



Forgalomtechnikai eszközök fejlesztési irányai

Balog Péter¹, Vágány András²

¹Délút Építő és Bányászati Kft., ²Budapesti Közlekedési Központ Zrt.

e-mail: balog.peter@delut.hu; andras.vagany@bkk.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.01

Kivonat A közúti forgalomtechnikai elemek és rendszerek alapvető célja a közutakkal kapcsolatos információk közlése a járművezetők számára adott helyszínen, illetve a követő útszakaszokon. Tudatában annak, hogy a dinamikus fejlődő járműtechnológiák újszerű igényeket és megközelítést követelnek a közúti infrastruktúrával szemben, szükséges vizsgálni a különböző forgalomtechnikai nemzetközi fejlesztési tendenciákat. Jelen munkában olyan megoldásokat foglaltunk össze és mutatunk be, melyek nemzetközi szinten már sikeres teszteken vannak túl, együttműködni képesek a különböző járművezetést támogató és irányító fejlesztésekkel. Ezen innovációk a közeljövőben megjelenhetnek hazánkban is, ezért szükséges megismertetni a szakma képviselőivel, illetve a hazai fejlesztéseknek is, adaptációnak is fontos információkkal szolgálhatnak.

Kulcsszavak autonóm járművek, forgalomtechnika, innovációk, burkolati jelek, elválasztó rendszerek

Trends in the development of traffic technology devices

Abstract The function of traffic signs is to provide informations for drivers locally and on the following segments. The rapidly improving vehicle technologies require new demands and approach in road infrastructure design, so it is necessary to investigate the different international trends in traffic signal improvements. In this article we summarize and present recent solutions which have been successfully tested and they can cooperate with different driving assistance and control systems. These innovations will soon approach Hungary, so we think the importance of introducing these technologies is high.

Keywords autonomous vehicles, traffic engineering, traffic signals, innovations, road markings, road barriers

Balog Péter

Okl. építőmérnök, okl. közlekedésmérnök, vállalozási mérnök. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán szerzett BSc diplomát 2016-ban, majd MSc diplomát 2018 tavaszán. A BME Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karán 2019 tavaszán végzett közlekedésmérnök MSc szakon. Egyetemi éve alatt vasúti pálya- és erőáramú tervezésben, közúti forgalomtechnikai tervezésben, fenntartható mobilitás tervezésben szerzett szakmai tapasztalatot, emellett mesterszakon részt vett autonóm járműirányítással kapcsolatos kutatási projektben. 2019 tavaszától a Délút Kft. vállalozási mérnökeként dolgozik.

Vágány András

Okl. közlekedésmérnök, innovációs munkatárs. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karán BSc-s tanulmányai során szakdolgozatát ösztöndíj program keretében Drezdában írta. Mesterszakon kutatói és diplomaterv pályázaton vett részt. 2018 februárjában gyakornokként került a BKK Mobilitásstratégia szakterületére. Egyetemi tanulmányainak 2019 januári befejezése óta innovációs munkatársként dolgozik, forgalmi modellezéssel foglalkozik. Jelenleg több nemzetközi kutatási és fejlesztési projektben vesz részt.

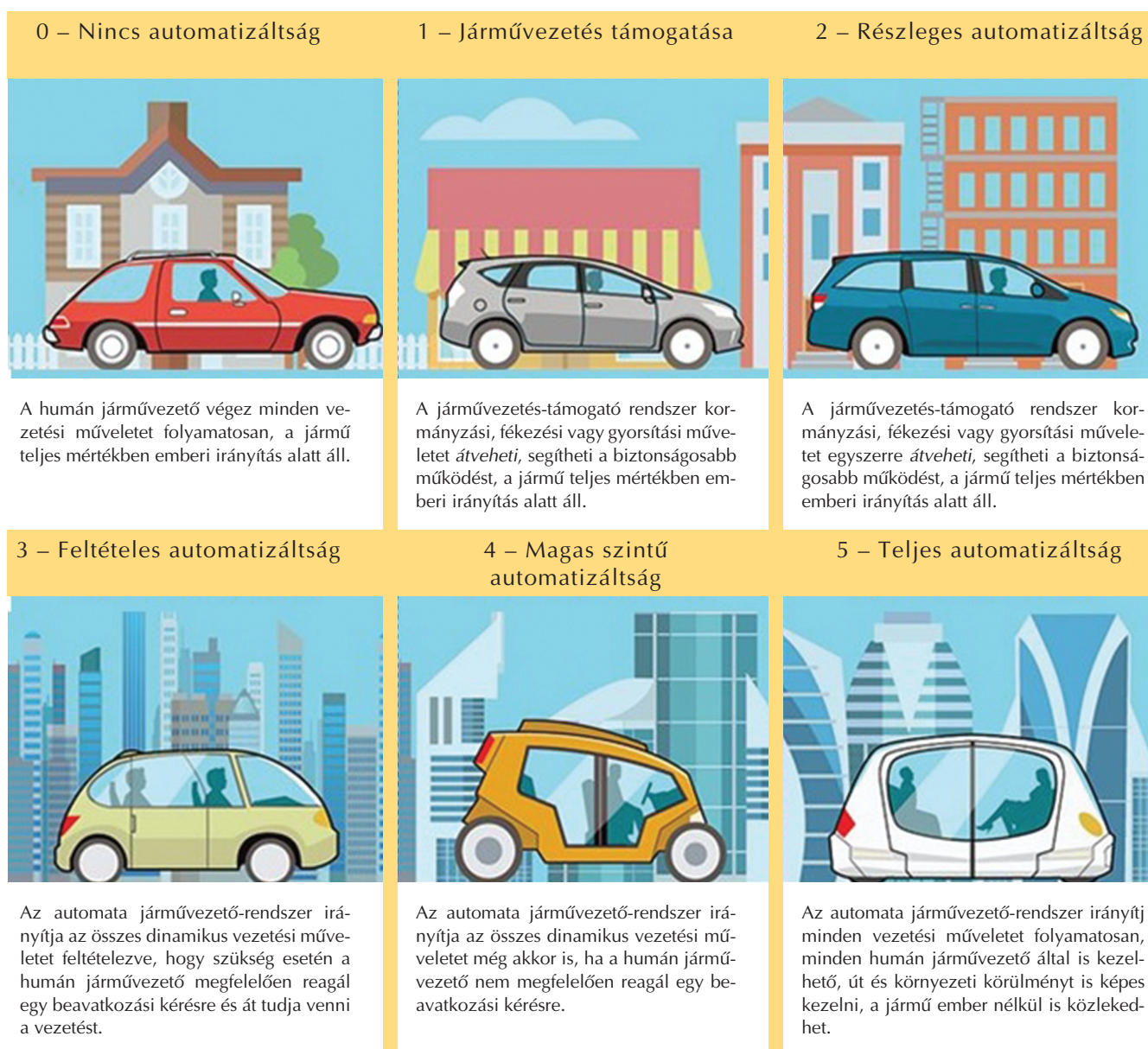
1. Bevezetés

Napjaink egyik új fejlődési iránya és innovációja az önálló döntéshozatalra képes, autonóm módon közlekedő járművek kutatása és fejlesztése, amelyben az infokommunikációnak meghatározó szerepe van, és amely számtalan további kapcsolódó szakterület innovációját is magával hozza, így a közúti infrastruktúrának is a jármű–pálya–ember hármas kapcsolatból eredően fejlődnie és előrelépnie kell. Az intelligencia járműfedélzetre való helyezését több tényező is indokolja:

- komplex, folyamatosan változó környezet;
- rengeteg vizuális információ;
- bonyolult közlekedési helyzetek;
- komplex döntési feladatok;

- többszintű és folyamatos útvonal tervezés;
- balesetek számának csökkentése;
- környezetvédelem.

Az emberi beavatkozástól független működés a közlekedés minden alrendszerében már jelen van különböző szinteken, ennek talán legfőbb oka, hogy ezen a területen is rohamtempóban gyűrűznek be az informatika és az infokommunikációs technológia megoldásai. Ezek a gyorsan bekövetkező változások nagy hatással vannak a közlekedésben részt vevő járművekre, így a kapcsolati rendszeren keresztül az infrastruktúrára és a közlekedő személyekre is, általában véve pedig a társadalom egészére. Ez a terület olyan új irány, amely erősen interdiszciplináris jellegű problémákat



1. ábra. Jármű-automatizáltság SAE szintjei (Forrás: MarketWATCH International – SAE Levels [1])

fezseget, hiszen figyelembe kell venni a műszaki, gazdasági, jogi és társadalmi aspektusokat egyaránt.

A SAE (Society of Automotive Engineers) International 2014-ben szabvány formájában definiálta az autonóm gépjárművek terminológiáját, illetve megfogalmazta azok szintjeit az automatizáltság tekintetében [1].

Ezek a szintek inkább irányadók és technikai jellegűek, mint jogi definíciók, nem utalnak a piaci bevezetés sorrendjére sem. Az egyes szinteken a minimális rendszerképeségek vannak definiálva, egy adott gépjármű több automatikus vezetési tulajdonsággal rendelkezhet, ezáltal különböző szinteken üzemelhet attól függően, hogy mely képességeit lehet alkalmazni. A definiált szintek alapvetően azt mutatják meg, hogy a dinamikus vezetési műveletek hogyan oszlanak meg az ember és a gép között a 0. (nincs automatizáltság) szinttől az 5. (teljesen automata rendszer) szintig (1. ábra).

2. Innovatív megoldások

2.1. Burkolati jelek

A közúti burkolati jeleket hossz-és keresztirányú vonalak, jelzések és szimbólumok halmazaként lehet definiálni, melyekkel valamilyen objektumra, környezeti és forgalmi körülményre vagy annak megváltozására utaló információt közlünk a járművek vezetőivel. Vezetés közben a forgalommal kapcsolatos információk több mint 90%-át valamilyen burkolati vagy közút menti jelzéssel juttatjuk el a járművezető felé, így ezek láthatósága minden akadályozó környezeti körülmény ellenére kritikus fontosságú az utazás biztonsága szempontjából. A burkolati jelek vizuális szabályozó eszközök, melyek hatással vannak a közlekedésben résztvevők viselkedésére, különös tekintettel a járművezetőkre, akik ezen egyértelmű és világos információk birtokában tudnak alkalmazkodni a közlekedés környezeti körülményeihez. Az információk feldolgozása, az emberi vagy gépi járművezető számára egyaránt a következő fázisokból tevődik össze, melyek rossz látási körülmények között több időt vesznek igénybe:

- észlelés és érzékelés,
- információ felfogás és feldolgozás,
- információ megértés és végrehajtás.

A biztonság elsősorban a burkolati jelek láthatóságától függ. A jövő útburkolati jeleivel szembeni elvárások:

- magas szintű láthatóság, érzékelhetőség minden környezeti körülmény között (éjszakai sötétben és esős-nedves körülmények között is),

- a környezeti és forgalmi körülményeknek megfelelő, dinamikusan változtatható jelzések legyenek

Az útburkolati jelek minősége az autonóm és önvezető járművek közlekedésbiztonsága szempontjából is kiemelt jelentőségű lesz. A járművek ma már rendelkeznek „sávelhagyási” figyelmeztető (Lane Departure Warning Systems, LDWS) vagy „sávartó” automatikával (Lane Keeping Assistance, LKA), így biztosítva a járművezetők segítségét különböző vezetési körülmények között (2. és 3. SAE szint). Ezek a technológiák az objektumok érzékelésén alapulnak (szenzor-, radar- és kamerarendszerek), így a biztonságos közlekedés a burkolati jelek érzékelhetőségétől is függ, ezért a láthatóság, mint alapvető tulajdonság különösen fontos nappali és éjszakai körülmények között egyaránt. Az új generációs utak tekintetében különösen fontos szerepet kapnak az intelligens burkolati jelek, melyek a járművek közlekedésében meghatározó szerepet fognak játszani:

- a burkolatba épített szenzorok segítségével érzékelik a forgalom összetételét és nagyságát,
- alkalmazkodva a forgalmi körülményekhez, változtatják a jelzéseképeket,
- ellenőrizni tudják, hogy ennek megfelelően a járművek betartják-e a jelzett utasításokat

A holland Studio Roosegarde kutatói 2013-ban fotolumineszcenciás burkolati jeleket építettek be több teszszakaszon [2]. A fotolumineszcencia egy fizikai jelenség, mely során egy anyag különböző hullámhosszúságú elektromágneses sugárzásokat abszorbeál és ennek hatására fényt bocsát ki a bejövő sugárzástól eltérő hullámhosszon. A legtöbb esetben a kibocsátott fény hullámhossza hosszabb és így kisebb energiával rendelkezik, mint az elnyelt sugárzás. A kutatók egy olyan festékport fejlesztettek ki, melynek segítségével a burkolati jelek napközben a napfény segítségével feltöltőd-



2. ábra. Studio Roosegarde által megálmodott fluoreszcenciás burkolati jelek [2]

nek, majd éjszakai körülmények között akár 10 órás fénykibocsátásra is képesek. A technológia továbbfejlesztéseként olyan burkolati jeleket tesztelnek, melyek bizonyos tényezők hatására jelennek meg, így például alacsony hőmérséklet esetén az erre figyelmeztető jelzés lesz látható a járművezetők számára, valós időben (2. ábra).

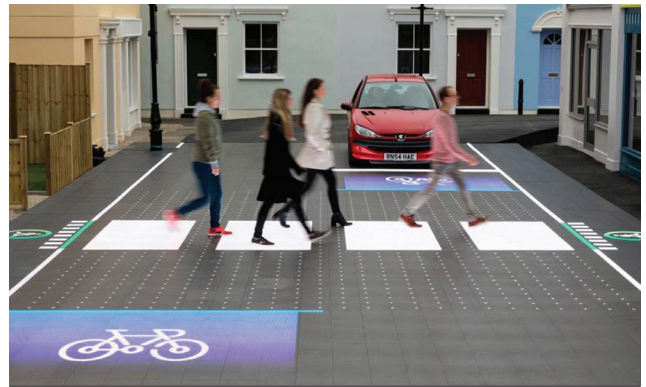
Magyarországon is vizsgálták már a fluoreszcenciás burkolati jeleket [3]. A technológiai megoldás nagy előnye, hogy az alacsonyabb forgalmú kerékpárutakon, de akár a közutakon sem kell közvilágítást kiépíteni, segítségével megfelelő tájékozódás biztosítható, költséghatékony és biztonságossá teszi a közlekedést (3. ábra).



3. ábra. Fluoreszcenciás burkolati jelek egy Eger környéki kerékpárúton [3]

A világító dióda (LED Light-Emitting Diode) félvezető anyagból készült fényforrás. A dióda által kibocsátott fény színe a félvezető anyag összetételétől, ötvözőitől függ. A fény úgy keletkezik, hogy a diódára kapcsolt elektromos áram a dióda anyagában lévő atomok elektronjait gerjeszti, amitől azok nagyobb energiaszintű elektronpályára lépnek, majd miközben visszatérnek eredeti energiaszintjükre, fotonokat bocsátanak ki. A LED égők előnye, hogy a kimeneti fény előállításához alacsony áramerősséget és feszültséget igényelnek, alacsony a fogyasztásuk, kevésbé melegszenek, nagy a kapcsolási sebességük, kis helyen elférnek, ütésállóak és nagy az élettartamuk. Egy az Egyesült Királyságban tesztelt rendszer szenzorok és a burkolatba épített LED égők segítségével dinamikusan tud gyalogátkelőhelyet kialakítani [4]. A gyalogátkelőhely egészen addig nem jelenik meg a burkolaton, ameddig a forgalmi körülmények nem biztosítanak biztonságos átkelési lehetőséget. Amennyiben a forgalom lehetővé teszi a gyalogos számára az átkelést, illetve gyalogosok jelennek meg a közelben, a gyalogátkelőhely a LED égők segítségével megjelenik a burkolaton, és a járművek számára is megállásra figyelmeztető jeleket jelenít meg. A rendszer reakcióideje nagyon alacsony, mindösszesen néhány századmásodperc. Az átkelőhely egy 22 méter

hosszú, acél alapszerkezetű, többrétegű burkolat. A LED égőket tartalmazó réteg alatt egy elektronikai réteg található, mely a rendszer vezérlését és energiaellátását biztosítja. Az égőket egy vékony, átlátszó műanyag réteg védi a forgalom és a környezet hatásaitól. A járművek és a gyalogosok érzékelését egy kamerarendszer végzi, mely mesterséges intelligencia segítségével azonosítja és csoportosítja az egyes objektumokat, majd ezen információk alapján dönti el, hogyan avatkozzon be és milyen burkolati jeleket jelenítsen meg az út felületén. A rendszer képes arra, hogy a gyalogosok számából meghatározza a szükséges gyalogátkelőhely szélességet (4. ábra).



4. ábra. Kísérleti LED technológiájú gyalogátkelőhely [4]

A kamera az észlelt objektumok helyzetét egy központi számítógép számára küldi el, mely az adatok alapján eldönti, milyen burkolati jelet és hol kell megjeleníteni. A számítógép ez alapján vezérli a LED égőket. A gyalogosok szabad vagy tilos jelzése nem a közúti jelzőlámpákon, hanem a burkolaton jelenik meg. Valós körülmények között a rendszerben nyomásérzékelő szenzorok is találhatóak, melyek biztosítják a rendszer folyamatos működését a kamerák hibája esetén is. Az érzékelők az objektumok súlyából, mozgásának irányából határozzák meg annak jellegét.

Németországban a B6-os autópályán, Bréma városának közelében egy induktív energiaellátású, LED-ekből készült hosszirányú burkolati jelrendszer működik [5]. Az égők két irányban is képesek fényt kibocsátani, továbbá vörös és fehér színekben tudják megvilágítani a burkolati jel alakzatot. Az intelligens burkolati jelek nappal és éjszaka is biztosítják az egyértelmű és érthető jelzéseket, továbbá forgalmi terelések és vészhelyzetek jelzésére is alkalmasak. Ez a rendszer képes nagy forgalom esetén a szükséges többlétsávok gyors és biztonságos kialakítására, így infrastruktúra építés nélkül lehet nagyobb kapacitást biztosítani.

A LED-es technológia alkalmazásának előnyei:

- gyors építés és telepítés;

- esetleges hibák gyors feltárása, kiszűrése;
- alacsony energiafogyasztás;
- kémiai anyagoknak és korrózióknak ellenállás;
- vízállóság;
- nem törekeny, nagy teherbírási;
- telepített útszakaszokon biztonság növelése.



5. ábra. Intelligens LED burkolati világítás B6 autópályán, Németországban [5]

A rendszer segítségével tartósan és jól láthatóan lehet az ideiglenes sávlezárásokat és munkaterület elhatárolásokat kialakítani. A moduláris egységekben az egyes panelek mikroprocesszorokat és tartalmaznak, melyek kommunikációs képességének köszönhetően a LED rétegek a megfelelő burkolati jeleket tudják a felületre kivezérelni (5. ábra).

Burkolati jeleket nemcsak lokálisan, az infrastruktúra által jeleníthetünk meg, hanem lehetőség van a közölni kívánt információ felküldésére a járműre és az képes különböző technológiákkal a járművezetővel közölni. A Mercedes-Benz Digital Light névre keresztelt technológiája egy nagy teljesítményű projektort költöztet az autó fényszórójába, amivel nem csipán centiméter pontosan szabályozott fénynyalábot, de különböző figyelmeztető jeleket is az útburkolatra tud vetíteni [6]. A szériaérett megoldás a 2018-as Genfi Autószalonon mutatkozott be és hamarosan már kereskedelmi forgalomban is elérhető lesz. A fényszóróban kétszer egymillió pontszerű fénytűkör kapott helyet, amivel a fényforrás lényegében egy nagyfelbontású projektorként működik, és az autó elé, az úttestre nem csupán a fényt, de képeket vagy közúti burkolati jelzéseket tud vetíteni (6. ábra).

A nagy teljesítményű fénydiódák a fényüket egységenként az egymilliónál is több apró tükrökre küldik, amelyek ráadásul +/- 10 fokos szögben állíthatók. Ezekről a mikroszkopikus méretű tükrökről verődik vissza a fénydiódák fénye, majd halad át egy nagyobb méretű vetítőlencsén, mielőtt bevilágítaná az úttestet. Az autó rezgése, a rossz minőségű útfelület nem zavarja a mikrotükrök helyzetét, mivel azok tehetetlenségi nyomatéka lényegében nulla. A tükrök helyzetét

egy nagy számítású kapacitású számítógép vezérli, nagy mennyiségű szenzor és kamera jelei alapján, aminek köszönhetően nagy számú kép megvalósítható az autó előtt.



6. ábra. Mercedes Digital Light munkaterület elkorlátozás jelzése [6]



7. ábra. Mercedes Digital Light követési távolság kijelzése [6]

Ezen felül a 300 méter hosszú „fényszőnyegre” különböző vezetést segítő jeleket tud vetíteni az autó. A nem egyértelmű burkolati jeleket fel tudja mérni és egyértelműsíti azokat. Útépítés, sávelhúzás mellett, illetve alacsony forgalmú útszakaszon ez nemcsak a sofőrt segíti, de az önvezető rendszerek számára is fontos referenciapont lehet. További, a vezetést támogató segítség, hogy a rendszer képes az adott sebességhez tartozó biztonságos követési távolságot egy mérővonal úttestre vetítésével jelezni (7. ábra).

Az intelligens, digitális alapú közúti burkolati jelek fontos elemei az okos utaknak. A közeljövő kérdései közé tartozik, hogy a különböző burkolati jeleket hogyan és miként kell majd tervezni, telepíteni és üzemeltetni, hogy azok még a hagyományos járműveknek is megfeleljenek, de a jövő intelligens és önvezető autóinak is kiszolgálják a megnövekedett információ igényüket. Az intelligens burkolati jelek esetében is fontos lesz a járművek, az infrastruktúra és az infrastruktúra üzemeltető közötti folyamatos, valós idejű adatcseré és kommunikáció.

2.2. Elválasztó rendszerek

A közúti visszatartó rendszerek alkalmazásának alapvető célja a közúti járművek és a benne ülők, illetve az úton vagy környezetében tartózkodó személyek, létesítmények védelme, illetve a jármű közútról való letéréséből származó következmények csökkentése. Az elválasztó sávval épülő utakon a járműveket visszatartja az ellenirányú forgalmi pályára való áthajtástól és ilyen módon védi azokat a frontális ütközéstől. A középső fizikai elválasztó elemek az alábbi szempontok szerint csoportosíthatók:

- a szembejövő útpályára való áttérés megakadályozását szolgáló acélszalag korlátok, vagy vasbeton (New Jersey) elemek;
- a középső elválasztó sávban létesített híd vagy portál tartópillérek kiemelt védelmét biztosító visszatartó létesítmények, általában acélszalag korlátok, kisebb számban vasbeton elemek;
- a szembejövő útpályára történő áttérés elkerülésének korrekciójára lehetőséget adó, középső elválasztó sáv, ami a hazai gyorsforgalmi utakon általában három és nyolc méter között változik, figyelemmel az ívekben létesítendő, megállási látótávolság meglétét biztosító méretekre is;
- a szembejövő útpályán haladó járművek kölcsönös elvakító hatású fényeinek leárnyékolását biztosító fénykorlátozó rendszerek.

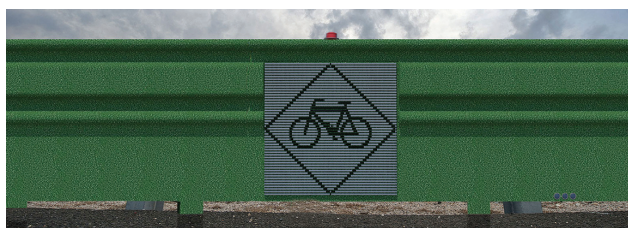
A visszatartó rendszerek tervezése során a tervezőknek beruházóval közösen mérlegelnie kell a

helyszín és a környezeti körülmények ismeretében a baleseti kockázatokat, ezek ismeretében kell a rendszer követelményeit meghatározni. A visszatartó rendszerek felszerelhetők olyan kiegészítő elemekkel, melyek például az ütközést csillapítják. Ezek az elemek az ütközési energia felvételét szolgáló szerkezet tulajdonságait javítják, melyek lehetnek visszatérítő vagy nem visszatérítő hatásúak. Az elvárások az elválasztó rendszerekkel szemben:

- legyen mozgatható, könnyedén átalakítható a forgalmi igényeknek megfelelően;
- biztosítsa az egyes járműforgalmi irányok elválasztását;
- az egyes forgalmi irányoknak adjon vezetést;
- csökkentse a balesetek, különösen a frontális balesetek kialakulásának lehetőségét;
- a bekövetkezett balesetek esetében csökkentse azok súlyosságát.

■ Intelligens elválasztó rendszerek

A 1BARRIER egy spanyol fejlesztésű, a világon teljesen egyedinek mondható elválasztó rendszer [7]. A rendszerben egyaránt található biztonsággal, technológiával és környezetvédelemmel kapcsolatos innováció. Vázát a hagyományos acélszalag korlátok adják, melyekre újrahasznosított gumiból és műanyagból készült burkolatot helyeznek el. Ezt a rendszert már közel 150 országban tesztelték és próbálták ki hosszabb útszakaszokon. Köszönhetően a kialakításnak, az acélszalag korlát élei a gumiburkolat által fedve vannak, így a védtelen közlekedőknek nem tudnak vágásos sérülést okozni balesetek esetén. A gumiburkolat egy sor információs és kommunikációs eszköz beépítésére ad lehetőséget, többek között a vészjelzéshez, veszélyérzékeléshez, szemben haladás vagy védtelen közlekedők észleléséhez szükséges elemeket lehet benne elhelyezni. A korlát kialakítása folyamatos, 70 cm magasságú, mely akár a nagyobb méretű állatok bejutását is meg tudja akadályozni, ezzel csökkentve az általuk okozott balesetek kockázatát. Az intelligens korlátokba az útüzemeltetés számára is hasznos alkalmazások építhetők be, így biztosítható az egyes káresemények után a gyors helyreállítás és a forgalom minimális zavartatása (8. ábra).



8. ábra. A spanyol 1BARRIER rendszer látványterve [7]

A balesetek jelzése vörös. Amikor megtörtént az ütközés, a korlátokba elhelyezett szenzorok érzékelik és a veszélyhelyzetre figyelmet felhívó jelzést azonnal kivetítik a baleset előtti útszakasz LED kijelzőire, ezzel figyelmeztetve az arra közlekedőket. A kijelzés távolságát a forgalomirányító központból lehet változtatni, annak függvényében, hogy mekkora a forgalom és milyenek a környezeti körülmények. A meghibásodott és a padkán várakozó járműveket a LED paneleken a narancssárga szín jelzi. Meghatározott távolságokban vészjelző gombok vannak az intelligens korlátokon elhelyezve, melyek segítségével a probléma jelezhető, így közvetlenül a veszélyre figyelmet felhívó jelzés megjelenik a megelőző útszakasz kijelzőin, továbbá a forgalomirányító központ is értesül. A hiba jelzése a jármű elhagyása nélkül, egy integrált rendszer applikációja segítségével is megvalósítható.

A rendszerbe LED égősorok is beépíthetők, ezzel biztosítható a nehéz látási viszonyok között is a megfelelő tájékozódás és vezetés. Ez a rendszer kiegészítheti vagy teljes egészében válthatja ki a hagyományos közúti világítást. A gumiburkolatba helyezett szenzorok segítségével érzékelni lehet a környezeti és időjárás körülmények változását, így a LED kijelzők az időjárásnak megfelelő jelzést tudják mutatni a járművezetőknek, illetve a járművek számára tudnak valós idejű információt szolgáltatni. Abban a pillanatban, mikor egy jármű a korlátnak ütközik, a rendszer egy vészjelzést küld GSM, 4G, 5G vagy IoT csatornákon, mely tartalmazza a baleset helyszínének és körülményeinek (becsapódás ereje, szöge) adatait. Ezek az adatok a közúti forgalmi vagy üzemeltetési központokba futnak be vagy az e-Call rendszer segítségével közvetlenül mentőkhöz, rendőrséghez és tűzoltósághoz jut el. Ezzel felgyorsíthatók a vészjelzési folyamatok, továbbá amennyiben a jármű is küld vészhelyzet esetén adatokat, a redundáns rendszer tovább növeli a biztonságot és a megbízhatóságot. A korlátokba „ultrasound” hangforrásokat lehet telepíteni, melyek megakadályozzák, hogy állatok közelítsék meg az utat és annak közvetlen környezetét. A korlát sokoldalúsága miatt, és mivel ez a szabadalom magában foglal minden olyan jelenlegi vagy jövőbeni technológiai alkalmazást, melyet fejleszteni lehet, az innovációs lehetőségek gyakorlatilag korlátlanok. A rendszer fejlesztésének további irányai lehetnek:

- olyan applikációk fejlesztése, melyek figyelmeztetik a járműveket a védtelen közlekedők jelenlétéről;
- járműfelismerő rendszer telepítése közvetlenül az elválasztó elemekbe;
- útdíjfizetési rendszer illesztése.

A moduláris szerkezet lehetővé teszi, hogy szinte minden esetben az igényeknek és a környezeti körülményeknek megfelelő rendszert lehessen telepí-

teni. Az egymástól teljesen független technológiai alkalmazásokat akár egyenként, de komplex formában is használni lehet. A korlátrendszer burkolatának gyártásánál méterenként 20 kg gumi-származékot tudnak újrahasznosítani, a gumihulladék szinte bármilyen forrásból származhat, így jelentősen csökkentve a rendszer környezeti terhelését.

■ Energiaelnyelő elválasztó rendszerek

A dél-koreai ETI (Evolution in Traffic Innovation) cég ütközési energia elnyelésére képes közúti elválasztó rendszert fejlesztett ki, mely ellentétben a hagyományos, statikus elválasztó rendszerekkel, az ütközésből és jármű csúszásából származó mozgási energiát elnyeli és fokozatosan lassítja le a becsapódott járművet [8]. A mozgó testek dinamikai számításának alaptétele szerint a járművek mérete és sebessége határozza meg a mozgási energia nagyságát, azt is, hogy mekkora erővel képes becsapódni egy elválasztó korlátba, így azok méretezéséhez ez jelent alapot. A hagyományos acélszalag korlátok nem garantálják a járművezetők biztonságát, a kisebb ellenállású elválasztó rendszerek pedig autópályák esetében a szembejövő forgalmat veszélyeztetik (9. ábra).

A forgó hengerek nem csupán elnyelik az ütközés energiáját, hanem átalakítják az elfordulás segítségével mozgási energiává, így a jármű tovább mozog, de annak mozgási energiája fokozatosan veszik el és lassul le, ennek következtében az utasok sokkal kisebb valószínűséggel szenvednek komoly sérüléseket a becsapódástól. A forgó henger EVA műanyagból készül, mely jobb rugalmas és elasztikus tulajdonságokkal rendelkezik más műanyagokhoz képest. A forgó hengereket egy alsó és egy felső acélkeret tartja, melyeket acél tartók támasztanak meg.

A felső és alsó tartókeretek az ütközéskor megtámasztják a járművek abroncsait, megvezetik, így



9. ábra. A dél-koreai KSI cég elválasztó rendszer fejlesztése [8]

megelőzve a kormányrendszer sérülését. A hengerek elfordulásának és az abroncs megvezetésének köszönhetően a jármű hátulja elkerüli az ütközést, oldalfala fokozatosan lassulva csúszni kezd a hengerek oldalán. A háromdimenziós szerkezeti kialakítás és a D-formájú keret szétosztja és elnyeli a jármű vége okozta ütközés energiáját. A rendszer kialakításának legfontosabb jellemzői:

- a forgó hengerek 34,5 cm átmérőjűek, így keskenyebbek a hagyományos acélszalag korlátoknál;
- az acéltartók egymástól függetlenek, így egyenként javíthatók, cserélhetők, csökkentve a fenntartási költségeket;
- az acél tartókat 70 cm-es kiosztással telepítik, így biztosítva az ütközéseknek megfelelő ellenállást;
- erős fényvisszaverő képességű szalagokat helyeznek el a forgó hengereken, így biztosítva a jó láthatóságot.

A gyártó cég több különböző forgó hengert és acél tartót is gyárt attól függően, hogy milyen kategóriájú úton lesz beépítve a rendszer.

■ Mozgatható elválasztó rendszerek

A SwiftGate rendszer egy automata korlát és kapu megoldás, melyet speciálisan autópályák forgalmi szabályozási műveleteihez alakítottak ki [9]. A Versilis cég számos típusú, automata üzemmódban mozgatható kaput fejlesztettek ki, melyek azonos tervezési elveket és kommunikációs technológiát követnek. Kialakítástól függetlenül a rendszer legfőbb célja, hogy gyorsan, hatékonyan és biztonságosan tudjon beavatkozni a forgalmi helyzetbe, illetve könnyen telepíthető és gazdaságosan üzemeltethető legyen. A SwiftGate kapuk egy függőleges tengely körül fordulnak el (forgócsap), a forgókarokon a jó láthatóság érdekében nagy felületű fényvisszaverő eszközök lettek telepítve és LED égők is találhatóak rajta. A karok rendkívüli teherbírást, flexibilitást és tartósságot biztosítanak, melyeket korrózió álló anyagokból gyártanak és ellenáll a közutak menti környezeti hatásoknak. A rendszer telepítése integráltan zajlik, tehát az egyes elemekhez egy komplex kommunikációs szoftver rendszer tartozik. A cég által fejlesztett kommunikációs hardver elemek különböző kommunikációs lehetőségeket biztosítanak, melyek elvégzik a teljes rendszer üzemeltetését, fenntartását, megfigyelését. Az egyes karok központilag vagy a helyszínen is irányíthatók. A mozgatható elválasztó elemek előnyei:

- csökkentik a forgalmi torlódásokat;
- üzemanyag megtakarítást jelent a csökkent eljutási időnek köszönhetően;
- jobb közlekedési felület kihasználás;
- károsanyag-kibocsátás csökkentése.

A különböző kommunikációs eszközök lehetővé teszik, hogy a mozgatható karokat akár egy integrált forgalomirányítási és infrastruktúra üzemeltetési központból irányítsák, ellenőrizzék, de a helyszíni beavatkozásokhoz manuális rádiófrekvenciás végberendezések is rendelkezésre állnak. Az ideiglenes telepítésű rendszerek helyszíni energiaforrásról működtethetők (piezoelektromos berendezések, napelemes burkolatok), melyek kiépítéséhez nincs szükség kommunikációs hálózat kialakítására sem. A mozgatható kapuk könnyen cserélhető modulokból vannak összeállítva, melyek nagy sűrűségű polietilénből készülnek. A karok kialakításával nagyon jó láthatóságot és maximális fényvisszaverő képességet értek el a fejlesztők, melyet a nagy felületen elhelyezett magas intenzitású retroreflektív burkolat biztosít. A rugalmas polikarbonát anyagból készült irányjelző táblát LED égőkkel szerelték fel a kar forgalom felé eső végén, így biztosítva a megfelelő figyelemfelkeltést. Az irányjelző tábla önmagában növeli a kar láthatóságát, továbbá megvédi a kisebb erejű ütésektől. Ütközés esetén a kar visszahajlik eredeti állapotába, így csökkentve a szerkezet sérülésének valószínűségét és egy biztonsági zár megakadályozza a visszacsapódást (10. ábra).

A Versilis rendszer másik fontos eleme a SwiftSign automata figyelmeztető jelzőkép, melyet speciálisan forgalomirányítási folyamatok szabályozására fejlesztettek ki. A jelzés 90 fokban elforgatható és csak akkor látható a közlekedők számára, ha működésben van. Különböző jelzéseket lehet vele közölni a járművezetők felé, többféle fényjelzési beállítás segítségével. A táblákat korrózió álló anyagokból készítik, így a közlekedési környezet hatásainak teljes mértékben ellenáll. A táblákat egyenként és csoportokba rendezve is lehet működtetni, illetve jól illeszthető más intelligens infrastruktúra



10. ábra. A Versilis cég dinamikus elválasztó rendszere [9]

elemekkel. Az ideiglenes kihelyezésű táblákhoz nem kell villamosenergia hálózatot kiépíteni, elegendő felszerelni napenergia panelekkel és önállóan tudja biztosítani a villamosenergiát. A jelzéseket központilag és helyben, manuális végberendezések segítségével is lehet működtetni.

A Versilis típusú elválasztó rendszerek alkalmazási területei az Egyesült Államokban:

- telekocsi sávok be- és kijáratái;
- autópálya fel- és lehajtók forgalmának szabályozása;
- változtatható forgalmi irányú sávok;
- balesetek esetén belső sávok lezárása;
- műtárgyak környezetében forgalmi sávok használatának irányítása;
- rövid időszakú, nagy forgalmi igények menedzselése;
- autópályák, műtárgyak lezárása vészhelyzetben.

3. Összefoglalás

A közúti forgalomtechnikai innovációknak két fő iránya van, melyek összefüggésben vannak a közúti információk közzétételével és a fokozódó biztonsági igényekkel. Az útburkolati jelek fejlesztései a dinamikus megoldásokat helyezik előtérbe, ennek érdekében a LED technológia alkalmazása megjelenik a különböző megoldásokban. A láthatóság fokozása érdekében, az éjszakai közlekedési körülményekben vezetést segítő főként fluoreszcenciás megoldásokat javasolnak nemzetközi és hazai szinten is. A járművek „intelligenciájának” növekedése lehetővé teszi, hogy önmaguk tudjanak akár útmenti jelzéseket megjeleníteni és egyértelműsíteni a fedélzeten, közölni a vezetővel. Az elválasztó rendszerek fejlesztései szintén a valós

idejű alkalmazkodó képesség elérését kívánják megvalósítani, emellett a biztonság továbbra is az innovációk egyik meghatározó elemek. A forgalomtechnikai elemek fejlesztése, kipróbálása hazánkban is aktuális, hiszen pl. Zalaegerszegi Tesztpálya alkalmas lehet az új infrastruktúra elemek tesztelésére is.

Felhasznált irodalom

- [1] Hesz Mátyás Okos út, teszt út. „Közös dolgaink – beszélgetések a szakmáról”: A jövő megoldásai a közutak fejlesztése és üzemeltetése során, Budapest, Magyarország, (2018).
- [2] 9 Technologies for Building the „Road of the Future” (hozzáférés: 2018.02.28.) <https://www.citylab.com/life/2012/12/9-technologies-building-road-future/4219/>
- [3] Világító útburkolati jelek (Living Road – Hungarian Road Kft.) <http://www.livingroad.hu/index.php?pg=vubjel>
- [4] LED gyalogos átkelőhely (hozzáférés: 2018.04.08.) <http://www.wired.co.uk/article/digital-pedestrian-crossing-technology-machine-learning-safety>
- [5] LED burkolati jelek (hozzáférés: 2018.04.08.) <http://www.worldhighways.com/categories/road-markings-barriers-workzone-protection/features/improved-road-markings-will-boost-roadway-safety-for-users/>
- [6] Mercedes-Benz Digital Light (hozzáférés: 2018.04.08.) https://totalcar.hu/magazin/hirek/2018/03/07/full-hd-ben_vetit_a_jovo_autolampaja/
- [7] Intelligens elválasztó rendszer (hozzáférés: 2018.04.08.) <https://1barrier.com/en/>
- [8] Energiaelnyelő elválasztó rendszer (hozzáférés: 2018.04.08.) <https://interestingengineering.com/korean-company-develops-life-saving-rolling-barrier-system>
- [9] Versilis mozgatható elválasztó rendszer (hozzáférés: 2018.04.08.) <http://www.versilis.com/>

NEMZETKÖZI SZEMLE

Elsőbbségi vagy kizárólagos használatú sávok összekapcsolt és önvezető járműveknek

Dedicating Lanes for Priority or Exclusive Use by Connected and Automated Vehicles

Szerző(k): Booz Allen Hamilton (WSP, New Jersey Institute of Technology, USA)

Link: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_891.pdf

Terjedelem: 156 oldal

NCHRP Report 891: Dedicating Lanes for Priority or Exclusive Use by Connected and Automated Vehicles concentrates on identifying and evaluating opportunities, constraints, and guiding principles for implementing dedicated lanes for connected and automated vehicles. It identifies and describes conditions amenable to dedicating lanes for users of these vehicles and the necessary guidance to deploy them in a safe and efficient manner. The analysis, which relied on application of virtual, computer-based models, helps identify potential impacts associated with various conditions affecting lane dedication, market penetration, evolving technology, and changing demand. This report will be of immediate interest to transportation planners responsible for examining opportunities for integrating connected and, eventually, automated vehicles into the highway network.



Hidraulikus kötőanyaggal stabilizált talajok teherbírásának értékelése ciklikus CBR-vizsgálattal

Primusz Péter¹, Kisfaludi Balázs¹, Péterfalvi József¹

¹ Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet
e-mail: primusz.peter@uni-sopron.hu; kisfaludi@gmail.com; peterfalvi.jozsef@uni-sopron.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.02

Kivonat Opiyo 1995 kidolgozta a ciklikus CBR- (cCBR) eljárásnak nevezett módszert annak érdekében, hogy a szemcsés útépitési anyagok reziliens modulusát (M_r) a CBR-vizsgáló berendezéssel meg lehessen határozni. A jelen kutatásban a cCBR-eljárást mész-cement keverékkel stabilizált iszapos homokliszt talajokon teszteltük. A vizsgálathoz 18 db 3, 5 és 7%, 70–30 arányú mész-cement keverék hozzáadásával próbatestet készítettünk 10–22% tervezett kiindulási víztartalom mellett. A minták teherbírásának kifejezésére három mérőszámot használtunk: 1. az általánosan használt CBR% érték, 2. a cCBR-vizsgálat eredményeként meghatározott terhelőerő és rugalmas alakváltozás függvényében kiszámított M_r -érték, illetve 3. a CBR-értékből számított reziliens modulus. A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy a kiindulási víztartalom nagyobb hatással volt a teherbírásra, mint a kötőanyag adagolás. A cCBR eljárást könnyen kivitelezhetőnek találtuk. A vizsgálat eredményeit az Opiyo, illetve a Molenaar által kidolgozott képlet segítségével lehet átszámítani reziliens modulus értékre. Az Opiyo-képlettel kapott M_r -értékek az irodalomban a hasonló talajokra megadott értékhatárokon belülre estek. A CBR-értékből számított reziliens modulus értékek igen nagy szórást mutattak. Webb és Campbell, valamint Uzan képlete a Molenaar-képlettel számított reziliens modulusokhoz hasonló eredményt adott.

Kulcsszavak ciklikus CBR, reziliens modulus, teherbírás, analitikus méretezés, talajstabilizáció

Evaluating the bearing capacity of hydraulic road binder treated soils by the cyclic CBR method

Abstract The cyclic CBR (cCBR) method was developed by Opiyo (1995) in order to determine the resilient modulus (M_r) of unbound road construction materials with the standard CBR machine. In this research, the cCBR method was applied to lime-portland cement stabilized silty sand soils. 18 soil samples were produced with 70–30% lime-cement binder, 10–22% water content and 3%, 5% and 7% binder dosage. The bearing capacity of the treated soils was expressed by three metrics: 1) the classic CBR% value, 2) the resilient modulus calculated based on the force and elastic deformation resulted from the cCBR procedure and 3) the resilient modulus calculated from the CBR% value. It was found that the water content had greater effect on the bearing capacity than the binder dosage. The cCBR method proved to be an easy-to-use evaluation tool. The results of the test were transformed into resilient modulus value by the equations presented by Opiyo or by Molenaar. The calculated M_r values by Opiyo corresponded well with the M_r values derived from the literature. The resilient modulus values calculated from the CBR showed great variance. The results of the equations of Webb & Campbell and Uzan corresponded well with the modulus calculated with the Molenaar equation.

Keywords cyclic CBR, resilient modulus, bearing capacity, analytical pavement design, soil stabilization

Dr. Primusz Péter

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése.

Dr. Kisfaludi Balázs

2019 februárjáig a Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa volt. Elsődlegesen erdészeti utak forgalomelemzésével foglalkozott, emellett részt vett talajstabilizációval, illetve úthálózatok vizsgálatával foglalkozó kutatásokban.

Dr. habil Péterfalvi József

Soproni Egyetem (SOE), Erdőmérnöki Kar, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet, Erdőfeltárási Tanszék. Fő szakterület: erdőfeltárási, erdészeti útépités. Oktatott tárgyak: Erdészeti utak tervezése és építése, Feltáráshálózatok tervezése, Erdészeti utak számítógépes tervezése, Infrastruktúra és közlekedés. Az Erdészeti utak tervezési irányelveinek egyik kidolgozója. Szakmai gyakorlati tevékenység: részvétel több mint 130 km erdészeti, 8,6 km kerékpárút tervének kidolgozásában, több mint 20 szakértés.

Háttér

A nem aszfaltburkolatú erdészeti feltárási utak komoly kihívás elé állítják az erdőgazdálkodót, hiszen ezeken az utakon a faanyag szállíthatóságát az időjárás nagymértékben befolyásolja. Különösen igaz ez a klímaváltozás fényében, merthogy a fagyos napok száma csökken, aminek következtében a földutak a fakitermelési időszakban szállításra alkalmatlan állapotban vannak. Egy földút hagyományos – makadám vagy aszfalt – burkolattal történő ellátása jelentős anyagi ráfordítást igényel, ami nem minden esetben áll rendelkezésre. Ezért az erdőgazdálkodók folyamatosan keresik azokat a megoldásokat, amelyek segítségével jó ár-érték arányú pályaszerkezetek építhetők, és amelyek jelentősen megnyújtják a forgalmazható időszakot. A pályaszerkezetek építési költségét jelentősen csökkenteni lehet a helyi anyagok felhasználásával. A helyi talajok a fizikai féleségüknek megfelelő kötőanyag hozzáadásával jól megmunkálhatóvá, illetve teherbíróvá tehetők. A közútépítési gyakorlatban a stabilizált helyi talaj teherbírását nem veszik figyelembe, ám az erdészeti útépitésben nagy biztonsággal a pályaszerkezet teherbíró részének tekinthető.

A gazdaságos, alacsony költséggel építhető pályaszerkezetek tervezésére és kivitelezésére különösen nagy figyelmet kell fordítani, hiszen a költségek csökkentését nem varázsszerekkel, hanem precízen meghatározott anyagmennyiségekkel és építési technológiával érik el. Az erdészeti utak közutakéhoz viszonyított alacsony építési költsége általában nem bírja el a magas tervezési költséget. A számítástechnika fejlődésével, illetve az egyre bővülő anyagismerettel azonban a tervezőnek lehetősége nyílik a klasszikus CBR módszer helyett az újszerű, precíz anyagparamétereket felhasználó analitikus, mechanikai alapú pályaszerkezet méretezési módszer használatára. Ez a méretezési eljárás a pályaszerkezetet egymásra helyezett rugalmas lemezekként képzele el. A lemezrendszer terhelésre adott válaszát a lemezek rugalmasságát le-

író anyagparaméterek, valamint a lemezek közti kapcsolat függvényében lehetséges kiszámítani.

Az analitikus méretezéshez szükséges anyagparaméterek közvetlenül a dinamikus triaxiális vizsgálattal határozhatók meg, ám ez a vizsgálat összetett és drága felszerelést igényel (Araya et al., 2010). Az egyszerűbb vizsgálatok (CBR, Egyirányú nyomóvizsgálat) eredményeinek átszámítását több szerző is megkísérelte, de az átszámított eredmények között nagy eltérések mutatkoztak. Opiyo (1995) kidolgozott egy olyan eljárást, amellyel az egyszerű CBR-vizsgáló berendezést felhasználva vizsgálható a talajminták rugalmas viselkedése. Az ciklikus CBR-eljárásnak nevezett módszer nagyban hozzájárulhat ahhoz, hogy a stabilizációs pályaszerkezetek mechanikai alapú méretezése költséghatékonyan elvégezhető legyen.

A ciklikus CBR-eljárás hazai talajok stabilizálhatóságának mérésében történő alkalmazhatóságára indított kísérlet-sorozat első eredményeit mutatja be a jelen tanulmány.

Irodalmi áttekintés

A hazai közúti pályaszerkezet méretezési gyakorlat a típus-pályaszerkezetek rendszerére épül, az erdészeti úttervezésben pedig a CBR-alapú módszer terjedt el. A talaj teherbírását a CBR-értékkel veszik figyelembe. Ez az érték egy viszonyszám, amely megmutatja, hogy egy etalonnak tekintett zúzottkő pályaszerkezeti réteg teherbírásához képest a vizsgált anyag mekkora teherbírású. A teherbírást azzal az erővel jellemzik, ami ahhoz szükséges, hogy egy 50 mm átmérőjű fém hengert 1,27 mm/s sebességgel 2,5 mm mélységben az előírás szerint elkészített talajmintába nyomjunk. A mért erőből az (1) képlet segítségével számítható a CBR-érték. A vizsgálat elvégzéséhez egy terhelő keretre, valamint egy erő-, illetve egy elmozdulásmérőre van szükség. Ezek az eszközök a legtöbb talaj-, illetve útlaborban rendelkezésre állnak, és használatuk rutinszerűen történik.

$$CBR\% = 100 - \frac{F_{2,5}}{13,2} \quad (1)$$

ahol: $F_{2,5}$ = a 2,5 mm benyomódáshoz szükséges erő (kN).

2016-ban Magyarországon is kidolgozásra került egy alternatív pályaszerkezet méretezési eljárás (Primusz és Tóth, 2018), amely lehetővé teszi a mechanikai alapú méretezést. Ehhez bemenő paraméterként a pályaszerkezeti réteg anyagának rugalmassági modulusára van szükség. A dinamikus terhelés mellett figyelembe vehető rugalmassági modulusra (E) a reziliens modulus (M_r) ad jó becslést. A reziliens modulus a deviátor feszültség és a rugalmas alakváltozás arányaként írható fel, amelynek mértéke függ az oldalirányú nyomástól (Back és Szendefy, 2017). A feszültségállapot mellett, a reziliens modulus értékét a földmű víztartalma és hőmérséklet eloszlása is jelentősen befolyásolja, melynek számítására már több módszert is kidolgoztak (Pap M, Mahler A és Tóth Cs, 2017).

A reziliens modulus közvetlen meghatározása dinamikus triaxiális vizsgálóberendezéssel történik. A vizsgálat alatt a mintát állandó cellanyomás mellett ciklikus, gyors (0,1 mp), tengelyirányú terhelésnek teszik ki. Ezzel a pályaszerkezet valós igénybevételét lehet modellezni, ahol a gyorsan mozgó járművek hasonlóan rövid ideig terhelik a szerkezet egy adott pontját. A vizsgálatához használt berendezés költséges, használata összetettebb, mint a CBR-vizsgáló berendezésé, ezért alkalmazása annál kevésbé elterjedt.

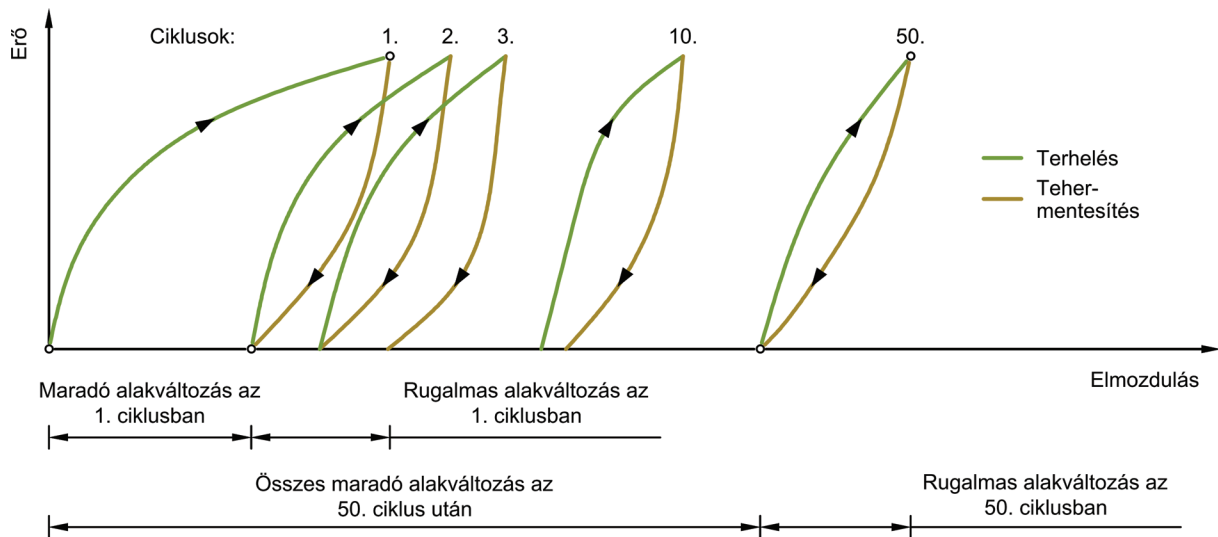
A mechanikai alapú méretezéshez szükséges reziliens modulus meghatározására kézenfekvő eljárásnak tűnt összefüggést keresni a könnyen meghatározható CBR és a reziliens modulus (M_r) értéke között. A kutatók több modellt is kidolgoztak, amelyek segítségével a CBR-érték átszámítható reziliens modulus értékre. Háromféle modell alkalmazása terjedt el: lineáris (Heukelom és Klomp, 1962;

Ohio DOT, 2008), hatványos (Green és Hall, 1975; Hopkins, 1994; Paterson és Maree, 1978; Powell et al., 1984; Uzan, 1985; Webb és Campbell, 1986) és polinomiális (Kenya Road Design Manual, 1987; Mukabi, 2016). Az átszámítási képleteket az 1. táblázat mutatja be. Fontos kiemelni, hogy a modellek alkalmazását meghatározott talajokra és CBR tartományokra javasolják, illetve hogy a használatukkal nyert reziliens modulus értékek esetenként nagy szórást mutatnak (Back és Szendefy, 2017).

A klasszikus CBR-vizsgálat egy terhelése alatt a vizsgált minta plasztikus és rugalmas alakváltozást is szenved, ezért Opiyo (1995) feltételezte, hogy ebből az egy értékből nem lehet tisztán a rugalmas tulajdonságokra következtetni, vagyis a CBR-érték nem számítható át megbízhatóan rugalmassági modulusra. Ezért 1995-ben kidolgozta a ciklikus CBR-vizsgálat módszerét azzal a céllal, hogy a talajok, illetve szemcsés útépitési anyagok rugalmassági modulusát egyszerű, már meglévő eszközökkel lehessen meghatározni. A vizsgálatot más kutatók sikerrel alkalmazták kötött talajokra és stabilizált talajokra is (Sas et al., 2012; Sas és Głuchowski, 2013). A CBR-vizsgálat első lépcsője (2,5 mm benyomódás, 1,25 mm/perc sebességgel) után további teherismétléseket javasolt. Az ismétléseket az első lépcsőben elért maximális terheléssel kell elvégezni. Az ismételt terhelések hatására az anyag egyre kisebb maradó alakváltozást szenved. A teherismétlési ciklusokat elméletileg addig kellene folytatni, amíg a minta már csak rugalmas alakváltozást mutat. A gyakorlatban megfelelő, ha az utolsó 5 ciklus együttes, maradó alakváltozása kisebb, mint a teljes maradó alakváltozás 2%-a. Ez az állapot jellemzően 50–100 teherismétlés után alakul ki (Araya, 2011; Molenaar, 2011). A rugalmas alakváltozást jól jellemzi az utolsó terhelési ciklusban mért alakváltozás, valamint az ezt kiváltó erő (1. ábra).

1. táblázat. Különböző átszámítási képletek CBR-ről reziliens modulusra

A modell típusa	A modell kidolgozója	Átszámító képlet	Ajánlott CBR tartomány
Lineáris	(Heukelom és Klomp, 1962)	$M_r = 10,340 \cdot CBR$	10–20
	(Ohio DOT, 2008)	$M_r = 8,274 \cdot CBR$	
Hatványos	(Green and Hall, 1975)	$M_r = 37,268 \cdot CBR^{0,711}$	2–200
	(Paterson és Maree, 1978)	$M_r = 20,670 \cdot CBR^{0,65}$	
	(Powell et al., 1984)	$M_r = 17,616 \cdot CBR^{0,64}$	2–12
	(Uzan, 1985)	$M_r = 91,226 + 0,017 \cdot CBR^2$	
	(Webb és Campbell, 1986)	$M_r = 21,470 \cdot CBR^{0,478}$	
	(Hopkins, 1994)	$M_r = 17,914 \cdot CBR^{0,874}$	
Polinomiális	(Kenya Road Design Manual, 1987)	$M_r = 0,0162 \cdot CBR^3 - 0,5454 \cdot CBR^2 + 10,062 \cdot CBR$	
	(Mukabi, 2016)	$M_r = 0,0022 \cdot CBR^3 - 0,1273 \cdot CBR^2 + 6,4261 \cdot CBR$	<170



1. ábra. A ciklikus CBR-vizsgálat sematikus erő-elmozdulás grafikonja

Ez a két változó, valamint néhány segédparaméter ismeretében több egyenletet is kidolgoztak a kutatók a reziliens modulus meghatározására. *Opiyo* (1995) eredeti összefüggését a (2) egyenlet mutatja be, míg *Molenaar* (2011) a (3) egyenletet állította fel.

$$E = \frac{\sigma d}{u d} \left[\frac{d(L-H)}{D} \right] \quad (2)$$

ahol: E : modulus (reziliens) (MPa)
 σ : átlagos nyomófeszültség (MPa)
 d : a terhelő felület átmérője (mm)
 u : rugalmas alakváltozás (mm)
 L : a minta magassága (mm)
 H : a kúpos rész magassága (mm)
 D : a minta átmérője (mm)

A fenti összefüggésben használt változók pontos értelmezését a 2. ábra segíti.

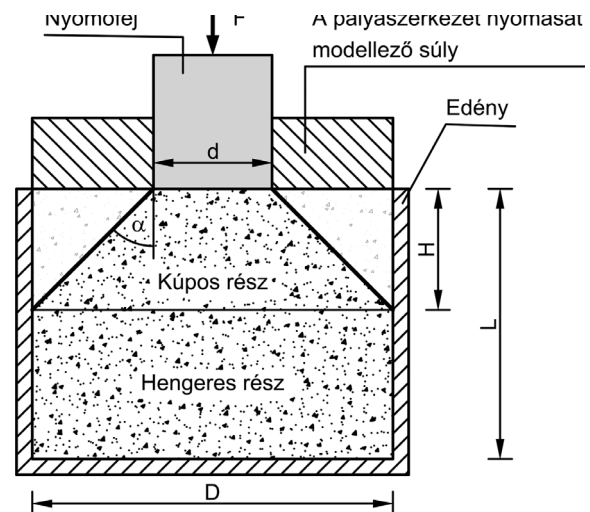
$$E_{equ} = \frac{1,513(1-\nu^{1,104})\sigma_p \cdot a}{u^{1,012}} \quad (3)$$

ahol: E_{equ} : ekvivalens modulus (MPa)
 ν : Poisson szám (-)
 σ_p : átlagos nyomófeszültség (MPa)
 u : Rugalmas alakváltozás (mm)
 a : A terhelő felület sugara (mm)

Anyag és Módszer

Mintaterület

A teherbírás-vizsgálatokat egy átfogó kutatás keretében végeztük, amihez az EGERERDŐ Zrt. biztosított helyszínt. A cég Parádfürdői Erdészetének terü-



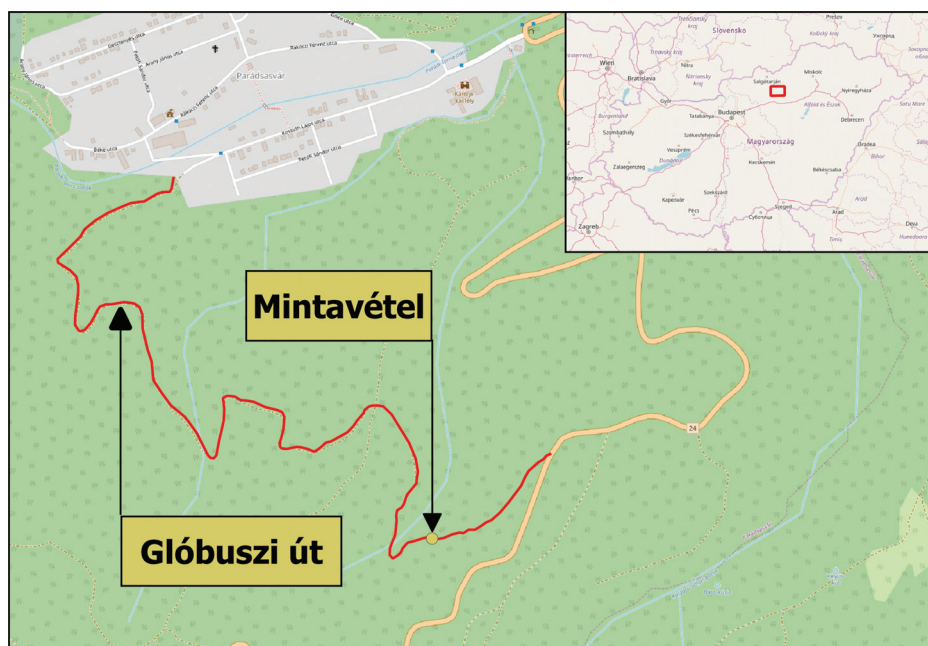
2. ábra. A ciklikus CBR vizsgálat feldolgozásánál használt méretek értelmezése (*Opiyo*, 1995)

(<http://utugyilapok.hu/wp-content/uploads/2015/11/Analitikus-TU.pdf>)

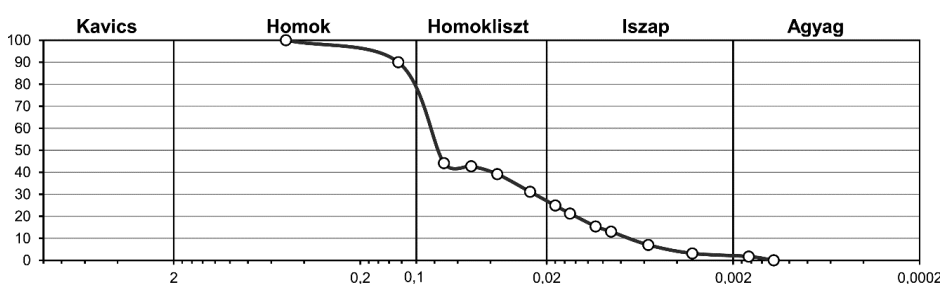
letén jellemzően kötött talajok találhatók, amelyek az útpépítés szempontjából kedvezőtlen körülményt jelentenek. A talajok stabilizálhatóságát egy konkrét, problémás út – „Glóbuszi” erdészeti feltáróút – mintáján demonstráltuk. Az út közvetlen közeléből, a humuszos réteg alatti réteg felső 50 cm vastag sávjából mintegy 300 kg talajmintát vettünk. A mintavétel pontos helye (3. ábra) AZ EOY koordinátákkal megadva: Y=284495,4; X=720066,5.

A vizsgált talaj

A talajon elvégeztük a talajazonosításhoz szükséges talajmechanikai vizsgálatokat. A talaj folyási



3. ábra. A talajmintavétel helye



4. ábra. A vizsgált talaj szemeloszlási görbéje

határa (W_L) 40,71%, a sodrási határa (W_P) 22,85%, a plasztikus indexe (IP) 17,86%-ra adódott. A talaj szemeloszlási görbéjét a 4. ábra mutatja be. A plasztikus index alapján a vizsgált talajt sovány agyagként azonosítottuk, míg a szemeloszlási gör-

talmazó kötőanyagot a Carmeuse Hungária Kft. biztosította. A talajkeverékekből széthyitható CBR edényekben (átmérő = 150 mm, magasság = 114 mm) edényekben mintákat készítettünk. A keveréket öt rétegen, rétegenként 25 ütessel Proctor-féle

be szerint az iszapos homokliszt kategóriába került. A talaj 15,8% víztartalom mellett tömöríthető legjobban, maximális halomsűrűsége $1,81 \text{ g/cm}^3$. Az irodalmi adatok alapján a talaj várható reziliens modulus értéke 60–100 MPa érték körül alakul (Drumm et al., 1990; Bandara és Rowe, 2003).

Próbatestek készítése

A vizsgálathoz a talajmintát levegőn szárítással és darálással készítettük elő. Az előkészített talajból 18 féle keveréket készítettünk a 2. táblázat szerinti kötőanyag és víz adagolásával. A talaj szemcseösszetétele alapján kötőanyagként mész, illetve mész-cement keverék jöhetett szóba. Az előzetes, három nap pihentetés után végzett vizsgálatok szerint a mész-cement keverékekkel kezelt talajok teherbírása 15–20%-kal magasabb, ezért ezzel a kötőanyaggal készítettük a próbatesteket. A vizsgálathoz szükséges, 70% mész és 30% cementet tartalmazó

2. táblázat. Kísérleti talaj-kötőanyag keverékek

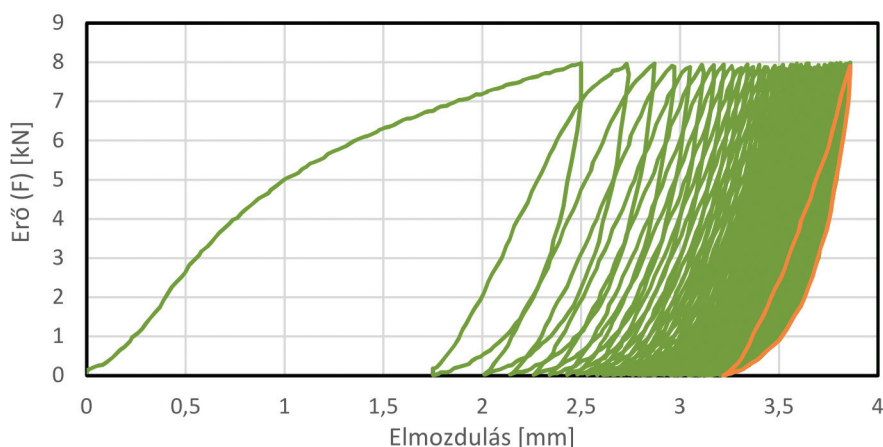
Minta száma #	Kötőanyag	Kötőanyag-adagolás (m/m %)	Mért víztartalom (m/m %)	Minta száma #	Kötőanyag	Kötőanyag-adagolás (m/m %)	Mért víztartalom (m/m %)
MC1	70% mész, 30% cement	3	10,0	MC10	70% mész, 30% cement	5	16,3
MC2		3	12,8	MC11		5	18,8
MC3		3	15,3	MC12		5	21,4
MC4		3	16,4	MC13		7	7,9
MC5		3	17,8	MC14		7	10,3
MC6		3	20,7	MC15		7	12,5
MC7		5	8,9	MC16		7	15,7
MC8		5	12,0	MC17		7	20,1
MC9		5	14,0	MC18		7	22,7

tömörítőgépből tömörítettük be az edényekbe. Az edényből kivett mintákat párazáró csomagolásban 28 napig állni hagytuk.

Ciklikus CBR vizsgálat

A pihentetés után a CBR mintákat visszatettük az edénybe, majd Multiensayo univerzális terhelő berendezés segítségével egy 1,25 mm/perc sebességgel mozgó, 50 mm átmérőjű acél hengerrel terheljük a készítés kori felső síkot, 2,50 mm mélységű behatolásig. Tehermentesítés után a benyomáshoz szükséges maximális erővel 50 teherismétlést alkalmaztunk. A vizsgálat alatt rögzítettük a terhelő fej elmozdulását és az elmozduláshoz szükséges erőt.

Az első ciklusban mért maximális erő alapján az (1) képlet segítségével számítottuk ki a minták CBR% értékét. Az utolsó ciklusban mért alakváltozás és a terhelő erő függvényében a (2) képlettel az Opiyo féle, míg a (3) képlettel a Molenaar-féle ekvivalens moduluszt számítottuk.



5. ábra. Az MC3 minta ciklikus CBR vizsgálatának erő-elmozdulás grafikonja

CBR átszámítása M_r -értékre

A szakirodalom több olyan képletet is bemutat, amelyekkel a CBR érték a szerzők szerint átszámítható reziliens modulusz értékévé. A kísérleti eredményeken elvégeztük ezeket az átszámításokat annak érdekében, hogy össze lehessen vetni a rugalmassági paramétereket is figyelembe vevő képletek eredményeivel. Az 1. táblázatban bemutatott tíz féle képlettel számítottuk az M_r várható értékét.

Eredmények

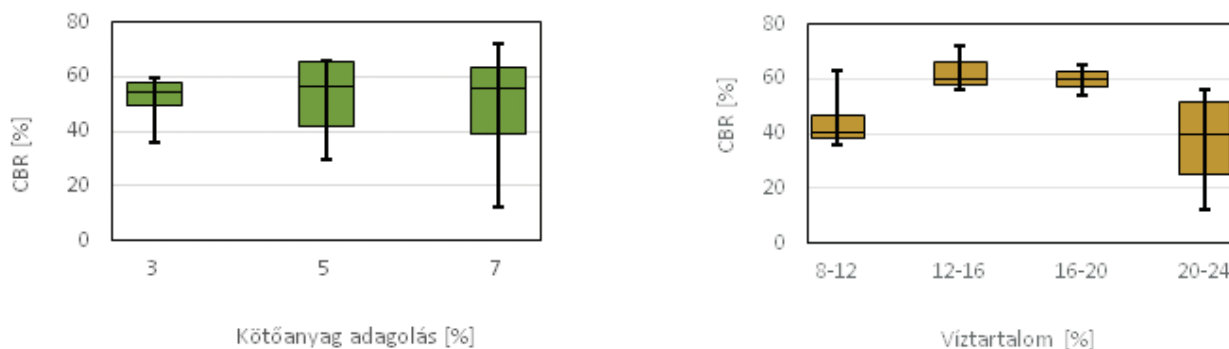
A ciklikus terhelés hatására a szakirodalomnak megfelelő erő-elmozdulás grafikon rajzolódott ki (5. ábra) a minták vizsgálatakor. A példán látható, hogy a vizsgált anyag mintegy 3 mm maradék, és 0,5 mm rugalmas alakváltozást szenvedett az 50. ciklus végén.

A mért CBR, illetve a kétféle összefüggéssel számított M_r - értékeket a 3. táblázat tartalmazza. A minták CBR-értékei 13 és 80 CBR% között változtak, az átlagos CBR-érték 53,9 CBR% (szórás: 16,3%) volt. Az Opiyo szerint számított reziliens moduluszok átlaga 44,2 MPa (szórás: 13,1 MPa), a Molenaar-féle számítás szerinti átlaga 157,6 MPa-ra (szórás: 46,9 MPa) adódott.

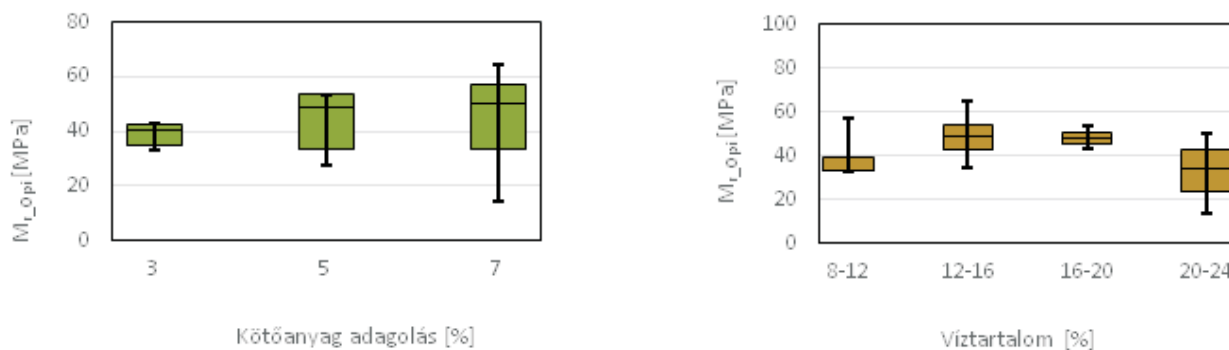
A kísérletben feltételeztük, hogy a stabilizáció teherbírása függ a kötőanyag típusától, a kötőanyag adagolástól, illetve a talaj víztartalmától. Az erre vonatkozó eredményeket a 6. ábra és a 7. ábra

3. táblázat. A talajkeverékek számított CBR értékei, valamint az Opiyo, illetve Molenaar képlettel számított egyenértékű moduluszai

Minta #	CBR (%)	Mr_Opi (MPa)	Mr_Mole (MPa)	Minta #	CBR (%)	Mr_Opi (MPa)	Mr_Mole (MPa)
MC1	36,0	33,0	117,5	MC10	71,3	54,8	196,6
MC2	59,9	42,9	152,3	MC11	65,4	53,5	190,3
MC3	58,1	34,6	122,4	MC12	29,8	27,3	97,2
MC4	58,8	44,6	160,0	MC13	39,3	33,3	118,6
MC5	54,3	42,9	152,4	MC14	63,3	56,9	202,4
MC6	49,8	40,7	144,8	MC15	72,0	64,7	230,3
MC7	41,7	33,5	119,2	MC16	80,3	63,5	239,3
MC8	56,3	53,7	191,4	MC17	55,8	50,1	178,4
MC9	66,1	48,8	173,4	MC18	12,6	14,1	50,4



6. ábra. A keverékek CBR-értéke a kötőanyag-adagolás függvényében



7. ábra. A keverékek M_r -értéke a víztartalom függvényében

mutatja be. A box-plot ábrák alapján az látszik, hogy a kötőanyag adagolás nagysága csak kis mértékben befolyásolta a minták átlagos CBR-, illetve M_r -értékeit. Ezt erősítik meg a 4. táblázat korrelációs adatai is. Ezzel szemben úgy tűnik, hogy a talaj víztartalma nagyobb hatással van a teherbírásra. A 6. ábra alapján a mintákra megadható egy, a CBR,

illetve az M_r -érték szempontjából optimálisnak tekinthető víztartalom.

A számított M_r -értékeket megvizsgálva szembevető, hogy a két adatsor között szoros összefüggés van (4. táblázat), ám a Molenaar-féle képlet háromszor magasabb értéket ad, mint az eredeti, Opiyo-féle. A két összefüggést különböző talajra és

4. táblázat. Korreláció a vizsgált változók között

W_{terv}	$W_{mért}$	Alakv.	$F_{2,5}$	F/alak	$CBR_{2,5}$	M_{r_Opi}	M_{r_Mol}	MC
0,00	-0,05	-0,58	-0,08	0,16	-0,08	0,16	0,16	B
	0,65	0,12	0,11	0,03	0,11	0,03	0,03	W_{terv}
		-0,16	-0,27	-0,27	-0,27	-0,27	-0,27	$W_{mért}$
			0,47	0,09	0,47	0,09	0,09	Alakv.
				0,92	1,00	0,92	0,91	$F_{2,5}$
					0,92	1,00	1,00	F/alak
						0,92	0,91	$CBR_{2,5}$
							1,00	E_{Opi}
								E_{Mol}

B: kötőanyag adagolás (%), W_{terv} : tervezett víztartalom (%), $W_{mért}$: valós víztartalom (%), Alakv: rugalmas alakváltozás az 50. ciklusban (mm), $F_{2,5}$: a 2,5 mm behatolásához szükséges erő (kN), F/alak: az $F_{2,5}$ és az alakváltozás hányadosa (-), $CBR_{2,5}$: a minta mért CBR értéke (%), M_{r_Opi} : Az Opiyo-féle képlettel számított reziliens modulus (MPa), M_{r_Mol} : A Molenaar-féle képlettel számított reziliens modulus (MPa)

edényméretre dolgozták ki, ami magyarázatot adhat az eltérő eredményre. Az *Opiyo*-féle képlettel számított modulusok nagyságrendje közelebb áll a vizsgált talaj irodalom alapján becsült modulusához (60–100 MPa).

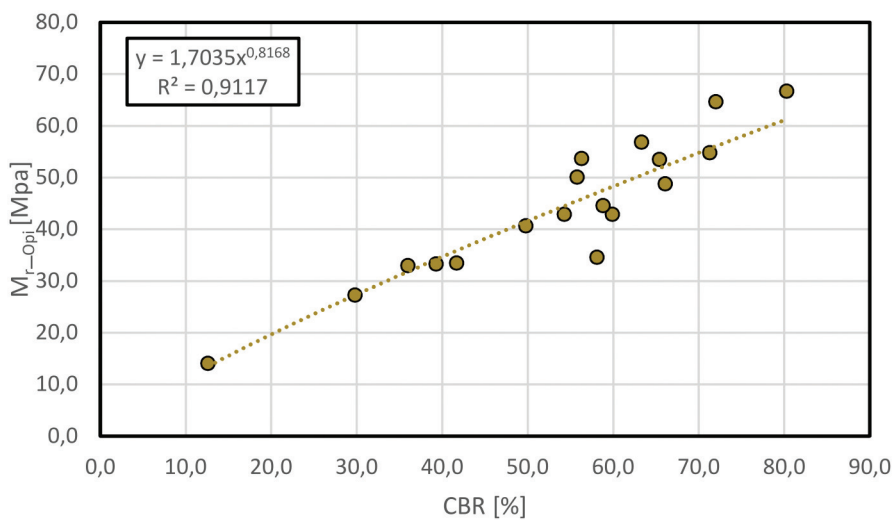
A kísérletsorozattal célunk volt annak vizsgálata is, hogy a CBR és a reziliens modulus értéke között található-e összefüggés. A 8. ábra a mért CBR-értékeket és a hozzájuk tartozó, *Opiyo*-féle képlettel számított reziliens modulus értékeket mutatja. A talajminták CBR értékének növekedésével a reziliens modulus értékek is nőnek. A pontokra illesztett lineáris, illetve hatvány modell R_2 -értéke

(0,86, illetve 0,91) is szoros összefüggést feltételez.

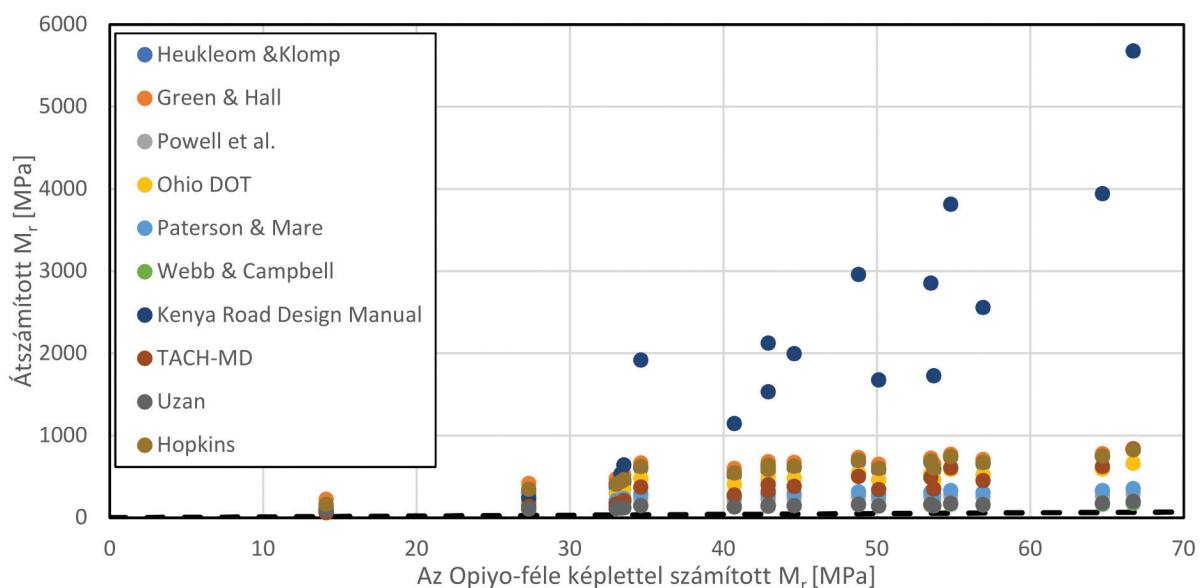
Az 1. táblázatban bemutatott összefüggésekkel kiszámítottuk a mért CBR értékekből becsült reziliens modulus értékeket (9. ábra). Azt tapasztaltuk, hogy a képletek eredményei jelentős szórást mutatnak, valamint, hogy az *Opiyo*-féle képlethez képest a CBR-ből számított reziliens modulusok jelentősen nagyobbak. Ezzel szemben volt olyan átszámító képlet, amelynek eredménye a Molenaar-féle képlettel számított M_r -értékekkel jó egyezést mutatott. A 45°-os egyeneshez Uzan, valamint *Webb* és *Campbell* (10. és 11. ábra) modellje áll a legközelebb. Az így számított M_r értékek legalább kétszer magasabbak, mint az *Opiyo*-képlettel számított reziliens modulus értékek, ellenben a *Molenaar*-féle képletből kapott eredményekkel nagyságrendileg megegyeznek.

Következtetések

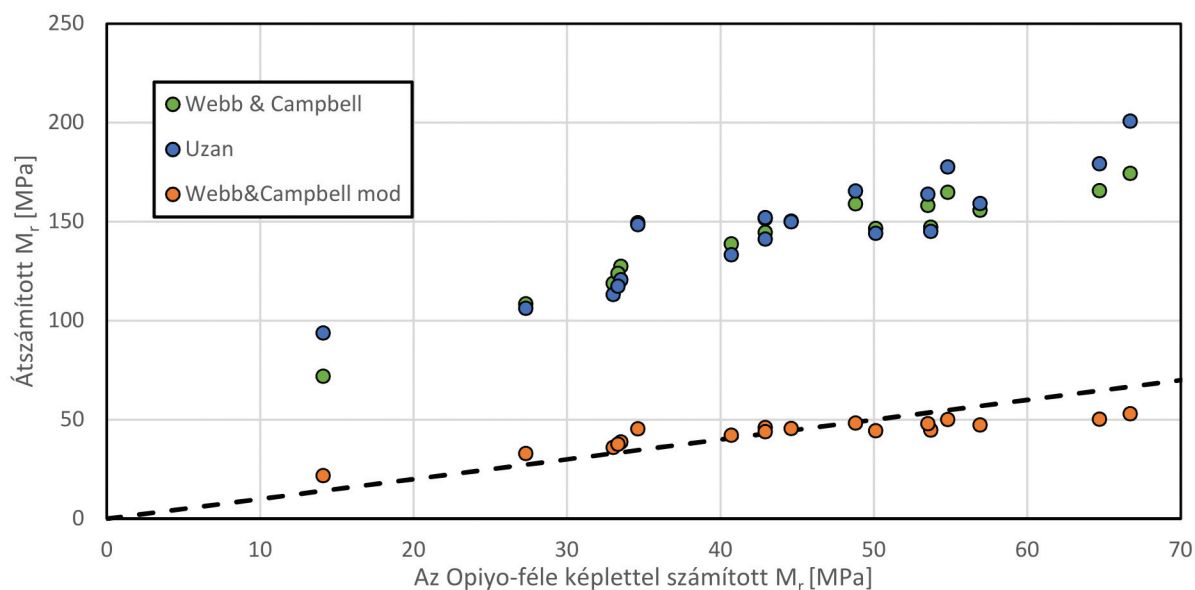
Az eredmények azt mutatják, hogy a vizsgált talajstabilizációk teherbírására nagyobb hatással volt a készítéskori víztartalom, mint a kötőanyag adagolás. Ezen felül megadható volt az optimális víztartalom, ahol a CBR, illetve az M_r értéke a legmagya-



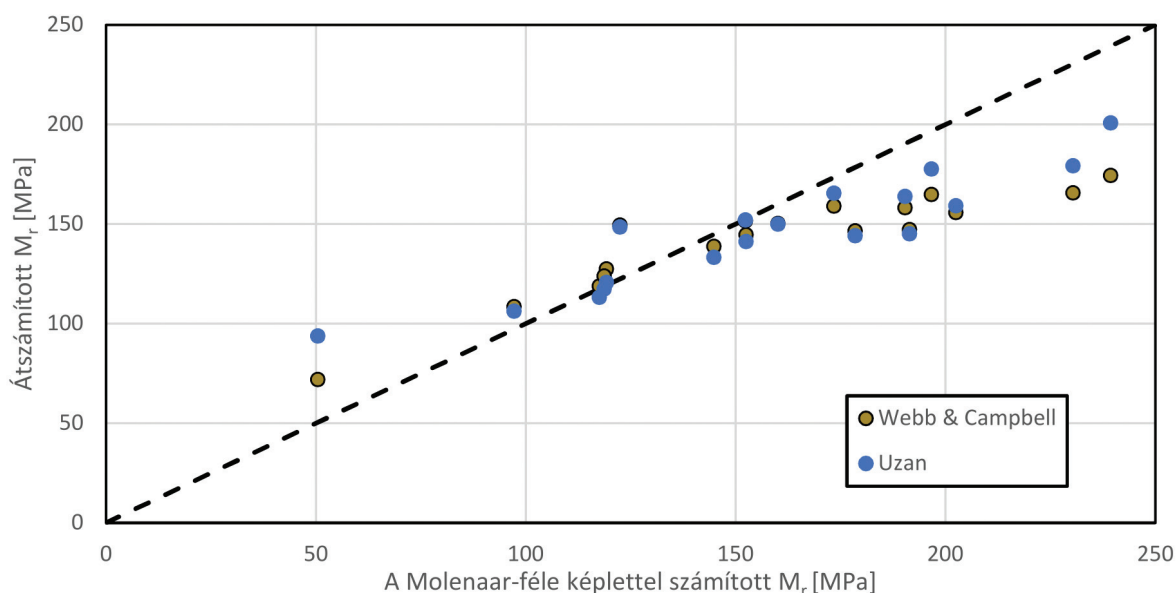
8. ábra. Összefüggés a CBR és a számított M_r értékek között kötőanyag szerinti bontásban



9. ábra. A különböző CBR átszámítási képletekkel kapott M_r -értékek összehasonlítása az *Opiyo*-féle képlettel számított értékekkel



10. ábra. A *Webb és Campbell* (1986), valamint az *Uzan* (1985) által javasolt képlettel számított M_r -értékek összehasonlítása az *Opiyo*-féle képlettel számított értékekkel



11. ábra. A *Webb és Campbell* (1986), valamint az *Uzan* (1985) által javasolt képlettel számított M_r -értékek összehasonlítása a *Molenaar*-féle képlettel számított értékekkel

sabb volt. Néhány kísérletből hosszútávú következtetéseket nem szabad levonni, ám az eredmények alapján a stabilizációk készítésénél a talaj víztartalmának optimális értéken tartása a teherbírás szempontjából fontosabb, mint a kötőanyag pontos adagolása.

A ciklikus CBR-vizsgálat ígéretes eljárásnak látszik a stabilizációk rugalmas viselkedésének meghatározására, hiszen a vizsgálat a meglévő CBR-vizsgáló berendezéssel könnyen elvégezhető, és az eredményekből a reziliens modulus számítható. *Opiyo* képletével (2) a szakirodalom alapján várt reziliens modulus értékekhez nagyságrendileg hasonló reziliens modulus értékeket számítottunk,

míg *Molenaar* képlete (3) az irodalomban fellelt $CBR-M_r$ átszámító képletek eredményével adott nagyságrendileg azonos eredményt. *Back és Szendefy* (2017) triaxiális mérésből származó reziliens modulusokkal összehasonlítva kimutatta, hogy az átszámító képletek jelentősen túlbecsülik a reziliens modulus valós értékét. Emiatt az *Opiyo*-féle képlet eredményeit a valósághoz közelebb állónak feltételezzük, és a további vizsgálatokig ennek alkalmazását javasoljuk.

A CBR értékből a 9. ábra tanúsága szerint nem számítható nagy biztonsággal a reziliens modulus értéke. A számítások azt mutatták, hogy az egyik legjobban illeszkedő modellt *Webb és Campbell*

(1986) dolgozta ki, ami összecseng a *Back és Szendefy* (2017) által bemutatott eredményekkel. Ezért a reziliens modulus durva becslésére ezt az összefüggést javasoljuk. A mérési adatok alapján a képlet eredményét a 11. ábra szerint szorozni kellene 0,3-del ahhoz, hogy a jelen kísérletben az Opiyo-féle képlettel meghatározott reziliens modulus értéket kapjuk. Ezt a módosítást azonban nem érdemes alkalmazni, hiszen az *Opiyo-féle* képletből számított reziliens modulus jóságának ellenőrzésére nem áll rendelkezésre mérési adat.

További kutatás

A ciklikus CBR-vizsgálat eredményeiből számított reziliens modulus értékek nagyságrendileg a várakozásoknak megfelelően alakultak, illetve a keverék tulajdonságainak változásával a számított modulus értékek is többé-kevésbé szabályosan változtak. Célszerűnek tartjuk a bemutatott keverékek dinamikus triaxiális vizsgálatát elvégezni annak érdekében, hogy a kétféle számítás közül ki lehessen választani a jobban használhatót, esetleg fel lehessen írni egy, az előzőeknél pontosabban illeszkedő modellt.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a „Soproni Egyetem Struktúraváltási Terve” – 32388-2/2017 INTFIN sz. projekt keretében az Emberi Erőforrások Minisztériuma támogatásával valósult meg. A tanulmányban bemutatott vizsgálatokhoz és elemzésekhez a talajt az Egererdő Zrt., a kötőanyagot a Carmeuse Hungária Kft. biztosította.

Felhasznált irodalom

- Araya A, Molenaar AAA, Houben L. A Realistic Method of Characterizing Granular Materials for Low-Cost Road Pavements. Delft University of Technology, Delft, Netherland, 2010; 10.
- Araya AA. Characterization of Unbound Granular Materials for Pavements (PhD disszertáció). Delft University of Technology, Delft, Hollandia. 2011.
- Back M, Szendefy J. Reziliens modulus mérése és talajstabilizációknál mért értéke. *Útgyilapok*. 2017. <http://utgyilapok.hu/cikkek/reziliens-modulus-merese-es-talajstabilizacioknal-mert-erteke/>
- Bandara N, Rowe GM. Design Subgrade Resilient Modulus for Florida Subgrade Soils, in: Durham GN, Marr WA, DeGroof, WL (Eds.), Resilient Modulus Testing for Pavement Components, STP. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2003; 274, <https://doi.org/10.1520/STP12524S>
- Drumm EC, Boateng-Poku Y, Johnson Pierce T. Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests. *J. Geotech. Eng.* 1990; 116:774–789. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1990\)116:5\(774](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1990)116:5(774)
- Green JL, Hall JW. Nondestructive vibratory testing of airport pavements. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss. 1975.
- Heukelom W, Klomp AJG. Dynamic testing as a means of controlling pavement during and after construction. Presented at the 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, 1962; pp. 495–510.
- Hopkins T. Minimum bearing strength of soil subgrades required to construct flexible pavements, in: Proceedings of the 4th International Conference, Bearing Capacity of Roads and Airfields. Minnesota Department of Transportation, Minneapolis, MN, USA, 1994; pp. 605–617.
- Kenya Road Design Manual, Road design manual, Part III: Materials and pavements design for new roads. Ministry of Transportation and Communications, Nairobi, Kenya. 1987.
- Molenaar AAA. Characterization of unbound base materials for roads using a new developed repeated load CBR test. Presented at the 8th International Conference on Managing Pavement Assets, Santiago de Chile, Chile. 2011.
- Mukabi JN. Review of DCP Based CBR UCS and Resilient Modulus Models for Applications in Highway and Airport Pavement Design. Acad. E-Publ. Pre-Print. 2016.
- Ohio DOT. Pavement Design Manual. The Ohio Department of Transportation, Office of Pavement Engineering, Columbus, Ohio, USA. 2008.
- Opiyo TO. A Mechanistic Approach to Laterite-based Pavements (M.Sc thesis). International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, Delft. 1995.
- Pap M, Mahler A, Tóth Cs. Klimatikus viszonyok hatása a reziliens modulusra I.: Környezeti hatások és talajjellemzők meghatározása, *Útgyilapok* 2017; 5(10):49-57.
- Pap M, Mahler A, Tóth Cs. Klimatikus viszonyok hatása a reziliens modulusra II.: Reziliens modulus meghatározása, *Útgyilapok* 2017; 5(10):58-63.
- Paterson WDL, Maree JH. An interim mechanistic procedure for the structural design pavements. National Institute for Transport and Road Research, Pretoria, South Africa, 1978.
- Primusz P, Tóth Cs. Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek egyszerűsített analitikus méretezése. *Közlekedéstudományi szemle*, 2018; 68(5):17-33. ISSN 0023-4362, <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2018.5.2>
- Powell WD, Potter JF, Mayhew HC, Nunn ME. The structural design of bituminous roads (No. LR1132). TRRL, Crowthorne, Berkshire, UK. 1984.
- Sas W, Głuchowski A. Rutting prediction for stabilized soils based on the cyclic CBR test. *Roads Bridg. Drogi Mosty* 2013; 411–423, <https://doi.org/10.7409/rabdim.013.026>
- Sas W, Głuchowski A, Szymański A. Determination of the Resilient Modulus Mr for the Lime Stabilized Clay Obtained from the Repeated Loading CBR Tests. *Ann. Wars. Univ. Life Sci. - SGGW Land Reclam.* 2012; 44. <https://doi.org/10.2478/v10060-011-0070-0>
- Uzan J. Characterization of granular material. *Transp. Res. Rec.* 1985; 1022:52–59.
- Webb WM, Campbell BE. Preliminary Investigation into Resilient Modulus Testing for New AASHTO Pavement Design Guide. Office of Materials and Research, Georgia Department of Transportation, Atlanta, GA, USA. 1986.



A fővárosi főúthálózat útburkolat-gazdálkodási rendszerének továbbfejlesztési irányai

Almássy Kornél¹, Pusztai Gábor¹, Gáspár László²

¹Budapest Közút Zrt., ² KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.

e-mail: kornel.almassy@budapestkozut.hu, gabor.pusztai@budapestkozut.hu
gaspar.laszlo@kti.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.03

Kivonat A Budapest Közút Zrt. a fővárosi főúthálózat és a közösségi közlekedéssel érintett mellékúthálózat kezelője. Ennek a tevékenységének hosszú távú hatékonyságát elősegítendő, a Társaság megbízására, a szóban forgó úthálózatra a KTI Nonprofit Kft. 2010-ben hálózati útburkolat-gazdálkodási rendszer (PMS) első változatát elkészítette. A modell alkalmazásának több éves tapasztalatait hasznosítva, a KTI Nonprofit Kft. 2018-ban továbbfejlesztési javaslatokat készített. Ezek közül, a cikk az egyes állapotparaméterek jellemzésével és az alkalmazásra javasolt rangsorolási rendszerrel kapcsolatos javaslatokra tér ki. Emellett a közeljövőben megvalósításra ajánlott feladatokat sorolja fel.

Kulcsszavak városi utak, útburkolat-gazdálkodás (PMS), útállapotvizsgálat, közúti projektek rangsorolási modellje, élettartam-költségek

The directions of the development of the pavement management system of the main road network in Budapest

Abstract Budapest Roads Limited Joint-Stock Company manages the main highway network of Budapest and the secondary roads with public traffic. In order to enhance the long-term efficiency if this task, the Company commissioned KTI Non-Profit Ltd. in 2010 to develop the first version of a network-level pavement management system (PMS) for the network mentioned before. Using the multi-year experiences gained during the application of this model, KTI Non-Profit Ltd. recommended some further development steps in 2018. The article covers the proposals on pavement condition evaluation and a new priority ranking system. Besides, some future relevant tasks are suggested, as well.

Keywords city roads, pavement management system (PMS), road condition test, road project ranking model, lifetime costs

Dr. Almássy Kornél

Egyetemi docens, BME Út és Vasútépítési Tanszék, a Budapest Közút Zrt. korábbi vezérigazgatója

Pusztai Gábor

Budapest Közút Zrt. nyilvántartási osztályvezető

Dr. habil Gáspár László

Okl. mérnök, okl. gazdasági mérnök, az MTA doktora. A Közlekedéstudományi Intézet kutató professzora, a Széchenyi István Egyetem emeritusz professzora. 430 publikációjának és 580 szakmai előadásának zöme útépítési, -fenntartási és -gazdálkodási témákkal foglalkozik. 30+ nemzetközi téma és bizottság tagja vagy vezetője (volt).

1. Bevezetés, előzmények

A Budapest Közút Zrt. már 2010 óta rendelkezik útburkolat-gazdálkodási rendszerrel (PMS-sel), amelynek első változatát, megbízásból, a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. (mérnöki változat) [1, 2] és az Universitas Alapítvány Győr Nonprofit Kft. (matematikai modell) [3] készítette el. A kidolgozók hangsúlyozták az anyag „deszka-modell” jellegét, azaz annak szükségességét, hogy a javasolt modellelemeket és algoritmusokat – az időközben szerzett gyakorlati tapasztalatok és/vagy a szakértői vélemények fokozatosan kialakuló egyezése alapján – tovább kell fejleszteni. Ennek megfelelően, a Budapest Közút Zrt. (illetve jogelődje, a BKK Közút Zrt.) a PMS-modellt rendszeresen alkalmazni kezdte, futtatásához rendszertervet készített.

A Társaságnak az általa kezelt (kb. 1300 km-nyi), illetve forgalomtechnikai szempontból kezelt (kb. 5600 km-es hosszúságú), fővárosi főúthálózatról folyamatosan részletes, geodéziai pontosságú és naprakész geoinformációs adatokra van szüksége; ezért a Budapest Közút Zrt. 2013-ban úgy döntött, hogy saját 3D adatgyűjtő és adatfeldolgozó rendszert fejleszt ki, mely biztosítja a Főváros teljes úthálózatának, illetve igény szerint a villamos- és városi vasúti pályák, a metróvonalak és aluljárók felmérését és, geodéziai pontossággal, 3D térképi adatbázisba töltését. Ez a Közúti Adatgyűjtő Rendszer (KARES) a jelenleg elérhető, legkorszerűbb ún. mobil lézer térképező technológiát alkalmazza, amelyhez a Riegl VMX-450 mobil lézerszkennert használja [4]. A mérési módszer lényege, hogy autóra/hajóra vagy más járműre szerelhető, nagy pontosságú 3D lézerszkennerekből, kamerákból, illetve precíziós, navigációs rendszerből álló műszeregyüttes a város útjain elhaladva az utakról, az épületekről és a műtárgyakról képeket és 3D (3 dimenziós) pontfelhőt készít, így azok nemcsak láthatóvá, hanem mérhetővé és elemezhetővé is válnak. Adataiból, egyebek mellett, a hosszirányú felületi egyenetlenséget jellemző IRI-értékek, illetve a keresztirányú egyenetlenség jellemző adata, a pálya keréknyomvályú-mélysége is meghatározható.

2015-től kezdve évente a társaság az az évi PMS-s futtatás eredményeiről részletes beszámolót készített [5, 6]. A Budapest Közút Zrt. a PMS továbbfejlesztése tárgyában más intézményektől (pl. a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemről [7], az Intelligens utak Mérnökiroda Kft.-től [8]) is szakvéleményt kért. Az előzményanyagokhoz számított még a KTI egy korábbi kutatási jelentése [9]. A Budapest Közút Zrt. 2018-ra, 8 évvel az első változat elkészülte után, időszerűnek ítélve – közbeszerzési eljárás lefolytatása után – a KTI Közle-

déstudományi Nonprofit Kft.-nek adott megbízást, amely, az időközben szerzett helyi és külföldi tapasztalatok és különböző szakvélemények felhasználásával, a Társaság PMS-ének tovább fejlesztésére, hatékonyságának növelésére vonatkozott [10]. A munka során a következő területekre összpontosítottak:

- a homogén szakaszok meghatározásának módszere,
- az állapotadatok értékelési rendszerének felülvizsgálata,
- a rangsorolási modell továbbfejlesztése,
- a létesítményi szintű PMS alapjainak kidolgozása,
- stratégiai szintű vizsgálatok előkészítése.
- Jelen cikk a kutatási eredmények közül egyet ismertet.

2. Az állapotadatok értékelésének felülvizsgálata

A városi utak burkolatának állapotparaméterei közül, a felületi épség (elterjedtebb elnevezésével: felületépség) az, amely a többenél kiemeltebb szerephez jut, a következők miatt:

- a felújítási igény felmerülésekor döntő (gyakran kizárólagos) szerephez jut az útpályán szemlélettel megítélhető meghibásodások (kátyúk, repedések, süllyedések, síkossá vált felületek stb.) mennyisége, amelyeket a felületi épség osztályzat összességében értékel;
- ennek elsődleges oka, hogy az említett hibák mind a gépkocsiban ülők utazáskényelmét hátrányosan befolyásolják, esetenként balesetveszélyes helyzetet teremtve, mind pedig az út kezelői számára – akár már elviselhetetlen mértékig – növekvő fenntartási költségeket okoznak;
- a felületi épséget az utakat beutazó létesítményfelelősök 1 és 5 közötti osztályzattal, vizuális alapon, évente minősítik, az értékelt hálózatrészt az általuk meghatározott hosszúságú homogén szakaszokra osztva (így tehát az állapotjellemzési eljárás viszonylag kis költségű, és szükség esetén, különösebb nehézség nélkül megismételhető).

A Budapest Közút Zrt.-nél jelenleg követett gyakorlat szerint, a felületi épség adatokat a létesítményfelelősök által rögzített állapotértékelés adja. A létesítményfelelősök olyan összetett, szakmai tapasztalatokon alapuló értékelést szolgáltatnak, amely tulajdonképpen, szubjektív módon az adott útszakasz forgalmával, kihasználtságával és egyéb nehezen számszerűsíthető paraméterekkel súlyozott minősítés.

2.1. A felületi épség jellemzés korszerűsítési lehetőségei

A Főváros főúthálózatán a burkolat felületi épségének továbbfejlesztett jellemzésére a következő lehetőségek merülnek fel:

- vizuális (szemrevételezéses) eljárás; ennek a szubjektív alapú állapotjellemezési eljárásnak a minősége (megbízhatósága) oktatással, illetve „szigorú” ellenőrzéssel javítható; esetleg az osztályzatok információtartalmának „kibővítése” (pl. 4K – jelentése „kátyúk miatt 4-es”); egy értékelési szakasz választása akár minden szomszédos csomópont között; esetleg az értékelési szakasz hosszát, például, 500 fm-ben lehetne maximálni; lehetőségként az is felmerül, hogy a létesítményfelelős által adott, 5 fokozatú felületi épség osztályzat a korábbi időszak kátyújavítási mennyiségét is tükrözze,
- gömbkamerával jellemzett burkolatállapot (ennek alapelve a közismert Google Street View-hoz hasonló), ennek során feltétlenül megoldást kell arra találni, hogy a minősítés eredménye a pillanatnyi időjárási körülményeket – például ragyogó napsütés vagy borús-esős időjárás – figyelembe tudja venni; a gömbkamerával felvett képek feldolgozását tapasztalt és lelkiismeretes szakember végezze.

Az aszfalt-, a beton- és a különböző idomkő burkolatok felületi épség jellemzési és értékelési technológiája között első szinten, nem célszerű különbséget tenni.

Míndezek után azt javasoljuk, hogy:

- hálózati szinten: a felületi épséget a KARESZ felmérés részeként készített fénykép-felvételek értékelésével jellemezzék; addig, amíg ennek az új technikának az alkalmazására a Budapest Közút Zrt. szakemberei még nem tudtak teljesen felkészülni, a jelenlegi gyakorlatot, azaz a létesítményfelelősök által végrehajtott, évenkénti vizuális (szubjektív) 1 és 5 közötti skálán történő felületi épség osztályozás folytatását javasoljuk;
- létesítményi szinten: a hálózati szinten adott osztályzat információtartalmának további növelése, esetlegesen hasznosítva a gömbkamerás és/vagy a KARESZ pont-felhőből származtatott felületi épség információkat is.

Az autóbuszöbölnek a felületi épségét, mint egyetlen célszerűen minősíthető állapotjellemezőt abban az esetben, ha az betonburkolatú – már a burkolattípus váltása miatt is –, külön önálló homogén szakaszként kell jellemezni. Amennyiben, a mellette húzódó folyópályához hasonlóan, az autóbusz-

öböl is aszfaltburkolatú, akkor is inkább az javasolható, hogy annak felületi épségét – célszerűen, a folyópályával egy időben, de – önálló homogén szakaszként minősítsék. Természetesen, amennyiben a szóban forgó folyópályára rossz állapota ezt igényli, a két burkolatot egy projekt keretében újítják fel.

További fontos kérdés annak az eldöntése, hogy valamely útszakasznak a kátyúképződési és -javítási mennyisége befolyásolja-e, és ha igen, milyen formában a létesítményfelelősök által adott felületi épség osztályzat értékét. Ebben a tekintetben két egymással ellentétes szempontot indokolt mérlegelni. Egyrészt az útpályán kátyúk megjelenése egyértelmű jele a kopóréteg (gyakran a teljes útpályaszerkezet) romló, illetve rossz minőségének. Másrészt pedig, a Budapest Közút Zrt. érvényes szabályozása szerint, a létesítményfelelős által észlelt kátyút legfeljebb 48 órán belül ki kell javítani, ebből meg az következne, hogy a létesítményfelelősök az észlelt kátyúk mennyiségét joggal hagyják ki, amikor az útszakasz felületi épség osztályzatát adják. Javaslatként itt az a kompromisszum fogalmazható meg, hogy a rövid időn (1–2 éven) belül újra nem keletkező kátyút az osztályozáskor nem szükséges figyelembe venni. Ugyanakkor pedig az ismétlődő kátyúkat – még ha azok az osztályozáskor, pillanatnyilag, kitöltött állapotúak is, és a környezetüktől eltérő színű foltként jelentkeznek – a felületi épség osztályzatot rontó tényezőként célszerű figyelembe venni. További indok lehet a kátyúk figyelembevételére, ha a szóban forgó homogén szakaszon, egy éven belül, a kitöltött kátyúk száma bizonyos mennyiséget (pl. 30 db-ot) meghalad. Nehézségként jelentkezik az ismétlődő kátyúk azonosítása. A jelenlegi gyakorlat szerint a kátyúkat az útellenőrök útszakaszokhoz rögzítve veszik fel. Egy hosszabb szakasz esetében nem egyértelmű hogy ismétlődő kátyúkról, vagy több új kátyúról van-e szó. Ezen a nehézségen a kátyúhibák pontosabb helyazonosítása segíthetne. (Megjegyzésre érdemes, hogy a kátyúk kiújulása kevésbé a nagyon rossz burkolatállapot bizonyítéka, mint inkább a nem megfelelő javítási technológia alkalmazásának és/vagy a minőségi munkához alkalmatlan időjárás melletti tevékenységnek a hátrányos következménye.)

2.2. A többi állapotparaméter vizsgálata

A Budapest Közút által meghatározott feladatok között volt a városi közúthálózat minősítések sorába jövő egyes állapotjellemező paraméterek jelentőségének átgondolása, különös tekintettel az egyes adatok mérési bizonytalanságaira. Foglalkozni kellett az állapotértékelés és a beavatkozási javaslatok esetleges forgalomfüggésének kialakításával. Majd pedig a különböző beavatkozási hatá-

rok, valamint a beavatkozások állapotértékekre gyakorolt hatásának pontosítása is a feladatok közé tartozott.

Jelenleg a Budapest Közút Zrt.-ben az egyes útszakaszok állapotát felületi épség (a kerületi létesítményfelelősök által vizuálisan), a pályaszerkezet-teherbírás (Lacroix-deflektográfákkal), valamint a hossz- és a keresztirányú felületi egyenetlenség, IRI és keréknyomvályú-mélység (KARESZ lézer pontfelhőjéből készített, terepmodellen alapuló, számított adatok) mérésével jellemzik.

A városi utak jellegzetes leromlási (tönkremeneteli) formáinak összehasonlító elemzése során arra lehet jutni, hogy a repedezés és kátyúképződés típusú romlások gyakoribbak és nagyobb jelentőségűek is, mint a deformáció jellegűek. (Természetesen, ez utóbbiak is válhatnak adott esetben mértékadókká).

Az összehasonlító vizsgálatra szóba jövő burkolat-állapot-paraméterek: felületi épség (felületépség), hosszirányú felületi egyenetlenség (IRI), keresztirányú felületi egyenetlenség (keréknyomvályú-mélység), pályaszerkezet-teherbírás, csúszásellenállás. (Az országos közutak állapotjellemezésében, különösen külföldön, egyre gyakrabban alkalmazott pálya-gördülőzaj mérése, a pálya fényvisszaverő képességének meghatározása, illetve a burkolatfelületen jelentkező vízköd-, illetve vízfüggöny-képződés jellemzése a városi utak esetében elhanyagolható jelentőségűnek ítéltető). Az állapotparaméterek jelentőségét (súlyát) a „városi szempontok” nagymértékben befolyásolják.

A folyamatos (nem pontszerű) állapotjellemezési technológiák számos előnnyel rendelkeznek, emellett azonban döntést igényelnek abban a tekintetben, hogy az irányonként egynél több forgalmi sávval rendelkező utakon a mérés mely sávokra vonatkozzék, nem felejtkezve meg az autóbusszöblök speciális állapotminősítési problémájáról sem.

A városi közúti közlekedés különlegességeinek, illetve jellegzetes tönkremeneteli formáinak figyelembevételével a burkolatállapotot jellemző paraméterek jelentősége a következőképpen ítéltető meg:

- felületi épség (kiemelt jelentőségű, az úthasználók általi minőség-megítélést elsősorban ez az állapotparaméter befolyásolja),
- pályaszerkezet-teherbírás (kiemelt jelentőségű, elsősorban az útkezelő vagyongazdálkodási kötelezettsége következtében, valamint amiatt, hogy más, esetenként közeljövőben várható burkolathiba kiváltója lehet),
- hosszirányú felületi egyenetlenség (közepes jelentőségű, fontossága a 60–70 km/órás megengedett sebességű szakaszokon és a nagy forgalmi terhelésű csomópontok előtti felgyűrődések esetében növekszik, amit az

osztályzatok értékhatárainál érvényre lehet juttatni),

- keresztirányú felületi egyenetlenség (közepes jelentőségű, utazáskényelmi nehézségeket vet fel, illetve mély nyomvályúk esetében a 60-70 km/órás megengedett sebességű közel vízszintes szakaszokon kell a vízen csúszás veszélyével számolni; ezt a tényt az osztályzatok értékhatárainál érvényre lehet juttatni),
- a pálya textúrája, csúszásellenállása (kis jelentőségű, legfeljebb – különösen síkos burkolatfelületnél – esetenként a járművek gyors megállását igénylő, forgalmi csomópontok előtti szakaszokon lehet érdemleges szerepe).

A pálya csúszásellenállásának a jellemzésére a KARESZ pontfelhő nem alkalmas. A hossz- és a keresztirányú felületi egyenetlenségről ugyanakkor képes – megfelelő, viszonylag nagy munka- és időigényű feldolgozást igénylően – hasznos információkat szolgáltatni.

A hálózati szintű állapotadatok feldolgozása után a választott beavatkozási projektek tervezett, létesítményi szintű állapotvizsgálata célszerűen csak a felületépségre terjedjen ki. Ennek pontosabb ismerete a leglényegesebb, mivel ritka eset, hogy városi úthálózaton másik állapotparaméter válik mértékadóvá (az állapotjavító beavatkozást a többiek megelőzően szükségessé tevő) paraméterre. Megjegyzésre érdemes egyébként az is, hogy a teljes pályaszerkezeti rétegeket érintő, megfelelő minőségben végrehajtott felújítás minden állapotparaméterre kedvező hatást gyakorol.

Általában elmondható, hogy az egy irányban több sávú utak esetében nincsen szükség minden forgalmi sáv állapotadatainak minden paraméter esetében való felvételére. Elegendő a (leg)külső sáv minősítése, mivel a pályaszerkezetet igazán igénybe vevő nehéz forgalom, így a menetrendszerű autóbusszok és trolibuszok is főként itt közlekednek. Elsősorban a Lacroix-mérőkocsival végzett pályaszerkezet-teherbírás az, ahol ez a megállapítás gyakorlati következményekkel járhat. (A KARESZ pontfelhő és a létesítményfelelős vizuális állapotfelvétele ne csak egyes forgalmi sávokra korlátozódjék).

Az autóbusszöblöt önálló „homogén szakasznak” kellene tekinteni, amelyről külön gyűjtenek állapotadatokat. A teherbírás mérése főleg betonburkolatú öblök esetében elhagyható. Egy-egy autóbusszöblötől szükség esetén a többivel versenyző beavatkozási projekt lehet.

Az egyes állapotparaméterekhez kapcsolódó beavatkozási határ (a még éppen „eltűrhető” állapot-szint) egyebek mellett a szakasz forgalomnagyságától is függ. Itt kiemelt szerephez juthat az út autóbussz- vagy trolibuszforgalma. Az 1. táblázatban levő három kategória javasolható.

1. táblázat. A nem kötött pályás közösségi közlekedéstől függő kategorizálás

Kategória	Leírás
1	napi 100-nál több autóbusz-trolibusz közlekedése
2	napi legfeljebb 100 autóbusz-trolibusz közlekedése
3	nem kötött pályás közösségi közlekedés nélkül

A pályaszerkezet teherbírását jellemző, Lacroix-deflektográfával mért behajlás érték javasolt, differenciált értékhatárait a 2. táblázat szemlélteti.

A 2. táblázatban szereplő értékek a megfelelő teherbírású homogén szakaszokon regisztrált behajlás értékek mm-ben kifejezett számtani átlagának felelnek meg. (Az adathalmaz szórását az osztályzatba sorolásnál általában nem javasoljuk figyelembe venni, mivel az már a homogén szakasz kijelölését befolyásolta).

A KARESZ pontfelhő adatainak feldolgozásával meghatározott, a hosszirányú felületi egyenetlen-

séget jellemző IRI-érték [4] javasolt differenciált értékhatárait a 3. táblázat szemlélteti.

Ezek az értékek a megfelelő homogén szakaszokon regisztrált IRI-értékek számtani átlagának felelnek meg. (Az adathalmaz szórását az osztályzatba sorolásnál általában nem javasoljuk figyelembe venni.)

A KARESZ pontfelhőből meghatározott, keréknyomvályú-mélységgel jellemzett keresztirányú felületi egyenetlenséget is rendszeresen meghatározni javasoljuk. Beavatkozási indok lehet:

- 5-ös keresztirányú felületi egyenetlenség (keréknyomvályú-mélység) osztályzat + 4-es teherbírás osztályzat és/vagy 4-es felületi épség osztályzat,
- az 5-ös keresztirányú felületi egyenetlenség osztályzathoz tartozó legkisebb keréknyomvályú-mélység értékét legalább 20%-kal meghaladó egyenetlenség (5+ osztályzat).

A homogén szakaszok átlagos keréknyomvályú-mélységtől függő, útosztálytól és a forgalom

2. táblázat. Teherbírás osztályzatok értékhatárai

Osztályzat	Osztályzatok behajlási értékhatárai (mm) a következő útosztályokban						
	a	b1	b2	b3	c1	c2	c3
1	-0,50	-0,70	-0,80	-0,90	-0,80	-0,90	-1,00
2	0,51-0,70	0,71-0,90	0,81-1,00	0,91-1,20	0,81-1,00	0,91-1,20	1,01-1,40
3	0,71-0,90	0,91-1,20	1,01-1,40	1,21-1,80	1,01-1,40	1,21-1,80	1,41-2,00
4	0,91-1,20	1,21-1,80	1,41-2,00	1,81-2,40	1,41-2,00	1,81-2,40	2,01-2,80
5	1,21-	1,81-	2,01-	2,41-	2,01-	2,41-	2,81-

Jelmagyarázat:

a belterületi gyorsforgalmi út

b1 belterületi elsőrendű főút – napi 100 feletti közösségi jármű közlekedésekor

b2 belterületi elsőrendű főút – napi legfeljebb 100 közösségi jármű közlekedésekor

b3 belterületi elsőrendű főút – nem kötött pályás közösségi közlekedés nélkül

c1 belterületi másodrendű főút és alacsonyabb rendű utak – napi 100 feletti közösségi jármű közlekedésekor

c2 belterületi másodrendű főút és alacsonyabb rendű utak – napi legfeljebb 100 közösségi jármű közlekedésekor

c3 belterületi másodrendű főút és alacsonyabb rendű utak – nem kötött pályás közösségi közlekedés nélkül

3. táblázat. Hosszirányú felületi egyenetlenségi osztályzatok értékhatárai

Osztályzat	Osztályzatok IRI értékhatárai (mm/m vagy m/km) a következő útosztályokban						
	a	b1	b2	b3	c1	c2	c3
1	-3,00	-4,00	-4,50	-5,00	-4,50	-5,00	-5,50
2	3,01-4,00	4,01-5,00	4,51-5,50	5,01-6,00	4,51-5,50	5,01-6,00	5,51-6,50
3	4,01-5,00	5,01-6,00	5,51-6,50	6,01-7,00	5,51-6,50	6,01-7,00	6,51-7,50
4	5,01-6,00	6,01-7,00	6,51-7,50	7,01-8,00	6,51-7,50	7,01-8,00	7,51-8,50
5	6,01-7,20	7,01-8,40	7,51-9,00	8,01-9,60	7,51-9,00	8,01-9,60	8,51-10,20
5+*	7,21-	8,41-	9,01-	9,61-	9,01-	9,61-	10,21-

Jelmagyarázat: lásd a 2. táblázat utáni jelmagyarázatot.

* 5+ az 5-ös állapotosztályzatban belül is különösen egyenetlen útpálya (már önmagában beavatkozási indok).

60 vagy 70 km/óra megengedett sebességű utak esetében a határértékek 20%-kal csökkentendők.

4. táblázat. Keresztirányú felületi egyenetlenségi osztályzatok értékhatárai

Osztályzat	Átlagos keréknyomvályú-mélység értékhatárai (mm), osztályzatonként
1	-5,00 (-4,00)
2	5,01-8,00 (4,01-6,50)
3	8,01-12,00 (6,51-9,50)
4	12,01-20,00 (9,51-16,00)
5	20,01-25,00 (16,01-20,00)
5+	25,01- (20,01-)

Zárójelben a 60 vagy 70 km/óra megengedett sebességű utakon alkalmazandó értékhatárok találhatók.

nagyságától független osztályzatba sorolás a következő (4. táblázat).

A 2-4. táblázat alsó soraiban levő értékek a 3. fejezetben leírtak szerinti esetekben a „lehetséges beavatkozási projekt” státusz elérésének indokaivá válnak.

Mind a hossz-, mind pedig a keresztirányú egyenetlenség jellemzésére a Budapest Közút Zrt. által meghatározott KARESZ pontfelhők szolgálnak. Ezeknek az állapotparamétereknek a mérésére és osztályozására a következő eljárás javasolható:

- hosszirányú felületi egyenetlenség: mindkét irányban a legkülső forgalmi sáv külső „keréknyomában” (80 cm-es távolságban a forgalmi sáv szélétől) a hosszirányú „burkolatmetszet” meghatározása 100 m-es szakaszokra – a szakaszolást a következő főút-keresztvezérségig folytatva – az IRI (m/km vagy mm/m) érték meghatározása, ebből (forgalomtól és közösségi közlekedéstől is függő) hosszirányú egyenetlenségi osztályzat kalkulálása; a homogén szakasz vége osztályzatváltáskor van; a két forgalmi irányban meghatározott IRI osztályzatok közül a rosszabbat tekintjük mértékadónak (ha a homogén szakasz 5-ös osztályzatú, akkor akár „lehetséges beavatkozási projekt” is lehet, a teherbírasi és a felületi építési osztályzat párhuzamos figyelembevétele mellett),
- keresztirányú felületi egyenetlenség: 10 folyóméterenként, a burkolat teljes felvett szélességében a keresztirányú „burkolatmetszet” meghatározása, ezekre a legnagyobb keréknyomvályú-mélység (mm) meghatározása, függetlenül attól, hogy melyik forgalmi irányú sávra esik, ebből keresztirányú egyenetlenségi osztályzat kalkulálása; a homogén szakasz vége osztályzatváltáskor van; (ha a homogén szakasz 5-ös osztályzatú, akkor akár „lehetséges beavatkozási projekt” is lehet, a teherbírasi és a felületi építési osztályzat párhuzamos figyelembevétele mellett).

A parkolósávok állapotinformációinak gyűjtésére nem feltétlenül érdemes törekedni, mivel rendkívül ritka, amikor azok mértékadóvá válnak, azaz a szomszédos forgalmi sávnál rosszabb állapotba kerülnek. (Egyébként az ott parkoló járművek gyakran az állapotjellemzés gyakorlati akadályává is válnak).

A Budapest Közút Zrt. által kezelt fővárosi közutak jelentős része kettőnél több sávós, gyakori az az eset, amikor egy irányban egynél több forgalmi sávon bonyolódik le a forgalom (akár többletként még parkolósávok is előfordulhatnak). Bár a felületi épség pillanatnyi szintjének jellemzése a követett gyakorlat szerint a létesítményfelelősöknek az egész útpályára kiterjedő vizuális értékelésén alapul, mégis indokolt az egyes sávoknak az állapotértékelési rendszerben való szerepét bizonyos mértékig egymástól megkülönböztetni a következőképpen:

- a (leg)külső forgalmi sávnak a pillanatnyi állapotára célszerű összpontosítani (ez igaz nem csupán a felületi épség jellemzésekor, hanem a teherbírasi mérésekor, illetve a KARESZ pontfelhőből meghatározott hossz- és keresztirányú egyenetlenségek felvételekor is), mivel általában azok nehéz forgalmi terhelése (mint az autóbusz- és a trolibuszforgalom) a legnagyobb, sőt több személygépkocsi is közlekedik rajtuk – a „jobbra tarts” kötelezettség sokak általi figyelembevétele következtében;
- a belső forgalmi sávok állapota meglehetősen ritkán válik mértékadóvá, legfeljebb akkor, ha ott – esetleg közművekkel összefüggő – helyi meghibásodások észlelhetők (ezekről természetesen a létesítményfelelősök az útszakaszok bejárásakor könnyen tájékozódhatnak);
- a parkolósávok helyzete mindenképpen különleges; egyrészt a nagyrészt statikus jármű-terhelésük következtében, másrészt a pillanatnyi állapotuk jellemzésének gyakori akadályoztatásából kifolyólag (ott parkoló járművek!); meglehetősen ritka eset, hogy a parkolósávok súlyosabb burkolatromlásokat mutatnak, mint az azokkal egyidőben épült, szomszédos forgalmi sávok.

3. A rangsorolási modell

3.1 Eddigi gyakorlat

A Társaság 2018. június 1-én kiadott, „Jelentés a burkolat-gazdálkodási rendszer 2018. évi futtatásának eredményeiről” tárgyú anyagában [6], az Általános felújítási rangsoron kívül a Forgalom alapú, az Állapot alapú és a Gazdasági alapú felújítási rangsort is megjeleníti térképen.

Az egyes szóba jövő projektek rangsorolásának alapját a gazdasági, a forgalmi és az állapot szempontok, illetve az ezekből képzett tervezési célok képezik. Minden célhoz mérőszám (ún. indikátor) rendelhető, amelynek alapján a változatok sorrendbe állíthatók. Minden változatot 10 pontos skálán osztályoznak, ahol a 10-es jelenti a legjobb helyzetet. Ezután a három cél egymáshoz való viszonyát kell meghatározni, azaz súlyozással összegezik azokat. A célok fontossága sok esetben már nem műszaki kérdés, ezért ebben az esetben többfajta súlyozás is vizsgálendő.

Az állapot szerinti rangsoroláshoz a Budapest Közút Zrt. által megrendelt kátyúzási felületeket használták fel. Az utolsó három évben elszámolt kátyúk összegzett területét az egyes szakaszok burkolatfelületének %-ában fejezték ki.

A gazdaságossági értékelésnél azt veszik figyelembe, hogy az el nem végzett beavatkozások a későbbiekben milyen többletköltségeket okoznának. A hosszú távú modell adatai alapján az is meghatározható, hogy egy most el nem végzett kifelületű beavatkozás 5, 10, illetve 15 év múlva milyen beavatkozási igényhez vezet, és a javasolt költségek különbsége megadja az okozott többletköltséget. A számításhoz az 5 év múlva keletkező többletköltséget 0,6-os, a 10 év múlva keletkező többletköltséget pedig 0,4-es arányszorzóval veszik figyelembe. Az összehasonlíthatóság érdekében az egyes útszakaszokra kapott többletköltségeket egységnyi felületre számolták át.

A harmadik szóba jövő, súlyozási szempont az utakon áthaladó forgalom nagyság. Ekkor az utakat az Átlagos Napi Forgalmuk (ÁNF) alapján rangsorolják, 0 és 50 000 E/nap forgalom nagyságok között lineáris osztályozással.

Ezután az említett három rangsort arányosítottan összegezik. Mivel az arányok meghatározása nem kizárólag műszaki feladat, az 5. táblázatban foglaltak szerint többféle javaslattal is éltek.

5. táblázat A három féle rangsorolási szempont súlyozási lehetőségei

Prioritás	Állapot szempont	Gazdasági szempont	Forgalmi szempont
Nincs (általános)	0,4	0,4	0,3
Állapot	0,6	0,2	0,2
Gazdaság	0,3	0,5	0,2
Forgalom	0,3	0,2	0,5

Jelenleg tehát az egymással versenyző beavatkozási projektek rangsorolásakor a következő tényezőket veszik figyelembe: a legutóbbi, valamint az 5 és 10 évre előre becsült felületi épség osztályzat; a legutóbbi, valamint az 5 és a 10 évre előre becsült

behajlásérték (mm); a legutóbbi, valamint az 5 és a 10 évre előre becsült teherbírási osztályzat; a legutóbbi, valamint az 5 és a 10 évre előre becsült, hosszirányú felületi egyenetlenséget jellemző IRI-érték (mm/m); a legutóbbi, valamint az 5 és a 10 évre előre becsült hosszirányú felületi egyenetlenségi osztályzat; a legutóbbi felújítás éve; a legutóbbi felújításkor újonnan elterített aszfalttréteg(ek) vastagsága (cm); a szakasz egyes geometriai jellemzői (hossza m-ben; felülete m²-ben; szegélyek hossza fm-ben); forgalmi paraméterek (F100 a 100 kN-os egységtengelyek ismétlődési számában; ÁNF E/nap-ban; terhelési osztály).

3.2. Javasolt rangsorolás

A burkolatfelújítási projektek rangsorolásának teljes folyamatára tehát a következő javaslattal élünk:

- az úthálózat egészének forgalomfelvétele és állapotjellemezése (felületi épség, pályaszerkezet-teherbírás, hossz- és keresztirányú felületi egyenetlenség),
- az említett szempontok szerint, előírt algoritmusok alapján homogén szakaszok meghatározása,
- a homogén szakaszok – meghatározott algoritmusok szerint végzett – kombinálása „lehetséges beavatkozási projekt”-ekbe (a szomszédos „kombinált” homogén szakasszal történő összevonás lehetőségének megvizsgálása),
- a „lehetséges beavatkozási projekt”-ek körének – algoritmusok segítségével – a „szükséges beavatkozási projekt”-ek körére történő szűkítése,
- minden „szükséges beavatkozási projekt”-hez (megfelelő algoritmusok segítségével hívásával) az „optimális beavatkozási technológia” kiválasztása (a legkisebb technológiai hossz és a homogén szakasz hosszának összevetése),
- „szükséges beavatkozási projekt”-ek (közelítő) beavatkozási költségének számítása (a geometriai adatok, a közművekkel kapcsolatos jellemzők és előzetesen rögzített egységárak alapján),
- „szükséges beavatkozási projekt”-ek rangsorolási tényezőinek (a pillanatnyi és a jövőben várható állapotadatok, a legutóbbi burkolatfelújítás jellemzői, geometriai paraméterek, forgalmi jellemzők) meghatározása,
- a „szükséges beavatkozási projekt”-ek háromféle (állapot, gazdasági és forgalmi) szempont szerinti jellemezése, megfelelő 10 fokozatú indikátor meghatározásával,
- a projektenkénti három indikátor előzetes megállapodás szerinti súlyozása (ún. sürgősségi paraméter meghatározása),

- a „szükséges beavatkozási projekt”-ek rangsorba állítása, sürgősségi paraméterük szerint,
- ez a projektrangsor szolgál a döntéshozók döntéseinek támogatására,
- döntés a felújítási projektekről,
- a felújítási projektek létesítményi szintű, részletesebb pályaszerkezet- és állapotjellemzése,
- a létesítményi szintű adatok tervezői adatszolgáltatásként szolgálnak.

Egyértelműen támogatandó, hogy a rangsorolási módszertan változatlanul műszaki-gazdasági (kisebb mértékig környezetvédelmi) szempontokon alapuljon – a „politikai” szempontok teljes kizárásával. (Környezeti szempont lehet azon burkolatfelújítási technológiák előtérbe helyezése, amelyek ipari melléktermékeket hasznosítanak és/vagy bontott építési anyagok újra való hasznosítását irányozzák elő.) Tekintettel arra, hogy az elsőbbségi sorolású beavatkozási projektlista „csupán” döntéstámogató (döntést előkészítő) anyag, a döntéshozókra célszerű hagyni minden olyan szempont érvényesítését, ami a műszaki, gazdasági, környezetvédelmi vonatkozásokon kívül esik.

Középtávon javasoljuk, hogy a rangsorolás az élettartam költségek alapján történjen. Javasoljuk, hogy minden „szükséges beavatkozási projekt” (a továbbiakban: projekt) esetében a „beavatkozás melletti, egész élettartam alatt jelentkező költséget, $\dot{E}K_b$ ” határozzák meg. Ehhez szükséges: a vizsgálati időszak (például 25 év), az állapotparaméterek leromlási görbéi, az éves bontású „fenntartási naptár”, a fenntartási-felújítási tevékenységek egységára, esetleg a változó burkolatállapot szerint számított úthasználói költségek, a későbbi években felmerülő költségek első évre történő diszkontálásához szükséges diszkonttényező.

Hasonló számításra van szükség annak az esetnek a feltételezése mellett is, hogy a szakaszon egyáltalán nem végeznek felújítási jellegű állapotjavító beavatkozást; így kapható a „beavatkozás nélküli, egész élettartam alatt jelentkező költséget, $\dot{E}K_{bn}$ ”.

A beavatkozási projektek rangsorolása a növekvő $\dot{E}K_b/\dot{E}K_{bn}$ sorrenden alapul. Az előzetesen számított beavatkozási költségek és a Budapest Közút Zrt. számára útfelújításra rendelkezésre álló pénzeszög szabja meg, hogy az útkezelő mely projektek mevalósítását javasolja.

$$\dot{E}K_b = K_\epsilon + \sum_{i=1}^n [(K_{ib} + K_{üb} + K_{úb})(1-d)^{i-1}]$$

$$\dot{E}K_{bn} = \sum_{i=1}^n [(K_{ibn} + K_{übn} + K_{úbn})(1-d)^{i-1}]$$

ahol

$\dot{E}K_{bn}$ beavatkozás nélküli, egész élettartam alatt jelentkező költség (Ft),

$\dot{E}K_b$ beavatkozás melletti, egész élettartam alatt jelentkező költség (Ft),

K_ϵ a beavatkozás (felújítás) 1. évi költsége (Ft),

i a folyó év sorszáma (1 és n között),

n a vizsgálat időtartama (év), jellemzően 20 vagy 25 év,

K_{ib} beavatkozás melletti fenntartási költség az i -edik évben (Ft),

$K_{üb}$ beavatkozás melletti üzemeltetési költség az i -edik évben (Ft),

$K_{úb}$ beavatkozás melletti úthasználói költség az i -edik évben (Ft),

K_{ibn} beavatkozás nélküli fenntartási költség az i -edik évben (Ft),

$K_{übn}$ beavatkozás nélküli üzemeltetési költség az i -edik évben (Ft),

$K_{úbn}$ beavatkozás nélküli úthasználói költség az i -edik évben (Ft),

d diszkonttényező (jellemzően 0,03–0,05, ami 3–5%-os alakban is kifejezhető).

Az egyes „lehetséges beavatkozási projektek” rangsorolásakor az út alatti közművezetékeknek is jelentős szerepe lehet:

- már a pillanatnyi burkolatállapotot is befolyásolhatja a közelmúlt tervezett vagy havária jellegű meghibásodásra reagáló közműfelújításait követő burkolathelyreállítás (ez utóbbi tevékenység tapasztalat szerint gyakran az elvártnál rosszabb minőségű is lehet, és így rövid idő alatt kialakuló lokális burkolathibák okozója lehet),
- a burkolat alatt húzódó közművezetékeknek nemcsak a helye és típusa lényeges információ, hanem a kora, illetve minősége is (ezekhez az információkhoz a közműtulajdonosok szolgálhatnak forrásul, az e-közmű rendszerre vonatkozó adatokat nem tartalmaz, adott esetben, a szóban forgó útszakaszon vagy annak közvetlen környékén a közelmúltban tapasztalt közműhaváriák is ez irányú útmutatást adhatnak),
- előregedett és/vagy bizonyítottan rossz állapotú közművek cseréjét a tervezett burkolatfelújítással együtt célszerű végrehajtani, ami költség- és kivitelezési időtartam-növekedéssel, ugyanakkor bonyolultabb építésszervezéssel jár; mindezek pedig a szóban forgó útszakasz beavatkozási rangsorolását befolyásolhatják (még abban az esetben is, ha a burkolat és a közművek felújításának finanszírozása nem ugyanazt a vállalatot terheli).

Jelenleg a „végleges” projektrangsor kialakításához, ahogyan arról már korábban szó volt, a projektek Forgalmi, Gazdasági és Állapot indikátorait súlyozva összegezik. A súlyszámokra a Nyilvántartási Osztály a korábbi V. táblázat szerinti négy variációs lehetőségét munkált ki. Ezek közül – az út-

használókat legnagyobb mértékben sújtó rossz burkolatállapot hangsúlyozásának szándékával – a leginkább támogatható a következő:

- az állapot szempont súlyszáma 0,6,
- a gazdasági szempont súlyszáma 0,2,
- a forgalmi szempont súlyszáma 0,2.

További vizsgálattal ezek a súlyszámok esetleg módosíthatók lehetnének, de inkább azt javasoljuk, hogy addig azok maradjanak változatlanok, amíg az egész élettartam alatti költségek számításán alapuló rangsorolási módszer alkalmazására megfelelő inputok birtokában fel nem lehet készülni.

4 Néhány további feladat

A közeljövőben még a következő PMS fejlesztési feladatok végrehajtása jöhet számításba:

- etalonszakaszok kijelölésének elve, valamint rendszeres állapot- és forgalomvizsgálatok módszertana,
- az említett elvet követve, konkrét etalonszakaszok kijelölése, majd rendszeres állapotvizsgálatok elkezdése,
- módszer kidolgozása a hálózaton végzett (végzendő) különböző burkolat-felújítási technológiák tényleges állapotjavítási mértékének felmérésére,
- a fővárosi főúthálózat alatti közműhálózat lehető legpontosabb mennyiségi és minőségi információinak összegyűjtése,
- a hiányzó pályaszerkezet-felépítési adatok roncsolásos vagy roncsolás mentes mérési technikával történő beszerzése [11],
- a KARESZ pontfelhő, illetve a kapcsolódó fényképfelvételek PMS céljaira való használhatóságának kiterjesztése,
- az útpálya repedezettségén alapuló beavatkozási határ kimunkálása,
- a rangsorolási modell költség/haszon elemzésen alapulóvá alakítása,
- a burkolatfelújítások független minőségbiztosítási (főleg minőségellenőrzési) rendszerének kialakítása,
- az útpálya létesítményfelelősök által végzett felületi épség vizsgálatának (1 és 5 közötti osztályzatok adásának) megbízhatóság-javítá-

tására oktatási és ellenőrzési rendszer kialakítása,

- burkolatfelújítási (és -építési) munkák kivitelezői által végzett tevékenységről olyan adatbank létrehozása, amely az elkészült projektek tényleges leromlási jellemzőiről is tartalmaz – a megbízó által a későbbi kivitelezési tenderek elbírálásakor is hasznosítható – információkat,
- a helyi közmű-meghibásodások utáni burkolat helyreállítás technológiájára és minőségi követelményeire útmutató készítése, kitérve az ellenőrzés és az esetleges szankcionálás (bírságolás) kérdéseire.

Irodalom

- [1] Dr. Gáspár László (KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.): Burkolatgazdálkodási rendszer (PMS) bevezetésére vonatkozó szakértői javaslat elkészítése és a bevezetési folyamat szakmai támogatása. 2010; 70.
- [2] Dr. Gáspár László (KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.): PMS I. mérnöki változatának validálása és továbbfejlesztése. Kutatási zárójelentés. Témaszám: 2161-117-2-0. 2010; 198.
- [3] Dr. Bakó András, dr. Ambrusné Somogyi Kornélia (Universitas Alapítvány Győr Nonprofit Kft.): PMS Matematikai Modelljének elkészítése és tovább fejlesztésének előkészítése. 2010; 63.
- [4] Almássy Gábor (BME), Németh Márk (Budapest Közút Zrt.): Útburkolat egyenletlenségmérési eljárások a KARESZ pontfelhő alapján, *Az Aszfalt* 2014; 2:22.
- [5] Budapest Közút: Beszámoló a 2015. évi Futtatás eredményeiről, 2016; 45.
- [6] Budapest Közút: Beszámoló a 2018. évi Futtatás eredményeiről, 2018; 29.
- [7] Soós Zoltán, Igazvölgyi Zsuzsanna (BME): Vélemény a „Projektbeszámoló KTI PMS modelljének adaptálása a BKK Közút rendszerébe, és a továbbfejlesztési irányok meghatározása c. projektről”, 2015; 4.
- [8] Dr. Ambrus Kálmán (Intelligens utak Mérnökiroda Kft.): Budapest Közút Zrt. PMS rendszer továbbfejlesztése, tanulmány, 2015; 66.
- [9] Dr. Gáspár László (KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft.): A forgalom áramlásának vizsgálata, 2012; 134.
- [10] Dr. Gáspár László (témafelelős): „Budapest Közút Zrt. Burkolatgazdálkodási rendszerének felülvizsgálata és továbbfejlesztése”. A KTI Nonprofit Kft. 18SZ00292 sz. témájának zárójelentése, 2018; 82.
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Ground-penetrating_radar



Aktualitások az útépitésben hasznosítható másodlagos nyersanyagok területén

Udvardi Bella¹, Géber Róbert¹, Kocserha István¹

¹ Kerámia- és Polimermérnöki Intézet

e-mail: ubella07@gmail.com; robert.geber@uni-miskolc.hu; istvan.kocserha@uni-miskolc.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.04

Kivonat Az útépitési technológiában a legelterjedtebben használt anyag az aszfaltbeton, amelynek előállításához nélkülözhetetlen alapanyagok a primer kőzetek. A folyamatos építőipari célú felhasználásnak köszönhetően a természetes ásványi anyagok mennyisége világszerte kimerülőben van. Magyarország természetföldrajzi adottságaiból fakadóan jó minőségű ásványvagyonnal rendelkezik, azonban néhány évtized múlva az ásványkincsek kitermelése gondot okozhat, esetleg a készletek kimerüléséhez vezethet. Mindezen okok miatt megnőtt az igény olyan potenciális anyagok keresésére, amelyek segítségével az ásványi nyersanyagok részben vagy teljes egészében helyettesíthetők. Ilyen anyagok lehetnek a különböző ipari folyamatok során keletkező másodlagos nyersanyagok. Jelen cikk célja az aktuális trendek, kutatási eredmények összefoglaló bemutatása.

Kulcsszavak másodlagos nyersanyagok, meddő, pernye, salak, építési és bontási hulladék

Current issues in recoverability of secondary raw materials used for road construction

Abstract Asphalt concretes, essentially produced from primary rocks, are the most widespread used materials in road construction. As a result of continuous use for construction purposes, the quantity of natural raw minerals are worldwide exhausting. Hungary, due to its geographical conditions, is rich in these good quality raw materials, however the extraction of minerals may cause the exhausting of the resources after a few decades. Therefore, the demand for searching potential materials to substitute mineral resources was grown. Secondary raw materials from different industrial processes may be a kind of these materials. The aim of this study is to present a summary of current research trends and results.

Keywords secondary raw materials, tailings, fly ash, slag, construction and demolition

Udvardi Bella

Miskolci Egyetem, Kerámia- és Polimermérnöki Intézet, PhD-hallgató. Okleveles anyagmérnök. Kutatási terület: építőanyagok

Dr. Géber Róbert

Miskolci Egyetem, Kerámia- és Polimermérnöki Intézet, egyetemi adjunktus. Okleveles anyagmérnök. Kutatási terület: építőanyagok, reológia

Dr. Kocserha István

Miskolci Egyetem, Kerámia- és Polimermérnöki Intézet, intézetigazgató, egyetemi docens. Okleveles gépészmérnök. Kutatási terület: hagyományos- és műszaki kerámiák, építőanyagok

1. Bevezetés

A fogyasztói társadalom és a szükségletek folyamatos kielégítése következtében nagy mennyiségű hulladék termelődik a gazdaság különböző ágazataiban. Az ipari gyártási folyamatok során keletkező maradványok elhelyezése jellemzően hulladéklerakóban történik, azonban a deponálás – ezen anyagok nagy mennyiségben történő folyamatos termelődése miatt – nem jelent végleges megoldást, valamint gazdasági és környezetvédelmi szempontból sem előnyös.

Az útépitési technológia megfelelő potenciállal rendelkezik ahhoz, hogy az ipari különböző melléktermékek hasznosíthatók legyenek. Az utóbbi években a fenntarthatóság fontos szerepet tölt be a társadalmi életben, ezáltal az útpályaszerkezetek építése során is a környezetbarát gyártási folyamatokra törekednek. Sok esetben központi szerepet tulajdonítanak a magas újrahasznosítási aránynak, ezzel ügyelve a karbon lábnyom minimalizálására. Ennek következtében számos kutatás [1-4] foglalkozik különböző melléktermékek útépitésben történő újrahasznosíthatóságával. Magyar szakemberek közreműködésével a 2000-es évek első felében egy hiánypótló mű is elkészült az útépitésben hasznosítható másodlagos nyersanyagokkal kapcsolatosan [5]. Az azóta eltelt 14 évben a technológiai fejlődésnek köszönhetően új kutatási eredmények születtek a különböző másodlagos nyersanyagok, illetve hulladékok útépitésben történő alkalmazásának témakörében. Éppen ezért a téma aktualitása miatt a Szerzők célszerűnek látják összefoglalni, ismertetni a legújabb kutatási eredményeket, ismereteket.

Közismert, hogy az aszfaltkeverék két fő összetevője a köváz és az a kötőanyag, amely biztosítja a közetszemcsék teljes egészében történő bevonását, illetve a felületükhöz történő tapadást. Az aszfaltkeverékek készítéséhez szükséges primer közetek helyettesítése lehetséges különböző újrahasznosított anyagokkal. Ugyanakkor további kutatások kérdése az, hogy ezeket az alternatív anyagokat hogyan és milyen arányban lehetne kombinálni

egymással úgy, hogy képesek legyenek biztosítani az elvárt minőségi követelményeket.

Ahhoz, hogy a keletkezett hulladékok felhasználhatók legyenek útépitési területen, a belőlük készített aszfaltoknak hasonló, esetleg jobb minőségi tulajdonságokkal kell bírniuk a hagyományos utaknál. Néhány fontos elvárás, amelynek eleget kellene tenniük:

- elegendő mennyiségű anyag rendelkezésre állása;
- megfelelő hulladékkezelési és hasznosítási eljárás létrehozása;
- hasonló vagy jobb teljesítményű pályaszerkezet építése a hagyományos utaknál.

Fontos megjegyezni, hogy azon ipari melléktermékek hasznosítása gazdaságos, amely nem vagy alig igényel előkészítési eljárást. Mindemellett az újrahasznosítani kívánt anyagoknak szabványos minőségi követelményeknek és környezetvédelmi előírásoknak is eleget kell tenniük. A következő fejezetekben bemutatásra kerülő tudományos eredmények megerősítik, hogy a számos hulladék anyag alkalmazása jó, illetve sok esetben még jobb eredményeket produkál a természetes ásványi anyagoknál.

2. Másodlagos nyersanyagok az útépitésben

Ebben a fejezetben a másodlagos anyagok négy nagy csoportját mutatjuk be (*bányászati meddő, erőműi pernye, kohászati salak, építési-és bontási anyagok*). Ezek közül a leginkább ismert az erőműi pernye, amellyel a szakirodalom már széles körben foglalkozott. Az 1. táblázat definíció szerint ismerteti az egyes típusokat.

A 2. táblázat a rendelkezésre álló szakirodalmi források ismereteit összegyűjtve mutatja be a különböző másodlagos nyersanyagok útépitési célra történő alkalmazásainak aktuális eredményeit. Megfigyelhető, hogy az erőműi pernyét az útépitő ipar számos területén alkalmazták már. Ezen kívül elterjedten alkalmazott a melléktermékként keletkező kohászati salak is (3. táblázat).

1. táblázat Másodlagos nyersanyagok fajtái definíció szerint [5-9]

Bányászati meddők	Erőműi pernye	Kohászati salakok	Építési és bontási hulladékok
Az ásványi nyersanyagok bányászata és előkészítése során nagy mennyiségű meddő, illetve maradék anyag keletkezik, melyek nem vagy csak minimális mennyiségben tartalmazzák az elsődleges termelési célként megjelölt anyagot.	Az erőműi pernye a szén elégetésekor keletkező heterogén, por-szerű, túlnyomó részt amorf (üveges) maradék anyag.	A kohászati salakok (ipari közet) a fém olvasztása során az érc meddő alkotórészeinek, illetve a fémolvadékból eltávolítandó nemkívánatos olyan vegyületek, melyek folyékony állapotban keletkeznek, majd lehűlve megdermednek.	Az építési hulladék körébe tartozik az épületek és az építmények létesítése, felújítása, illetve bontása folyamán keletkező szilárd hulladékok összessége. Ide sorolják a kitermelt földet, az épületek és építmények bontási törmelékét, ide tartozik az útbontási törmelék, valamint az építési munkahelyi hulladék (fa, papír, műanyagok, fémek stb.) is.

2. táblázat. Útépitésben újrahasznosított anyagok

Újrahasznosított anyagfajta		Földműalap			Földmű		Útpályaszerkezeti réteg			
		Tömörített altalaj	Földmű- alapozási réteg	Szívárgó réteg	Töltéstest	Földmű felsőrész	Burkolat- alap réteg	Aszfalt alapréteg	Aszfalt kötőréteg	Aszfalt kopóréteg
Bányászati meddő	Rézbányászati meddő	–	–	–	–	–	[10]	[10]	–	–
	Magnetit	–	–	–	–	–	[11]	–	–	[12]
	Olajfúrásból származó tisztí- tott meddő	–	–	–	–	–	–	–	[13]	–
Erőműi pernye		[14]	[14, 15]	[16]	[14, 17, 18]	–	[19–23]	–	[24, 25]	–
Kohászati salakok	Elektroacélműi salak	–	–	–	–	–	[10, 26]	[10, 33]	–	[27]
	Alumínium salak	–	–	–	[28]	–	–	–	–	[29]
Építési, bontási hulladék	Téglaőrlemény	[30]	[15]	–	–	–	–	[31]	–	[32]
	Bontott beton	–	–	–	–	–	–	[33]	[34]	–
	Visszanyert martszifalt	–	–	–	–	–	–	–	[35]	[36, 37]
	Üveg	[38]	–	–	–	–	–	[39]	–	[40]

2.1. Erőműi pernye alkalmazása útépitési területen

A pernye puccolános tulajdonságokkal rendelkező, általában a cementnél finomabb szemcséket tartalmazó anyag. A pernyét vízzel keverve önmagában nem, viszont a kalcium-hidroxid jelenlétében hidraulikusan megszilárdul, azaz megköt. A pernyék puccolános tulajdonságait (aktivitását) a kémiai és fizikai sajátosságai határozzák meg, amelyek a következők:

- a pernyeszemcsék morfológiája,
- fajlagos felülete,
- szemcseméret-eloszlása, illetve
- a fázisösszetétele.

A puccolános aktivitása szerint (reakcióképesség szempontjából) a pernyében lévő SiO_2 és Al_2O_3 mennyisége a mérvadó, de ez nem azonos a teljes SiO_2 - Al_2O_3 tartalommal. A pernye puccolános aktivitása nő, ha minél több reakcióképes SiO_2 - Al_2O_3 tartalommal rendelkezik az adott anyag. Morfológiai szempontból nagyrészt gömbölyű szemcsékkel rendelkezik. A szakirodalom alapján megkülönböztetnek savanyú (F-típusú) és bázikus pernyét (C-típusú) [1, 25]. A savanyú pernye 45–60% SiO_2 -ot, míg kevesebb, mint 15% CaO -ot tartalmaz, melyből az aktív mésztartalom nem haladhatja meg a 10%-ot. A bázikus pernyék mindössze 20–25% SiO_2 -tartalommal bírnak, emellett 30–40% CaO -dal rendelkeznek, melyből az aktív mésztartalom több lehet 10%-nál [8, 41, 42].

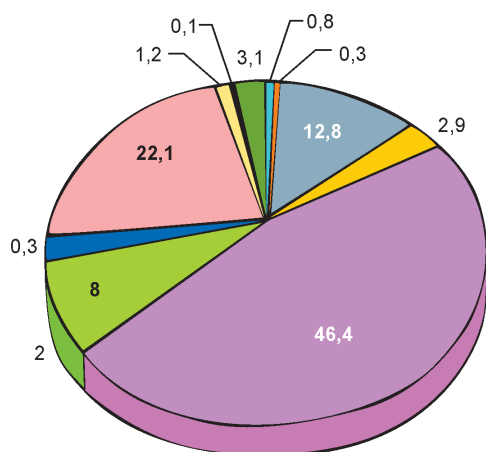
Az erőműi pernyének számos potenciális felhasználási területei léteznek. Alkalmazásának lehetséges területeit négy fő kategóriába sorolják:

- építőanyagok (*cement, beton, kerámia, üveg*),
- geotechnikai alkalmazások (*útburkolatok, töltések*),
- „mezőgazdasági” terület (*talajstabilizáció*),
- egyéb (*szorbens, iszapkezelés*) [30].

Ahogy az 1. ábra is szemlélteti, a pernyét útépitési anyagként már számos célra alkalmazták. Megfigyelhető, hogy a pernye alkalmazási területeinek több, mint 50%-át az útépitő ipar fedi le. Szakirodalmi adatok szerint a pernyét már alkalmazták az útépitőiparban töltésstabilizáló anyagként, alapréteg alapanyagként, töltőanyagként, illetve bitumenes burkolatok anyagaként egyaránt. Az útpályaszerkezetek alkalmazásánál az esőzések során a pernye belsejébe a víz nem tud behatolni, ezáltal a nehéz fémek kioldódása nem okoz problémát. A pernye útépitési anyagként történő alkalmazása esetében az útburkolatok költségeit jelentős mértékben lehetne csökkenteni [44]. *Mohammadinia* munkatársaival [15] a pernyét különböző arányban használták zúzott téglával és visszanyert aszfalttal együtt újrahasznosított aszfaltburkolat stabilizálásához alsó teherhordó burkolat alapjaként. A próbatesteken nyomószilárdságot és rugalmassági modulust határoztak meg (*7 napos korban*). Az eredmények alapján a pernyével stabilizált zúzott téglából és visszanyert aszfaltból

3. táblázat. Másodlagos anyagok alkalmazása útépitési anyagként

Szerzők	Felhasznált anyag	Szemcseméret	Elért eredmény
Wu et al.	nikkelsalak	$d < 80 \mu\text{m}$	3 napos korban: $R_{m,\min} = 6,9 \text{ MPa}$, $R_{m,\max} = 21,9 \text{ MPa}$; 28 napos korban: $R_{m,\min} = 14,5 \text{ MPa}$ $R_{m,\max} = 52,4 \text{ MPa}$
Mohammadinia et al.	pernye	$d_{50} < 30 \mu\text{m}$	A szilárdsági tulajdonságok legfeljebb 15 m/m%-ban hozzáadott pernyével növelhetők (>15 m/m% szilárdságcsökkenést eredményez)
	zúzott téglá	$d_{50} < 600 \mu\text{m}$	
	visszanyert aszfalt	$d_{50} < 400 \mu\text{m}$	
Sobolev et al.	pernye (F típusú)	$d < 74 \mu\text{m}$	Keverék teljesítménye \uparrow . A pernyeszemcsék a dinamikus terhelések hatására kialakuló repedéseket elzárták.
Xu et al.	erőműi pernye	$d = 0,76\text{--}61,61 \mu\text{m}$	A pernyével készített aszfaltkeverék Marshall-stabilitása és nyomvályúsodással szembeni ellenállása \downarrow
	mészkeőliszt	$d = 4,71\text{--}179,7 \mu\text{m}$	
Likitlersuang et al.	cement	$d_{50} < 11 \mu\text{m}$	A keverék merevségi modulusa \uparrow
	lignittüzelésből származó pernye (C típusú)	$d_{50} < 19 \mu\text{m}$	
Gómez-Meijide et al.	építési és bontási hulladék	12/24 mm	A keveréknek magasabb a hézagterfoga. Bitumenigény \uparrow
		6/12 mm	
Arabani et al.	dácit	$d = 0,074\text{--}19 \text{ mm}$	Mechanikai tulajdonságok \downarrow , Marshall-stabilitás \uparrow
	acélgyártási salak		
	visszanyert beton (Recycled concrete aggregate, RCA)		
Tao et al.	acélgyártási salak	$d < 75 \mu\text{m}$	A salak, mint aszfalt töltőanyag növeli a habarcs nyírási modulus értékét. Kombinálva a salakot és mészkeőlisztet minimálisra csökkenthető az aszfalt alacsony hőmérsékletű repedési ellenállása.
Pesetto et al.	acélgyártási salak (két különböző összetétel)	0/5, 5/10, 10/15 mm	Az acélgyártási salakkal készült keverék rendkívül pozitív hatással rendelkezik, mind a merevség és a fárasztási vizsgálat tekintetében
	homok		
	mészkeőliszt		


1. ábra. A pernye alkalmazásának aránya [43]

lárdságuk és tartósságuk alapján életképesek útburkolati anyagként. A szilárdsági tulajdonságok legfeljebb 15 m/m%-ban hozzáadott pernyével növelhetők (>15 m/m% szilárdsági romlást eredményez).

Sobolev és munkatársai [45] savanyú és bázikus pernye hatását vizsgálták a bitumenes anyagok reológiai tulajdonságaira. Eredményeik alapján megállapították, hogy a bitumenes anyagban célszerű alkalmazni a pernyét, ugyanis javítja a keverék teljesítményét. A szerzők mikroszerkezeti vizsgálattal kimutatták, hogy a bitumenes mátrixban egyenletesen eloszlott pernyeszemcsék a dinamikus terhelések hatására kialakuló repedéseket elzárták.

Xu és munkatársai [46] szén-erőműből származó pernye aszfalthabarcs keverékekben történő vizsgálatával foglalkoztak. Az eredmények alapján a pernye kisebb sűrűséggel rendelkezik a mészkeőlisztnél (referencia

anyag). A szénerőműi hulladék lúgosabb kémhatású, valamint finomabb szemeloszlással bír. A pernyét tartalmazó keverék alacsonyabb Marshall-stabilitást és nyomvályúsodással szembeni ellenállást mutat. Gazdasági szempontból kivitelezhető a szénerőműi hulladék alkalmazása aszfaltkeverékben.

Likitlersuang és kollégái [23] cement és lignit tüzelésből származó (C típusú) pernye felhasználásával készítettek aszfaltbeton keverékeket, majd a keverék teljesítményének laboratóriumi vizsgálatával foglalkoztak. Eredményeik alapján megállapították, hogy a keverékek merevségi modulusa nőtt a cement és pernye töltőanyagként történő hasznosításával.

Churchill és munkatársai [19] a közúti építés során felhasznált természeti erőforrások csökkentésének érdekében széntüzelésből származó pernye aszfaltbeton töltőanyagának helyettesítésével foglalkoztak. Kutatásaik során az aszfaltbeton próbatetek mechanikai tulajdonságait vizsgálták. Az eredményeik azt mutatták, hogy a töltőanyag frakció széntüzelésből származó pernyével történő részleges helyettesítése mérsékelten káros hatást gyakorolt a próbatetek szilárdságára. Ezzel szemben számos pernye/mész keverék eleget tett a minimális szilárdsági követelményeknek.

Mistry és társa [20] kutatómunkájukban azt vizsgálták, hogy az aszfaltkeverékben felhasznált pernye milyen hatással van a mészhidrát töltőanyag helyettesítésére. A kísérleti eredményeik szerint a mészhidrát pernyére történő cseréje nem csak a szabványban foglalt előírásoknak tesz eleget, hanem jobb szilárdságot biztosít a hagyományos töltőanyaghoz képest.

További kutatások [21] során szilánnal kezelt pernyét vizsgáltak, valamint azok felhasználásával készítettek aszfaltkeverékeket, amelyeken a nedveség hatására bekövetkező tönkremeneteli jelenségeket tanulmányozták. Az eredményekből megállapították, hogy a modifikált pernye javította a vízérzékenységet, növelte a húzószilárdságot, a merevségi modulusát, a fáradási ellenállást és a maradó alakváltozást is.

Ali és munkatársai [22] széntüzelésből származó pernyét használtak töltőanyagként aszfaltbeton keverékben. A mérési eredmények alapján megállapították, hogy a pernye alkalmazása célszerű, mivel javítja az aszfaltbeton szilárdsági tulajdonságait.

2.2. Bányászati meddő alkalmazása útépitési területen

Oluwasola és társai [10] elektroacél-gyártási salakot és rézbányászati meddőt alkalmaztak hagyományos ásványi anyagok helyett autópályák anya-

gáknak. Az általuk készített keverékeken Marshall-stabilitást, vízérzékenységet mértek, illetve a keverék laboratóriumi értékeléséhez meghatározták a reziliens modulust, majd dinamikus kúszási vizsgálatot is végrehajtottak. Az eredmények alapján arra a következtetésre jutottak, hogy javul az aszfaltkeverék teljesítménye, ha a gránitot, mint természetes adalékanyagot rézbányászati meddővel és salakkal helyettesítik. Az eredmények kiértékelését követően megállapították, hogy a bányászati melléktermék, illetve a kohászati hulladék anyag adalékanyagként alkalmazhatók az útépitésben.

Giustozzi és munkatársai [11] mészkőliszt helyett két különböző helyről származó magnetit ásványi anyagot vizsgáltak töltőanyagként aszfaltkeverékekben. A magnetit olyan ásványi anyag, amely számos magmás kőzetben, valamint folyami és tengeri környezetben is nagy mennyiségben megtalálható. Kísérleteik során a magnetit és a mészkőlisztet bitumenhez adagolták. Megvizsgálták a keverék reológiai tulajdonságainak hatását a magnetit, mint potenciális töltőanyag aszfaltkeverékben történő alkalmazási lehetőségeire. Továbbá szemcseméret-eloszlással, morfológiai elemzéssel (SEM, Cryo-SEM), és energiadiszperzív röntgenspektroszkópiával jellemezték a keveréket. Elért eredményeik alapján megállapították, hogy a magnetit alapú ferromágneses töltőanyag (amely számos országban nagy mennyiségében áll rendelkezésre) újrahasonosításának megfelelő módja az anyag aszfaltkeverékbe történő felhasználása. A hőmérséklet növelésével a keverék merevsége és rugalmas viselkedése javult, ezáltal potenciálisan növekszik a burkolat állandó deformációval szembeni ellenállása.

Wang és társai [12] magnetit meddőt használtak mészkőliszt helyettesítő adalékanyagként. A vizsgálati eredményeik alapján megállapították, hogy a magnetit meddő nem tartalmaz nehézfémet és nincs jele a toxikus szennyezés veszélyeinek sem. A mészhidrát a magnetittel javítja az aszfalt adalékanyag tapadását és az aszfaltkeverékek vízérzékenységét. Eredményeik alapján kijelenthető, hogy a magnetit meddőt tartalmazó aszfaltkeverékek kiváló tulajdonságokkal rendelkeznek, ezáltal a természetes adalékanyagok aszfaltban történő helyettesítésére alkalmasak.

Dhir és munkatársai [13] olajfűrészből származó, tisztított meddőt vizsgáltak, melyet aszfalt töltőanyagként kívántak hasznosítani. Az anyagok geometriai, fizikai és kémiai tulajdonságainak vizsgálata mellett általános aszfalttechnológiai tesztek is elvégeztek. Kutatásaik során referenciaanyagként mészkőlisztet használtak. Az eredmények kiértékelését követően megállapították, hogy az olajfűrészből származó meddő anyag egyik lehetséges felhasználási területe lehet az útépités.

2.3. Kohászati salakok alkalmazása útépitési területen

A kohászati salakok elhelyezése világszerte növekvő problémát jelent. A World Steel Association 2016-os adatai alapján Kína (49,5%) és Európa (10,2%) áll a nyersacél termelés élén [2].

Az utóbbi évtizedben Magyarországon is nagy mennyiségben megnövekedett az alumínium ötvözetek felhasználása, melynek következtében jelentős mennyiségű alumínium öntészeti salak keletkezik. A 3. táblázatban megfigyelhető Magyarország alumíniumöntvény termelésének alakulása 2007 és 2014 közötti időszakban. A táblázat adatai szerint 2010-től folyamatosan nőtt az alumíniumtermékek előállítása.

Irodalmi adatok [48] támasztják alá azt a tényt, hogy a kohászati folyamatokból nyert salakok kiváló eredményeket mutatnak az aszfaltkeverékekben felhasznált szerepük alapján. A kohósalak javítja az útburkolat járművek okozta deformációjával szembeni ellenállását és kifáradását. A salakok alkalmazásával javíthatók a járművek és az útburkolatok közötti súrlódási tulajdonságok (kopás), valamint az útburkolati hibák (pl. nyomvályósodás, repedés) kialakulása is csökkenthető.

Wu és társai [49] kutatómunkájukban nikkelsalakot használtak útépitési nyersanyagként portlandcement előállításához. A klinkerásványok és a hidratációs termékek morfológiáját metallográfiai és pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgálták. Az eredményeik azt mutatták, hogy a nikkelsalak hozzáadásával csökkent a klinker CaO-tartalma és javult a nyersliszt égethetősége. Emellett a nikkelsalak növelte a cementpép hidratációs fokát és hajlítószilárdságát. A szerzők megállapították, hogy a nikkelsalak alkalmas cement előállításra. A nyomószilárdsági eredmények 3 napos korban 6,9 MPa – 21,9 MPa, míg 28 napos korban 14,5 MPa – 52,4 MPa között változott.

Pasetto és társa [50] aszfaltbeton keverékeken végeztek laboratóriumi vizsgálatokat, melyeket három különböző kötőanyaggal és négyféle adalékanyaggal készítettek el. Munkájuk során kétféle összetétellel rendelkező acélgyártási salakot, homokot és mészkölsztet használtak fel. Kísérleti eredményeik alapján megállapították, hogy a fizi-

kai és mechanikai jellemzők szerint az acélgyártási salakok megegyeznek a közlekedési infrastruktúrában leggyakrabban használt természetes kőanyagok jellemzőivel. A salakkal készült keverék rendkívül pozitív hatással bír, mind a merevség, mind a fázastási vizsgálatok tekintetében.

Tao és társai [51] szintén acélgyártási salakot használtak aszfaltkeverékek töltőanyagaként, melyek reológiai tulajdonságainak hatását vizsgálták. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálataik eredménye szerint az acélgyártási salak őrlemény felületén számos pórus található (0,5–5 µm), míg a mészkölszt felülete sima. Oxidos összetételvizsgálattal kimutatták, hogy mindkét anyag fő alkotója a CaO és a SiO₂, de bizonyos mennyiségben tartalmaznak Fe₂O₃ és egyéb más oxidokat is. A salak, mint aszfalt töltőanyag növeli a habarcs nyírás modulusának értékét. Kombinálva a salakot és mészkölsztet minimálisra csökkenthető az aszfalt alacsony hőmérsékletű repedési ellenállása.

Mailar és társai [52] kutatási eredményei azt igazolták, hogy a megfelelő mennyiségben újrahasznosított alumínium salak a beton készítéséhez szükséges cement részleges cseréjére, kiváltására alkalmas. A cement salakkal történő megfelelő arányú cseréje javítja a beton pórusszerkezetét, szilárdságát, a sókkal szembeni ellenállóképességét, illetve szulfátállóságát.

Li és munkatársai [53] kísérleteik során finomszemcsés acélgyártási salak hatását vizsgálták aszfalthabarcsokon. Kontrollvizsgálatokat is elvégeztek mészkölszttel készített keverékeken. Megfigyelték, hogy alacsony hőmérsékleten az acélgyártási salak felhasználásával készített aszfalthabarcsok – magasabb CaO-tartalmuk és nagyobb fajlagos felületük következtében – több aszfaltént képesek lekötni, ezáltal nagyobb repedéssel szembeni ellenállóképességet biztosítanak az aszfalthabarcsnak alacsony hőmérsékleten. Emellett a finomabb salakszemcsék növelik a szakadással szembeni ellenállást is. Ennek okát a húzás során kialakuló feszültségkoncentrációk különbözőségében látták.

Masoudi és társai [54] kutatómunkájuk során az elektroacélműi salak hasznosíthatóságát vizsgálták a meleg aszfaltkeverékek hosszú távú teljesítményére. A természetes ásványi anyagokat a salak-

3. táblázat. Magyarország alumíniumöntvény termelése 2007 és 2014 között [47]

Megnevezés	Öntvénytermelés (tonna)			
	2007	2010	2011	2014
Alumínium kokillaöntvény	53 919	46 323	43 721	49 604
Alumínium nyomásos öntvény	43 011	42 898	55 448	51 658
Alumínium homoköntvény	343	202	243	161
Összes alumíniumöntvény	97 276	88 921	99 412	101 423

kal, mint másodlagos nyersanyaggal kívánták kiváltani. Kutatómunkájuk eredményeként megállapították, hogy az acélgyártási salakot tartalmazó keverék kevésbé öregedett, mint a referenciaanyagot (mészkeverék) tartalmazó keverék.

2.4 Építési hulladékok alkalmazása útépitési területen

Az építési-bontási hulladékok (Construction and Demolition Waste, CDW) újrahasznosítását három szempont szerint határozzák meg:

- műszaki minőség,
- környezettel való összeegyeztethetőség, illetve
- az elsődleges ásványi anyagokkal való versenyképesség.

Az építési másodlagos anyagok felhasználása történhet közvetlenül, valamint közvetetten. A közvetlen újrahasznosítást elsősorban a kitermelt talajok esetén alkalmazzák, míg a közvetett hasznosítást valamilyen előkészítési folyamat előzi meg.

Számos kutatásban foglalkoztak már a tégláörleménnyel, mint újrahasznosított aszfalt töltőanyaggal [32, 54-57]. *Chen és munkatársai* [32] összehasonlító elemzéseket végeztek, amelyben a primer kőzetként alkalmazott mészkőlisztet és az alternatív anyagként használt tégláörleményt vizsgálták. A töltőanyagokon elvégzett anyagszerkezeti vizsgálatokat követően aszfaltkeverékeket készítettek. Kísérleti eredményeik alapján arra jutottak, hogy a tégláörleménnyel készített aszfaltkeverékek javítják a burkolat nyomvályúsodással szembeni ellenállását, a vízáteresztőképességet, valamint a fáradási tulajdonságokat.

Gómez-Meijide és kollégái [58] építési és bontási hulladékból készítettek hideg aszfaltkeveréket, amelyen merevségi tulajdonságokat vizsgáltak. Kutatómunkájuk során azt tapasztalták, hogy az aszfaltkeverék magasabb szabad hézaggal rendelkezett, ami előnyös lehet porózus aszfalt készítése szempontjából. Ugyanakkor az építési és bontási hulladékból készült keverék több bitument igényelt a keverékkészítés során. A szerzők vizsgálataik alapján megállapították, hogy az építési és bontási hulladék anyagból készített hideg aszfaltkeverék jól alkalmazható gyengébb forgalmú utakhoz.

Több tanulmány is foglalkozik újrahasznosított betonörlemény útépitési anyagként történő alkalmazásával [31, 59]. Ezek a kutatások jellemzően az újrahasznosított betonörlemény aszfaltkeverékben történő alkalmazását vizsgálták. A vizsgálati eredmények szerint a referenciaanyaghoz (mészkeverékhez) képest javulást figyeltek meg az aszfaltkeverékek vízáteresztőképessége és a fáradási ellenállása során.

Arabani és munkatársai [33] tanulmányának célja a visszanyert beton (Recycled concrete aggregate, RCA) és az acélgyártási salak adalékanyagként történő hatásainak vizsgálata melegaszfaltban. Az aszfaltkeverékben dácit kőzetet RCA-ra cserélve nagymértékben romlottak a keverék mechanikai tulajdonságai. Az RCA finom adalékanyagként, illetve az acélgyártási salak finom, vagy durva adalékként történő alkalmazása esetén nőtt a keverék Marshall-stabilitása. Az optimális aszfaltbeton keverékük töltőanyagként dácitot, finom adalékként RCA-t és durva adalékanyagként acélgyártási salakot tartalmazott.

3. Összegzés

Jelen cikk a másodlagos nyersanyagok, illetve más típusú hulladékok útépitési anyagként történő hasznosítási lehetőségeivel foglalkozó irodalmi ismereteket kívánta bemutatni, ismertette a legújabb kutatási eredményeket. Nem szabad elmenni amellett a tény mellett, hogy a különböző gyártási technológiák eredményeként keletkező hulladékok is az emberi igények kielégítésének hatására folyamatosan termelődnek, mennyiségük rohamosan nő. A hulladéklerakókban történő tárolásuk nem jelent végleges megoldást, hiszen ez sem gazdaságilag, sem pedig környezetvédelmi szempontból nem előnyös. Emiatt újrahasznosításuk nélkülözhetetlen, melynek egyik potenciális területe az útépités.

Köszönetnyilvánítás

Jelen kutatómunka az Európai Szociális alap és Magyarország Kormányának társfinanszírozásával valósul meg a „Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017” című EFOP-3.6.2-16-2017-00010 azonosító számú projekt keretén belül.

Felhasznált irodalom

- [1] Anupam K, Kumar P, Ransinchung G. Use of Various Agricultural and Industrial Waste Materials in Road Construction. *Procedia-Social and Behavioral Science*. 2013 December; 104:264-273. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.119>
- [2] Guo J, Bao Y, Wang M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Management*. 2018 August, 79: 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.045>
- [3] Wang G) 14 - Case studies on slag utilization. *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*. 2016; 339-370. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100381-7.00014-8>
- [4] Wang G. 8 - Unbound slag aggregate use in construction. *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure*

- Construction. 2016; 155-184.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100381-7.00008-2>
- [5] Bornemissza T, Bóhm J, Csőke B, Erős Gy, Gáspár L, Horváth A, Karoliny M, Lengyel A, Molnár J, Ruppert L, Vámos Gy, Záray Gy. Másodlagos nyersanyagok az útépitésben. IHU Kht. Kiadó, 2005; 255.
- [6] Építési és bontási hulladék.
http://www.kvvm.hu/szakmai/hulladeggzald/hulladeggzaldokodas/hulladektipusok_epit_bont.htm
 Megtekintés ideje: 2018. 11. 20.
- [7] Csőke B. Ipari hulladékok előkészítése és hasznosítása.
<http://hulladekonline.hu/files/178/>
- [8] Mucsi G: Erőműi pernye komplex hasznosítása.
[http://kritikuselemek.uni-miskolc.hu/files/files/monografia_6\(1\).pdf](http://kritikuselemek.uni-miskolc.hu/files/files/monografia_6(1).pdf)
 Megtekintés ideje: 2019. 01. 07.
- [9] http://ec.europa.eu/environment/waste/construction_demolition.htm
 Megtekintés ideje: 2018. 11. 20.
- [10] Oluwasola E, Hainin M, Aziz MMR. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*. 2015 March; 2:47-55.
<https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
- [11] Giustozzi F, Mansour K, Patti F, et al. Shear rheology and microstructure of mining material-bitumen composites as filler replacement in asphalt mastics. *Construction and Building Materials*. 2018 May; 171:726-735.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.190>
- [12] Wang Z, Xu C, Wang S, et al. Utilization of magnetite tailings as aggregates in asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*. 2016 July; 114:392-399.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.139>
- [13] Dhir R, Csetenyi L, Dyer T, et al. Cleaned oil-drill cuttings for use as filler in bituminous mixtures. *Construction and Building Materials*. 2010, March; 24:322-325.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.022>
- [14] Ahmed I, Lovell CW. *Use of Waste Materials Used in Highway Construction* 1st Edition. Imprint William Andrew, 1993; 125. eBook ISBN9780815519461
- [15] Mohammadinia A. (2017) Effect of fly ash on properties of crushed brick and reclaimed asphalt in pavement base/subbase applications. *Journal of Hazardous Material*. 2017 January; 321(5):547-556.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.039>
- [16] Dwivedi A, Jain M. Fly ash-waste management and overview: A review. *Recent Research in Science and Technology*. 2014 August; 6:30-35.
- [17] Miloš Š, Nebojša R, Nikolay V. Construction of Road Embankment with Waste Materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2015 January; 725-726:596-601.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.596>
- [18] <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fach06.cfm>
 Megtekintés ideje: 2019. 01. 31.
- [19] Churchill EV, Amirghanian SN. Coal ash utilization in asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1999 November; 11(1s.4):295-301.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:4\(295\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:4(295))
- [20] Mistry R, Roy T. Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt. *Perspectives in Science*. 2016 September; 8:307-309.
<http://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.04.061>
- [21] Xie SW, J, Pang, L, Lin, J, Zhu, Z. Influence of surface treated fly ash with coupling agent on asphalt mixture moisture damage. *Construction and Building Materials*. 2012 May; 30:340-346.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.022>
- [22] Ali N, Chen J, Simms S, et al. Mechanistic evaluation fly ash asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 1996 February; 8(1s.1):19-25.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1996\)8:1\(19\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1996)8:1(19))
- [23] Likitlersuang S, Chompoorat T. Laboratory investigation of the performances of cement and fly ash modified asphalt concrete mixtures. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2016 September; 9(1s.5):337-344.
<http://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.08.002>
- [24] Sobolev K, Vivian IF, Saha R, et al. The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials. *Fuel*. 2014 January; 116:471-477.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.123>
- [25] Saritha N. A Study on use of Carbon Black Powder in Bituminous Road Construction. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2015 June; 4:76-83, ISSN2278-0181.
<https://doi.org/10.17577/ijertv4is060220>
- [26] Mohd RH, Maniruzzaman A, Zulfiqar A, Ramadhansyah PJ, Moetaz MS, Haryati Y. Steel Slag as A Road Construction Material. *Journal Teknologi (Sciences and Engineering)*. 2015 January; 73(4):33-38.
 eISSN2180-3722
- [27] Pasetto M, Baldo N. Experimental evaluation of high performance base course and road base asphalt concrete with electric arc furnace steel slags. *Journal of Hazardous Materials*. 2010 September; 181:938-948.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.104>
- [28] Busari AA, Akinwumi I, Awoyera PO, Olofinnade OM, Tenebe TI, Nwanchukwu JC. Stabilization Effect of Aluminum Dross on Tropical Lateritic Soil. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018 November; 39:86-96.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.39.86>
- [29] Soós Z, Géber R, Tóth Cs, Igazvölgyi Zs, Udvardi B. Utilization of aluminium dross as asphalt filler. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2017 March; 69(3):89-93.
<https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2017.15>
- [30] Saravanan S, Venkatasubramanian C, Muthu D, Ramakrishnan K. Construction of Rural Roads using C&D Waste Materials. *Indian Journal of Science and Technology*. 2016 July; 9(27):1-5.
<http://dx.doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i27/97634>
- [31] Chen, M, Lin, J, Wu, S. Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 2011 October 2011; 25(10):3909-3914.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>
- [32] Chen M, Lin J, Wu S, Liu C. Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*. 2011 April; 25(4): 1532-1536.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005>
- [33] Arabani M, Azarhoosh AR. The effect of recycled concrete aggregate and steel slag on the dynamic properties of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*.

- 2012 October; 35:1-7.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.036>
- [34] Hou Y, Ji X, Li J, Li X. Adhesion between Asphalt and Recycled Concrete Aggregate and Its Impact on the Properties of Asphalt Mixture. *Materials*. 2018 December; 11(12):1-15. <https://doi.org/10.3390/ma11122528>
- [35] Rodríguez-Fernández I, Lastra-González P, Indacochea-Vega I, Castro-Fresno D. Recyclability potential of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement and industrial by-products. *Construction and Building Materials*. 2018 November; 195:148-155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.069>
- [36] Fernandes SRM, Silva H, Oliveira J. Recycled stone mastic asphalt mixtures incorporating high rates of waste materials. *Construction and Building Materials*. 2018 October; 187:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.157>
- [37] Mhlongo SM, Abiola OS, Ndambuki JM, Kupolati WK. Use of Recycled Asphalt Materials for Sustainable Construction and Rehabilitation of Roads. *International Conference on Biological, Civil and Environmental Engineering*. 2014; 91-94. <http://dx.doi.org/10.15242/IICBE.C0314157>
- [38] Disfani MM, Arulrajah A, Bo MW, Hankour R. Recycled crushed glass in road work applications. *Waste Management*. 2011 November; 31(11):2341-2351. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.003>
- [39] Pasetto M, Baldo N. Resistance to Permanent Deformation of Road and Airport High Performance Asphalt Concrete Base Courses. *Advanced Materials Research*. 2013 August; 73:494-502. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.494>
- [40] Lou J, Liu H, Pang A, Sun H, Yang S, Yang T. The High Temperature Stability of Asphalt Composite Reinforced by Basalt Glass Powder and Basalt Fiber. *Advanced Materials Research*. 2012 December; 627:813-815. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.627.813>
- [41] Szilágyi K, Gömze AL, Polacsek G. A pernye bekeverési arányainak vizsgálata, meghatározása a gyártott cement mechanikai tulajdonságainak optimalizálása céljából. *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2008 August; 60:44-49. <http://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2008.9>
- [42] Opocky L. A pernyék szilikátkémiai tulajdonságai. <http://hulladekonline.hu/files/166/> Megtekintés ideje: 2019. 01. 07.
- [43] <https://www.slideshare.net/JyotiKumari70/flyash-disposal-and-utilization-69528633> Megtekintés ideje: 2019. 02. 14.
- [44] Ahmaruzzaman M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009 December; 36:327-363
- [45] Sobolev K, Vivian IF, Sah R et al. The effect of fly ash on the rheological properties of bituminous materials. *Fuel*. 2014 January; 116:471-477. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.123>
- [46] Xu P, Shi, Chen Z, Cai J, Pei J, Gao J, Zhang J, Zhang J. The effect of retreated coal wastes as filler on the performance of asphalt mastics and mixtures. *Construction and Building Materials*. 2019 January; 203:9-17. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.088>
- [47] http://www.innoteka.hu/cikk/egy_alig_ismert_sikeragazat_onteszet.1228.html Megtekintés: 2019. 03. 19.
- [48] Yi H, Xu G, Cheng H, Wang J, Wan Y, Chen H. An overview of utilization of steel slag. *Procedia Environmental Sciences*. 2012; 16:791-801. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.108>
- [49] Wu Q, Wu, Y, Tong W, Ma H. Utilization of nickel slag as raw material in the production of Portland cement for road construction. *Construction and Building Materials*. 2018 December; 193:426-434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.109>
- [50] Pasetto M, Baldo N. Resistance to Permanent Deformation of Road and Airport High Performance Asphalt Concrete Base Courses. *Advanced Materials Research*. 2013 August; 723:494-502. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.494>
- [51] Tao G, Xiao Y, Yang L, Cui P, Kong D, Xue Y. Characteristics of steel slag filler and its influence on rheological properties of asphalt mortar. *Construction and Building Materials*. 2019 March; 2019, 201:439-446. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.174>
- [52] Mailar G, Raghavendra SN, Sreedhara BM, Manu DS, Hiremath P, Jayakesh K. Investigation of concrete produced using recycled aluminium dross for hot weather concreting conditions. *Resource-Efficient Technologies*. 2016 June; 2:68-80. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.06.006>
- [53] Li Q, Qiu Y, Rahman A, et al. Application of Steel Slag Powder to Enhance the Low-temperature Fracture Properties of Asphalt Mastic and its Corresponding Mechanism. *Journal of Cleaner Production*. 2018 May; 184:21-31. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.245>
- [54] Masoudi S, Abtahi S, Goli A. Evaluation of electric arc furnace steel slag coarse aggregate in warm mix asphalt subjected to long-term aging. *Construction and Building Materials*. 2017 March; 135:260-266. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.177>
- [55.] Wu S, Zhu J, Zhong J. et al. Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder. *Construction and Building Materials*. 2011 June; 25:2883-2887. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.040>
- [56] Aliabdo A, Hassan H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. 2014 March; 53:151-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>
- [57] Bilgin, N, Yeprem, H, Arslan, S. et al. (2012) Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*. 2012 April; 29:449-457. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.011>
- [58] Gómez-Meijide B, Pérez I, Airey G, Thom N. Stiffness of cold asphalt mixtures with recycled aggregates from construction and demolition waste. *Construction and Building Materials*. 2015 February; 77:168-178. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.045>
- [59] Bhusal S, Li X, Wen H. Evaluation of Effects of Recycled Concrete Aggregate on Volumetrics of Hot-Mix Asphalt. *Journal of the Transportation Research Board*. 2011; 2205:36-39. <http://doi.org/10.3141/2205-05>



Reziliens modulus helyszíni mérési lehetősége SMART-BC műszerrel

Subert András¹, Subert István²

¹ CEO Alltest Műszerfejlesztő Kft., ² CEO Andreas Építőipari Fejlesztő és Szolgáltató Kft.
e-mail: allest-office@gmail.com; mail@andreas.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.05

Kivonat Az alternatív pályaszerkezet méretezés lehetővé teszi az altalaj jellemzőit figyelembe vevő pontos méretezést biztosítva a hosszú élettartamot. Ehhez szükséges a reziliens modulus ismerete. Nagy előny lenne, ha a reziliens modulus helyszíni méréssel is meghatározható lenne, a jelenleg alkalmazott laboratóriumi triaxiális vagy CBR-módszer mellett, vagy a helyett. A SMART-BC mérési módszer továbbfejlesztése alkalmaznak tűnik a reziliens modulus előzetes meghatározására a helyszínen, építés alatti ellenőrzésére és akár önellenőrzésre vagy minősítésre.

Kulcsszavak Reziliens modulus, alternatív pályaszerkezet méretezés, SMART-BC, CWA15846, dinamikus tömörség- és teherbírásmérés, terepi mérések, SP-LFWD, alapozás, K+F+I

Possibility of On-site Measurement of Residual Modulus, Measuring by SMART-BC Instrument

Abstract Alternative pavement structure design allows to taking into consideration the characteristics of the subsoil for the precise scaling, ensuring long pavement life-time. This requires the knowledge of the resilient modulus. It would be a great advantage if the resilient modulus could be determined by a field measurement, in addition to or instead of the current triaxial and CBR laboratory method. The further development of the SMART-BC measurement system seems to be suitable for the preliminary determination of the resilient modulus in site, controlling during construction and even for self-control or qualifying.

Keywords Resilient modulus, alternative pavement design, SMART-BC, CWA15846, dynamic compactness- and bearing capacity test, field measurements, SP-LFWD, foundation, R+D+I

Subert András

Óbudai Egyetem Keleti Károly Gazdasági Kar Kereskedelem és Marketing Szakos hallgató

Subert István

Okl. ép. mérnök, okl. közlekedésgazdasági mérnök

Bevezető, előzmények

Az útpálya-szerkezetek tervezését jelenleg a hagyományos e-UT06.03.13 (ÚT2-1.202), illetve kisforgalmú utakra e-UT06.03.12 (ÚT2-1.503) szabályozza, mely a tervezett élettartamra számított terheléssel, táblázatból való választással teszi tervezhetővé a típus-pályaszerkezet összetételét, réteg-

rendjét (19, 20). A földmű tetején a minimálisan elvárt teherbírás elvárt értéke $E_2 = 40$ MPa, aminek biztosítása érdekében az e-UT06.03.53. (ÚT 2-3.206) előírás a legkedvezőtlenebb helyen és körülmények között $E_2 \geq 50$ MPa teherbírást ír elő a földmű koronaszintjén. A jelenlegi tervezési módszer használata esetén tehát nem érvényesülhet egy ennél jóval magasabb teherbírási

100–160 Mpa teherbírású javított (stabilizált) földmű előnye, amivel a pályaszerkezetek vastagsága hatékonyan és gazdaságosan lenne csökkenthető. További problémát okoz, hogy a hazánkban előforduló talajok döntő része (adott terepi víztartalommal) nem is tudja az előírt földműteherbírást biztosítani, ezért szemcsés anyagból (pl. homokos kavics, zúzottkő) teherbírást javító réteget kell tervezni és beépíteni. A teherbírás-javítás ugyanakkor gazdaságosan elvégezhető a talajok kötőanyag stabilizálásával is. Ez a technológia egyben lehetővé teszi az $E_2 > 40$ MPa földmű-teherbírást indokolt és műszakilag lehetséges jelentős meghaladását is. A típuspályaszerkezet-méretezés azonban nem teszi lehetővé azt, hogy az 50 Mpa-nál magasabb földmű-teherbírástól származó műszaki előnyöket figyelembe vegyünk. Az útpálya alaprétegei és a burkolati rétegek vastagsága, anyaga, rétegrend összetétele nem változtatható, ezzel egy hatékony műszaki előny veszik el. Ennek a megoldásaként dolgozták ki egy az első magyar alternatív méretezési eljárást (*Pethő, Primusz, Tóth, Karoliny*), amelyek már mindezt figyelembe veszik a pályaszerkezet méretezéskor [2, 12, 16, 26].

A korszerű tervezéséhez azonban szükséges lenne a reziliens modulus helyszíni meghatározására, mely az analitikus méretezés alkalmazását széleskörűen lehetővé tenné. Reziliens modulus (M_r) a rugalmas visszalakulásból számított rugalmassági modulus, mely az alternatív pályaszerkezet méretezéshez szükséges fontos paraméter. Ezt a paramétert jelenleg laboratóriumi mérésekből, zavart mintákból mérve határozzák meg triaxiális vizsgálattal direkt módon [11, 13, 14, 25] vagy CBR-vizsgálattal és átszámítással indirekt módon (10, 15, 21) – erősen különböző pontossággal.

Az alternatív pályaszerkezet méretezési módszer alkalmazása lehetővé tenné a pontosabb méretezést, elkerülhetővé a korai leromlást, kezelve a lokális problémákat és biztosítva a hosszú és teljes szakaszon homogén élettartamot.

Számos külföldi és hazai cikk foglalkozik az alternatív pályaszerkezet méretezéssel és a reziliens modulus meghatározásával, alkalmazásával. Hazai cikkek közül kiemelendő *Szendefy, Back* és *Primusz, Tóth* cikke [1, 22, 23, 24]. Külföldi cikkek sokasága foglalkozik ezzel a témával [3, 4, 5, 6, 7, 10, 11], felvetve, hogy ejtősúlyos nagytárcsás mérési módszer alkalmazása is eredményes lehet az M_r reziliens modulus meghatározására [9, 30]. Mindezen összefüggéseknél azonban a közreadott regressziós együtthatók nem megnyugtatók.

A pályaszerkezet-tervezés kritikus pontja lett annak meghatározása, hogy a fogadóréteg teherbírása, hajlékonysága milyen, az élettartama alatt a rá helyezett alap- és aszfaltrétegek milyen hajlítóhúzó igénybevételeket kapnak, melyeket el kell vi-

seljenek károsodás, fáradási repedés, illetve deformáció nélkül [2, 16, 24, 26].

Minden tehát az alapoknál kezdődik, azaz a földmű és a szemcsés rétegek, kötőanyag, vagy kötőanyag nélküli alaprétegek jellemzőin múlik, így annak reziliens modulusán. A földmű tetején a minimálisan elvárt teherbírás $E_2 = 40$ MPa értékben van megadva, aminek biztosítása érdekében az eUT06.03.53. (ÚT 2-3.206) előírás a legkedvezőtlenebb helyen és körülmények között is $E_2 \geq 50$ MPa teherbírást ír elő a földmű koronaszintjén. Ezek alapján elmondható, hogy a jelenlegi tervezési módszer használata esetén nem érvényesül egy magasabb teherbírású földmű előnye, amivel a pályaszerkezetek vastagsága hatékonyan csökkenthető lenne.

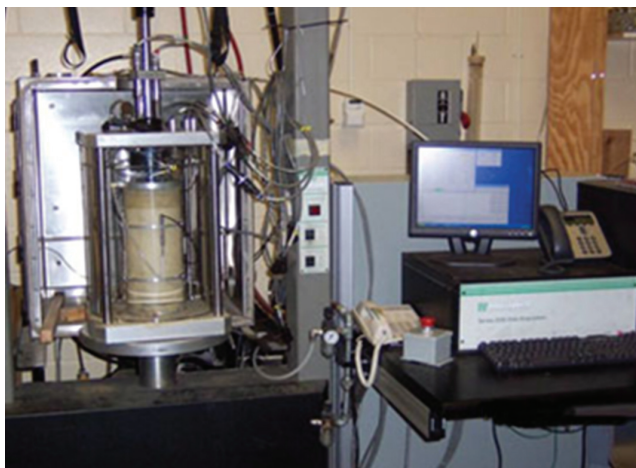
További problémát okoz, hogy a hazánkban előforduló talajok döntő része nem is képes az előírt $E_2 \geq 50$ MPa földműteherbírást biztosítani, ezért durva szemcsés anyagból (pl. homokos kavics, zúzottkő) teherbírásjavító réteget kell terveznünk és építsünk. A teherbírás-javítás gazdaságosan elvégezhető lenne a talajok kötőanyag stabilizálásával, ez a technológia lehetőséget adna az $E_2 = 40$ MPa-nál jóval magasabb földműteherbírást elérésére is. A típuspályaszerkezet-méretezés tehát nem teszi lehetővé a magasabb földmű-teherbírást, mint műszaki előny figyelembevételét, mert az útpálya alaprétegei és a burkolati rétegek vastagsága vagy anyagminősége nem csökkenthető. Ennek a megoldására dolgozták ki az új alternatív méretezési eljárást (*Pethő, Primusz, Tóth, Szendefy és sokan mások*), amely már figyelembe veszi az elvárt földműteherbírást meghaladó értéket a méretezéskor.

Mi a reziliens modulus?

A reziliens modulus általános definíciója alapján a deviátor feszültség és a rugalmas alakváltozás aránya – visszalakuláskor, a felterhelés utáni tehermentesülés mellett:

$$M_r = \sigma/\varepsilon \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Az M_r értéke nem az anyag szilárdságát jellemzi, hanem annak reziliens (visszaalakuló) merevségét. Mivel nagysága változik az oldalnyomás függvényében, így laboratóriumban többféle terhelés és oldalnyomás párosítás mellett kell meghatározni. Természetes körülmények közötti vizsgálata nehézkes, helyszíni CBR-vizsgálattal lenne lehetséges. A laboratóriumi triaxiális vizsgálatok (1. ábra) hátránya, hogy drága, lassú, körülményes és mivel zavart mintán történik, ezzel megbízhatósága gyengül.



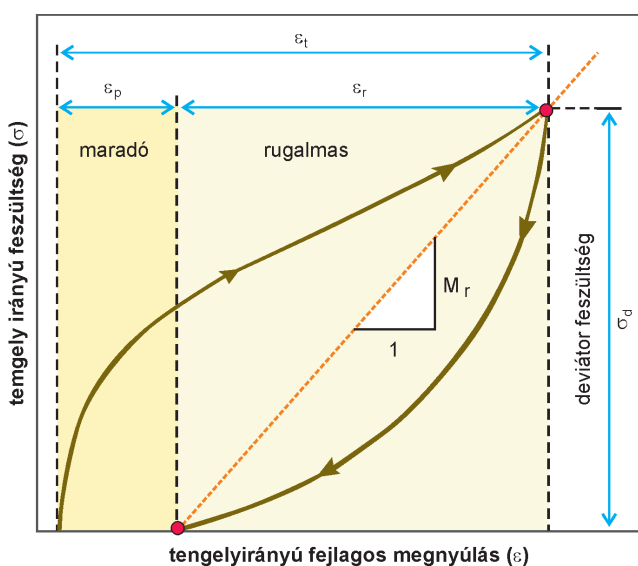
1. ábra. Triaxiális vizsgálat
(<http://www.dot.state.mn.us/materials/mr/>)

Ideális eset lenne egy gyors helyszíni mérés a meghatározására, mely nem időigényes, olcsó és ezzel a mérési gyakoriság növelhetővé válik. Gyakoribb vizsgálat a felület állapotát jobban jellemzi és az eredeti célt – a statisztikai alapon történő méretezés lehetőségét is megteremthetné.

Az M_r értékének meghatározására közvetett módszerként a szakirodalom a CBR vizsgálatot javasolja, amely a laboratóriumban egyszerűbb eszközökkel végrehajtható, mint a speciális berendezést igénylő és költséges dinamikus triaxiális vizsgálat.

AASHTO T-307 szerinti laboratóriumi triaxiális vizsgálatok

AASHTO T-307 amerikai előírás szerint eltérő deviátor feszültségek alkalmazásával egy mintán



2. ábra. A reziliens (visszaalakulási) modulus általános értelmezése

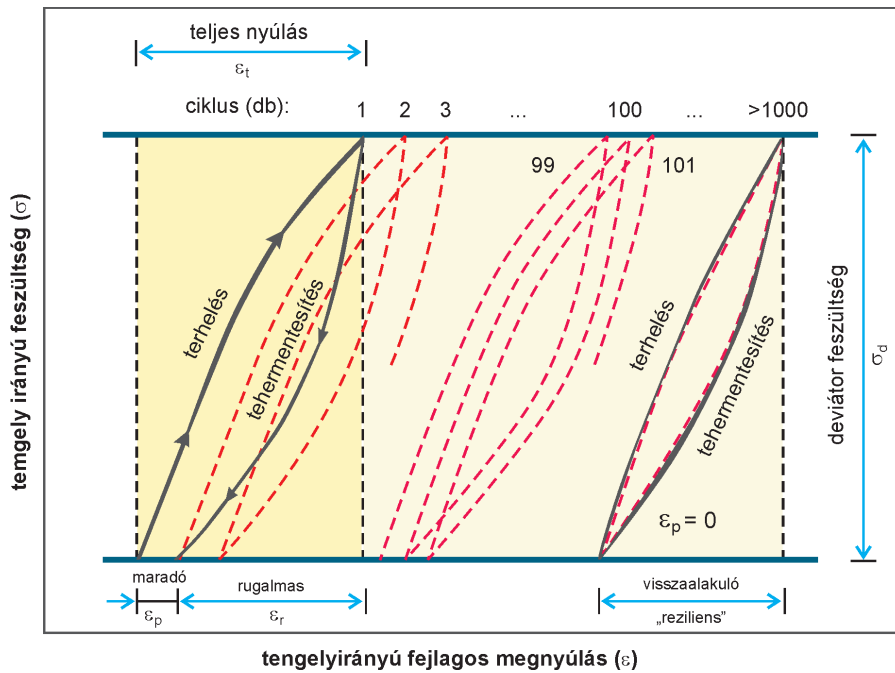
több száz dinamikus triaxiális vizsgálatot végeznek el, amelyek során előre meghatározott nagyságú tengelyirányú ciklikus terhelés alá vetetik a próbatestet. Egy terhelési ciklus 0,1 másodperc hosszúságú terhelési fázisból, valamint egy 0,9 másodpercig tartó nyugalmi periódusból áll, így teljes időtartama 1 másodperc. A mintákat először 1000 cikluson keresztül 27,6 kPa cellanyomás és 27,6 kPa deviátor feszültség mellett, ún. kondicionáló terhelésnek vetetik alá, aminek célja, hogy megszüntesse a tömörödés és a terhelés közti időszak hatását, illetve a kezdeti terhelést az újrateherelés ellenében. Ezen kívül minimalizálja a minta végei, illetve a terhelőfej és az alapzat között esetlegesen fennálló nem megfelelő érintkezés hatását. A kondicionáló terhelés után a 27,6 kPa cellanyomást fenntartva 5 különböző, fokozatosan emelkedő deviátor feszültség alkalmazása mellett, 100–100 cikluson keresztül történt a minták terhelése. A vizsgálat végső lépéseként az utolsó terhelési lépcső 68,9 kPa nagyságú deviátor feszültségének alkalmazásával a minták terhelése további 10 000 cikluson keresztül folytatódik a maradó alakváltozások meghatározása céljából. Elterjedten alkalmazzák az M_r reziliens modulus meghatározására (2. ábra). Korlátai az anyag szemnagysága és mintázásának határai.

A szakirodalom a reziliens modulus egyszerűbb, de közvetett meghatározására a CBR-értékből történő átszámítást javasolja, amihez a 30 éves szakirodalomban számos különböző összefüggés szerepel [15, 18, 24, 25]. Ezen összefüggések célja, hogy a még kevésbé elterjedt dinamikus triaxiális berendezést igénylő közvetlen mérés helyett az M_r értéke egy egyszerűbb, kevésbé költséges vizsgálatlal is előállítható legyen.

Szendefy által bemutatott eredmények szerint a CBR teherbírásból számított M_r reziliens modulusok jóval magasabbak, mint a triaxiális mérésekből kapott értékek (1). Az átszámítási módok közül Szendefy szerint a Georgia Department of Transportation ajánlása adta a legközelebbi értékeket, azonban még ezek is 1,5-szer nagyobbra adódtak, mint a laboratóriumban dinamikus triaxiális berendezéssel mért M_r -értékek. Megítélése szerint ezek az értékek túl tág határok közöttiek, mérnöki méretezésre alig, inkább becslésre alkalmasak.

Szendefy szerint a stabilizációknál a mért, illetve „átszámított”, szakirodalomban található különböző összefüggéssel meghatározott reziliens modulusok átlagértéke erősen szór. Az eltérés akár az átlag 3–4-szeres is lehet, ami a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából elgondolkodtató.

Nyilvánvaló, hogy ha a reziliens modulus meghatározásának alapfeltétele az, hogy a maradó fajlagos alakváltozás már nulla legyen a ciklikus terhelések hatására (3. ábra). Ekkor a terhelési szakasz



3. ábra. A reziliens (visszalakulási) modulus – nulla maradó alakváltozásnál (Tervezési Útmutató, 7. ábra)

kezdő- és végpontjai egyeznek a tehermentesítési szakasz kezdő-vég pontjaival. Kimondható tehát, hogy ha bármely ciklikus terhelési vizsgálat a nulla maradó alakváltozást eléri, akkor a rugalmas alakváltozából (ϵ_r) számított „teherbírási” modulus, a reziliens modulussal egyező értékű (3. ábra piros

kezdeti szakasz, illetve 2. ábra jobb oldala), azaz általanosságban:

$$\epsilon_{der} = M_r \text{ (MPa)} \quad (2)$$

Reziliens modulus mérési lehetőségei SMART-BC vizsgálattal

Vizsgálatunk ezek után arra irányult, hogy lehetséges-e az 3. ábra szerinti terhelési és mérési modell alkalmazása a reziliens modulus direkt meghatározására az MSZ 15846 szerinti dinamikus kistárcsás tömörség- és teherbírási vizsgálattal.

A SMART prototípus műszer fejlesztése

a GINOP-2.1.7-15-2016-001

79 projektben „SMART-BC –

Okostelefonra fejlesztett di-

namikus tömörség- és teherbírási

mérés kutatása és prototípus

kifejlesztése” címmel folyik és

befejezés előtt áll (36).

Nagy előny lenne, ha az alternatív

pályaszerkezet méretezés a

valós körülményeket figyelembe

vevő dinamikus mérési modellből

meghatározott, azaz a rétegen

mért reziliens modulusra alapozhatná

a méretezést, nem többszörös

átszámításokkal terhelt, táblázatos

értékekből. További előny lehet, hogy az

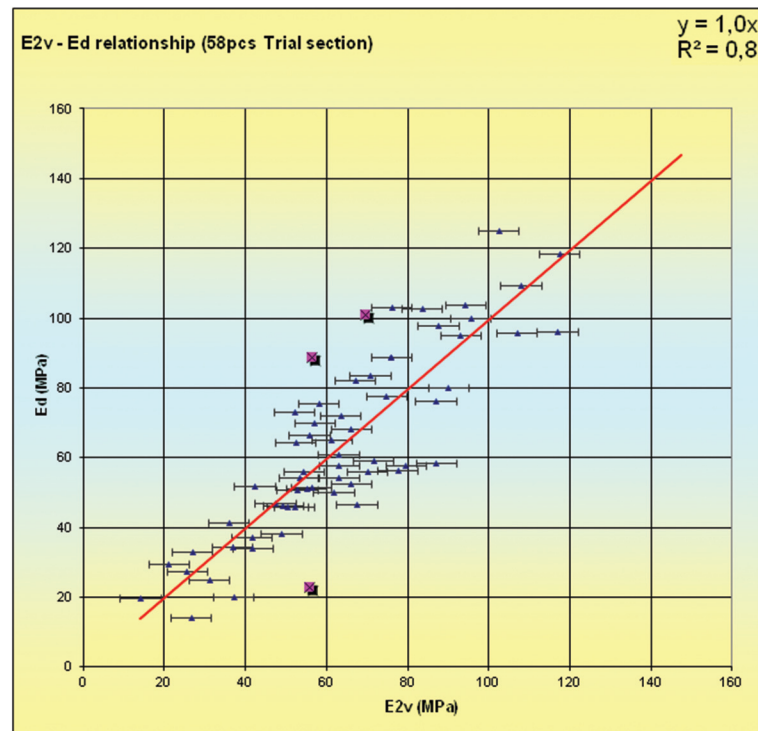
$E_2 - E_d$ statikus – dinamikus modulusok

közötti összefüggés $n = 763$ mérésből

58 db próbabeépítés összesített

eredményeiből korábban már igazolódott

[17, 33, 34] és ezért nem becsülni



4. ábra. $E_d - E_2$ dinamikus–statikus modulusok próbabeépítésekkel megállapított összefüggése

$$E_2 = 0,94 \cdot E_d \text{ (} R^2=0,8 \text{)} \quad (3)$$

Az ejtésekkor rugalmas és maradó alakváltozás keletkezik. A maradó és rugalmas alakváltozás figyelembe vételének módját már meg kellett oldjuk a

dinamikus tömörségi fok elméletének kidolgozásakor, ezt a 18 ejtési sorozat

süllyedési amplitúdóinak különbségéből számítottuk. A dinamikus tömörség-

mérési mód a

ténylegesen mért *maradó alakváltozások sorozatának* meghatározásával tette lehetővé a deformációs mutató (továbbá ebből a dinamikus tömörségi fok) meghatározását és azt elméleti levezetéssel is igazolta [34]. A dinamikus tömörségi fok mérése a *rugalmas alakváltozást kiküszöbölve* a maradó alakváltozások súlyozott átlagával határozza meg a D_m deformációs mutatót. A mérési módszert szabvány rögzíti (MSZ 15846, a CWA15846, és az e-UT09.02.35 is).

Adódik tehát, hogy ezen elv mentén lehetséges – a maradó alakváltozás kiküszöbölésével – a tisztán rugalmas alakváltozás mérése, ebből pedig a reziliens modulus meghatározása $\varepsilon_{der} = M_r$ adott terepi mérési pontokon, a reziliens modulusra vonatkozó – elfogadott – Poisson-tényezővel számítva. Ennek több lehetséges megoldása is elképzelhető, melyek közül a meghatározás pontossága, egyszerűsége és ismételhetősége dönthet, nagy mintaszámú elemzés után (5. ábra).



5. ábra. SMART-BC mérőeszköz a legújabb tagja az LFWD műszercsaládnak (MSZ15846)

Elemzés alá vont lehetséges alternatívák

A megoldást keresve az alábbiakból indultunk ki: a nyomás (stressz) hatására alakváltozási görbe jön létre jelölése σ - ε . Fajlagos alakváltozás $\varepsilon = \Delta L/L$ (strain). A teljes fajlagos alakváltozástól levonva a maradó alakváltozást kapjuk a rugalmas alakváltozást. Reziliens (mert visszalakuló) – azaz nem az összenyomódásból, hanem utána következő tehermentesülés alatti szakaszból határozható meg ez az összefüggés, illetve M_r paraméter. Ez egyenlő az 3. ábra $\varepsilon_p = 0$ lineáris meredekséggel (slope). Tömörségi fok ($Cr =$ Compaction-rate) elméleténél levezetett számításból látható, hogy a Proctor-talajhenger magasságának változásból levezethető a tömörségi fok

$$C_{ri} = \frac{V^*}{V_i} = \frac{A \cdot h^*}{A \cdot h_i} = \frac{h_i - \Delta h}{h_i} = \frac{h_i}{h_i} - \frac{\Delta h}{h_i} = 1 - \varepsilon_i \quad (4)$$

ahol * optimális víztartalom melletti értéket jelöl,
 C_r : Compaction-rate és $i \neq \text{opt}$

Elméletileg is bizonyított [17, 28], hogy a tömörség $Cr\% = 1 - \varepsilon$, míg a tömörségi fok

$$Trd\% = 100 \cdot (1 - \varepsilon)\% \quad (5)$$

Azaz ebből már látható, hogy ha meghatároztuk a tömörségi fokot, akkor ε értéke is számítható. Ezzel a fajlagos alakváltozás σ - ε összefüggése regresszióanalízissel is meghatározható az adott talajmintára. A relatív helyszíni tömörségi fok adott terepi víztartalommal a szabványos mérési módszerrel MSZ15846 szerint:

$$TrE\% = 100 - 0,380 \cdot 1,25 \cdot D_m \quad (6)$$

Alternatíva-1 ha mérhető a teljes alakváltozás (fajlagos alakváltozás), valamint annak maradó alakváltozása minden ejtésnél, akkor akár a rugalmas alakváltozás is számítható (teljes alakváltozás – maradó alakváltozás).

Alternatíva -2 a mért rugalmas alakváltozás ugyanúgy súlyozható az ejtések számával, mint azt teszi a tömörségmérés a maradó alakváltozás sorral. Resiliens alakváltozás = teljes alakváltozás – maradó alakváltozás. Ezt az ismert képlettel számíthatjuk:

$$D_m = \left[\sum_{i=1}^{i=17} d_i \cdot \sum_1^i SUM \Delta s_i \right] \cdot \frac{1}{17} \quad (7)$$

ahol Δs helyére az $(s - \Delta s)$ kerül, minden más változatlan. A képlet szorzadó a kiemelt $(1/L)$ értékkel. A D_m jelölés helyett mást kell választani (m_r). A fajlagos alakváltozástól kiemelhető szorzóként minden tagnál az $1/L$ ezzel a fajlagos alakváltozás (ε) számításának akadály nincs

Alternatíva-3 a feszültég (σ) felfejlődése és lefutása a SMART-BC ejtő súlyánál ismert, időtartama ismert (mért) terhelés nagysága a tárcsaméretből és a *Boussinesq*-féle feszültség eloszlásból meghatározható. Ez a statikus tárcsás E2 mérésnél és a dinamikus E_d mérésnél a SMART-BC esetében 0,35 Mpa, míg más nagy tárcsás LFWD mérés tárcsa alatti terhelése nagyságrenddel kisebb, 0,1 Mpa.

Alternatíva-4 a dinamikus tömörség- és teherbírásmérés algoritmusában korábban is alkalmazott módszer lehet a *Boussinesq* képlet alkalmazása, a maradó alakváltozás kiszűrése után kapott *tisztán rugalmas* alakváltozástól. Az alkalmazott képlet az E_d számításakor a 4-5-6 ejtésből meghatározott *alakváltozás átlagával* számol:

$$E_d = \frac{(1 - \mu^2) \cdot c \cdot p_{din} \cdot r}{s_r} \quad (8)$$

Szabványos fogalom továbbá $E_{dvég}$ végmodulus, melyet ugyanezzel a képlettel, de 16-17-18. ejtés-

ből (BC-FULL), azaz a már tömörített anyagrétegre meghatározott süllyedési amplitúdókból számítjuk (CWA15846 és MSZ15846). Ezzel analóg lehet, hogy még ennél is több ejtéssel, vagy az utolsó ejtések előre-számítással meghatározott „**virtuális amplitúdókból**” határozzuk meg a M_r reziliens modulust. A tömörségi fok mérésének végén ugyanis, a tömörítő ejtések hatására a maradó alakváltozás folyamatosan csökken, a süllyedési amplitúdó pedig mindig a tisztán rugalmas alakváltozáshoz közelít.

Alternatíva-5 Lehetséges a 18 ejtéses teljes sorozatú dinamikus tömörségmérés (BC-FULL) megismétlése a tárcsa elmozdítása nélkül, újabb 18 ejtéssel. Ennek eltűrését segíti, hogy a mostani szabályozás is tartalmazza a CWC munkavégzési korrekció számításához az ismételt mérést a tárcsa elmozdítása nélkül. [Meg kell jegyezni, hogy a túltömörítés egy idő után hullámzó alakváltozást mutat (fellazulás – tömörödés) ami pont az átlaggal szűrhető ki jól. Ha több mint 3 plusz ejtéssel, vagy akár (és ez a mérés szempontjából a külső helyszínen még a megtűrhető maximum) 18 db újabb ejtéssel kívánunk operálni – azt is megtehetjük a mérési eredmény fontosságára való tekintettel.]

Egyéb feltételek és megfontolások, próbaszámítások

Ha *Boussinesq* által leírt feltételeket, a feszültség-alakváltozás általános összefüggését elfogadjuk érvényesnek az *összenyomódás utáni kitágulási szakaszra* is (2. ábra) akkor megállapíthatjuk, hogy

- az alakváltozás terepen a terhelési idő alatt kizárólag elektronikával, csak gyorsulásmérővel mérhető, azaz kézi mérőórával, vagy induktív jeladóval nem. A bélyeges mérési mód szemcsés anyagoknál nyilvánvalóan nem lehetséges
- A tárcsa alatti terhelés nagysága megfelelő tartomány, a reziliens modulusnál alkalmazott Poisson-tényező beállíthatósága fontos, merev Boussinesq-féle tárcsaszorító alkalmazása nem nélkülözhető ($c = \pi/2$) a méréskor.
- A dinamikus tömörség- és teherbírás mérési eljárás szabványosított, de nyilvánvalóan továbbfejleszhető az M_r mérésére is
- M_r mérésének szabványosítása tehát egyszerű lenne, mert a mérőeszköz és paraméterei egyértelműen adottak, a mérési mód kiválasztása után annak rögzítése a már meglévő szabvány módosításával (referenciával alátámasztottan) lehetséges lehet.

A megoldás finomítható és pontosítható megfelelő statisztikai megbízhatóságú és mintaszámú hely-

színi és laboratóriumi vizsgálatokkal, anyag típusokra külön, vagy egyezés esetén általánosíthatóan. Kérdés lehet a további kutatáshoz, hogy az alternatív pályaszerkezet tervezési paramétereinek megválasztásában kiindulásként jelenleg feltételezett statikus – dinamikus teherbírás értékek lineáris összefüggése tartható-e, vagy más, pl. hatványkitevős formája közelíti-e jobban a valóságot.

A dinamikus tömörség és teherbírás *legújabb típusa a SMART-BC applikáció már az okostelefont használja fel műszernek*. Ez az oka, hogy a jelenlegi elméleti fejlesztés kizárólag szoftver fejlesztéssel járna csak és persze a szükséges számú mérésekkel és kiértékeléssel. Eredménye:

- meglévő gyors, pontos mérőeszköz,
- igen sok adat, gyorsan és olcsón,
- a mérési módszer eredményeinek felhasználása a méretezéshez szükséges, adódik, hogy lehetséges a szakaszolás, lehetséges a gyakori mérés, akár 10–20 méterenként, akár oldalonként, akár sávonként, akár keréknyomonkénti keresztmetszetben.
- A digitalizáció, az ITC iparág rohamos fejlődése, az azonnali elérhetőség, azonnali adat-továbbítás, a drive-alkalmazás terjedésével, térinformatikai alkalmazással a várt eredmény hasznossága lényegesen növekszik és forradalmi előrelépést jelentene.

A **próbaszámításokat** BC-FULL 18 ejtéses adat-sorokon teszteltük, melyet az Andreas Kft 2006-ban Portugáliában mért. A Portugáliai Műszaki Egyetem Geotechnikai Tanszéke, Prof Correia meghívására Evola mellett egy épülő gyorsvasút földmű koronaszintjén szervezett kísérleti szakaszt, ahol – sok más műszer és módszer mellett – a magyar dinamikus tömörség- és teherbírás mérő berendezés is tesztelésre kerülhetett (6. és 7. ábra).



6. ábra. Portugália, elkészült pályaszakasz



7. ábra. Portugália, próbabeépítés helyszíne

A jelenlegi feldolgozást az itt mért adatokból készítettük. A 4-es alternatíva részeként 4-5-7-10 virtuális

lis pontokat vettük fel a hármas és ötös átlag különbségéből számított Δ értékből számítva, melyet az 5-ös ejtési sorozat 3-as mozgóátlaghoz tartozó pontból számítunk $n=21, 22, 24, 27$ ejtési pontokhoz (5. ábra), majd ezeket a alternatív pályaszerkezet méretezés tervezési útmutatójában alkalmazott (jelenlegi) Mr-E2 trendhez viszonyítottuk (8. ábra).

A számítás elve:

$$S5\acute{a} = (s51+s52+s53)/3, \quad (9)$$

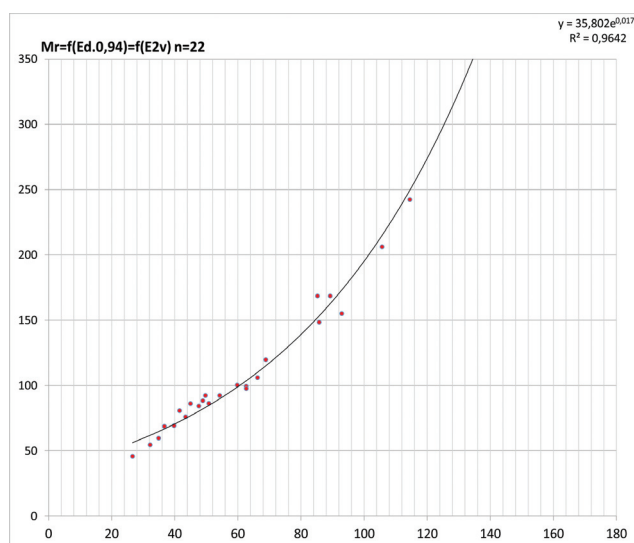
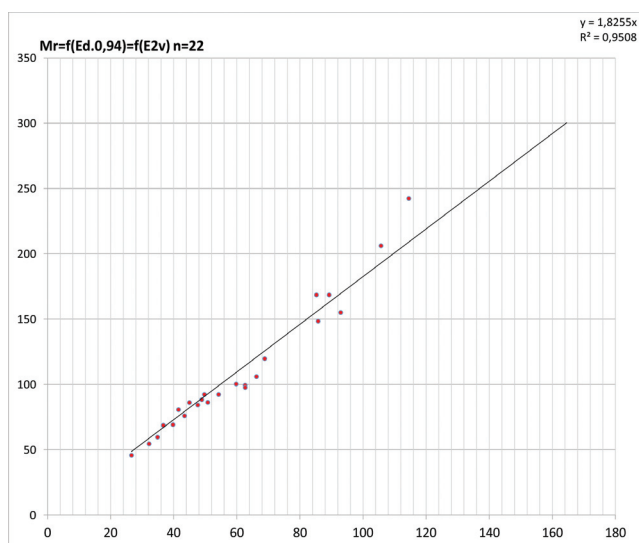
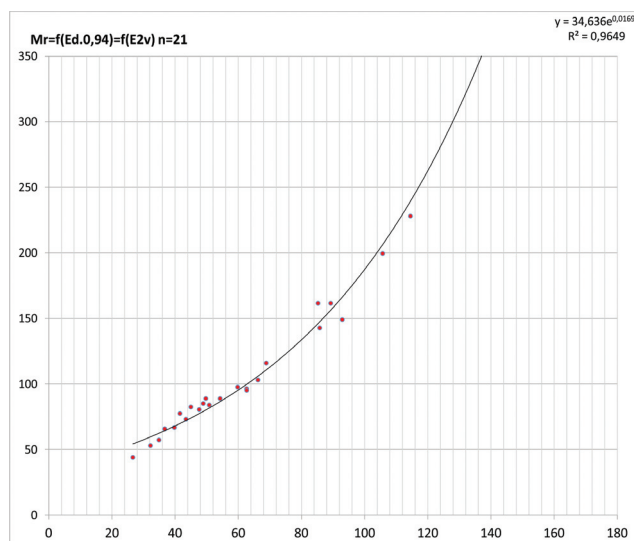
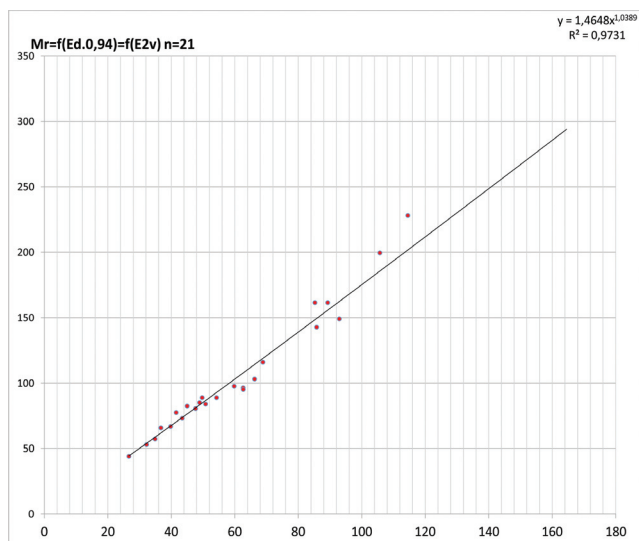
valamint

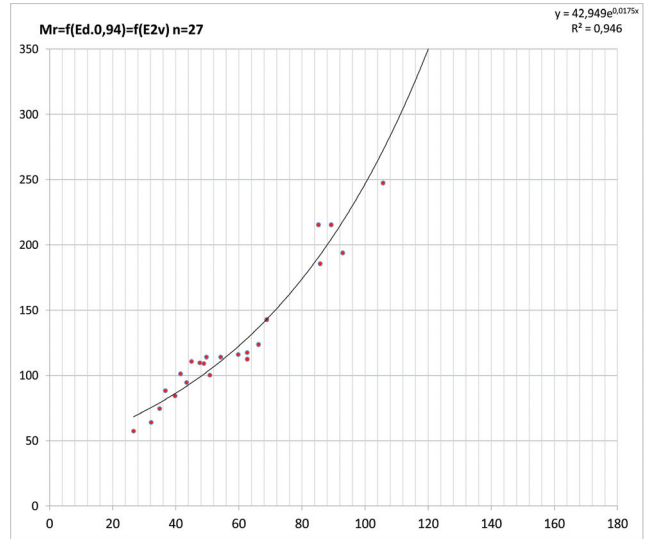
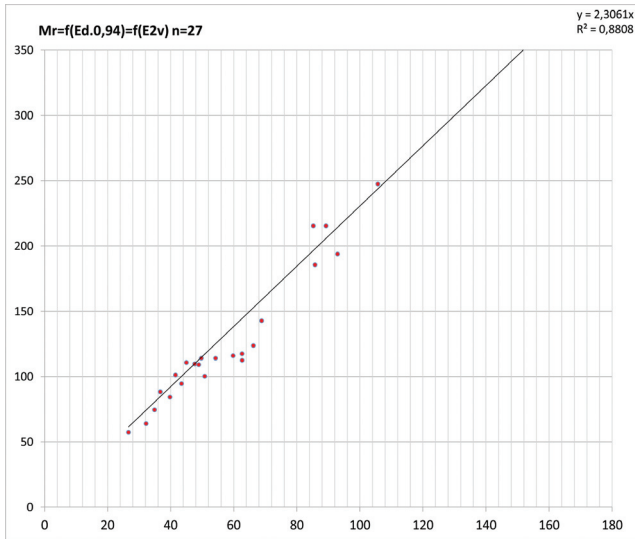
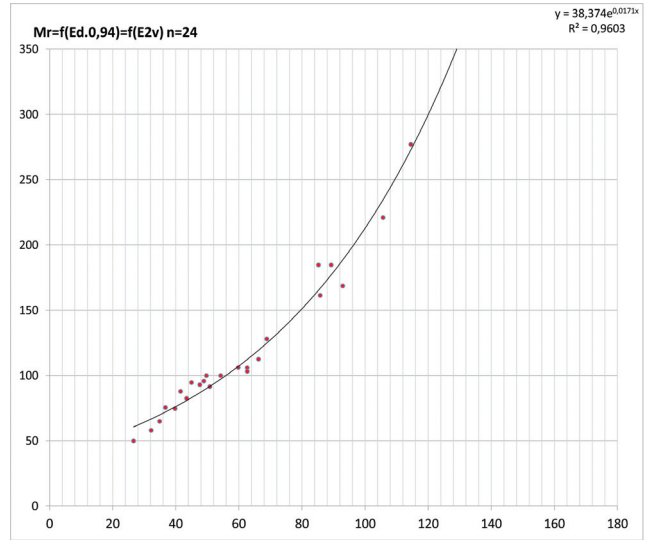
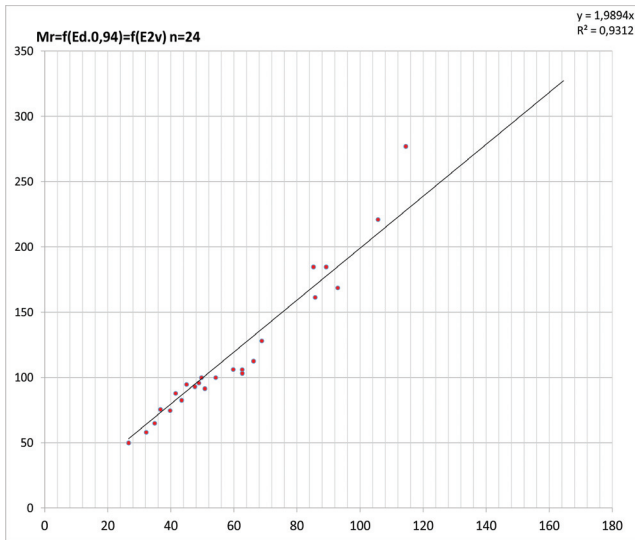
$$S45\acute{a} = (s42+s43+s51+s52+s53)/5 \text{ utolsó öt süllyedés mm átlaga}$$

$$\Delta = (S45\acute{a} - S5\acute{a}) \text{ mm (és } \Delta < 0 \text{ esetén } sr=s53-0,05 \text{ mm) (lásd 9. ábra),}$$

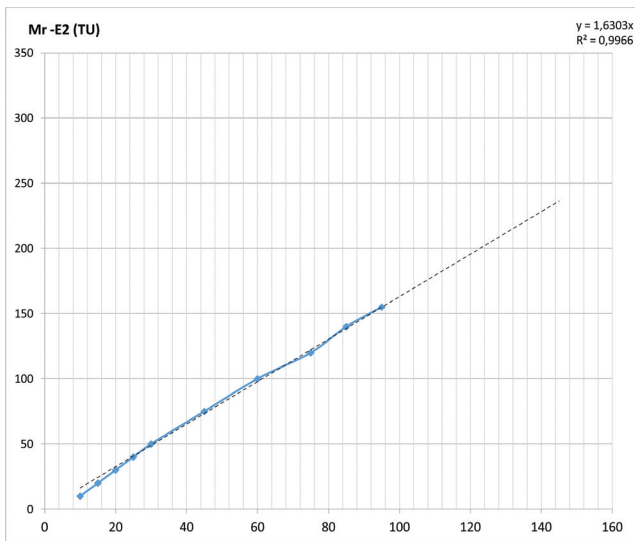
végül

$$Sr = S5\acute{a} - 4 \cdot \Delta \text{ (mm) rugalmas alakváltozás az } M_r \text{ számításához (n=21 esetén)}$$





8. ábra. SMART BC előzetes érzékenység-vizsgálat n=21 /22 /24 /27



9. ábra. Mr-E2 Alternatív TU 2016 táblázatos értékei – kérdés, maradhat-e lineáris vagy sem

Konklúzió

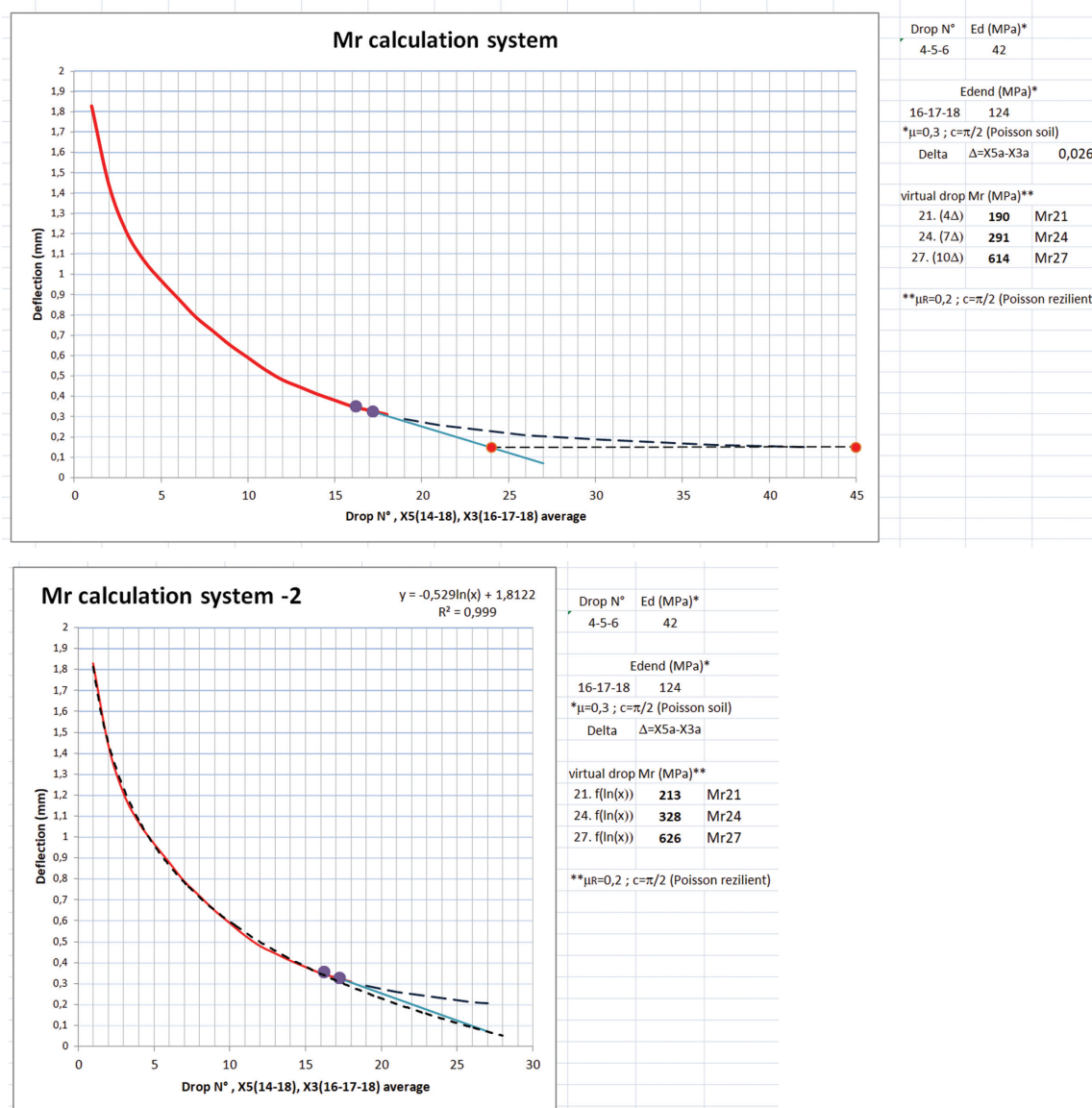
A reziliens modulus M_r előzetes mérésekkel igazolva számítható lehet a dinamikus tömörség- és teherbírás mérésből, ha a 2. és 3. ábra szerinti, tisztán rugalmas alakváltozás tartományát a terhelési ciklusokkal elértük. Ekkor az E_d számításánál alkalmazott E_d (MPa) képlettel számítható.

A dinamikus tömörség-teherbírás mérési elve és módszere alkalmas arra, hogy az alkalmazhatóságot elemezni lehessen.

Az M_r mérése igen gyors és pontos, nagy mintaszámban meghatározható (talaj)vizsgálati paraméter lehetne.

A javasolt meghatározási módszer egyszerűen mérhető, elve logikus, nagyságrendjét azonban az eddig alkalmazott feltételezett értékek tartományához kell illeszteni.

Rendkívüli fontosságú, hogy az M_r reziliens modulus helyszíni meghatározása a SMART-BC műszerrel



10. ábra. Virtuális módszer – M_r meghatározása a SMART-BC mérésből (maradó alakváltozás nulla)

rel lehetséges, mert lehetővé teszi a széleskörű alkalmazhatóságot

További kutatások dönthetik csak el, hogy a virtuális $n=21-22-24-27$ pontok megoldásai közül melyik lesz alkalmazható. A közelítő görbék (8. ábra) regressziós összefüggések, trendek jellegének megválasztásakor az lesz döntő, hogy a jelenlegi alkalmazások mely paraméterekkel lesz a leginkább egyező.

Összefoglalás

A terepen mért reziliens modulus óriási előrelépés lehet a táblázatból vett, általános értékek alkalmazása helyett, főleg azért, mert az alternatív pályaszerkezet méretezés pont az általánosítást kívánja

elkerülni és a valós körülményeket, tényleges teherbírást kihasználni a pályaszerkezeti rétegek pontos méretezésekor. A könnyűejtsúlyos, dinamikus mérések terjedésével lehetségessé vált a SP-LFWD kistárcsás mérés is, ami fontos, mert ennek tárcsa alatti terhelése az egyetlen, ami a statikus teherbírás mérésnél alkalmazottal egyező és a Poisson-tényező (statikusnál alkalmazott értékű) figyelembe vétele is szabványos mérési előírás.

A BC dinamikus tömörség- és teherbírásmérés korábbi kutatási adatai és összefüggései emiatt bevonhatók lesznek a további elemzésekbe.

Az alkalmazásra nyitott a magas- és mélyépítő iparág, repülőtereket, építési alapokat, vasutat, utakat, pályaszerkezeteket tervező mérnökirodák, tervezők, mérnökök, laborok – mindenki mérhetné a reziliens moduluszt okostelefonos SMART-BC-vel,

az igényes alternatív méretezéshez szükséges input adatok GPS adatokkal azonosítható pontos meghatározásához.

A mérés gyakorisága igen magas lehet a rövid mérési idő miatt (virtuális pontokkal számítható), ami lehetővé teszi a szakaszolást, valamint valószínűségi alapokon nyugvó precíz feldolgozást. A helyszíni mérés a valós általajviszonyokat várhatóan mindennél jobban képes reprezentálni.

A reziliens modulus helyszíni mérése, valamint az alternatív méretezés támogatja az élettartam-tudományt és jelentős környezetvédelmi szempontból. Minden lehetséges alkalmat fel kell használni arra, hogy az input adatok száma bővíthető legyen, mert ezzel a méretezés a valós környezethez jobban illeszthető.

Érdekelt lehet az innovációban a közúti adminisztráció a beruházások optimalizálása miatt, az országos úthálózat üzemeltetője az élettartam és fenntartási ciklusok pontos tervezése miatt. Hasznos segítsége lehet az önkormányzati és magánutak üzemeltetőinek, kutatók és egyetemek számára, akik a reziliens modulus kutatásán és alkalmazásán fáradoznak.

A K+F+I munkában ajánlott próbaszakasz építése, nagy mintaszámú kontroll vizsgálat és annak statisztikai kiértékelése – a választott végleges módszer kiválasztása, validálása a mérés véglegesítése és bevezetése előtt. Az LFWD 300 mm-es tárcsás mérési próbálkozásai után vélhetően egy gyors, olcsó és biztonságos új mérési módszer válna lehetővé a világon először, a reziliens modulus pontos és megbízható közvetlen meghatározására.

Mivel a mérési módszer eredményeinek felhasználása az alternatív pályaszerkezet méretezéshez szükséges; adódik, hogy lehetséges a szakaszolás, lehetséges a gyakori mérés, akár 10 m-ként, akár oldalanként, akár sávonként, akár keréknyomonkénti keresztmetszetben felvett GPS helyazonosítással felvett pontokon – bárhol a térben.

A mérés igen gyors és eredménye a helyszínen azonnal rendelkezésre áll, a mért adat azonnal továbbítható. Példátlanul pontos pályaszerkezet méretezést lehetne elvégezni szakaszolással, akár hossz és keresztirányban is – sőt akár 3D térinformatikai feldolgozás bevezetésével. A tervezés kibővítendő lehetne a lokális hibák tervezett javításával és ezen pontok lehelyettesítésével – már tervezéskor, mely önmagában több cm vastagságú megtakarítást eredményezne az aszfaltrétegek szükséges vastagságában.

A reziliens modulus mérése SMART-BC-vel hatalmas lehetőség lenne az önellenőrzésre és QC, QA biztosítására is, nemcsak tervezéskor. Fontos, hogy a SMART-BC 0,01 mm-es mérési pontossága magas, akár 3000 MPa reziliens modulus helyszíni mérésére is képes.

A jelenlegi MSZ 15846 dinamikus tömörség- és terhebrás mérési szabvány könnyen kibővíthető az újabb Mr Reziliens Modulus, vagy annak közelítő terepi mérésével, mert a készülék, a mérési elv, karbantartás, kalibrálása ugyanaz, „mindösszesen” egy mért paraméterrel több a mérési lehetőség.

Különösen aktuális és különleges előny, hogy a SMART-BC projektbe ezek a paraméterek már bevitelők, tájékoztatásként alkalmazhatók az átszámítások – összefüggések menüpontban. A mérés lehetőségének megteremtésével pedig a további K+F munka alapjait biztosítja.

Irodalom

- [1] Back M, Szenfdefy J: Reziliens modulus mérése és talajstabilizációknál mért értéke. <http://utugyilapok.hu/cikkek/reziliens-modulus-merese-es-talajstabilizacioknal-mert-erteke/> érvényes 2019-06-23
- [2] Primusz P, Tóth Cs. (2018): Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek egyszerűsített analitikus méretezése. *Közlekedéstudományi szemle*, 2018; 68(5):17-33. ISSN 0023-4362, <https://doi.org/10.24228/KTSZ.2018.5.2>
- [3] Shu-Rong Yang, Wei-Hsing Huang, and Yu-Tsung Tai: Variation of Resilient Modulus with Soil Suction for Compacted Subgrade Soils. Department of Civil Engineering, National Central University, Jungli, Taoyuan 32054, Taiwan. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1913, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp. 99–106., <https://doi.org/10.3141/1913-10>
- [4] MnRoad USA Minnesota Department of Transportation <http://www.dot.state.mn.us/materials/mr/> érvényes 2019-06-23
- [5] Achampong F, Usmen M, Kagawa T. Evaluation of resilient modulus for lime- and cement-stabilized synthetic cohesive soils. 1997. <https://doi.org/10.3141/1589-12>
- [6] Berg RL, Bigl SR, Stark J, Durell G. Resilient Modulus Testing of Materials from Mn/ROAD Phase1, Technical Report Minnesota Department of Transportation. 1996. <https://doi.org/10.21949/1404573>
- [7, 8] Durham G, DeGroff W, Marr W, eds., Resilient Modulus Testing for Pavement Components. (West Conshohocken, PA: ASTM International, 2003) <https://doi.org/10.1520/STP1437-EB>
- [9] George KP. „Falling Weight Deflectometer for Estimating Subgrade Resilient Moduli”, Final Report, FHWA/MS-DOT-RD-03-153, Mississippi Department of Transportation, Jackson, MS, 2003 October. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(2003\)129:1\(100\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(2003)129:1(100))
- [10] National Cooperative Highway Research Program, 1-28A Project, “Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design, Annex A-1”, Transportation Research Board, Washington, DC, 2003. <https://doi.org/10.17226/21960>

- [11] Jin MS, Lee KW, Kovacs WD. „Seasonal Variation of Resilient Modulus of Subgrade Soils”. ASCE Journal of Transportation Engineering, 1994 July/August; 120(4): 603-616.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1994\)120:4\(603\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1994)120:4(603))
- [12] National Cooperative Research Program, “Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structure, Appendix DD-2”, Transportation Research Board, Washington, DC, 2000.
- [13] Houston WN, Mamlouk MS, Perera RWS. „Laboratory versus Nondestructive Testing for Pavement Design”, ASCE Journal of Transportation Engineering, 1992; 118(2):207-222.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-947x\(1992\)118:2\(207\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-947x(1992)118:2(207))
- [14] Qiu X, Yang Q, Wang B, Luo X. (2014): Prediction model of dynamic resilient modulus of cohesive subgrade soil based on triaxial test system, Key Engineering Materials 2014; 579-580:873-876.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.579-580.873>
- [15] SAS W, Gluchowski A, Szymanski A. Determination of the Resilient modulus MR for the lime stabilizaed clay obtained form the repeted loading CBR test, Annals of Warsaw University of Life Sciences Land Reclamatoin, 2012; No44.
<https://doi.org/10.2478/v10060-011-0070-0>
- [16] Karoliny Márton: Közlekedési pályák teherbíróképessége. A földmű hatásai. Útügyi Lapok; 2013.
- [17] Subert I, Imre E, Garai J, Tompai Z: Test and Method is Proposed for Measuring the Dynamic Compaction-rate and Dynamic Modulus in Earthworks. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017; p:4, f:4, R:20, LP,CA
- [18] Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere.
<http://utugyilapok.hu/wp-content/uploads/2015/11/Tervez%C3%A9si-%C3%BA%20mutat%C3%B3.pdf>
érvényes 2019-06-23
- [19] ÚT2-1.503 (eUt06.03.12) Kisforgalmú utak pályaszerkezetének méretezése.
<https://ume.kozut.hu/dokumentum/116>
érvényes 2019-06-23
- [20] ÚT2-1.202 (eUt06.03.13) Aszfaltburkolatú utak pályaszerkezetének méretezése és megerősítése.
<https://ume.kozut.hu/dokumentum/117>
érvényes 2019-06-23
- [21] Pethő L, Szentpéteri I. Hajlékony és félmerev pályaszerkezetek méretezése Ausztráliában.
<http://utugyilapok.hu/cikkek/hajlekony-es-felmerev-palyaszerkezetek-meretezese-ausztraliaban/>
érvényes 2019-06-23
- [22] Szendefy J. A hazai talajok szerkezetének és teherbírásának változása meszes talajstabilizáció hatására, PhD dolgozat, Budapesti Műszaki És Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar. 2009.
- [23] Szendefy J. Viacalcoval kezelt talajok laboratóriumi vizsgálata, Geotechnika Konferencia, Ráckeve, 2014.
- [24] Szendefy J. Kutatási jelentés aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének alternatív módszere című tervezői utasítás geotechnikai paramétereinek pontosítására. 2017.
- [25] Vogrig M, et al. A Laboratory Technique for Estimation the Resilient Modulus of Unsaturated Soil Specimens from CBR and Unconfined Compression Test, 56th Canadian Geotechnical Conference, 2003.
- [26] Primusz P, Péterfalvi J, Markó G, Tóth C. Effect of Pavement Stiffness on the Shape of Deflection Bowl/ A pályaszerkezet merevségének hatása a behajlási teknő alakjára, Acta Silvatica et Lignaria Hungarica, 2015; 11(1): 39-54. doi: <https://doi.org/10.1515/aslh-2015-0003>
- [27] Subert I. Application of Density Correction in Use of Dynamic Falling Weight Devices / Sűrűségkorrekció alkalmazása dinamikus ejtősúlyos berendezéseknél Road-issues Journal/ Útügyi Lapok 16-jan-2016 LP
- [28] Subert I. CWA15846 Theory of Dynamic-compactness and Modification Background / CWA15846 Dinamikus tömörségi-fok elmélete és módosításának háttere. Road-issues Journal/ Útügyi Lapok 15-dec-2015 LP
- [29] Subert I. Dynamic compactness and bearing capacity measurement – success of a Hungarian measurement method / Dinamikus tömörség és teherbírás mérés – egy magyar mérési módszer sikere. Civil Engineering Science Bulletin / Mélyépítéstudományi szemle dec-2015 LP
- [30] Subert I. Compactness and bearing capacity measurement methods used in Europe – Portugal report / Európában használatos tömörség- és teherbírás módszerek – Portugália beszámoló. Roads Sheets dec 2015 / Útügyi Lapok 2015 dec LP
- [31] Subert I. The potential impact of inhomogeneity of Road Earthwork Compactness on achievable IRI roughness requirements / Földmű tömörségi inhomogenitás lehetséges hatása az utak új IRI egyenetlenségi követelményének teljesíthetőségére. Lecture and article / Előadás és cikk. 25th Geotechnical Jubilee Conference Ráckeve, 12-14. oct. 2015/25 Jubileumi Geotechnikai Konferencia Ráckeve 2015. 10.12-14.
- [32] Subert I. Self-Control Compaction rate & Bearing Capacity on Stabilization / Önellenzés – Stabilizációk tömörség- és teherbírás mérése. International Conference of Dr Arpad Kezdi 21-05-2015 / Dr Kézdi Árpád Konferencia 2015-05-21 Budapest, Hungary CA
- [33] Subert I. CWA15846:2008 Modification Draft and Main Background Studies. CWA15846:2008 módosítási javaslat és főbb háttér tanulmányai. Engineering Geology – Rock Mechanics 2015 Congress. BMGE Hungary. p.379-394 CA
- [34] Subert I. „Method for measuring Compactness-rate with New Dynamic LFWD. XIII. Danube-European Conference on Geotechnical Engineering Ljubljana, Slovenia, 2006. CA
- [35] GINOP-2.1.7-15-2016-00179 projekt “SMART-BC – Okostelefonra fejlesztett dinamikus tömörség- és teherbírás mérés kutatása és prototípus kifejlesztése”
- [36-43] Patent N°43917 Thailand, Patent 200980107701.2-CHINA, Patent US008448492B2-USA, Patent MA 32569 Marocco, P08 00441-HU, Patent P 03 01895-HU, Patent EP.1.338.704-EU, Patent P02 00715-HU.



Betonút csak a Lajtán túl? (1. rész)

Erdélyi Attila¹, Fenyvesi Olivér², Gável Viktória³, Gál Attila⁴

¹ BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék és Cemkut Kft.,

² BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék,

³ Cemkut Kft.,

⁴ Betontechnológia Centrum (BTC) Kft.

e-mail: erdelyi.attila33@gmail.com; fenyvesi.oliver@epito.bme.hu; gavelv@cemkut.hu; gala@btclabor.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.06

Kivonat Az egyre sűrűbb nehézjármű-forgalom és a növekvő tengelysúlyok viselésére az aszfaltburkolatok – az éghajlati melegedés hatásával tetéztve – sok helyen már nem felelnek meg. Az Amerikai Egyesült Államok 45 államának tényleges pályázati árajánlatait elemezve igazolták, hogy az államok adott évi 200 millió dolláros költségvetéséből összesen több km út építhető meg, ha a betonútépítő iparág részesedése a költségvetésből mintegy 35–40%-os (és az aszfalté így „csak” 65–60%), mert az így beálló egészséges versenyhelyzetben mind a beépített aszfalt, mind a beton egységára csökken. A helyes és gazdaságos arányt igazolják a tőlünk nyugatra fekvő országok aszfalt/beton pályaburkolati viszonyszámai is (1. táblázat). Piaci versenyhelyzet nélkül a pályaburkolat kiválasztási eljárása értelmetlenné válik (Wathne L, ACPA). Vannak továbbá olyan esetek, amikor – az ártól függetlenül – a burkolatok gyors felújításához vagy cseréjéhez csak beton: „gyorsbeton” alkalmazható, pl. repülőtéri kifutópályáknál, nagyforgalmú autótutaknál stb., amikor már 5 (zürichi repülőtér)vagy 8–12–24 órás elzárás után a betonpályát át kell adni a forgalomnak. A gyorsbeton – a gyorsan szilárduló cement és a folyósító adalékszerek révén – már néhány óra vagy legföljebb 1 nap múlva (pl. M7-es út, táblacsere) eléri a terhelhetőséget jelentő kb. 20 N/mm² nyomó- és 4–5 N/mm² hajlítószilárdságot. Cikkünk következő, 2. részében további betonútépítési módokat tekintünk majd át (mosott beton, White Topping, azaz fehér/beton/szönyegezés aszfalton vagy betonon, autópálya-építés újrahasznosított betonból, betonnyomsávós és egyéb betonanyagú mező- és erdőgazdasági utak).

Kulcsszavak betonburkolat, beton kontra aszfalt, útburkolatfajta kiválasztása, piaci árverseny, globális felmelegedés, gyorscement, gyorsbeton

Concrete roads only westward from Hungary?

Abstract Asphalt pavements nowadays on many motorways do not correspond highly requirements caused by the continuously increasing number of heavy vehicles and axle loads. The global warming is also impairing the rideability of asphalt pavements under such conditions. An analysis of the actual bid data and unit prices for asphalt and concrete in 45 states of the USA is rendering the following data. From the same sum of budget less km length road can be built, if only one single type of pavement, i.e. asphalt is applied (and only such types of firms are involved in contracts), as compared to the case of a competitive market with concrete pavement building companies. If so, when sharing the budget with abt. 30–40% in favour of concrete pavement and such companies and so „only” the rest 70–60% goes to asphalt road building, then due to the competition of the two types of road building companies both the unit price of asphalt and that of concrete will decrease significantly. USA experts (e.g. L. Wathne, ACPA) say that there is no equitable and meaningful pavement type selection process without a competitive market. The result of such a competitive market is also proved, when looking at the asphalt/concrete road ratio percent of West-European countries (Tabl. 1.) Furthermore, there are cases of rapid pavement reconstruction necessities (eg. airport runways, busy motorways), where only the fast track paving concrete renders an acceptable solution as a traffic stop only for a few hours is allowed. Therefor a „fast concrete” attaining abt. 20 N/mm² compressive and 4–5 N/mm² flexural strength within these few hours must be used. The Part 2 of this paper will deal with other useful concrete pavement types (exposed aggregate surface concrete, White Topping, the use of recycled concrete in road building, agricultural concrete roads, etc.)

Keywords concrete pavement, concrete versus asphalt, selection of pavement type, market price competition, global warming, rapid cement, fast track paving

Dr. Erdélyi Attila

(1933-) okl. mérnök (1956), ny. egyetemi docens, a műszaki tudomány kandidátusa. Kivitelező a Máv Hídépítő Vállalatnál 1961-ig, majd tervező a Vizitervnél 1963-ig. Tanársegéd, majd 1965-től adjunktus dr. Palotás László professzor mellett a BME Építőanyagok Tanszéken. 1973-ban egyetemi doktor, 1984-ben a műszaki tudomány kandidátusa, 1985-től egyetemi docens, 1991-től 1995-ig tanszékvezető. A FIP, majd fib Acélbizottságának volt magyar tagja, és a MAÚT tagja. 2003-ban Palotás-díjat kapott. Szakterületei: feszítő acélok relaxációja, feszítési veszteségek, adalékszerek, különleges sózás és fagyálló út-, híd-, vízpítési-, továbbá nagyszilárdságú-, tömeg- és gyorsbetonok, acélszálas betonok, nagyműtárgyak betontechnológusa. Hazai és európai szabványosítás. Szakmérnöki és régebben mérnöktovábbképző, doktorandusz és angol nyelvű oktatás a fenti tárgykörökben.

Dr. Fenyvesi Olivér

(1981-) adjunktus, BME, okl. építőmérnök (BME 2005), szerkezetépítő PhD (BME 2012), műemlékvédelmi szakmérnök (2017), korróziós szakmérnök (2018), adjunktus a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén. Fő kutatási területei: betonok korai (autogén + száradási) zsugorodása, korai zsugorodási repedések közönséges és könnyűbetonokban, szálerősített betonok, szálerősített könnyűbetonok, könnyűbetonok tartóssága, önterülő könnyűbetonok, útbetonok, betonszerkezetek korróziója, épületdiagnosztika, épített örökség védelme. A Szilikátipari Tudományos Egyesület Beton Szakosztályának titkára, illetve Kő és kavics Szakosztályának tagja, a FIB (Nemzetközi Betonszövetség) Magyar Tagozatának tagja.

Dr. Gábel Viktória

(1975-) kutatómérnök, Tanúsítási Iroda vezető, CEMKUT Kft., okl. előkészítéstechnikai mérnök (Miskolci Egyetem 1998), szerkezetépítő betontechnológus szakmérnök (BME 2006), földtudományi PhD (Miskolci Egyetem, 2013), c. egyetemi docens (Miskolci Egyetem). Fő kutatási területei: klinkerek és cementkiegészítő anyagok örölhetősége; őrlési finomság értékelése; alternatív nyersanyagok cementipari felhasználhatósága; csökkentett klinkerhányadú cementek őrlési technológiája, szemcseméret-eloszlása, minősége, alkalmazástechnikai tulajdonságai, csökkentett klinkerhányadú cementekből készült betonok teljesítőképessége, tartóssága. A Szilikátipari Tudományos Egyesület szakértője (2012), az MSZT/MB 102 Cement és mész nemzeti szabványosító műszaki bizottság elnökhelyettese (2019).

Gál Attila

(1984-) okl. mérnök, Műszaki Földtudományi Kar, Környezeti eljárás-technikai és hulladék-előkészítéstechnikai szakirány (2009 Miskolci Egyetem), Nemesdy Ervin diplomadíj, Harsányi István tanulmányi ösztöndíj. Ellenőrző mérnök (2010-2018 Cemkut Kft.) Kutatási Terület: cementek szulfátduzzadásának mérése, cementek savállósági vizsgálatának fejlesztése. Laboratóriumvezető (2018-tól jelenleg is) Beton Technológia Centrum Kft.

1. Kérdésfeltevés

Az egyértelmű éghajlati felmelegedés, a nehézgépjármű forgalom és a tengelysúlyok növekedése, a sűrű forgalmat akadályozó – a gyakoribb felújítások okozta – útlezárási és torlódási hátrányok miatt az aszfalttól a jó láthatóságú és tükröződésmentes felületek, a tartósan jól járható, kevesebb fenntartást igénylő betonpályák irányába kell eltolódnia az autópályák, gyorsforgalmi és megkerülő utak burkolatválasztásának.

Igazolni fogjuk, hogy ez *műszakilag is és gazdaságilag is* helyes megoldás (Asphalt Roads VS Concrete Roads, Liptay A, 1966; Liptay, 2012).

A betonburkolat *nem gyúlékony*, ezért alagutakban és a hozzá vezető szakaszokon sok országban kötelező, benzinkutak környezetében mindenütt. A világos színe miatt jó fényvisszaverő, és ezért nagyvárosok *hőszigeteteinek* megszüntetéséhez (az egyébként még kedvezőbb zöldfelületek növelése mellett) az *aszfaltot betonnal helyettesítik* vagy azzal vonják be (White Topping vagy „fehérszőnyegezés”). Ugyanazt a megvilágítás erősséget (cd/m^2) kevesebb energiával lehet elérni. Jobb a

járművek és személyek *éjszakai láthatósága* (Maier et al., 2016): és rövidebb a *fékút* a betonburkolatú utakon. A *súrlódási együttható* 7 év után is azonosnak tekinthető a kezdeti értékekhez képest (Haider és Steigenberger, 2007, 3. ábra). Ezekre a kérdésekre a cikk 2. részben, amely az Útügyi Lapok őszi számában fog megjelenni, még visszatérünk. A fentiekén kívül a betonburkolatok széleskörűen ismert további előnyei:

- Alaktartó, *nagy hőmérsékleten sem keletkeznek nyomvályúk*, a vizencsúzás előfordulásának veszélye kisebb.
- A hézagképzés a *teherátadó vasalás révén (dűbel) mára már megoldott*, és a régi panaszok a táblák közti lépcsőképződés miatt ezzel teljesen megszűntek.
- Az aszfaltburkolatok élettartama általában 17–20 év, ezen belül 5–10 évenként felújítandók, ehhez képest a *betonutak élettartama* 30–40 év, 3–8 évente csak a hézagkiöntéseket kell javítani, nagy felújításra pedig átlagosan 25 év után van szükség.
- Az egyre növekvő tengelysúlyoknak és ezzel együtt járó *nyíróerőknek a betonburkolatok, a*

nyári felmelegedések esetén is alakváltozás nélkül megfelelnek.

- A betonburkolatokon a gépjárművek üzemanyag-fogyasztása és a károsanyag-kibocsátása kisebb, mint aszfalt burkolatokon (nem „gyúrnak” az aszfaltot és meleg időjárási viszonyok között kevésbé ragadnak) (Sommer, 2018, és Europave, 2009).
- A kezdetben kedvezőbb zajkibocsátású aszfalttal szemben a forgalmi zaj hosszú távon, betonburkolatokon kevésbé nő, mint az aszfalt változatoknál. Kétségtelen, hogy ma már léteznek zajcsökkentő vékonybevonatos aszfaltok, amelyek ennél jobb zajszint értékekkel jellemezhetők (Breyer et al., 2009, 2. ábra).
- Fotokatalitikus úton az NO_x és karbonátosodással a beton a CO₂-gázokat meg tudja kötni (Europave, 2009) bár az is igaz, hogy ez utóbbi esetén ugyanez a CO₂-mennyiség a cementgyártáskor kibocsátásra kerül, ami azonban más mértékű CEM I. tiszta portlandcement és más pl. CEM II. A/B-S utépítési kohósalak portlandcement esetén (Europave, 2009, 4. ábra).
- Gyorsbetonok alkalmazásával a pályazár 24, 12 órára vagy még rövidebb időre csökkenthető. A zürichi repülőtér futópályáit 6 órás éjszakai repülési szünetek alatt újították fel (Schnyder és Hardegger, 2012).
- A friss beton egészség- és munkavédelmi rendszabályai nagyon egyszerűek az akár égési sebeket vagy egyéb egészségkárosodást is okozható forró aszfalthoz képest (The Shell Bitumen Handbook, p.24).
- A betonhoz csak hazai alapanyagokat használunk és így áringadozása csekély a külföldről behozott nyersolajéhoz képest (olajárrobbanás).
- A betonutak anyaga újrahasznosítható (Steigenberger et al., 2011 és e-UT 05.02.31 Útbeton betonhulladék újrahasznosításával – Kausay T). Osztrák kísérletek szerint 10–15% aszfalttartalom (amely régi betonpálya esetleges bevonásából származik) nem rontja a feltört régi betonburkolat újrahasznosíthatóságát). Elkészült az ezzel kapcsolatos Útügyi Műszaki Előírás átdolgozása is.

A betonburkolatokkal szembeni kihívások és hátrányok:

- a betonutak kivitelezése nagyobb technológiai fegyelmet és gyakorlott, jól képzett munkacsoportot igényel,
- költségesebb bedolgozógépek szükségesek a betonutak építéséhez,
- a betonutak javítása hosszabb időt vesz igénybe és aprólékosabb, mint az aszfalt uta-

ké, viszont a felújítások közötti időszak jóval hosszabb,

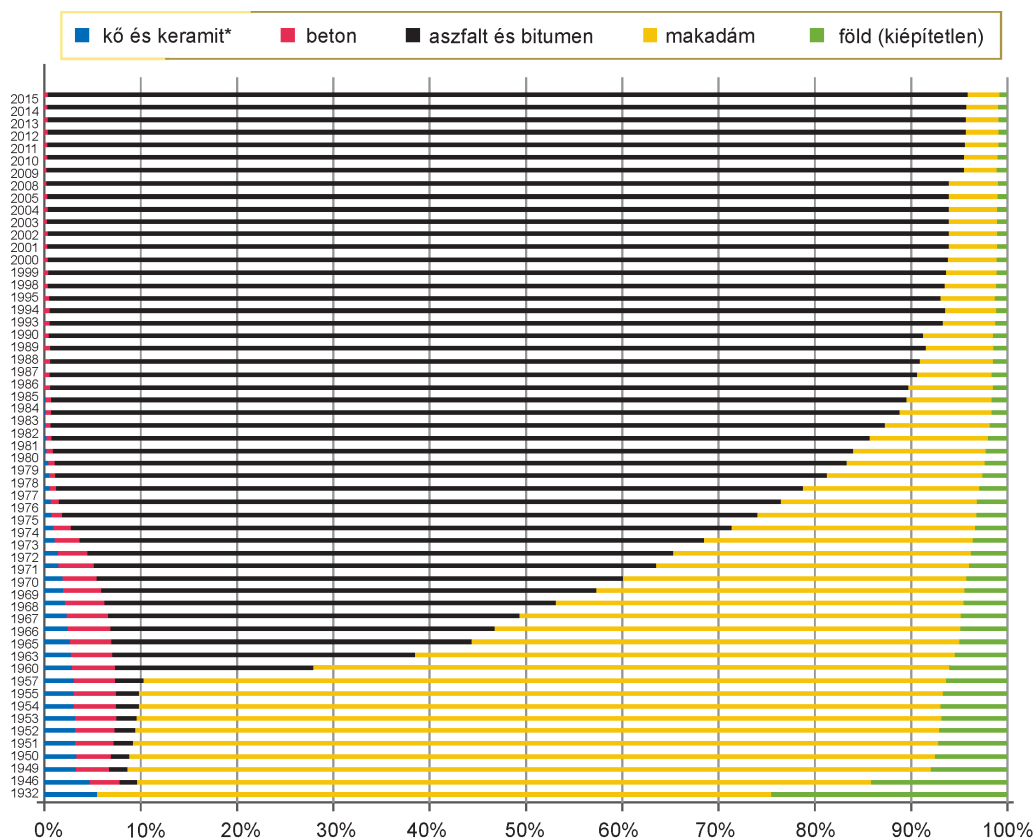
- a hézagokat rendszeresen karban kell tartani, de kb. ugyanolyan gyakran, mint amilyen az aszfaltpálya felújítási igénye,
- negatív imázs a médiában: „Mindig mindent lebetonoznak” (Jobb, ha leaszfaltozzák?),
- a vékonybeton szőnyegezés (White Topping) igényesebb feladat, mint aszfaltréteggel való felújítás, de természetesen tartósabb,
- a beton pályaszerkezet megépítése energiaigényesebb, mint az aszfalt pályáé (Tóth, 2014) de a „környezeti lábnyom” szempontjából általában a betonpálya előnyösebb (Europave, 2009, 1. ábra).

2. Helyzetfelmérés

2.1. Burkolatfajták

Magyarországon az első sikeres betonburkolatot 1911-ben építették Iglón (ma Szlovákia), amely 20 évig üzemben volt. Összehasonlításképp néhány más ország: Skóciában 1865-ben és 1872-ben; Franciaországban 1876-ban, Németországban 1880-ban, Ausztriában 1927-ben (Wallner és Steigenberger, 2008; Hulladéktároló telep kétrétegű betonburkolata) építettek először beton útburkolatot. Magyarországon az első világháború után 1927–1935 között az 1. számú főutat 320 km hosszú betonburkolattal építették át. Ezek a burkolatok 50 év múlva is használatra alkalmasak voltak és az 60 éves fűrt magminták nyomószilárdsága 55 N/mm² volt (Liptay, 2017). Hazánkban az 1950-es évek elején még több, mint 1200 km betonburkolatú út volt (Gábel és Gál, 2017). A 21-es számú salgótarjáni főút II. világháború előtt készült betonburkolata még az 1980-as években is jól járható volt, az aszfaltos felújítás ezután kezdődött.

A KTI adatbázisa szerint a burkolatfajták megoszlása 1932-ben és a továbbiakban 1946-tól 2015-ig az 1. ábrán látható. Feltűnő, hogy a piros jelzésű betonburkolat a '60-as években mintegy 5 százaléknyi, – de 1980-ra, és azután 2015-ig a betonburkolatok gyakorlatilag eltűnnek az összesítésből. A *Betonburkolatok* című könyv (Szerk. Keleti Magyar Betonburkolat Egyesület 2012, 2.10. ábra) szerint az utóbbi 20 évben 0,2–0,5% a betonburkolatok aránya az egész magyar úthálózaton belül. Az országos közúthálózati nyilvántartás szerint 2018. december 31-én a főúthálózathoz (8968 km) az autópálya, autópályán kívüli és ezek csomóponti ágai, továbbá az I. és II. rendű főútvonalak hossza összesen 8902 km. Ebből betonpálya 93 km, azaz az összes előbbi úthálózat 1%-a. Versenyhelyzet tehát nincs.



1. ábra. A magyar közúthálózat megoszlása burkolat típusa szerint (1932–2015) (KTI, 2015) <http://www.kti.hu/trendek/a-magyar-kozuthalozat-megoszlasa-burkolat-szerint-1932-2015/> Letöltés dátuma: 2019. 05. 13.

1. táblázat. Gyorsforgalmi utak burkolatfajtái [%]

Ország	Aszfalt	Beton	Helyezés
Belgium*	30	70	I
Ausztria	40	60	II
Németország	50	50	III
USA	50	50	III
Franciaország	80	20	IV
Magyarország	>97	<3	?

* Nagyrészt folytonosan vasalt betonburkolat (CRC)

Számunkra a gyorsforgalmi utak (autópálya, autótűt) burkolati fajtáinak számaránya érdekes. A számarányokról a KTI tanulmánya szerint (Karsainé Lukács K és Bors, 2009) néhány mértékadó országban az 1. táblázat adatai tájékoztatnak. Más forrásokban más számadatok találhatóak, az évszámtól is függően (Gável és Gál, 2017, [19]). Később látni fogjuk, hogy a betonburkolatok kb. 35–40%-os és afölötti aránya mind a beton, mind az aszfalt ajánlati árát – a verseny miatt – lényegesen lecsorítja. Egy külső szemlélő akár azt is megállapíthatja az 1. táblázat láttán, hogy úgy látszik „Magyarországon nem szeretnek tartós betonutat építeni.” (Bakos, 2010).

A 2018. december 31.-i adatok szerint a magyarországi főúthálózaton felület alapján összesen 2,15% betonburkolatú, a többi aszfaltos (KSH, 2018). A 2000-es évek hazai betonpálya építési kísérleteiről lásd például Karsainé Lukács K. – Bors T. BETON 2007 12. sz. p8.

A hazai betonút építés megtorpanását az utolsó évtizedekben vélhetően az M7-es betonpályának az elvártnál gyengébb viselkedése okozta. A pálya tábláit a keresztirányokban nem kötötték össze teherátadó vasalással (dűbel), noha – tudomásunk szerint – ez az eredeti terveken szerepelt, de később „népgazdasági takarékosági okokból” ezt a tervből törölték azzal a magyarázattal, hogy a vakhézagok alatt az átrepedt betonban az adalékszemek összefogozódása (aggregate interlock) a táblák függőleges irányú eltolódását meg fogja akadályozni. Ezen kívül a betonburkolat alatt közvetlenül egy vékony bitumenes homokrteg volt, amely a fugakiöntő anyag előregedése és a pályatáblák elmozdulása után a beszívargó csapadék hatására kimosódott és ez a táblák további elmozdulását tette lehetővé. A kivitelező kimondottan – hiába – kérte a teherátadó vasalás alkalmazását (Betonburkolatok szerk. Keleti I. 2012)

Az olvasztósózás okozta lehámlást légbuborékképző adalékszer alkalmazásával lehet a betonban megakadályozni. Az M7-esen vagy kevés, vagy

semmi légbuborékképzőt sem használtak, mert mindenáron a nyomószilárdságot akarták biztonságosan elérni, *holott már akkor is köztudomású volt szakmai berkekben, hogy a lég(buborék) tartalom ugyan csökkenti a nyomószilárdságot, de biztosítja a fagyállóságot.* Sajnálatos, hogy nem hivatkoztak az akkor egyébként mértékadónak tartott GOSZT szovjet szabványra, amely buborékképzős betonra 10%-os nyomószilárdságcsökkenést engedélyezett (a mostani EN 206, illetve az MSZ 4798 is egyfelkisebb szilárdsági osztályt enged meg légbuborékos betonra, azonos fagyállósági környezeti osztály pl. XF4 esetén).

2.2. Hőmérsékleti viszonyok

Az utóbbi évtizedek hőmérsékleti adatai szerint egyértelmű felmelegedés tapasztalható, ami a hőre érzékeny aszfalt pályák használhatóságát és állapotát – különösen a nyári, egymást követő hőségnapokon – rontja. Az utóbbi évtizedekben az előzőket lényegesen meghaladó éves hőmérsékleti többletek láthatók a 2. ábrán; ennél érdekesebb volna a július-augusztusi, egymást követő hőségnapok tényleges hőmérséklete és azok gyakorisága, mert ezek tapasztalat szerint növekednek, és ez az, ami az aszfalt igénybevehetőségét erősen rontja. Megemlítjük, hogy egy újsághír szerint Skóciában a 30 °C feletti hőségben az aszfalt utak annyira megpuhultak, hogy egy sajtót bejárt kép szerint a burkolaton átsétálónak a cipője beragadt az aszfaltba (Magyar Idők 2018. júl. 14. szombat, Jancsó Orsolya: „Hőhatás”; lásd még Gáspár L, 2010a és 2010b). Az aszfalt tehát kb. 10 °C-kal lesz melegebb a nap sugárzás hatására, mint a beton. A hőmérséklet az aszfaltra azonban igen jelentős hatású, például egy átlagos aszfaltkeverék -10 és +30 °C hőmérsékleti tartományban végzett merevségvizsgálata alapján

2. táblázat. Eltérő anyagú pályafelületek felmelegedése

(Peyerl et al., 2016)

(https://www.met.hu/eghajlat/eghajlatvaltozas/megfigyelt_valtozasok/Magyarorszag/ Letöltés dátuma: 2019. 05. 13.)

A kísérleti mező anyaga	Albedó	Felületi hőmérséklet (°C)
öntött aszfalt	0,12	50±1
aszfaltburkolat	0,13	52±1
beton pályalemez	0,48	48±1
* fehérbeton (WT)	0,57	41±1
** világosbeton (WT)	0,47	44±1
közönséges beton (WT)	0,48	43±1

WT = White Topping, betonszönyegezés (fehérszönyegezés), vékonybeton

* fehér cementtel

** pigmenttel fehérített közönséges cementtel

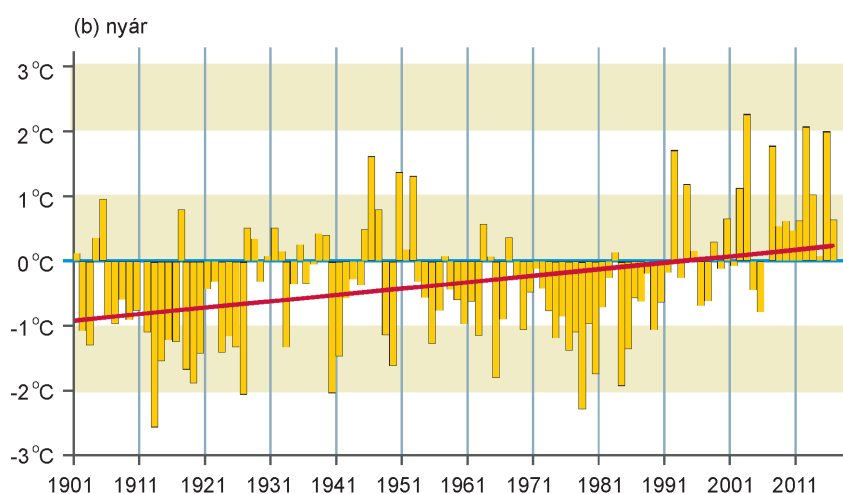
látszik, hogy a dinamikus modulusok jelentős mértékben, kb. 28 000 MPa és 2000 MPa értékek között változnak (Tóth, 2009), sőt növelve a vizsgálati hőmérsékletet az aszfalt merevsége akár 1000 MPa alá is csökkenhet.

Általános tapasztalatként megállapíthatjuk tehát az aszfalt mechanikai tulajdonságai a hőmérséklet emelkedésével romlanak, a betoné viszont nem.

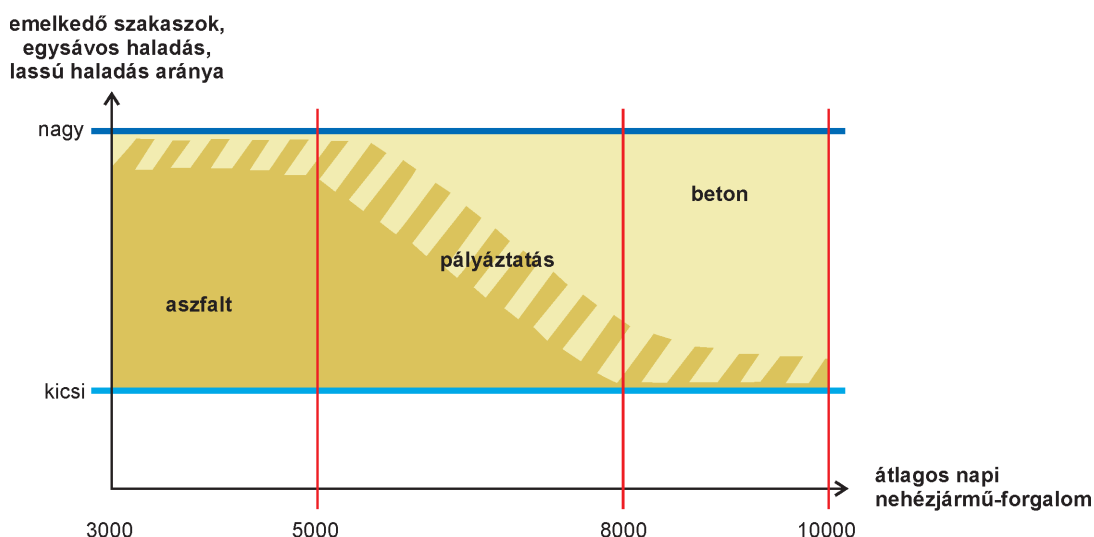
3. A pályaburkolat választás műszaki és gazdasági indokai

3.1. Műszaki okok

2004 óta a szakmában ismert a Breyer-féle diagram (vagy ismertnek kellene lennie), amely a burkolatfajta kiválasztását egyszerűsíti, lásd 3. ábra (Breyer és Steigenberger, 2006 és Breyer et al, 2009), illetve Breyer G. Entscheidungskriterien für den Bau



2. ábra. Az évszakos középhőmérsékletek országos átlagainak anomáliái (°C) 1901–2016 között. Az értékeket az 1981–2010 időszakhoz viszonyították. (Homogenizált, interpolált országos átlagok alapján)



3. ábra. Döntési séma a burkolat kiválasztásához (Breyer et al, 2009)

von Betonfahrbahndecken in Österreich. Internationale Konferenz „Betonfahrbahnen 2004“, Slavkov, Csehország)

A betonra eső választást – részben egymástól függetlenül is – kikényszerítő műszaki tényezők:

- a napi nehézármű áthaladási szám (pl. >8000),
- a pályaviszonyok: sok emelkedő, a lassú haladás aránya, sok íves szakasz, egysávon haladás, hosszú várakozások, határátkelők, most már beleértve a schengeni határokon is – ellenőrzés végett – megállított forgalmat.
- Ide írhatnánk harmadikként a területenként változóan nagy nyári hőségnapok számát is.

Mіндеzek a fékezés-gyorsítás (hosszirányú nyíróerők), az íves szakaszok (sugárirányú nyíróerők), üres járatban álló nehézgépjárművek (közben olajcsöpögés?) révén mintegy „gyűrják” az aszfaltot és minél melegebb az aszfalt, annál inkább: mindezek hullámosodást, nyomvályúkat stb. okoznak. Mérsékelt számú nehéz gépjármű forgalom és/vagy kedvezőbb pályaviszonyok esetén az aszfalt és a beton közt versenynek kell döntenie. Németországban van egy olyan rendelkezés („Allgemeine Rundschreiben”), hogy a pályázati kiírásban be-

tonnak is szerepelnie kell, illetve vannak olyan esetek, amikor csak betonnal lehet pályázni.

Belátható, hogy vannak olyan esetek, amikor csak a *műszaki szükségesség és igény* dönt és ilyen esetekben csak betonpálya kerülhet szóba (pl. repülőterek, hernyótalpas katonai vagy egyéb járművek közlekedési útjai stb.). Ilyenkor a *verseny a beton-útépítő cégek között*, iparágon belül valósul meg. (Összehasonlításképpen: ha valahol rozsdamentes acélra van szükség, akkor hiába olcsóbb egy időjárásálló vagy horganyzott acél, mindenképpen csak Cr-Ni ötvöztetésű acéllal lehet pályázni.)

A Lenti-Letenye közti 7538. sz. út 4×500 m-es kísérleti szakasz megépítésének és az élettartamra vonatkozó költségek elemzésének eredményét a 3. táblázat tartalmazza.

A „tényleges” organizációs feltétel az ottani valóságos viszonyokat szállítási távolságokat stb. veszi figyelembe, – az „azonos” organizációs feltétel pedig mindkét burkolati anyagra egy elképzelt egyformára szabott gyártási és építési körülményeket jelent. Az *azonos körülmények közt, tehát a szokásos hézagában vasalt betonpálya – kissé alábecsült – 30 éves élettartamra 9%-kal olcsóbb volt, mint a vizsgált aszfalt pályaszerkezet.*

3. táblázat. A Lenti-Letenye közti 7538. sz. út kísérleti szakaszainak költségelemzése 30 évre (Karsainé Lukács K és Bors T, 2007; Karsainé Lukács K, et al., 2000)

Kísérleti burkolat jellemzői	Egységár a tényleges organizációs feltételek mellett (Ft/m ²)	%	Egységár az azonos feltételek mellett (Ft/m ²)	%
22 cm-es vastagságú, hagyományos betonburkolat, teherátadó hézagokkal	9016	104	7920	91
22 cm-es vastagságú, hézagokban vasalt, kimosással érdesítéett felületű betonburkolat	9379	108	8231	95
17 cm-es vastagságú, folytatólagosan vasalt, keresztézag nélküli betonburkolat	9445	109	8413	97
21 cm-es vastagságú szfalt pályaszerkezet (4 cm mZMA-12; 8 cm mK/F; 9 cm JU-35/F)	8660	100	8660	100

3.2. Az árcsökkenő verseny

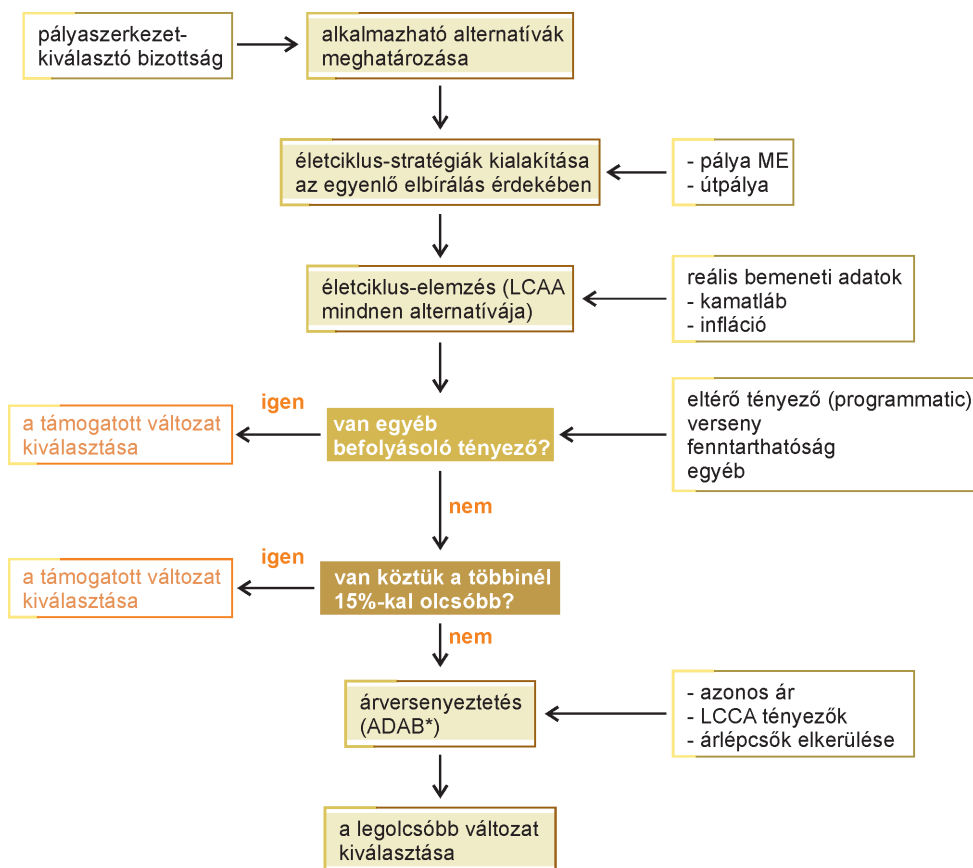
Az ACPA (American Concrete Pavement Association, Washington DC.) 2013-ban kiadott egy tájékoztatót: „A burkolattípus kiválasztása: mi a kedvezőbb eljárás?“, azaz: „Pavement Type Selection: What is the Ideal Process?“ címmel. (Wathne L, <http://www.acpa.org/>) Ez a tanulmány összefoglalja az AASHTO és AASHTO ajánlásait, és az azóta kidolgozott előírások és szoftverek említésével megadja a javasolt élettartam-költségelemzésének és a döntés elősegítésének módját, s ehhez folyamatábrát is ad (4. ábra).

A folyamatábrát nem részletezzük, mert ez kimondottan a pályázatok, a burkolattípust kiválasztók és az LCCA-val (Life Cycle Cost Analysis, élettartam-költségelemzés) foglalkozó szakemberek számára lehet tanulságos (hazánkban pl. Gáspár L, Orosz Cs, Tánzos Lászlóné, Tímár A). A folyamatábra első „elágazási pontjához” a tanulmány hangsúlyozza, hogy a sikeres és költséghatékony döntés legfontosabb feltétele az iparágak közötti verseny,

– tehát lennie kell külön aszfalt és külön beton útépítési iparágaknak és ezeken belül még versenyző vállalatoknak is. Idézzük a tanulmány összefoglalójának utolsó bekezdését:

„Végezetül a burkolattípus kiválasztásának csak akkor van jelentősége, ha ez piaci verseny környezetében történik. A döntő tényezők közül semelyik másnak sincs olyan egyértelmű hatása, mint a versenynek az utügyi hatóságok azon képességére, hogy az infrastruktúra kihívásainak a szűkre szabott források esetében is meg tudjanak felelni. A gyorsforgalmi utak építésével foglalkozó hatóságok számára a verseny a legjobb lehetőség a mai gazdasági környezetben.”

A verseny nélkülözhetetlenségét igazolja az USA 45 államából gyűjtött ajánlati árak elemzése is. 5 éves időszakot véve alapul azok az államok (illetve az Állami Utügyi Minisztériumok, DOT, Department of Transport) járnak jól, ahol a beton-



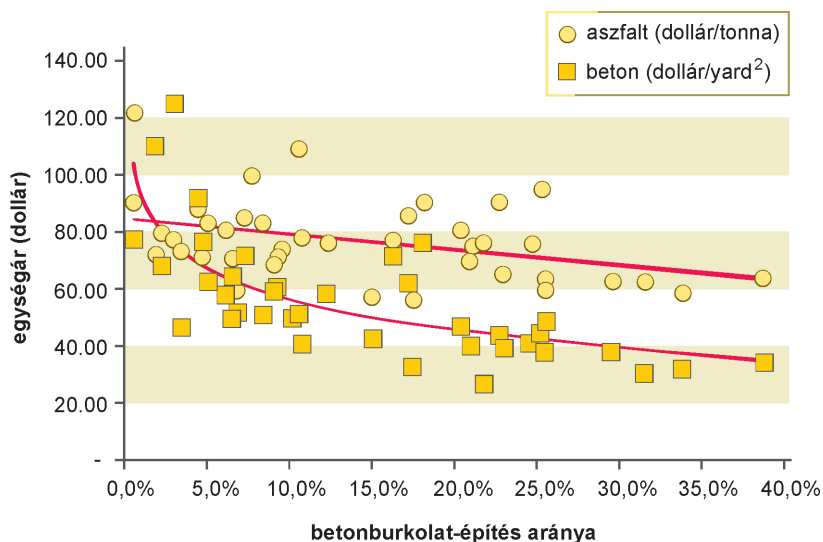
4. ábra. A burkolattípus kiválasztásának folyamatábrája

* (ADAB = Alternate Design Alternate Bid)

(Overview of the pavement type selection process)

(National Cooperative Highway Research Program NCHRP, Project 10–75, TRB 2011)

(További hozzáférési lehetőség az NCHRP 2011 TRB „Guide for Pavement Type Selection” irányelv és kiegészítései, FHWA (Federal Highway Administration) 2012 dec. 20. Washington DC. „Technical Advisory on Use of Alternate Bidding for Pavement Selection, T5040.38)



5. ábra. Burkolati egységárak \$-ban a betonburkolat építés növekvő aránya esetén (1 yard² = 0,84 m²)

illetve aszfalt iparágak részesedése kiegyenlített, és azok rosszul, amelyekben csak az aszfalt iparág-nak van megrendelése. (A tanulmány úgy mondja,

iparág között. A 4a és b táblázatból kivehető, hogy ugyanakkora 200 millió \$-os állami útépítési költségvetésből

hogy a költségvetés szinte felrobban, „bang of the buck”, „dollárrobbanás” áll be a versenyhelyzetben.) Ezt szemlélteti az 5. ábra és a 4a és b táblázat, a hivatkozott a Wathne L. féle tanulmányból.

Ha a beton részesedése az Útügyi Minisztériumok 5 éves ciklusa alatt csak néhány %-nyi, akkor a 2013-as súlyozott ajánlati egységárak szerint a betonpálya yard² szerinti költsége 80–120 \$, de az uralkodó aszfalt is drága: 80–120 \$/tonna. Ha van iparágak közötti verseny és a beton részesedése eléri az állami útépítési költségvetés 40%-át (vö. a 1. táblázat), akkor a betonburkolat ára 40\$/yard² alá megy, tehát az előbbinek ~1/3-a, és ugyanakkor az aszfalt árak is csökkennek – az előzőnek ~2/3-ára –, mert verseny van a két

4a táblázat. „Break-even” elemzés a burkolatépítésre szánt évi 200 millió \$-os költségvetésből (Wathne, 2013)

Keret, millió \$	Beton aránya ráfordításból (%)	Aszfaltra fordított összeg (millió \$)	Aszfalt egységára (\$)	Aszfalt mennyisége (tonna)	Betonra fordított összeg (millió \$)	Beton egységára (\$)	Betonfelület (yard ²)
200	0	200	83,88	2 384 232	-	-	-
200	5	190	81,24	2 338 829	10	66,94	149 380
200	10	180	78,59	2 290 382	20	56,13	356 314
200	15	170	75,94	2 238 558	30	49,81	602 348
200	20	160	73,29	2 182 989	40	45,32	882 666
200	25	150	70,65	2 123 255	50	41,84	1 195 137
200	30	140	68,00	2 058 869	60	38,99	1 538 778
200	35	130	65,35	1 989 266	70	36,59	1 913 236

4b táblázat. A 4/a táblázat átszerkesztett változata (Pálya szélessége: 2·3,75 m forgalmi sáv + 3,00 m üzemi sáv = 10,5 m; aszfaltvastagság: 0,2 m; aszfalt sűrűsége 2400 kg/m³)

Aszfalt mennyisége (tonna)	Aszfaltfelület (m ²)	Aszfalt felület (yard ²)	Aszfaltburkolatú út hossza (km)	Betonfelület (m ²)	Betonfelület (yard ²)	Betonburkolatú út hossza (km)	Összes burkolt felület (yard ²)	Összes burkolt felület hossza (km)
2 384 232	4 967 150	4 153 170	473	-	0	0	4 153 170	473
2 338 829	4 872 560	4 074 081	464	124 901	149 380	12	4 223 461	476
2 290 382	4 771 629	3 989 690	454	297 924	356 314	28	4 346 004	483
2 238 558	4 663 663	3 899 416	444	503 640	602 348	48	4 501 764	492
2 182 989	4 547 894	3 802 619	433	738 021	882 666	70	4 685 285	503
2 123 255	4 423 448	3 698 566	421	999 287	1 195 137	95	4 893 703	516
2 058 869	4 289 310	3 586 410	409	1 286 614	1 538 778	123	5 125 188	531
1 989 266	4 144 304	3 465 166	395	1 599 709	1 913 236	152	5 378 402	547

hány tonna aszfalt, illetve hány yard² betonburkolat készíthető, ha a beton részesezése a költségvetésben 0–35%-ig növekszik. Ha pl. a beton részesezése a költségvetésből szerényen csupán 15% (a sokkal kedvezőbb 35–40% helyett), akkor a verseny nélküli 2 384 232 tonna aszfalt helyett kissé kevesebbet: 2 238 558 tonnát építenek be, – de a csökkenő 49,81 \$/yard² egységárú betonból 602 348 yard², azaz kb. 506 ezer m² betonburkolat is megépíthető, ami majdnem „ingyen” van. Ez 10,5 m széles betonpályával (2·3,75m forgalmi sáv +3,00 m üzemi sáv) számítva 48 km. Azért csak „majdnem ingyen”, mert 2384 ezer tonna aszfalt (és a belőle készülő út) helyett csak 2238 ezer, azaz 6%-kal kevesebb építhető be aszfalt burkolatként, az említett hosszú élettartamú 48 km-es „ingyen” betonpályán kívül.

Az amerikai példa szerint a verseny (45 állam adatai alapján 40%-os költségvetési betonpálya részesezés esetén (a nulla helyett) az aszfalt egységárát 100%-ról 77%-ra, a betonét pedig 66%-ra, azaz mindkét egységárt csökkentti. Az egységár bizonytalanságok, vagyis a helyettesítő görbe körüli szóródások kb. 20%-nyi betonrészesezéstől kezdve szinte eltűnnek (5. ábra).

Ha tehát az államban a két iparág között erős verseny van és a burkolatépítési stratégia és program is biztos és előrelátható, akkor ez mindkét anyagra alacsonyabb egységárakat eredményez. **Ha a jól ismert döntési tényezők közül** (forgalom, anyagok hozzáférhetősége, időjárás, a burkolat hosszú idejű viselkedése, becsült költségek stb.) **kifelejtik az egészséges versenyt, akkor a burkolat kiválasztási eljárás értelmetlenné válik. Ezt az ACPA tanulmányt a döntéshozóknak különösen is figyelmébe ajánljuk.**

4. Ajánlott betonút építési módok

A továbbiakban – nagyrészt külföldi adatok alapján – a Magyarországon is követendő és követhető alkalmazási módokat tekintjük át, amelyek *műszakilag hasznosak és gazdaságosak lehetnek és lesznek, ha verseny is van.*

4.1. Gyorsbeton

4.1.1 M7-es autópálya táblacsere (Erdélyi et al, 2002)

A gyorsbeton, azaz a 4–6–12–24 órás korban terhelhető, a hídépítésben feszíthető, út- és repülőtéri burkolatok esetén a forgalomnak már átadható beton készítése semmilyen külön technológiát és tudnivalót nem igényel. A cementet, adalékszereket és adalékanyagot (ezek fajtáját és mennyiségét) és a v/c tényezőt kell úgy megválasztani, továbbá az

utókezelést (a hidratációs hő benntartását és a párolgás megakadályozását) kell úgy megoldani, hogy a kívánt szilárdulási sebességet elérjük. Külön építésszervezési kívánalom, hogy a bedolgozó, szállító, áramfejlesztő stb. gépekből tartalék is legyen, mert itt a várakozás nincs megengedve. Mindehhez *előzetes laboratóriumi munkák, szervezési terv és betontechnológiai utasítás* (BTU) kell.

Az ÁKMI (Beruházó), a Betonútépítő Vállalat (Kivitelező, Liptay András), a Betonolith K+F Kft. (Technológia és labor: Erdélyi Attila, Szegő József, Máhr Géza) együttese kidolgozta az akkor 1997-ben az M7-es betonúton sérülés miatt cserélendőnek ítélt tábláinak gyorsbetonnal való pótlását, – a tervezett 24+4–5 órás egy sávon közlekedő forgalomkorlátozással. A meglévő betonpályából magminták fúrása, a betonpálya feltörése, elszállítása, a tükör kiképzése és a teherbírás ellenőrzése kb. 4–5 órát vett igénybe. Az utolsóként bebetonozott szakasz volt 24 órás a forgalomba helyezéskor. A „rég M7” betonból vett magminták szilárdsága 45–70–64–60 N/mm², tehát bőven megfelelt.

Idézzük a *BETON* c. szaklap 1998. novemberi számában (16. oldal) megjelent rövid híradást – kis kiegészítéssel- Kiskovács Etelka szerkesztő tollából. Ez ott és akkor „Útjavítás betonnal az M7 autópályán” címmel jelent meg.

„1998. szeptember 30-án az M7 autópálya 83+200 km. szelvényénél a balatonvilágosi benzinkutat követően útjavítás folyt. Ez azért nevezetes esemény, mert a javításhoz gyorsan szilárduló betont használtak. A javítandó rész három táblából áll, 2 méter széles és 3×5 m hosszú. A cserére azért volt szükség, mert túlsúlyos járművek a külső perem mellett végigrepesztették a táblákat. A keresztthézagokat az elmozdulások megakadályozására a szokásos teherátadó vasalással (tüske, dübel) képezték ki. Az egyik táblánál műanyag szálát, a másikon acél szálát is keverték a bazalt adalékos betonba. Utóvizsgálatok során kiderülhet, hogy a PP száladagolás mennyire javítja a beton szilárdságát és tartósságát.

Előzetes laborkísérletek alapján dolgozták ki a betonreceptúrát, ennek lényege: a szokásosnál több, 420 kg/m³ nagyon gyorsan szilárduló, de normálisan kötő cement, folyósítószer és légpórusképző. Ezzel el lehet érni egy nap alatt kb. 35–40 N/mm² nyomószilárdságot és 4–5 N/mm² hajlítószilárdságot, ami fölött van az osztrák előírások szerinti 28 napos korra előírt 5 N/mm² érték 3/4-ének (3,75 N/mm²) és biztonságosan eléri a kb. 20 N/mm² nyomószilárdságot.

A kivitelezés reggel hatkor útelzárással az útpálya bontásával és a tükör elkészítésével kezdődött. A betont mixerkocsikkal szállították a

helyszínre. Merülővibrátorral tömörítették, vibrogerendával és gumilemez simítólapáttal simították. Kemény műanyag seprűvel bordázták keresztirányban (kép), majd kis idő múlva ráfújták az oldószeres párazáró szert és hőszigetelő paplannal letakarták. A beton beváltotta a hozzá fűzött reményeket, a forgalmat + 24 óra elteltével rá lehetett engedni (a beton ekkor kb. 22 órás volt). *Bebizonyosodott, hogy a gyorsbetonból való útépitéshez van technológia, megfelelő alapanyag és tervezési tudás.*

Ugyancsak a BETON havilap egy ezt követő számában „A kamionok is rámehetnek 24 óra után az új betonra az M7-esen” (A betonosok első sikere a 83-as km-kőnél) c. cikk jelent meg. A gyorsbeton iránti érdeklődést mutatja, hogy „Fagyálló gyorsbeton” címen részletes beszámoló is található (Erdélyi A, 2002).

A tervezett táblacserénél 3 db 6 méter hosszú mellett kellett kicserélni gyorsbetonnal – de a belső sáv forgalma érdekében a külső szélétől számítva csak 2 méter széles sávokat bontottunk fel. A 6 méter hosszú lemezeket közepükön még egy-egy kereszt-hézaggal is megosztottuk, hogy kedvezőbb 2 x 3 méteres táblákat kapjunk. – Adódott a lehetőség,



6. ábra. M7 gyorsbeton metszete (Fotó: Szentpéteri, 2019)



7. ábra. M7 gyorsbeton tört felülete (Fotó: Szentpéteri, 2019)

hogy háromféle betont alkalmazzunk. Az egyik a szokásos légbuborékos útbeton volt (etalon), a másik PP szál (Forta Fibre High Grade 190) beton, légbuborék képző nélkül. Ennek oka, hogy a szakma és a kereskedelem úgy látta, hogy a vékony szálak mentén bentmaradó levegőrétteg pótolja a buborékos betonban a légbuborékoknak köszönhetően a kapillárisokat megszakító hatást és a szálak mentén bentmaradó víz pótlólagos utókezelést is jelent. A harmadik Harex SF 32–01, 35 kg/m³ forgácsolt acélszál beton volt, amelybe légbuborék-képzőt is adalékoltunk. Ebből a betonból kifűrt próbatestekből készített vizsgálati hasáb fényképein (6. és 7. ábra) láthatók a légbuborékok (célszerűen 300–600 µm alattiak), valamint a szabadlevegőn megrozsdásodott acélforgácsok. A tört keresztmetszetben a bazaltszemcse láthatóan jól tapadt és a karbonátosodás is (szürke színű kéreg) csak kb. 10–12 mm mélységű: tehát a vasvédelem is jó.

Az 1998-as akkori „gyorscement” választék idevágó adatai az 5. táblázatban található. A mostani 2019-es cementválasztékát az 6. táblázatban adtuk meg, DDC adatok alapján. A két táblázat (1998. és 2019. évre vonatkozó) adatai azonosak. Emlékeztünk szerint 1998-ban a Váci Gyár még nem gyártott CEM I 52,5 N típusú cementet, csak CEM I 42,5 R típusút.

Az előkísérletekhez az adalékszer, a PP- és acélszál osztrák szállítóival egyeztetve kétféle cementtel: váci CEM I 42,5 R és beremendi CEM I 52,5 N; v/c = 0,35 víz/cement tényezőjű és kétféle gyártótól származó folyósító és buborékképző adalékszer családdal D = 22 mm-es bazaltadalékos 420 kg/m³ cementadagolású betont készítettünk. E kísérletekben 70 x 70 x 250 mm-es hasábok l = 200 mm támaszközű központos hajlításából számítottuk a hajlítószilárdságot és a félhasábokon mértük a nyomó- (test)szilárdságot 70 x 70 mm² felületen. Ezek eredménye a 8. ábrán és a 7. táblázatban látható.

5. táblázat. Cementválaszték 1998

Nagy kezdőszilárdságú hazai cementek tulajdonságai (CEM I. 52,5 - CEM I. 42,5 R)

Fajlagos felület (cm²/g 3700–3800)

C₃S (tri-kalcium-szilikát) >50%

1 napos nyomószilárdság ≥18 N/mm²

2 napos nyomószilárdság ≥30 N/mm²

28 napos nyomószilárdság ~ 60 N/mm²

2 napos hajlítószilárdság ~ 5,2–5,3 N/mm²

28 napos hajlítószilárdság ~ 8,5–8,6 N/mm²

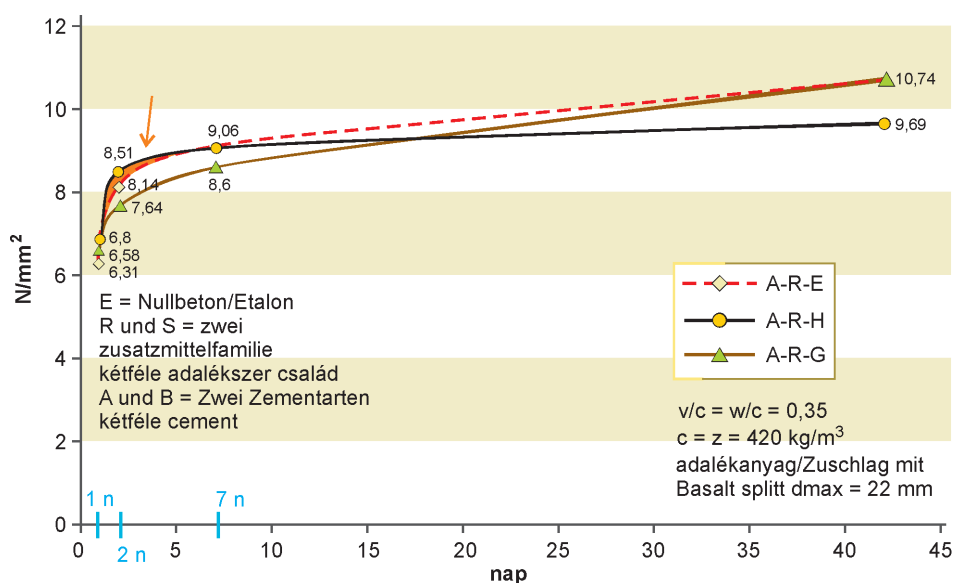
Kötés kezdete és vége (nem gyorskötő)

kezdete ~ 2 óra (120 perc)

vége ~ 3 óra (180 perc) vagy több

6. táblázat. Cementválaszték 2019 (DDC)

		CEM I 52,5 N	CEM I 42,5 N	CEM II/A-S 42,5 N	
Vác	Blaine (cm ² /g)	4016	3510	3554	
	Hajlító-nyomószilárdság (MPa)	1 nap	4,9–21,1	2,8–11,1	2,3–8,8
		2 nap	6,0–30,7	5,2–24,6	4,6–20,7
		28 nap	8,4–65,0	8,6–58,6	8,6–56,3
Beremend	Blaine (cm ² /g)	4166	3542	-	
	Hajlító-nyomószilárdság (MPa)	1 nap	3,6–18,2	2,2–10,8	-
		2 nap	5,7–30,4	4,7–23,8	-
		28 nap	8,4–63,9	8,7–58,2	-



8. ábra. Hajlítószilárdsági diagramok

7. táblázat. M7 táblacsere előkísérlet II. (1997. júniustól). 7 × 7 × 25 cm-es félhasábokon nyomó(test)szilárdság N/mm² (légtartalom egyformán kb. 5 térf. %). *: 42 nap után laborlevegőn tárolva, légszárazon törve, Betonolith K+F Kft.

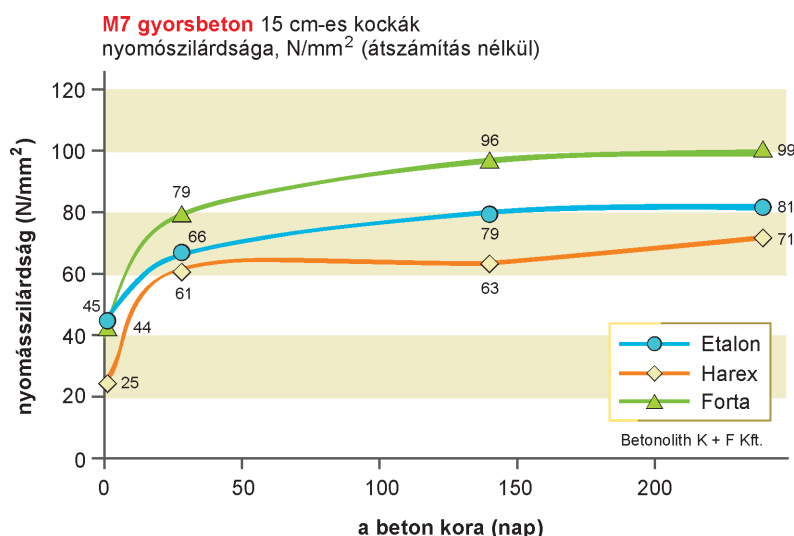
Betonfajta	1	2	7	42	900
	napos korban				
Etalon	43,7	60,8	67,8	86,0	-
Harex	46,7	61,7	74,9	86,2	96,4*
Forta	42,2	53,9	62,8	85,8	95,4*

Az előkísérleti 24 órás hajlító és nyomószilárdságok bőven felülmúlták a forgalomba helyezéshez szükséges értékeket.

Az 1998. szeptember 30./október 1-i táblacsere tényleges szilárdsági eredményei az útbetonokra előírt próbatesteken a 9. ábrán, és 8. táblázatban található. A 9. ábrán a Forta jelű „legjobb” műszálas beton nem volt buborékképzős, így légtartalma sokkal kisebb és szilárdsága természetesen na-

gyobb, mint a másik kettő (a tényleges légtartalmak a 8. táblázat utolsó oszlopában találhatóak). Azonos (itt 0%) légtartalomra átszámítva a nyomószilárdságokat 250 napos korra 150 mm-es kockán 96÷107 N/mm² gyakorlatilag azonos eredményt kapunk (# jelű adatok). A Harex acélszálas beton 24 órás értéke (8. táblázat és 9. ábra) nemcsak a nagyobb légtartalom miatt volt kisebb 24 órás korban, hanem azért is, mert Székesfehérvárról a betonüzemből ezt szállították utoljára és a délutáni melegben a betonüzem „kissé nehezen keverhetőnek” találta (részben az acélszálak miatt), és ezért kötéskésleltetést adagolt, hogy a munkahelyen „jól bedolgozhatósák”.

A 28 napos 150 mm-es kockák legkisebb szilárdsága (Harex) 61 N/mm², ami s=5 N/mm² szórás felvéve C40/50 szilárdsági osztályt jelent – jóval felülmúlva a szokásos autópályabetonokra előírt CP-4/2,7 osztály (kb. C30/37) követelményeit –, ami természetes is a táblacserenél ténylegesen alkalmazott v/c=0,36 és CEM I 42,5 R esetén. Egyébként ezt a gyorsbetont 24 órás koránál előbb is for-



9. ábra. M7 gyorsbeton 15 cm-es kockák nyomószilárdsága, N/mm² (átszámítás nélkül)

galomba lehetett volna helyezni, a 24 órás szilárdsági adatokból visszakövetkeztetve.

Adalékanyag: az M7 táblacseréhez OH 0/4 mm homokot és 12/22 mm bazaltzúzalékot alkalmaztunk, – azaz kihagytuk a kedvezőtlenebb szemelakú 5/12 mm-es bazaltzúzalékot (lépcsős szemmegoszlás).

Tartósság. A 8. táblázat 180 napos oszlopában (*) alatt feltüntettük a 150-szer fagyasztott 150 mm-es kockák nyomószilárdsági eredményeit: *eszerint fagylagyulás gyakorlatilag nincs*. Ehhez hozzátesszük, hogy – főleg a hídépítésben kedvelt – „kockafagyasztáshoz” a vizsgálati szabvány 100 mm-es (érzékenyebb) kockát ír elő és ez a módszer az útbetonokra ma már nem mértékadó, mert azóta a peremes lehámlasztás („slab test”) a referencia-módszer. Az itteni fagyállósági vizsgálatból tehát nem lehet különbséget tenni a háromféle beton viselkedése közt.

Az M7 autópálya táblacseré tapasztalatainak összefoglalása. Minden további gyorsbeton alkalmazásakor *nincs szükség ilyen részletes előkísérletekre*, mint amelyet az első alkalmazáskor

végeztünk. **Alapszabály:** (a mostani cementválasztékból, lásd 6. táblázat) itt pl. váci CEM I 52,5 N, v/c~0,35 és bármilyen ismert jónevű cégtől való folyósító és legbuborékképző adalékszer (mindkettő ugyanattól a szállítótól), kb. 420 kg/m³ cementadagolás és bazaltzúzalékos adalékanyag keverék (szemmegoszlás az ÚT előírások szerint). Az előkísérlet lényege: **próba keverés, a konzisztencia és eltarthatóságának ellenőrzése, a frissbeton légtartalom beállítása (D=22 mm-hez kb. 5 V%) és annak ellenőrzése, hogy a legbuborékképzőszer szállítójának engedélyezési bizonyítványában szerepel-e, hogy az adott légtartalomhoz $t_i \leq 0,22$ mm távolsági tényezőt igazoltak**. Próbatestekkel igazolni kell, a kívánság szerinti 6–12–24 stb. órás nyomó- és hajlítószilárdságot, – utóbbit 150×150×600 mm-es gerendán mérve az MSZ EN 13877–1 szerint. (Lásd még a többi előírást, Liptay, 2017 CEMBETON Útmutató 4.6.1. fejezetében.)

A szilárdulást ellenőrző próbatesteket a helyszínen érkező gyorsbetonból kell elkészíteni hőszigetelő béléses fasablonban és ugyanúgy kell párazáróval lefűjni és hőszigetelő paplannal takarni, mint a pályabetont.

8. táblázat. Kockaszilárdságok 1-250 napig

Betonfajta	24 óras korban	28		180		250		légtartalom □
Etalon	45	66	{55}	& 79	('72)	81	#104	5,60
Harex	25	61	{46}	& 63	('60)	71	#96	6,45
Forta	44	79	{70}	& 96	('89)	99	#107	1,76

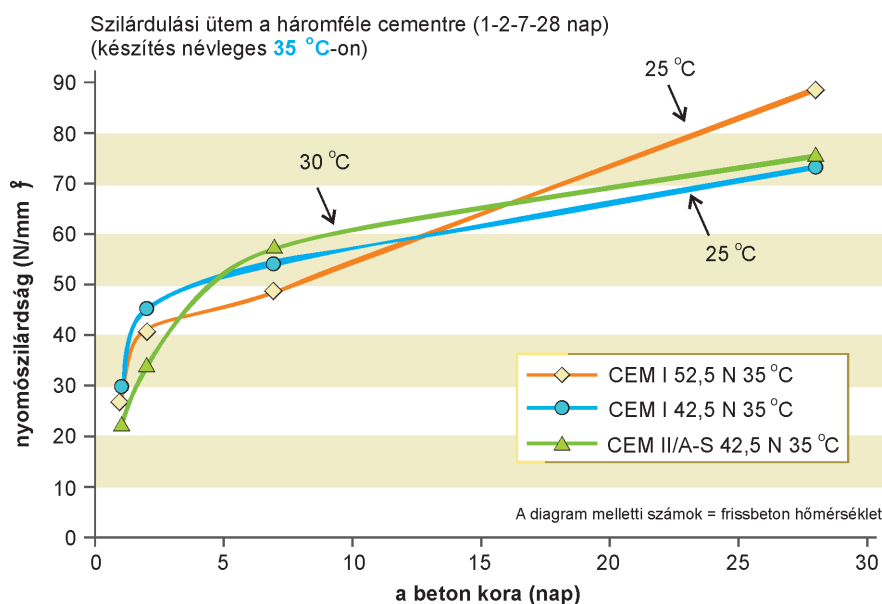
{} 28 napos átm. 15x20 cm magminták adatai

(') 3%-os NaCl oldatban 150-szer fagyasztott kockák nyomószilárdsága

Átszámítva 0% légtartalomra

& Ez légszáraz kb 88 (#13); 77 (#84); 108 (#116) N/mm² lenne

□ + 1 V% légtartalom kb. 4% szilárdság csökkenést okoz



10. ábra. 25–30 °C tényleges kiinduló hőmérsékletű betonok nyomószilárdsága

Nagy nyári hőségben (ami útbeton és betonút készítéséhez egyébként nem kedvező) az említett CEM I cementek helyett CEM II/A-S 42,5 N (6–20%) kohósalak-portlandcement is jó lehet gyorsbetonnak, ha a keverék hőmérséklete „kényszerűségből” eléri a 30 °C-t. A 10. ábrából kitűnik (Betonolith K+F Kft. kísérlete), hogy a ténylegesen 30 °C hőmérsékletű CEM II/A-S 42,5 N cementtel 24 órában elérhető a 22 N/mm² szilárdság, ami természetesen sem itt, sem az összes előbb említett esetben nem pontosan 24 órás útelzárást jelent, mert a már említett előmunkálatok miatt az elzárás 4–6 órával hosszabb lehet. A kohósalak-portlandcement utószilárdulása (lásd 10. ábra) kedvező. További – a külföldiekkel egyező – tapasztalat még, hogy acélszálal alkalmazni csak akkor érdemes, ha a gyorsbeton dinamikus, ütköző hatásnak is ki van téve. (Az acélszál a betont szívóssá, nagy alakváltozásokra képessé teszi, törés nélkül, de a konzisztencia eltarthatóságát rontja és a felületképzést nehezíti.)

4.1.2. A zürichi repülőtér futópályáinak felújítása gyorsbetonnal: csúcsteljesítmény (Update 2012/03)

Az előző fejezet szerény feladatához képest az itteni 35 cm vastag beton futópályák tábláinak (alatta 55 cm cementstabilizáció, amely a teherbírást kis költséggel megnövelte) gyorsbetonnal való cseréjét az éjszakai forgalmi szünetben 23:30 és 5:30 között, azaz 6 óra alatt végezték, óriási gépesítéssel és szervezéssel. A betont **2,5 órás korában** adták át a forgalomnak.

Update 2012/03. számából idézünk:

„A futópályák felújítása:

A zürichi repülőtéren három fel- és leszállópálya van: ezek háromszög lakban helyezkednek el. A különböző érkezési/indulási forgatókönyvek miatt a repülőüzemnek mindháromra szüksége van. A futópályák felújítására ezért csak éjszaka kerülhet sor. 20 éven át csak kisebb felületeket cseréltek ki gyorsan szilárduló betonnal. Kb. 10 éve kezdték meg az egészlemez felújítást. Ma már éjszakánként akár 6 db 6 × 6 × 0,37 m-es táblát is ki tudnak cserélni. Évenként, a nyári hónapokban kb. 1200 m³ gyorsbetont építenek be, ez kb. 100 db egyedi lemezek felel meg. A gyorsbetonhoz legalább 21°C hőmérsékletű frissbeton kell, hogy 150 perc alatt a 20 N/mm² szilárdságot elérje. Ezt a munkát tehát csak a nyári hónapokban lehet végezni. 24 óra múlva az ilyen beton kb. 55 N/mm² nyomószilárdságú lesz, hajlító-húzószilárdsága pedig 5,5 N/mm². A lemezcserét a futópálya középső, a gépekkel legjobban terhelt sávjában hajtják végre.

Belső szervezés, logisztika

A betont egy repülőtér közeli keverőtelepen készítik. A beton a keverővíz hozzáadása után 60 percig marad bedolgozható. A frissbeton adagok megkeverésének kezdetét ezért a munkahelyen zajló folyamatok állásának megfelelően pontosan kell megrendelni. Az építésvezető felelős a rendelésért. További (a bedolgozás utáni) 90 perc múlva a beton szilárdságának legalább 20 N/mm²-nek kell lennie. Ha ezt nem sikerül elérni, akkor a vészforgatókönyv lép életbe. (Az újonnan beépített betont fel kell törni és egy feketeburkolatú „ideiglenes tömésként” szolgáló lemezpótlást kell beépíteni.)

Kivitelezés

- a futópálya lezárása 23 óra 30 perckor,
- kettős mélyrāvágás éjfélig,
- a beton feltörése bontókalapácsos gépekkel,
- a cementstabilizációs alsórét meg tisztítása,
- alsó-hálóvasalás (dűbelek) számára lyukfúrás a megmaradó betonba és a $d=32$ mm, $h=600$ mm-es vasak beragasztása,
- a felső hálóvasalás (8 kg/m^2) elhelyezése,
- a gyorsbeton beépítése,
- seprűs rovátkolás és az utókezelő szer felszórása,
- 60 percre rá letakarás hőszigetelő paplanokkal,
- takarítás és szilárdságvizsgálat,
- a futópálya átadása a forgalomnak 5 óra 30 perckor.

Az éjszakánként 80 m^3 gyorsbeton készítéséhez és beépítéséhez hatalmas géppark (állószerző érték $2,5$ millió CHF, azaz 2 millió Euró) és egy 20 fős csapat szükséges, amelyik különlegesen ki van képezve a gyorsbeton készítésére és beépítésére."

(Marco Schnyder, Basler & Hofmann AG, Zürich, E-Mail: marco.schnyder@baslerhofmann.ch; Daniel Hardegger, Implenia Bau AG, Zürich, E-mail: daniel.hardegger@implenia.com)



Éjszakai üzemszünet alatti burkolatfeltörés



A gyorsbeton lemez számára elhelyezett hálóvasalás



Gépi betonbedolgozás csúszózsálas finiszerrel

11. ábra. A zürichi repülőtér futópályáinak felújítása gyorsbetonnal (Schnyder és Hardegger, 2012)

Összefoglalás

Az egyre sűrűbb nehézjármű-forgalom és a növekvő tengelysúlyok viselésére az aszfaltburkolatok – az éghajlati melegedés hatásával tetéztve – sok helyen már nem felelnek meg. Az Amerikai Egyesült Államok 45 államának tényleges pályázati árajánlatait elemezve igazolták, hogy az államok adott évi 200 millió dolláros költségvetéséből összesen több km út építhető meg, ha a betonút építő iparág részesedése a költségvetésből mintegy 35 – 40 %-os

(és az aszfalté így „csak” 65 – 60), mert az így beállított egészséges versenyhelyzetben mind a beépített aszfalt, mind a beton egységára csökken. A helyes és gazdaságos arányt igazolják a tőlünk nyugatra fekvő országok aszfalt/beton pályaburkolati viszonyismertai is (1. táblázat). Piaci versenyhelyzet nélkül a pályaburkolat kiválasztási eljárása értelmetlenné válik (Wathne L, ACPA). Vannak továbbá olyan esetek, amikor – az ártól függetlenül – a burkolatok gyors felújításához vagy cseréjéhez csak beton: „gyorsbeton” alkalmazha-

tó, pl. repülőtéri kifutópályáknál, nagyforgalmú autótutaknál stb., amikor már 5 (zürichi repülőtér) vagy 8–12–24 órás elzárás után a betonpályát át kell adni a forgalomnak. A gyorsbeton – a gyorsan szilárduló cement és a folyósító adalékszerek révén – már néhány óra vagy legfőleg 1 nap múlva (pl. M7-es út, táblacsere) eléri a terhelhetőséget jelentő kb. 20 N/mm² nyomó- és 4–5 N/mm² hajlítószilárdságot.

Cikkünk folytatásában, a 2. részben néhány betonút építési módot (fehérszönyegezés, azaz White Topping, mező- és erdőgazdasági utak, kombinált aszfalt + beton alkalmazások, újrahasznosítás stb.) fogjuk áttekinteni, és kitérünk néhány részletkérdésre: fényviszonyok és megvilágítás, felületi érdesség és felületképzési módok (mosott beton), fékút, zajkibocsátás stb.

Köszönetnyilvánítás

A Szerzők hálásan köszönik *Szentpéteri Ibolyának* (okl. építőmérnök, doktorandusz, BME Út- és Vasútépítési Tanszék) az adatbeszerzés, a táblázatok összeállítása, az ábrák kiegészítése, és az irodalomjegyzék gondozása terén kifejtett pontos munkáját. Köszönik továbbá *Dr. Kausay Tibor* c. egyetemi tanár segítségét nemrég elhunyt neves kollégánk: *Dr. Liptay András* betonutakra vonatkozó szakirodalmi tevékenységének feltárásában.

Irodalom

- Aphsolt Roads VS Concrete Road:
<https://www.youtube.com/watch?v=IZJNgCPN4Ek>
Letöltési idő: 2019. 05. 10.
- Bakos A. Beton kontra aszfalt. Dél Magyarország, Szeged Hírei, 2010. február 8.
- Breyer G, Litzka J, Steigenberger J. A betonút – időtálló építési mód, biztos jövővel; Update 2009/09/3.*
- Breyer G, Steigenberger J. Betonburkolatok nemzetgazdasági szempontból; Update 2006/3.*
- Erdélyi A. Fagyálló gyorsbeton in Beton- és vasbeton szerkezetek védelme, javítása és megerősítése II. (szerk. Balázs Gy). Műegyetemi Kiadó 2002; 7.2. fejezet, p.84.
- Erdélyi A, Kádár O, Németh I, Máhr G.(2002): Táblacsere gyorsbetonból az M7 autópálya 83+200 km szelvényében in Beton- és vasbeton szerkezetek védelme, javítása és megerősítése II. (szerk. Balázs Gy) Műegyetemi Kiadó 2002; 8.15. fejezet p.309.
- Europave kiadvány (2009): Concrete Roads: a Smart and Sustainable Choice; 2009. 09. <https://www.eupave.eu/>
Letöltés ideje: 2019. 05. 13.
- e-UT 05.02.31:2008 Útbeton betonhulladék újrahasznosításával
- Gáspár L. Betonburkolatokkal kapcsolatos újdonságok. BETON 2007; 2:22-23.
- Gáspár L. Éghajlatváltozás és a hazai utügyi szabályozás; Közlekedésszabványügyi Szemle 2010a; 60(10):1-9.

- Gáspár L. Felkészülés az éghajlatváltozás közötti közlekedési kihívásaira. Közlekedéstudományi Szemle, 2010b; 12:13-20.
- Gábel V, Gál A. Beton versus aszfalt. CEMKUT tanulmány. 2017.
- Haider M, Steigenberger J. Mosott beton felületek hosszú távú viselkedése akusztikai szempontból; Update 2007/1.*
- Internationale Fachtagung 2005 «Betondecken aus volkswirtschaftlicher Sicht». Vortragsband, 2005
- Karsainé Lukács K. Betonburkolatok alkalmazása fenntartásban és felújításban. KTI 2009. évkönyv, p. 233.
- Karsainé Lukács K, Bors T. Betonburkolatú kísérleti útszakaszok építése és állapot-megfigyelése 1. rész: Letenye – Lenti összekötő út; BETON; 2007; 12:8.
- Karsainé Lukács K, Bors T. KTI tanulmány, 2009.
- Karsainé Lukács K, Liptay A, Táska Andorné. Kísérleti útszakaszok a 7538. sz. Letenye-Lenti közti nehézfogalmi úton, Közúti és Mélyépítéstudományi Szemle, 2000/5
- Keleti I (szerk.). Betonburkolatok. Magyar Betonburkolat Egyesület, 2012.
- Liptay A. Cembeton Útmutató; Magyar Cement-, Beton- és Mészipari Szövetség, 2017.
- Liptay A. Betonutak fejlesztése és építése az utóbbi 60 évben Magyarországon. <http://www.betonopus.hu/notesz/liptay-betonutak-60.pdf>; Letöltési dátum: 2019. 05. 13.
- Liptay A. A betonútépítés helyzete és jövője Magyarországon, Közúti Közlekedési- és Mélyépítéstudományi Szemle, 1966; 11:416-426.
- Liptay A: Fejezetek a betonútépítés fejlődéséről (szerk. Keleti I. Betonburkolatok). MBBE, 2012, 15-21, 277-283.
- Maier G, Peyerl M, Krispel S. TunnelHELL („AlagútVILÁGOSAN”) Az alagutak betonanyagú útpályáinak hatása: növekvő biztonság és energiatakarékosság egyszerre. Update 46; 2016. november*
- Peyerl M, Krispel S, Weihs P, Maier G. Városi közlekedési felületek – legkedvezőbb beton a városbelső számára. Update 44/2016*
- Schnyder M, Hardegger D. A zürichi repülőtér pályáinak felújítása, Update 2012/12/3*
- Sommer H. Betonstraßen im Wandel; Zement + Beton, 2018; 2:5-8.
- Steigenberger J, Eisner H, Marchtrenker S. A beton újrahasznosítása az útépítésben; Update 11/1, 2011.*
- Tóth Cs. (2014): Sustainable pavement: környezettudatos és energiatakarékos útpályaszerkezetek. (Szerk. Keleti I. Hosszú élettartamú útpályaszerkezetek.) Budapest, Magyarország: Konferencia Iroda Bt, 2014; 1-9, 4, 9.
- Tóth Cs. Aszfaltkeverékek viszkoelasztikus viselkedésének jellemzése Huet–Sayegh-moddal. Közlekedésszabványügyi Szemle, 2009 Augusztus; 59:(8)6-12.
- Wallner R, Steigenberger J. Betonburkolat a városi úthálózaton – egy megkerülhetetlen tényező; Update 2008/1
- Wathne L. Pavement type selection: What is the ideal process? <http://www.acpa.org/> letöltés dátuma: 2019. 05. 13.
- Wien, 2005;
www.zement.at (<http://www.zement.at/page.asp?c=158>)
Letöltési dátum: 2019. 05. 13.

*Az Update kiadványok a cembeton.hu honlapon megtekinthetők és letölthetők.



Elméleti utcahálózatok forgalomlebonyolító képességének vizsgálata makroszkopikus modellezési eljárással I. – Kutatás módszertana

Háznagy Andor Gellért¹, Fi István¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék
e-mail: andor.haznagy@bkk.hu; fi.istvan@epito.bme.hu

DOI: 10.36246/UL.2019.1.07

Kivonat Településrészek utcahálózatának felépítése és a rajta hálózati szinten megjelenő forgalom lefolyása közötti kapcsolat elemzésével megállapítható, hogy az összetett utcahálózatok felépítése milyen hatással van a rajta megjelenő forgalom minőségére és lefolyására. A több részes cikksorozatban bemutatásra került kutatás négyzetrács alapú elméleti utcahálózatok forgalmi vizsgálatával arra kereste a választ, hogy az utcahálózatokat felépítő építőelemek, a közúti csomópontok és utcaszakaszok eltérő elhelyezkedése és kialakítása, mint paraméter, milyen hatással van a közúti hálózaton megjelenő forgalom lebonyolódására. A kutatás során az utcahálózatok felépítését tekintve 8 eltérő utcahálózati paraméterrel megvizsgáltam 23 utcahálózati modellt változó nagyságú forgalmi ráterheléssel makroszkopikus környezetben 8 forgalomminőséget jellemző mennyiség alapján. A cikksorozat első részében az alkalmazott vizsgálati módszertant részleteztem a területi és a forgalmi igénymodell bemutatásával.

Kulcsszavak települési utcahálózat, négyzetrácsos utcahálózat, hálózatelemzés, makroszkopikus forgalmi modell, forgalomminőség

Capacity analysis of street network with macroscopic traffic modelling approach – Methodology

Abstract One of the most important challenges in urban design is planning an appropriate street network, satisfying the demand of users with different transport modes. Understanding the nature of road networks has been thoroughly studied problem for many years and extensive professional literature is now available in this respect. Junctions and streets are the main parts of street network. Their impact on everyday traffic could be analysed with grid street network in the neighbourhood aspect. For this reason, I analysed in more articles, 8 different street network elements were analysed with 23 theoretical grid street network model, and macroscopic traffic modelling approach was used in this work. The outcomes were analysed with 8 different traffic quality characteristic measures. The first article of series contains the network and traffic model of research.

Keywords urban street network layout, grid street plan, network analysis, traffic modelling, traffic quality

Háznagy Andor Gellért

Okl. építőmérnök, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Út és Vasútépítési Tanszékén szerezte MSc diplomáját 2014-ben. Ezt követően 4 évig a Tanszék PhD-hallgatója, jelenleg a Budapesti Közlekedési Központ munkatársa.

Dr. habil Fi István

Professor emeritus, MTA doktora (műszaki tudomány) Szakmai tevékenység: 3 könyv, 2 könyvfejezet, 6 egyetemi jegyzet, mintegy 150 tudományos publikáció és kutatási jelentés, jelentős számú terv, illetve megvalósult létesítmény. Speciális szakterület: forgalmi folyamatok lefolyása, intelligens forgalomszabályozás elmélete és gyakorlata, útpályaszerkezetek deformációja és méretezése.

1. Bevezetés

Települések utcahálózata a városok és falvak ütérei és az emberek mindennapos helyváltoztatási igényeinek biztosítanak teret a többi szerepük mellett. Ebből a speciális helyzetből kiindulóan jelentős befolyással rendelkeznek az emberek közötti társadalmi és gazdasági kapcsolatok alakulására és egyben lenyomatai e kapcsolat erősségének és a környezethez való viszonyuknak. Az egymást követő történelmi korokhoz és földrajzi régiókhöz kapcsolódó lenyomatok igen eltérő utcahálózati és települési struktúrákat hoztak létre, melyek mind nemzetközi, mind pedig hazai viszonylatban az elmúlt évtizedekben számos vizsgálat tárgyát képezték (Marshall, 2004; Meggyesi, 2009).

Ezeket a hálózatokat és a bennük lévő kapcsolatokat eltérő városmodellekkel igyekeztek leírni a kutatók a XX. század elejétől kezdve. Az elsődleges, klasszikusnak tekinthető városmodellek így a Burgess-féle koncentrikus körök elmélete (Burgess, 1935), Hurd-féle (Hurd, 1903), Hoyt-féle kapszulaelmélet szektormoddell (Hoyt, 1939), illetve Ullman–Harris-féle többmagvas város modellje (Harris, Ullman, 1945), amelyeket számos egyedi vizsgálati modell követett.

A települési struktúrák és a településen belül megjelenő tevékenységek időbeli és térbeli változása egymástól eltérő sebességgel zajlik, és a folyamatok időbeli lefolyása alapján lassan és gyorsan változó tényezők azonosíthatók (Wegener, 2004). Nagyon lassan változó tényezők közé tartozik a településrész struktúrájának, kialakításának és területhasználatának változása. Lassan változó tényezők közé sorolandó a munkahelyek és a lakások mennyiségében és elhelyezkedésében bekövetkező változás. Gyorsan változó tényezők a településeken, településrészekben lakók és a munkát vállalók időbeli fluktuációja. Negyedik, a leggyorsabban változó tényező a közlekedés (személy és áruszállítás) minőségében és volumenében következhet be változás. A települési jellemzők felsorolt időbeli változékonyságából következik, hogy a településrészek folytonosan változó képét, beépítését és szerepét az utcahálózat a legtöbb esetben utólag képes követni. Kivételt azok az esetek képeznek, amelyek során egy-egy tudatos várostervezési döntés hatására egy korszakban a városrészek előre meghatározott funkcióknak épültek, vagy újultak meg (meglévő városrész teljes átépítése: Budapest, Tabán bontása az 1930-as években; környezeti katasztrófát követően város vagy városrész korszerűsítés megvalósítása: Szeged az 1879-es nagy árvízét követő újjaépítése, korábban mezőgazdasági művelés alatt álló terület beépítése: Lipótváros jelenlegi négyzettrács kialakítású utcahálózata jelentősen eltér a korábbi úthálózattól; illetve a korábbi iparterületek rekultivációja során

a barnamezős beruházásként létre jövő új településrészek utcahálózata is jelentősen eltérhet a korábbi iparterületi úthálózattól).

A települési utcahálózat lassú változásából és a rajta megjelenő közlekedési forgalom nagyságának mind hosszú távú, mind pedig rövid távú dinamikus változása szükségessé teszi, a települési utcahálózatok topológiájának megfelelőségi vizsgálatát a rajtuk megjelenő közúti forgalom lebonyolítása szempontjából. Ugyanis az utcahálózatokat felépítő elemek, a közúti csomópontok és utcaszakaszok kiépítettségén, ezáltal a közúti forgalom számára rendelkezésre álló szabad kapacitás mértékén könnyebb változtatni a csomópontok forgalmi rendjének és kialakításának változtatásával és az utcahálózaton sávszám- és parkoló bővítéssel. Ezekkel a módszerekkel csak addig lehet élni, ameddig a közlekedésfejlesztésre rendelkezésre álló terület el nem fogy. Ezekből következik, hogy a településrészek utcahálózatának kialakítása alapvetően befolyásolja a településeken megjelenő forgalmi igény alakulását és lefolyását. A település- és a közlekedésfejlesztésnek szorosan egymásra épülve szükséges megvalósulnia (Koller, 1980).

A településeken az 1980-as évektől kezdve a forgalomcsillapított övezetek fokozatosan terjedtek el, amely következtében az alkalmazott területek forgalombiztonsága és légszennyezettsége (Knoflacher, 1992; Vis, Dijkstra, Slop, 1992) kedvezőbb, mint a forgalomkorlátozás bevezetését megelőzően volt. Manapság nem ritka, hogy teljes településrészek közúthálózata forgalomcsillapított övezet. Ez elősegíti a közforgalmú közlekedés és egyéni közlekedés közötti munkamegosztás városszerkezetekhez illeszkedését és azt, hogy közlekedéstervezés és a várostervezés egymás mellett megfelelő helyet kapjon a megfelelő városi lét biztosítása érdekében (Koller, 1974; Tímár, 1986). A forgalomcsillapított övezetekben, mint kis területi egységekben a forgalom lezajlása, különösen a reggeli csúcsidőszakban kritikus a teljes utcahálózat szempontjából. Annak következtében, hogy ezekről a területekről kiinduló forgalom táplálja a teljes közlekedési hálózatot, így a lakóterületek utcahálózatának kialakítása számos közlekedőt érint.

Kutatásomban arra kerestem a választ, hogy makroszkopikus közlekedési modellezési környezetben változó nagyságú forgalmi ráterhelés hatására, a települési utcahálózatokat felépítő közúti csomópontok és a köztük található utcaszakaszok milyen hatással vannak a közlekedési hálózatokon megjelenő forgalom lefolyására hálózati szinten több forgalomminőséget jellemző mennyiség együttes vizsgálatával. A vizsgálataimban 8 utcahálózati építőelemet néztem. A megfelelő eredmények érdekében e 8 jellemzőt összesen 23 négyzettrács

alapú, elméleti utcahálózat felhasználásával vizsgáltam.

Az utcahálózatok kialakításának és vizsgálatának sokszínűsége miatt a korábbi vizsgálatok mind az elemzett utcahálózati modellek elrendezésében, mind pedig a kutatási módszertanban (valós közlekedési viszonyok vizsgálata (Olszewski, Fan, Tan, 1995) és számítógéppel végzett vizsgálatok (Liu, May, Shepherd, 2011) eltérnek egymástól. Mindezek mellett a közlekedési modellezés a forgalmi vizsgálatok egyik elterjedt kiegészítő módja Budapesten is (Kerényi, Kórizs, Halmos, 2017).

Kutatási eredményeimet egy cikksorozat keretein belül mutatom be, amelynek első részében az alkalmazott vizsgálati módszertant mutatom be a területi és a forgalmi igénymodell segítségével. A cikksorozat második részében az eredményeket és az abból levont következtetéseket ismertetem. A harmadik, egyben utolsó részben az első két cikkben ábrázolt módszertant alkalmazom valós, lakótelepi utcahálózatok forgalmi vizsgálatához.

2. Metodológia

A metodológia fejezetben bemutatom a kutatás során elemzett elméleti, négyzetrács alapú utcahálózati modellek kialakítását, a rajtuk megjelenő közlekedési igény leképezését a forgalmi vizsgálatok során alkalmazott makroszkopikus forgalmi ráterhelési módszertanával.

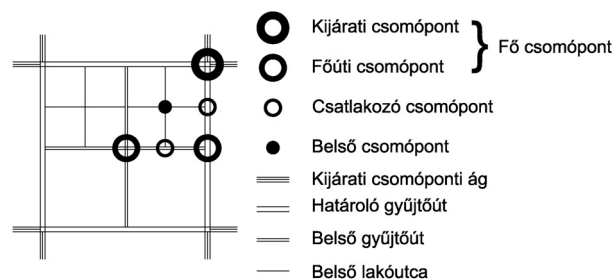
A településeket felépítő utcahálózatok építőelemi hálózati funkció alapján két csoportba sorolhatók, ún. közúti csomópontokra és a csomópontok között található, azokat összekötő útszakaszokra. E két alkotóelem számos eltérő tulajdonsággal rendelkezhet a hálózatban betöltött funkció és a rajta megjelenő eltérő közlekedési igények alapján. A közúthálózatok forgalmi kapacitása is erősen függ e két alkotóelemtől. A közlekedési hálózatok kapacitását tulajdonképpen a forgalom lefolyása szempontjából a kritikus elhelyezkedésű legszűkebb keresztmetszet kapacitása adja meg, ugyanakkor a közlekedési rendszerek átjárhatósága következtében a bejáratott útvonalak szűk keresztmetszetei gyakran új útvonalak használatára ösztönzik a közlekedőket. A mai korban, a közúti navigációs szoftverek (pl.: Waze) széleskörű használata által egyre inkább a közúti hálózatokon az egyéni optimum helyett a társadalmi optimum jelenik meg a forgalmi torlódásokban töltött idő minimalizálása érdekében.

Közúti közlekedési hálózatok forgalmi teljesítőképességének vizsgálatához olyan utcahálózati modellek összehasonlítására van szükség, amelyek csak bizonyos tulajdonságaikban térnek el egymástól a közlekedésre gyakorolt hatások összehasonlíthatósága érdekében. Az utcaszakaszok és a

csomópontok kialakítási lehetőségeinek módjai a valóságban mindig a forgalom nagyság, a forgalmi igények, a rendelkezésre álló terület, valamint az alkalmazható forgalombiztonsági és forgalomszabályzási beavatkozási eszközrendszerek együttes vizsgálatával határozható meg a különböző közlekedési módok figyelembevételével. A közlekedési hálózatok kismértékű megváltoztatása is jelentős hatást gyakorolhat a rajta megjelenő forgalom lefolyására.

2.1 Területi modell

A településeket felépítő utcahálózatokat közúti csomópontok és azokat összekötő utcaszakaszok segítségével definiáltam. A csomópontokra és utcaszakaszokra elhelyezkedésük és hálózati funkciójuk alapján az alábbi jelölés-rendszert alkalmaztam, amelyet a 1. ábra tartalmaz.



1. ábra. Közúti csomópontok és utcaszakaszok elnevezése elhelyezkedésük alapján

Közúti csomópontok esetén megkülönböztethető eseteket az 1. táblázat tartalmazza.

A csomóponti ágak járműosztályozó nélküliek, minden esetben irányonként 1 sávval rendelkeznek. Utcaszakaszok esetében megkülönböztethető eseteket a 2. táblázat tartalmazza.

A vizsgálataimban a lakóterületek elhagyhatóságával foglalkoztam. Az utcahálózati modellekben a forgalom vizsgált területen belül keletkezett és a hálózatot felépítő utcaszakaszokon keresztül hagyta el modellezési területet.

Első lépésben 23 elméleti, négyzetrács kialakítású utcahálózati modellt vizsgáltam. A 23 modellre azért volt szükség, hogy több, utcahálózatot felépítő alkotóelem forgalomra gyakorolt hatását vizsgálni tudjam. A csomópontok és utcaszakaszok elhelyezkedése alapján 8 vizsgálati paramétert határoztam meg. Ezekhez a vizsgálatokhoz összesen 23 db eltérő utcahálózat-kialakítással rendelkező elméleti modell készült. E modellek csoportosított elemzésével lehetővé vált az alábbi 8 paraméter vizsgálata:

- i. kijárató csomópontok elhelyezkedése,
- ii. kijárató csomópontok száma,

1. táblázat. Közúti csomópontok jellemzése

Név	Jellemzés	Forgalomirányítás
Kijárási csomópont*	A városrész határán lévő olyan csomópont, amely főútvonalon található, és amelyen keresztül a forgalom a városrészt elhagyja.	körforgalom †
Főúti csomópont*	Olyan csomópont, amely városrészt határoló főút és a városrészt feltáró gyűjtőutak találkozásában található.	körforgalom †
Csatlakozó csomópont	Városrész belső utcahálózatát elhagyó forgalom ezeken a csomópontokon keresztül érik el a belső gyűjtőutakat, illetve a határoló főutakat.	elsőbbségadás kötelező
Belső csomópont	Városrészben belüli lakóutak kereszteződése. A forgalmi szimuláció során alkalmazott csomóponti forgalomirányítás módja.	jobbkezd-szabály

* Fő csomópont: A kijárási csomópont és a főúti csomópont együttes elnevezése; † egysávos körforgalom

2. táblázat. Utcaszakaszok jellemzése

Név	Jellemzés	Megengedett sebesség	Írnyonként forgalmi sáv	Hálózati funkció*	Környezeti körülmény*
Kijárási csomóponti ág	városrészekhez kapcsolódó gyűjtőút, amely biztosítja közúti hálózaton megjelenő modellezett járművek kapcsolatát a város többi részével	$v_{max} = 50$ km/h	1	c	D
Határoló gyűjtőút	városrészeket határoló gyűjtőút	$v_{max} = 50$ km/h	1	c	D
Belső gyűjtőút	városrészben belüli, területi forgalomcsillapítással nem rendelkező út	$v_{max} = 50$ km/h	1	d	D
Belső lakóutca	forgalomcsillapítással rendelkező lakóutcák, vegyeshasználatú utak és szervízutak parkolóhelyekkel	$v_{max} = 30$ km/h	1	d	D

* e-ÚT 03.01.11 (ÚT 2-1.201). Közutak Tervezése, 1.1 táblázata alapján

- iii. kijárási csomópontok kijárási ágainak száma,
- iv. terület mérete,
- v. terület alakja,
- vi. a belső utcahálózatot felépítő párhuzamos utcaszakaszok távolsága, azaz a belső utcahálózati raszter,
- vii. a forgalom területről történő elhagyását biztosító gyűjtőút elhelyezkedése,
- viii. belső lakóutcák egyirányú forgalmi kialakítása.

Az elemzett 23 utcamodell által lehetőségem nyílt arra, hogy a vizsgálati paramétereknek az utcahálózatokon megjelent forgalomra gyakorolt hatása kutathatóvá váljon. Az egyes utcahálózati paramétereket csoportosítva vizsgáltam meg. A csoportos összehasonlítás eredményessége érdekében mindegyik vizsgálati csoport legkevesebb 4 utcahálózati modellt tartalmazott. A kutatás peremfeltételeinek meghatározása során adódott a kiválasztott 23 utcahálózati modell. Az elemzésre kiválasztott modelleket a fontosabb adatokra való tekintettel a 3. táblázat tartalmazza.

A 3. táblázat *A oszlopában* a modellek neve szerepel, az itt szereplő karakterek jelentése az alábbi, *e* vagy *s*: a kijárási csomópont elhelyezkedése, *e*: amely él mentén, a határoló gyűjtőút mentén a ut-

cahálózati modellek horizontális és vertikális szimmetriatengelyében elhelyezkedő kijárási csomópont, *s*: amely az utcahálózati modellek sarkában elhelyezkedő kijárási csomópont, *e4k*: a belső gyűjtőút az utcahálózati modell területén belül halad keresztül, *s8_egy*: az egyirányú forgalomirányítással rendelkező belső utcahálózat, *nr*: normál rendszer, *mr*: Malcher-rendszer, *kr*: körös-rendszer (Koller, 1986).

G oszlopban egy belső tömb területe szerepel, amely tömb területe az egymással párhuzamos utcák úttengelye által határolt terület nagyságával azonosítható. A valóságban ez a szabályozási szélességtől függően, ennél a méretnél egy lakótömb területe kisebb. A gyűjtőút elhelyezkedését a vizsgált modellekhez képest a *J oszlop* jeleníti meg. A *K oszlop* a teljes utcahálózat hosszát tartalmazza. A teljes utcahálózat meghatározása során forgalmi irányonként számítottam a lakóutcák és a gyűjtőutak összegzett hosszát.

A négyzetrács alakú utcahálózatok elemzése során, amely változó nagyságú forgalmi ráterhelés mellett történt az alkalmazott modellek mindegyikében a lakótömböket határoló, egymással párhuzamos utcaszakaszok úttengelye egymástól 125 m távolságra található.

3. táblázat. Vizsgált elméleti utcahálózatok kialakítása – fontosabb adatok

Utcahálózati modell neve	Modell területe (km ²)	Modell horizontális hossza (m)	Modell vertikális hossz (m)	Modell vertikális tömbszáma (db)	Modell horizontális tömbszáma (db)	Egy belső tömb területe (ha)	Kijárat csomópont szám (db)	Kijárat csomóponti ágyszám (db)	Gyűjtőút jellege*	Teljes utcahálózat hossza (km)
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
e3_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	3	3	határoló (zárt)	36.75
e4_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	4	határoló (zárt)	37.00
e4k_v0_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	4	belső	37.00
e4k_v1_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	4	belső	37.00
e4k_v2_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	4	belső	37.00
e4k_v3_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	4	belső	37.00
e4k_v4_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	3	határoló (részben)	37.00
s3_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	3	3	határoló (zárt)	36.75
s4_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	4	határoló (zárt)	37.00
s6_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	3	6	határoló (zárt)	37.50
s8_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	8	határoló (zárt)	38.00
s8_1000_8x5	1.0	1000	1000	8	5	2.500	4	8	határoló (zárt)	32.00
s8_1000_8x6	1.0	1000	1000	8	6	2.083	4	8	határoló (zárt)	34.00
s8_1000_8x7	1.0	1000	1000	8	7	1.786	4	8	határoló (zárt)	36.00
s8_391_5x5	0.391	625	625	5	5	1.563	4	8	határoló (zárt)	17.00
s8_563_6x6	0.563	750	750	6	6	1.563	4	8	határoló (zárt)	23.00
s8_766_7x7	0.766	875	875	7	7	1.563	4	8	határoló (zárt)	30.00
s8_625_8x5	0.625	625	1000	8	5	1.563	4	8	határoló (zárt)	25.50
s8_750_8x6	0.750	750	1000	8	6	1.563	4	8	határoló (zárt)	29.50
s8_875_8x7	0.875	875	1000	8	7	1.563	4	8	határoló (zárt)	33.75
s8_egy_nr_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	8	határoló (zárt)	24.00
s8_egy_mr_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	8	határoló (zárt)	24.00
s8_egy_kr_1000_8x8	1.0	1000	1000	8	8	1.563	4	8	határoló (zárt)	24.00

* határoló (zárt): határoló gyűjtőút határolja kívülről körül az utcahálózati modellt; határoló (részben): határoló gyűjtőút nem minden oldalról határolja körül az utcahálózati modellt; belső: belső gyűjtőút

4. táblázat. Vizsgált utcahálózati modellek jellemző topológiai mérőszámai

Terület neve	Utcahálózat-sűrűség (km/km ²)	Utcaszakasz-sűrűség (db/km ²)	Csomópont-sűrűség (db/km ²)	Kapcsolati index (db/db)	Alaktani index (km ² /km ²)	Egyirányú utcák arány (%)
e3_1000_8x8	36.000	288.000	77.000	3.740	0.637	0
e4_1000_8x8	36.000	288.000	80.000	3.600	0.637	0
e4k_v0_1000_8x8	36.000	288.000	81.000	3.556	0.637	0
e4k_v1_1000_8x8	36.000	288.000	81.000	3.556	0.637	0
e4k_v2_1000_8x8	36.000	288.000	81.000	3.556	0.637	0
e4k_v3_1000_8x8	36.000	288.000	81.000	3.556	0.637	0
e4k_v4_1000_8x8	36.000	288.000	81.000	3.556	0.637	0
s3_1000_8x8	36.000	288.000	80.000	3.600	0.637	0
s4_1000_8x8	36.000	288.000	81.000	3.556	0.637	0
s6_1000_8x8	36.000	288.000	80.000	3.600	0.637	0
s8_1000_8x8	36.000	288.000	81.000	3.556	0.637	0
s8_1000_8x5	30.000	186.000	54.000	3.444	0.637	0
s8_1000_8x6	32.000	220.000	63.000	3.492	0.637	0
s8_1000_8x7	34.000	254.000	72.000	3.528	0.637	0
s8_391_5x5	38.400	307.200	92.160	3.333	0.637	0
s8_563_6x6	37.333	298.667	85.333	3.500	0.637	0
s8_766_7x7	36.571	292.571	83.592	3.500	0.637	0
s8_625_8x5	37.200	297.600	86.400	3.444	0.572	0
s8_750_8x6	36.667	293.333	84.000	3.492	0.611	0
s8_875_8x7	36.286	290.286	82.286	3.528	0.631	0
s8_egy_nr_1000_8x8	22.000	176.000	81.000	2.173	0.637	77.778
s8_egy_mr_1000_8x8	22.000	176.000	81.000	2.173	0.637	77.778
s8_egy_kr_1000_8x8	22.000	176.000	81.000	2.173	0.637	77.778

A vizsgált utcahálózati modellek kialakításukban egymástól különböznek, ugyanakkor hasonló felépítést követnek. A 4. táblázat azon topológiai mérőszámokat tartalmazza, amelyek alapján az eltérő beépítési móddal rendelkező településrészeket jellemeztem (Háznagy, 2018).

Az utcahálózati modellek hasonló kialakítása és felépítése a topológiai mérőszámok felhasználásával láthatóvá válik. A mérőszámok megállapításakor a kijáratú csomóponti ágakat nem vettem figyelembe. A 3. táblázat második oszlopa által kijelölt területekbe beletartozó utcaszakaszokat és csomópontokat vettem figyelembe a számítás során. Az utcahálózatok felépítését jellemző mérőszámok nagyfokú hasonlósága mellett a forgalmi ráterhelések során kapott eredményekben mégis jelentős eltérések mutatkoztak. Ezek alapján a hálózati forgalom lefolyását befolyásoló utcahálózati elemek elrendezésében kis különbségek is jelentős hatást gyakorolnak az utcahálózatokon megjelenő forgalom lebonyolódására.

A kutatás során elemzett 23 utcahálózati modellt a vizsgálat során 6 csoportba soroltam. A csoportosítás elősegítette a 8 vizsgálati paraméternek a forgalom lebonyolódásra való hatásának vizsgálatát. A vizsgált esetek csoportosítása a 5. táblázatban található.

A 5. táblázat sorai tartalmazzák a vizsgálati csoportosításokat. Táblázat C és D oszlopában a vizsgálatra kiválasztott modelleket jellemeztem, dőlt betűvel emeltem ki a D oszlopban a kiválasztott modellek eltérő tulajdonságait. A vizsgálati paramétereket, amelyek részletes jellemzését az alábbi felsorolás tartalmazza.

- i. *Középpontosan hasonló területek nagyságának vizsgálata.* A településeket felépítő településrészek eltérő nagyságúak és alakúak. Állandó nagyságú utcahálózati raszter mellett, az eltérő méretű, középpontosan hasonló területek, azaz eltérő nagyságú négyzet alakú területek összehasonlítása révén megvizsgál-

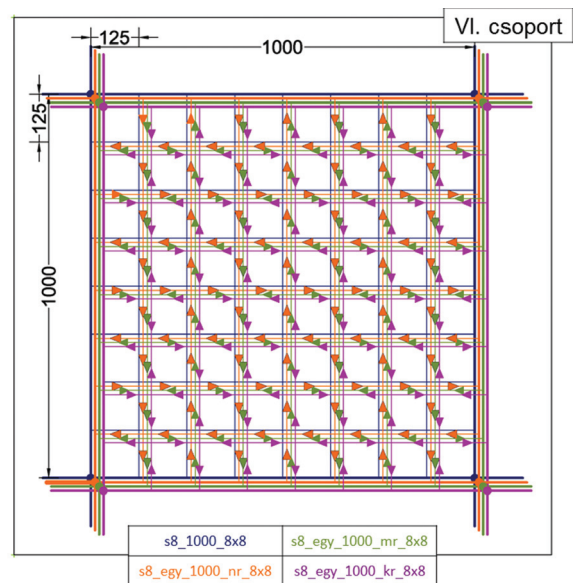
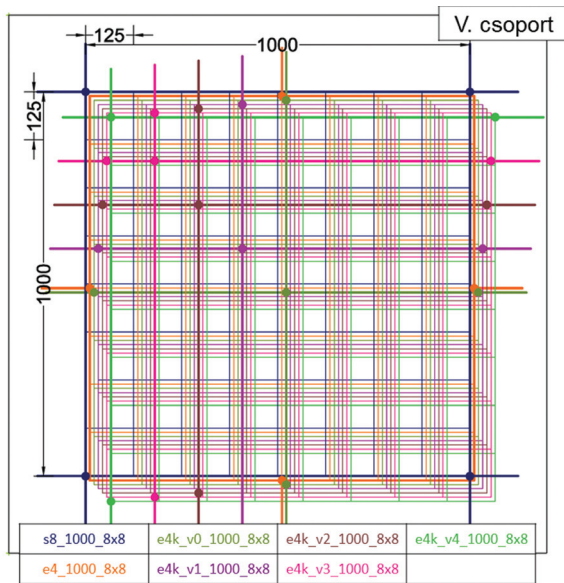
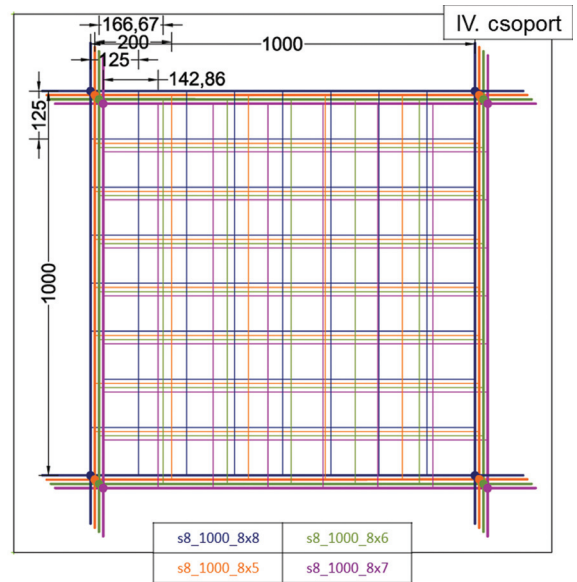
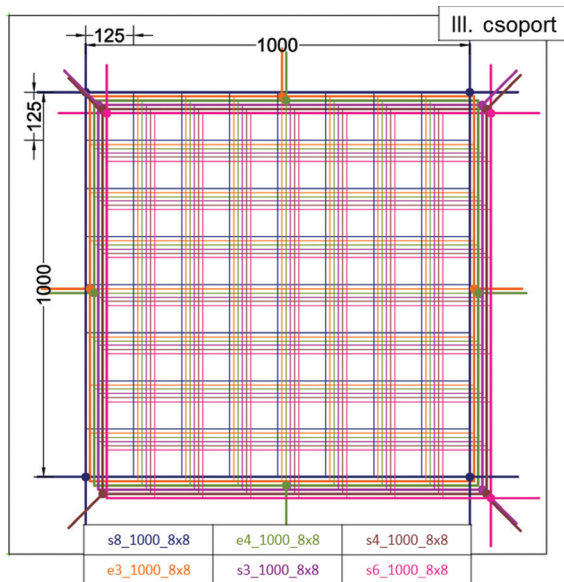
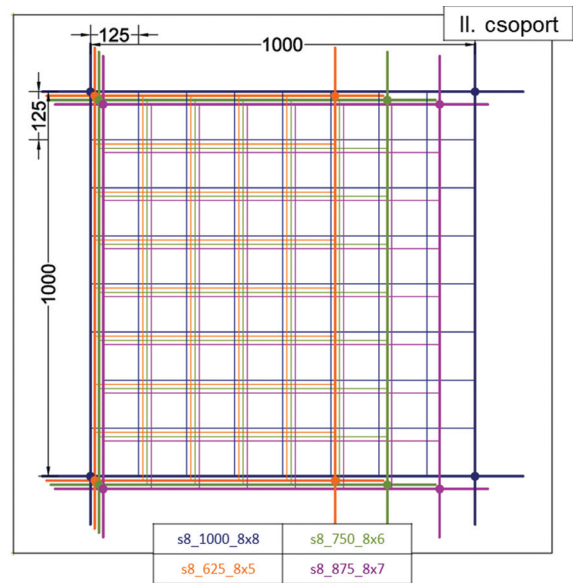
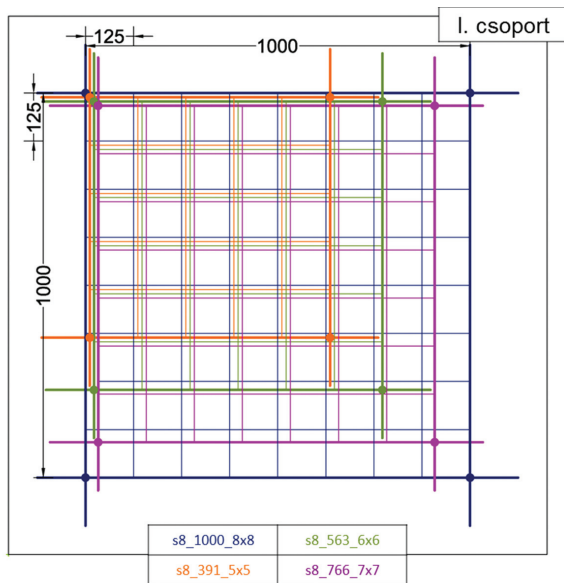
5. táblázat. Vizsgálatra kiválasztott utcahálózati modellek csoportosítása

Paraméter vizsgálat (vizsgálat célja)	Felhasznált modellek	Vizsgálatra kiválasztott modellek jellemzése (vizsgálat paraméterek)	
		Azonos paraméter	Eltérő paraméter
A	B	C	D
I. Ugyanolyan alakú, de eltérő méretű területek vizsgálata	- s8_1000_8x8 - s8_391_5x5 - s8_563_6x6 - s8_766_7x7	- Kijárat csomópontok elhelyezkedése - Kijárat csomópontok száma - Kijárat csomópontok kijárat csomóponti ágyszám - Terület alakja - Belső utcahálózati raszter - Gyűjtőút elhelyezkedése - Egyirányúsítás	- <i>Terület mérete</i>
II. Eltérő alakú területek vizsgálata	- s8_1000_8x8 - s8_625_8x5 - s8_750_8x6 - s8_875_8x7	- Kijárat csomópontok elhelyezkedése - Kijárat csomópontok száma - Kijárat csomópontok kijárat csomóponti ágyszám - Belső utcahálózati raszter - Gyűjtőút elhelyezkedése - Egyirányúsítás	- <i>Terület mérete</i> - <i>Terület alakja</i>
III. Kijárat csomópontok számának és elhelyezkedésének vizsgálata	- s8_1000_8x8 - e3_1000_8x8 - e4_1000_8x8 - s3_1000_8x8 - s4_1000_8x8 - s6_1000_8x8	- Terület mérete - Terület alakja - Belső utcahálózati raszter - Gyűjtőút elhelyezkedése - Egyirányúsítás	- <i>Kijárat csomópontok elhelyezkedése</i> - <i>Kijárat csomópontok száma</i> - <i>Kijárat csomópontok kijárat csomóponti ágyszám</i>
IV. Belső utcahálózat sűrűségének vizsgálata	- s8_1000_8x8 - s8_1000_8x5 - s8_1000_8x6 - s8_1000_8x7	- Kijárat csomópontok elhelyezkedése - Kijárat csomópontok száma - Kijárat csomópontok kijárat csomóponti ágyszám - Terület mérete - Terület alakja - Gyűjtőút elhelyezkedése - Egyirányúsítás	- <i>Belső utcahálózati raszter</i>
V. Gyűjtőutak elhelyezkedésének vizsgálata	- s8_1000_8x8 - e4_1000_8x8 - e4k_v0_1000_8x8 - e4k_v1_1000_8x8 - e4k_v2_1000_8x8 - e4k_v3_1000_8x8 - e4k_v4_1000_8x8	- Terület mérete - Terület alakja - Belső utcahálózati raszter - Egyirányúsítás	- <i>Kijárat csomópontok elhelyezkedése</i> - <i>Kijárat csomópontok száma</i> - <i>Kijárat csomópontok kijárat csomóponti ágyszám</i> - <i>Gyűjtőút elhelyezkedése</i>
VI. Utcáhalózat egyirányúsításának vizsgálata	- s8_1000_8x8 - s8_egy_1000_nr_8x8 - s8_egy_1000_mr_8x8 - s8_egy_1000_kr_8x8	- Kijárat csomópontok elhelyezkedése - Kijárat csomópontok száma - Kijárat csomópontok kijárat csomóponti ágyszám - Terület mérete - Terület alakja - Belső utcahálózati raszter - Gyűjtőút elhelyezkedése	- <i>Egyirányúsítás</i>

hatóvá vált a területi kiterjedés forgalomra gyakorolt hatása.

- ii. *Eltérő alakú területek vizsgálata.* A településeket felépítő településrészek eltérő nagyságúak és alakúak. Állandó nagyságú utcahálózati raszter mellett, az eltérő méretű négyszög alaprajzú területek összehasonlítása révén megvizsgálhatóvá vált a településrészek alakjának hatása a forgalom lebonyolódásra.

- iii. *Kijárat csomópontok elhelyezkedése, sarok menti kialakítások összehasonlítása.* A kijárat csomópontok elhelyezkedése a legtöbb esetben a vizsgált modellek sarkaiban kerültek definiálásra (4 db), csomópontonként 2 db kijárat csomóponti ággal (összesen 8 db). A kutatás során ez a fajta elrendezés összehasonlításra került másol elhelyezkedő kijárat csomóponttal (határoló él mentén közepén), más



2. ábra. Megvizsgált utcahálózati modellek csoportosítás alapján

kijárat csomóponti számmal (3 db) és eltérő kijárat csomóponti ágszámmal (3 db, 4 db, 6 db). A vizsgálat során mind a lakóutak, mind pedig a gyűjtőutak kialakítása azonos volt.

- iv. Belső utcahálózat sűrűségének vizsgálata. A vizsgálatokat a teljes hálózatra vonatkozóan elvégeztem. A vizsgálatra kiválasztott utcahálózatok szabályos négyzetrácsos utcahálózatok. A területet felépítő utcahálózat részei mind horizontális, mind pedig vertikális irányban azonos távolságra helyezkednek el egymástól. Az egymással párhuzamos útenyelvek távolsága változó (125,00 m, 142,86 m, 166,67 m, 200,00 m).
- v. Gyűjtőutak elhelyezkedésének vizsgálata. A településrészeket felépítő belső utak, a lakóutak és a magasabb hálózati ranggal rendelkező gyűjtőutak egymáshoz képesti elhelyezkedését vizsgáltam állandó nagyságú utcahálózati raszter mellett. A kijárat csomópontok száma és elhelyezkedése a gyűjtőutak elhelyezkedésétől függ.
- vi. Utcahálózat egyirányúsításának vizsgálata. Egyirányú utcaszakaszok megléte a választható útvonalak számát jelentősen befolyásolja. A vizsgálat során a makroszkopikus forgalmi elemzéshez hasonlóan három eltérő fajta kialakítást vizsgáltam. Ezek a négyzög – rendszer (alap_s8_egy_nr_1000_8x8), Malcher – rendszer (alap_s8_egy_mr_1000_8x8) és a körös – rendszer (alap_s8_egy_kr_1000_8x8). Az utcahálózati raszter és a kijárat csomópontok száma és elhelyezkedése állandó.

A vizsgált modellek csoportosítását a 2. ábra tartalmazza. Az utcahálózati modellek ismertetése során alkalmazott színek megegyeznek az eredmények kiértékelése során alkalmazott színekkel.

2.2 Forgalmi modell

Utcahálózatok forgalmi teljesítőképességének vizsgálata változó nagyságú forgalmi ráterheléssel. A vizsgálati módszer alkalmas volt arra, hogy a különböző utcahálózati elemek forgalom lebonyolódására gyakorolt hatása vizsgálható legyen. Az eltérő beépítési módokat és a vizsgálat során megjelent kapcsolatot Perényi Imre: Várostervezés tan c. könyve alapján (Perényi, 1978) a 6. táblázat tartalmazza.

Megjegyzendő, hogy beépítési módoként az egy lakásra jutó lakosság átlagosan 1,6 és 2,3 között alakul (Háznagy, 2018). A beépítési mód és a modal split változása a területet feltáró és kiszolgáló úthálózat felépítésére is hatással van, hogy a hálózat forgalmi kapacitása a felmerülő közlekedési igényeket kiszolgálja. A beépítési mód változása és eltérő modal split mellett a hálózat változó forgalmi kapacitásának vizsgálata nem képezte jelen kutatás tárgyát.

Az utcahálózatok makroszkopikus forgalmi vizsgálataihoz a német PTV közlekedési szoftverfejlesztő cég VISUM 15-ös forgalom szimulációs szoftverét használtam fel. A makroszkopikus közlekedési modellek felépítése során az azokat felépítő elemek, úm. utcaszakaszok, csomópontok, forgalmi zónák, konnektorok előre meghatározott tulajdonságok

6. táblázat. Különböző beépítési módok és forgalmi ráterhelés kapcsolata

Beépítés jellege	Népsűrűség (fő/ha)	Népsűrűség (fő/km ²)	Minimális járműszám esetén (320 E/h) az 1 lakosra eső gépjármű*	Maximális járműszám esetén (8320 E/h) az 1 lakosra eső gépjármű*	
Földszintes családi házas-telek övezet	extenzív jellegű kertes övezet	20–30	2000–3000	0,16–0,11	4,16–2,77
	intenzív, városias jellegű övezet	100–250	10000–25000	0,03–0,01	0,83–0,33
Alacsony beépítésű, jellegzetesen 2–3 szintes övezet	200–350	20000–35000	0,02–0,01	0,42–0,24	
Közepes beépítésű övezet; 4–5 szintes lakóépület	400–550	40000–55000	0,01–0,01	0,21–0,15	
Középmagas beépítésű övezet; 9–12 szintes lakóépület	600–700	60000–70000	0,01–0,01	0,14–0,12	

* 8. táblázat alapján

7. táblázat. Makroszimuláció során alkalmazott utcahálózatok tulajdonságai

Alkalmazott utca típusa	Sávszám – forgalmi irányonként (db)	Forgalmi teljesítőképesség (E/h/irány)	Megengedett maximális sebesség (km/h)
Belső lakóutca	1	500	30
Kijárat csomóponti ág, határoló gyűjtőút út, belső gyűjtőút	1	1000	50

alapján definiáltam. A közlekedési modellezésben alkalmazott ellenállásfüggvények eredményeképp a számítógéppel modellezett forgalom karakterisztikája torlódott állapotban eltér a valóságban tapasztalható lefolyástól. Túltelített forgalmi állapotban ezt mutatja az átlagos sebesség-forgalomnagyság és az átlagos utazási idő forgalomnagyság összefüggés alakja (Akcelik, 2003). Az utcaszakaszok forgalmi jellemzőit a 7. táblázat tartalmazza elméleti utcahálózatok esetében.

Csomóponti áthaladási időveszteség valamint a csomópontok kapacitásának meghatározására változó nagyságú forgalmi viszonyok mellett a HCM 2000 (Transportation Research Board National Research Council, 2000) alapú csomópontkapacitás-számítási módszert, a VISUM programba beépített ICA modult használtam fel. A csomóponti áthaladási időveszteség mértékét a csomóponton megjelenő forgalom nagyságának függvényeként automatikusan határozta meg a szoftver. Ez a módszer biztosította, hogy a csomóponti időveszteség a valósággal közel megegyező módon, dinamikusan alakuljon a forgalom nagyságától függően, és ne kerüljön sor előre definiált értékek alkalmazására a modellezés során. Csomópontokban a csomóponti visszakanyarodási (megfordulási) mozgás minden esetben tiltásra került.

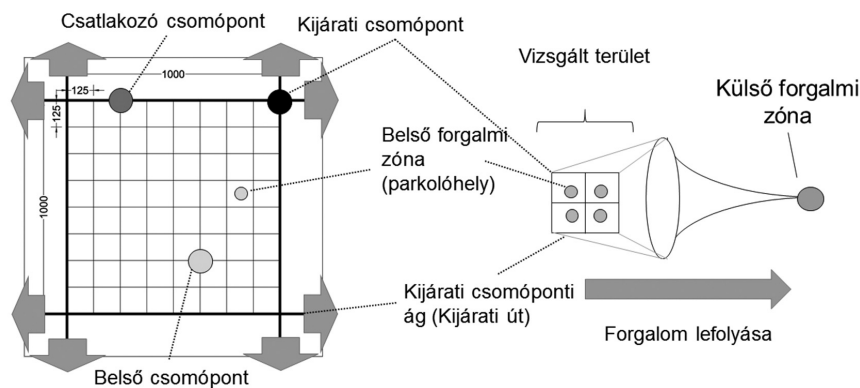
A belső forgalmi zónákat a belső, utcák által határolt tömbökben definiáltam, mint köz- vagy magánterületen lévő parkolás. A belső forgalmi zónákat a belső tömböket határoló csomópontokba konnektorok felhasználásával kötöttem be, amely biztosította a hálózat egyenletes alapterhelését.

Minden utcahálózati modell esetében 1–1 külső forgalmi zónát határoztam meg, ezt mint a hálózaton keletkező összes utazás végpontjaként definiáltam. A vizsgált hálózatokon megjelenő forgalom a belső forgalmi zónákban került generálásra, amíg

a vizsgálati területeket a külső forgalmi zónán keresztül hagyta el a hálózaton megjelenő forgalom. A külső forgalmi zóna és a kijárat csomóponti ágak közötti kapcsolatot biztosító konnektorok élhosszúságát minden esetben azonosan, 0 m-ként definiáltam. A hálózati modell vázát és a forgalmi terhelés utcahálózatokon belüli lefolyását a 3. ábra tartalmazza. Ezzel a módszerrel biztosítható volt, hogy a területeket elhagyó forgalom azonos valószínűséggel haladjon keresztül bármely kijárat csomóponton.

A 3. ábra bal oldala az elméleti utcakialakítást szemlélteti. A területről kifelé vezető nyilak mutatják, hogy milyen irányban képes a forgalom a vizsgált terület elhagyására. Az ábra jobb oldalán a terület forgalom-lebonylódásának váza látható. A belső forgalmi zónákból kiinduló forgalom a kijárat csomópontokon és a kijárat csomóponti ágakon keresztül hagyja el a vizsgált területet. A forgalmi ráterhelés ideje 1 óra volt.

Az elméleti utcahálózatok esetében a vizsgálat során a hálózaton megjelenő forgalom minden forgalmi ráterheléskor a belső forgalmi zónákban egyenletesen került szétosztásra, azaz a belső forgalmi zónához rendelt forgalom értéke mindig azonos volt. A legkisebb alkalmazott forgalmi terhelés a belső tömbök számától és a vizsgált utcahálózat méretétől függött. A maximálisan meghatározott forgalomnagysága a hálózatok forgalmi teljesítőképességeinek függvényében került meghatározásra. A forgalmi terhelés legnagyobb értéke mellett a hálózaton közlekedő járművek átlagos utazási sebessége tartósan 10 km/h alatti értéket vett fel. A köztes forgalomterhelések állandó nagyságú terhelési lépcsőkben történtek. A kritikus pontok környezetében – ahol kis forgalmi növekmény mellett az átlagos utazási idő ugrásszerűen megnövekedett, vagy az átlagos utazási sebesség ugrásszerűen



3. ábra. Makroszkopikus forgalmi vizsgálat elvi ábrája – elméleti kialakítás

8. táblázat. Elméleti utcahálózatok vizsgálata során definiált forgalomnagyságok határértékei

Terület neve	Belső tömbök száma (db)	Minimális forgalom – tömb (E/h)	Minimális forgalom-hálózat (F_{min}) (E/h)	Maximális forgalom-tömb (E/h)	Maximális forgalom-hálózat (F_{max}) (E/h)	Forgalmi határérték (F_h) (E/h)
e3_1000_8x8	64	5	320	60	5120	3008
e4_1000_8x8	64	5	320	75	6080	3968
e4k_v0_1000_8x8	64	5	320	80	6080	3968
e4k_v1_1000_8x8	64	5	320	80	6080	3968
e4k_v2_1000_8x8	64	5	320	75	6080	4032
e4k_v3_1000_8x8	64	5	320	75	6080	4096
e4k_v4_1000_8x8	64	5	320	75	6080	3520
s3_1000_8x8	64	5	320	60	5120	3008
s4_1000_8x8	64	5	320	75	6080	3968
s6_1000_8x8	64	5	320	85	6720	4160
s8_1000_8x8	64	5	320	110	8320	5824
s8_1000_8x5	40	10	400	190	8200	5960
s8_1000_8x6	48	10	480	150	8160	5760
s8_1000_8x7	56	10	560	125	8120	5880
s8_391_5x5	25	10	500	280	8000	6000
s8_563_6x6	36	10	360	200	8100	5712
s8_766_7x7	49	10	490	145	8085	5880
s8_625_8x5	40	10	400	180	8200	6000
s8_750_8x6	48	10	480	150	8160	5712
s8_875_8x7	56	10	560	125	8120	5880
s8_egy_nr_1000_8x8	64	5	320	110	8320	5760
s8_egy_mr_1000_8x8	64	5	320	110	8320	5760
s8_egy_kr_1000_8x8	64	5	320	110	8320	5760

csökkent – további forgalmi ráterheléseket végeztem el. A forgalmi ráterhelés során minden a forgalmi vizsgálatokban alkalmazott minimális (F_{min}) és maximális (F_{max}), továbbá a forgalmi határértékhez (F_h) tartozó forgalomnagyságokat a 8. táblázat tartalmazza.

A cikksorozat a vizsgálat eredményeivel és a belőlük levont következtetésekkel folytatódik.

Irodalom

- Akcelik R. Speed-flow models for uninterrupted traffic facilities. Akcelik & Associates Pty Ltd, 2003; 1–34.
- Burgess EW. The growth of the city: an introduction to a research project. Ardent Media. 1935.
- Harris CD, Ullman EL. The nature of cities. The Annals of the American Academy of Political and Social Science, 1945; 242(1), 7–17, <https://doi.org/10.1177/000271624524200103>
- Háznagy A. Budapest utcahálózatának topológiai elemzése. Útügyi Lapok, 2018; 6(11), 5–17.
- Hoyt H. The structure and growth of residential neighborhoods in American cities. 1939.
- Hurd RM. Principles of city and land values. The Record and Guide. 1903.
- Kerényi LS, Kőrösi AL, Halmos TZ. A Főváros és agglomerációja Egységes Forgalmi Modelljének létrehozása, fenntartása, alkalmazási területei és fejlesztési lehetőségei. Városi Közlekedés, 2017; 53(1):12–19.
- Knoflachner H. Bécsi tapasztalatok a 30 km/h sebességkorlátozó-sú területekről. Városi Közlekedés, 1992; 32(5): 263–268.
- Koller S. A városi forgalom minősége. Közlekedéstudományi Szemle, 1974; 24(10):443–449.
- Koller S. A 10. városi forgalmi tervezési és forgalomtechnikai tudományos tanácskozás. Városi Közlekedés, 1980; 20(1).
- Koller S. Forgalomtechnika és közlekedéstervezés. Budapest, Műszaki Könyvkiadó. 1986.
- Liu R, May T, Shepherd S. On the fundamental diagram and supply curves for congested urban networks.

- Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2011; 17, 229–246, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.516>
- Marshall S. Streets and Patterns (1 edition). Routledge. 2004.
- Meggyesi T. Városépítészeti alaktan. TERC Kft. 2009.
- Olszewski P, Fan HSL, Tan Y-W. Area-wide traffic speed-flow model for the Singapore CBD. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1995; 29(4):273–281, [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(94\)00033-7](https://doi.org/10.1016/0965-8564(94)00033-7)
- Perényi I. Várostervezés. Budapest: Tankönyvkiadó. 1978.
- Tímár A. Várostervezés-típusok értékelése a személyközlekedési ráfordítások alapján. Városi Közlekedés, 1986; 26(2):55–60.
- Transportation Research Board National Research Council. Highway Capacity Manual “HCM2000.” Washington, D.C. 2000.
- Vis AA, Dijkstra A, Slop M. Safety effects of 30 km/h zones in the Netherlands. Accident Analysis & Prevention, 1992; 24(1):75–86, [https://doi.org/10.1016/0001-4575\(92\)90074-S](https://doi.org/10.1016/0001-4575(92)90074-S)
- Wegener M. Overview of land-use transport models. Handbook of Transport Geography and Spatial Systems, 2004; 5:127–146.

NEMZETKÖZI SZEMLE

Mobiltelefon hálózati adatok felhasználása utazási viselkedési kutatásokhoz

The application of cellular network data for travel behavior research

Szerző(k): F.A. Gregersen, E.B. Lunke (Norwegian Centre for Transport Research)

Link:<https://www.toi.no/getfile.php/1348909/Publikasjoner/T%C3%98I%20rapporter/2018/1657-2018/1657-2018-el.pdf>

Terjedelem: 32 oldal

This report is a literature review of the application of cellular network data from mobile phones for travel behavior research.

Aktív forgalomirányítás tervezési eszköze a mikroszimuláció és a dinamikus forgalmi ráterhelés kombinálásával

A Planning Tool for Active Traffic Management Combining Microsimulation and Dynamic Traffic Assignment

S.D. Boyles, C.M. Walton, J. Duthie, E. Jafari, N. Jiang, A. Khani, J. Li, J. Osorio, V. Pandey, T. Rambha, C. Yahia (The University of Texas at Austin USA)

Link: <https://library.ctr.utexas.edu/ctr-publications/0-6859-1.pdf>

Terjedelem: 147 oldal

Active traffic management (ATM) strategies have been considered as a tool for congestion mitigation in the last few decades. They rely on real-time traffic observations to regulate the flow of traffic. This research focuses on developing tools for evaluating the effectiveness of ATM strategies for freeway corridors. The research efforts can be categorized into two parts. The first part performs a detailed microsimulation analysis for four ATM strategies commenting on their effectiveness under cases of recurring and non-recurring congestion and develops a hybrid microsimulation-DTA model to capture the combined microscopic and network-level impacts of an ATM strategy. The second part develops spreadsheet tools which are useful to predict effectiveness of an ATM strategy under different levels of data availability. Ramp metering, variable speed limits, and hard shoulder running are found effective on the Williamson County test network, whereas dynamic ramp control and freeway arterial coordinated operations do not lead to any significant improvement. We also find that ATM strategies can improve the performance over a corridor while simultaneously reducing the performance of frontage roads due to spillover effects. Our findings also indicate that a hybrid microsimulation-DTA model is useful for an accurate analysis. However, based on the network characteristics, changes in route choice patterns may/may not be significant. The regression models used in the spreadsheet tool in the second part provide a good fit to the simulation results and thus can be used as an initial tool for testing effectiveness of ATM strategies during planning stage.