

A pályaszerkezet merevségének hatása a behajlási teknő alakjára

Primusz Péter, Markó Gergely, Péterfalvi József, Tóth Csaba

2012. november 14.

Kivonat

The paper introduces a new method for calculating the elastic moduli of the pavement layers. The method requires only two input parameters: the thickness of the upper „bound” layer and the falling weight deflectometer (FWD) measurement data. The authors developed a continuously differentiable regression function, which can be applied to describe the shape of the deflection bowl. Additional parameters of the deflection bowl (e.g. radius of curvature, position of the inflexion point) can be calculated based on the regression function. FWD measurements were simulated running the „BISAR” software on different pavement variations. Outputs of the simulations were further processed with own developed software. As a result, a series of diagrams were elaborated, by which the elastic moduli of the pavement layers can be determined.

1. Bevezetés

A forgalom a járművek abroncsain keresztül adja át terhelését a pályaszerkezetnek. Ennek hatására függőleges igénybevételek (nyomó, ütő, rázó, hajlító, szívó stb.) és a vízszintes erőhatásokból (fékezésből, gyorsításból, koptatásból stb.) származó nyíró igénybevételek jelennek meg (Kosztka, 2009). Ezen feszültségek az egyes pályaszerkezeti rétegekben eltérő hatást fejthetnek ki, ilyenek a rugalmas és a plasztikus (maradandó) alakváltozás, a törés és a szerkezeti átrendeződés (Boromisza, 1976). Mindezen szerkezeti változások összessége a burkolat felszínén alakváltozásokban jelentkezik, vagyis kialakul az úgynevezett behajlási teknő vagy deformációs felület.

A kialakuló deformációk mérésére több módszert dolgoztak ki. Jelenleg a csillapított rezgéskeltésen alapuló mérési eljárások terjedtek el. Ezeket összefoglaló néven nehézejtősúlyos behajlásmérő (Falling Weight Deflectometer, FWD) eszközöknek nevezzük. Ezek az impulzussal operáló behajlásmérő berendezések általában egy lökésállapítóval ellátott tárcsára – a helyzeti energia felhasználásával – adott magasságból adott tömeget ejtenek le és a kialakuló elmozdulásokat rögzítik. A vizsgálat alatt rögzített behajlási teknő lényegesen több információt szolgáltat a pályaszerkezet pillanatnyi állapotáról mint (csak önmagában) a központi behajlás, így pontosabban határozható meg annak teherbírása, hátralévő élettartalma és a szükséges erősítőréteg vastagsága. Egy adott pályaszerkezet esetében az alkalmazandó rehabilitációs eljárás kiválasztása pedig igen nagy gazdasági jelentőséggel bír. A pályaszerkezet állapotának megfelelő ismerete nélküli döntéshozatal igen költséges lehet. Pontosan ezért fontos, hogy a mért elmozdulások elemzésével olyan többletinformációhoz jussunk, ami a döntést megkönnyíti a gyakorló mérnök számára. Munkánkat ezzel a szemlélettel kezdtük el és eredményeinket jelen tanulmányban foglaltuk össze.

2. Anyag és módszer

2.1. A deformációs vonal közelítése függvényekkel

A teherbírás megítéléséhez szükséges behajlásméréskor a terheléstől csak bizonyos távolságokra mérjük és rögzítjük a kialakult elmozdulásokat. Ez szükségessé teszi, hogy a diszkrét mérési

pontokra függvényt illesszünk és így teljes képet kapjunk a kialakult elmozdulásokról. A deformációs vonal alakját leíró függvények alkalmazása azért is célszerű, mert viszonylag egyszerű számításokkal lehetséges azokat a geometria tulajdonságokat meghatározni, amelyek a terhelt pályaszerkezet szempontjából fontosak.

A bányászat hatására kialakuló felszíni süllyedések miatt (pl. alagútépítés) már korán kidolgoztak összefüggéseket a jelenség leírására. A legtöbb szerző (*Aversin, Martos, Beyer, Bals*, stb.) a *Gauss*-féle haranggörbéhez hasonló függvényalakot javasolt (Fazekas, 1978). Útpályaszerkezetek deformációs vonalának leírására Hothan és Schäfer (2004) összefoglaló munkájában találhatunk javaslatokat.

Hossain és Zaniewski (1991) a külső terhelés hatására kialakuló alakváltozás közelítésére exponenciális függvényt használt fel:

$$D(x) = ae^{bx} \quad (1)$$

ahol:

x = távolság a terhelés középpontjától.

a és b = paraméterek.

Vizsgálataik alapján a felsőbb és merevebb rétegek hatása az a paraméter csökkenésében, míg a mélyebben fekvő nagyszilárdságú rétegek hatása a növekvő b értékben mutatkozik meg. Az a és b együtthatók tehát az útpályaszerkezet szilárdsági jellemzőinek függvénye. Az exponenciális függvény magas korreláció mellett képes az FWD méréseket közelíteni, de a behajlási teknő természetes alakját nem tudja visszaadni. Alkalmazása ezért még magas korreláció mellett sem helyes.

Jendia (1995) kísérletet tesz a teljes deformációs vonal leírására oly módon, hogy a deformációs vonal középső tartományában ($0 \leq x \leq r$) az exponenciális függvényt egy hatodfokú polinommal helyettesíti:

$$D(x) = \begin{cases} c_3x^6 + c_2x^4 + c_1x^2 + c_0 & 0 \leq x \leq r \\ ae^{bx} & x \geq r \end{cases} \quad (2)$$

Az ismeretlen paraméterek közül Jendia először az a és b értékét határozza meg. A függvények kapcsolódási pontjánál a második derivált azonosságát, vagyis a görbület folytonosságát írja elő. Ezért három kényszerfeltétel áll szemben a c_3 , c_2 , c_1 és c_0 paraméterrel. Az utolsó független változót az FWD készülék második illetve harmadik szenzorán mért értékek és a számított elmozdulások különbségének minimalizálásával, iteratív módon állítja elő. Jendia módszere a magas számításigényéhez képest is csak alacsony egyezést képes elérni az adatpontokkal (1. ábra).

Grätz (2001) a behajlási teknő leírását egyetlen összefüggéssel teszi lehetővé:

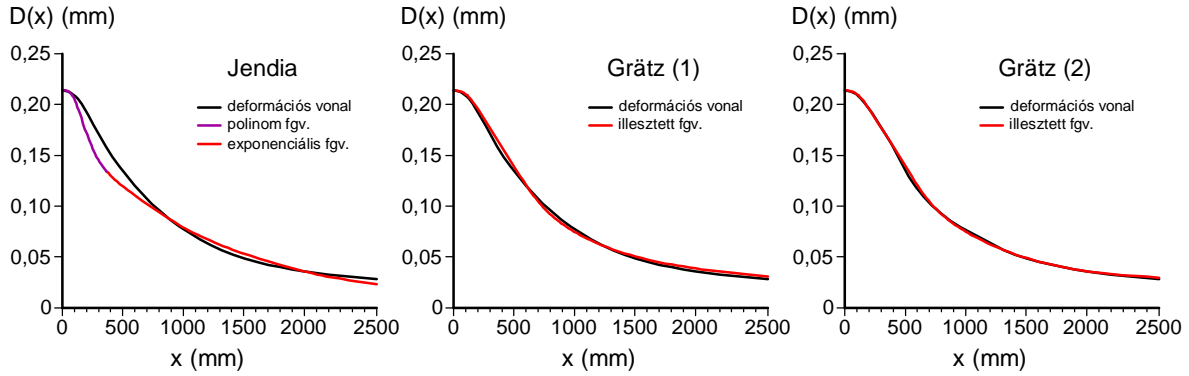
$$D(x) = \frac{w_a + w_b x^2}{1 + w_c x^2} \quad (3)$$

A javasolt racionális törtfüggvény¹ segítségével a teljes teknőt jellemző három együttható kifejezhető (1. ábra. Grätz (1)). A mért eredményekkel való egyezés tovább növelhető, ha a polinom fokszámát a negyedik hatványra növeljük:

$$D(x) = \frac{w_a + w_b x^2 + w_c x^4}{1 + w_d x^2 + w_e x^4} \quad (4)$$

A módosított racionális törtfüggvénnyel magasabb korreláció érhető el, de az egyenlet együtthatóiból a rétegparaméterekre nem lehet következtetni, mivel a koefficiensek különbözőképpen függenek az összes rétegtől (1. ábra. Grätz (2)). A gyakorlat számára a deformációs vonal leírására olyan függvényalak alkalmazása célszerű amelynek segítségével levezethető olyan tekno-paraméter mely az útpályaszerkezet egy speciális rétegét jellemzi (pl. görbületi sugár).

¹A racionális törtfüggvény a valós számok halmazának olyan önmagára való leképezése, amelyben a hozzárendelést két polinom hányadosával adjuk meg.



1. ábra. Eltérő függvényillesztések összehasonlítása (Hothan és Schäfer, 2004).

Dähmert (2005) dolgozatában két függvényalakot mutat be a francia irodalomból (Ph. Leger és P. Autret) amik jó egyezést mutatnak az elméleti deformációs vonallal:

$$D(x) = D_0 e^{-(x^2/b)} \quad (5)$$

és

$$D(x) = D_0 \frac{a}{x^2 + a} \quad (6)$$

ahol:

D_0 = maximális elmozdulás a terhelés tengelyében.

A (6) összefüggést eredetileg a Lacroix-mérések feldolgozásához fejlesztették ki. Szerkezetében pedig az *Agnesi*²-féle (ejtsd: Anyeszi) síkgörbéhez hasonló (Scharnitzky, 1989).

Cser (1961) már közvetlenül a kerékterhelés alatt kialakuló deformációk modellezéséhez használja fel a (6) összefüggést $a = 3r^2$ helyettesítés mellett:

$$D(x) = D_0 \frac{3r^2}{x^2 + 3r^2} \quad (7)$$

ahol:

r = az egyenletesen megoszlónak és köralakúnak vett terhelt felület sugara.

A görbének a terhelés szélén ($x = r$) inflexiós pontja van. Az összefüggés csak korlátozottan képes lekövetni a kialakuló deformációkat, mivel az inflexiós pont rögzített.

2.2. A deformációs vonal közelítése mechanikai összefüggések alapján

A Boussinesq-féle feszültségképletekből kiindulva levezethető $d = 2r$ átmérőjű hajlékony köralap középpontja alatti D_0 süllyedés, vagy lehajlás értéke (Nemesdy, 1985):

$$D_0 = \frac{2pr}{E_e} (1 - \mu^2) \quad (8)$$

ahol:

D_0 = a terhelés tengelyében mért függőleges elmozdulás [mm].

E_e = a rugalmas féltér modulusa [MPa].

p = felületi terhelés [MPa].

r = a terhel tárcsa sugara [mm].

μ = a Poisson-féle tényező [-].

²Maria Gaetana Agnesi (Milánó, 1718. május 16. – Milánó, 1799. január 9.) olasz nyelvész, matematikus és filozófus, a Bolognai Egyetem tiszteletbeli tagja.

A központi lehajlás mellett Odemark a szokásos módon terhelt E_e modulusú rugalmas féltér deformációs vonalát is számította az $y = f(p, r, E_e)$ függvény segítségével. Ennek a $x = 0$ helyen vett második differenciálhányadosa jól közelíti a görbület értékét. Az R_0 görbületi sugár így tehát egyrétegű féltér esetén a következő képlettel számítható (Nemesdy, 1985):

$$R_0 = \frac{E_e r}{p(1 - \mu^2)} \quad (9)$$

Mind a két összefüggés azonos eredményt szolgáltat homogén végtelen féltér esetén, így belátható, hogy a központi lehajlás és a görbületi sugár között függvénykapcsolat áll fent. Vegyük a fenti két egyenlet által szolgáltatott egyenértékű modulus hányadosát:

$$c = \frac{2r^2}{R_0 D_0} \quad (10)$$

ahol a c tényező a modulusok hányadosát fejezi ki, ami homogén végtelen féltér esetén $c = 1$. A homogén féltér felületén kialakuló deformációk meghatározása Boussinesq elméletével igen hosszadalmas számítást igényel, ezért ennek egyszerűsítése érdekében egy közelítő függvény felvétele célszerű. A közelítő függvény felírásánál pedig a geometriai korlátozásokból vagyis peremfeltételekből kell kiindulni. A bemutatott összefüggések alapján a következő feltételek fogalmazhatóak meg: $x = 0$ ahol $D(x) = D_0$, és a keresett $D(x)$ függvény második deriváltja $D''(x) \approx 1/R_0$ az $x = 0$ helyen. Ezen felül a meghatározott D_0 és R_0 értékekre teljesülni kell (10) mechanikai feltételnek is. A feltételeket kielégítő függvény keresésénél a Cser (1961) által javasolt függvényalakból indultunk ki:

$$D(x) = D_0 \frac{d^2}{c \cdot x^2 + d^2} = D_0 \frac{1}{c \left(\frac{x}{d}\right)^2 + 1} \quad (11)$$

A javasolt függvényben c az úgynevezett *alaktényező* mely a deformációs vonal alakját befolyásolja (Primusz és Tóth, 2009; Primusz és Markó, 2010). A közelítő függvény valóban kielégíti az $x = 0$ és $D(x) = D_0$ feltételt, ez könnyen belátható. A behajlási teknő alakjának felírása után rátérhetünk a görbületi sugár meghatározására. A $D = D(x)$ függvény tetszőleges pontjához tartozó simuló kör görbületi sugarát a $\kappa(x) \approx D''(x)$ összefüggéssel becsültük:

$$\kappa(x) \approx \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{D_0 4r^2}{cx^2 + 4r^2} \right) = 8 \frac{D_0 r^2 c (3cx^2 - 4r^2)}{(cx^2 + 4r^2)^3}$$

A görbület negatív előjele azt fejezi ki, hogy pozitív hajlító nyomaték esetén a görbületi sugárral jellemzett simuló kör középpontja (0 pont) a rúdtengely $-D$ irányítású oldalára esik. A görbület változását a 2. ábra mutatja be.

A minimális görbületi sugár $x = 0$ helyen

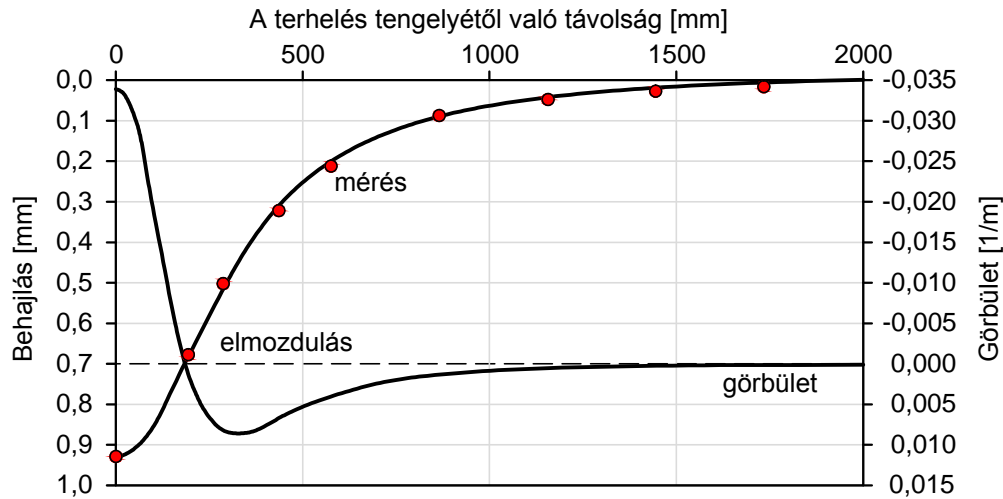
$$R_0 = \frac{2r^2}{D_0 c} \quad (12)$$

Láthatjuk, hogy a (10) mechanikai feltétel is teljesül, így a felvett függvény jó közelítése a mechanikai úton meghatározott deformációs vonalnak.

2.3. A kötött réteg alján ébredő nyúlás becslése

A deformációs vonalra illesztett függvényből levezetett görbületi sugár és a burkolatvastagság ismeretében a kötött rétegek alján jelentkező megnyúlásokat jól lehet becsülni az alábbi képlettel:

$$\varepsilon = \frac{h}{2R_0} = c \cdot D_0 \frac{h}{4r^2} \quad (13)$$



2. ábra. A behajlási teknő és a görbület változása a terhelés tengelyétől távolodva.

ahol:

ε = a fajlagos alakváltozás a terhelés tengelyében.

h = a kötött réteg vastagsága.

R_0 = a görbületi sugár a terhelés tengelyében.

A kötött rétegre előírt feltételek csak akkor teljesülnek, ha a Hooke-törvény fennáll és a rugalmassági modulus nyomásra és húzásra is egyforma (Primusz és Tóth, 2009).

2.4. Számítógépes szimuláció a BISAR szoftverrel

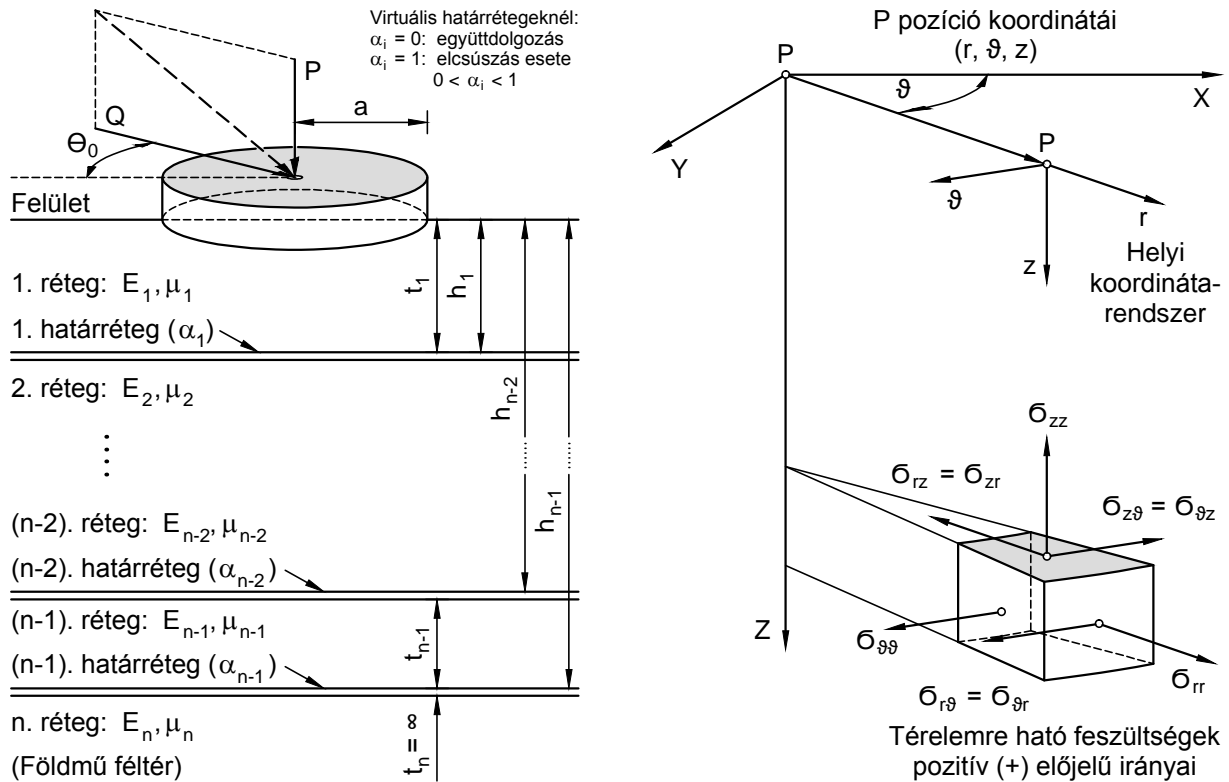
A szimuláció alapvetően olyan vizsgálat, amikor egy folyamat fizikai vagy számítógépes modelljén keresztül tanulmányozzák a rendszer várható, illetve valódi viselkedését. A szimulációs modell alkalmazásával képesek vagyunk a rendszer modelljét megfelelő bemenetekkel ellátni, működtetni és a kimeneteket megfigyelni.

Az útpályaszerkezetek szimulációs vizsgálatán keresztül megfigyelhető, hogy az FWD készülőkre jellemző külső terhelés hatására milyen alakváltozások alakulnak ki az elmozdulásokat rögzítő szenzorok helyén. Valamint, hogy milyen mértékű igénybevételek jelentkeznek az egyes szerkezeti rétegekben. A szimuláció segítségével a valóságos útpályaszerkezeteken rögzített behajlási vonalak is nagyobb információ tartalommal ruházhatóak fel és így pontosabb pályaszerkezet-diagnosztikát tesznek lehetővé.

2.4.1. A szimulációs modell felállítása

Jelenleg az útpályaszerkezetekben keletkező igénybevételek meghatározásának az egyik legelterjedtebb és leginkább elfogadott módja a számítógépes programok alkalmazása. Az egyik legrégebbi és legtöbbet hivatkozott szoftver a SHELL Kutatóközpont által kifejlesztett BISAR (Bitumen Stress Analysis in Roads). A programmal feszültséget, megnyúlást és elmozdulást lehet számolni egy függőleges erővel terhelt rugalmas többrétegű rendszerben. A rétegeket a rétegvastagság, a rugalmassági modulus, a Poisson-féle tényező valamint a rétegek határán értelmezett tapadás jellemzi. Az egész rendszert legalul egy végtelen rugalmas féltér támasztja alá (3. ábra).

A szimuláció végrehajtásához a BISAR program DOS-os változatát használtuk fel, mert így – a kiindulási adatfájlok generálása után – a számításokat kötegelten lehetett futtatni. Az adatfájlokat tartalmazták az egy menetben számítandó pályaszerkezetek felépítését (rétegek száma, vastagsága, modulusa, stb.), a terhelés nagyságát és helyét, illetve azon pontok koordinátáit,



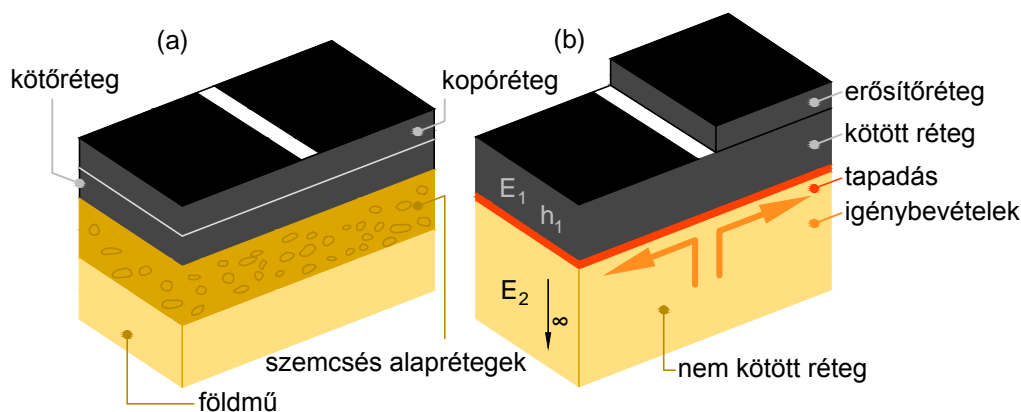
3. ábra. A BIZAR program elvi háttere.

ahol az igénybevételek és elmozdulások számítása szükséges. A BIZAR-szimuláció két- és háromrétegű rendszer esetén futott le.

2.4.2. A szimulációban felhasznált pályaszerkezet modellek

Az útpályaszerkezeteket felépítő rétegek alapvetően három fő csoportba sorolhatók: földmű (szükség szerint fagyvédő és/vagy javítórétegekkel együtt), alapréteg és burkolati réteg. Minden egyes csoport további rétegekre bontható, így átlagosan egy valóságos útpályaszerkezet 3–5 rétegből épül fel (4 a) ábra). Az egyes rétegek anyagukat tekintve lehetnek kötőanyag nélküli vagy bitumenes (esetleg hidraulikus) kötőanyag tartalmúak. Mivel a legtöbb pályaszerkezeti modell az anyagtulajdonságokat csak a rugalmassági modulus és a Poisson-féle tényező segítségével képes figyelembe venni, a rétegszám növelése helyett célszerű a kötőanyag nélküli és a kötőanyagot tartalmazó rétegeket összevonni és együttesen kezelni. Ennek megfelelően beszélhetünk kötött és nem kötött pályaszerkezeti rétegekről (4 b) ábra). Az útszerkezet viselkedési modellek az egyes rétegek között értelmezett együttdolgozást is figyelembe képesek venni. A kötőanyag nélküli szemcsés rétegek és a kötőanyagot tartalmazó burkolati rétegek között teljes elcsúszással, míg megerősítés esetén – a régi és az új burkolati réteg között – teljes tapadással érdemes számolni. Még akkor is, ha ez kedvezőbb (kisebb) igénybevételeket okoz a régi aszfaltrétegek esetében.

A szimuláció alatt a meglévő útpályaszerkezetek viselkedését kétrétegű rendszerekkel, míg az útpályaszerkezet megerősítést háromrétegű rendszerekkel vizsgáltuk. A kétrétegű rendszerek a meglévő útpályaszerkezetek idealizált modelljei, amelyekben az alsó réteg a kötőanyagot nem tartalmazó szemcsés réteget és a földművet, míg a felső kötött réteg a burkolati réteget jellemzi. A kötött és a nem kötött rétegek között súrlódásos elcsúszás valószínűsíthető. A kétrétegű pályaszerkezet-modellek esetében a felső, kötött réteg modulusa 1000 és 8000 MPa között, az alsó, nem kötött féltér modulusa pedig 20 és 500 MPa között változott. A minimális és maximális modulusok között mindkét réteg esetében 12 értéket vettünk fel, a felvett értékek közötti tartomány logaritmikus felosztásával. A felső, kötött réteg vastagsága 50 és 500 mm



4. ábra. A szimulációban vizsgált pályaszerkezet modellek szerkezete.

Modell	Nr.	Modulus	Var.	Poisson	Vastagság	Var.	Tapadás	Összesen
Kétrétegű	1	20–500	12	0,5	Végtelen	-	1	1 008
	2	1000–8000	12	0,5	50–500	7		
Háromrétegű	1	20–500	12	0,5	Végtelen	-	1	15 552
	2	1000–8000	12	0,5	50–300	6		
	3	5000–15000	3	0,5	20–120	6	0	

Magyarázat: Rétegsorszám (Nr.) alulról felfelé, Rétegmodulus (Modulus [MPa]), Variáció (Var. [db]), Poisson-tényező [-], Vastagság [mm], Tapadás [0: teljes tapadás, 1: súrlódásos elcsúszás], Összes variáció (Összesen [db])

1. táblázat. A szimulációban vizsgált pályaszerkezet modellek paraméterei.

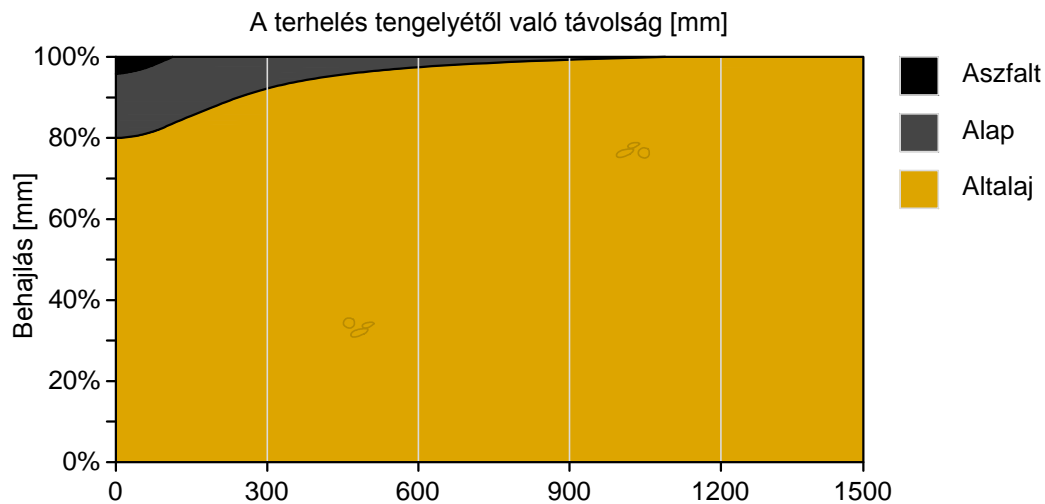
között változott és a vizsgált tartományt itt is logaritmikusan osztottuk fel 7 különböző értéket vizsgálva. Így a kétrétegű rendszereket $12 \times 12 \times 7 = 1008$ db kombinációban vizsgáltuk.

A háromrétegű modellek a kétrétegű rendszerek egy új – erősítésként használt – réteg ráépítése után jönnek létre, és az útpályaszerkezetek teherbírás változása vizsgálható a segítségükkel. A számítások alatt az erősítésként használt új aszfaltréteg merevségi modulusa 5000, 10000 és 15000 MPa volt. Az erősítőréteg vastagságát pedig 2 cm-es lépcsőkben 12 cm-ig növeltük, így összesen 15552 db variáció jött létre (Primusz és Markó, 2010).

A réteg modulus és vastagság mellett a Poisson-féle tényező is eltérő értéket vesz fel különböző anyagok esetében, azonban gyakorlati meghatározása igen nehézkes, mivel értéke feszültség-, illetve hőmérséklet függő (Pethő, 2008). Általános útépitő anyagok esetén értéke általában 0,2 és 0,5 között változhat. A harántkontrakciós tényező változásának hatását részletesen L. Peutz és Korswagen (1973) valamint Tam (1987) vizsgálta. A kutatók arra a megállapításra jutottak, hogy a Poisson-féle tényező változtatása az elsődleges méretezési paramétereket csak kis mértékben befolyásolja. Vagyis a Poisson-féle tényező változtatásának a behajlásokra gyakorolt hatása elenyésző a rétegvastagsághoz vagy a réteg modulusához viszonyítva. Ha a Poisson-féle tényezőt 0,2-ről 0,5-re növeljük a behajlások csupán néhány százalékkal csökkennek (Van Gurp, 1995). A bemutatott kutatások alapján a BISAR szimulációban minden réteg $\mu = 0,5$ értékkel lett figyelembe véve. Ebben az esetben az analitikus összefüggések is nagymértékben egyszerűsödnek, így több okból is praktikus ezt az értéket választani.

2.4.3. Igénybevételek számítása

A BISAR szoftver több terhelést képes figyelembe venni és azok szuperpozícióját számítani. A terhelések és a vizsgálati pontok egy koordináta rendszerben helyezkednek el és tetszőlegesen de-



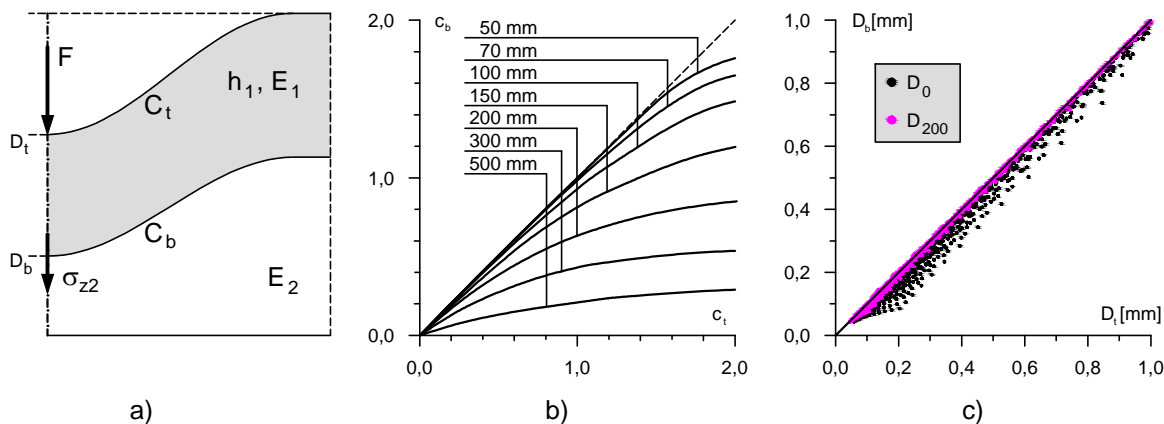
5. ábra. Az egyes rétegek hozzájárulása a felszíni behajláshoz (Van Gurb, 1995).

finiálhatók az x , y , z koordináta számhármassal. A szimuláció alatt $F = 50$ kN nagyságú, egyes kerékterhet vettem figyelembe, amely függőleges irányban a legfelső rétegre hat, és egyenletesen oszlik meg egy $r = 0, 15$ m sugarú hajlékony körtárcsán ($p = 0, 707$ MPa). A vizsgált pontok – a terhelés tengelyétől mért – távolsága pedig megegyezett az FWD készülékek szokásos szenzor-elrendezésével. Az aszfalt burkolatok élettartama szempontjából a legfontosabb igénybevétel az alsó szélső szál megnyúlása a függőleges hajlítóterhelés hatására. Ezért a rögzített pozíciókban nem csak a függőleges elmozdulásokat hanem a kötött rétegek alsó síkján értelmezett megnyúlásokat is vizsgáltuk. A BISAR program futtatása után eredményül kapott szövegfájlokat – egy újabb saját fejlesztésű – programmal értékeltük ki. A BISAR által a burkolat felületén számolt függőleges elmozdulásokra, mint egy FWD mérés eredményére tekintettünk a további elemzéseknél.

3. Eredmények és megvitatásuk

Az értékelés első részében azt vizsgáltuk, hogy egy adott útpályaszerkezet esetében mennyi az egyes rétegek befolyása a kialakuló deformációkra. Ezt a kérdést részletesen tárgyalja Van Gurb (1995) dolgozatában. Az 5. ábra azt mutatja be, hogy egy három rétegű szerkezet egyes rétegei mennyiben járulnak hozzá a felszíni behajlásokhoz (Van Gurb, 1995). Az eloszlás természetesen változik a rétegvastagság vagy a rétegek merevségének módosítása esetén. A dolgozat szerint minél vastagabbak és merevebbek a felső rétegek annál fontosabbá válnak az 5. ábra sötétre színezett területei. Az ábra azt is jól szemlélteti, hogy a teherhordó altalaj befolyásolja leginkább a felszíni behajlások csúcserékét és a terhelés tengelyétől 900 mm-re a mért behajlás már 100%-ban a földmű behajlását reprezentálja. Az is megfigyelhető, hogy ha az altalaj és az alapréteg hatását együttesen kezeljük, akkor a felső kötött (aszfalt) réteg hatása csak a terhelés tengelyétől 300 mm-re terjed ki, vagyis a központi elmozdulásokra fejt ki leginkább a hatását. Ez az elgondolás a BISAR szimuláció segítségével vizsgálható.

A felállított pályaszerkezet modellek esetén a felszíni maximális és a kötött réteg alján megjelenő részleges elmozdulásokat egyaránt számítottam a BISAR szoftverrel. Így szerkezetenként mindkét deformációs vonal rendelkezésre állt. Ezekre az elmozdulásokra a 11 függvényt illesztettem aminek eredményeként kétféle c alaktényező értéket kaptam. Összevetve a két értéket azt mondhatjuk, hogy a felszíni és a kötött réteg alján jelentkező deformációs vonal között a (h) rétegvastagságtól függő eltérés mutatható ki. Ezt a kapcsolatot grafikusán a 6 ábra mutatja be, a felszíni deformációs vonalat a c_t míg a kötött réteg alján lévő a c_b jelöli (6 a) ábra). Minél vastagabb a kötött réteg vastagsága (h) annál nagyobb az eltérés mértéke is (6 b) ábra). Az



6. ábra. A felszínen és a kötött réteg alján ébredő deformációkra illesztett függvény c paraméternének változása.

alaktényezők közötti eltérések az elmozdulások közötti különbségekre vezethetők vissza. Az 1008 db kétrétegű rendszer behajlásait összevetve, csak a központi elmozdulások mutattak mérhető eltérést a 0–1 mm közötti tartományban (a D_0 értékek 70%-a esett ebbe bele). A terhelés tengelyétől távolodva (200–300 mm) pedig már teljesen megegyeztek a felszíni elmozdulások a kötött réteg alján számítottakkal (ez az eredmény is alátámaszta a fejezet elején leírtakat). Vagyis az alaktényezők eltérése főleg a központi behajlás változásával magyarázható, mivel a kötött réteg vastagsága hatással van a réteg saját összenyomódására (6 c) ábra).

Ha most a gyakorlat szempontjából vizsgáljuk az eredményeket és elfogadjuk azt a feltételezést, hogy az útpályaszerkezetek felszínén mért elmozdulások közel azonosak a kötött réteg alján kialakulókkal, azaz $D_t(x) \approx D_b(x)$ akkor a kötött réteg alját jellemző alaktényező (c_b) is jól becsülhető a felszíni mérésekből: $c_t \approx c_b$. Mivel a gyakorlati mérések mindig hibával terheltek, valamint számos olyan tényező van (pl. hőmérséklet) amit a modellezés nem képes számításba venni, a továbbiakban nem teszünk különbséget a kétféle alaktényező között.

3.1. A kétrétegű rendszer elemzése

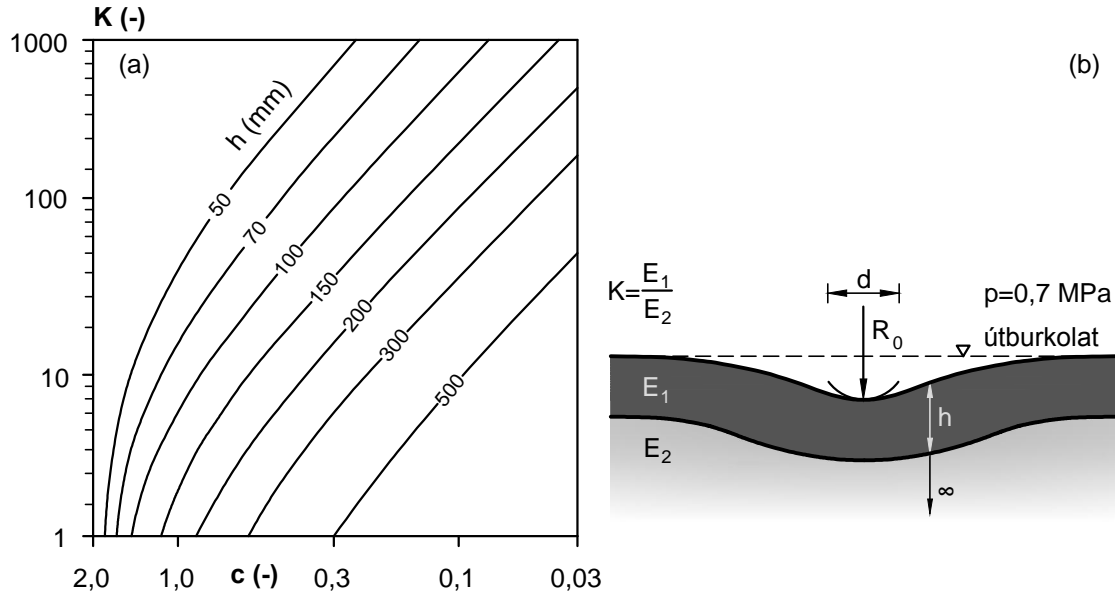
A BISAR szoftver eredményeit felhasználva összefüggést kerestünk a behajlási teknő alakjából levezethető geometriai paraméterek (Primusz és Tóth, 2009) és a kétrétegű rendszer rétegpaméterei között. A vizsgálat kimutatta, hogy a c alaktényező, a rétegmódulusok hányadosa (K) és a kötött réteg vastagsága (h) között igen szoros összefüggés mutatkozik. Az eredmények grafikus feldolgozását a 7. ábra mutatja be. A grafikon segítségével egy adott útpályaszerkezet idealizált kétrétegű modellje – a kötött rétegvastagság ismeretében – visszaszámítható az FWD mérésekből.

A $K = f(c, h)$ függvénykapcsolat statisztikai modelljét két lépésben állítottam fel. A vizsgálatok ugyanis azt mutatták, hogy a modulusok K aránya és az alsó réteg tetején ébredő σ_{z2} nyomófeszültségek között a 7. ábrához hasonló kapcsolat áll fent. Mivel a K és σ_{z2} értékek nem függenek az elmozdulásokra illesztett függvény pontosságától – vagyis a c alaktényezőtől – így célszerű először csak ezt a kapcsolatot leírni. A legjobb eredményt az alábbi modell adta

$$Y = \frac{a}{b \cdot X^c + 1} \quad (14)$$

a következő helyettesítés mellett: $Y = \sigma_{z2}$ és $X = h^d \sqrt{K}$. A modell a , b , c és d paramétereit a STATISTICA programmal határoztuk meg:

$$\sigma_{z2} = \frac{0,8}{20,816 \cdot \left(h^{1,4} \sqrt{K} \right)^{1,393} + 1} = \frac{0,8}{20,816 \cdot h^{1,95} K^{0,70} + 1} \quad (15)$$



7. ábra. Az alaktényező és a rétegmodulusok aránya közötti összefüggés

A illeszkedés pontosságát jól mutatja az igen magas $R^2 = 0,9977$ érték. Ezután a c alaktényező valamint a σ_{z2} érték között kerestünk kapcsolatot. Egyértelmű polinomiális összefüggés mutatkozott $R^2 = 1$ mellett:

$$\sigma_{z2} = 0,0392c^6 - 0,2749c^5 + 0,6907c^4 - 0,8332c^3 + 0,5424c^2 + 0,2588c \quad (16)$$

Az értékpárok grafikus ábrázolása után a hatodfokú polinom egy egyenessel is jól közelíthető volt anélkül, hogy az illeszkedés mértéke gyakorlatilag csökkenne ($R^2 = 0,9954$):

$$\sigma_{z2} \approx 0,4205 \cdot c \quad (17)$$

A 17. összefüggést behelyettesítve a 15-be kapjuk meg a keresett kapcsolatot:

$$c \approx \frac{1,9}{20,816 \cdot h^{1,95} K^{0,70} + 1} \quad (18)$$

vagy átrendezve K -ra

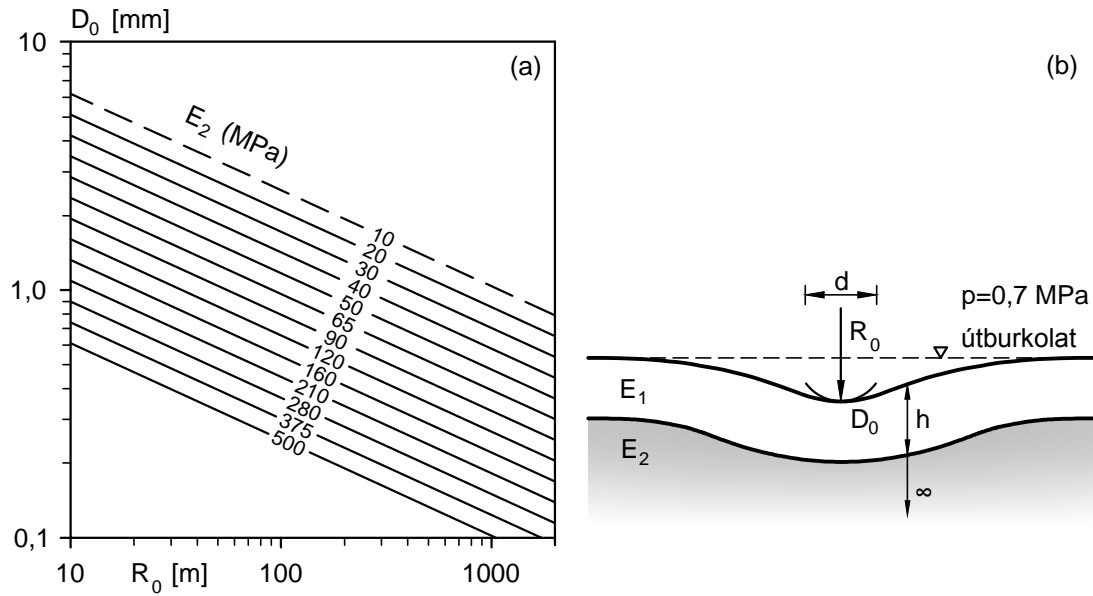
$$K \approx 0,0131 \left[h^{-1,95} \left(\frac{1,9}{c} - 1 \right) \right]^{1,428} \quad (19)$$

az így megkapott K tényező a rétegek egymáshoz viszonyított merevségét fejezi ki.

3.1.1. A szemcsés rétegek modulus becslése

Hoffmann (1988) munkája szerint abban az esetben, ha a pályaszerkezetet és az altalajt két-rétegű rendszernek vesszük, a görbületi sugár és a központi behajlás ismeretében közvetlenül számítható a földmű (altalaj) E-modulusa. Ez a megállapítás a BISAR futtatások eredményeinek ismeretében ellenőrizhető. Felhasználva az 1008 db kétrétegű rendszer deformációs vonalát a szerkezetek görbületi sugara a 12 összefüggéssel meghatározható. Az összetartozó D_0 , R_0 és E_2 adatsorokat a 8 ábra mutatja be grafikusán. Az ábrán látható, hogy az adatsorok egy síkot határoznak meg kettős logaritmikus koordináta-rendszerben. Így az alsó réteg E-modulusa a következő függvénykapcsolattal írható le:

$$E_2 = a \cdot D_0^b \cdot R_0^c \quad (20)$$



8. ábra. Az alsó réteg E-modulusának meghatározása a behajlásból és a görbületi sugárból.

h (cm)	N = 1008 db	Béta	Szórás (Béta)	B	Szórás (B)	t(1005)	p
	Tengelymetszet	-	-	3,08794	0,000767	4024,03	0,00
5-50	Íránytangens (1)	-1,56581	0,000598	-1,62284	0,000620	-2617,99	0,00
	Íránytangens (2)	-1,05669	0,000598	-0,62894	0,000356	-1766,77	0,00
$R^2 = 0,9998$ $F(2, 1005) = 3515439,5$ $p < 0,0000$ $\alpha = 0,05$ és a reziduális szórás: 0,00525							

2. táblázat. A kétrétegű rendszerre illesztett függvény konstansainak statisztikai jellemzői.

Az összefüggést lineáris alakra hozva

$$\log(E_2) = \log(a) + b \log(D_0) + c \log(R_0)$$

kapjuk az alábbi általános egyenletet az $Y = \log(E_2)$, $X_1 = \log(D_0)$, $X_2 = \log(R_0)$, $b_0 = \log(a)$, $b_1 = b$ és $b_2 = c$ helyettesítés mellett:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2$$

Ebben a b_0 a tengelymetszetet, b_1 és b_2 pedig a részleges meredekségeket jelöli. A regressziós együtthatók a legkisebb négyzetek módszerével határozhatók meg az eddigiekhez hasonlóan (Orbay, 1990). A STATISTICA programmal végzett számítások eredményeit a 2 táblázat foglalja össze. A vizsgálat szerint az alsó réteg E-modulusa és a terhelés tengelyében értelmezett függőleges elmozdulás valamint a görbületi sugár között igen erős összefüggés található. Ezt a magas R^2 is mutatja. Így az E_2 modulus az alábbi összefüggéssel becsülhető a kialakuló elmozdulásokból:

$$E_2 = 1224,45 \cdot D_0^{-1,623} R_0^{-0,629} \quad (21)$$

A nagy számok elkerülése miatt a D_0 mm-ben, az R_0 görbületi sugár m-ben, míg a szemcsés rétegek együttes modulusa E_2 MPa-ban szerepel az egyenletben. Az R_0 a 10 összefüggés szerint a c alaktényezőtől függ, ezért a 21 a következő alakba átírható:

$$E_2 = 111,73 \cdot D_0^{-0,994} \cdot c^{0,629} \quad (22)$$

A statisztikai modell szerint a kötött rétegvastagság ismerete nem szükséges a szemcsés rétegek együttes modulus becsléséhez, vagyis az roncsolásmentesen meghatározható az FWD mérésekből. Az így meghatározott állapotparaméter főleg a PMS rendszerek számára lehet hasznos.

3.1.2. A kötött rétegek modulus becslése

A kötött rétegek modulus meghatározása a következő egyszerű összefüggéssel történik:

$$E_1 = K \cdot E_2 \quad (23)$$

ahol:

E_1 = a kötött réteg modulusa [MPa].

E_2 = a nem kötött, szemcsés réteg modulusa [MPa].

K = a rétegek egymáshoz viszonyított aránya [-].

A fenti összefüggésben K a kötött és a nem kötött rétegek egymáshoz viszonyított aránya, amit a 19. képlettel számítunk. Az E_2 modulus becsléséhez pedig a 21 képletet használjuk fel. Ezzel be is bizonyítottuk, hogy kétrétegű pályaszerkezet modellek esetén, az egyes rétegek modulusait egyértelműen vissza lehet számolni a deformációs vonalból és így a visszszámító iteratív (backcalculation) módszerek használata nem szükséges.

3.2. A háromrétegű rendszer elemzése

A BISAR program segítségével 15552 db háromrétegű pályaszerkezet-variánst modelleztünk le. Az eredeti pályaszerkezetekre „ráépített” megerősítő rétegek, valamint a teljes kötött rétegvastagság alján számítottuk a keletkező feszültségeket és megnyúlásokat. A számítás alapját Ambrus (2001) korábbi eredményei adták. Kimutatta, hogy azonos lehajlási vonallal rendelkező, de eltérő felépítésű pályaszerkezetek erősítő rétegének alján minden esetben azonos megnyúlás keletkezik. Vagyis, ha ismerjük a pályaszerkezet lehajlási vonalat (görbületi sugarát), akkor abból közvetlenül becsülhetjük a szükséges erősítés mértékét is.

A BISAR programmal számított lehajlási vonalak R_0 görbületi sugara valamint az erősítőréteg alján közvetlenül ébredő megnyúlások között nem sikerült regressziós kapcsolatot találnunk. Ennek oka az, hogy a két réteg között teljes tapadást feltételeztünk, így az valójában egy réteggént viselkedett. A továbbiakban ezért csak a teljes kötött rétegvastagság alján megjelenő megnyúlásokkal foglalkoztunk. Az alábbi statisztikai modellt sikerült felírni:

$$\log(\varepsilon_b) = -0,522 \cdot \log(R_0) - 0,533 \cdot \log(\Delta h) - 0,189 \cdot \log(E_e) + 5,088 \quad (24)$$

vagy

$$\varepsilon_b = 122463 \cdot R_0^{-0,522} \cdot \Delta h^{-0,533} \cdot E_{aszfalt}^{-0,1888} \quad (25)$$

ahol:

ε_b = az erősítés utáni kötött réteg alján ébredő megnyúlás [$\mu\text{m}/\text{m}$].

R_0 = az erősítés előtti pályaszerkezet görbületi sugara [m].

Δh = az erősítőréteg vastagsága (20 és 120 mm között).

$E_{aszfalt}$ = az erősítőréteg modulusa (5000 és 15000 MPa között).

A STATISTICA programmal végzett számítások eredményeit a 3. táblázat foglalja össze. Az ε_b ismeretében már lehetséges a szükséges aszfalt erősítőréteg meghatározása. Ehhez az aszfaltmechanikában is használt és ismert aszfaltfáradási függvényeket kell felhasználni. A módszer alapelve, hogy az anyag egy adott megnyúlást csak meghatározott ismétléssel képes elviselni tönkremenetel nélkül. Vagyis a keletkező ε megnyúlást egyértelműen lehet egy ismétlési számnak, így egységtengegy áthaladási számnak megfeleltetni (Ambrus, 2001). Az anyag fáradási függvényét laboratóriumi vizsgálatokkal kell meghatározni, de ma már számos közelítő összefüggés is ismert (Botcz, 2009).

Jelenleg a hazai közutas gyakorlatban a kritikus megnyúlást az erősítőréteg alján közvetlenül határozzák meg. Ennek egyik magyarázata, hogy a régi aszfaltréteg idővel átreped, és így nem lehet hosszabb távon a teherviselő képességével számolni. Ez a megközelítés eseténként túlméretezést okoz, mivel csak az új rétegtől várja el, hogy a külső terheknek ellenálljon.

h (cm)	N = 15552 db	Béta	Szórás (Béta)	B	Szórás (B)	t(15548)	p
2-12	Tengelymetszet	-	-	5,08800	0,01863	273,097	0,00
	Íránytangens (R)	-0,836629	0,002617	-0,52207	0,00163	-319,699	0,00
	Íránytangens (H)	-0,425223	0,002617	-0,53302	0,00328	-162,489	0,00
	Íránytangens (E)	-0,112957	0,002617	-0,18882	0,00437	-43,164	0,00
R ² = 0,8935 F(3, 15548) = 43491 p < 0,0000 α = 0,05 és a reziduális szórás: 0,10747							

3. táblázat. A háromrétegű rendszerre illesztett függvény konstansainak statisztikai jellemzői.

Miközben a régi aszfaltrétegek még képesek részt venni az erőjátékban. A meglévő aszfaltrétegek számításbavételét az a tény is hátráltatja, hogy sokáig csak ömlesztett aszfaltkeverékek fáradási képességeit tudtuk vizsgálni 2 vagy 4 pontos hajlítással. A meglévő pályaszerkezetből vett fűrt magmintákból csak nagyon körülményesen lehet próbatestet készíteni ezekhez a vizsgálatokhoz. Ma már viszont a hasító-húzó vizsgálat (Indirect Tensile Test, ITT) lehetővé teszi, hogy a pályaszerkezetből közvetlenül kifűrt mintával dolgozzunk és annak fáradási tulajdonságait meghatározzuk. A vizsgálatot részletesen ismerteti az MSZ EN 12697-24:2005 E melléklete. A régi aszfaltanyag fáradási kritériumát a legkisebb négyzetek módszerével kell meghatározni a laborkísérlet eredményeiből:

$$N_f = k \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_0}\right)^n \quad (26)$$

ahol:

N_f = a teljes teherisméltési szám.

k, n = anyagállandók.

ε_0 = vízszintes nyúlás $\mu\varepsilon$ -ban a próbatest középpontjában.

A fenti összefüggés alapján már lehet mondani valamit a régi aszfaltréteg megengedett megnyúlására. A 25 képlet jelentősége pedig abban van, hogy segítségével az erősítést követően lehet becslést adni a mértékadó megnyúlására a meglévő aszfaltrétegek alján. A kettő összevetéséből máris megvan egy olyan méretezési eljárás alapösszefüggése, amely nem az új, hanem a régi aszfalt fáradási tulajdonsága alapján méretez.

4. Összefoglalás

Az általunk javasolt függvény nem csak az FWD, hanem a BISAR programmal számolt lehajlási vonalakra is jól illeszthető. Kimutattuk, hogy a lehajlási vonal és a kötött réteg vastagságának ismeretében további iterációs eljárás (backcalculation) nélkül meghatározható a vizsgált pályaszerkezet rétegeinek modulusa. Az ily módon számított modulus természetesen nem feleltethető meg valamely laborvizsgálat eredményének. Az eljárás gyakorlati haszna abban rejlik, hogy a meghatározott modulusokkal egy olyan pályaszerkezet-modell állítható elő, amelynek viselkedése – terhelés hatására történő alakváltozása – jól közelíti a valóságos pályaszerkezetét.

A görbületi sugár ismeretében számítható a kötött réteg aljának megnyúlása, a megnyúlás ismeretében pedig a jelenlegi pályaszerkezet hátralévő élettartama. A háromrétegű modellek elemzése lehetővé tette, hogy becslést adjunk az erősítőrétteg megépítése után a meglévő aszfaltréteg alján keletkező megnyúlásokra, és így egy arányos és gazdaságos megerősítési méretezési módszer elvi lehetőségét teremtsük meg. A kidolgozott modellezési eljárás hálózati szinten alkalmas lehet arra, hogy egy pályaszerkezet-gazdálkodási rendszer alapját képezze. Projekt szinten a megfelelően felparaméterezett kétrétegű pályaszerkezet-modell pedig a szakszerűbb erősítőrétteg tervezést segítheti.

5. Köszönetnyilvánítás

A tanulmányban bemutatott kutatást a NymE-ERFARET Nonprofit Kft.³ a GOP-1.1.2-08/1-2008-0004 pályázaton keresztül támogatta.

References

- Ambrus Kálmán (2001). “Ejtősúlyos teherbírás-méréseken alapuló új útburkolat-erősítési méretezési eljárás kidolgozása”. In: *Közúti és Mélyépítési Szemle* 51.3, pp. 90–97.
- Boromisza Tibor (1976). “Aszfaltburkolatú utak teherbírásának vizsgálata behajlásméréssel”. In: *Mélyépítéstudományi Szemle* XXVI.12, pp. 521–528.
- Botcz Péter (2009). “Az aszfaltkeverékek mechanikai paramétereinek és a pályaszerkezet fáradási élettartamának összefüggései”. PhD thesis. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék.
- Cser István (1961). “Az útpálya behajlásmérésének elméleti alapja”. In: *Mélyépítéstudományi Szemle* XI.11, pp. 500–503.
- Dähnert Matthias (2005). “Messwertgestützte Ermittlung der Tragfähigkeit von bestehenden Strassen”. German. Diplomarbeit. Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen.
- Fazekas György (1978). “A felszíni süllyedések számításának új módszerei metróalagutaknál, különös tekintettel az időbeli alakulásra”. In: *Mélyépítéstudományi Szemle* XXVIII.1, pp. 13–20.
- Grätz Bernd (2001). “Möglichkeiten und Grenzen des Falling-Weight-Deflectometers”. German. In: *Straße und Autobahn* 52.1. ISSN: 0039-2162, pp. 18–32.
- Hoffmann Zsolt Antal (1988). “A hajlékony útpályaszerkezetek teherbírásának jellemzése a mért behajlásvonal alapján”. Kandidátusi értekezés. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- Hossain Mustaque, Zaniewski John P. (1991). “Characterization of Falling Weight Deflectometer Deflection Basin”. English. In: *Backcalculation of Pavement Moduli*. Transportation Research Record 1293. ISBN 0-309-05101-0. Washington, D.C: Transportation Research Board, National Research Council, pp. 1–11.
- Hothan Jürgen, Schäfer Florian (2004). “Analyse und Weiterentwicklung der Bewertung von Tragfähigkeitsmessungen”. German. In: *Straße und Autobahn* 55.7. ISSN: 0039-2162, pp. 376–382.
- Jendia Shafik (1995). *Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen*. German. Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 45, Karlsruhe.
- Kosztka Miklós (2009). *Erdészeti Útéptés, Erdészeti Utak Építése*. Egyetemi tankönyv. Országos Erdészeti Egyesület (OEE), Budapest.
- L. De Jong D. Peutz M. G. F, Korswagen A. R. (1973). *Computer Program BISAR. Layered System under Normal and Tangential Surface Loads*. External Report AMSR. 0006.73. Amsterdam: Koninklijke Shell Laboratorium (Amsterdam, Netherlands).
- Nemesdy Ervin (1985). *Útpályaszerkezetek méretezésének és anyagállandó-vizsgálatainak mechanikai alapjai*. Kutatási részjelentés 1. Budapest: BME Útéptési Tanszék.
- Orbay László (1990). *A többváltozós regressziószámítások alapjai és fagazdasági alkalmazása*. Kézirat. Erdészeti és Faipari Egyetem, Faipari Mérnöki Kar. Sopron.

³<http://www.erfaret.hu>

- Pethő László (2008). “A hőmérséklet eloszlás alakulása az aszfalt burkolatú útpályaszerkezetekben és ennek hatása a pályaszerkezeti rétegek fáradásai méretezésére, technológiai tervezésére”. PhD thesis. Budapest: Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék.
- Primusz Péter, Markó Gergely (2010). “Kétrétegű pályaszerkezetmodellek paramétereinek meghatározása FWD mérések alapján”. In: *Közlekedésépítési Szemle* 60.7, pp. 8–13. URL: http://efelt.emk.nyme.hu/primuszp/publications/articles/ketretegu_palyaszerkezetmodellek_parametereinek_meghatarozasa_FWD_meresek_alapjan.pdf.
- Primusz Péter, Tóth Csaba (2009). “A behajlási teknő geometriája”. In: *Közlekedésépítési Szemle* 59.12, pp. 18–24, 28. URL: http://efelt.emk.nyme.hu/primuszp/publications/articles/a_behajlasi_tekno_geometriaja.pdf.
- Scharnitzky Viktor (1989). *Matematikai képletgyűjtemény főiskolásoknak*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- Tam W.S. (1987). “Pavement evaluation and overlay design”. PhD thesis. U.K.: Department of Civil Engineering. University of Nottingham.
- Van Gurp CAPM (1995). “Characterization of seasonal influences on asphalt pavements with the use of falling weight deflectometers”. English. ISBN 90-9008036-8. PhD thesis. Delft University of Technology.