

Georadar alapú roncsolásmentes útpályadiagnosztikai módszertan bemutatása

GPR based non-destructive evaluation method to assess and detect road structure and quality

TRENKA Sándor¹, RUNA Boglárka¹, BALOGH Olivér¹, van LEEUWEN Boudewijn¹
Prof. Emeritus FI István², Dr. TÓTH Csaba², Dr. PRIMUSZ Péter²
Dr. SIPOS György³, Dr. TOBAK Zalán³

¹RODEN Mérnöki Iroda Kft., 1089 Budapest, Villám utca 13.,
tel: (36-1)814-97-00, fax: (36-1)814-97-03,
e-mail: roden@roden.hu, honlap: www.roden.hu

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Építőmérnöki Kar, Út és Vasútépítési Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.,
tel: (36-1)463-11-11, fax: (36-1)463-11-10,
e-mail: info@bme.hu, honlap: www.bme.hu

³Szegedi Tudományegyetem, Geoinformatikai, Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék, 6722 Szeged,
Egyetem utca 2-6., tel: (36-62)544-158, fax: (36-62)544-158,
e-mail: office@geo.u-szeged.hu, honlap: www.geo.u-szeged.hu

Abstract

The mechanical condition and material composition of the pavement layers are traditionally assessed by destructive testing. There are several drawbacks to these testing methods, including the damage of the road structure, the data representativeness, etc. In this article we are proposing a ground penetrating radar (GPR) based pavement diagnostic method which can provide continuous information about the thickness of pavement layers, asphalt compactness, density and road defects.

Keywords: GPR, non-destructive, pavement quality, layer thickness, air void content

Kivonat

Hagyományosan az útpályaszerkezetek felépítésének és a rétegek mechanikai állapotának meghatározása roncsolásos vizsgálatokkal történik. Ezek alkalmazásának azonban számos hátránya van. Jelen cikk célja, egy olyan georadar alapú roncsolásmentes útpályadiagnosztikai módszertan bemutatása, amely folytonos információt szolgáltat a pályaszerkezet rétegtrendjéről, a rétegek vastagságáról, szabadhézag-tartalmáról, sűrűségéről és az úthibákról.

Kulcsszavak: GPR, roncsolásmentes, burkolatállapot, rétegvastagság, szabadhézag-tartalom

1. BEVEZETÉS

A roncsolásmentes vizsgálatok fő előnye abban rejlik, hogy gyorsan és zavarásmentesen lehet nagymennyiségű mérést úgy végrehajtani, hogy közben nem okozunk kárt a vizsgált szerkezetben. Az előbb említett előnyök, valamint a technológia fejlődésének köszönhetően az elmúlt években az útállapot értékelésére egyre szélesebb körben alkalmaznak fejlett roncsolásmentes vizsgálati módszereket is. A RODEN Mérnöki Iroda Kft. a 2018-1.1.2-KFI-2018-00029 szerződésszámú projekt keretein belül kifejlesztett egy hazai útviszonyokra adaptált georadar alapú roncsolásmentes útpályadiagnosztikai módszertant és rendszert, mely egyedülálló módon képes nagy pontosságú, folytonos információt szolgáltatni az útpálya rétegtrendjéről, a pályaszerkezeti rétegek vastagságáról, tömörségéről és homogenitásáról. Mivel a pályaszerkezeti rétegvastagságok megfelelő megépített alépítmények esetén szorosan összefüggenek a várható nehéz forgalmi teherbírással, az eddigiekben széles körűen teherbírás mérésre szolgáló, konstrukciójából következően csak lokálisan alkalmazható, ejtősúlyos berendezések hasznos kiegészítője lehet a georadar. Segítségével kvázi folyamatossá tehető a

teherbírásiányos, ún. lokális hibahelyek kijelölése, valamint ami hasonlóan lényeges, az azonos mértékű pályaszerkezet megerősítést igénylő homogén szakaszok meghatározása. A rendszer részletes információt szolgáltat az úthibákról is, képes feltárni a felszíni úthibák felszín alatti kiterjedését, valamint a felszínen nem azonosítható a jövőben akár jelentősebb problémákat is okozó felszín alatti pályaszerkezeti anomáliákat. Mindezen adatok birtokában lehetőség nyílik az útpálya teljeskörű állapotértékelésre és a pályaszerkezet gazdálkodás racionalizálására.

2. ELMÉLETI HÁTTÉR

A georadar rendszer három fő részből – adó-, vevőantenna és vezérlőegység – áll [1]. A jeladó antenna nagyfrekvenciájú elektromágneses impulzusok sorozatát bocsátja ki a felszín felé. Ezek az elektromágneses hullámok a vizsgált közegben részben elnyelődnek, részben visszaverődnek, részben pedig megtörve tovább haladnak a nagyobb mélység felé [3]. A radarjel terjedése a vizsgált közeg elektromos és mágneses tulajdonságaitól függ. Ezek közül a két legjellemzőbb, a dielektromos állandó (permittivitás) és a vezetőképesség (konduktancia). A visszaverődő jelek amplitúdóját és fázisát a vevő antenna detektálja és digitalizálja az idő függvényében [1]. Az így kapott idő szelvényen követhető a rétegződés, a földtani szerkezet, valamint minden felszín alatti objektum. Az időszelvény mélységszelvényé történő átalakításához az adóból kilépő és a vevőig visszaverődő hullám kétirányú futási idejét használjuk fel:

$$h = v \cdot \left(\frac{t}{2}\right) \quad (1)$$

ahol v a hullámterjedési sebesség, t a hullám kétirányú futási ideje, h a rétegvastagság. Az időt azért osztjuk el kettővel, mivel a kibocsátott hullám kétszer teszi meg ugyanazt az utat. A radarhullám terjedési sebességét elsősorban az anyag dielektromos állandója határozza meg. A dielektromos állandóból (ε) a hullámterjedési sebesség (v) a következő képlet felhasználásával számolható ki:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (2)$$

ahol c a fénysebesség vákuumban (0,30 m/ns) [1]. Az aszfaltrétegek in-situ ε_r relatív dielektromos állandóját megkapjuk a felületi visszaverődés (Surface Reflection, SR) módszerét alkalmazva. A felületi visszaverődésen alapuló módszer azt használja ki, hogy a visszavert jel amplitúdója annál nagyobb, minél nagyobb a kontraszt a réteghatár két oldalán található anyag fizikai és elektromágneses tulajdonságaiban. A reflexiók együttható (R) – elhanyagolva a vezetőképességet – az alábbi képlettel számítható [2]:

$$R = \frac{\text{Visszaverődő hullám amplitúdója}}{\text{Beeső hullám amplitúdója}} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}} \quad (3)$$

ahol ε_1 és ε_2 az egymást követő rétegek dielektromos állandói. Az útpályaszerkezetre beeső hullám amplitúdóját (A_p) megkapjuk, ha egy rendkívül reflektív fémlemezt helyezünk a GPR antenna alá, ami tökéletesen visszasugározza a vevő felé a kibocsátott jelet. A fémlemezt eltávolítva az antenna alól, és egy újabb mérést végrehajtva megkapjuk a felső aszfaltrétegről visszaverődő hullám (A_0) amplitúdóját. Felhasználva ezeket az adatokat és figyelembevéve, hogy a levegő dielektromos állandója 1, az (3) egyenlet átrendezésével megkapjuk a keresett ε_1 összefüggést:

$$\varepsilon_1 = \left[\frac{1 + (A_0/A_p)}{1 - (A_0/A_p)} \right]^2 \quad (4)$$

ahol ε_1 a felső aszfaltréteg dielektromos állandója, A_0 az aszfaltréteg felületéről visszaverődő hullám amplitúdója, A_p pedig a fémlemezről visszaverődő hullám amplitúdója [2]. A módszer nehézsége, hogy a dielektromos állandó az útépitési anyagoknál változó lehet, amire a nedvességtartalom, az ásványi összetétel, a hőmérséklet, a tömörség és a mérőfrekvencia egyaránt hatást gyakorol. Ez azzal magyarázható, hogy az útépitésben használt anyagok (talaj, zúzottkő, aszfalt, beton stb.) kémiai szempontból háromfázisú diszperz rendszerek. Ennek köszönhetően viszont a georadar mérések nem csak a rétegvastagságok meghatározására

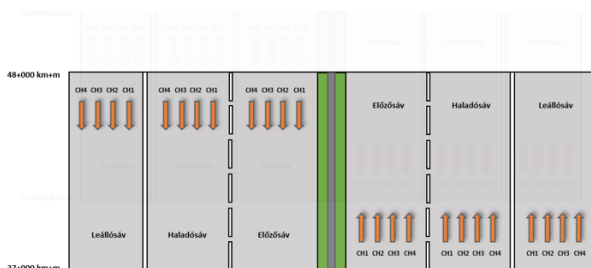
alkalmasak, hanem az aszfaltkeverékek testsűrűségének és szabadhézag-tartalmának megbecslésére, a földműanyagok tömörségének és nedvességtartalmának monitorozására, valamint az úthibák pl. repedések detektálására is [5] [6] [7].

3. ANYAG ÉS MÓDSZERTAN

Az útpályadiagnosztika megvalósításához a RODEN Mérnöki Iroda Kft. egy hordozó gépjármű átalakításával kiépítette az ún. RoadScan rendszert, mely különböző mérőrendszereket (georadar rendszer, helymeghatározó rendszer, videókamera rendszer) integrálva egyedülálló módon alkalmas nagy pontosságú folytonos információgyűjtésre. A georadar rendszer GSSI gyártmányú, amely egy SIR-30 többcsatornás adatgyűjtő és vezérlő rendszerből, egy DMI-ből (Distance Measuring Instrument), valamint 4 db levegőkapcsolt (HORN) antennából áll. A DMI a gépjármű felniehez rögzítve és a vezérlőegységhez csatlakoztatva méri a megtett távolságot. Az alkalmazott antennák 1 és 2 GHz középfrekvenciájúak, a mérőautó mögött 1,5 méterre, a burkolat felszíne felett pedig 460 mm magasságban vannak rögzítve (1. ábra). Ezen elrendezés biztosítja a vizsgált sáv teljes szélességű lefedését, a mérés reprodukálhatóságát, valamint az útpálya nagy sebességgel történő felmérését. A nagy pontosságú helymeghatározást egy a vezérlőegységhez csatlakoztatott Leica VIVA GS14 RTK GPS biztosítja, amely mágnes talppal rögzül a gépjármű tetejéhez. A videókamera rendszer 4 db GoPro Hero 7 Black kamerából, egy Garmin GPS-ből, valamint egy BlackMagic rögzítő eszközből épül fel. A kamerák rögzítik a vizsgálandó aszfaltfelület állapotát, valamint az útpálya környezetét. A georadar adatok és a videófelvételek integrációja koordináta alapon történik. A RoadScan rendszer által szolgáltatott adatok opcionálisan kiegészíthetők ortofotókkal is, melyeket GIS rendszerbe integrálva az úthibák vektorizálhatók, kiszámítható az egyes hibák által érintett terület nagysága, valamint meghatározható az egyedi repedések hossza, ezáltal növelhető az állapotértékelés részletessége.

3.1. Terepi adatgyűjtés

Az útpályadiagnosztika első lépése a terepi adatgyűjtés, melyet megelőz a kutatás céljának megfelelő lehatolási mélység (ns) és felbontás, valamint az in situ szűrések kiválasztása. Ezen felül közvetlenül a mérés előtt elvégzendő a fémlemez kalibráció és a távolságmérő eszköz (DMI) kalibrációja. Előbbi során egy tökéletes reflektorként viselkedő fémlemez helyezünk az antennák alá, majd a gépjármű álló helyzetben történő függőleges irányú mozgatásával rögzítjük a kalibrációs fájl. Ezen kalibráció célja a dinamikai zavaró hatások kiszűrése, az aszfalt felszínének, valamint a fémlmezről visszavert hullám amplitúdójának detektálása. Ezt követően a radarbeállítások által meghatározott sebességgel sávonként felmérjük a vizsgált útszakaszt.



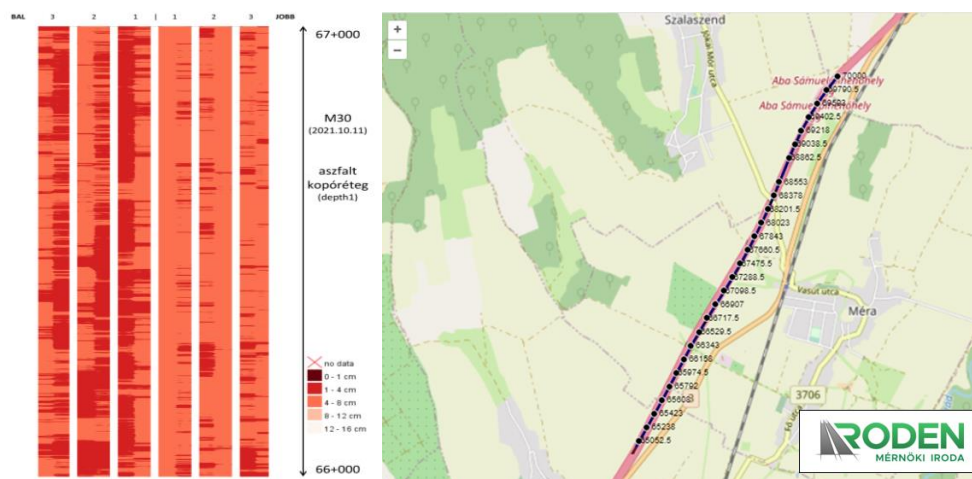
1. ábra. A felmérés sematikus ábrája (balra) és a RODEN Mérnöki Iroda Kft. RoadScan mérőautója (jobbra)

3.2. Adatfeldolgozás

A terepi mérések során felvett nyers adatfájlokból a pályaszerkezeti információkat az adatfeldolgozás eredményeként kapjuk meg. A feldolgozás GSSI RADAN 7 szoftverrel történik. Az adatfeldolgozás legalapvetőbb lépései a direkt jel eltávolítása, a háttérzajok és a magas frekvenciájú zajok szűrése, a radarjeleket felerősítése, valamint a réteghatárok kijelölése. A videófelvételek feldolgozása és a felvételek hangsúlyában rögzített koordináták kikódolása RED HEN SYSTEM IsWhere with MediaGeotagger szoftver használatával történik.

3.3. Megjelenítés

A georadar adatok alapján meghatározott a sűrűség és a szabadhézag-tartalom értékeit Surfer 14 program használatával hőtésképen jelenítjük meg, míg a rétegvastagság, a rétegmélység és a dielektromos állandó eredmények ábrázolására és feldolgozására a RODEN Mérnöki Iroda Kft. a 2018-1.1.2-KFI-2018-00029 szerződés számú projekt keretein belül kifejlesztett egy több lépcsős automatizált munkafolyamatot, amely lehetővé teszi az adatsorok információ tartalmának változatos vizualizációját, valamint webes felületen elérhető megjelenítését és lekérdezését. Az online elérhető felületen a teradatbázisba rendezett felmérések alapján lehetőség nyílik a rétegvastagság / mélység értékek teljes útfelületre interpolált megtekintésére; az egyedi mintavételi pontok adatainak lekérdezésére (oszlopdiagram vagy ESRI Shape / CSV adatletöltés formájában); megadott távolságonként keresztmetszvények és sávonkénti hossz-szelvények kirajzolására; a felmérés 100 méteres szakaszaira sávonként aggregált adatok kinyerésére és összehasonlítására; valamint a saját adatok alá különböző alaptérképek betöltésére. Ennek az ábrázolási módszernek a segítségével a mérnöki tervezést támogató információkat egyszerűen és gyorsan el lehet érni.



2. ábra. Kopóréteg vastagságának hőtésképen történő ábrázolása (balra) és az online felületen megjelenített mérési nyomvonal (jobbra)

4. EREDMÉNYEK

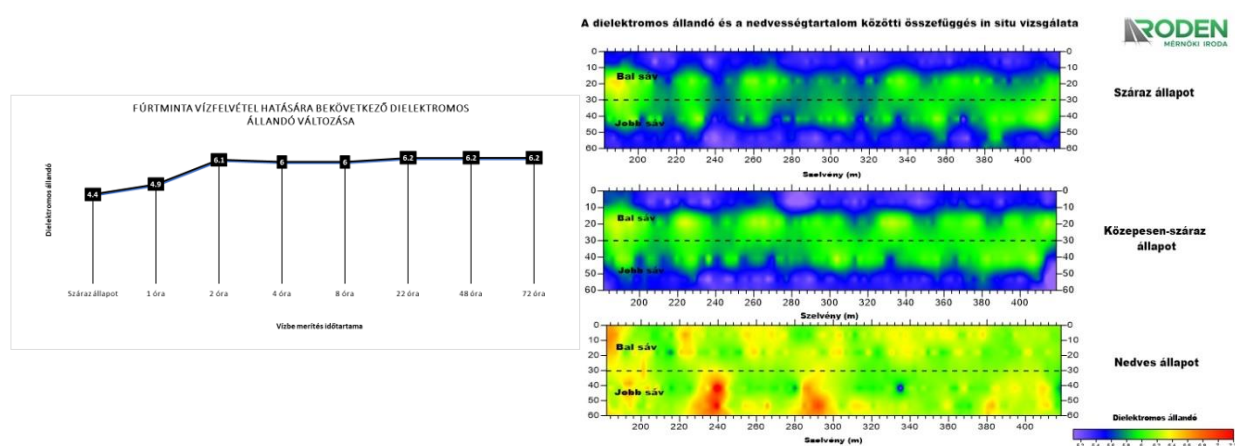
A magyarországi közúthálózat kiépült struktúrájában, korábban, anyagi összetételében rendkívül változatos ezért a kifejlesztett módszertan közúti célú használhatóságát a RODEN Mérnöki Iroda Kft. nagy számú különböző rangú és építési idejű útszakasz felméréseivel igazolta. Összesen 472 km útszakaszt mértünk fel, amelyek autópályákon, főutakon, alsóbbrendű utakon és számozatlan utakon fekszenek.

A pályaszerkezeti rétegek vastagságának, valamint a fizikai anyagparamétereinek a GPR felmérések eredményeivel való összefüggését 160 db fúrómag és 30 db zsirátoros próbatest laboratóriumi elemzésével kalibráltuk. A fúrások különböző építési idejű és összetételű aszfalt és alaprégeket tártak fel. Ennek köszönhetően a hazánkban leggyakrabban előforduló aszfalt és alaptípusokra megtörtént az anyagmodell kalibrációja. A zsirátoros próbatestek előállításával kontrollálni tudtuk a fizikai paramétereket az egyértelmű kapcsolatok felállítása érdekében.

A kifejlesztett roncsolásmentes útpályadiagnosztikai módszertan vastagságmérési eredményeit 208 db fúrómag segítségével validáltuk. Az eredmények alapján az aszfalt vastagságot átlagosan 3,43%, míg a hidraulikus kötőanyagú és soványbeton alaprétegek alsó síkjának mélységét átlagosan 3,96% hibával tudtuk meghatározni. Mindezt figyelembe véve elmondható, hogy a RODEN Mérnöki Iroda Kft. által kidolgozott

georadaros rétegvastagság meghatározási módszertan alkalmazása javasolható az új szerkezetek tervezett vastagságértékeinek kontrolljaként, mivel pontossága eléri a fúrásokkal történő ellenőrzés megbízhatóságát. Nem kell azonban számolnunk a fúrásos mintavétel hátrányaival, úgymint a pályaszerkezetben okozott szerkezeti kár, a mintavételek során kialakuló forgalmi zavar és az ennek következtében megnövekedett balesetveszély, valamint a pontszerű információ szolgáltatásból adódó kiterjeszhetőségi problémák. A kifejlesztett RoadScan rendszer alkalmazásával detektált vastagságadatok felhasználhatók az üzemelő utak pályaszerkezettervezése során is, mivel a pontos rétegvastagság adatok a megbízható kvantitatív számítás alapját adják. A folytonos vastagságadatok alapján leválogathatók az azonos mértékű pályaszerkezet megerősítést igénylő homogén szakaszok, melynek eredményeként mód nyílik különböző mértékű, a meglévő hatékony vastagságot kihasználó, gazdaságosabb megerősítések kivitelezésére.

A nedvességtartalom és a dielektromos állandó közötti összefüggést különböző nedvességállapotokban történt ismételt mérésekkel laboratóriumi és in situ körülmények között egyaránt vizsgáltuk. Valamennyi vizsgálat igazolta azt az összefüggést, miszerint az aszfalt és az alapréteg nedvességtartalmának növekedésével párhuzamosan nő a réteg dielektromos állandó értéke is. Ennek fizikai hátterében az áll, hogy az útpályát felépítő anyagok (aszfalt, beton stb.) háromfázisú diszperz rendszerek, így azok dielektromos állandóit a fázisalkotók (kőváz, kötőanyag, szabad hézag) térfogataránya és dielektromos állandója határozza meg. A szabad hézagokban található folyadék- és gázfázis aránya az időjárási körülmények függvényében nagymértékben változhat. A víz dielektromos állandója (~81) jóval magasabb mint a levegőé (~1), így a folyadék fázis arányának emelkedésével növekszik a szabad hézagok dielektromos állandója, amely módosítja a pályaszerkezeti rétegen mért dielektromos állandó értéket.



3. ábra. *Vízfelvétel hatására bekövetkező dielektromos állandó változás laboratóriumi vizsgálata (balra) és különböző nedvességállapotokban történt mérések dielektromos térképeinek összehasonlítása (jobbra)*

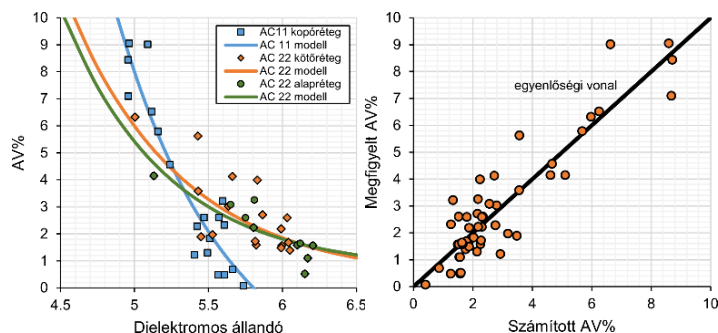
A kutatásaink kiterjedtek a mért dielektromos állandó és a szabad-hézagtartalom közötti korrelációs kapcsolat vizsgálatára is. Az aszfaltrétegek szabadhézagtartalmának ismerete kulcsfontosságú, mivel ezen paraméter nagy mértékben befolyásolja az útpályaszerkezetek várható élettartamát, valamint alakváltozási tulajdonságait [8]. A korrelációs kapcsolat megismeréséhez részben helyszínen fúrt magminták adatait, részben az adott aszfaltkeverékből laboratóriumban, kontrollált körülmények között előállított zsiratoros próbatesteket használtunk fel. Kutatási eredményeink alapján feltártuk, hogy az útburkolat dielektromos állandója és annak szabadhézag-tartalma között exponenciális kapcsolat van:

$$AV(\%) = \alpha * e^{-\beta \varepsilon_{AC}} + \epsilon \quad (5)$$

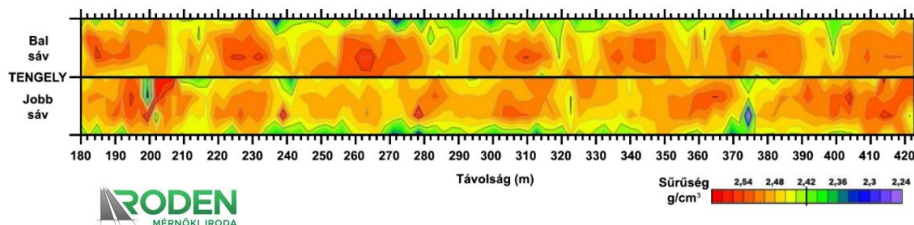
ahol AV a szabadhézag, ε_{AC} az aszfalt dielektromos állandója, α és β az anyagfüggő modellparaméterek, ϵ pedig a hibtag. A hibtag megjelenése a modellben azt jelenti, hogy a dielektrikumon kívül más tényezők is befolyásolhatják a szabadhézag-tartalom előrejelzésének pontosságát, amelyek közé tartozhat a modell hibája, az anyagok és a környezet, például a hőmérséklet vagy a nedvességtartalom változékonysága. A számított és a megfigyelt szabadhézag-tartalom értékek viszonyát vizsgálva kijelenthető, hogy a modell jól tudja előre jelezni a szabadhézag-tartalmat a dielektromos állandóból, mivel a mért és a becsült értékek egy 45°-os egyenesre esnek és a pontok szórása is kielégítő [4]. Amennyiben ismerjük a szabadhézag-tartalmat az alábbi képlet segítségével a testsűrűség (G_{mb}) már könnyen kiszámítható:

$$G_{mb} = (1 - V_A) * G_{mm} \quad (6)$$

ahol G_{mm} a hézagmentes testsűrűség (km/m^3). A modellparamétereket zsirátoros próbatestekkel kalibrálva a pályaszerkezet roncsolása nélkül kaphatunk folytonos információt az aszfalt szabadhézag-tartalmáról és testsűrűségéről. Ez különösen az új építésű pályaszerkezetek minőségellenőrzése során fontos, hiszen az újonnan épített rétegeket nem lehet szétfűrni. A minőségellenőrzés során a GPR technológia előnye, hogy nagy adatsűrűséggel, gyorsan és pontosan képes testsűrűség vagy szabadhézag térképeket és profilokat előállítani, melyek alapján lehatárolhatjuk a túl- vagy éppen alul tömörített útszakaszokat, majd azok minőségét fűrt mintával igazolhatjuk [4].



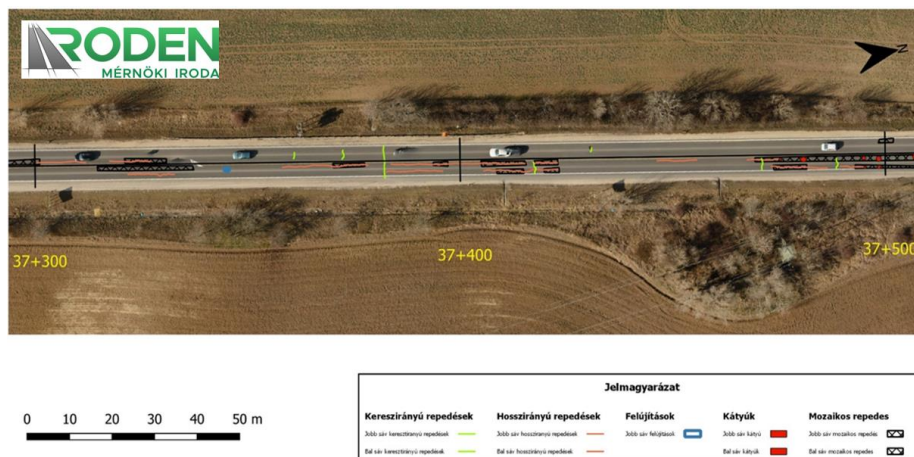
4. ábra. A fűrt magminták alapján a dielektrikus állandó és a szabadhézag-tartalom között aszfaltrétegenként felállított empirikus modellek (bal), és a számított és megfigyelt AV% értékek viszonya (jobb) [4]



5. ábra. GPR adatok alapján szerkesztett sűrűségterkép

Azon utakon, ahol a vékony pályaszerkezet kis teherbírású földművön fekszik összefüggést tártunk fel a behajlás és a szerkezetvastagság között. Eredményeink azt mutatták, hogy a nagyobb behajlással jellemezhető keresztmetszetek pályaszerkezetei helyileg kisebb szerkezeti vastagsággal rendelkeznek, mint az útszakaszra jellemző átlagos vastagság. Kutatásunk során igazoldott, hogy a szerkezeti gyengülés mértéke és a teherbíráscsökkenés növekedése összefügg. A gyakorlatban a statikus behajlásmérések 100-40 m sűrűségű pontokban készülnek. A kiugróan nagy behajlást mutató helyeken lokális pályaszerkezetcsere szükséges kivitelezni. Ezek kiterjedésének meghatározására a RODEN Mérnöki Iroda Kft. RoadScan rendszerével meghatározott szerkezetvastagságok kiválóan használhatók, hiszen centiméteres pontossággal jelzik a markáns vastagságkülönbségek határvonalait. A módszer használata gazdaságos és teljesértékű pályaszerkezetcsere eredményez.

Az integrált adatszolgáltatásnak köszönhetően a rendszer részletes információt nyújt az úthibákról is, képes feltárni a felszíni úthibák felszín alatti kiterjedését, valamint a felszínen nem azonosítható a jövőben akár jelentősebb problémákat is okozó felszín alatti pályaszerkezeti anomáliákat. Ezen adatok birtokában lehetőség nyílik az útpálya teljeskörű állapotértékelésére. Kidolgozásra került egy egyedülálló úthiba kataszter is, amely különböző osztályokba sorolva, képekkel illusztrálva ismerteti a hazánkban leggyakrabban előforduló úthibák felszíni megjelenését, radarszelvényképét, mindemellett részletes szöveges leírást is ad a hibákról.



6. ábra. Burkolati állapotértékelés eredményeinek megjelenítése

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezen kutatás a RODEN Mérnöki Iroda Kft. által elnyert 2018-1.1.2-KFI-2018-00029 szerződésszámú projekt keretein belül valósult meg, melyben a Budapesti Műszaki Egyetem és a Szegedi Tudományegyetem alvállalkozóként vettek részt.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Bigman D. P. *GPR Basics: A Handbook for Ground Penetrating Radar Users*, Bigman Geophysical, LLC, Sunwanee, GA, USA, 2018.
- [2] Maser K.R., Scullion T., Briggs R.C. *Use of radar technology for pavement layer evaluation*, Report of Texas Transportation Institute, USA, 1991.
- [3] Pattantyús-Á. M., Neduczka B., Prónay Z., Törös E. *A földradar módszerfejlesztés másfél éves tapasztalatai az ELGI-ben*. Magyar geofizika. A Magyar Geofizikusok Egyesülete, 1994, 35(1), 32-41.
- [4] Primusz P., Runa B., Balogh O., Tóth Cs. *Új építésű aszfaltrétegek vastagságának és tömörségének meghatározása földradarral*. Útügyi lapok. Makadám 2000 Kft., 2022, 10(16), 38-52.
- [5] Runa B., Balogh O. *Georadar szerepe a roncsolás mentes útpályadiagnosztikában*. Az aszfalt XXVIII. Magyar aszfaltipari Egyesülés, 2021, 2, 49-56.
- [6] Saarenketo T. *Using Ground-Penetrating Radar and Dielectric Probe Measurements in Pavement Density Quality Control*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1997, 1575(1), 34-41.
- [7] Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P. *Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines*. Water Resources Research. Advancing Earth and Space Science, 1980, 16(3), 574-582.
- [8] Zaltuom A. M. *A Review Study of The Effect of Air Voids on Asphalt Pavement Life*. In Proceedings of First Conference for Engineering Sciences and Technology. AIJR Publisher, 2018, 2, 618-25.