

SZENT ISTVÁN EGYETEM

Közútról lefutó járművek mozgásának
elemzése

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Máthé László

Gödöllő
2014

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki tudományok

vezetője:

Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

témavezető:

Prof. Dr. Laib Lajos
professor emeritus, CSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar
Folyamatmérnöki Intézet

társ témavezető:

Prof. Dr. Kiss Péter
egyetemi tanár, PhD
SZIE, Gépészmérnöki Kar
Folyamatmérnöki Intézet

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezetők jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	5
2.1. A vizsgálatok módszere	5
2.1.1. Mérés betonon	5
2.1.2. Szántóföldi mérés	6
2.1.3. Keréktúrás vizsgálata	7
2.1.4. Mérés hajtott járművel	7
2.1.5. Terepprofil mérés	7
2.1.6. Felfekvési felületek meghatározása	7
2.2. Modell a sebesség meghatározására	8
3. EREDMÉNYEK	10
3.1. Gördülési ellenállási tényezők meghatározása	10
3.2. A túrás jelenségének vizsgálata	14
3.3. Terepre behatoló jármű sebességének meghatározására	16
3.3.1. A modell input adatai	16
3.3.2. A modell output adata	17
3.4. A modell ellenőrzése szabadföldi mérésekkel	17
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	19
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	21
6. ÖSSZEFOGLALÁS	22
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	23

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A kutatás a Nemzeti Technológiai Program „Crash” projecthez kapcsolódva, a Nemzeti Innovációs Hivatal támogatásával valósult meg.

A terepen bekövetkező balesetek számos problémát jelentenek az igazságügyi szakértők számára. HUGEMANN (2007) szakértői könyvében kijelenti, hogy a terepi balesetek számítógépes szimulációval történő elemzése jelenleg csak közelítő eredményt szolgáltat. Szükséges a talajmechanikai paraméterek vizsgálata (LIU és SUBRAMANIA 2009), ami a terepi balesetek értékelését segíteni tudja. A balesetelemzések során szükséges megvizsgálni a talaj és a gumiabroncs kapcsolatát, a talajmechanikai paraméterek hatását a jármű mozgására.

Célom, hogy számítással meghatározzam a pályát elhagyó és terepre behatoló jármű sebességét. A számításhoz olyan összefüggést dolgozok ki, amelyben a bemenő paraméterek könnyen mérhető vagy megadható adatok. Az igazságügyi szakértők számára korlátozott lehetőségek állnak rendelkezésre, ezért a baleset helyszínén felvehető és egyszerűen meghatározható paraméterekre van szükség.

A terepre behatoló jármű, mozgási energiával rendelkezik, ami terepen a menetellenállások, lengésgyorsulások és nagyméretű terepakadályok okozta energiavesztés következtében nullára csökken. A pályaelhagyástól a megállásig a sebességváltozás Δv . Ennek meghatározása a számítás célja.

A módszer lényege, hogy a behatolás során a járműre ható ellenállásokat összegezve, a terepen megtett út ismeretében számítom a jármű behatolásának és megállásának sebesség különbségét. Mivel a véghelyzetben a jármű sebessége nulla, a sebességváltozás megegyezik a behatolási sebesség értékével. A terepre behatoló jármű sebességét az útelhagyás módja jelentősen meghatározza, ezért fontos szakaszokra bontani a jármű útját a pályaelhagyástól a végső pozícióig.

További célom, hogy szabadföldi kísérletekkel megvizsgáljam a gördülési ellenállás, keréktúrási esetén a túrási ellenállás, kerékbesüllyedés, abroncs felfekvési felület, abroncs belső légnyomás és talaj hordképesség hatását a jármű mozgására. Ezek a terepre és járműre vonatkozó paraméterek egy pályaelhagyásos baleset során felvehetőek.

Munkám során arra törekszem, hogy olyan módszert vezessek be, amelyet az igazságügyi szakértők egyszerűen tudnak alkalmazni.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A kutatási célkitűzésben leírt modell pontosságának meghatározásához vontatási vizsgálatokat végeztem a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar kísérleti területén.

A szabadföldi mérések célja a gördülési ellenállási tényező meghatározása volt különböző hordképességű (kúpos indexű) talajokon. Amennyiben túrást tapasztaltam, akkor a túrási tényezőt határoztam meg. Hajtott, majd üresben guruló járművel is végeztem ellenőrző méréseket a jármű lassulási úthosszának meghatározása végett. A vontatási vizsgálatokhoz speciális kialakítású vonószerkezetet alkalmaztam, annak érdekében, hogy a vontatott jármű ne az öt vontató traktor nyomvonalán haladjon. A vonóerőt a vonószerkezetre szerelt 50 kN teherbírású erőmérőcellával, a megtett utat fordulatszám jeladóval mértem.

2.1. A vizsgálatok módszere

A különböző kísérleti beállításokat egy betűvel és egy számmal jelöltem (pl.: B1,5), ahol a betűjel utalt a vizsgált terepre (B=beton; T=tarló; H=hántott; K=kultivátorozott), a szám pedig a vizsgálati járművön beállított abroncslégnyomásra (1,5-1,8-2,1-2,4 bar).

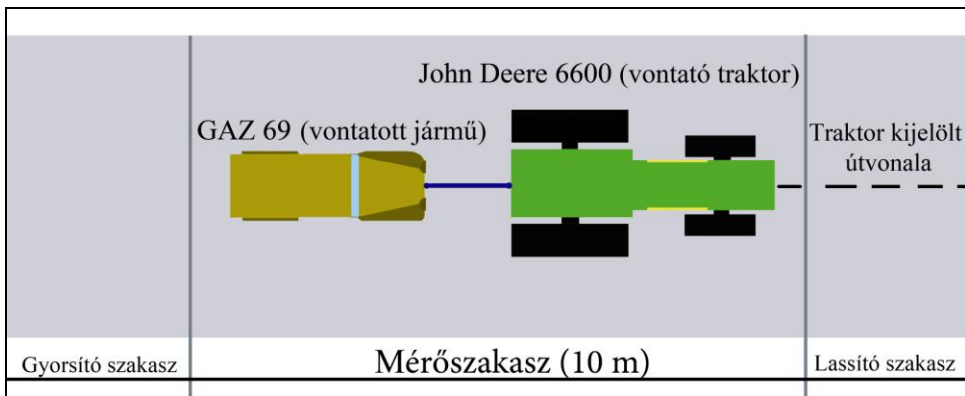
Terepen a kúpos index vizsgálatokat a vontatott jármű mindkét nyomvonalában, vontatás előtt végeztem el. Így a terepi méréseknél a kísérleti beállítás jelölése kiegészül egy betűvel, ami arra utal, hogy a jobb (J) vagy bal (B) oldalon történt a mérés, pl. H1,5J, ami azt jelenti, hogy hántott területen, 1,5 bar abroncslégnyomás mellett, a jobb oldali keréknyomban történt a mérés. Jellemzően ezt a jelölést a kúpos index méréseknél alkalmaztam, vonóerő vizsgálatánál nem kellett ilyen módon részletezni az eredményeket.

A vontatási vizsgálatokat minden esetben 10 km/h állandó sebességgel hajtottam végre.

2.1.1. Mérés betonon

A vizsgálat célja volt, hogy alapadatokat vegyek fel a behatolási sebesség meghatározásához szükséges modellhez. A vontatás betonon a deformálódó kerék - merev pálya kapcsolatnak felel meg, ahol a kialakuló gördülési ellenállás a gumiabroncs deformációjának köszönhető. A mérés során célom volt a gördülési ellenállási tényezők meghatározása az eltérő abroncslégnyomások figyelembevételével. A kapott eredményeket összevetve a terepi mérésekkel meghatározható a gumiabroncs deformációs vesztesége. A vontatott jármű a traktor mögé volt kötve, így mértem a vonóerőt (2.1. ábra).

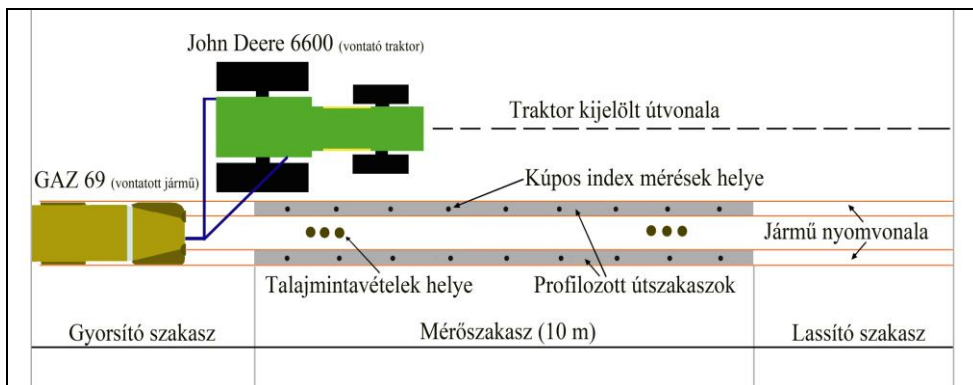
2. Anyag és módszer



2.1. ábra. Vontatási kísérlet betonon.

2.1.2. Szántóföldi mérések

A méréseket 60 m-es vizsgálati szakaszokon hajtottam végre (2.2. ábra) úgy, hogy a kijelölt mérőszakaszok hossza 10 m, a ráfutási és lassítási szakaszok hossza pedig 25-25 m volt. Egy adott talajállapot mellett négy különböző abroncslégnyomással végeztem a méréseket, így tarlón, hántott és a kultivátorozott területen 4 – 4 – 4 mérőszakaszt jelöltem ki. A függőleges irányú talajdeformáció meghatározása érdekében, minden mérést deformálatlan pályaszakaszon végeztem el, így a gumibroncs talajba süllyedésének mértéke ismert volt. A szántóföldi mérések további célja volt, hogy a betonon történt méréshez hasonlóan, alapadatokat vegyek fel a modell felírásához. A mérések során a görbülési ellenállási tényezők meghatározását tűztem ki célul, a különböző talajállapotokon és eltérő abroncslégnyomásokon.



2.2. ábra. Vontatási vizsgálat terepen.

A szántóföldi vontatásnál szükség volt a vonószerkezetre, mivel a traktor mellett, érintetlen területen kellett vontatni a járművet.

2. Anyag és módszer

2.1.3. Keréktúrás vizsgálata

A keréktúrás jelenség vizsgálatához szintén szabadföldi méréseket végeztem, abból a célból, hogy meghatározzam a túrási ellenállási tényező nagyságát. A mérést vontatott járművel végeztem. A vontatás során három különböző sebességre gyorsította fel a traktorvezető a járművet, majd adott jelre fékezni kezdett, és a vontatott jármű kereke túrást idézett elő. A mérések 10-15-20 km/h sebességeknél kerültek elvégzésre, minden esetben érintetlen felületen: tarlón, hántott, és kultivátorozott területen. Miután a kerék belemélyedt a talajba és létrehozta a túrást, megmértem a besüllyedés mértékét, illetve a kerék előtt felhalmozódott talaj magasságát. A vizsgálatok során mértem a vonóerőt.

2.1.4. Mérés hajtott járművel

A mérés célja a jármű sebességének meghatározása volt abban a pillanatban, amikor a terepre érkezik. Ezzel a vizsgálattal elkezdtem a modell pontosságának és érvényességének a meghatározását. A mérések helyszíne füves terület, tarló, hántott- és kultivátorozott talaj volt. A mérést 2,1 bar abroncslégnymáson hajtottam végre. A jármű 10-20-30 km/h sebességre gyorsított fel majd a jármű behatolt egy kijelölt pontnál a terepre. Amikor megállt, megmértem a kijelölt pont és a megállás közötti távolságot. Így megkaptam, hogy az adott kúpos index és kerékbesüllyedés mellett, a menetellenállások hogyan lassítják, majd állítják meg a járművet, és a jármű eközben mennyi utat tett meg.

2.1.5. Terepprofil mérés

A terepprofil felvételével a célom az volt, hogy meghatározzam a talajdeformációt a vontatási vizsgálatok során, különböző talajállapotok mellett. Ennek módja a deformálatlan mérőszakasz és a vontatás utáni, letaposott nyomvonal profilozása. A kettő különbsége szolgáltatja a vontatott jármű alatt keletkező függőleges deformáció nagyságát.

2.1.6. Felfekvési felületek meghatározása

A mérések során az abroncslégnymás változó paraméter volt. Ennek eredményeként a gumiabroncs felfekvési felülete is változott, melyet minden abroncslégnymás változtatást követően, és minden talajállapoton illetve betonon meghatároztam. Betonon indigós papírra lenyomatot hagyott a gumiabroncs, terepen pedig jelölőporral szórtam körbe a gumiabroncsot. Mindkét esetben a hátrahagyott nyomokat ellipszisnek feltételeztem, ennek felületét határoztam meg, melyhez lemértem a nyomok fő átlóit.

2.2. Modell a sebesség meghatározására

A terepre behatoló gépjármű a megállás pillanatáig számos terepi tényezővel találkozhat. Ezek befolyásolják az útját, végső helyzetét és az utasok állapotát. A szakirodalmi áttekintésben részletesen bemutattam a lehetséges terepi balesetek formáit. Az érdemi részben három kiemelt területtel foglalkozom, melyek alapját képezik az összes lehetséges kimenetelnek. Ezek az esetek az alábbiak:

- **A jármű üresen gurulva kifut a terepre, majd megáll.**
- **A jármű motorfék segítségével fékezve kifut a terepre, majd megáll.**
- **A jármű fékezett kerekekkel és motorfékkel kifut a terepre, majd megáll.**

A sebesség meghatározásához ismerni kell az adott talaj gördülési ellenállási tényezőjét, túrás esetén a túrási ellenállási tényezőt. Baleset során csak a nyomok ismertek, illetve a kúpos indexet és a nyommélységet lehet mérni, valamint a talaj típusa beazonosítható. A járműre vonatkozó jellemzők katalógusból, adatbázisból kikereshetők, így a járműjellemzőket ismert bemeneti paraméternek tekinthetjük.

Abból a feltételezésből kiindulva, hogy egy pályaelhagyásos baleset során nem ismerjük a jármű sebességét, csak a terepen hagyott nyomokat, szükséges a balesetet az ellenállások oldaláról vizsgálni, hogy melyek azok az erők, amelyek lassították, majd megállították a járművet. Ha ezeket a gyakorlat számára elfogadható pontossággal meg lehet határozni, a bevezetésben közölt mozgási energiát a következő összefüggéssel lehet egyenlővé tenni, ha a behatoló jármű a terepen “s” hosszúságú úton áll meg:

$$\frac{m \cdot \Delta v^2}{2} = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\int_{s_i}^{s_{i+1}} F_{v_i} \cdot ds + E_{i \text{ lengések}} + E_{i \text{ makroakadályok}} + E_{i \text{ perdület}} \right), \quad (2.1.)$$

ahol:

- m jármű tömege [kg]
- Δv a jármű sebességváltozása a pályaelhagyás után [m/s]
- s megállás úthossza [m]
- F_v vonóerő [N]
- $E_{i \text{ lengések}}$ lengések okozta energiaveszteség [J]
- $E_{i \text{ makroakadályok}}$ makroakadályok okozta energiaveszteség [J]
- $E_{i \text{ perdület}}$ körfordulás esetén a jármű perdülete okozta energiaveszteség [J]

2. Anyag és módszer

A jármű haladó mozgását leíró egyenlet azt fejezi ki, hogy a vonóerő egyenlő a menetellenállások összegével:

$$F_v = F_g + F_{lég} + F_e + F_f + F_{gy} \text{ [N]}, \quad (2.2.)$$

ahol:

- F_v a vonóerő [N]
- F_g a gördülési ellenállás (túrás esetén túrási ellenállás) [N]
- $F_{lég}$ a légellenállás [N]
- F_e az emelkedési ellenállás [N]
- F_f fékerő (motorfék + hajtáslánc ellenállása) [N]
- F_{gy} gyorsító erő (nálam ezt nem kell figyelembe venni, nem gyorsítottunk) [N]

Amennyiben a jármű függőleges tengelye körül megpördül, és a perdülés közelítőleg a tengelytávval, mint sugárral történik, akkor egy teljes perdület energiája:

$$E_{i\text{perdület}} = 2L_t \cdot \pi \frac{m \cdot g}{2} \cdot f_{cs} \text{ [J]}, \quad (2.3.)$$

ahol

- L_t a tengelytáv [m]
- f_{cs} oldalt csúszó kerék ellenállási tényezője [-]

A jármű haladási sebességét jelentősen befolyásolja a perdület, de munkám során a megjelölt három alapesetet vizsgáltam, melyek nem tartalmazzák a jármű körülfordulásának esetét.

Leegyszerűsítve a (2.1.) összefüggést, és csak a menetellenállásokat figyelembe véve, valamint a (2.2.) képletet behelyettesítve a (2.1.) képletbe az alábbi egyszerűsített összefüggést kaptam:

$$\frac{m \cdot \Delta v^2}{2} = \sum_{i=0}^{n-1} \left(\int_{s_i}^{s_{i+1}} (F_{g_i} + F_{e_i} + F_{lég_i} + F_{f_i} + F_{gy_i}) \cdot ds \right). \quad (2.4.)$$

Ha a jármű megáll a terepen, azaz sebessége 0 lesz, a Δv megegyezik a behatolási sebességgel ($v_{\text{behatolási}}$):

$$v_{\text{behatolási}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(\int_{s_i}^{s_{i+1}} (F_{g_i} + F_{e_i} + F_{lég_i} + F_{f_i} + F_{gy_i}) \cdot ds \right)}{m}} \text{ [m/s]}. \quad (2.5.)$$

3. EREDMÉNYEK

A bevezetésben megfogalmazott célkitűzéseknek megfelelően elvégeztem méréseimet. A kísérletek előkészítését, az alkalmazott berendezéseket, eszközöket és mérési módszereket az előző fejezetben ismertettem. Ebben a fejezetben a mért, számolt, illetve az új tudományos eredményeket mutatom be.

3.1. Gördülési ellenállási tényezők meghatározása

A szabadföldi vontatási kísérletek során kapott adatokból meghatároztam minden talajtípuson és minden abroncslégnymóson a talaj gördülési ellenállási tényezőjét. A táblázatban összefoglaltam a számított menetellenállásokat, valamint a mért vonóerőt, a beállított abroncsnyomás értékeit, illetve a területre jellemző meredekségeket is, amelyet a felvett profilgörbe meredekségéből határoztam meg.

A gördülési ellenállási tényező (f_g) felírható volt az alábbi módon:

$$f_g = \frac{F_v \mp m \cdot g \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} \cdot A \cdot c_w \cdot \rho_{\text{levegő}} \cdot v^2}{m \cdot g \cdot \cos \alpha} \quad [-]. \quad (3.1.)$$

A gördülési ellenállási tényező ilyen formában csak akkor határozható meg, ha ismert a vonóerő. A vonóerőt a mérések során az erőmérő cellával mértem. A jármű tömegét talpmérlegek segítségével határoztam meg, továbbá a légellenállás számításához szükséges alapadatok rendelkezésemre álltak. Mivel a mérések állandó 10 km/h-s sebességgel történtek, a légellenállást állandó értéknek tekintettem.

Baleset során csak a terepen hagyott nyomok, terep- és járműjellemzők ismertek, a vonóerő nem. A (3.1.) képlet tehát nem használható abban az esetben, ha a terepre behatoló jármű sebességét akarom felírni, mivel az F_g gördülési ellenállást nem tudom kifejezni az ellenállási tényező hiányában.

A terepre behatoló jármű pályaelhagyási sebességének meghatározásához szükséges a gördülési ellenállási tényező ismerete, amelyet célszerű könnyen meghatározható paraméterek segítségével felírni. A terep- és járműjellemzők felhasználásával felírt gördülési ellenállási tényező meghatározásához felhasználtam a szakirodalomban közölt, egy kerékre vonatkozó gördülési ellenállás (3.2.) és gördülési ellenállási tényező (3.3.) számítását:

$$F'_g = \frac{B \cdot p_{\text{talaj}} \cdot z}{n + 1} \quad [\text{N}], \quad (3.2.)$$

3. Eredmények

$$f'_g = \frac{F_g}{Q} = \frac{B \cdot p_{\text{talaj}} \cdot z}{(n+1) \cdot Q} = \frac{B \cdot z}{(n+1) \cdot A_{\text{abr}}} [-], \quad (3.3.)$$

ahol:

- f'_g gördülési ellenállási tényező egy kerék esetén [-]
- F_g gördülési ellenállás egy kerék esetén [N]
- Q kerékterhelés [N]
- z talajdeformáció (kerékbesüllyedés) [m]
- B gumiabroncs szélessége [m]
- p_{talaj} talajnyomás [Pa]
- A_{abr} gumiabroncs felfekvési felülete [m²]
- n terhelési görbe kitevője [-]

Méréseim alapján meghatároztam a diagonál és radiál abroncsok felfekvési felületének számítását. Diagonál abroncs esetén, a felfekvési felületet az alábbi (3.4.) egyenlet írja le:

$$A_{\text{abr(D)}} = \frac{Q}{10 \cdot p_{\text{abr}} \cdot \left[1,2 - 1,2 \cdot \left(\frac{z}{D} \right)^{0,44} \right]} [\text{cm}^2]. \quad (3.4.)$$

Radiál abroncsoknál az alábbi (3.5.) összefüggés használható:

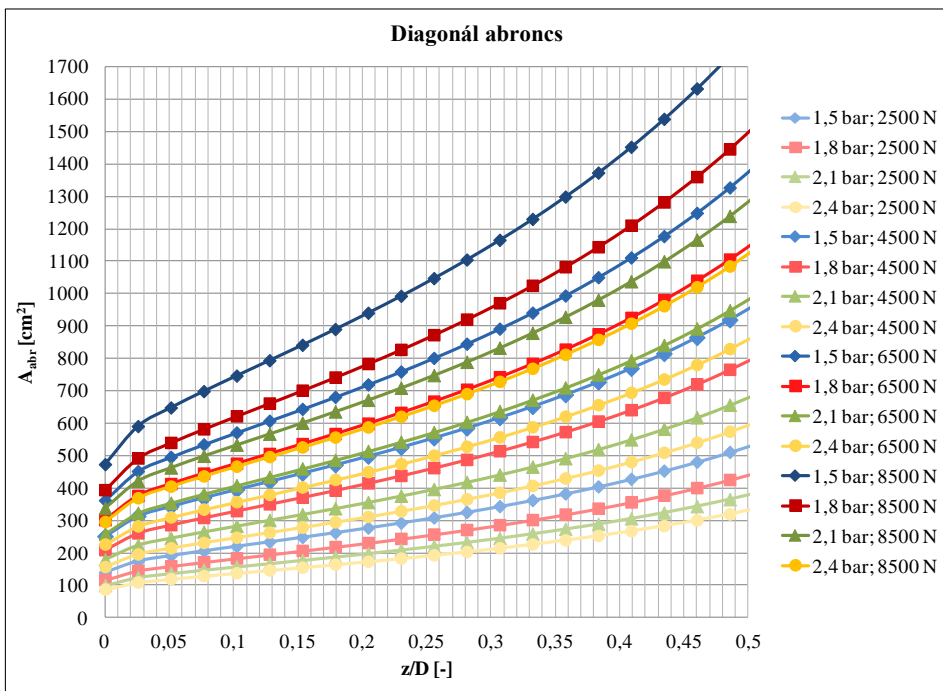
$$A_{\text{abr(R)}} = \frac{Q}{10 \cdot p_{\text{abr}} \cdot \left[0,75 - 0,75 \cdot \left(\frac{z}{D} \right)^{0,44} \right]} [\text{cm}^2]. \quad (3.5.)$$

Ahol Q az egy kerékre eső terhelés [N], p_{abr} a gumiabroncs belső légnyomása [bar], z/D a relatív kerékbesüllyedés [-].

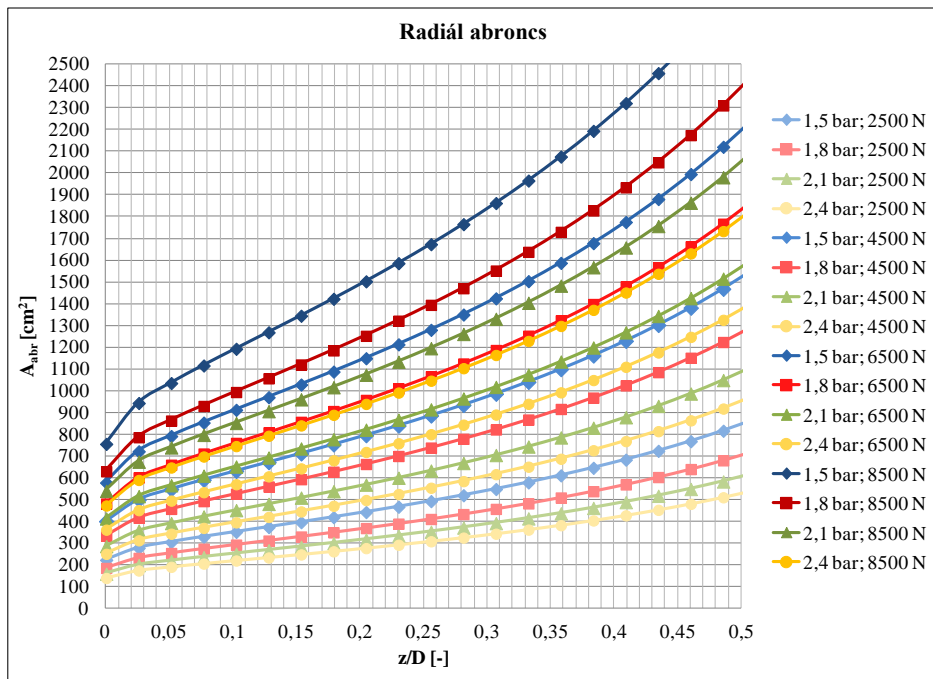
A (3.4.) és (3.5.) összefüggések felhasználásával nomogramokat készítettem (3.1. és 3.2. ábra), annak érdekében, hogy az igazságügyi szakértők, a relatív besüllyedés, az abroncs belső légnyomása és a kerékterhelés ismeretében, gyorsan és egyszerűen meg tudják állapítani az adott gumiabroncs felfekvési felület nagyságát, amely fontos bemenő paraméter a pályaelhagyási sebesség meghatározása során.

A 3.1. és 3.2. ábrákon az azonos abroncslégnyomásokhoz tartozó görbéket azonos színnel, de eltérő telítettséggel jelöltem, így az eltérő kerékterhelések hatása jól megfigyelhető a görbék alakján. A nomogramok készítése során négy abroncslégnyomást (1,5-1,8-2,1-2,4 bar) és négy kerékterhelést vettem figyelembe: $Q_1 = 2500$ N, $Q_2 = 4500$ N, $Q_3 = 6500$ N, $Q_4 = 8500$ N.

3. Eredmények



3.1. ábra. Felfekvési felület a relatív besüllyedés függvényében, diagonál abroncsok esetén.



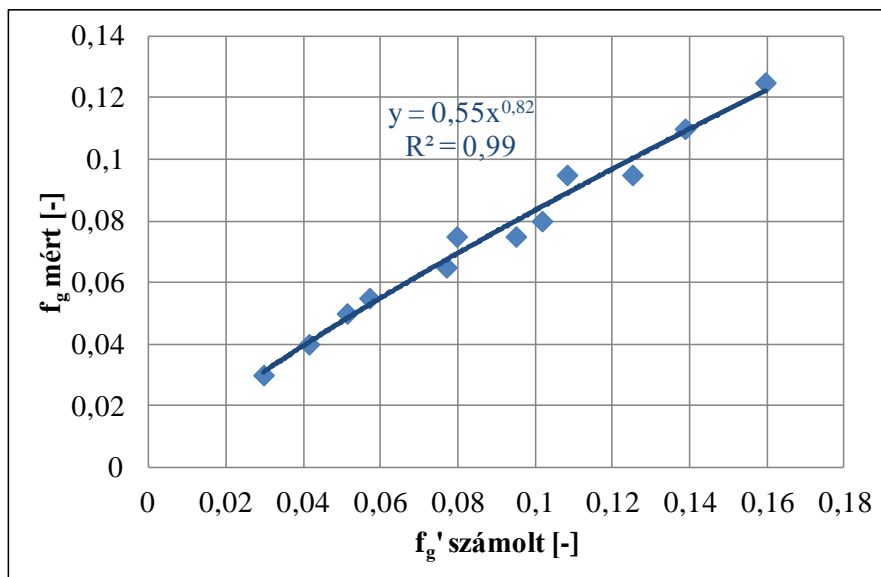
3.2. ábra. Felfekvési felület a relatív besüllyedés függvényében, radiál abroncsok esetén.

3. Eredmények

A (3.3.) összefüggés egy kerékre vonatkozik, a sebesség meghatározására felírt modellhez nem használható. Szükséges annak vizsgálata, hogy a nyomon járás során mért gördülési ellenállási tényezők, milyen függvénykapcsolatban állnak az egy kerékre vonatkozó, gördülési ellenállási tényezőkkel. Ennek érdekében a (3.3.) képlet segítségével meghatároztam minden mérési sorozathoz az f_g' értéket.

Annak érdekében, hogy a terep okozta ellenállást vizsgáljam, kivontam mind a két gördülési ellenállási tényezőtől a gumiabroncs deformáció okozta ellenállást, melyet a betonon történt mérés alapján határoztam meg. Ezt az értéket ($f_{g(def)}=0,03$) később hozzáadom a kapcsolatot leíró függvényhez, mivel ez egy állandó érték.

A négy kerékre vonatkozó gördülési ellenállási tényezők és az egy kerékre számolt gördülési ellenállási tényezők függvénykapcsolatát a 3.3. ábra szemlélteti. Az ábrán látható, hogy a pontokra illeszkedő hatványfüggvény $R^2=0,99$ értéket ért el.



3.3. ábra. A szabadföldi kísérletek eredményeiből kapott gördülési ellenállási tényezők, az egy kerékre vonatkozó gördülési ellenállási tényezők függvényében, a gumiabroncs deformáció okozta ellenállás nélkül.

A görbét leíró hatványfüggvény egyenlete segítségével felírható a négy kerék és nyomon járás esetére vonatkozó gördülési ellenállási tényező meghatározása (3.6.):

$$f_g = 0,03 + 0,55 \cdot \left(\frac{B \cdot z}{(n + 1) \cdot A_{abr}} \right)^{0,8} \quad [-]. \quad (3.6.)$$

Az egyenletet ellenőriztem, hogy valóban jó eredményeket kapok, ha felhasználom későbbi számításaimhoz. A (3.6.) képlet segítségével gördülési ellenállási tényezőket határoztam meg, melyeket a szabadföldi mérések során meghatározott gördülési ellenállási tényezők függvényében vizsgáltam. Az egyenletet felhasználva a mérésekből kapott és a modellezett tényezők között a korreláció $R^2=0,98$, így a képlet jól használható.

3.2. A túrás jelenségének vizsgálata

A túrás jelenség során a túrási ellenállási tényezőt (f_t) kell figyelembe venni, amely a gördülési ellenállási tényező (f_g) értelmezésével azonos, annak egy speciális fajtája, abból származtatott tényező.

Túrás esetén a jármű mozgásegyenlete felírható az alábbi általános módon:

$$F_v = F_t + F_e \quad [N], \quad (3.7.)$$

ahol:

- F_v a vonóerő [N]
- F_t túrási ellenállás [N]
- F_e emelkedési ellenállás [N]

A vonóerő az alábbi módon írható fel:

$$F_v = f_t \cdot m \cdot g \cdot \cos\alpha \pm m \cdot g \cdot \sin\alpha \quad [N]. \quad (3.8.)$$

Amennyiben ismert a vonóerő nagysága, a túrási ellenállási tényező kifejezhető a képletből:

$$f_t = \frac{F_v \mp m \cdot g \cdot \sin\alpha}{m \cdot g \cdot \cos\alpha} \quad [-]. \quad (3.9.)$$

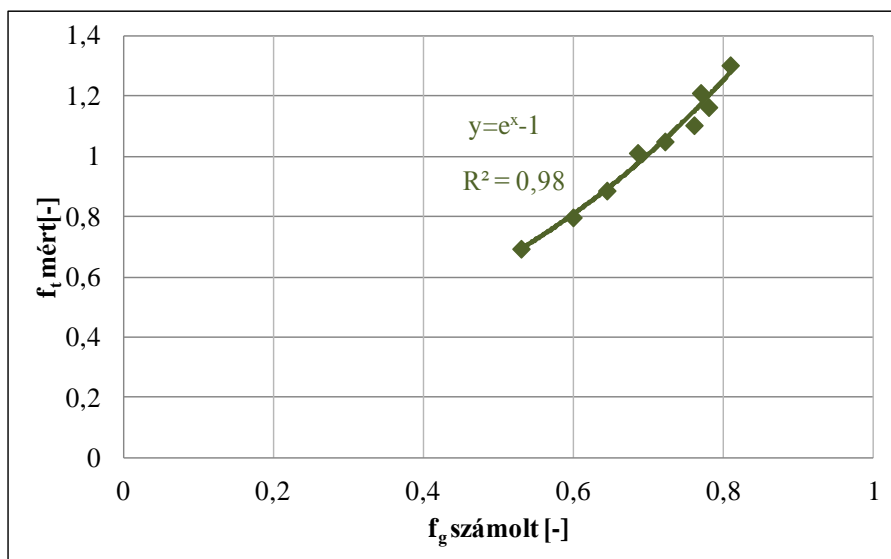
A terepre behatoló és túrást előidéző jármű pályaelhagyási sebességének meghatározásához szükséges a túrási ellenállási tényező ismerete, amelyet az igazságügyi szakértők számára könnyen meghatározható paraméterek segítségével szükséges felírni. A terep- és járműjellemzők felhasználásával felírt túrási ellenállási tényező meghatározásához felhasználtam a (3.6.) összefüggést, amelyben figyelembe vettem a feltúrt földmennyiség magasságát is.

3. Eredmények

A mérési eredményekből a (3.9.) összefüggés alapján számoltam a túrasi ellenállási tényezőt (f_t), valamint a (3.10.) képlet felhasználásával meghatároztam a gördülési ellenállási tényezőket (f_g).

$$f_g = 0,03 + 0,55 \cdot \left(\frac{B \cdot H}{(n + 1) \cdot A_{abr}} \right)^{0,8} [-]. \quad (3.10.)$$

A gördülési ellenállási tényező számítása során a (3.6.) összefüggést vettem alapul, de a „z” besüllyedés helyére a „H” értéket helyeztem. Amennyiben nincs túrás, azaz nincs feltúrt földmennyiség, a „H” értéke megegyezik a „z” értékével. Előfordulhat, hogy a jármű szakaszosan fékez, így áthaladhat a feltúrt földmennyiségen. Ebben az esetben ismert a besüllyedés mértéke, illetve a keréknyom mellett feltúrt földmennyiség magassága. Ezek figyelembevételével, jó közelítéssel számolható az adott szakaszra a túrasi ellenállási tényező.



3.4. ábra. A szabadföldi mérések eredményeiből számolt túrasi ellenállási tényezők vizsgálata a számolt gördülési ellenállási tényezők függvényében.

Az ábrán látható, hogy a pontokra illesztett görbét exponenciális függvény írja le $R^2=0,98$ korrelációval, ami igen kedvező. A görbe egyenletét pontosítva felírtam a túrasi ellenállási tényező (f_t) meghatározását a (3.10.) összefüggés szerinti gördülési ellenállási tényező felhasználásával:

$$f_t = \exp(f_g) - 1 = \exp \left[0,03 + 0,55 \cdot \left(\frac{B \cdot H}{(n + 1) \cdot A_{abr}} \right)^{0,8} \right] - 1 [-]. \quad (3.11.)$$

Az exponenciális függvényt úgy ellenőriztem, hogy felhasználásával túrasi ellenállási tényezőket számoltam, és megvizsgáltam, hogy a módosítás után

3. Eredmények

elfogadható maradt-e a kapcsolat a mérésekből meghatározott, és a képletből számolt tényezők között. Az egyenlettel számolt és a szabadföldi mérések során meghatározott tényező között a korreláció kielégítően magas, $R^2=0,98$.

3.3. Terepre behatoló jármű sebességének meghatározása

Feltételezem, hogy balesetnél az épített út elhagyása után a jármű terepre hatol be. A javaslatom szerint a számítás célja a mozgási energiával rendelkező, terepen haladó jármű Δv sebességváltozásának meghatározása, amely megfelel a $v_{\text{behatolási}}$ sebességnek.

A modell bemenő, illetve kijövő adatait, valamint a felhasznált összefüggéseket a következő alfejezetekben ismertetem.

3.3.1. A modell input adatai

A modell bemenő adatai megoszlanak járműre és terepre vonatkozó input adatokra.

A járműre vonatkozó input adatok:

- m jármű tömege [kg]
- B gumiabroncs szélessége [m]
- D abroncs átmérője [m]
- Q egy kerékre eső terhelés [N]
- A_{abr} gumiabroncs felfekvési felülete [m²]
- p_{abr} abroncslégnyomás [Pa]
- L_t tengelytáv [m]
- f_{mf} motorfék ellenállási tényezője [-]
- f_h hajtáslánc ellenállási tényezője [-]

A terepre vonatkozó input adatok:

- $CI_{z_0=0}$ kúpos index $z_0=0$ mélységben [MPa]
- $CI_{z_0=L}$ kúpos index $z_0=L$ mélységben [MPa]
- n teherbírási görbe kitevője [-]
- α lejtőszög [°]
- z talajdeformáció, kerékbesüllyedés [m]
- h a talajszinttől számított, feltúrt földmennyiség magassága [m]
- H a z és h összege [m]
- s fékút-, ill. kifutás hossza [m]
- f_g gördülési ellenállási tényező [-]
- f_{cs} oldalt csúszó kerék ellenállási tényezője [-]
- f_t túrási ellenállási tényező [-]

3. Eredmények

3.3.2. A modell output adata

Folytonos vagy szakaszosan hagyott járműnyomok ismeretében, valamint gördülést feltételezve, a terepre behatoló jármű pályaelhagyási sebessége az alábbi módon írható fel:

$$v_{\text{behatolási}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(\int_{s_i}^{s_{i+1}} (F_{g_i} + F_{e_i} + F_{mf_i} + F_{h_i}) \cdot ds + E_{i \text{ perdület}} \right)}{m}} \quad [\text{m/s}]. \quad (3.12.)$$

A (3.12.) képletben figyelembe vettem a függőleges tengely körüli elfordulás esetét is. Egyszerűsítve az alábbi formában írható fel:

$$v_{\text{behatolási}} = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(\int_{s_i}^{s_{i+1}} [g \cdot (\cos \alpha \cdot f_g \pm \sin \alpha + f_{mf} + f_h)] \cdot ds + L_t \cdot \pi \cdot g \cdot f_{cs} \right)} \quad [\text{m/s}]. \quad (3.13.)$$

Amennyiben a jármű a kerekein nem tisztán gördül, hanem túrást idéz elő, a (3.12.) képletben helyettesíteni kell a gördülési ellenállást a túrási ellenállással. Lassuláskor súlyáthelyeződés van az első tengelyre, ami a túrást növelheti. Ebben az esetben a tengely körüli elfordulás esete elhagyható:

$$v_{\text{behatolási}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(\int_{s_i}^{s_{i+1}} (F_{t_i} + F_{e_i} + F_{mf_i} + F_{h_i}) \cdot ds \right)}{m}} \quad [\text{m/s}]. \quad (3.14.)$$

A (3.14.) képlet egyszerűsítve az alábbi módon írható fel:

$$v_{\text{behatolási}} = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(\int_{s_i}^{s_{i+1}} [g \cdot (\cos \alpha \cdot f_t \pm \sin \alpha + f_{mf} + f_h)] \cdot ds \right)} \quad [\text{m/s}]. \quad (3.15.)$$

3.4. A modell ellenőrzése szabadföldi mérésekkel

A 3.1-es táblázatban összefoglaltam a felgyorsított jármű terepre érkezés pillanatától a megállásig mért út hosszát. A vizsgálatok során a jármű üresen gurult. Motorfékkel nem végeztem ellenőrzést, valamint fékezett járművet sem vizsgáltam.

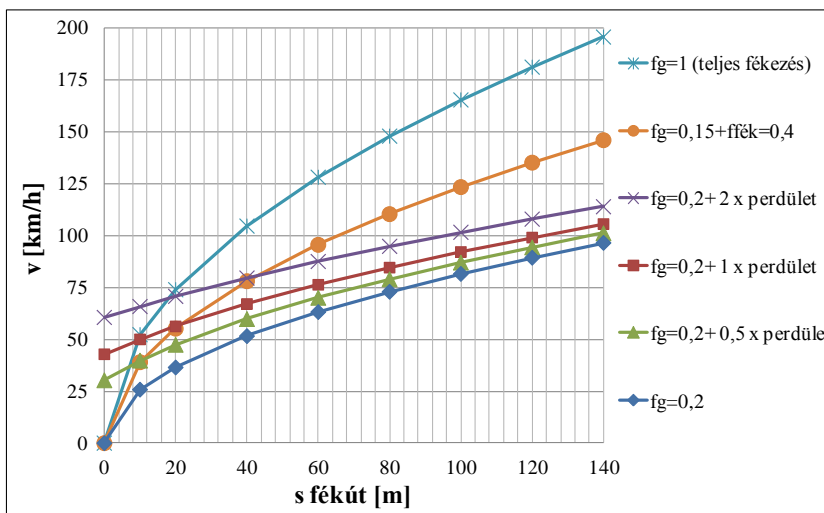
A modell ellenőrzését Excel-program segítségével végeztem, amely a 3.3.1. fejezetben közölt bemeneti adatokból számolta a keresett behatolási sebességet. A mérés során beállított, valamint a modellel számolt sebességet összehasonlítottam, az eltéréseket meghatároztam.

3. Eredmények

3.1. táblázat. A modell pontosságának meghatározása.

A modell pontosságának vizsgálata					
Mért adatok				Számolt	Eltérés
v [km/h]	s fékút [m]	z [m]	n [-]	v [km/h]	Δ [%]
10	8,5	0,005	0,6	12,74	21,51
20	27			23,39	14,49
30	64,5			34,49	13,02
10	3,5	0,021	0,7	11,42	12,43
20	12			21,14	5,39
30	28,5			32,58	7,92
10	3	0,046	1,5	12,84	22,12
20	10			23,44	14,68
25	11			24,58	1,71
30	18			31,45	4,61
35	25			37,06	5,56
10	2	0,071	1,8	11,05	9,50
20	7,5			21,39	6,50
30	15,5			30,75	2,44
35	22,5			37,05	5,53

A szakértők segítségével elkészítettem a modellem segítségével a 3.5. ábrán látható diagramot, melyen a számított sebességértékek láthatóak a tetszőlegesen felvett fékút értékek függvényében.



3.5. ábra. A sebesség meghatározására szolgáló (3.13.) és (3.15.) összefüggések segítségével számolt sebességértékek a fékút függvényében.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Új összefüggést dolgoztam ki a gumiabroncs felfekvési felületének meghatározására. Az összefüggés figyelembe veszi a gumiabroncs átmérőjének nagyságát (D), egy kerékre eső terhelést (Q), abroncs légnyomását (p_{abr}), valamint a relatív talajbesüllyedés (z/D) értékét. A számítás diagonál abroncsoknál a következő:

$$A_{abr(D)} = \frac{Q}{10 \cdot p_{abr} \cdot \left[1,2 - 1,2 \cdot \left(\frac{z}{D} \right)^{0,44} \right]} \text{ [cm}^2\text{]}.$$

Radiál abroncsoknál:

$$A_{abr(R)} = \frac{Q}{10 \cdot p_{abr} \cdot \left[0,75 - 0,75 \cdot \left(\frac{z}{D} \right)^{0,44} \right]} \text{ [cm}^2\text{]}.$$

2. Új összefüggést dolgoztam ki a jármű gördülési ellenállási tényezőjének számítására négy kerék és nyomon járás esetén. A gumiabroncs szélesség (B), felfekvési felület (A_{abr}), talajdeformáció (z) és a talaj terhelési görbéjének kitevője (n) ismeretében a tényező az alábbi összefüggéssel számítható:

$$f_g = 0,03 + 0,55 \cdot \left(\frac{B \cdot z}{(n + 1) \cdot A_{abr}} \right)^{0,8} \text{ [-]}.$$

A fenti összefüggés általános érvényű, mert tartalmaz minden járműre és terepre vonatkozó paramétert, amelyek a gördülési ellenállási tényezőt befolyásolják.

3. Összefüggést dolgoztam ki a túrási ellenállási tényező meghatározására. Az összefüggés a gördülési ellenállási tényezőtől határozza meg a túrási ellenállási tényező értékét. A gumiabroncs szélesség (B), felfekvési felület (A_{abr}), a kerékbesüllyedés valamint a feltúrt talajmennyiség magasságának összege (H) és a talaj terhelési görbéjének kitevője (n) ismeretében, a túrási ellenállási tényező az alábbi összefüggéssel számítható:

$$f_t = \exp(f_g) - 1 = \exp \left[0,03 + 0,55 \cdot \left(\frac{B \cdot H}{(n + 1) \cdot A_{abr}} \right)^{0,8} \right] - 1 \text{ [-]}.$$

4. Új tudományos eredmények

4. Meghatároztam az épített útpályát elhagyó, terepre behatoló gépjármű pályaelhagyási sebességét. A számítás alapelve, hogy balesetnél az épített út elhagyása után a jármű terepre hatol be, majd megáll, azaz sebessége 0-ra csökken. Ekkor a megtett utat megmérve és az ellenállások ismeretében kiszámítható a behatolási sebesség mértéke. A terepre érkezés módját külön kell vizsgálni. Ez a számítás csak a terepre beérkezés és a megállás közötti szakaszt veszi figyelembe. A terepre érkezés módja többféle lehet, ezek matematikai leírása ismert.

A sebesség meghatározásához az alábbi alapadatok szükségesek: fékút, lejtőszög, gördülési ellenállási tényező, motorfék ellenállási tényező, hajtáslánc ellenállási tényező, valamint túrás esetén a túrási ellenállási tényező. A sebesség meghatározását három alapesetre végeztem el: a jármű behatol a terepre és fékezés nélkül, üresben gurulva megáll; a járművet motorfék lassítja, valamint a jármű fékezett kerekekkel, túrást előidézve áll meg. Figyelembe vettem továbbá azt a lehetőséget, hogy a jármű függőleges tengelye körül megpördül. A behatolási sebességet az alábbi egyenletek írják le:

Gördülés esetén:

$$v_{\text{behatolási}} = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(\int_{s_i}^{s_{i+1}} [g \cdot (\cos \alpha \cdot f_g \pm \sin \alpha + f_{mf} + f_h)] \cdot ds + L_t \cdot \pi \cdot g \cdot f_{cs} \right)} \text{ [m/s]}.$$

Túrás esetén:

$$v_{\text{behatolási}} = \sqrt{2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left(\int_{s_i}^{s_{i+1}} [g \cdot (\cos \alpha \cdot f_t \pm \sin \alpha + f_{mf} + f_h)] \cdot ds \right)} \text{ [m/s]}.$$

5. Új módszert dolgoztam ki diagonál és radiál abroncsok felfekvési felületének meghatározására. A módszer lényege, hogy a relatív besüllyedés (z/D), egy kerékre eső terhelés (Q) és a gumiabroncs belső légnyomásának (p_{abr}) ismeretében a felfekvési felület (A_{abr}) számítás nélkül meghatározható a 3.1. és 3.2. ábrán látható nomogramok segítségével. A nomogrammal az igazságügyi szakértők, gyorsan és egyszerűen meg tudják állapítani egy adott gumiabroncs felfekvési felület nagyságát, amely fontos bemenő paraméter a pályaelhagyási sebesség meghatározása során.

A nomogramok készítésénél négy abroncs légnyomást (1,5-1,8-2,1-2,4 bar) és négy kerékterhelést (2500-4500-6500-8500 N) vettem figyelembe.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Az eredményekből levonható az a következtetés, hogy baleset esetén a terepre lefutó jármű mozgásának vizsgálata minden esetben nélkülözhetetlen a balesetrekonstrukció során. Az nem vezethet jó eredményre, ha az igazságügyi szakértők mindössze tapasztalati értékekre hivatkoznak, ugyanis a talajparaméterek nem kellőképpen felvett értékeinek használata komoly számítási hibákat eredményezhet. Ezt igazságügyi szakértői szemináriumon meg is erősítették a jelenlévők, és felhívták a figyelmet arra, hogy a terepjáráselméleti kutatások során kapott eredmények segítségükre lehetnek.

A terepre behatoló gépjármű mozgási energiával rendelkezik a pályaelhagyás pillanatában, majd a terepen megáll. A mozgási energiáját a terepi közlekedésből ismert menetellenállások emésztik fel, amelyek ismerete fontos a baleseti elemzés szempontjából. Munkám során arra törekedtem, hogy olyan modellt építsek fel, amely könnyen meghatározható bemenő adatokkal számol. Ez fontos, hiszen egy baleset során a szakértőnek nincs ideje laboratóriumi vizsgálatokra, a helyszínen kell felvennie jellemző értékeket a talajoldalról valamint a járműoldalról egyaránt.

Véleményem szerint a szakértőknek több hangsúlyt kell fektetniük a terep vizsgálatára egy terepi baleset során, nem csak a járművön kialakult deformációkat kell figyelembe venni, hanem a terep sajátosságait. Ide tartozik a mikro- és makrodomborzat megfigyelése, leírása, a talaj állapotának meghatározása, nedvességtartalom, hordképesség definiálása. Ezek jellemzik az adott területet, ezek képezhetik a modell bemenő adatait.

A balesetet szenvedett jármű adatai katalógusból és adatbázisokból kivehetők, így a járműre vonatkozó bemeneti adatok rendelkezésre állnak. A nehézséget a terep tulajdonságainak meghatározása jelenti, ehhez rendelkezni kell alap szinten terepjáráselméleti ismeretekkel. Munkám során cél volt, hogy segítségére legyek az igazságügyi szakértőknek, és eredményesebbé, valamint pontosabbá tegyem a mechanikai számításaikat.

Az új tudományos eredményeim segítségül szolgálnak a balesetelemző és szakértői munkák során. Javaslom minden, balesetekkel foglalkozó szakembernek, hogy eredményeimet használja fel számításaihoz. Természetesen további mérések szükségesek, hogy az általam felírt modell minden balesettípusra általánosítható legyen, de a dolgozatban közölt egyszerűbb esetekben felhasználható. Javaslom továbbá, hogy terepi balesetnél a talajt is úgy vegyék figyelembe, mintha az ütközésben résztvevő jármű lenne, tehát a terepen kialakuló deformációkra is fektessenek nagyobb hangsúlyt.

A közútról terepre lefutó jármű mozgásának vizsgálata során a talaj és a rajta hagyott nyomok, deformációk vizsgálata nélkülözhetetlen.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A járművek biztonságával, balesetek elemzésével foglalkozó hazai és nemzetközi szakemberek megerősítettek abban, hogy tisztázni kell a talajmechanikai paraméterek hatását a terepre behatoló jármű mozgására. Ezzel elősegítjük a rekonstrukciós munkákat, azaz a sebesség meghatározását baleset után.

Kutatási célkitűzésem a terepjárás-elmélet tudományterület kutatási eredményei alapján kidolgozott, új szimulációs algoritmus alkalmazásával, a balesetben résztvevő jármű haladási sebességének meghatározása abban a pillanatban, amikor a sérült jármű elhagyja a közutat, és behatol a terepre.

A terepre behatoló gépjármű a megállás pillanatáig számos terepi tényezővel találkozik. Ezek befolyásolják az útját, végső helyzetét és az utasok állapotát. A szakirodalmi áttekintésben részletesen bemutattam a lehetséges terepi balesetek formáit. Az érdemi részben három kiemelt területtel foglalkozom, melyek alapját képezik az összes lehetséges kimenetelnek. Ezek az esetek az alábbiak: a jármű üresben gurulva kifut a terepre, majd megáll; a jármű motorfék segítségével fékezve kifut a terepre, majd megáll; a jármű fékezett kerekekkel és motorfékkel kifut a terepre, majd megáll.

A sebesség meghatározásához ismerni kell a terepre vonatkozó adatokat: az adott talaj gördülési ellenállási tényezőjét, túrás esetén a túrási ellenállási tényezőt; a terepen hagyott nyomadatokat: baleset során csak a nyomok ismertek; a terepen mért adatokat: a kúpos indexet és a nyommélységet lehet mérni, valamint a talaj típusa beazonosítható. A járműre vonatkozó adatok katalógusból, adatbázisból kikereshetők, így a járműjellemzőket ismert bemeneti paraméternek tekinthetjük.

A kutatási célkitűzés megvalósításához, illetve a felírni kívánt modell igazolásához vontatási vizsgálatokat végeztem a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar területén. A szabadföldi mérések fő célja volt a különböző hordképességű (kúpos indexű) talajokon meghatározni a gördülési ellenállási tényezőt, illetve túrás esetén a túrási tényezőt. A kísérleteket, három különböző talajállapotban, tarlón, hántott-, valamint kultivátorozással fellazított talajon végeztem el. Méréseimet megelőzte a talajjellemzők vizsgálata, helyszínen illetve laboratóriumi körülmények között.

A mérések eredményei alkalmasak voltak arra, hogy új tudományos eredményeket fogalmazzak meg, amelyek a baleset után terepre behatoló jármű sebesség meghatározására irányultak. Az eredmények programba építve hasznos segítségei lehetnek igazságügyi szakértőknek.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk idegen nyelven:

1. Laib, L. – Máthé, L. – Pillinger, Gy. (2010): The effects of the off-road vehicle on the soil cohesion and internal friction. Mechanical Engineering Letters, Vol. 4., pp. 73-91. HU ISSN 2060-3797
2. Máthé, L. – Kiss, P. – Laib, L. – Pillinger, Gy. (2013): Computation of run-off-road vehicle velocity from terrain tracks in forensic investigations. Journal of Terramechanics, Vol. 50. Issue 1., pp. 17-27. (IF: 0,803*)
3. Máthé, L. – Kiss, P. – Laib, L. – Pillinger, Gy. – Magdics, G. (2013): Run-off-road vehicle speed analysis from terrain tracks. Mechanical Engineering Letters, Vol. 10., pp. 81-90. HU ISSN 2060-3797
4. Máthé, L. – Magdics, G. (2013): Investigation of friction coefficient between vehicle body and soil. Hungarian Agricultural Engineering. Vol. 25., pp. 51-53. HU ISSN 0864-7410
5. Máthé, L. – Pillinger, Gy. (2014): Examination of an overturned towed vehicle. Journal of Tekirdag Agricultural Faculty, Vol. 11. Issue 1., pp. 63-66. ISSN 1302-7050

Lektorált cikk magyar nyelven:

6. Máthé, L. (2011): Terepre futó jármű menetellenállásainak elemzése különböző talajfelszínen. GÉP, LXII. évf., 6. sz., 27-35. o., ISSN 0016-8572
7. Máthé, L. (2011): Terepen bekövetkező baleset elemzése a talajparaméterek figyelembevételével. Járművek és Mobil Gépek online folyóirat (<http://on-and-off-road-vehicles.hu>), III. évf., 1. sz., 137-151. o., HU ISSN 2060-4408
8. Máthé, L. (2012): Terepre futó jármű menetellenállásai. Mezőgazdasági Technika, LIII. évf. Január, 2-5. o., HU ISSN 0026 1890
9. Máthé, L. (2012): Mezőgazdasági terület talajparamétereinek vizsgálata. Mezőgazdasági Technika, LIII. évf. November, 2-4. o., HU ISSN 0026 1890
10. Máthé, L. (2013): Vályogtalaj ülepedettségének és mechanika tulajdonságainak vizsgálata. Járművek és Mobil Gépek online folyóirat (<http://on-and-off-road-vehicles.hu>), IV. évf., 1. sz., 9-16. o., HU ISSN 2060-4408