



A pályaszerkezet-teherbírást jellemző behajlás mérések feldolgozása során alkalmazott korrekciók megbízhatósága I.

rész

Tóth Csaba¹, Gáspár László²

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék

² KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.

E-mail: toth.csaba@epito.bme.hu

KIVONAT

A cikk egy olyan kutatás első eredményeit tartalmazza, amely során az útpályaszerkezetek hálózati szintű teherbíróképességét német, litván és amerikai eljárások segítségével vizsgálták, továbbá ismertetésre kerül két olyan hőmérsékleti korrekciós eljárás, amely ezen eljárások alkalmazásához szükséges.

Kulcsszavak: hőmérsékleti korrekció, szerkezeti szám, teherbírás

Dr. Tóth Csaba

A Magyar Mérnöki Kamara, a Közlekedéstudományi Egyesület, a Magyar Útügyi Társaság Útpályaszerkezetek Szakbizottság tagja, jelenleg az BME Út és Vasútépítési Tanszék docense. Korábban a Csongrád Megyei Állami Közútkezelő Kht., illetve az Állami Közúti Műszaki és Információs Kht. osztályvezetőjeként a magyar útügyi adminisztrációban dolgozott. Később a Strabag Konzern mérnökeként részt vett az épülő hazai országos közúthálózat minőségellenőrzésében, valamint a Konzern nemzetközi és hazai kutatásaiban. Közlekedési építőmérnöki szakértőként, tervezőként, illetve műszaki ellenőrként közreműködött számos hazai burkolat-megerősítési projektben. Kutatási területe: hajlékony útpályaszerkezetek igénybevétele, méretezése, teherbíró-képessége, megerősítése. Publikációinak száma: több mint 50.

Dr. habil. Gáspár László

okl. mérnök, okl. gazdasági mérnök, az MTA doktora. A Közlekedéstudományi Intézet kutató professzora, a Széchenyi István Egyetem emeritusz professzora. 400 publikációjának és 520 szakmai előadásának zöme útépítési, -fenntartási és -gazdálkodási témákkal foglalkozik. 30+ nemzetközi téma és bizottság tagja vagy vezetője (volt).

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

Az útpályaszerkezetek behajlásmérési eredmények alapján becsült teherbíró-képessége (továbbiakban: teherbírása) a szerkezet pillanatnyi állapotáról és – bizonyos mértékig – a jövőben várható viselkedéséről szolgáltat információkat. A teherbírás meghatározásának – egyéb, napjainkra már kiforrott, más lehetőségeken kívül – elterjedt mérési módja a burkolatfelületen, szabványos mértékű terhelés hatására regisztrálható függőleges elmozdulás (behajlás) rögzítése, amelynek mértékét az egyes

pályaszerkezeti rétegek állapota és az azokat alátámasztó földmű, illetve altalaj szilárdsága határozza meg.

A pályaszerkezeti rétegek – kiemelten az aszfaltrétegek – állapotát jellemzően a hőmérséklet, a földművét pedig, a legtöbb talajfajta esetében, alapvetően annak víztartalma befolyásolja. Ezen klimatikus hatások által okozott változásoknak a figyelembevételére, a pályaszerkezet-megerősítési eljárások, a pályaszerkezet reprezentatív (mértékadó) állapotát jellemző paraméter meghatározásához, ún. korrekciós tényezőket alkalmaznak. Kutatásunk ezen korrekciók meg-bízhatósági vizsgálatát, illetve azok pontosítását tűzi ki céljául. Ennek érdekében – korábbi mérési eredmények feldolgozásával – a pályabehajlás mérésekor regisztrált hőmérséklet, illetve a mérést megelőző csapadék mennyiségének a mérési eredményekre gyakorolt hatását vizsgáljuk, majd, az így nyert eredmények segítségével, azt tanulmányozzuk, hogy a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. már 27 éve, rendszeresen megfigyelt etalonszakaszain mért teherbírási eredmények idősora – az említett tényezők figyelembevételével – hogyan módosul.

A kutatás során a pályaszerkezet teherbíró képességét nem a hazánkban megszokott – és az érvényes útügyi műszaki előírásban (e-ÚT 09.02.34, 2005) szereplő módon, az ún. mértékadó behajlás alapján jellemezzük, hanem három, nemzetközileg elterjedt eljárás segítségével is vizsgáljuk. Jelen cikk az útpályaszerkezetek hálózati szintű teherbírását vizsgáló, német, litván és amerikai eljárásokat mutat be, illetve két olyan hőmérsékleti korrekciós eljárást ismertet, amely az említett eljárások alkalmazásához szükséges.

2. HÁLÓZATI SZINTŰ TEHERBÍRÁSI JELLEMZŐK

A Közlekedéstudományi Intézet 1991 óta az országos közúthálózatból választott 60 db, 500 fm-es hosszúságú etalonszakasz rendszeres, évenkénti állapotvizsgálatának eredményeit dolgozza fel, elsősorban hálózatviselkedési modellek kifejlesztése, illetve pontosítása érdekében. A hatodik állapot-megfigyelési évtől kezdődően, az egyes útszakasz-osztályokban, regressziós eljárással, a hat vizsgált állapotparaméter hálózatviselkedési modelljeit kezdték kialakítani, az idő vagy a lefutott forgalom függvényében. A további években, az újabb állapotadatok hasznosításával egyre pontosabb függvényeket lehetett meghatározni. Az egyes állapotparaméterek idősorai általában „logikusan” – az előzetesen várakozásoknak megfelelően – alakultak. Ezek között egyedüli kivételnek a pályaszerkezet-teherbírás bizonyult, amelynek idősora határozott „romló” trendet nem mutatott, hanem gyakran – beavatkozások hiányában is – „megmagyarázhatatlanul”, az egyik évről a másikra a mért értékek javultak (Burkolatleromlási, 2017). Ennek nyomán felmerült a kérdés, hogy ennek oka az alkalmazott korrekciók pontatlansága vagy valamilyen környezeti körülmény figyelmen kívül hagyása, esetleg a használt állapotjellemzők – mértékadó behajlás és egyenértékű felületi modulus – nem képesek a rongálódási folyamat elvárt pontosságú detektálására.

Az úthálózat teherbírásának jellemezhetőségét, természetesen, a nemzetközi szakirodalom is kiemelt hangsúllyal taglalja. A magyar gyakorlatban megszokott teherbírási jellemzők mellett számos egyéb paraméter terjedt el a nemzetközi gyakorlatban ennek a kérdésnek a tanulmányozásakor.

A kutatás során elsőként a magyar gyakorlattól teljesen eltérő megközelítést jelentő, az ún. szerkezeti számon alapú jellemzéseket tekintettük át, majd útpályaszerkezetek hálózati szintű teherbírásának jellemzésére három modellt választottunk ki, amelyeket részletesen is megvizsgáltunk az alábbiak szerint.

2.1. AZ „SN, SNC ÉS SNP” PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSÁNAK ÁLTALÁNOS ÖSSZEFÜGGÉSEI

Az útpályaszerkezetek teljesítőképességét a világ számos részén – az USA-tól Új-Zélandig – napjainkban is az ún. szerkezeti számmal (SN: structural number) jellemzik, amelyet az AASHO útkísérlet (Highway, 1962) után dolgoztak ki. Figyelembe véve, hogy a magyar nyelvű szakirodalom e szakterületen meglehetősen szűkszavú, így tömören áttekintjük az ezzel kapcsolatos főbb ismereteket.

A szerkezeti szám alapösszefüggése az alábbi:

$$SN = \sum_{i=1}^n a_i * h_i \quad (1)$$

ahol:

- SN - szerkezeti szám
- a_i - anyag- és rétegegyüttható
- h_i - rétegvastagság

Az alapösszefüggést az 1960-as évek elején alkották meg, azonban a későbbiekben felmerült, hogy a szerkezeti szám, mint a pályaszerkezet teherbírásának egyik lehetséges jellemzője nem kellő súllyal veszi figyelembe a földmű-teherbírás esetleges változásait; így azt a következőképpen egészítették ki:

$$SNC = \sum_{i=1}^n a_i * h_i + SN_{sg} \quad (2)$$

ahol:

- SNC - módosított szerkezeti szám (Modified Structural Number)
- a_i - anyag- és rétegegyüttható
- h_i - rétegvastagság
- SN_{sg} - a földmű merevségét jellemző, szerkezeti szám

A bevezetett új tag (SN_{sg}) a földmű merevségét igyekszik figyelembe venni, értékének meghatározására az első összefüggést, CBR-értékek alapján, Hodges dolgozta ki (Hodges et al., 1975):

$$SN_{sg} = 3,51 * (\log CBR) - 0,85 * (\log CBR)^2 - 1,43 \quad (3)$$

Következő lépésként a módosított szerkezeti szám (SNC) pályabehajlás alapján történő meghatározhatósága került a kutatások középpontjába, és erre számos modell született, például, (Paterson, 1987):

$$SNC = A_0 (D_0)^{-0,63} \quad (4)$$

ahol:

- D_0 - maximális behajlás (mm), Benkelman-tartóval mérve
- A_0 - modell együttható (értéke: 3,2 kötőanyag nélküli alapréteg és 2,2 hidraulikus kötő-anyagú burkolatalap esetében)

A statikus behajlásmérések mellett megjelenő ejtősúlyos berendezések (FWD) elterjedése később szükségessé tette, hogy a szerkezeti szám meghatározásához, a dinamikus berendezések által szolgáltatott adatok is felhasználhatóak legyenek. Így ismét modellek tucatjai készültek, amelyek FWD-mérések alapján külön határozták meg az SN paramétert és külön az SN_{sg} értékét.

A cikk terjedelmi keretei nem teszik lehetővé a pályaszerkezetek teherbírását hálózati szinten leíró modellek – napjainkban is zajló – fejlődésének részletesebb bemutatását, így csak felsorolunk néhány jelentősebb, a témában kidolgozott állapotjellemzőt:

- Adjusted Structural Number (HDM-4),
- Structural Adequacy Index (Haas, 1994),
- Structural Strength Index (Scullion, 1988),
- Structural Strength Indicator (Flora, 2009),
- Modified Structural Index (Bryce et al., 2013),
- Structural Capacity Index (Nam et al., 2016),
- Structural Health Index (Elbagalati et al., 2018)

Közelmúltban megjelent publikáció (Kavussi et al., 2017) a pályaszerkezet és a földmű együttes állapotát reprezentáló SNeff érték meghatározásának lehetőségeit részletezi, a földmű merevségének becsléséhez használható képletekre is kitérve.

2.1.1. PUODZIUKAS ÉS PAKALNIS KÖZELÍTÉSE

Egy litván kutatás (Puodziukas és Pakalnis; 2002) a szezonális hatások aszfaltburkolatú utak szerkezeti állapotára gyakorolt hatását ezen klasszikus elvek mentén tanulmányozta 5 út összesen 13 szakaszán. A szezonális hatásokat három éven keresztül követték nyomon. A pályaszerkezet teherbírásának becslésére az ún. Jameson-képletet alkalmazták:

$$SN = 1,69 + \frac{842,8}{d_0 - d_{1500}} + \frac{42,94}{d_{900}} \quad (5)$$

majd a földmű CBR-értékét az alábbi, széleskörűen elterjedt képlettel becsülték:

$$\log(CBR) = 3,264 - 1,108 * \log d_{900} \quad (6)$$

$$SNSG = 3,51 * \log(CBR) - 0,85 * (\log(CBR))^2 - 1,43 \quad (7)$$

$$SNC = SNSG + SN \quad (8)$$

ahol:

CBR - a földmű CBR-értéke

d_i - terhelés tengelyétől i távolságban lévő geofon alatt mért behajlás, μm

SNSG - a földmű szerkezeti száma

SN - a pályaszerkezeti rétegek szerkezeti száma

SNC - útpályaszerkezet módosított szerkezeti száma

Figyelembe véve, hogy a litván kutatás – hasonlóan a mi elképzeléseinkhez szintén a klimatikus hatások lehetőség szerinti kiküszöbölésével kívánta az aszfaltburkolatú utak teherbíró-képességét jellemezni, így ezt a modellt további vizsgálatra kiválasztottuk.

2.1.2. AASTHO-ELJÁRÁS

Az amerikai AASTHO méretezési eljárás elméleti megközelítést alkalmaz: a földművet reziliens modulussal (M_R) jellemzi, ami a felette fekvő (H) vastagságú, (E_p) merevségű pálya-szerkezeti réteget alátámasztja; a kétrétegű rugalmas lemezelmélet két alapösszefüggését használja, az alábbiak szerint:

$$M_R = \frac{0,24 * P}{d_r * r} \quad (9)$$

ahol:

M_R - a földmű reziliens modulusa

P - terhelés

d_r - a terheléstől „r” távolságra mért behajlás

r - a terheléstől mért távolság

$$d_0 = 1,5 * p * a * \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D^3}{a} \sqrt{\frac{E_p}{M_R}}\right)^2}} + \frac{1 - \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a}\right)^2}}{E_p} \right\} \quad (10)$$

ahol:

- d_0 - a terhelés alatt mért behajlás
- p - terhelő feszültség
- a - terhelő felület sugara
- M_R - a földmű reziliens modulusa
- D - a pályaszerkezet vastagsága
- E_p - a pályaszerkezet merevsége

Az eljárás végül, az „ E_p ” meghatározást követően, az alábbi képlettel határozza meg a szerkezet teherbírasi jellemzőjét:

$$SN_{eff} = 0,00045 * D * E_p \quad (11)$$

ahol:

- SN_{eff} - a meglévő pályaszerkezet szerkezeti száma
- D - a pályaszerkezet vastagsága
- E_p - a pályaszerkezet merevség

Mivel a két egyenlet egymástól nem független, így segítségükkel, a mért „ d_0 ” és „ d_r ” értéke alapján, a két ismeretlen („ M_r ” és „ E_p ”) közvetlenül nem számolható, meghatározásukhoz valamilyen iterációs technika, pl.: Excel SOLVER szükséges.

Ennek nyomán, az úthálózatok teherbírásának jellemzésére, napjainkban elterjedten használják még az ún. SCI indexet (Structural Condition Index):

$$SCI = \frac{SN_{eff}}{SN_{req}} \quad (12)$$

ahol:

SN_{req} - 20 éves élettartamra meghatározott szükséges szerkezeti szám, az AASHTO mé-retezési eljárás alapján

- SN_{eff} - a meglévő pályaszerkezet szerkezeti száma

Tekintettel arra, hogy a magyar mérések is FWD berendezéssel történtek és történnek ezt a megközelítést szintén illeszthetőnek tartjuk a hazai gyakorlatba, így ez a modell is kiválasztásra került.

2.2. A NÉMET GYAKORLAT

A Jendia-féle kiértékelés (Jendia, 1995) segítségével, a pályaszerkezet-megerősítés előtt és után vizsgálják az altalaj/földmű és a kötőanyag rétegek teherbírását. Az altalaj teherbírásának jellemzésére, a terhelési középponttól távolabb fekvő érzékelőkkel mért behajlasi értékek alkalmazhatók. Bevezetve az altalaj-indikátor (UI) fogalmát és meghatározva a terhelés középpontjától az $r = 900$ mm és az $r = 1500$ mm-es távolságban levő behajlasi értékek, azaz a d_{900} és a d_{1500} különbségét, a földmű teherbírására vonatkozóan nyerhető információ.

$$UI = d_{900} - d_{1500} \quad (13)$$

Jendia az altalaj teherbírására az $UI = 70$ μm -es határérték bevezetését javasolja; ez alatt gyengének, felette pedig jó teherbírásúnak tekintik az altalajt. A pályaszerkezeti rétegek állapotát az ún. teherbírasi számmal jellemzik:

$$T_z = \sqrt{\frac{R_0}{d_0}} \tag{14}$$

ahol:

- T_z - teherbírasi szám,-
- R₀ - behajlási teknő görbületi sugara, m
- d₀ - a terhelő tárcsa alatt mért behajlás, μm

A megfelelő és a nem megfelelő értékek határának Jendia a T_z = 0,75 értéket javasolja. A mérési pontonként meghatározott teherbírasi szám (T_z) és az általaj indikátor (UI) értékpárok alapján, a pályaszerkezet teherbírására négy kombináció lehetséges (1. táblázat)

1. táblázat: A Jendia-diagram kiértékelési táblázata

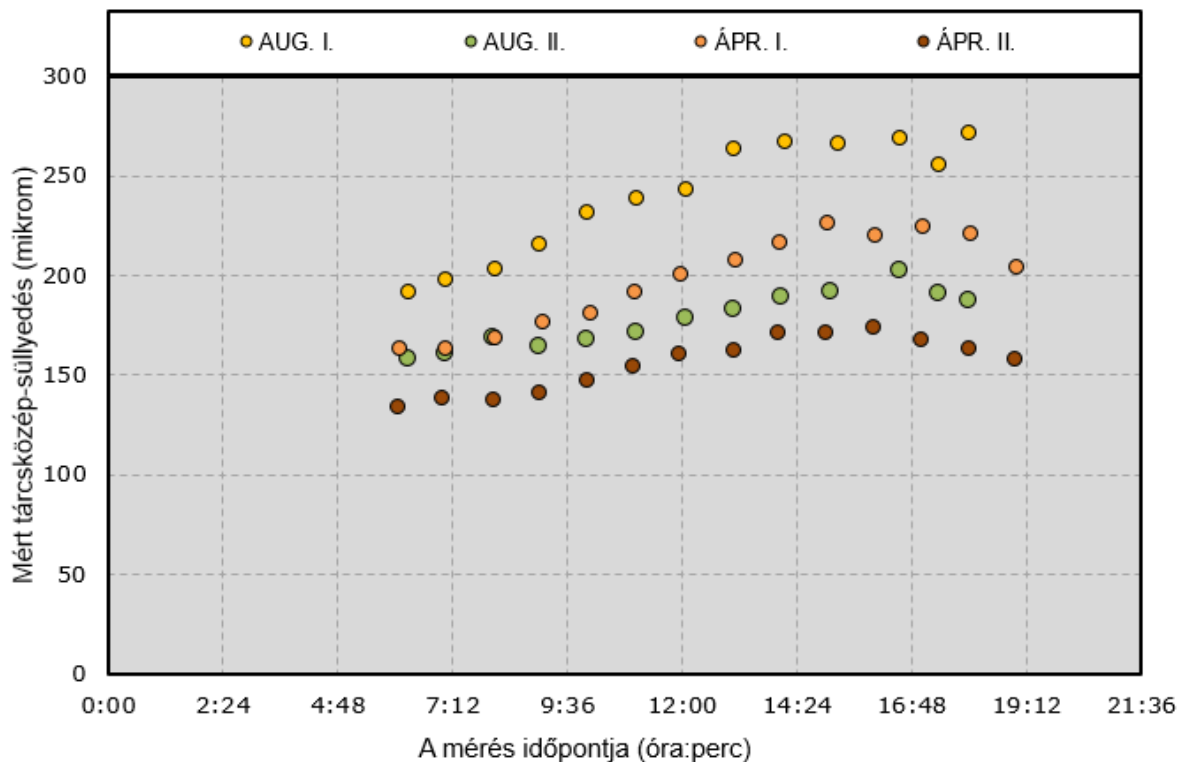
Jelleg	T _z	UI(μm)	Pályaszerkezet teherbírása	Kötött rétegek teherbírása	Földmű teherbírása
I.	0,75	70	jó	viszonylag merev	viszonylag jó
II.	0,75	70	nem megfelelő	viszonylag merev	gyenge
III.	0,75	70	erősítés szükséges	kötött rétegek merevsége kisebb	viszonylag jó
IV.	0,75	70	kimerült	kötött rétegek merevsége kisebb	gyenge

Figyelembe véve, hogy a módszer mai is az egyik leggyakrabban alkalmazott eljárás Németországban (Cickovic, 2017), továbbá hazai alkalmazására is sor került (Tóth, 2008), ezért ezt a megközelítést is további vizsgálatoknak vettük alá.

3. A HŐMÉRSÉKLET HATÁSÁNAK KIKÜSZÖBÖLÉSI LEHETŐSÉGE A BEHAJLÁSI EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSEKOR

A behajlási adatok kiértékelhetőségét a pályaszerkezet hőmérséklete nehezíti. Ez a hatás azonban meglepően nagymértékű, ahogyan azt korábbi hazai publikáció is tárgyalta (Ureczky, 2005).

Az 1. ábra ugyanazon keresztmetszetekben (I. illetve II. jelzésű keresztmetszvény), reggel 6 és este 7 óra között, óránként mért behajlási eredmények láthatók; ezek között az eltérés esetenként 150%-osnak is adódott!



1. ábra: Tavasszal és nyáron, két keresztmetszetben, óránként mért behajlások idősora

Elsődlegesen megoldandó probléma volt tehát, a napi hőingás mérést befolyásoló hatásának kiküszöbölése.

A napi hőmérséklet-ingadozás hatásán túlmenően, az adatok az évszaki hatást is mutatják, hiszen a tavaszi és a nyári mérések közötti szignifikáns különbség nem elsősorban az időközben lefutott forgalmi terhelésnek tudható be, hanem az alátámasztó földmű merevségváltozásának, amely a mérést megelőző csapadékmennyiséggel hozható kapcsolatba.

Az előzőekben ismertetett modellek azonban a hőmérséklet hatásával nem foglalkoznak, csupán előírják, hogy a fenti összefüggések már hőmérsékleti korrekcióval ellátott, behajlási adatokra alkalmazhatók.

A 2005-ben kiadott Útügyi Műszaki Előírás (ÚT 2-1.202, 2005), a hőmérsékleti korrekciós tényező értékét a következő

$$CT = 1,3 - 0,015 * T \tag{15}$$

ahol:

CT - a tárcsaközép-süllyedés hőmérsékleti korrekciója

T - burkolatfelület hőmérséklete, a mérés időpontjában, °C

Az említett ÚME szerint, a hőmérsékleti korrekciós tényező értéke 100 mm-nél vékonyabb aszfaltréteg esetében 1,0. Vastagabb aszfaltrétegnél, a fenti képletet kell alkalmazni. Látható azonban, hogy a képlet csak a terhelés alatti behajlás korrekciójára alkalmas, így keresni kellett olyan összefüggést, ami a hátsó szenzorokon mért értékeket is tudja korrigálni.

Karoliny a hazai burkolat-megerősítési eljárás kidolgozása során egy finn, az Oulu-i egyetemen kidolgozott összefüggést javasolt (Gáspár – Karoliny, 2014), így adott, hogy ezen összefüggés pontosságát vizsgáljuk. A korrekció alapösszefüggése:

$$k_{Di} = 1 - (T_a - 20) * a_i * h \tag{16}$$

ahol:

- kD_i - a terheléstől „i” távolságra mért behajlás korrekciós tényezője 20°C-ra
- T_a - a burkolatfelület hőmérséklete a méréskor, °C
- a_i - szenzortávolságtól függő paraméter
- h - bitumenes kötőanyagú rétegek összes vastagsága, mm

Jansen (2009) is hasonló korrekciót dolgozott ki PhD-értekezésében:

$$D_{20,i} = (a - b * T) * D_{T,i} \quad (17)$$

ahol:

- $D_{20,i}$ - „i” távolságban lévő szenzoron mért, 20 oC-ra korrigált behajlás
- a, b - a szenzorok távolságától, a hőmérséklettől és a behajlási értékek nagyságától függő paraméterek
- T - a burkolat hőmérséklete a felszín alatt, 5 cm-es mélységben
- $D_{T,i}$ - „i” távolságban lévő szenzoron mért behajlás

A modell használatát nehezíti, hogy a bemenő paraméterként nem a felszíni, hanem az 5 cm-es mélységben mért aszfalthőmérséklet szerepel, hiszen a hazai gyakorlatban a rendelkezésre álló adatok, jellemzően, a léghőmérséklet mellett, a burkolathőmérsékletre szorítkoznak. Ez utóbbi többféleképpen becsülhető (pl.: BELLS3 modell), a német szabályozás azonban Kayser eredményét használja (Kayser, 2007), az alábbiak szerint.

$$y = a * \ln(0,01 * x + 1,0) + T \quad (18)$$

ahol:

- y - „x” mm mélységben becsült burkolathőmérséklet
- x - mélység, mm
- T - felületi hőmérséklet, °C
- a - hőmérséklettől függő paraméter, –

Az 1. ábrán szemléltetett mérési sorok kiértékelése során mind a két hőmérsékleti korrekciót alkalmaztuk, annak érdekében, hogy vizsgáljuk a két korrekció pontosságát. A mérési eredmények lehetősé tették, hogy a különböző burkolathőmérsékletek esetén mért és a modellek segítségével korrigált behajlási eredmények közötti egyezést vizsgáljuk. Ideális modell esetén ezen két érték között az eltérés nulla kellene legyen, a valóságban azonban ez az érték a modell megbízhatóságától függő változó. Ennek ismerete azért alapvetően fontos, hogy a hálózati szintű, évente végzett behajlás mérési eredmények idősorának ingadozást nem csupán a forgalmi terhelés okozta teherbírás csökkenés okozhatta, hanem a hőmérsékleti korrekció pontatlansága is. Ezen torzító hatás mértéke, ezen kiértékelésből jól becsülhetővé válik.

4. A FÖLDMŰ MEREVSÉG ÉS A PÁLYASZERKEZET TEHERBÍRÁS BECSLÉSE

A reggeltől estig óránként regisztrált behajlási értékek idősora alapján, az egyes teherbírás-becsülő modellek megbízhatósága felmérhető lehet, hiszen ebben az időszakban nincs semmiféle olyan klimatikus – a nyomon követett hőmérsékletváltozáson kívül – vagy forgalmi hatás, ami indokolná a teherbírás változását. Ha ingadozás figyelhető meg, az csak a hőmérsékleti korrekcióra, illetve az egyes modellek megbízhatóságára vezethető vissza, ha a mérési pontatlanságot elhanyagolható mértékűnek tekintjük.

A mérési eredményeken a korábban ismertetett modellek közül hármat teszteltük:

- Puodziukas és Pakalnis módszere,

- Jendia-féle módszer,
- AASTHO-eljárás.

Mind a három módszer, mint azt korábban részleteztük, a pályaszerkezet teherbírását két részre – a földmű állapotára és a földmű feletti pályaszerkezeti rétegek állapotára – bontva vizsgálja. Elméleti várakozásunk szerint, mind a két paraméternek az óránkénti mérések során konstans érték körül kellene ingadozni; a tényleges ingadozás mértéke pedig a modell megbízhatóságával hozható kapcsolatba.

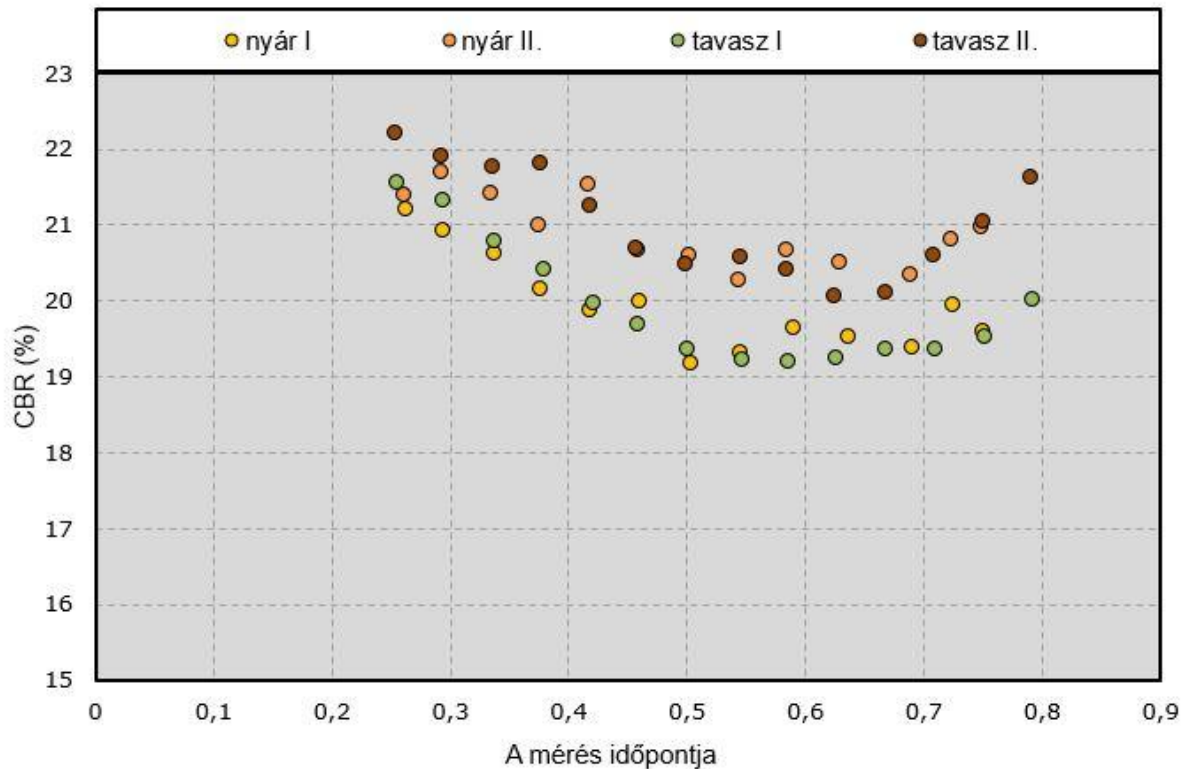
4.1. A FÖLDMŰ-MEREVSÉG ALAKULÁSA

A három módszert alkalmazva, a két mérési pontban, két alkalommal mért adatok alapján, a földmű állapotát jellemző paraméterek statisztikai jellemzőit meghatároztuk. (2. táblázat).

2. táblázat: A földmű különböző eljárások alapján becsült állapotjellemzői

Módszer	Puodžiukas	Jendia	AASTHO	
Vizsgált jellemző	CBR (%)	SNsg	UI	Mr (MPa)
nyár I.				
átlag	19,94	1,70	36,15	182,47
szórás	0,63	0,02	2,37	5,65
variancia	0,03	0,01	0,07	0,03
nyár II.				
átlag	20,90	1,72	30,46	191,13
szórás	0,47	0,01	1,04	4,23
variancia	0,02	0,01	0,03	0,02
tavasz I.				
átlag	19,92	1,69	33,56	182,56
szórás	0,79	0,02	2,38	7,35
variancia	0,04	0,01	0,07	0,04
tavasz II.				
átlag	21,03	1,73	28,46	192,26
szórás	0,72	0,02	1,52	6,73
variancia	0,03	0,01	0,05	0,03

Fontos megjegyezni, hogy a hátsó (>600 mm) szenzorokat, a nemzetközi gyakorlatnak megfelelően, sem a Jansen-képlet, sem pedig a finn összefüggés nem korrigálja, a hőmérsékleti hatás azonban ott is megfigyelhető.



2. ábra: Tavasszal és nyáron, két keresztmetszetben, óránként végzett behajlási eredmények alapján becsült CBR-értékek idősora Puodziukas és Pakalnis modell alapján

Látható a 2. ábra alapján, hogy a burkolathőmérséklet növekedésével, csökkennek a becsült CBR-értékek, illetve, az esti lehülést követően, ezek újra növekedésnek indulnak. Hasonló trend figyelhető meg a másik két modell esetében is, hiszen mind az „UI” paraméter, mind pedig a becsült reziliens modulus (M_r) a hőmérsékletváltozásra kis mértékben reagál.

Figyelembe véve továbbá, hogy a vizsgált keresztmetszelvek pályaszerkezete alatt, 30 cm-es vastagságban javítóréteg készült, amelyen, eltakarás előtt, 54-75 MPa-nyi E2-értékeket mértek, a kapott földmű-jellemzők megfelelőnek minősíthetők. A Jendia-módszer szerint, $UI < 70$ esetében, a földmű állapota jó; ezzel összhangban, a kapott CBR-értékek is meglehetősen magasak. Az amerikai szabályozás az így megkapott M_r -értékeket $C=0,3$ értékkel korrigálja; ennek figyelembevétele után, a becsült modulus értékek szintén kiválóknak adódnak.

4.2. A KÖTŐANYAGOS RÉTEGEK MEREVSÉGÉNEK ALAKULÁSA

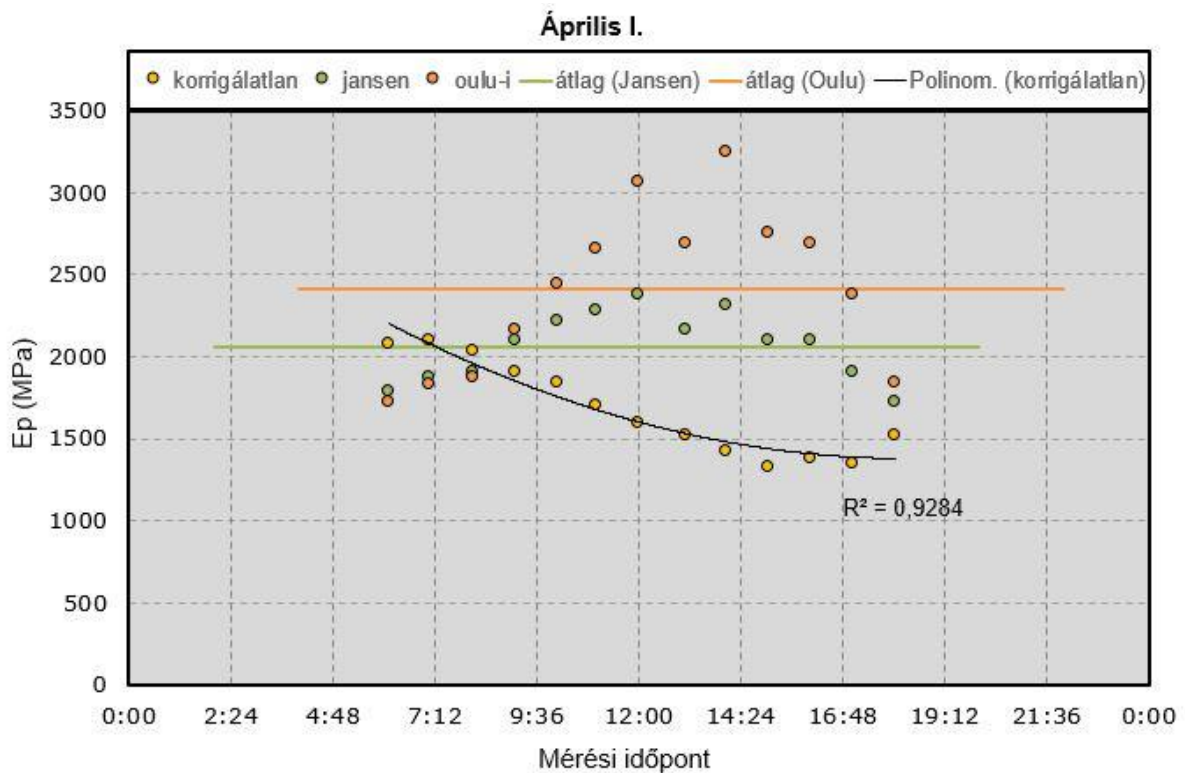
Hasonlóan a földmű-állapot jellemző paramétereikhez, a három módszer pontosságát a kötő-anyaggal készült rétegek vonatkozásában is vizsgáltuk. Meghatároztuk a két mérési pontban, két alkalommal mért adatok alapján, a „ T_z ”, az „SN” és az E_p ” értékeket. Itt azonban már a két – korábban ismertetett – hőmérsékleti korrekciót is alkalmazni kellett. Annak érdekében, hogy a hőmérsékleti korrekció hatása is láthatóvá váljon, minden esetben az eredeti, korrigálatlan adatokhoz is kiszámítottuk a burkolat állapotát jellemző paramétereket (3. táblázat).

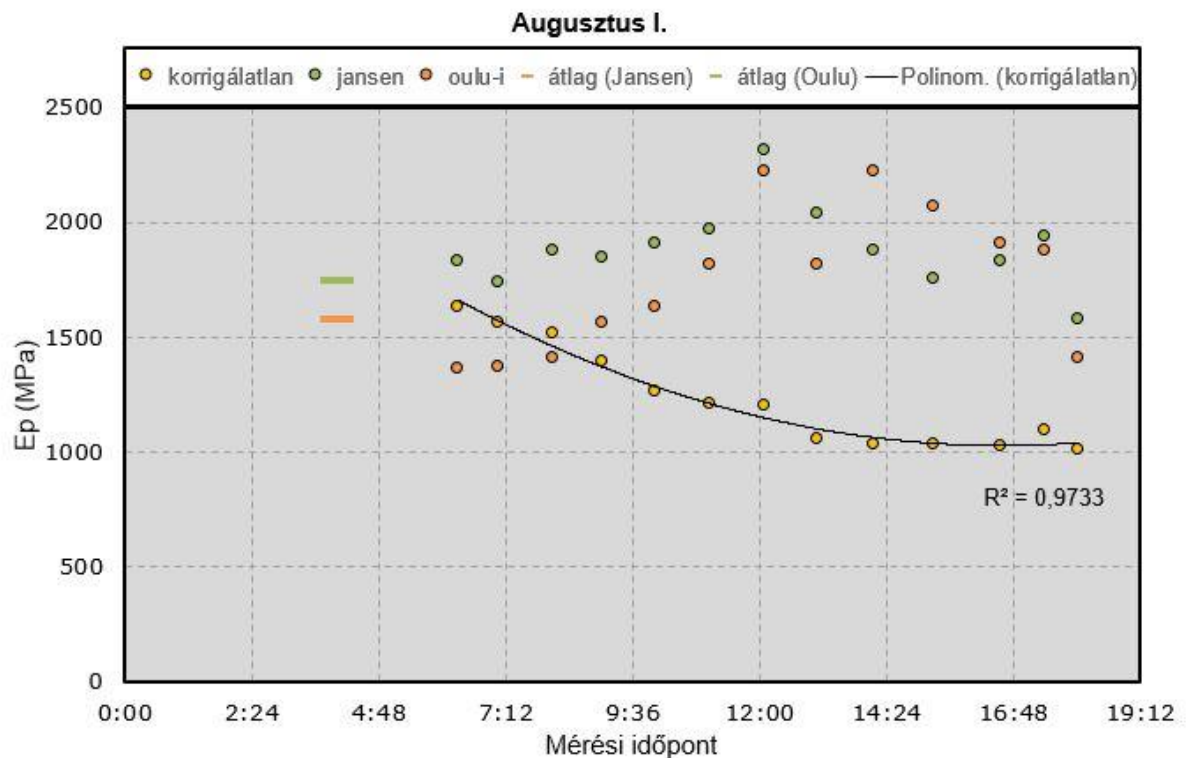
3. táblázat: A különböző eljárások alapján becsült pályaszerkezet állapotjellemzők

	Poudziukas			Jendia			ASTHO		
	SN			TZ			Ep		
	korrigálatlan	korrekció (Jansen)	korrekció (Oulu)	korrigálatlan	korrekció (Jansen)	korrekció (Oulu)	korrigálatlan	korrekció (Jansen)	korrekció (Oulu)
nyár I.									

átlag	6,74	8,70	10,63	1,14	1,55	1,74	1 230	1 882,3	1 741,2
szórás	0,77	0,51	1,51	0,22	0,15	0,17		172,73	312,30
variáció	0,11	0,06	0,14	0,19	0,096	0,099	0,18	0,09	0,18
nyár II.									
átlag	8,90	13,08	18,85	1,95	2,94	3,13	1 852	3 170,8	2 771,8
szórás	0,70	1,75	6,05	0,42	0,50	0,47	208,1	553,5	687,2
variáció	0,08	0,13	0,32	0,22	0,17	0,15	0,11	0,17	0,25
tavasz I.									
átlag	8,14	9,32	10,34	1,54	1,79	1,88	1 673	2 062,8	2 410,1
szórás	0,99	0,64	1,40	0,29	0,18	0,19	287,1	209,3	495,9
variáció	0,12	0,07	0,14	0,19	0,0998	0,0999	0,17	0,10	0,21
tavasz II.									
átlag	10,54	12,52	14,74	2,64	3,15	3,23	2 337	2 947,3	3 473,8
szórás	1,06	1,46	3,17	0,62	0,57	0,44	314,1	484,5	817,4
variáció	0,10	0,12	0,21	0,23	0,18	0,14	0,13	0,16	0,24

Jól látható, hogy, a korrigálatlan paraméterekhez képest, mind a két hőmérsékleti korrekció a behajlási eredmények felhasználhatóságán javított, hatásuk mértékét a 3. ábrán szemléltettük.





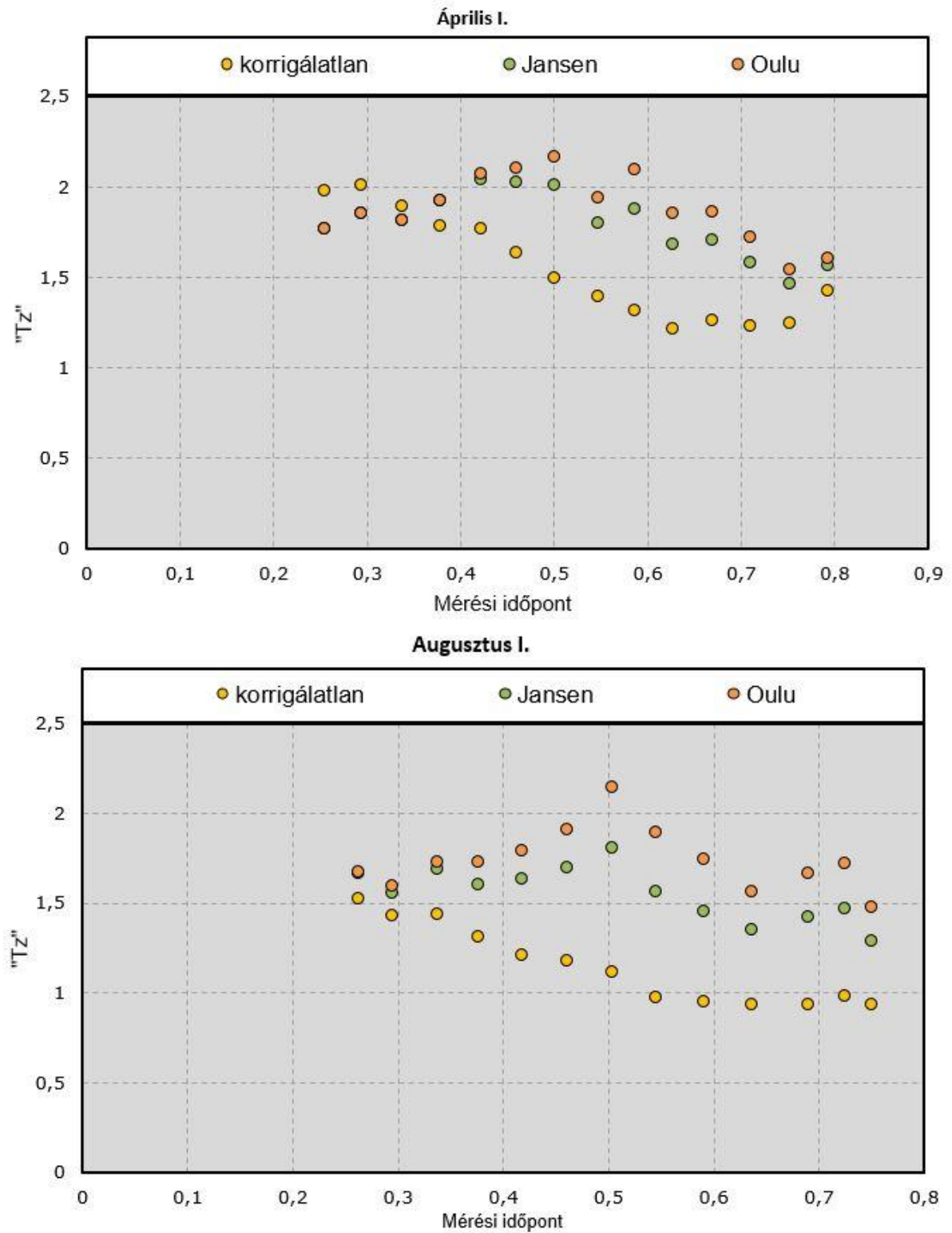
3. ábra: Az AASHTO-módszer szerint meghatározott „Ep” értékek alakulása, hőmérsékleti korrekciókkal és azok nélkül

Látható, hogy a burkolathőmérséklet növekedésével a becslült „Ep” értékek csökkennek, illetve az esti lehűlést követően, a korrigálatlan értékek újra növekednek. A mérési időpont, azaz közvetve a hőmérséklet alakulása és a becslült teherbírás között nagyon szoros korreláció figyelhető meg. A hőmérsékleti korrekciónak ezt a hatást kellene „kisimítania”. Az áprilisi mérést vizsgálva, látható, hogy a Jansen-féle korrekció, az oulu-i összefüggéssel szemben, a hőmérsékleti hatás jelentősebb mértékű kiküszöbölésére volt képes. A 4. táblázat a 3. ábrán fel-tüntetett adatok áttekintő, statisztikai leírását szolgáltatja.

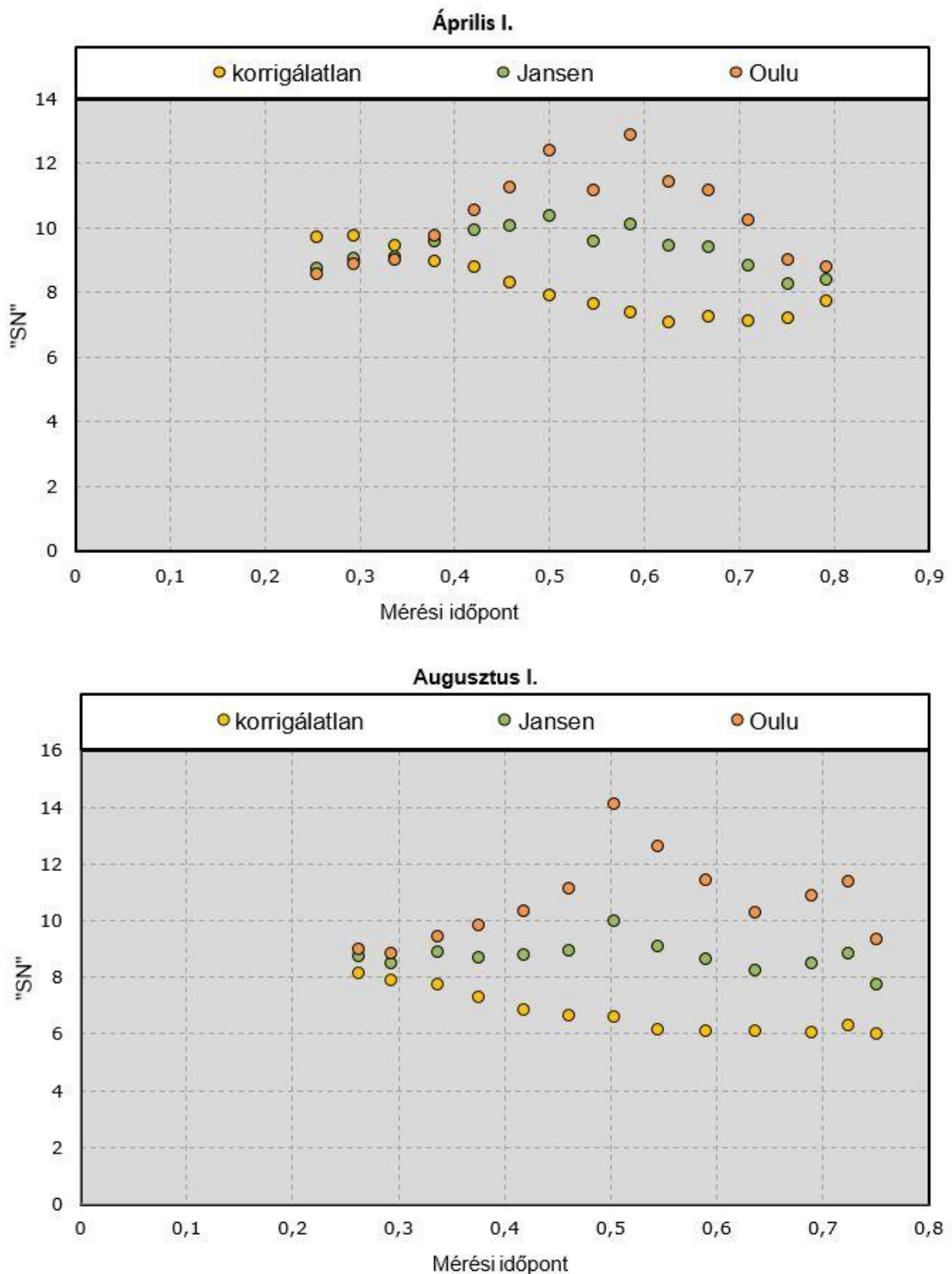
4. táblázat: Az AASTHO-eljárás alapján becslült pályaszerkezet-állapotjellemző terjedelme, különböző korrekciók esetében

Korrekció-típus	Statisztikai jellemző	Mérési időpont és hely	
		Augusztus I.	Április I
Korrigálatlan	min	1008,309	1328,461
	max	1625,188	2094,227
	átlag	1230,553	1673,36
	terjedelem	617	766
Jansen-féle korrekció	min	1578,336	1718,891
	max	2312,922	2375,406
	átlag	1882,354	2062,808
	terjedelem	735	657
Oulu-i korrekció	min	1359,695	1718,891
	max	2219,195	3250,188
	átlag	1741,24	2410,114
	terjedelem	860	1 531

Hasonló trend figyelhető meg a másik két modell esetében is; mind az „Tz” paraméter, mind pedig a becslült SN a hőmérséklet változására hasonlóképpen reagál.



4. ábra: A Jendia módszer szerint meghatározott „Tz”értékek alakulása, hőmérsékleti korrekciókkal és azok nélkül



5. ábra: A Puodžiukas-módszer szerint meghatározott „SN” értékek alakulása, hőmérsékleti korrekciókkal és azok nélkül

Az eredmények azonban jól alátámasztják, hogy bármilyen modell alapján történik majd a jövőben a magyar úthálózat pillanatnyi teherbíróképességének vagy hátralévő élettartamának – akár hálózati, akár projekt szintű – vizsgálata, annak egyik legfontosabb eleme kell legyen egy olyan új hőmérsékleti korrekciós összefüggés megalkotása, amely a behajlási teknő teljes spektrumában képes korrigálni.

5. TOVÁBBI KUTATÁSI CÉLOK ÉS FELADATOK

Távlati kutatási célunk – a hazai úthálózat teherbírásának alakulását hálózati szinten és elvárt pontossággal leírni képes modell megalkotása – megvalósításaként, első lépéseként három (lett, német és amerikai) modellt vizsgáltunk. A modellek alkalmazhatóságának azonban szükséges feltétele a klimatikus hatások kiküszöbölése annak érdekében, hogy a teherbírás változása közvetlenül a lefutott forgalmi terheléssel legyen kapcsolatba hozható. Ennek részeként azt vizsgáltuk, hogy a hőmérsékleti hatás milyen módon és mértékben küszöbölhető ki. A csekély számú, korábbi kutatás során keletkezett adatok újrahasznosításakor azonban egyértelmű állás-foglalás nem tehető; csupán az állapítható meg, hogy mind a három vizsgált módszer alkalmas lehet arra, hogy a hazai pályaszerkezetek teherbírásának jellemzésére készülő modell alapját alkossa. Sajnos a napi hőingás hatásának kiküszöbölésére alkalmas hazai korrekciót az érvényes magyar szabályozás (e-ÚT 09.02.34, 2005) nem tartalmaz; a korábbi publikációkban (Gáspár – Karoliny, 2014), szereplő, ún. finn korrekció erre megfelelő lehet; a két szelvényben és két időszakban végzett méréseink eredményei azonban azt mutatták, hogy a Németország-ban kidolgozott korrekció (Jansen, 2009) jobb megbízhatósággal korrigál. Ennek eldöntése azonban még újabb vizsgálatok elvégzését igényli.

További vizsgálatok szükségesek annak megítélésére is, hogy az évszaki ingadozást, valamint a mérést megelőző időszak csapadékviszonyait milyen mértékben képesek a modellek leképezni. Ennek érdekében, kijelölt útszakaszokon heti rendszerességgel, egy teljes meteorológiai éven át végzett mérések szolgálhatnak alapul.

A fenti vizsgálatok elvégzését és kiértékelését követően dolgozható ki olyan hazai modell, amelynek segítségével a magyar aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek leromlása modellezhető.

6. IRODALOMJEGYZÉK

2-1.202:2005 (e-UT_09-02-34) Dinamikus teherbírás mérés (KUAB). Mérési eredmények feldolgozása.

AASHTO, American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Bryce, J. M. et al.: Developing a Network-Level Structural Capacity Index for Structural Evaluation of Pavements. VCTIR 13-R9. Virginia Center for Transportation Innovation and Research, Charlottesville, 2013.

Burkolatleromlási modell készítése. A KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. témajelentése (Témafelelős: dr. Gáspár László), 2017, 113 p.

Chai et al. : Prediction of Subgrade CBR using FWD for Thin Bituminous Pavements. International Journal of Pavement Research and Technology, 2013.

Cickovic, M.; Bald, J. Stefan: Rückrechnung der charakteristischen mechanischen Parameter von Verkehrsbefestigungen aus FWD-Messungen Straße + Autobahn, 2017

Emery, S. J.: Prediction of Moisture Content for Use in Pavement Design. Ph.D. dissertation. University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 1985.

Flora, W.F. Development of a Structural Index for Pavement Management: An Exploratory Analysis. Master's Thesis. Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2009.

Gáspár L., Karoliny M.: Felújított útpályaszerkezetek ciklusidejének növelése kor-szerű tervezéssel. Közlekedéstudományi Szemle 64:(4), pp. 7-20, 2014.

Gedafa, D. et al.: Estimation of Remaining Service Life of Flexible Pavements from Surface Deflections. Journal of Transportation Engineering, Vol. 136, Issue 4, 2010a, pp. 342-352.

Gustav T. Rohde: Determining Pavement Structural Number from FWD Testing. Transportation Research Record 1448, 1994.

Haas, R., Hudson., Q.R. and Zaniewski, J.: Modern Pavement Management. Krieger Publishing Company, Malabar, FL. 1994.

Highway Research Board „The AASHO Road Test: Report 5 – Pavement Research” Highway Research Board Special Report 61-E, 1962.

Irwin, L. H. User’s Guide to MODCOMP2, Version 2.1. Local Roads Program, Cornell University, Ithaca, N.Y., 1983.

Jansen, D.: Temperaturkorrektur von mit dem Falling-Weight-Deflectometer gemessenen Deflexionen auf Asphaltbefestigungen, Essen, 2009.

Kavussi, A. et al.: A new method to determine maintenance and repair activities at network level pavement management using falling weight deflectometer. Journal of Civil Engineering and Management, 23:3, 338-346, DOI: 10.3846/13923730.2015.1073173, 2017

Kayser, T.: Berücksichtigung klimatischer Bedingungen bei der rechnerischen Dimensionierung von Oberbauten für Verkehrsflächen, Dissertation, TU Dresden. 2007.

Omar Elbagalati, Mostafa Elseifi, Kevin Gaspard & Zhongjie Zhang (2018) Development of the pavement structural health index based on falling weight deflectometer testing, In-ternational Journal of Pavement Engineering, 19:1, 1-8, DOI: 10.1080/10298436.2016.1149838

Puodžiukas, V., Pakalnis, A.; Determination of seasonal factors for structural condition values of bituminous pavements, Journal of civil engineering and management, 8:2, 133-137, doi: 10.1080/13923730.2002.10531265, 2002.

Romanoschi, S. and Metcalf, B.: Simple approach to estimation of pavement structural capacity. Transportation Research Record 1652 (1), 198–205. doi:10.3141/1652-59., 1999.

Scullion, T.: Incorporating a structural strength index into the Texas pavement evaluation system. CollegeStation, TX: Texas Transportation Institute, Research Report 409-3F, 1988

Tóth Csaba – Tóth J.: Útpályaszerkezetek roncsolásmentes diagnosztikai lehetőségei. Köz-úti és mélyépítési szemle. (2008)

Ureczky J. Tóth Cs.: A hőmérséklet teherbírásra gyakorolt hatásának vizsgálata. Közúti és mélyépítési szemle 58. évfolyam, 3.szám.

ÚT 2-2.202:2005 (e-ÚT 06.03.13) Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése és megerősítése.

Wimsatt, A.J.: Direct analysis methods for falling weight deflectometer deflection data. Transportation Research Record 1655 (1), 135–144. doi:10.3141/1655-18., 1999.