, G. (2025): Design and evaluation of a UGV-based robotic platform for precision soil moisture remote sensing. *arXiv preprint: arXiv:2504.18284*.
33. Vertse D. (szerk.) (1957): *MSZ Szabványgyűjtemények 20. Alapozások Tervezése I. Rész (Talajmechanika. Alapozás.)*. Budapest: Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó. 43-44. p.

34. Wong, Y.G. (2010): Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering: Terrain Behaviour, Off-Road Vehicle Performance and Design. Ottawa: Carleton University. 2-3. p., 15-19. p.
35. Yuan, J., Wang, X., Yan, C., Wang, S., Ju, X. & Li, Y. (2019): Soil Moisture Retrieval Model for Remote Sensing Using Reflected Hyperspectral Information. Remote Sensing: 11(3), 366. <https://doi.org/10.3390/rs11030366>
36. Zhan, Z., Qin, Q., Ghulam, A. & Wang, D. (2007): NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring. Science in China Series D: Earth Sciences: 50(2), pp. 283–289. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-2004-6>

10. Nyilatkozatok

MATE Szervezeti és Működési Szabályzat

III. Hallgatói Követelményrendszer

III.1. Tanulmányi és Vizsgaszabályzat

**6.13. sz. függelék: A MATE egységes szakdolgozat /
diplomadolgozat / záródolgozat / portfólió készítési útmutatója**

**4.2. sz. melléklete: Nyilatkozat a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió nyilvános
hozzáféréseiről és eredetiségéről (módosítva: 2025. október 16.)**

NYILATKOZAT diplomadolgozat nyilvános hozzáféréseiről és eredetiségéről

A hallgató neve: Fekete Nimród
A Hallgató Neptun kódja: BLCPU2
A dolgozat címe: A talaj színének, nedvességtartalmának és hordképességének kapcsolata
A megjelenés éve: 2025
A konzulens intézetének neve: Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Járműtechnika Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott diplomadolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem. Továbbá kijelentem, hogy a dolgozat elkészítése során alkalmazott mesterséges intelligencia-eszközök (pl. szöveggenerálás, nyelvi javítás, fordítás, adatelemzés) használata nem helyettesítette a saját kutatási és alkotói munkámat, azok alkalmazását a források között vagy a módszertani részben feltüntettem, és a szakmai-etikai elvárásoknak megfelelően jártam el.

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 mindenkor szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitóri rendszerébe. 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 könyvtári repozitóri rendszerében.

Kelt 2025. év 10. hó 31. nap


Hallgató aláírása

NYILATKOZAT

Fekete Nimród (hallgató Neptun azonosítója: BLCPU2) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a diplomadolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A diplomadolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / nem javaslom¹.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*2}

Kelt 2025. 11. 03.



belső konzulens

MATE Szervezeti és Működési Szabályzat

III. Hallgatói Követelményrendszer

III.1. Tanulmányi és Vizsgaszabályzat

6.13. sz. függeléke: A MATE egységes szakdolgozat /
diplomadolgozat / záródolgozat / portfólió készítési útmutatója

7. sz. melléklete: Műszaki Intézet külső konzulensi nyilatkozat

KÜLSŐ KONZULENSI NYILATKOZAT

Tekete László (név) (hallgató Neptun azonosítója: BLCPU2)

külső konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon rendszeresen megjelent.

Kelt: BUDAPEST év 10 hó 30 nap



külső konzulens

Hallgatók, doktoranduszok nyilatkozata mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásáról

1. Általános adatok

Hallgató neve:	Fekete Nimród
Neptun-kódja:	BLCPU2
Képzési szint (a megfelelőt jelölje X-szel):	☐ BSc/BA ☒ MSc/MA ☐ Doktori (PhD) ☐ Egyéb:
Tantárgy neve/kódja*:	Diplomadolgozat
A munka címe:	A talaj színének, nedvességtartalmának és hordképességének kapcsolata

* doktori értekezés esetén nem kitöltendő

2. Nyilatkozat az MI használatáról

Alulírott, etikai felelősségem teljes tudatában az alábbi nyilatkozatot teszem:

(Kérjük, válasszon egyet az alábbi lehetőségek közül!)

☒ A) Nem alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Amennyiben ezt jelölte, a további táblázatok kitöltése nem szükséges.)

☐ B) Alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Kérjük, töltsse ki a vonatkozó táblázatokat!)

3. A mesterséges intelligencia használatának részletezése

I. TÁBLÁZAT: Asszisztensi vagy kisebb mértékű felhasználás (pl. fordítás, nyelvi korrektúra, ötletelés stb.)

(Ezen felhasználások esetében a konkrét promptok és válaszok csatolása nem szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve és verziója	Érintett rész (ha nem a szöveg egészére vonatkozik)

II. TÁBLÁZAT: Jelentős tartalmi hozzájárulás (pl. egy teljes ábra vagy egy hosszabb szövegrész generálása)

(Ezekben az esetekben a felhasznált kulcsfontosságú promptok és az MI által adott nyers válaszok dokumentálása és a munka **mellékletében való csatolása szükséges.**)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve,	Az érintett fejezet / ábra / táblázat pontos sorszáma	A prompt-naplót tartalmazó melléklet

	verziója, elérhetősége		bejegyzésének sorszáma

3/A. Oktató által előírt kiegészítő szabályok (ha vannak)

Amennyiben az adott tantárgy oktatója vagy témavezetője az MI-eszközök használatára vonatkozóan külön szabályokat vagy elvárásokat határozott meg, kérjük, az alábbi mezőben foglalja össze ezeket:

Pl. az MI használatának tilalma bizonyos feladattípusokra; csak konkrét eszköz használata engedélyezett; eltérő hivatkozási elvárások; dokumentációs forma stb.

Oktató vagy témavezető által előírt szabályok:

.....

.....

.....

.....

4. Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozat:

Kijelentem, hogy az MI által esetlegesen generált tartalmakat minden esetben kritikailag felülvizsgáltam, szerkesztettem és a munkába illesztettem. A leadott munka minden eleméért, annak eredetiségéért és tudományos helytállóságáért teljes körű felelősséget vállalok. Tudomásul veszem, hogy a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem a benyújtott munkát mesterséges intelligencia detektorral ellenőrizheti, és eljárást kezdeményezhet, amennyiben a nyilatkozatom valótlan vagy hiányos.

Kelt: Gödöllő, 2025. 11. hó 3 nap

Hallgató aláírása

Konzulens/Témavezető aláírása