

Prof. dr. Kiss Péter*–Kiss Botond Levente**–Böröczky András***

A terepi járműmozgást befolyásoló tényezők I. rész

Kerék–pálya kapcsolat, a terep tulajdonságai

ELŐZMÉNYEK

Épített utak hiányában az emberi helyváltoztatás évezredek óta keresztül terepen zajlott. A kereket az emberiség körülbelül i. e. 3500-tól alkalmazza, a lánctalpat pedig a XX. század elejétől. A motor- és autótechnika megjelenéséig a kerekes járművek (szekerek, majd később a hintók) legnagyobb sebességét a vontatásra használt emberi vagy állati erő korlátozta. Míg a szekerek semmilyen rugózással nem rendelkeztek, addig a hintókat – a terep egyenetlenségeinek csillapítása és a nagyobb sebesség elérése érdekében – szíjakra függesztették fel. Az akkori járművek számára is kihívásnak számított a terepjárás problémája: puha, ingoványos talajon gyakran elsüllyedtek, a hintók gyors haladaskor, a terep egyenetlenségei gerjesztette lengések következtében felborultak. Bár az elszenvetett balesetek tapasztalatai nyomán fejlődött a korabeli kocsiépítés, azonban a terep–jármű kapcsolat tudományos igényű kutatásáról sokáig nem beszélhettünk. Az áttörést a belső égésű motor megjelenése hozta, amelyet a járműbe építve, a sebesség jelentősen növelhető. Az évezredek óta keresztül alkalmazott „kocsitechnikát” felváltotta az autótechnika. A fúvott gumibroncs, majd a járműrugózás és lengéscsillapítás jelentős sebességnövekedést tett lehetővé. A járműtechnika fejlődése az utak minőségének javulását is eredményezte, mivel az egyre nagyobb sebességhez, egyre jobb minőségű, simább utakra volt szükség.

A járműtechnikai fejlődés a terepjáró járművek körében is megfigyelhető. Az 1900-as évek elején megjelentek a mezőgazdasági traktorok, kerekes és lánctalpas változatban egyaránt, majd az I. világháborúban csatasorba állt az első tank, amelynek prototípusa látható az 1. ábrán. A haditechnikai fejlesztés sokat lendített a terepjáró járművek fejlődésén.



1. ábra. Little Willie, a világ első működőképes tankja [4]

Megkezdődött a mai értelemben korszerűnek mondott terepjáráselméleti kutatás. Felismerték azt az alapvető törvényszerűséget, hogy a jármű terepen történő fennmaradását és mozgását a talaj ellenálló képessége teszi lehetővé. A talaj típusa, felszíne lényegesen meghatározza a jármű mozgását, haladását.

A TEREPJÁRÁS-ELMÉLET ALKALMAZÁSA, KERÉK–PÁLYA KAPCSOLATOK

A kerék–pálya kapcsolatot négy csoportba sorolhatjuk:

1. merev kerék és merev pálya kapcsolat;
2. merev kerék és deformálódó pálya kapcsolat;
3. deformálódó kerék és merev pálya kapcsolat;
4. deformálódó kerék és deformálódó pálya kapcsolat.

A felsorolt csoportokat modelleknek is nevezzük. Az első modell a vasúti kerék és sín kapcsolata. Rögtön hozzá kell

ÖSSZEFOGLALÁS: A terepen mozgó járművek jellemzően kerekes futóművel, lánctalpas járószerkezettel vagy ezek kombinációjával rendelkeznek. A terepi járműmozgást számos tényező befolyásolja, amelyeket három csoportban foglalhatunk össze: járműparaméterek, terep- és talajparaméterek, valamint a jármű mozgását befolyásoló emberi tényezők. A tanulmány sorozat első része a terep- és talajjellemzőkkel foglalkozik, valamint bemutatja a terep és a talaj járműmozgást befolyásoló hatásait, a jármű és a terep kapcsolatát.

KULCSSZAVAK: terepjárás, talajmechanika, kerék–pálya kapcsolatok, terep tulajdonságai, járműdinamika

ABSTRACT: This article is the first one in a four-part series of articles covering the basics of off-road vehicle movement. Off-road vehicles typically have wheeled undercarriages, tracked undercarriages or a combination of both. Off-road vehicle movement is influenced by a number of factors, which can be grouped into three categories. Vehicle parameters, terrain and ground parameters and human factors affecting vehicle movement. This paper deals with the first group of factors, terrain and soil characteristics, in more detail and describes the influences of terrain and soil, the connection between vehicle and terrain.

KEY WORDS: Land Locomotion, Soil Mechanics, Wheel-Track Connections, Terrain Properties, Vehicle Dynamics

* Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet, Járműtechnika Tanszék. Egyetemi tanár, tanszékvezető. ORCID: 0000-0002-5265-8133
 ** Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet, MSc hallgató. ORCID: 0000-0002-7003-1289
 *** Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Műszaki Intézet, MSc hallgató. ORCID: 0000-0003-4897-9601

tennünk, hogy valóságban teljesen merev test nem létezik, így a merevnek mondott kerék és pálya valójában deformálódik. Az elszorított igen kismértékű deformáció azonban elhanyagolható a számításokban, ezért figyelmen kívül hagyják. A vasúti kerék és sín kapcsolat adja a legkisebb gördülési ellenállási tényezőt, amely ezred nagyságrendű. Merev kerék és deformálódó pálya kapcsolatáról beszélhetünk a vas- és fémkereű földmunkagépek, és a régebben alkalmazott vaskereű mezőgazdasági gépek esetében. A deformálódó kerék és merev pálya kapcsolata a közúti közlekedés modellje. Az autótechnikában használt gumibroncsok menet közben deformálódnak, míg az útfelület deformációja a jármű haladása során elhanyagolhatóan kicsi. Ebben a kapcsolatban a gördülési ellenállási tényező jellemzően század nagyságrendű. A negyedik, és egyben a legbonyolultabb modell, a terepen mozgó járművek (terepjárók, mezőgazdasági, erdőgazdasági gépek) modellje. Ebben a modellben gördülés, haladás közben szinte mindig fizikai paraméter változik. Változik a kerék és a pálya alakja, változnak a gördülési sugarak, abszolút és relatív csúszások lépnek fel az érintkezési felület mentén, változik a kerékterhelés és változnak a deformációk is. Itt sem a kerék, sem a pálya deformációja nem hanyagolható el. A modellre jellemző gördülési ellenállási tényező tízed nagyságrendű. Megnevezve a modellben egymásra ható elemeket, ezt a modellt gumibroncs–talaj kapcsolatnak is hívjuk.

Hasonló csoportosítás tehető a lánctalp–pálya kapcsolat esetén. A lánctalpas járószerkezetek kialakítástól függően lehetnek merevek és deformálódóak attól függően, hogy tartalmazznak-e rugalmas (rugózó vagy csillapító) elemeket.

A terepen mozgó járműveknél a terepjáráseleméleti kutatások eredményét használjuk fel. A teljesség igénye nélkül idetartoznak a mezőgazdasági és erdőgazdasági járművek, a katonai és civil terepjárók, a bánya- és földmunkagépek, valamint az űrtechnika fejlődésével megjelenő égitestjárművek (hold- és marsjármű). Az eltérő alkalmazási célok jellemzően a terepjáráselemélet különböző eredményeit hasznosítják. A katonai és civil terepjárók esetén az elsődleges cél a jármű mozgásképségének megtartása. A mezőgazdasági járműveknél azonban, a mozgásképes-

ség mellett – a talaj termőképességének óvása miatt – igen fontos szempont a talajtaposás, tömörítés csökkentése. A kifejezetten terepre készült járművek mellett megjelentek az ún. hobbiterepjárók, sportcélú vagy haszonjárművek (SUV – sport utility vehicle). Ezek a járművek alapvetően szilárd burkolatú közútra készültek, azonban a nagyobb motorteljesítmény, a magasabb hasmagasság, ballonosabb, nagyobb gumibroncsok és a speciális hajtómű (felező, összkerekhajtás, differenciálzár) miatt könnyebb terepre is alkalmasak.

A JÁRMŰMOZGÁST BEFOLYÁSOLÓ PARAMÉTEREK

Terepen a járműmozgást számos paraméter és függvény befolyásolja, amelyeket három fő csoportba sorolhatunk:

1. terepre vonatkozó paraméterek és függvények;
2. járműre vonatkozó paraméterek és függvények;
3. a jármű vezetőjére vonatkozó paraméterek és függvények.

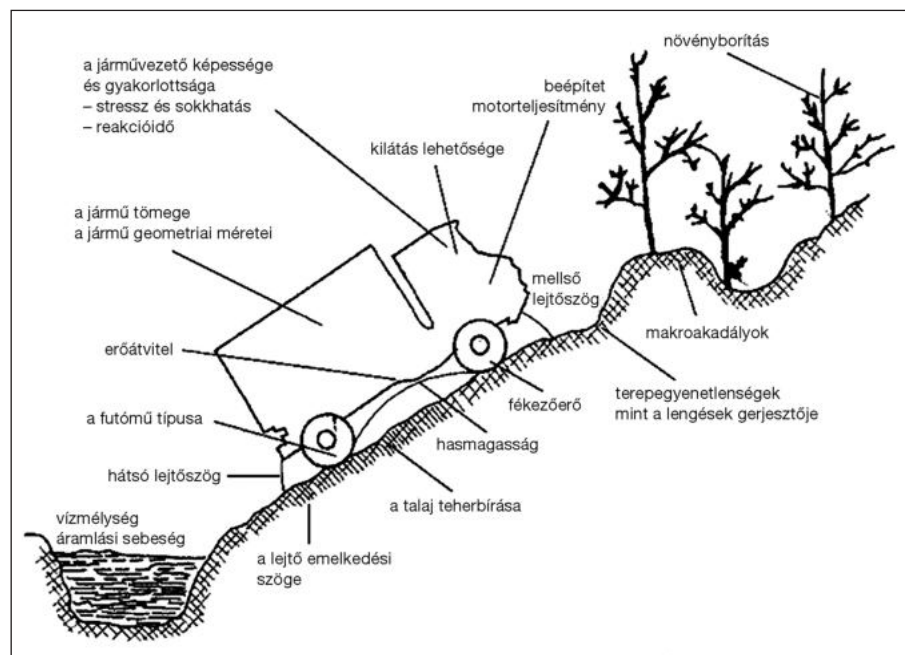
A járműmozgást alapvetően meghatározza a terep, amelynek tulajdonságai jelentősen befolyásolják a jármű sebességét. A terep sajátosságaihoz tartozik a lejtőszög, a terep makroakadályai, a mikroakadályok, a növényzet, a talaj típusa és mechanikai tulajdonságai (2. ábra).

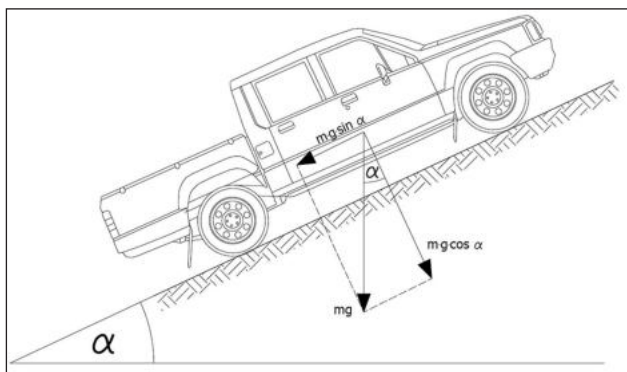
A LEJTŐSZÖG ÉS A JÁRMŰ STABILITÁSA

A közutak lejtésének maximális értéke korlátozva van, a terepen azonban nincs ilyen korlátozás, ezért a jármű lejtőmászó képessége fontos járműtervezési kritérium. Az emelkedő a hátsó kerekeken, a lejtő a mellső kerekeken terhelésnövekedést eredményez. Lejtőn történő haladásakor, a lejtővel párhuzamos erő is ébred. Az erő nagysága szögfüggvényrel meghatározható (3. ábra). A jármű kanyarodása közben szintén oldalirányú erő hat. Ez fokozottan veszélyes a lejtőn végzett haladásakor, mert a létrejövő oldalirányú erők összeadódnak. A terepre merőleges erők stabilizálják, a tereppel párhuzamos oldalirányú, előre- vagy hátramutató erők borításra vagy oldalirányú kicsúszásra készítik a járművet. A jármű helyzete mindaddig stabil, amíg az ébredő erők eredőjének hatásvonalja a jármű felfekvési felületén belül mutat. (A jármű felfekvési felületén egyszerű esetben a négy kerék talppontja által határolt négyszög területét értjük.) Ha az eredő erő hatásvonalja a felfekvési felületen kívülre esik, akkor a jármű felborul. Létrejöhét oldalirányú csúszás is, ha a kerék–pálya közötti tapadás kisebb, mint az ébredő oldalirányú erő nagysága.

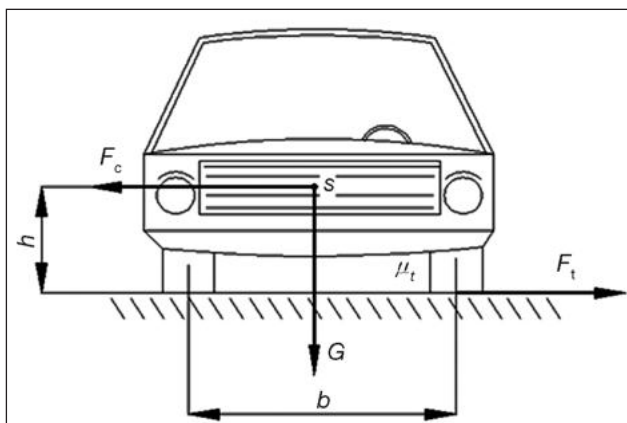
A 4. ábra a jármű oldalirányú erő hatására bekövetkező kicsúszását mutatja. Ez az eset jellemzően akkor következik be, ha a jármű súlypontja alacsonyan helyezkedik el. A csúszás addig nem következik be, amíg az oldalirányú erő (F_y) kisebb vagy egyenlő a tapadási erővel (F_x). ➔

2. ábra. A járműmozgást befolyásoló paraméterrendszerek és függvénykapcsolatok [2]





3. ábra. A járműre ható erők lejtőn (A szerzők szerkesztése)



4. ábra. A jármű oldalirányú erő hatására bekövetkező kicsúszása (A szerzők szerkesztése)

Az erőegyenletből a kanyarodás maximális sebessége meghatározható.

Az 5. ábra a jármű oldalirányú erő hatására bekövetkező borulását mutatja. Ez az eset jellemzően akkor következik be, ha a jármű súlypontja magasan helyezkedik el.

A jármű súlyereje:

$$G = m \cdot g, \quad (1)$$

ahol: m – a jármű tömege [kg],
 g – a gravitációs gyorsulás ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Kanyarodáskor a járműre ható oldalirányú erő:

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

ahol:

v – a jármű sebessége [m/s],
 r – a kanyarodási sugár [m].

Az oldalirányú erővel szemben a tapadási erő hat:

$$F_t = m \cdot g \cdot \mu_t \quad (3)$$

ahol: μ_t – a tapadási tényező ($\mu_t = 0,1-0,7$) [-].

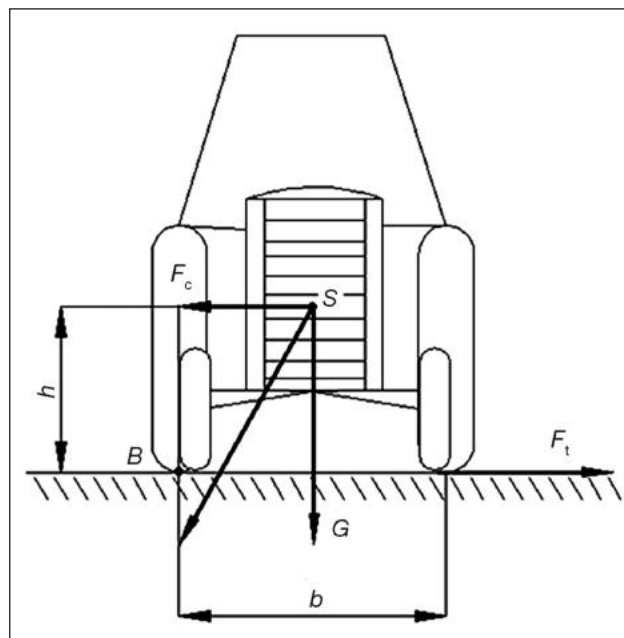
A jármű kicsúszása nem következik be, ha a tapadási erő nagyobb vagy egyenlő, mint az oldalirányú erő:

$$F_c \leq F_t \quad (4)$$

A (2) és (3) egyenletet behelyettesítve, a maximális kanyarodási sebesség kifejezhető:

$$m \cdot \frac{v^2}{r} \leq m \cdot g \cdot \mu_t \quad (5)$$

$$v_{\max} \leq \sqrt{r \cdot g \cdot \mu_t} \quad (6)$$



5. ábra. A jármű oldalirányú erő hatására bekövetkező borulása (A szerzők szerkesztése)

A jármű oldalra borulását vizsgálva kanyarodás közben, a súlyerő, az oldalirányú erő és a tapadási erő a már ismert módon alakul:

$$G = m \cdot g \quad (7)$$

$$F_c = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad (8)$$

$$F_t = m \cdot g \cdot \mu_t \quad (9)$$

A járműre ható oldalirányú erő miatt a kerék talppontja körül ébredő nyomaték:

$$M_b = F_c \cdot h \quad (10)$$

ahol: h – a jármű súlypontjának magassága [m].

A súlyerő stabilizáló nyomatéka:

$$M_{st} = G \cdot \frac{b}{2} \quad (11)$$

ahol: b – a jármű nyomtávja [m].

Egyensúly esetén a két nyomaték egyenlő:

$$M_b = M_{st} \quad (12)$$

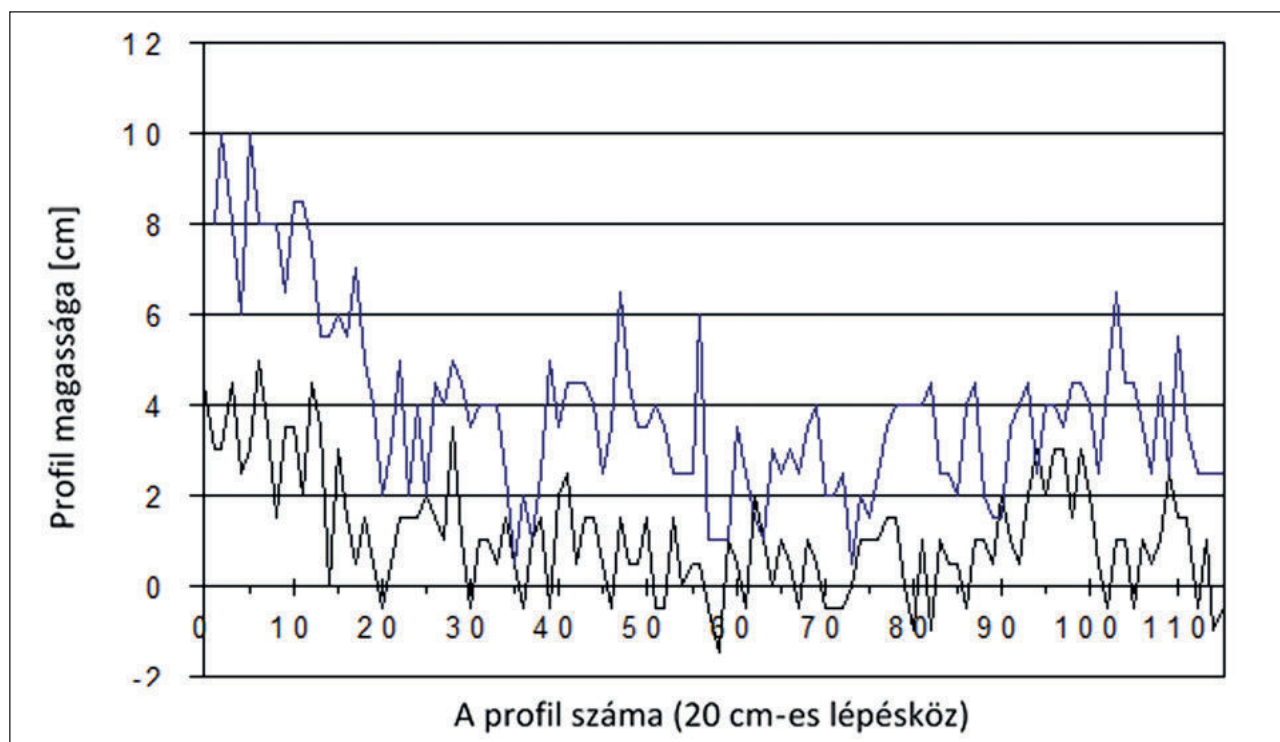
A (10) és (11) egyenletet behelyettesítve, a maximális sebességet kifejezhetjük:

$$m \cdot \frac{v^2}{r} \cdot h = m \cdot g \cdot \frac{b}{2} \quad (13)$$

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{r \cdot g \cdot b}{2 \cdot h}} \quad (14)$$

MAKROAKADÁLYOK

A 0,25 m-nél nagyobb egyenetlenségeket makroakadályoknak nevezzük. Ide tartoznak a nagyobb kövek, sziklák, árkok, vízmosások, kidőlt fatörzsek, valamint a patak- és folyómedrek is. A jármű geometriája (melső és hátsó kinyúlás, szabad hasmagasság) alapvetően befolyásolja a leküzdhető makroakadály nagyságát.



6. ábra. A jármű előtt mért szűz- (kék vonal) és deformált profil (fekete vonal), homokos vályog tarlón [1]

MIKROAKADÁLYOK

Mikroakadályoknak, más néven terepprofilnak a talajfelszín érdességét nevezzük, amely mérhető tereptulajdonság. Megkülönböztetünk deformálatlan, és a jármű áthaladása után mért deformált profilt (6. ábra). A terepprofil jelentősen befolyásolja a jármű függőleges lengéseit. A lengést gerjesztő profilt ható profilnak nevezzük. A lengések a jármű stabilitására is hatással lehetnek, kedvezőtlen esetben a jármű fel is borulhat, azonban a lengések nemcsak a járműre, hanem a személyzetre és a vezetőre is hatnak. Ebből adódóan a terepen alkalmazott maximális sebességet a vezető pszichológiai tűrőképessége határozza meg.

NÖVÉNYZET

A növényzet gátolhatja, vagy segítheti a jármű mozgását. A nagyobb növények, fák, bozót, bokrok gátolják a járművek mozgását, mert köztük a manőverezés, a kormányzás nehéz, a fordulási kör akadályozott. A gyepek növényei azonban segíthetik a jármű ingoványos, süppedékes területen történő áthaladását.

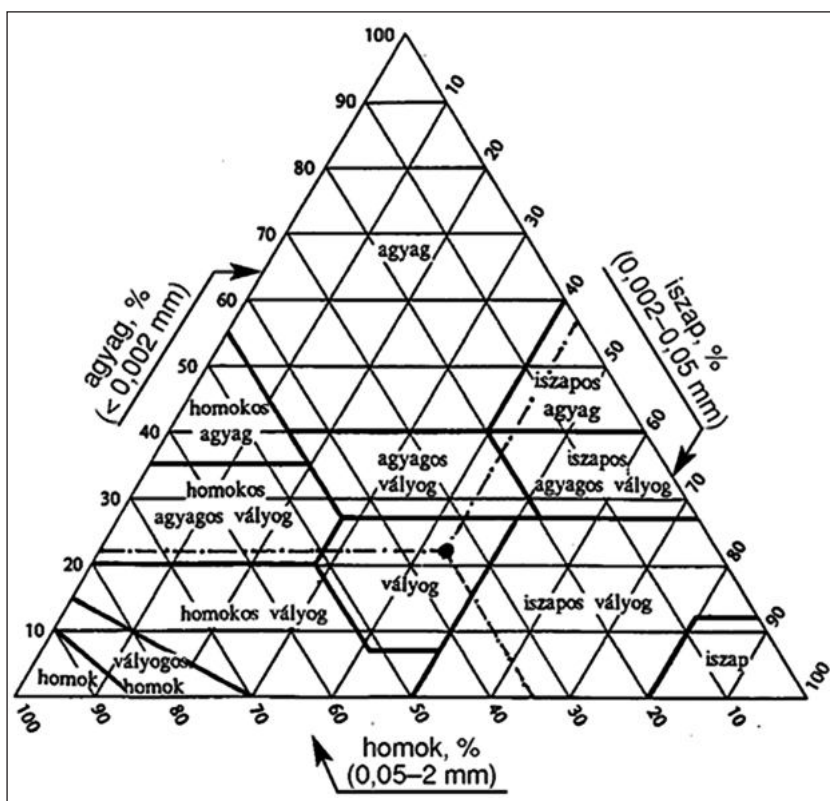
A TALAJ TÍPUSA

A talaj a szilárd földkéreg legkülső, laza takarója. Az egyik legfontosabb tulajdonsága a termékenység, vagyis az a képessége, hogy megfelelő időben és a szükséges mennyiségben képes a növényeket vízzel és tápanyagokkal ellátni. Olyan természeti erőforrás, amely az élő és élettelen természettel szoros kölcsönhatásban folyamatosan képes megújulni. Az alatta fekvő kőzettel, a vízzel, a levegővel és az élővilággal együtt a természeti környezet része, emellett ősidőktől fogva az ember legfontosabb termelőeszköze. A köztudatban úgy terjedt el, hogy a talaj a legfelső, meg-

művelt réteg, azonban a növények gyökerei jóval mélyebbre is lehatolnak. Valójában talajnak tekinthető a felszíntől az elmállatlan kőzetig terjedő – néhol vékonyabb, másutt vastagabb, átlagosan 1,5–2 m vastagságú – réteg. Ennek függőleges metszete a talajszelvény. Bár a talaj nagyrészt nem reakcióképes vázanyagokból áll, jellegzetes kémiai és fizikai tulajdonságait mégis a jóval kisebb mennyiségben jelen levő reakcióképes, kolloid állapotú anyagok határozzák meg. Ezek biztosítják a felületet a talajban lezajló kémiai folyamatokhoz. Aktivitásukat elsősorban nagy fajlagos felületüknek, és legtöbbször jelentős felületi töltéseiknek köszönhetik. A talajban előforduló vas- és alumínium-hidroxidok savas közegben pozitív töltésűek, így anionok megkötésére képesek, míg lúgos kémhatás mellett töltésük negatív lesz, és ekkor kationokat adszorbeálhatnak. A humuszanyagok molekuláinak a felületén nagy mennyiségű karboxil és fenol hidroxil csoport található. Ezek könnyen adnak le hidrogéniont, ezáltal kation megkötésre alkalmas, negatív töltésű helyek jönnek létre. A humuszanyagok aminocsoportjai pedig pozitív töltést kialakítva anionokat kötnek meg. A szemcsék mérete a kolloid mérettartományba eső (1–500 nm) részecskéktől, a néhány cm átmérőjű közettörmelékekig változhat. A nagy méretű közettörmelék és a kavicsfrakciók csak egyes talajokban fordulnak elő. Az egyes szemcsecsoportok jellemző fizikai tulajdonságokkal bírnak. A különböző méretű részecskék illeszkedéséből származó hézagok nagysága talajonként eltérő. (7. ábra)

- A *homokszemcse-frakció* elemei között jelentéktelen a tapadóerő (kohézió). A nagy átmérőjű pórusok révén jó vízvezető képességű, de a kapilláris mérettartományba eső pórusok kis térfogata miatt kevés vizet tud visszatartani. Ásványi összetételükre jellemző, hogy többnyire a mállásnak, oldódásnak jobban ellenálló részekből (pl. kvarc) állnak.
- Az *iszapfrakció* szemcséi egymáshoz erősebben tapadnak, a szemcsék közötti pórustér viszonylag szűk,





7. ábra. A talaj textúrájának megállapítását szolgáló háromszögi diagram [3]

emiatt a vizet kevésbé vezeti. Több vizet tud visszatartani, mint a homok. A finomabb, 0,2–0,002 mm átmérőjű kőzetlisztszemcséket a víz könnyebben szállítja, és a szél is hosszabban lebegtet. A vízi eredetű üledékeket iszapnak, a folyók árteréből kifúj, szél által szállított anyagot pedig lösznek nevezzük. A lösz átmenetet alkot a laza, és a szilárd kőzetek között.

- Az agyagfrakció szemcséi nagy fajlagos felületűek, számottevő elektromos töltéssel rendelkeznek. A szemcsék közötti tapadóerő jelentős, ezáltal a vizet rosszul vagy egyáltalán nem vezeti, de nagy mennyiségű víz megtartására képes.

A TALAJ MECHANIKAI TULAJDONSÁGAIAT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

A talaj külső, mechanikai terhelésekkel szembeni ellenálló képességét a talaj szilárdsága határozza meg. A talaj szilárdságát meghatározó legfontosabb tulajdonságok a nedvességtartalom, illetve nedvességpotenciál, a szemcse- és agyagásvány-összetétel, a szervesanyag-tartalom, a térfogattömeg és a pórusok mérete.

NEDVESSÉGTARTALOM, NEDVESSÉGPOTENCIÁL

A talajnedvesség fogalma alatt a talajban található víz mennyiségét értjük. Értékét számos módon kifejezhetjük, de a gyakorlatban gravimetrikus és a volumetrikus nedvességtartalom terjedtek el a leginkább. A terepjárás szempontjából fontos megemlíteni továbbá a talajok víztartó képességét. A talajban lévő vízmolekulákra adhéziós, kohéziós és gravitációs erők hatnak. Ezen erők szuperpozíciója határozza meg a talaj víztartó képességét. Minél nagyobb értékűek az adhéziós és kohéziós erők, annál jobb

a talaj víztartó képessége. Ezen képességére jellemző érték az úgynevezett pF-szám. Ugyanannak a talajnak más-más a pF száma a vízzel való telítettségre függvényében. Például a vályogtalajok alacsony nedvességtartalomnál teherbírók és járművel jól járhatóak, még vízzel telített állapotban a jármű elsüllyed benne, a kerekek kipörögnek. Az ún. pF-érték alatt, a víz adott részlegének elszívásához szükséges erő vízoszlop centiméterben kifejezett Schofield-értékének 10-es alapú logaritmusát értjük. [5]

10^5 Pa = 981 cm	
vízoszlopnyomással (~1000 cm):	pF 3;
10^6 Pa = ~ 10 000 cm:	pF 4;
10^7 Pa = ~ 100 000 cm:	pF 5;
10^8 Pa = ~ 1 000 000 cm:	pF 6;
10^9 Pa = ~ 10 000 000 cm:	pF 7.

A TÉRFOGATTÖMEG ÉS A PÓRUSOK MÉRTE

A talaj térfogattömege, sűrűsége és porozitása hasonló jellemzőknek tűnnek, azonban fontos tisztázni közöttük a különbségeket. A talaj *térfogattömege* alatt a nedvességmentes, bolygatatlan szerkezetű, egységnyi térfogatú száraz talaj tömegét értjük. A talaj *sűrűsége* (fajsúlya) alatt pedig a hézag és nedvességmentes egységnyi térfogatú talaj tömegét értjük. A különbség a két érték között tehát a bolygatatlan állapotban, a talajban megtalálható levegő mennyisége.

A talaj *porozitása* ezzel szemben az egységnyi térfogatú, bolygatatlan szerkezetű talaj térfogatszázalékban kifejezett összes hézagterefogatát jelenti. Ebből adódóan a nagyobb porozitással rendelkező talajok lazább szerkezetűek, azaz a külső behatásoknak kevésbé tudnak ellenállni. Abban az esetben, ha a mechanikai terhelés meghaladja a talaj szilárdságát, akkor a talaj pórustere lecsökken, térfogattömege nő. A talaj szilárdsága egy bizonyos tartományon belül, a növekvő nedvességtartalommal csökken.

(Folytatjuk)

HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Kiss Péter. „Terepen mozgó járművek energetikájának egyes kérdései.” PhD doktori értekezés, Gödöllő: Szent István Egyetem, 2001.;
- [2] Laib Lajos. Terepen mozgó járművek. Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 2002.;
- [3] Stefanovits Pál, Filep György, Fülek György. *Talajtan*. Budapest: Mezőgazda Kiadó, 1999.;
- [4] Forrás: <https://tankmuseum.org/tank-nuts/tank-collection/little-willie/> (Letöltés: 2021.04.12.);
- [5] Fülek György (szerk.), *Talajvédelem, talajtan*. Veszprém: Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet, 2011. <https://oszkdk.oszk.hu/storage/00/01/75/46/dd/1/03-Talajtan-talajvedelem.pdf> (Letöltés: 2021.6.7.).