



A V2X járműkommunikáció alapjai

**Petkovics Ármin¹, Szabó Csaba Attila¹,
Wipfelhauser András¹, Varga Norbert¹, Bokor
László¹**

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék

E-mail: petkovics@hit.bme.hu, szabo@hit.bme.hu, wipfelhauser@hit.bme.hu,
vnorbert@hit.bme.hu, bokorl@hit.bme.hu

DOI: [10.36246/UL.2020.2.01](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.01)

KIVONAT

A cikk a kooperatív intelligens közlekedési rendszerek (C-ITS) jármű-jármű és jármű-infrastruktúra vonatkozásában alkalmazott kommunikációs megoldások alapvető jellemzőivel foglalkozik. A gyűjtőnéven V2X-ként (Vehicle-to-Everything) nevezett technológiacsoport elsődleges célja a közlekedés biztonságosabbá és gazdaságosabbá tétele. A V2X-alkalmazások fejlesztését segíti a szabványos C-ITS kommunikációs architektúra, ennek ismertetése képezi az írás gerincét. A szerzők részletesen taglalják a C-ITS architektúra feladatait és szolgáltatásait, a menedzsment és biztonság rétegek jellemzőit, valamint a képességek réteg speciális megoldásait. A cikk célja, hogy a távközlési világból származó rétegszerkezet és az alapvető fogalmak bevezetésével közelebb hozza az olvasó számára a V2X járműkommunikációs technológiákat, áttekintse a már bevezetett, tudatos vezetést segítő C-ITS alkalmazásokat, és felvázolja a közeljövőben bevezetésre kerülő szenzor alapú érzékelésekre alapuló vezetést, majd a kicsit távolabbi jövőt jelentő kooperatív és szinkronizált kooperatív vezetést alkalmazásait, a rájuk építhető szolgáltatásokat, valamint a bennük rejlő távlati lehetőségeket.

Kulcsszavak: járműkommunikáció, V2X, C-ITS, tudatos vezetést, érzékeléseken alapuló vezetést, kooperatív vezetést

ABSTRACT

The paper introduces the basics of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure communication technologies of cooperative intelligent transport systems (C-ITS). The primary objective of this technology group, often called by the collective name V2X (Vehicle-to-Everything), is to help to enhance the safety and economic efficiency of our transportation systems. The paper focuses on the standardized C-ITS communication architecture that supports the development of V2X applications. The tasks and services of the specific architectural layers, such as the management, security, applications, facilities, transport, network and access layers, are dealt with in detail as the paper aims to make the reader familiar with the V2X paradigm by introducing the layered architecture well known from the telecommunications world. The authors also overview the already deployed applications supporting conscious driving and future applications supporting driving based on extensive sensor information sharing, and cooperative and synchronized driving applications relying on intention and coordination data exchange.

Keywords: vehicular communications, V2X, C-ITS, conscious driving, sensing-based driving, cooperative driving

Petkovics Ármin

Műszaki informatikus Msc diplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen szerezte meg 2013-ban. Ugyanettől az évtől a BME Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszékének oktatója

számítógép hálózatok és médiainformatika témakörökben. Kutatási területei az okos városok és szolgáltatásaik köré csoportosulnak és magukban foglalják az adatgyűjtést megvalósító mobiltelefonos közösségi érzékelést és a városi közúti közlekedés optimalizálását. A 2012-ben a reggio calabriai Mediterrán Egyetem, 2018-ban pedig a trentói Fondazione Bruno Kessler vendégkutatója volt. A Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület tagja és Ifjúsági Tanácsának vezetője 2009 óta: konferenciáin több évig az Ifjúsági Szekció szervezője, HTE Ezüst- és Aranyjelvény kitüntetettje, illetve a HTE Távközlési Klub szakmai rendezvénysorozat szervezője.

Prof. Dr. Szabó-Csaba Attila

Rádiómérnök MSc-diplomáját a Szentpétervári Állami Távközlési Egyetemen, Dr. Univ. és PhD-fokozatát a BME-n szerezte meg, az MTA-tól a műszaki tudomány doktora címet nyerte el. A BME-n létrehozta és vezette a MEDIANETS Laboratóriumot. Az 1990-es évek elején a Business Communications Networks amerikai-magyar hálózatintegrátor cég társalapítója és 2002-ig vezetője volt. 2000-2002-ben a Magyar Telekom divízió-igazgatójaként is tevékenykedett. 2002-2003-ban az olaszországi Trentino tartomány elnöki tanácsadójaként részt vett a régió optikai-rádiós hálózati infrastruktúrájának tervezésében. 2003 és 2010 között a Create-Net nemzetközi kutatóközpont főmunkatársaként EU- és olasz kutatási projektek vezetése mellett irányította egy innovatív városi szélessávú teszthálózat kialakítását. Sok éven át a HTE Híradástechnika folyóiratának főszerkesztője és az Infocommunications Journal alapító főszerkesztője volt. Puskás Tivadar- és Gábor Dénes-díjas, a Magyar Érdemrend Lovagkeresztje kitüntetés birtokosa. Jelenleg a BME Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások tanszékének professzor emeritusa.

Wipfelhauser András

BSc tanulmányait 2014 és 2018 között végezte a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen Mérnök-informatikus szakán és infokommunikáció specializációján. Szakdolgozatát a MEDIANETS laborban írta, Kooperatív járműkonvojok algoritmusait befolyásoló V2X kommunikációs paraméterek szimulációs vizsgálata témában. 2017 őszi szemeszterében külföldi részképzésben az Erasmus+ program keretein belül a lisszaboni NOVA IMS Information Management School intézményben tanult. 2018 és 2020 között a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen Mérnök-informatikus MSc képzésén szerzett diplomát. Diplomamunkájában a C-ITS rendszerek szolgáltatásminőségét befolyásoló V2X kommunikációs paraméterek szimulációs vizsgálatát végezte el. 2018 óta dolgozik a Commsignia Kft vállalatnál -2020 áprilisa óta kutatómérnök pozícióban-, amely a V2X technológia területén világszínvonalú kompetenciával bír. 2020 szeptemberében kezdte meg PhD tanulmányait a BME Informatikai Tudományok Doktori Iskolájában.

Varga Norbert

2014-ben szerzett diplomát a BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar mérnök informatikus szakán, alkalmazott informatika szakirányon Ezt követően a BME Informatikai Tudományok Doktori Iskolájában, a Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszékén kezdte meg a doktori képzést, melyen 2018-ban abszolutóriumot szerzett. Jelenleg tudományos segédmunkatársként dolgozik a tanszéken. Főbb kutatási területei az infokommunikációs hálózatok és jövőbe mutató távközlési megoldások. Kutatási témái között szerepel a heterogén, elosztott, dinamikus és proaktív mobilitás-kezeléssel támogatott, skálázható mobil architektúrák, a járműkommunikáció, a dolgok internete (IoT) és az intelligens környezetek konvergenciájához kötődő technológiák. Az elmúlt években a kutatási tevékenysége a hybrid/heterogén V2X kommunikációs (ITS-G5 + 4G/5G celluláris) architektúrákra és szolgáltatásokra fókuszált a rádiós infrastruktúra tervezéstől egészen az járműkommunikációs alkalmazások fejlesztéséig. Számos ehhez a területhez kapcsolódó hazai és nemzetközi ipari K+F projekt tagja. Tagja a HTE és ITS Hungary egyesületeknek. Eddigi tudományos munkásságát és eredményeit Csibi Sándor ösztöndíjjal és az Új Nemzeti Kiválóság Program doktorjelölti ösztöndíjával ismerték el.

Dr. Bokor László

2004-ben szerezte mérnöki diplomáját a BME Villamosmérnöki Karának Műszaki Informatika Szakán. A BME Informatikai Tudományok Doktori Iskolájába az Ericsson HSN Laboratory Ph.D. ösztöndíjasaként nyert felvételt, 2014-ben doktorált. A Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék Mobil Kommunikáció és Kvantumtechnológiák Laboratóriumának és a Mobil Innovációs Központnak a tagjaival számos hazai és európai uniós projekt munkájában vett részt, előbb kutatóként, majd hazai

kapcsolattartóként és munkacsomag vezetőként. IEEE tag, tagja a MEDIANETS Laboratóriumnak, a Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesületnek, az ITS Hungary Egyesületnek, és a Magyar Szabványügyi Testület Intelligens közlekedési rendszerek Műszaki Bizottságának. A BME-n tanít, a tanszéken működő járműkommunikáció kutatócsoport vezetője, a Mobilitás Platformban a hálózatba kapcsolt járművekkel foglalkozó munkacsoport irányítója, számos oktatási anyag, könyvfejezet, folyóiratcikk, és konferencia-kiadványban megjelent cikk szerzője ill. társszerzője. Szakmai tevékenységét a Hírközlési és Informatikai Tudományos Egyesület 2013-ban HTE Ezüst Jelvénnnyel, 2015-ben Pollák-Virág díjjal, 2018-ban Arany Jelvénnnyel ismerte el. 2016-ban az Új Nemzeti Kiválóság Program felsőoktatási posztdoktori kutatói ösztöndíjjal jutalmazta, 2018-ban a járműkommunikáció területén folytatott oktatási és kutatási tevékenységéért dékáni dicséretben részesült.

1. BEVEZETÉS

Az elektronika és a távközlés fejlődésével az érzékelésen alapuló vezérlő és beavatkozó rendszerek hihetetlen sebességgel kezdtek terjedni, és az 1970-es évektől kezdődően a közúti járműveket is fokozatosan ellepték a mikro-elektromechanikai megoldások (microelectromechanical systems, MEMS), és általuk eljött a multifunkcionális, kis hatótávú és kisméretű szenzorokra támaszkodó rendszerek világa. Törték a nagy hőingadozást és a rezgéseket, ezáltal gépjárművekbe történő beépítésre is alkalmassá váltak: kezdetben a meghajtott tengely forgási sebességét (és ebből a jármű sebességét) mérték vele, valamint az olaj és hűtővíz hőmérsékletét. Ma már egészen extrém és sokféle felhasználási módjuk ismert, a hangsúly pedig eltolódott az alapfunkciók támogatása felől a biztonsági- és komfortfunkciók irányába.

A biztonsági funkciók egy ideje már nem számítanak luxusnak, hanem kötelező elemei lettek a közúti járműveknek: 2004 óta minden EU-ban forgalomba állított autóban kötelező blokkolásgátlót alkalmazni (Anti-lock Braking System, ABS), ugyanitt, 2014 óta az ESP menetstabilizáló (Electronic Stability Program) is kötelező alapfelszereltség. Gondoljuk csak végig: az ABS működéséhez minden keréknél szükség van egy-egy szenzorra, ami figyelni azt, hogy fékezéskor blokkol-e a kerék, az ESP-nél pedig minden kerékhez kell egy forgássebesség-szenzor, egy giroszkóp-gyorsulásmérő páros az oldalirányú gyorsulás érzékelésére, valamint még egy szenzor, ami a kormányszögállást érzékeli. De ezeken kívül is rengeteg, az autókban már most is széles körben használt szenzorokat sorolhatunk fel: lambdaszenzor az üzemanyag-levegő keverék arányának beállítására, esőszenzor az automatikus ablaktörléshez, külső és belső hőmérsékleti szenzorok, melyek figyelmeztetnek, ha kinn fagyponthoz közelre süllyed a hőmérséklet, illetve egészen komfortosan, fél fokos pontossággal állítják be a vezetői fülke hőmérsékletét. Újabban az ultrahang- és kamerarendszerek, valamint a RADAR (Radio Detection and Ranging) és LIDAR (Light Detection and Ranging) alapú megoldások is egyre elterjedtebbek. Az ultrahangos érzékelés pl. a parkolásnál segít, illetve a kamera alapú megoldásokkal együttműködve automatikus távolság- illetve sávtartást tesz lehetővé. Természetesen ez azzal jár, hogy szükség esetén gyorsítja vagy lassítja az autót, tehát már „beleszól” annak közvetlen irányításába is. A kamerarendszer is besegíthet parkolásnál, de szabad parkolóhelyek keresésére is alkalmas. A RADAR-ra, LIDAR-ra és kamerákra alapozó vezetéssegítő, -támogató és kényelmi rendszereket ADAS-alkalmazásoknak nevezik (Advanced Driver Assistance Systems). Ezek a rendszerek a járművek autonóm, azaz önálló mozgása irányába mutatnak: az önvezetés természetesen itt még nem teljes, de a cél az, hogy a szenzorokkal nagy biztonsággal kezelhető helyzetek megoldásának terhére levegyék a sofőrök válláról.

Az autókba telepített szenzorokat alapvetően két típusra oszthatjuk. Az egyik csoportba tartozók az autó alkatrészeinek állapotát monitorozzák, az autó üzemeltetését segítik: visszajelzést adnak annak állapotáról. A környezeti érzékelők a vezetéssegítő rendszert látják el információval, a környezet megfigyelésére összpontosítanak: sávjelzéseket értelmeznek, időjárás paramétereit gyűjtnek, közelben közlekedő autót észlelnek, mérik azok gyorsulását, stb. Vannak viszont olyan helyzetek, ahol szenzorokkal együtt sem tud egy autó biztonságosan áthaladni. Ilyen például egy beláthatatlan kereszteződés: nincs ugyanis több releváns információja egy emberi sofőr által begyűjthetőnél, hiszen a

szenzor sem tudja, hogy mi van a „kanyar mögött”, a legmodernebb megoldások sem látnak át házakon. Viszont, ha van autó a kanyarban, akkor az akár „szólhatna” is arról, hogy érkezik, és mi nem mennénk ki elé: megszületik tehát az igény a kommunikációra. Ha egy autó nem is tud mindent az útszakasról, többen, kooperatív módon együttműködve, az adatforrásaikat (szenzoradataikat) megosztva egészen pontos képet alakíthatnak ki az útszakasz állapotáról, forgalmáról, jellemzőiről. Ez a V2V, azaz Vehicle-to-Vehicle, autók közötti kommunikáció, amely a járművek együttműködésével hoz létre kooperatív tudatosságot: minél több forrás, annál több és megbízhatóbb a leszűrt információ mennyiség. Azonban míg a járművek egymás közötti „beszélgetése” megoldhatja a helyzetet bizonyos szituációkban, addig más esetekben be kell vonni az infrastruktúrát is, pl. a közlekedési lámpákat, meteorológiai állomásokat, változtatható jelzéseképű táblákat, mivel az útinfrastuktúra üzemeltetője olyan információkat birtokolhat, melyeket nem lehet előre jelezni, melyeket nála pontosabban senki sem tudhat. Itt válik szükségessé a V2I és I2V (Vehicle-to-Infrastructure, és fordított irányban), tehát az infrastruktúra-jármű vagy jármű-infrastuktúra kommunikáció. Mindennek az összefoglaló neve a napjainkban már ismerősen csengő V2X (Vehicle-to-Everything) vagy C2X (Car-to-Everything), azaz járművek kommunikációja „minden mással” (Zhou et al., 2020). A magas szintű kooperáció eredménye pedig a kooperatív intelligens közlekedési rendszerek (Cooperative Intelligent Transport Systems, C-ITS) ökoszisztémája, melyben a járműkommunikációs infrastruktúrára épülve a fejlett szolgáltatások széles skálája biztosítható (Hamilton, 2016).

2. A JÁRMŰKOMMUNIKÁCIÓ CÉLJAI ÉS KIHÍVÁSAI

A V2X lehetővé teszi, hogy az autók együttműködjenek az útinfrastuktúra és/vagy a város közlekedésirányításával, valamint más járművekkel, így optimalizálva, és persze elsősorban *biztonságosabbá* téve a közlekedést. Az autó vezetőjének információja lesz a nem belátható területekről érkező veszélyekről, eseményekről, döntéseit így lépésről lépésre segítik a járműkommunikációs rendszerek.

Régóta léteznek már olyan megoldások, melyek mobiltelefonos applikáció formájában jeleznek a sofőrnek az útvonalon várható eseményekről, kátyúkról, balesetekről: ilyen például a jól ismert Waze alkalmazás is (Waze, 2020). A V2X viszont többet kínál: a Waze frissítési ideje nem versenyezhet a V2X milliszekundumos késleltetésével: éles szituációkban, ütközés-elkerülésnél a Waze, vagy más, applikációba ültetett közlekedést segítő rendszerek nem versenyképesek, és nem is ez a céljuk. Amit tehát szeretünk a Waze-ben, azt a V2X alapból tudja majd támogatni, és nem csak informáló-segítő alkalmazásként, hanem biztonságkritikus döntési helyzetekben is megállja a helyét. A járműkommunikáció elsődleges célja tehát a biztonság, a közúti halálesetek és alapvetően a balesetek visszaszorítása. Ebből adódik, hogy a Waze-jellegű alkalmazásokkal ellentétben a V2X-ben nem feltétlenül követelmény az információt hordozó csomagok nagy távolságokra való elküldése: a közvetlen, viszonylag kis hatótávolságú, elosztott kommunikációra hatékonyan építhetők a biztonsági alkalmazások.

A biztonságon felül a takarékoság is motiválja a V2X kommunikációra épülő szolgáltatások bevezetését: a szenzorok által egyformán nagyon gyors „reakcióidővel” rendelkező autók, teherautók konvojban, gyorsan, egymáshoz nagyon közel haladva spórolhatnak rengeteg üzemanyagot a légellenállás okozta veszteségek minimalizálásával.

További célok közt lehet említeni a real-time multimédiás alkalmazásokat, a dugók elkerülését, a károsanyag-kibocsátás csökkentését is, tehát sok olyan szolgáltatást, amit az okos város koncepció is megcéloz: ehhez a V2X megfelelő eszköznek bizonyul.

A V2X fejlesztések előremutató célterülete az önvezető járművek támogatása és széleskörű alkalmazhatóságuk, elterjedésük segítése. Az autonóm járművek jelenleg elérhető változatai ott tartanak, hogy az emberi vezetőt próbálják gépekkel emulálni: szenzorokkal látnak, hallanak és érzékelnek, az aktuátorok (beavatkozók) pedig helyettesítik az ember reakcióit (pl. elektromos működtetésű hidraulikus kormányrészegység, elektromechanikus fékrendszerek, stb.). Viszont ahogyan a beláthatatlan kanyarnál is említettük: az emberi sofőr emulálásával és szenzorokkal/beavatkozók

történő helyettesítésével csak maximum egy emberhez hasonló módon érzékelő szerkezetet fejlesztünk. A V2X-szel viszont jóval több információ biztosítható az autonóm működéshez, megalapozottabb döntéseket hozhat az önvezető jármű, melyekhez az összes közlekedő és maga az infrastruktúra is hozzájárulhat az információi megosztásával (Edwards, 2015). Így létrejöhet a kooperatív tudatosság, melyre alapozva komplex szolgáltatások és alkalmazások építhetők fel.

A célkitűzések között a felhasználási területek és a hozzájuk kapcsolódó alkalmazások továbbfejlesztése mellett fontos megemlíteni egy világszinten szerveződő mozgalmat, a Vision Zero-t (Vision Zero, 2020): célja hosszabb távon minden emberi hibalehetőség kizárása a közlekedésből, ezzel a balesetek és halálesetek nullára csökkentése és a közlekedési dugók elkerülése. Utóbbit a közlekedni kívánók, illetve az őket szállító (autonóm) járművek tökéletes informáltságával tervezik elérni. Mindez természetesen a környezetet is pozitívan érinti majd: városoként évente több milliárdnyi felesleges dugóban töltött óra gazdasági hátrányt okozó hatása és felesleges károsanyag-kibocsátása is megtakaríthatóvá válhat.

Az Európai Unió is hasonló törekvéseket fogalmazott meg: az aktuális célkitűzés szerint 2030-ra 40%-al kell csökkenteni a gazdaságok kibocsátását az 1990-es szinthez képest (EC, 2014).

Természetesen a szabványosítás és a kezdeti megvalósítások során már előjöttek a technológia kihívásai is, amikkel meg kell birkózni. Ilyen például az autók közötti nagy relatív sebesség, amely elsősorban autópályákon jelentkezik: két szemben haladó jármű viszonylagos sebessége 2-300 km/h is lehet. Ebből eredően a topológia is nagyon gyorsan változhat, a szemben haladó autók nagyon rövid ideig vannak egymás „hatótávolságában”, így az üzenetek továbbítása ebbe a rövid időbe kell, hogy beleférjen, vagy alternatív megoldást kell kifejleszteni egy hatékonyabb, ad-hoc szerveződő hálózati struktúra formájában. A túlzottan sok kommunikáló eszköz is lehet gond: dugóban állva, ha mindenki csak periodikusan küld magáról információkat, az is a rádiós/hálózati közeg túlterheléséhez vezethet. Ilyen esetben viszont nagy újdonságértékkel sem rendelkezik az, hogy az autó még mindig ugyanazon az útszakaszon vesztegel, tehát érdemesebb ritkábbra venni a jelzéseit vagy eseményvezérelté tenni: elindulás, dugóból kiszabadulás esetére például. Az ilyen és ehhez hasonló kihívásokat tartalmazó komplex igényrendszert (Karagiannis et al., 2011; Wymeersch et al., 2015) kell tudnia kezelni a kooperatív intelligens közlekedési rendszerek architektúráinak, a megvalósítandó járműkommunikációs szolgáltatási rendszereknek.

Cikkünkben áttekintjük a C-ITS architektúra alapvető jellemzőit, és a telekommunikációs iparból származó rétegszerkezet-alapú csoportosításban tárgyaljuk azokat a legfontosabb építőelemeket, melyek nélkülözhetetlen infrastruktúra-összetevőként minden bizonnyal jelentős hatással lesznek közlekedésünk jövőjére.

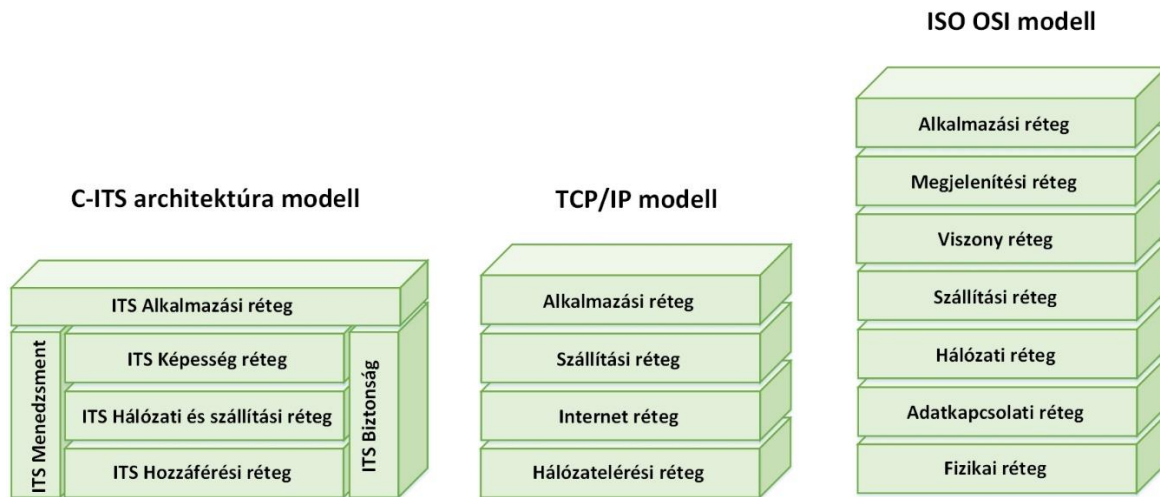
3. A C-ITS ARCHITEKTÚRA

A C-ITS kommunikációs architektúra már több mint tíz éve szabványosítás alatt van, kisebb kiegészítéseket kap még, de alapvetően letisztult és stabil (1. ábra) (ETSI 302 665, 2010). Érdemes összehasonlítani az internet működésének alapjául szolgáló, a hálózati számítógépek kommunikációjához definiált TCP/IP protokoll-hierarchia szerkezetével vagy az ISO OSI szabvánnyal (ISO / IEC 7498-1, 1994): a C-ITS-ben vannak vertikális rétegek is. Ezek a *Biztonság réteg (ITS Security Layer)* és a *Menedzsment réteg (ITS Management Layer)*: nem csak a közvetlen felettük vagy alattuk lévő réteggel vannak direkt összeköttetésben, hanem mindegyikkel: ez javítási lehetőségeket rejt magában a rétegek közötti (cross-layer) optimalizáció (Karagiannis et al., 2011) révén és integrált biztonsági mechanizmusok megvalósítására is hatékony eszközöket biztosít.

További hasonlóság az OSI-rétegszerkezettel, hogy mindkettőben megtalálható a közeghozzáférési (ITS Access Layer), a hálózati és transzport (ITS Network and Transport Layer) valamint az alkalmazási réteg (ITS Applications Layer). A C-ITS-architektúrában azonban megjelenik egy új, ún. *Képesség réteg (ITS Facilities Layer)* is. Ez a réteg arra szolgál, hogy a C-ITS/V2X-alkalmazások speciális igényeit közvetlenül, speciális C-ITS fókuszú képességekkel ki lehessen elégíteni. Ilyenek például a kooperatív tudatosságot előidéző üzenetváltások: periodikus- és eseményvezérelt információadás a közlekedésben

részt vevő komponensek állapotáról, amit a többiek elfognak és az alapján tudnak reagálni, illetve a hordozott információkat be tudják építeni a „világképükbe”.

A következőkben áttekintjük a C-ITS protokoll-hierarchia és szabványos kommunikációs architektúra fentebb felsorolt alapvető rétegeit, fontosabb jellemzőiket és feladataikat, a közegehozzáféréstől az alkalmazási rétegig bezárólag.



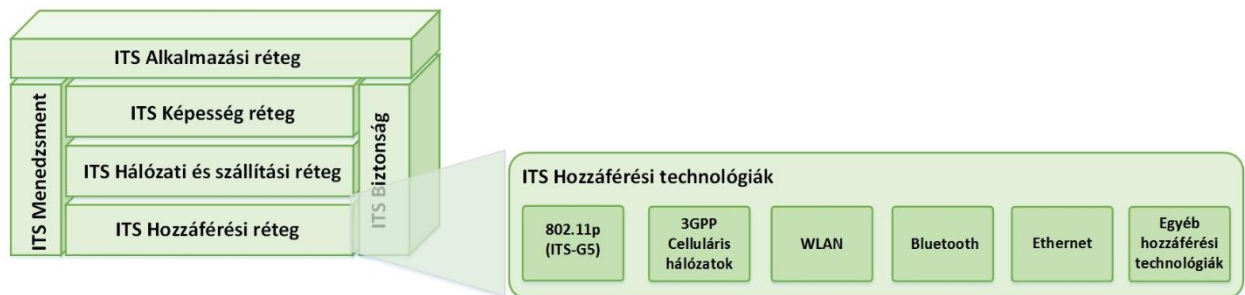
1. ábra. A C-ITS-architektúra összehasonlítása a TCP/IP és az ISO OSI rétegszerkezetekkel.

3.1. ITS HOZZÁFÉRÉSI RÉTEG (ITS ACCESS LAYER)

Transzparens réteg, felcserélhetőek benne a Wi-Fi alapú, Bluetooth-os, cellás és vezetékes hozzáférési módok (2. ábra). Az aktuális C-ITS telepítési és továbbfejlesztési erőfeszítések a rendelkezésre álló rádiós hozzáférési technikákon alapulnak. Ezek az IEEE 802.11p/ETSI ITS-G5 (röviden ITS-G5) (ETSI 302 663, 2020), valamint a 3GPP mobil celluláris hálózatainak (3GPP, 2020) harmadik és negyedik generációi (3G és 4G cellás technológiák). Ebben a jelenleg elérhető kombinációban az ITS-G5 megoldás adja a rövid hatótávolságú, ad-hoc hálózati technikákra épülő kommunikációs technológiát, melyet kiegészítenek a nagy hatótávolságú 3G/4G mobil celluláris rendszerek. Az IEEE 802.11p szabvány (IEEE Std 802.11TM-2016, 2016) használatos leginkább az aktuális pilot projekteknél (pl. EU C-ROADS (C-ROADS, 2020), US Connected Vehicle Test Bed (Connected Vehicle Test Bed, 2020)), ennek megfelelő 5,9 GHz-es frekvenciatartomány (ETSI 302 571, 2017; Kenney, 2011) és a definiált működés használatos a világ legnagyobb részén, néhány kivétellel (Japánban 700 MHz a kijelölt sáv, illetve Kínában inkább celluláris megoldásokat tesztelnek). Ez a szabvány hasonló az otthoni használatra szánt Wi-Fi-hez, de nem az ISM (Industrial, Scientific, Medical) szabad frekvenciasávjában működik, hanem engedélyköteles sávban. Napjainkra már kiforrott, „automotive grade” szintű, vagyis megkezdődött a járművekben való alkalmazásuk (pl. a 2019-ben megjelent Volkswagen Golf 8 modell esetén). Az 1980-as években megkezdett C-ITS kutatási munka 2008-ban ért oda, hogy az Európai Bizottság kijelöljön egy 30 MHz-es tartományt (5875 - 5905 MHz az 5,9 GHz-es frekvenciasávon belül a biztonsággal kapcsolatos ITS-alkalmazásokhoz (EC/2008/671) (2008/671/EC, 2008). 2013-ban került kiadásra az első, valós telepítéseken végzett teszteken alapuló ITS-G5 európai szabványcsalád, melyre támaszkodva napjainkban már off-the-shelf termékek és éles környezetben használható C-ITS-rendszerek érhetők el világszerte.

A 802.11p alapú C-ITS közegehozzáférés hatótávolsága ~800–1600 méter a rádiós és földrajzi viszonyoktól függően. Ezen távolságon belül rengeteg autó feltorlódhat, így nagyon fontos, hogy a haladási sebességtől függően adaptívan szabályozzuk a „levegőben lévő” csomagok számát, mivel a rádiós erőforrás egyrészt telítődhet, másrészt viszont egy lassan haladó járműről értelemszerűen nem ad több hasznos információt az, ha másodpercenként többször is jelent magáról, mintha lassú haladás esetén mindezt csak másodpercenként tenné meg. Ez az adaptív változtatás a közegehozzáférési réteget érinti, de az ITS Management vertikális rétege segítségével kivitelezhető megfelelő gyakorisággal és

megfelelően rövid idő alatt. Szintén flexibilitást követel meg az egyéb, 5 GHz-es sávban működő alkalmazásokkal való együttélés: több helyen (pl. Olaszország, Ausztria) az autópálya-fizetőkapuk egy része az 5795 MHz – 5815 MHz sávban működő DSRC-technológiákat alkalmazza (ECC Report 250, 2016), ami potenciális interferencia-lehetőség a C-ITS 5855 MHz – 5925 MHz sávjával. Így a V2X átvitelt használó járműveknek észlelniük kell, ha ilyen kapuhoz közelednek, és vissza kell venniük ezen időszakban az adási teljesítményükből (ETSI 102 792, 2015). Ezzel a hatótáv, vagyis az a távolság „ameddig ellátnak”, csökken, de ez nem jelent különösebb gondot, hiszen a kapuknál egyébként is lassítaniuk kell. Nem meglepő módon ebben is a vertikális Management réteg működik közre.



2. ábra. A C-ITS architektúra Hozzáférési rétege.

A hozzáférési technológiák fejlődése természetesen még nem zárult le: a Wi-Fi megoldások közé tartozó IEEE 802.11p, ennek továbbfejlesztése az IEEE 802.11bd és a 3GPP celluláris LTE-V2X illetve az 5G megjelenő megoldásai is versenyeznek, és itt elsősorban a gyártók csapnak össze. A celluláris hálózatokat fejlesztők már nehezen indokolják az újabb mobil hozzáférési generációk bevezetését, de a járműkommunikáció egy kiváló használati eset, megfelelő motiváció. Itt már nem az a cél, hogy 100 Mbit/s fölé vigyék a letöltési sebességeket (bár ez is megtörténik), hanem az, hogy a késleltetést csökkentse milliszekundumos nagyságrendre, és ennek az ingadozását minimalizálják: real-time közeli alkalmazásoknak ugyanis elsősorban erre van szükségük. Éppen ezért a további szabványosítási munkák során elkezdtek egységesíteni az LTE-V2X technológiát is (3GPP 36.885, 2016) (ETSI 123 285, 2020), valamint folynak az 5. generációs celluláris hálózatok (5G) és a 802.11bd kutatási-fejlesztési munkálatai is (Ganesan et al., 2019; Naik et al., 2019; Zhou et al., 2020). Azonban az ITS-G5 és a C-V2X (celluláris V2X, 4G és 5G technológiákra alapulva) közötti átjárhatóság továbbra is problémát jelent. Így egy jármű, ami csak ITS-G5-tel van felszerelve, további harmonizálási erőfeszítések nélkül nem fog tudni kommunikálni egy olyan járművel, ami csak LTE-V2X vagy 5G C-V2X technológiával van felszerelve. Éppen ezért az alábbi megfontolások kiemelkedő jelentőségűek (ASECAP Position, 2018; C-ROADS Position, 2018):

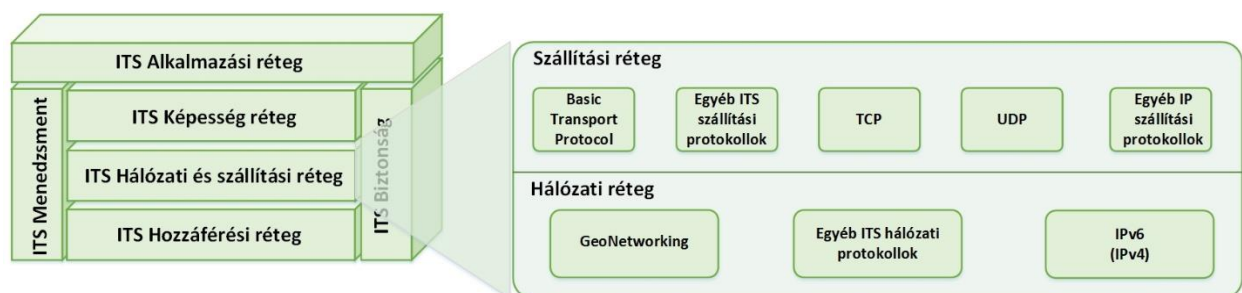
- Az átjárhatóság az ITS-G5 és az újabb celluláris C-ITS hozzáférési technológiák között elengedhetetlen. Az emberi élet védelme elsődleges prioritás és ebbe nem fér bele az a tény, hogy azért alakult ki baleset, mert a járművek nem tudtak egymás között kommunikálni, vagy mert egy RSU nem volt képes kommunikálni átjárhatósági probléma miatt.
- Az úthálózatok üzemeltetőit nem szabad arra kényszeríteni, hogy két vagy több egymással versengő hozzáférési technológiával ellátott RSU-kal legyenek felkészülve, amelyek a hozzáférési technológiától függetlenül ugyanazt a használati esetet szolgálnák, vagy azonos szolgáltatást biztosítanának a vezetőknek/autonóm járműveknek.
- Az 5G felé irányuló celluláris mobil hálózati szabványok fejlődése várhatóan tovább javítja a nagy hatótávú kommunikációt (például a lefedettség javítását és a jelátviteli hatékonyságot), hozzájárulva egyúttal a hibrid kommunikációs rendszer javításához és kiegészítve a rövid hatótávolságú kapcsolatot is.

- A visszafelé kompatibilitás (backward compatibility) megközelítését mindenképpen követni kell, vagyis az új, Day-1 szintet meghaladó C-ITS-eszközöknek támogatniuk és továbbra is biztosítaniuk kell a már telepített C-ITS-szolgáltatásokat és -alkalmazásokat.
- Az LTE-V2X- és jövőbeli 5G-technológiáknak nem szabad károsan befolyásolniuk az ITS-G5 használhatóságát, az együttműködésre, együttélésre kell törekedni.
- Az úthálózatok üzemeltetőinek szabadon kell tudniuk dönteni arról, hogyan lehet a hibrid kommunikációs megközelítésen keresztül biztosítani az összeköttetést, beleértve minden jövőbeli járműkommunikációra alkalmas megoldást is.

3.2. ITS HÁLÓZATI ÉS SZÁLLÍTÁSI RÉTEG (ITS NETWORK AND TRANSPORT LAYER)

Ahogy a 3. ábra is mutatja, az ITS hálózati és a szállítási rétegei (ETSI 302 636-3, 2014; ETSI 302 636-5-1, 2019) az OSI-modellben megszokott módon épülnek egymásra. Az internet világában a hálózati rétegben az IP (Internet Protocol) végzi a címzés és az adatsomagok útvonalirányításának alapvető feladatait. A C-ITS világában is felmerül az internetes (IP-alapú) erőforrások elérésének szükségessége (Jeong, 2020). Itt már kizárólag az IPv6 (Internet Protocol version 6) használatára kell a jövőben számítani a járművek nagy száma miatt, de az elsődleges, közlekedésbiztonsági (safety-) alkalmazásokkal kapcsolatban az IP a megoldások/telepítések első hullámából mégis kiszorul. Ennek legfontosabb oka, hogy a biztonsági alkalmazások esetén az IP alapú kommunikáció túlzottan nagy terhelést (overhead-et) eredményezne az átviteli késleltetés és a sávszélesség paramétereiben egyaránt, így az IP-t (valamint a rá épülő transzport rétegbeli megoldásokat) ilyen esetekben nem érdemes alkalmazni, speciális megoldásokra van igény.

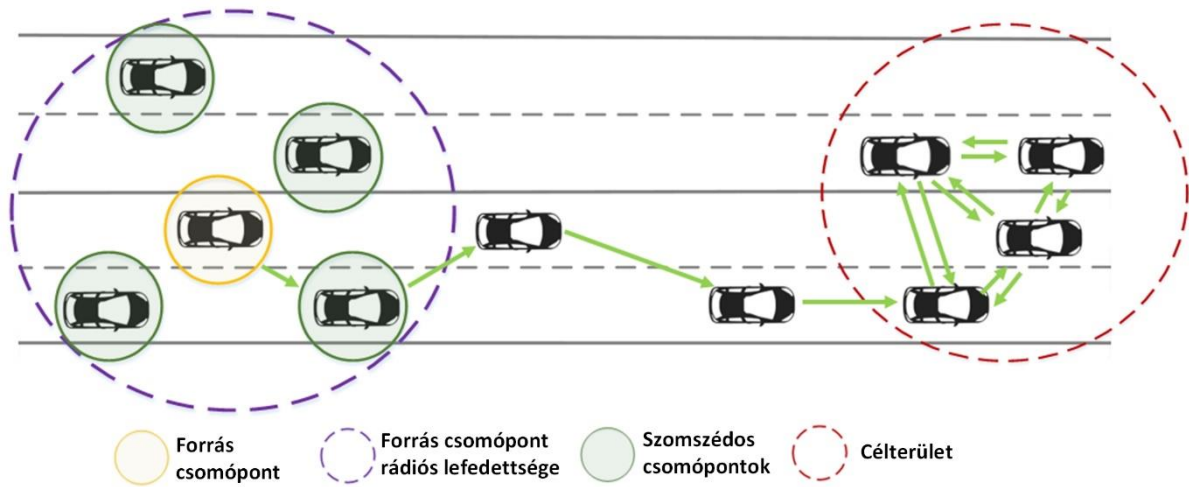
Nagyon fontos az ITS hálózati rétegében, hogy tudjunk földrajzi alapon is címezni, például a mögöttünk lévő öt kilométer hosszú útszakaszon közlekedőket, vagy a városban egy adott kereszteződés adott sugarú környezetében lévőket. Ez egy releváns alkalmazási igény a járműkommunikációnál: ha például érzékeltünk egy úthibát vagy az előrehaladást befolyásoló tényezőt, akkor azt a mögöttünk haladóknak kell tudniuk, aki már túl van rajta, azt kár terhelni az üzeneteinkkel. Ezt az IPv6 alából nem tudja. IPv6-ban multicast van, ami csoportcímezést végez, de továbbra is IP-címek alapján működik. Kell tehát a geografikus címzés és útvonalirányítás (addressing és routing), amit a GeoNetworking speciális V2X hálózati rétegbeli protokolljának a feladata.



3. ábra. A C-ITS architektúra Hálózati és szállítási rétege, valamint főbb protokolljaik.

A GeoNetworking leggyakoribb felhasználása az egyetlen ugrást megengedő single hop broadcast (SHB), és a multihop megoldást képviselő geobroadcast (GBC), azaz a téglalap, kör vagy ellipszis választható alakú és felparaméterezhető célterületeken belül tartózkodók megcímezése (4. ábra). A terület általában nagyobb vagy messzebb van, mint a V2X közeghozzáférési technológia hatótávja, tehát amikor egy jármű megkap egy ilyen üzenetet, akkor kötelessége továbbítani is mindaddig, amíg mindenki, aki az adott területen belül tartózkodik, meg nem kapja, és ameddig a hirdetés releváns, azaz az üzenet időzítője le nem jár. A GeoNetworking része tehát az ad-hoc routing protokoll, ami összetett algoritmusokat kíván (Kuhlmorgen et al., 2015). Míg az USA-ban csak egy ugrásig szabad terjedniük a V2X-üzeneteknek, tehát ilyen összetett megoldásokat nem alkalmaznak, addig az EU-ban

használható a több „hop”-on keresztüli üzenet-célbajuttatás is, azaz a szabványok alapján a járművek továbbíthatják a csomagokat egymást között is, például egy célterület felé.

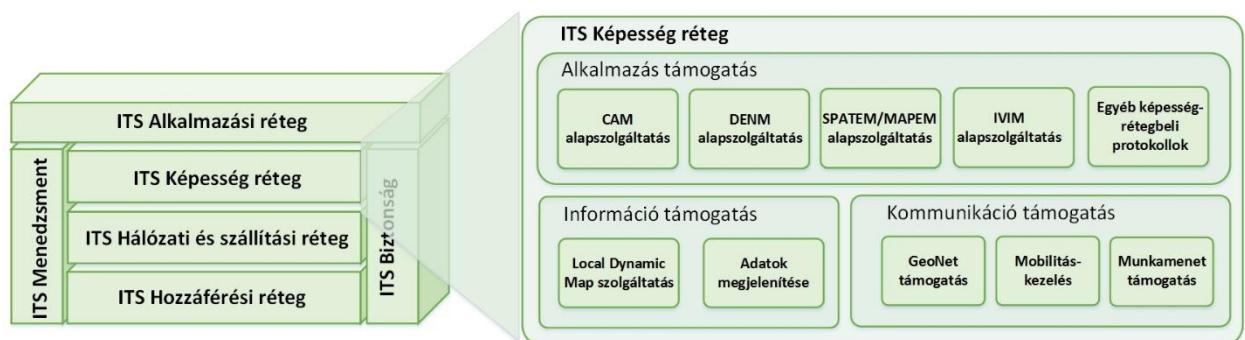


4. ábra. Geobroadcast példa: a sárga autó üzenetének útja a piros körrel jelölt területre.

3.3. ITS KÉPESSÉG RÉTEG (ITS FACILITIES LAYER)

Ez az „új” réteg, ami nincs az OSI-struktúrában, de a V2X-architektúrában megjelent (ETSI 102 894-1, 2018). Különböző alkalmazásokat támogató funkciókat valósíthatunk meg ezzel a réteggel (5. ábra).

A legalapvetőbb ide tartozó protokoll a CAM (Cooperative Awareness Message) üzenetváltást definiáló szolgáltatás (ETSI 302 637-2, 2019). A CAM-üzenet egy „heartbeat”, azaz „itt vagyok” jellegű folyamatos, *periodikus* üzenet, ami segít megtudni minden járműről azt, hogy hol van, merre halad, hányan ülnek benne, hány kg a súlya, mi a sebességvektora, stb. Itt is megjelenik a rétegek közötti optimalizáció: ha a jármű gyorsabban halad, akkor az üzenetek sűrűségét akár másodpercenként tíz alkalomra is tudja állítani, fordított esetben, lassú haladásnál csak egy üzenet kerül kiküldésre másodpercenként.



5. ábra. A C-ITS architektúra Képeség („Facilities”) rétege.

A másik legismertebb protokoll ebből rétegből a DENM (Decentralized Environmental Notification Message) üzeneteket definiáló (ETSI 302 637-3, 2019). Ez a CAM-mel ellentétben *eseményvezérelt*: csak akkor küld üzenetet, amikor valamilyen esemény bekövetkezett. Például, ha megállunk a leállósávban, akkor küld egy „álló jármű a leállósávban” üzenetet. Előre definiált eseményekhez kódokat rendelnek és az üzenetek magukat a kódokat tartalmazzák, csak idő- és geopozíció-bélyeggel ellátva.

Vannak persze további üzenettípusok is a Facilities rétegben, melyek a közlekedési lámpák beállításait közlik (SPaTEM) (ETSI 302 637-3, 2019), ezek alapján tudja az autó beállítani a sebességét, hogy pont zöld jelzésre érjen oda; vannak, amelyek szervizüzeneteket továbbítanak (ETSI 102 890-1,

2017); olyanok, melyek a kereszteződések geometriáját közlik a közeledő járművekkel (MAPEM) (ETSI 302 637-3, 2019), vagy akár a különböző szenzorok által gyűjtött adatok megosztására képesek (ETSI 103 562, 2019). Ezekkel az ismeretterjesztő cikk terjedelmi korlátai miatt bővebben nem foglalkozunk.

3.4. ITS MENEDZSMENT RÉTEG (ITS MANAGEMENT LAYER)

Az ITS Menedzsment réteg – a következő szakaszban tárgyalt biztonság réteghez hasonlóan – nem feleltethető meg egyik OSI-modellben szereplő rétegnek sem. Ez a réteg felelős az ITS-architektúrában található, a biztonság rétegen kívül valamennyi réteg irányításáért, működésük összehangolásáért (ETSI 103 175, 2015; ETSI 302 665, 2010). Az összehangoltság rendkívül fontos a kooperatív funkciókra kihegyezett C-ITS infrastruktúrákban, hiszen minden működési inkonzisztencia, nem kívánt késleltetés felboríthatja az optimalizált rendszert, és komoly problémákkal járhat. Egy nagyrészt járművekből álló hálózatban folyamatosan változik a rádiós összeköttetések topológiája, ebből eredően a jel/zaj-viszony, és változik az is, hogy milyen átviteli technológiával, milyen kódolási eljárást használva és milyen sáv szélességre optimalizálva érdemes átvinni az adatainkat. Például egy 50 Mbit/s-os Wi-Fi-linken 4K felbontású videó is átvihető, míg egy 3G cellás hálózaton ezzel meg sem szabad próbálkozni. Ilyen és ehhez hasonló információk birtokában, folyamatosan végzett mérésekre támaszkodva a Menedzsment réteg időben dönthet az átviteli mód különböző paramétereinek változtatásáról, és értesítheti az architektúra különböző elemeit, ezzel javítva, optimalizálva a kommunikációt.

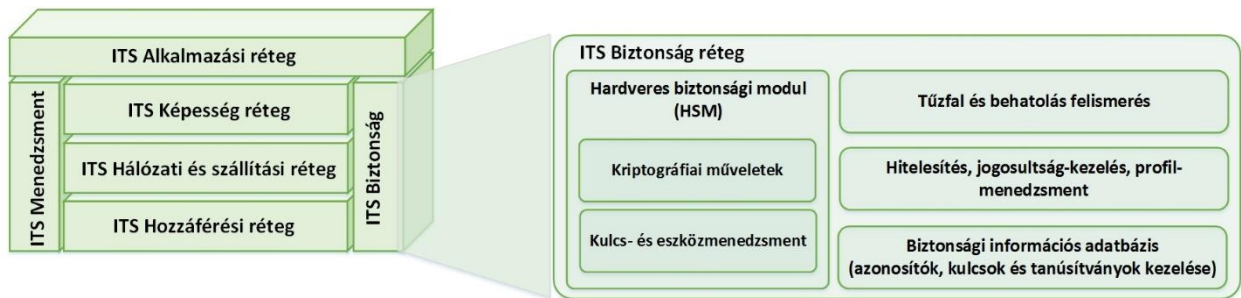
A menedzsment réteg a cross-layer optimalizáció központja a C-ITS-architektúrában (például itt található a hatékony közeghozzáférést megvalósító Decentralized Congestion Control, vagyis a DCC központi modulja is), éppen ezért áll kapcsolatban az összes többi réteggel.

3.5. ITS BIZTONSÁGI RÉTEG (ITS SECURITY LAYER)

Az ITS Biztonság réteggel (ETSI 102 731, 2010; ETSI 102 940, 2018) ellátott szolgáltatások számára alapvető követelmény a megbízhatóság, integritás, autentikálás (confidentiality, integrity, authenticity), valamint a privát szféra védelmének biztosítása. Az alábbi pontokban röviden összefoglaljuk ezeket a fontos követelményeket:

- **Bizalmasság (Confidentiality):** azt jelenti, ha Alice Bobnak küld egy üzenetet, harmadik fél nem tudhat meg semmit sem az üzenet tartalmából (esetleg a hosszát). Ez a gyakorlatban titkosítással valósul meg.
- **Integritás (Integrity):** azt jelenti, hogy ha Alice küld egy üzenetet Bobnak, Bob egyértelműen képes azonosítani, ha valaki megpróbálta megmásítani a küldött üzenetet.
- **Autentikálás (Authenticity):** azt jelenti, ha Alice Bobnak küld egy üzenetet, akkor biztos lehet abban Bob, hogy az üzenet Alicetől származik és nem hamisan akart valaki Alice nevében üzenetet küldeni
- **Anonimitás (Anonymity):** A V2X-kommunikáció által küldött üzeneteknek nem szabad semmilyen olyan információt tartalmazniuk, ami egyértelműen azonosítaná a gépjárművet, a gépjármű sofőrjét, vagy az utast.
- **Összekapcsolhatatlanság (Unlinkability):** a jármű által küldött üzenetek alapján ne legyen könnyen követhető a jármű. Ne legyen könnyebben követhető a V2X segítségével, mint a hagyományos vizuális módon.

Ezeket a követelményeket a V2X biztonság rétegében (6. ábra) a megbízható hardverelemek (Hardware Security Module - HSM), biztonsági és tanúsítvány-attribútumok, a digitális aláírás (és azok ellenőrzése) valamint a hozzá tartozó PKI (Public Key Infrastructure) mechanizmusok segítségével biztosítja.



6. ábra. Az ITS Biztonság réteg szerkezete és feladatai.

A hardveres biztonsági modul (Hardver Security Module, HSM) jellemzően egy külső periféria. Feladata, hogy privát kulcsokat generáljon, tároljon és ezekkel speciális kriptográfiai műveleteket végezzen. Mivel egy privát kulcs egy randomszám, ezek generálásához a HSM-modul egy valódi hardveres véletlenszám-generátort (true random number generator) tartalmaz. A privát kulcs generálásán túl, a HSM feladata még az aláírások generálása is.

A digitális aláírás egy matematikai módszer arra, hogy kiszűrjessük azokat az üzeneteket, amik nem megbízható forrásból származnak, egyértelműen azonosíthatunk valakit. V2X-ben az ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm) (Johnson et al., 2001) megoldást használják. Az ECDSA alapú PKI működése nagyon vázlatosan az alábbi: a járműben lévő HSM-mel generáltatunk egy kulcspárt. A publikus kulcsot elküldjük a Certificate Authority (CA) nevű entitásnak (a privát kulcs végig a járműhöz tartozó HSM-ben marad). A CA aláírja az ő privát kulcsával a jármű által elküldött publikus kulcsát. Ezt az aláírt publikus kulcsot nevezzük tanúsítványnak. Ezután ezt a tanúsítványt a CA visszaküldi a járműnek, ami a tanúsítványt mindenkinek elküldi rádióan, akinek aláírt üzenetet akar küldeni. A tanúsítvány segítségével az üzenet fogadók biztosak lehetnek abban, hogy az információ a CA által hitelesített forrásból származik. Az üzenet fogadók onnan tudják, hogy a küldő tanúsítványa megbízható, hogy ők is rendelkeznek a CA tanúsítványával. Így tudják hitelesíteni a rádióan fogadott tanúsítványt. Ez a PKI infrastruktúra az EU C-ITS Credential Management System (EU CCMS) rendszer (C-ITS Platform Phase II, 2017a, 2017b) magjában működve biztosítja a járművek közötti biztonságos kommunikációt.

3.6. ITS ALKALMAZÁSI RÉTEG (ITS APPLICATION LAYER)

A cikkben követett „bottom-up” megközelítéssel a hozzáférési rétegtől eljutottunk egészen az alkalmazási réteghöz (ETSI 102 637-1, 2010; ETSI 102 638, 2009), mellyel kapcsolatban az ún. „Day 1” alkalmazásokat fogjuk bővebben tárgyalni, vagyis azokat az alapvető V2X alkalmazásokat, amelyeket a C-ITS technológiák bevezetésének első lépéseinek tartanak. Közülük sok már most is használható, vagy bemutatásra került pilot telepítések, demók, tesztek során.

A Car-2-Car Communication Consortium (C2C-CC, 2020) megközelítését alapul véve, a következő három csoportba soroljuk a V2X szabványosítás alatt lévő és tervezett alkalmazásait (C2C-CC Roadmap, 2019): az első csoportban a „Day 1” alkalmazások vannak, melyek már működnek vagy tesztelés alatt állnak. A második és harmadik csoportban az előző csoport(ok)ra építő, magasabb hozzáadott értékű és persze ezzel párhuzamosan egyre bonyolultabb szolgáltatások tartoznak, ezeket villantjuk fel érdekességként, hogy lássuk, mi mindenre lehet majd képes a V2X a jövőben.

1. Tudatos vezetés (Awareness driving via status data)

A tudatosság arra utal itt, hogy a Facilities rétegnél tárgyalt CAM/DENM/stb. üzenetek révén a sofőr illetve az autó tisztában van a környezetével, a környéken közlekedőkkel azáltal, hogy veszi és feldolgozza ezeket a periodikus/eseményvezérelt üzeneteket az autóktól. Előre „látja”, ha a leállósávban

vesztegel valaki, ha beláthatatlan helyről tolat kifelé az útestre, vagy ha baleset történt valahol. Ide tartozó alkalmazások a teljesség igénye nélkül:

- ütközési figyelmeztetés a kereszteződéseknel;
- rendőr, mentő, tűzoltó járművek közelségére vonatkozó értesítés;
- általános veszélyre való figyelmeztetés az útvonalon;
- álló/lassú járműre való figyelmeztetés.

2. Érzékelésekre alapuló vezetés (Sensing driving via sensor data)

A CAM- és egyéb szolgáltatások által közvetített alapadatok mellett, a V2X-kommunikációra képes járművek a legkülönbözőbb szenzorai adatait is megoszthatják egymással: környezetükről pontosabb és mélyebb képet közvetíthetnek, így a közelükben közlekedő autók ismerete teljesebb lesz a környezetről. Ennek köszönhetően a korábbi használati esetek pontossága, megbízhatósága tovább növelhető, és figyelembe vehetnek például olyan környezeti tényezőket, közlekedési paramétereket is, amelyeket más járművek vagy az útinfrastruktúra elemei érzékelnek. Így egy kanyarodó jármű tisztában lehet azzal, hogy útját a jobbra fordulás után egy gyalogos keresztezi majd. Ebbe a csoportba tartozó alkalmazások például a következők:

- „előzés alatt állsz” figyelmeztetés;
- távol(abb)i kereszteződés előtti figyelmeztetés;
- csoportos adaptív sebességtartó automatika;
- vészfékezés-jelzés;
- úttesttel kapcsolatos figyelmeztetések, távol(abb)ról, jóval az odaérkezés előtt.

3. Kooperatív és szinkronizált kooperatív vezetési műveletek (Cooperative and synchronized cooperative driving with intention and coordination data)

A CAM-üzenetek és a hatótávon belül tartózkodó vagy azon kívül lévő, de releváns adatokkal bíró autók szenzoradatai mellett a V2X-kommunikációra képes járművek összehangoltan működnek, és segítik egymás döntéseit az összetett forgalmi szituációkban: kifordulhat-e mellékútról, belekezdhet-e az előzésbe adott helyzetben, ha igen, akkor hogyan soroljon be, és a többi jármű hogyan segítheti a besorolását, stb. Ebbe a csoportba sorolhatók pl. a következő jövőben várható alkalmazások:

- kooperatív előzés (mindenki besegít az előző autó döntésébe és manőverének meghatározásába);
- kooperatív holtér-figyelmeztetés;
- kooperatív sávváltás;
- rajban/konvojban/csoportban haladás (pl. teherautóknál, üzemanyag-megtakarítási céllal).

A járművek közötti kommunikáció lényege tehát az, hogy ha a járművezető vagy a járműszenzor nem is érzékeli, a jármű akkor is értesülhet arról, hogy a másik autó, az akadály, a dugó, a kátyú vagy a gyalogos ott van, amerre a jármű tart, és ezt az információt a jármű felhasználhatja (például a vezetőt értesítheti), annak köszönhetően, hogy a közlekedésben részt vevő valamennyi elem kooperatív, és „elmondja” a többieknek a környezet általa felfedezett és digitálisan leképzett, közlekedés szempontjából releváns adatait.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A járműkommunikáció napjaink egyik legígéretesebb, nemzetközi szabványosítás alatt lévő fejlesztése. A közlekedés meghatározó szereppel bír mindennapjainkban, a mobilitás javulását gyakran

egyenlővé teszik a gazdasági fejlődéssel: ahol autópálya épül, ott felvirágzik a környék, csak azért, mert könnyebben, gyorsabban elérhetővé válik a régió az országban meghatározó szerepet játszó „csomópontokból”: a fővárosból és az ipari, logisztikai központokból. A közlekedés mindemellett negatív hatásokkal is bír: szennyezi a környezetet és sok ember haláláért felelős. A károsanyag-kibocsátást csak csökkenteni tudják a V2X-járműkommunikációval támogatott intelligens megoldások, azáltal, hogy például a közlekedés ütemezését tökéletesíti, segít elkerülni a forgalmi dugókat, illetve konvojban, egymástól nagyon alacsony követési távolságra utaztatja a kamionokat, melyek így a légellenállás drasztikus csökkentése miatt rengeteget spórolnak. A haláleseteket viszont a jövőben akár teljesen ki is tudjuk majd küszöbölni: a V2X elsődleges célja a közlekedésbiztonság sokkal magasabb szintre emelése azáltal, hogy a járművek egymással kommunikálva megosztják azt a „tudást”, amit szenzoraiuk segítségével környezetükről begyűjtöttek.

A V2X-technológiák bevezetésének első lépései („Day 1” alkalmazások) már tesztelés alatt vannak, egyre szélesebb körben kezdik alkalmazni őket: azon alapulnak, hogy periodikus CAM-üzenetekkel és eseményvezérelt DENM-üzenetekkel a járművek értesítik egymást érkezésükről, megkülönböztető jelzést alkalmazó jármű közeledtéről, úthibákról, lassú vagy veszteglő járművekről. Itt az információ előre definiált üzenetekre alapuló megosztására építenek a szolgáltatások, de nincs benne még valódi kooperáció: ezt nevezik tudatos vezetésnek (awareness driving). A hazai ITS-G5 telepítések (M0, M1) és tervezés alatt álló okosúti infrastruktúrák (M9, M76) ezeket az alkalmazásokat már alapértelmezésben támogatják.

A következő szinten már további információkat is megosztanak egymással a járművek: az egyik autó által a zebrán érzékelt gyalogos annak is hasznos információ, aki még a sarok mögött autózik és pont arra készül befordulni, ahol a gyalogost érzékelték. Itt az információk továbbítása távolabbra is lehetséges, több ugráson keresztül és magasabb szintű információkat közvetít: vészfékezés jelzése a kettővel előttünk haladó autótól, „előzés alatt állsz” jelzés, valamint ide tartozik a csoportos adaptív sebességtartás is.

A harmadik szinten, ami egyelőre még bőven a jövőbe mutat, megjelennek a *kooperatív vezetési műveletek*, azaz a többi autó segít annak megítélésében, hogy belekezdhet-e az előzésbe, a holtteret már nem csak a saját szenzorom figyeli, hanem a belső sávban 300 km/h-val érkező motorosról a többi autótól is értesülök, és ide tartozik a konvojban haladás is, ugyanis itt is szoros együttműködésre, szinkronizált gyorsulásra/lassulásra van szükség.

A V2X fejlesztésének távlati célja természetesen a teljesen *autonóm járművek* kiszolgálása. Az önvezetés kezdeti szintjét (saját, auton belüli) szenzoralapú, embert emuláló megoldások jellemzik. Minden autonóm járműnek szüksége van a környezetet leíró digitális reprezentációra: és ha mindenki csak a saját szenzorjaira támaszkodik, az sokkal kevesebb bemeneti adatot jelent annál, mintha mindenki meg is osztaná a saját érzékeléseit a többiekkel. Ehhez kell a járműkommunikáció, melynek szintjétől, szolgáltatásainak bonyolultságától, hozzáadott értékétől függően jutunk el az *önvezetés* magasabb szintjeire, ezt pedig a vázolt három lépcsőfokon való előrehaladás modellezi. A fejlődéssel fokozatosan létrejön a kooperatív tudatosság az egyes elemek (járművek, útmenti szenzorok, közlekedési lámpák, változtatható jelzéseképű táblák, stb.) közt, kicserélik azt, hogy mit látnak a környezetből, és ezzel egyre teljesebb képet tudnak alkotni róla, ami a megfelelő beavatkozással egyre magasabb szintű közlekedésbiztonságot és hatékonyságot jelent.

Viszont az önvezetés akkor sem lesz teljes megoldás, ha majd egyszer szabályozott körülmények közt, széleskörűen megvalósul: megtörténhet majd, hogy a vezérlő intelligencia meghibásodik, nem képes vezetni, de az autó még vezethető lenne, motorikusan semmi baja. Ekkor jön képbe a „távoli vezetés” (remote driving), azaz az irodában ülő operátor szervízbe/a bázisra vezethetné az autót távolról. Ehhez tehát már nem kell működőképes vezérlő algoritmus, elég, ha a kommunikáció jól működik, megfelelően nagy sáv szélességgel és nagyon alacsony késleltetéssel. Itt már csak az 5G-6G alapú megoldásoknak (Letaief et al., 2019) lehet létjogosultsága, ezek tudják ill. fogják tudni teljesíteni az extrém alacsony késleltetésre és a megfelelően nagy átviteli kapacitásra, küldetéskritikus működésre vonatkozó elvárásokat.

Végül a távoli jövőre való kitekintésként megemlíthetjük a V2X – IoT (Internet of Things) várt jövőbeli összefonódását (Kunz et al., 2018): ezzel újabb, óriási adatforráshoz juthatnak a közlekedők, ugyanis az IoT eszközök lassan mindenhol (szinte minden újabb készülékben) megtalálhatók. A személyekhez köthető adatok továbbítása még jogi szempontból megoldandó kérdéskör, de amikor ez sikerül, egy még jobb minőségű adathalmazra alapozó, városi, sőt akár ország szintű egyéni és közösségi közlekedést optimalizáló rendszer lesz megvalósítható, amivel már egészen közel kerülhet a V2X a kitűzött „nulla halálos áldozat a közlekedésben” céljához.

5. HIVATKOZÁSOK

3GPP. 2020: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 3GPP specifications. <https://www.3gpp.org/specifications>

3GPP 36.885. 2016: 3GPP TR 36.885 V14.0.0, Study on LTE-based V2X Services (Release 14). <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2934>

2008/671/EC. 2008: 2008/671/EC: Commission Decision of 5 August 2008 on the harmonised use of radio spectrum in the 5875—5905 MHz frequency band for safety-related applications of Intelligent Transport Systems (ITS). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32008D0671>

ASECAP Position. (2018): ASECAP Position Regarding LTE-V2X in the 5GHz Band. https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/ASECAP_position_regarding_LTE.pdf

C2C-CC. 2020: CAR 2 CAR Communication Consortium – Key player with high reputation in driving C-ITS developments and assisting to achieve vision zero. <https://www.car-2-car.org/>

C2C-CC Roadmap. 2019: C2C-CC, Guidance for day 2 and beyond roadmap, CAR 2 CAR Communication Consortium. https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2072_RoadmapDay2AndBeyond.pdf

C-ITS Platform Phase II. 2017a: C-ITS Platform Phase II, Certificate Policy for Deployment and Operation of European Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS), RELEASE 1. https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/c-its_certificate_policy_release_1.pdf

C-ITS Platform Phase II. 2017b: C-ITS Platform Phase II, Security Policy & Governance Framework for Deployment and Operation of European Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS). https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/c-its_security_policy_release_1.pdf

Connected Vehicle Test Bed. 2020: Connected Vehicle Test Bed, Testing Connected Vehicle Technologies in a Real-World Environment. https://www.its.dot.gov/research_archives/connected_vehicle/dot_cvbrochure.htm

C-ROADS. 2020: August 24. C-ROADS - The Platform of Harmonised C-ITS Deployment in Europe. <https://www.c-roads.eu/platform.html>

C-ROADS Position. 2018: C-ROADS, Radio frequencies designated for enhanced road safety in Europe—C-Roads position on the usage of the 5.9 GHz band. https://www.c-roads.eu/fileadmin/user_upload/media/Dokumente/C-Roads_Position_paper_on_59GHz_final.pdf

EC. 2014: 2030 climate & energy framework. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en
ECC Report 250. 2016. ECC Report 250, Compatibility studies between TTT/DSRC in the band 5805-5815 MHz and other systems. <https://docdb.cept.org/download/f4340389-e665/ECCRep250.pdf>

Edwards, T. 2015: Connected and automated vehicles: Concepts of V2x communications and cooperative driving. Autonomous Passenger Vehicles, 1–14. <https://doi.org/10.1049/ic.2015.0060>

ETSI 102 637-1. 2010: ETSI TS 102 637-1 V1.1.1, Technical Specification, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 1: Functional Requirements. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/10263701/01.01.01_60/ts_10263701v010101p.pdf

ETSI 102 638. 2009: ETSI TR 102 638 V1.1.1, Technical Report, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Definitions. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102600_102699/102638/01.01.01_60/tr_102638v010101p.pdf

ETSI 102 731. 2010: ETSI TS 102 731 V1.1.1 (2010-09), Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Security Services and Architecture. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102700_102799/102731/01.01.01_60/ts_102731v010101p.pdf

ETSI 102 792. 2015: ETSI TS 102 792 V1.2.1 (2015-06), Mitigation techniques to avoid interference between European CEN Dedicated Short Range Communication (CEN DSRC) equipment and Intelligent Transport Systems (ITS) operating in the 5 GHz frequency range. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102700_102799/102792/01.02.01_60/ts_102792v010201p.pdf

ETSI 102 890-1. 2017. ETSI TS 102 890-1 V1.1.1 (2017-05): Intelligent Transport Systems (ITS); Facilities layer function; Part 1: Services Announcement (SA) specification. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/10289001/01.01.01_60/ts_10289001v010101p.pdf

ETSI 102 894-1. 2018: ETSI TS 102 894-1 V1.1.1 (2013-08), Intelligent Transport Systems (ITS); Users and applications requirements; Part 1: Facility layer structure, functional requirements and specifications. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102800_102899/10289401/01.01.01_60/ts_10289401v010101p.pdf

ETSI 102 940. 2018: ETSI TS 102 940 V1.3.1 (2018-04), Intelligent Transport Systems (ITS); Security; ITS communications security architecture and security management. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102900_102999/102940/01.03.01_60/ts_102940v010301p.pdf

ETSI 103 175. 2015: ETSI TS 103 175 V1.1.1 (2015-06), Intelligent Transport Systems (ITS); Cross Layer DCC Management Entity for operation in the ITS G5A and ITS G5B medium. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103100_103199/103175/01.01.01_60/ts_103175v010101p.pdf

ETSI 103 562. 2019: ETSI TR 103 562 V2.1.1, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Analysis of the Collective Perception Service (CPS); Release 2. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103562/02.01.01_60/tr_103562v020101p.pdf

ETSI 123 285. 2020: ETSI TS 123 285 V16.4.0 (2020-10), Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Architecture enhancements for V2X services (3GPP TS 23.285 version 16.4.0 Release 16). https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123285/16.04.00_60/ts_123285v160400p.pdf

ETSI 302 571. 2017: ETSI EN 302 571 V2.1.1 (2017-02), Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302500_302599/302571/02.01.01_60/en_302571v020101p.pdf

ETSI 302 636-3. 2014: ETSI EN 302 636-3 V1.2.1 (2014-12), Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network Architecture. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263603/01.02.01_60/en_30263603v010201p.pdf

ETSI 302 636-5-1. 2019: ETSI EN 302 636-5-1 V2.2.1 (2019-05), Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/3026360501/02.02.01_60/en_3026360501v020201p.pdf

ETSI 302 637-2. 2019: ETSI EN 302 637-2 V1.4.1, European Standard, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263702/01.04.01_60/en_30263702v010401p.pdf

ETSI 302 637-2. 2019: ETSI EN 302 637-2 V1.4.1, European Standard, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263702/01.04.01_60/en_30263702v010401p.pdf

ETSI 302 637-2. 2019: ETSI EN 302 637-2 V1.4.1, European Standard, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263702/01.04.01_60/en_30263702v010401p.pdf

ETSI 302 637-2. 2019: ETSI EN 302 637-2 V1.4.1, European Standard, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263702/01.04.01_60/en_30263702v010401p.pdf

ETSI 302 637-3. 2019: ETSI EN 302 637-3 V1.3.1, European Standard, Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/30263703/01.03.01_60/en_30263703v010301p.pdf

ETSI 302 663. 2020: ETSI EN 302 663 V1.3.1, European Standard, Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.03.01_60/en_302663v010301p.pdf

ETSI 302 665. 2010: ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09), European Standard, Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. ETSI. https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302665/01.01.01_60/en_302665v010101p.pdf

Ganesan, K., Mallick, P. B., Löhr, J., Karampatsis, D., & Kunz, A. (2019). 5G V2X Architecture and Radio Aspects. 2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 1–6. <https://doi.org/10.1109/CSCN.2019.8931319>

Hamilton, B. A. 2016: History of Intelligent Transportation Systems. U.S. Department of Transportation, Intelligent Transportation Systems Joint Program Office. https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/30826/dot_30826_DS1.pdf

IEEE Std 802.11™-2016. 2016: 802.11-2016—IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", IEEE Standard 802.11-2016 (Issue IEEE Std 802.11™-2012). IEEE-Pub. <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11-2016.html>

ISO / IEC 7498-1. 1994: Open Systems Interconnection—Basic Reference Model. <https://www.iso.org/standard/20269.html>

Jeong, J. 2020: IPv6 Wireless Access in Vehicular Environments (IPWAVE): Problem Statement and Use Cases, draft-ietf-ipwave-vehicular-networking-19. <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-ipwave-vehicular-networking-19>

Johnson, D., Menezes, A., & Vanstone, S. 2001: The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA). International Journal of Information Security, 1(1), 36–63. <https://doi.org/10.1007/s102070100002>

Karagiannis, G., Altintas, O., Ekici, E., Heijenk, G., Jarupan, B., Lin, K., & Weil, T. 2011: Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions. Communications Surveys Tutorials, IEEE, 13(4), 584–616. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.061411.00019>

Kenney, J. B. 2011: Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States. Proceedings of the IEEE, 99(7), 1162–1182. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2132790>

Kuhlmoorgen, S., Llatser, I., Festag, A., & Fettweis, G. 2015: Performance Evaluation of ETSI GeoNetworking for Vehicular Ad Hoc Networks. 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 1–6. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2015.7146003>

Kunz, A., Nkenyereye, L., & Song, J. 2018: 5G Evolution of Cellular IoT for V2X. 2018 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 1–6. <https://doi.org/10.1109/CSCN.2018.8581830>

Letaief, K. B., Chen, W., Shi, Y., Zhang, J., & Zhang, Y. A. 2019: The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks. IEEE Communications Magazine, 57(8), 84–90. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2019.1900271>

Naik, G., Choudhury, B., & Park, J. 2019: IEEE 802.11bd 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications. IEEE Access, 7, 70169–70184. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919489>

Vision Zero. 2020: Vision Zero: Safety. Health. Wellbeing. <http://visionzero.global/>

Waze. 2020: Waze, A legjobb útvonal valós időben – a többi autóvezető segítségével.
<https://www.waze.com/hu>

Wymeersch, H., Campos, G. R. de, Falcone, P., Svensson, L., & Ström, E. G. 2015: Challenges for cooperative ITS: Improving road safety through the integration of wireless communications, control, and positioning. 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), 573–578. <https://doi.org/10.1109/ICCNC.2015.7069408>

Zhou, H., Xu, W., Chen, J., & Wang, W. 2020: Evolutionary V2X Technologies Toward the Internet of Vehicles: Challenges and Opportunities. Proceedings of the IEEE, 108(2), 308–323.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2961937>



A klimatikus jellemzők hatásai az útpályaszerkezetre: A pályaszerkezet hőmérsékletek számítása

**Herceg András¹, Primusz Péter¹, Kalicz Péter¹
Gribovszki Zoltán¹**

¹ Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet

E-mail: herceg.andras@uni-sopron.hu; primusz.peter@uni-sopron.hu; kaliczp@gmail.com; zgribo@gmail.com

DOI: [10.36246/UL.2020.2.02](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.02)

KIVONAT

A környezeti jellemzők (elsősorban a hőmérséklet, a csapadék, a légnedvesség, a fagyás-olvadás ciklusok és a talajvíz mélysége) jelentős hatást gyakorolnak az útburkolatok állapotára és élettartamára, tehát a pályaszerkezetek méretezésénél is fontos tényezőként vehetők figyelembe.

Az aszfaltburkolatú pályaszerkezetek tartósságának számításánál, az egyszerűen meghatározható és általában könnyen elérhető meteorológiai paraméterek közül, a hőmérséklet, ennek ingadozása és a csapadék figyelembe vehető. Bár a hőmérséklettől függő aszfalt merevségi modulust a tényleges, reálisan várható aszfalthőmérséklet alapján célszerű felvenni, ezen mérések csak korlátozott számban állnak rendelkezésre. Ellenben a léghőmérséklet mérésekkel, melyek igen jól lefedik az országot, és felhasználhatóak az aszfalthőmérsékletek - elsősorban szezonális, havi gyakoriságú - becslésére.

Jelen cikk a léghőmérsékletnek, az aszfalthőmérsékletekkel való összefüggését, és a levonható következtetéseket dolgozza fel.

Kulcsszavak: pályaszerkezet méretezés, léghőmérséklet, aszfalthőmérséklet

ABSTRACT

Environmental characteristics (primarily temperature, precipitation, humidity, freeze-thaw cycles, and groundwater depth) have a significant impact on the condition and life-time of pavements, so they can also be considered as important factors in the pavement design procedure.

When calculating the durability of asphalt pavements, the temperature, its fluctuations and precipitation can be taken into account among the easily determinable and easily accessible meteorological parameters. Although it is advisable to record the temperature-dependent modulus of asphalt stiffness based on the actual, realistically expected asphalt temperature, these measurements are only available in limited numbers. In contrast, with air temperature measurements, which cover the country very well and can be used to estimate asphalt temperatures, mainly seasonally, with a monthly frequency.

This paper analyses the correlation between air temperature and asphalt temperatures, and the conclusions that can be drawn.

Keywords: pavement design, air-temperature, asphalt-temperature

Dr. Herceg András

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe a vízmérleg-modellezés.

Dr. Primusz Péter

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

Dr. Kalicz Péter

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vizgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe a hidrológiai modellezés, intercepció automatizálása.

Prof. Dr. Gribovszki Zoltán

A Soproni Egyetem (SOE) Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vizgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az öko-hidrológia, evapotranszpiráció számítása a talajnedvesség, a talajvíz és a lefolyás nagy gyakoriságú mérése alapján.

1. BEVEZETÉS

A környezeti jellemzők (főként a hőmérséklet, a csapadék, a légnedvesség, a fagyás-olvadás ciklusok és a talajvíz mélysége) jelentős hatást gyakorolnak az útburkolatokra így a pályaszerkezetek méretezésénél is fontos tényezőként vehetők figyelembe (Gupta, 2014). Különösen fontos a környezeti jellemzők alaposabb vizsgálata az alsóbbrendű vagy mezőgazdasági utaknál, az erdők feltáráshálózatánál, valamint az agro-erdészeti rendszerek kiszolgáló útjainál, mivel ezeknél az úthálózatoknál az időjárásnak való kitettség a vékonyabb pályaszerkezet miatt erőteljesebben is érezteti hatását. Pethő (2008) mérései azt mutatták, hogy konkrétan a szélsőségesen alacsony és magas hőmérsékletek fordulnak elő gyakrabban, mint a magasabb terhelési kategóriákban (vastagabb pályaszerkezetekben).

A környezeti jellemzők közül 3 változását célszerű figyelembe venni a hajlékony pályaszerkezetek méretezésénél:

- Az aszfalt rétegek hőmérsékletének változásai. Ez a paraméter azért lényeges, mert az aszfaltkeverékek modulusai nagyon érzékenyek a hőmérsékletváltozásra.
- Az alsó rétegek (elsősorban a földmű) talajnedvességének változásai. A földmű modulusok általában az optimális talajnedvességre és sűrűsége (tömorségre) vonatkoznak. Sok esetben viszont az optimálistól eltérő jellemzőkre korrekciós faktorok szükségesek (Zapata, 2018).
- A fagyás-olvadás jelensége és ennek ciklusai igen jelentősen befolyásolják az alsó rétegek és a földmű teherbírását. Hiszen a fagyos periódusok alatt a földmű teherbírása nő, míg az olvadási periódusok alatt jelentősen csökken, tehát a fagyás mélységének és az egyes olvadási ciklusok egymásra következésének ismerete is egy fontos kérdés.

Az előbbieket szerint tehát az aszfaltburkolatú pályaszerkezetek tartósságának számításánál, az egyszerűen meghatározható és általában könnyen elérhető meteorológiai paraméterek közül, a hőmérséklet, annak ingadozása és a csapadék a figyelembe vehető tényezők (Boromissza, 1997). Az Útügyi Lapok folyóirat 13. lapszámában közölt: „*A klimatikus jellemzők hatásai az útpályaszerkezetre*” című kézirat dolgozta fel e két paraméter általános változási tendenciáit Magyarországon, figyelembe véve a klímaváltozást.

Jelen cikk pedig a pályaszerkezet hőmérsékletek számításának lehetőségeivel foglalkozik.

2. A PÁLYASZERKEZET HŐMÉRSÉKLETEK SZÁMÍTÁSA

Az aszfaltkeverékek, mint viszkoelasztikus anyagok merevségi modulusai jellemzően az aszfalt összetételétől, a terhelési frekvenciától, és a hőmérséklettől, mint környezeti tényezőtől függenek. A beépített aszfaltrétegek modulusa, tehát erősen a hőmérséklet függvénye is.

2.1. A PÁLYASZERKEZET HŐMÉRSÉKLETÉRE HATÁST GYAKORLÓ PARAMÉTEREK

A pályaszerkezet vertikális hőmérsékleti eloszlása alapvetően a következő jellemzőktől függ: 1, időjárási körülmények (dinamikusan változnak), 2, az egyes pályaszerkezeti rétegek és az alépítmény hővezetési hőraktározási jellemzői (inkább statikusak, bár a nedvességtartalom jelentősen befolyásoló hatással bírhat (Zapata, 2018)).

A pályaszerkezet felszínén jellemző hőmozgás alapvetően energiaháztartási alapon határozható meg. A felszínre az energiamérleg a következő formában írható fel (Dingman, 2002):

$$R_n - G - H - LE = \frac{dQ}{dt} \tag{1}$$

Ahol:

R_n - A felszínre vonatkozó sugárzási egyenleg, amely a beérkező és távozó rövid és hosszuhullámú sugárzás egyenlege [W/m^2]. Elsősorban a beérkező globál sugárzástól, a felszín albedójától, valamint rövid és hosszuhullámú sugárzás elnyelő képességétől függ (Pethő, 2008);

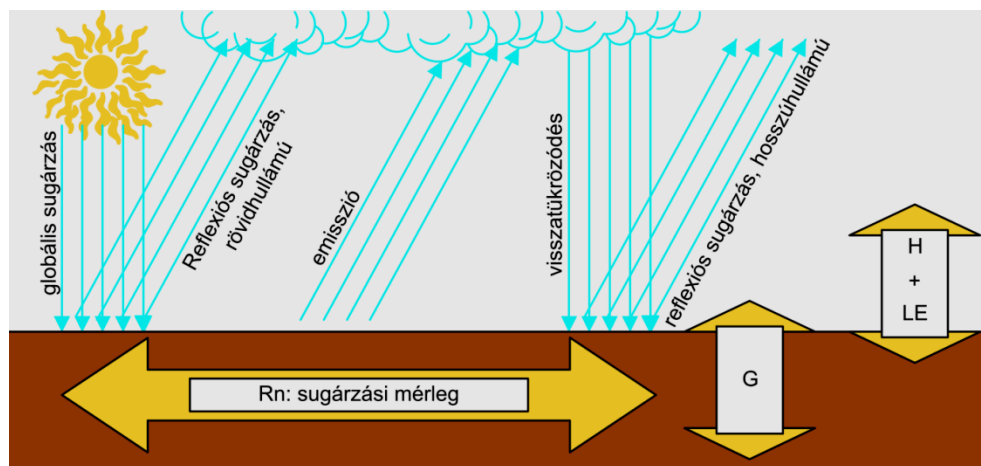
G - a talaj felé irányuló hőáram, amely a talajban tárolt hőmennyiségtől és a köztes rétegek hővezető képességétől függ [W/m^2];

H - a szenzibilis hőcsere az atmoszférával, a környező levegő felmelegítése vagy lehűtése [W/m^2];

LE - az atmoszféra felé irányuló látens hőáram (párolgás), csak a csapadékesemények alatt, ill. közvetlenül utána van jelentősége [W/m^2];

$\frac{dQ}{dt}$ - a raktározott hőmennyiség megváltozása a felszíni rétegben [W/m^2].

A felszín energiaháztartását a következő 1. ábra illusztrálja.



1. ábra: A pályaszerkezet energiamérlegét befolyásoló tényezők (Pethő, 2008 nyomán).

Az előbbi hőháztartási egyenlet alapján a klimatikus viszonyok mérése mellett elviekben a pályaszerkezet hőmérséklete a kívánt mélységben meghatározható. Természetesen a rendelkezésre álló paraméterek valós értékének ismerete elengedhetetlen a pontos meghatározáshoz.

A pályaszerkezet hőmérséklete valamilyen mértékben követi a környezet hőmérsékleti változásait, így rövid távon (napon belül, órás léptékben) és hosszú távon (szezonalisan) is ingadozik. Azonban nemcsak az aktuális sugárzási viszonyok és a levegőhőmérséklet, hanem a csapadék és a légmozgás is, mint klimatikus befolyásoló faktorok megjelennek. Ezenkívül az alsóbb pályaszerkezeti rétegek hőmérséklete (és hővezetése) is befolyásolja a felszín közeli pályaszerkezeti rétegek hőmérsékletét (Pethő, 2008).

Az előbbiekből talán a naptól érkező és a felszín jellemzőitől függően hasznosuló sugárzás emelendő ki, mint a pályaszerkezet hőmérséklet eloszlásának egyik legfontosabb eleme (Pethő, 2008).

A pályaszerkezet függőleges hőmérsékleti eloszlására ható tényezőket Pethő (2008) a következőkben sorolja fel:

- Léghőmérséklet,
- Besugárzás,
- Építőanyagok termo-fizikai jellemzői,
- A felület szóró, elnyelő és reflektáló tulajdonságai,
- A szél intenzitása.

A burkolatfelszín és a mélyebb rétegek hőmérséklete különböző termodinamikai, fizikai és meteorológiai folyamatok eredménye. Ezen folyamatok ismerete és vizsgálatokon alapuló megértése nagyon fontos ahhoz, hogy információkat nyerjünk pályaszerkezetünk hőmérséklet viselkedéséről (Ureczky és Tóth, 2008).

Ha vannak méréseink az adott pályaszerkezetre vonatkozóan, akkor általában a pályaszerkezet hőmérsékletét, célszerű alapul venni, de felmerül a kérdés, hogy milyen mélységre számítsunk, vagyis, hogy milyen mélységben értelmezett hőmérsékletet értünk a pályaszerkezet hőmérséklet alatt. A méretezés szempontjából a különböző forgalmi terhelés osztályokhoz rendelt teljes aszfalt típus pályaszerkezetek alsó rétegének középső síkjában számított hőmérsékleteket célszerű vizsgálni (Pethő, 2008).

Pethő (2008) az adott pályaszerkezet típus alsó rétegének középsíkjában mért hőmérséklet, illetve az alsó szál megnyúlása között igen szoros ($R^2 \approx 0,98-0,99$), összefüggést határozott meg. A léghőmérséklettel is elvégezte az összefüggés-vizsgálatot. Az eredmények szerint az összefüggés szorossága gyengült, de még mindig (minden esetben $R^2 > 0,84$) erős függvénykapcsolat állt fenn a jellemzők között. Az összefüggés létrehozásához felhasznált mérési adatok gyakorisága perces volt, tehát relatíve nagy időbeli felbontású.

A léghőmérséklet és a megnyúlás között fennálló relatíve gyengébb kapcsolatot azzal magyarázza, hogy a vizsgált alsóbb réteg hőmérséklete a léghőmérsékletet időbeli késéssel és erősen csillapítva követi. A csillapítás mértéke a mélység növelésével nő, viszont a szélsőséges kiugró értékek is ellapulnak. Felmerül a kérdés azonban, hogy ha nem perces felbontású, hanem pl. havi adatokat használunk fel a méretezéshez, akkor a korábban említett időbeli késésnek van –e jogosultsága. Szezonális elemzéseknél a léghőmérséklet és a pályaszerkezet hőmérséklete közötti fáziskésés nem vagy alig jelentkezik, így a két jellemző közötti hiszterézis hatással nem kell kalkulálni, elég a csillapítást számítani.

Pethő (2008) is megjegyzi munkájában, hogy a pályaszerkezet hőmérséklet adatok csak korlátozottan állnak rendelkezésre (a mérés kivitelezése sem olyan könnyű), míg a léghőmérséklet mérése jó területi eloszlásban és nagy gyakorisággal történik, így a léghőmérsékleti adatok felhasználásával létrehozott összefüggésekre nagyobb az igény.

2.2. ÁLTALÁNOSAN HASZNÁLT PÁLYASZERKEZET HŐMÉRSÉKLET BECSLÓ EGYENLET

Ha nem állnak rendelkezésre a pályaszerkezet hőmérsékletére vonatkozóan mérések, akkor az adott jellemző mélységben a hőmérséklet napon belüli változásának figyelembevételéhez sokszor a burkolat felületi hőmérsékletét és a megelőző nap hőmérsékletét veszik figyelembe, mint az általánosan használt BELLS2 egyenletnél (Drumm & Meier, 2003).

$$T_d = B_0 + B_1 \cdot T_s + (\log_{10}(d) - 1,25) \cdot (B_2 \cdot T_s + B_3 \cdot T_{a(1-nap)} + B_4 \cdot f_a) + B_5 \cdot T_s \cdot f_b \quad (2)$$

Ahol:

T_d - a pályaszerkezet hőmérséklete az adott d [mm] mélységben [°C];

T_s - a felszín hőmérséklete (infravörös hőmérővel mért eredetileg) [°C];

T_a - (1-nap), a mérést megelőző nap átlagos léghőmérséklete [°C];

f_a és f_b - az időbeli késést figyelembe vevő korrekciós faktorok, lásd részletesebben Stubstad et al. (1998).

$B_0 - B_5$ - az egyenlet paraméterei az USA-ban megadott kalibrációs paraméterekre a következők: $B_0=2,78$; $B_1=0,912$; $B_2=-0,428$; $B_3=0,553$; $B_4=2,630$; $B_5=0,027$ (Fernandó et al. 2001). Az USA-n belül Texas (5 pont és 2 szelvény), Új Mexikó (1 pont) és Oklahoma (1 pont) államok területén voltak a mérési pontok, így jellemzően e mérési helyekre kalibráltak a paraméterek.

Általában azonban nem áll rendelkezésre a burkolathőmérséklet. Ilyen esetben a napközbeni órákra vonatkozóan, mikor általában a forgalom is döntő mértékben zajlik, és a burkolathőmérséklet magasabb, mint a léghőmérséklet a következő egyszerű összefüggést fejlesztették ki a pályaszerkezet hőmérsékletének becslésére (Ullidtz, 1998):

$$T_p = 1,2 \cdot T_a + 3,2 \tag{3}$$

Ahol:

T_p - a pályaszerkezet napközbeni átlagos hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$];

T_a - a napközbeni léghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$].

A hivatkozott irodalom sajnos nem közli, hogy az összefüggés milyen mélységben, vagy milyen vastagságú pályaszerkezetre érvényes, így konkrét számításra kevésbé használható.

2.3. MAXIMUM ÉS MINIMUM HŐMÉRSÉKLETEK SZÁMÍTÁSA

Ahogy azt korábban leírtuk, a hőmérséklet szélső értékei sokszor kritikusak, így ezekre vonatkozóan is kidolgoztak összefüggéseket. A következő számítási eljárásnál a minimum és maximum hőmérsékletbecslésre is nyílik lehetőség a pályaszerkezet adott mélységben, napi időlépcsőben. A kidolgozott összefüggésben a felszint érő sugárzás mennyiségét (pl. globálsugárzás) is felhasználják általában a levegőhőmérséklet értékek mellett. A Deiefenderer et al. (2006) által kidolgozott módszer általános alakja első megközelítésben a következő volt:

$$T_p = a + b \cdot T_a + c \cdot Y + d \cdot P_d \tag{4}$$

Ahol:

T_p - a pályaszerkezet hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$];

P_d - mélységben [m];

a - tengelymetszet;

b - a környezeti hőmérsékletre vonatkozó korrekciós tényező;

T_a - környezeti hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$];

c - az év napjaira vonatkozó korrekciós tényező;

Y - az év napjai (1 tól 183-ig). Az év napjainak megadása az év első felében (Január 1-től július 2.-ig) lineárisan növekedett 1-től 183-ig. Az év második felében pedig ugyancsak lineárisan csökkent 182-ről 1-re (július 3-tól december 31.-ig). Szökőévekben egy nap hozzáadása történt meg az értékekhez;

d - a mélységre (P_d) vonatkozó korrekciós tényező.

Az év napjainak megadása a modell kezdeti állapotában a sugárzási paraméter (pl. globálsugárzás) helyettesítésére történt meg. A felparaméterezett kezdeti egyenlet azonban csak a kalibrálás helyén volt érvényes.

Az eljárás továbbfejlesztése során az év napjainak megadása helyett már egy adott földrajzi helyre számítható, sugárzási paraméter bevonása történt meg az egyenletbe, a napi minimum és maximum aszfalthőmérsékletek becslése céljából. Az USA Virginia államában kidolgozott és ott validált modellek paraméterekkel ellátva a következők:

Maximum hőmérséklet:

$$T_{psmax} = 2,78752 + 0,6861 \cdot T_{max} + 5,6736 \cdot 10^{-4} \cdot R_s - 27,8739 \cdot P_d \quad (5)$$

Minimum hőmérséklet:

$$T_{psmin} = 1,2097 + 0,6754 \cdot T_{min} + 3,7642 \cdot 10^{-4} \cdot R_s - 7,2043 \cdot P_d \quad (6)$$

Ahol a korábban nem szereplő paraméterek:

T_{psmax} és T_{psmin} - a pályaszerkezet P_d mélységben számított napi minimum és maximum hőmérséklete;

R_s - az adott helyre számított globálsugárzás ($\text{kJ/m}^2/\text{nap}$);

T_{max} és T_{min} - mint a környezet jellemző napi maximum és minim hőmérséklete.

A globálsugárzás számítása sok esetben bonyolultabb, több lépésben elvégezhető eljárás, ezért az adott hely földrajzi szélességét, mint a globálsugárzást kiváltó, de mégis helyspecifikus paramétert vonták be a végső modellbe. A kidolgozott, most már egyszerűen és általánosan (a föld felszínén bármely ponton) használható egyenlet a következő:

Maximum hőmérséklet:

$$T_{plmax} = 6,0775 + 1,1265 \cdot T_{max} + 0,001820 \cdot Y_d + 0,0839 \cdot L - 53,5247 \cdot P_d \quad (7)$$

Minimum hőmérséklet:

$$T_{plmin} = 27,5986 + 0,9608 \cdot T_{min} + 0,0641 \cdot Y_d - 0,5616 \cdot L + 9,4893 \cdot P_d \quad (8)$$

Ahol a korábban nem szereplő paraméterek:

L - a földrajzi szélesség (fokban) és

Y_d - az év napja (most már 1-től 365-ig).

A fenti egyenletek 0,8-0,85 közötti R^2 értékkel tudták becsülni a burkolathőmérsékleteket (Deiefenderer et al., 2006) tehát általában elfogadható pontosságúnak minősülnek. A hibák inkább a maximum hőmérsékletek esetében jellemzőbbek és általában az aszfalthőmérsékletek alábecslésében jelentkeznek. A minimum hőmérsékletek viszonylag pontosabban becsülhetők az egyenletekkel.

A fenti egyenlet a maximális és minimális napi léghőmérséklet ismeretét igényli.

2.4. SZEZONÁLIS BECSLÉS

Megfontolandó, ha aszfalt merevségi modulusait csak szezonális, havi felbontásban akarjuk meghatározni, nem elegendő-e egy egyszerűbb, kevesebb paramétert bevonó egyenlet kidolgozása.

Az előbbi probléma-megoldási módszert a kevesebb paraméter mellett más is indokolja. Hazai viszonyok között végzett behajlásmérések hőmérsékletfüggésének vizsgálatánál Ureczky és Tóth (2008) azt találták, hogy a léghőmérséklettel szorosabb a tárcsaközép behajlás (és így a merevségi modulus) összefüggése, mint a burkolatfelszín hőmérsékletével. A burkolatfelszín hőmérséklet emellett elég heterogén (a felszín időszakos árnyékoltságától, egyenetlen szerkezetétől, albedójától, mikrodomborzatától is nagymértékben függ) is lehet és kevésbé hozzáférhető adat, mint a standard 2 méteres árnyékolt szenzorral mért levegőhőmérséklet.

Az amerikai irodalom is a havi szintű, a pályaszerkezet mélyebb rétegeire vonatkozó, hőmérsékletbecslésnél egyszerű léghőmérsékleten, mint egyetlen független változón, alapuló összefüggést javasol a megoldásra (George & Hussian, 1986; Asphalt Institute, 1982).

Az Asphalt Institute (1982) javaslata szerint (eredetileg Witczak (1972) összefüggését alapul véve) az egyes mélységekben az aszfalthőmérsékleteket a következő egyenlet megfelelő pontossággal becsli (terepi vizsgálatok szerint $R^2=0,89-0,93$ a mélységgel növekvő korreláció mellett):

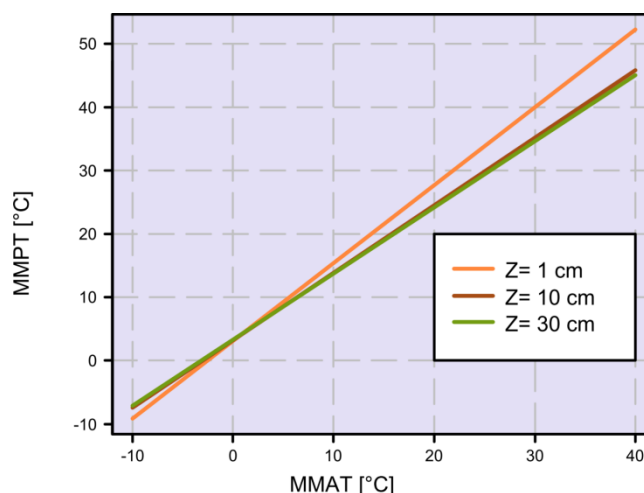
$$MMPT = MMAT \cdot \left(1 + \frac{1}{\frac{z}{2,54} + 4}\right) - \frac{10}{9 \cdot (\frac{z}{2,54} + 4)} + \frac{10}{3} \tag{9}$$

Ahol:

MMPT - az aszfalt hőmérséklete a megadott z [cm] mélységben [°C];

MMAT - a levegőhőmérséklet 2 méteres magasságban [°C].

Az egyenlet működésére illusztrációként az 1, 10 és 30 cm mélységekben számolt aszfalthőmérsékleteket feltüntettük a 2. ábrán a léghőmérséklet függvényében.



2. ábra: Aszfalthőmérsékletek különböző mélységben a léghőmérséklet függvényében.

A Pethő (2008) a léghőmérséklet és a pályaszerkezet alsó rétegének súlypontjában mért hőmérsékletek között a fenti Asphalt Institute (1982) által kidolgozott egyenletnek megfelelő összefüggést talált. A paraméterek annak ellenére nagyon hasonlóak, hogy az egyik perces mérésekből dolgozott, a másik összefüggés pedig havi adatokon alapult (1. táblázat).

| Forgalmi terhelési osztály | Mélység Z [cm] | Pethő (2008) | | AI (1982) | |
|----------------------------|----------------|--------------|----------------|------------|----------------|
| | | Meredekség | Tengelymetszet | Meredekség | Tengelymetszet |
| C | 14,5 | 1,1246 | 1,9218 | 1,1030 | 3,2189 |
| D | 17 | 1,0965 | 2,2386 | 1,0935 | 3,2294 |
| E | 19 | 1,0778 | 2,4492 | 1,0871 | 3,2365 |
| K | 23 | 1,0448 | 2,7775 | 1,0766 | 3,2482 |

1. táblázat: A léghőmérsékletek alapján, adott mélységben jellemző aszfalthőmérsékleteket számító egyenletek paramétereinek összehasonlítása a Pethő (2008) és az Asphalt Institute (1982) összefüggésére vonatkozóan. C, D, E és K a forgalmi terhelési osztályokat jelzi, slope (iránytangens), intercept (tengelymetszet).

A két összefüggést azonos alakúra hozva, a 1. táblázat alapján látható, hogy az alkalmazott lineáris kapcsolatok iránytangense csak a második tizedesben, a tengelymetszetek pedig a legfelső kategóriát kivéve (a felső 14,5 cm-es mélységben 1,3 Celsius fok) 1 Celsius fokon belül vannak.

A fenti AI (1982) egyenlethez teljesen hasonló formájú összefüggést közöl George & Hussian (1986) az aszfalthőmérsékletek havi szintű becsléséhez.

$$MMPT = MMAT \cdot \left(1 + \frac{7,62}{z+30,48}\right) - \frac{8,47}{z+30,48} + 3,3 \quad (10)$$

Ahol:

MMPT - az aszfalt hőmérséklete a megadott z [cm] mélységben [$^{\circ}\text{C}$];

MMAT - a levegőhőmérséklet 2 méteres magasságban [$^{\circ}\text{C}$].

2.5. ADATSZEGÉNY ESETBEN A HAVI ÁTLAGOS LÉGHŐMÉRSÉKLET BECSLÉSÉRE HASZNÁLHATÓ ÖSSZEFÜGGÉS

Abban az esetben, ha az adott helyre vonatkozóan még léghőmérsékleti adatok sem állnak idősor formájában rendelkezésre, ill. a meteorológiai állomások nagyon távol (több száz km) helyezkednek el a mérési ponttól, akkor egyszerű pl. cos hullámon alapuló becslést vesznek alapul. Az eljárásra, amennyiben az adott időlépcsőben érvényes hőmérsékleti szélsőségek legalább becslésszerűen ismertek, szolgáljon például a következő heti átlaghőmérsékleteket becsülő összefüggés (Ullidtz, 1998):

$$T_a = \frac{(T_{max}+T_{min})}{2} + \frac{(T_{max}-T_{min})}{2} \cdot \cos \frac{(U-U_0) \cdot P_i}{26} + 3,3 \quad (11)$$

Ahol:

T_a - az átlagos levegőhőmérséklet az U -val jelölt héten [$^{\circ}\text{C}$];

T_{min} ill. T_{max} - a jellemző heti maximum és minimum hőmérséklet az adott régióban [$^{\circ}\text{C}$];

U_0 - az a hét, ahol a maximális léghőmérséklet (heti átlagban) előfordul.

Az egyenlet havi átlaghőmérsékletek becslésre is alkalmas lehet, de ebben az esetben az U adott hónapot, az U_0 pedig a T_{max} , maximális átlaghőmérsékletű hónapot jelöli. Havi becslésnél a cos-os tag nevezőjében 26 helyett 6 szerepel és természetesen a T_{min} , minimális hőmérséklet is havi szinten értendő.

2.6. AZ ASZFALT MODULUSOK ÉS A HŐMÉRSÉKLET KAPCSOLATA

Az aszfalt merevségi modulusa és hőmérsékletek között kidolgozott összefüggések általában exponenciálisak, ami felhívja a figyelmet a hőmérsékletnek, mint változónak a fontosságára a méretezésben. Az AASHTO (1993) által kidolgozott összefüggés például:

$$\log E_{ac} = 6,451235 - 0,000164671 \cdot T_p^{1,925244} \quad (12)$$

Ahol:

E_{ac} - az aszfalt merevségi modulusa (Asphalt Concrete Elastic Modulus)

T_p - az aszfalt hőmérséklete az adott mélységben [$^{\circ}\text{C}$].

Hasonló és igen szoros ($R^2=0,98$) exponenciális összefüggést talált Pethő (2008) a megnyúlás és a pályaszerkezet alsó rétegének hőmérséklete között.

2.7. MAGYARORSZÁGRA JELLEMZŐ MÉRETEZÉSHEZ SZÜKSÉGES HŐMÉRSÉKLETI ÉRTÉKEK ÉS AZOK VÁLTOZÁSA AZ IDŐBEN

A számításokhoz szükséges léghőmérséklet adatsorokat kutatási célra a szabadon hozzáférhető FORESEE adatbázis felhasználásával állítottuk elő.

Az amerikai Shell módszerben (Claessen et al., 1977) a havi levegőhőmérsékletekből indulnak ki, az alapján számolják. Az Asphalt Institute (Witczak, 1982) megközelítés szerint az adott mélységben az aszfalthőmérsékleteket és azokat egy súlyszámmal látják el a léghőmérsékletek alapján a következő összefüggés szerint:

$$WF = 0,0763 \cdot \exp(0,1328 \cdot MMAT) \tag{13}$$

Ahol:

WF - a súlyszám (dimenzió nélküli);

MMAT - a levegőhőmérséklet 2 méteres magasságban [°C].

Az adott földrajzi helyre vonatkozólag a havi súlyszámok alapján meghatároznak egy átlagos súlyszámot. Végül pedig az átlagos súlyszám alapján határoznak meg egy ekvivalens hőmérsékleti értéket.

Az összefüggéshez csak a havi átlagos levegőhőmérsékletek szükségesek. Ezeket megadjuk a múlt jelen és jövő 30 éves periódusaira összesítve a 2. táblázatban. Láthatjuk, hogy az előbbi összefüggés szerint a nyári periódusra eső súlyszámok jelentősen nagyobbak, mint a téliek. Az előbbiekből következően a nyári magasabb hőmérsékletű hónapok hatása fokozottabban jelentkezik az ekvivalens hőmérsékletek számításánál.

| Hónap | 1951-1980 | | 1981-2010 | | 2016-2045 | |
|--------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
| | MMAT | WF | MMAT | WF | MMAT | WF |
| Jan. | -1,88 | 0,06 | -0,57 | 0,07 | -0,05 | 0,08 |
| Febr. | 0,88 | 0,09 | 1,45 | 0,09 | 2,81 | 0,11 |
| Már. | 5,24 | 0,15 | 6,09 | 0,17 | 6,64 | 0,18 |
| Ápr. | 10,75 | 0,32 | 11,68 | 0,36 | 12,26 | 0,39 |
| Máj. | 15,45 | 0,59 | 16,73 | 0,70 | 17,45 | 0,77 |
| Jún. | 19,07 | 0,96 | 19,63 | 1,03 | 20,48 | 1,16 |
| Júl. | 20,49 | 1,16 | 21,68 | 1,36 | 22,77 | 1,57 |
| Aug. | 19,98 | 1,08 | 21,26 | 1,28 | 22,56 | 1,53 |
| Szept. | 16,23 | 0,66 | 16,74 | 0,70 | 18,06 | 0,84 |
| Okt. | 10,85 | 0,32 | 11,55 | 0,35 | 13,01 | 0,43 |
| Nov. | 5,39 | 0,16 | 5,25 | 0,15 | 5,87 | 0,17 |
| Dec. | 0,58 | 0,08 | 0,66 | 0,08 | 1,44 | 0,09 |

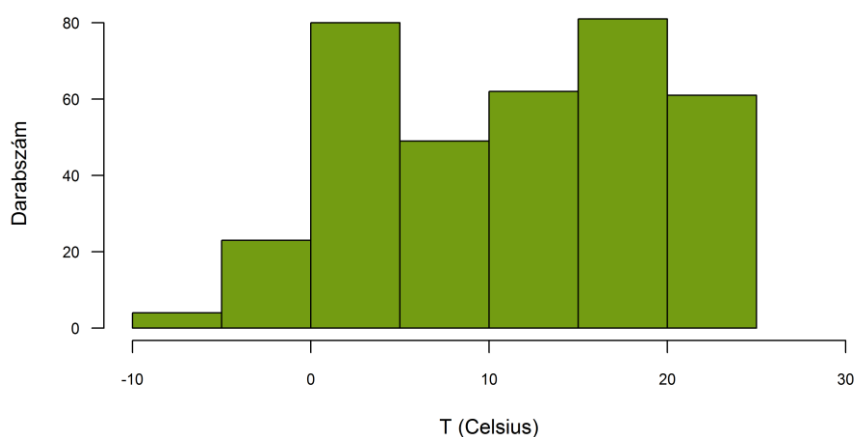
2. táblázat: Átlagos havi hőmérsékleti értékek a múlt (1951-1980) a jelen (1981-2010) és a jövőbeli (2016-2045) periódusokra. MMAT, levegőhőmérséklet (°C), WF súlyszám.

Az aszfalthőmérsékletek alapján történő merevségi modulus becsléséhez bizonyos méretezési eljárásoknál hőmérsékleti eloszlásokat használnak. A francia méretezési eljárásnál 5 fokos osztályközönként adják meg a hőmérsékleti eloszlásokat és így számítják egy segédprogram segítségével a mértékadó aszfaltmodulust (French Design Manual, 1997).

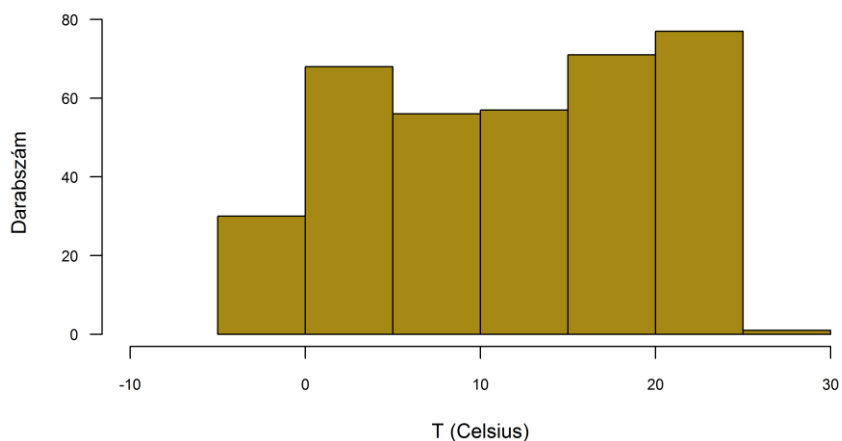
A következő 3. táblázat, 3. ábra, 4. ábra és 5. ábra mutatják Budapest környékére vonatkozóan a hőmérséklet eloszlásokat a havi hőmérsékleti adatok alapján a múlt, a jelen és a jövő vizsgált 30 éves periódusaira vonatkozóan. A méretezéshez szükséges pályaszerkezet mélységet megadva, havi szinten a pályaszerkezet hőmérsékletét és annak eloszlásait is számíthatjuk.

| Kategória | Múlt | | Jelen | | Jövő | |
|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|
| [Celsius] | Darab | Gyakoriság | Darab | Gyakoriság | Darab | Gyakoriság |
| -10-(-5) | 4 | 0,0111 | - | - | 1 | 0,0028 |
| -5-0 | 23 | 0,0639 | 30 | 0,0833 | 23 | 0,0638 |
| 0-5 | 80 | 0,2222 | 68 | 0,1889 | 72 | 0,2000 |
| 5-10 | 49 | 0,1361 | 56 | 0,1556 | 54 | 0,1500 |
| 10-15 | 62 | 0,1722 | 57 | 0,1583 | 52 | 0,1444 |
| 15-20 | 81 | 0,2250 | 71 | 0,1972 | 74 | 0,2056 |
| 20-25 | 61 | 0,1694 | 77 | 0,2139 | 79 | 0,2194 |
| 25-30 | - | - | 1 | 0,0028 | 5 | 0,0139 |

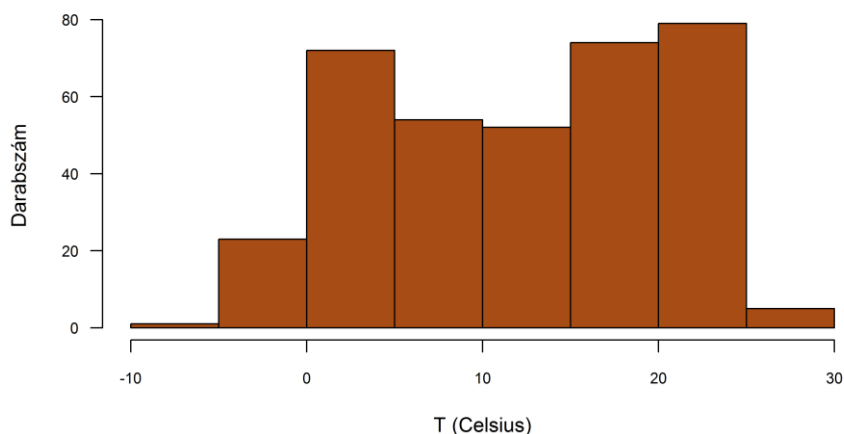
3. táblázat: Havi hőmérsékleti értékek eloszlása a múlt (1951-1980) a jelen (1981-2010) és a jövőbeli (2016-2045) periódusokra Budapest környékére vonatkozóan.



3. ábra: A léghőmérsékletek eloszlása 5 cm-es osztályközökkel a múltban (1951-1980).



4. ábra: A léghőmérsékletek eloszlása 5 cm-es osztályközökkel a jelenben (1981-2010).



5. ábra: A léghőmérsékletek eloszlása 5 cm-es osztályközökkel a jövőben (2016-2045).

Az ekvivalens hőmérsékletek számítása, az egész országra területi átlagként érvényesen, az 1981-2010-es periódust figyelembe vevő havi hőmérsékleti idősor alapján történt. Az egész országra érvényes hőmérsékleti eloszlást 5 fokos osztásközökben a 4. táblázat tartalmazza.

| Kategória [°C] | Jelen (1981-2010) | |
|-------------------|-------------------|------------|
| | Darab | Gyakoriság |
| -10-(-5) | 1 | 0,0028 |
| -5-0 | 39 | 0,1083 |
| 0-5 | 65 | 0,1806 |
| 5-10 | 52 | 0,1444 |
| 10-15 | 60 | 0,1667 |
| 15-20 | 81 | 0,2250 |
| 20-25 | 62 | 0,1722 |
| 25-30 | - | - |

4. táblázat: Havi hőmérsékleti értékek eloszlása a jelenre (1981-2010) vonatkozóan országos átlagban.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A környezeti jellemzők alaposabb vizsgálata az alsóbbrendű vagy mezőgazdasági utaknál, az erdők feltáróhálózatánál, valamint az agro-erdészeti rendszerek kiszolgáló útjainál kifejezetten fontos, mivel ezeknél az úthálózatoknál az időjárásnak való kitettség a vékonyabb pályaszerkezet miatt erőteljesebben is érezteti hatását. Pethő (2008) mérései azt mutatták, hogy konkrétan a szélsőségesen alacsony és magas hőmérsékletek fordulnak elő gyakrabban, mint a magasabb terhelési kategóriák (vastagabb pályaszerkezetek) esetén. Az aszfalt rétegek hőmérséklet változásai lényegesek, mert az aszfaltkeverékek modulusai nagyon érzékenyek a hőmérsékletváltozásra.

Az aszfalt merevségi modulust a tényleges, reálisan várható aszfalthőmérséklet alapján célszerű felvenni, de ezen mérések csak korlátozott számban állnak rendelkezésre, szemben a léghőmérséklet mérésekkel, melyek igen jól lefedik az országot, és felhasználhatóak az aszfalthőmérsékletek - elsősorban szezonális, havi gyakoriságú - becslésére.

A cikk a léghőmérsékletnek, az aszfalthőmérsékletekkel való összefüggését és a levonható következtetéseket dolgozta fel.

Köszönetnyilvánítás:

A publikáció megírását az EFOP 362-16-2017-00018 „Termeljünk együtt a természettel – Az agrárerdészet, mint új kitörési lehetőség” pályázat támogatta.

4. IRODALOMJEGYZÉK

- AASHTO. 1993: AASHTO Guide for Design of Pavement Structures -1993: American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C. ISBN 1-56051-055-2, p. 624.
- Asphalt Institute 1982: Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design manual (MS-1), 9th ed. Research Report 82-2, Asphalt Institute, Lexington, KY
- Claessen, A. I. M., Edwards, J. M., Sommer, P. & Ugé, P. 1977: Asphalt Pavement Design, The Shell Method, 4th International Conference on Design of Asphalt Pavements, pp. 39-65.
- Diefender, B. K., Al-Qadi, I. L. & Diefender, S. D. 2006: Model to predict Pavement Temperature Profile: Development and Validation. Journal of Transportation Engineering, ASCE, 132(2): 162-167, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:2\(162\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:2(162))
- Dingman, L., S. 2002: Physical Hydrology. Prentice-Hall. ISBN: 0-13-099695-5, p. 646.
- Drumm, E. C. & Meier, R. 2003: LTPP Data Analysis: Daily and Seasonal variations in Insitu Material Properties, 2003 NCHRP Web Document 60.
- Fernando, E. G., Liu, W. & Ryu, D. 2001: Development of a procedure for temperature correction of back calculated AC modulus. Report 1861-1. Texas Transportation Institute, Texas AM University System. p. 147.
- French Desing Manual for Pavement Structures. Guide technique. Laboratoire Central Ponts et Chaussées (LCPC), Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) Centre de la Sécurité et des Techniques Routières, May 1997.
- George, K. P. & Husain, S. 1986: Thickness design for flexible pavement: a probabilistic approach, Transportation Research Record, Vol.1095, pp 26-36.
- Gupta, A. 2014: A review of Environmental Factors on Flexible Pavement Modelling, Modern Traffic and Transportation Engineering Research, vol:3 iss:1 pg:14-20
- Pethő, L. 2008: A hőmérséklet eloszlás alakulása az aszfalt burkolatú pályaszerkezetekben és ennek hatása a pályaszerkezeti rétegek méretezésére, technológiai tervezésére. PhD értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.
- Stubstad, R. N., Lukanen, E. O., Richter, C. A. & Baltzer, S. 1998: Calculation of AC Layer Temperatures from FWD Field Data. in: Proc. of the 5th International Conference on the Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway, p. 919-928.
- Ureczky, J., & Tóth, Cs. 2008: A hőmérséklet teherbírásra gyakorolt hatásának vizsgálata. Közúti és mélyépítési szemle., 2008 április, 3. szám. 9-14.
- Ullidtz, P. 1998: Modelling Flexible Pavement Response and Performance. TechUniv. of Denmark Polyteknisk, ISBN: 978-8750208051, p. 205.
- Witzak, M. W. 1972: Design of full-depth asphalt airfield pavements, Proceedings of the 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements: 550-567.
- Zapata, C. 2018: Empirical approach for the use of unsaturated soil mechanics in pavement design. Geotechnical Special Publication, 2017-November (GSP 300), 149-173. <https://doi.org/10.1061/9780784481677.008>



A hazai útpályaszerkezetek energiaszükségletének vizsgálata

Szpotowicz Réka¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Út és Vasútépítési Tanszék

E-mail: reka.nadasi@gmail.com

DOI: [10.36246/UL.2020.2.03](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.03)

KIVONAT

Az építési folyamatok energiaigényének csökkentése egyaránt gazdasági és fenntarthatósági előnyökkel bír. A cikk célja az útpályaszerkezetek energiaigényének vizsgálata, annak eredményének bemutatása. Ehhez a cikk összegyűjtött szakirodalmak alapján meghatározta a különböző építési folyamatok energiaigényeit, valamint egy esettanulmányon keresztül összehasonlítja a magyar előírásoknak megfelelően (UME) mind aszfalt, mind betonburkolattal megtervezett autópályaszakasz energiaigényét, figyelembevéve a folyamatokat a nyersanyag kitermelésétől a pályaszerkezet építéséig. Az esettanulmány eredményeként látható, hogy a betonburkolatok energiaszükséglete közel 60%-kal nagyobb, mint az aszfaltburkolatoké. Ennek oka a portlandcement gyártásának kimagaslóan magas energiaigénye, melyet az egyéb építési folyamatok nem tudtak árnyalni

Kulcsszavak: energiaszükséglet, aszfalt pályaszerkezet, betonpályaszerkezet, gyártási és építési folyamatok

ABSTRACT

The reduction of energy needs for construction activities has both economical and sustainability interests. The aim of the presented paper is to examine and present the energy requirements of pavements. Therefore, the paper collected the relevant literature about the topic and define the energy demand of different construction activities. The paper also presents a case study designed by the Hungarian standards (UME) to compare the energy need of asphalt and concrete pavements from the material extraction to the construction. The result shows, that the concrete pavements require approximately 60% more energy than the asphalt pavements. The reason for this is the extremely high energy demand of the production of Portland cement, which could not be moderated enough by the other processes and activities

Keywords: energy demand, asphalt pavement, concrete pavement, production and construction processes

Szpotowicz Réka

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Út- és Vasútépítési Tanszék Ph.D. hall-gatója.
Kutatási területe a környezettudatosan tervezett útburkolatok és közutak.*

1. BEVEZETÉS

Az általános értelemben vett „növekedés” kevésbé anyag- és energiafüggővé tétele a jövő fenntarthatóságának záloga. Mivel az energiafogyasztás és a CO₂-kibocsátás csökkentése, illetve a másodlagos nyersanyagok/források – lehetőség szerint növekvő mértékű - felhasználása mind gazdasági, mind környezeti szempontból egyaránt fontos, ez az szemlélet fokozatosan elérte az

építőipart is [1], ezáltal a kormányok, a vállalatok és a kutatók egyre nagyobb figyelmet fordítanak erre a kérdésre.

Magyarországon az épített pályaszerkezetek anyaga nagyrészt (99%) aszfalt [2], ugyanakkor a növekvő tengelysúlyok és a felújítási igények időben való kitolása okán a beton és kompozit utak iránti igény folyamatosan növekszik, elsősorban az autópálya-építéseket tekintve.

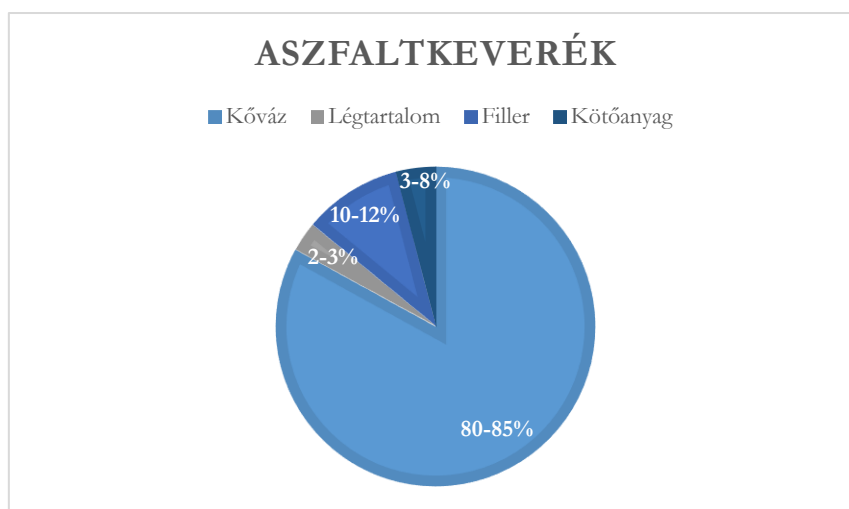
A cikk célja az útpályaszerkezetek energiaszükségletének vizsgálata, beleértve a nyersanyag-kitermelési, illetve a gyártási folyamatokat, továbbá az építési tevékenységeket, az anyagok szállítását a magyar szabványok, előírások és a hazai gyakorlat alapján. A cikk összegyűjti és bemutatja a pályaszerkezetek energia számításáról rendelkezésre álló nemzetközi publikációkat, elemzi a felhasznált energia értékeket és meghatározza a különböző folyamatok energiaigényének átlagos értékeit, majd egy olyan 1 km hosszú, autópályaszakasz 3,75 m széles sávjára végez mintaszámításokat, ahol a várható tengelyterhelés „rendkívül nehéz” terhelési osztályba esik.

1.1. ASZFALT ÉS BETON PÁLYASZERKEZETEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A pályaszerkezetek általános célja a járművek biztonságos, akadálymentes közlekedésének biztosítása a járművek által okozott terhek szétosztása által, úgy a földműre és a termett talajra csak tartósan elviselhető terhek adódnak. Általánosságban három különféle pályaszerkezet típust különböztetünk meg: hajlékony, félmerev, merev, megjegyezve, hogy bizonyos terminológiák külön kezelik a kompozit szerkezeteket, a hazai gyakorlat ezt a merevbe sorolja. [3], [4], [5].

1.1.1. ASZFALT PÁLYASZERKEZET

Aszfalt a legelterjedtebben alkalmazott pályaszerkezet típus, minthogy az európai közúthálózat több mint 90% -át aszfalt borítja, és több mint 10 000 európai vállalat foglalkozik aszfalt előállításával és aszfaltépítéssel, Európában pedig körülbelül 4700 keverőtelep működik [6]. Az aszfalt pályaszerkezetek főbb előnyei a költséghatékonyság, a zajszennyezés csökkentése és az utazáskényelem. Ezenkívül az aszfaltburkolatok építése, felújítása, bontása gyorsan elvégezhető, így a városi területeken igazán kedvelt anyag. Az aszfaltkeverék általánosságban kötőanyag, kőanyag és finomrész keveréke, melyhez bizonyos esetekben adalékanyagokat is adhatnak. Az aszfalt kötőanyag (bitumen) különböző molekulatömegű szénhidrogének keveréke, ami a nyersolaj desztillációjának terméke. A kémiai adalékanyagokat általában arra használják, hogy javítsák a keverék bizonyos ellenálló képességét, mint például a nedvességérzékenység, a nyomvályúsodás vagy a fáradási-repedés képződés. Az aggregátumok – melyek a legmagasabb térfogatrészen vannak jelen az aszfaltkeverékben [4] – származhatnak természetes kőzetekből vagy más anyagok gyártási folyamatának melléktermékeiből (például acélgyártásból származó salak, bányászati hulladékok, kemencéből származó pernye stb.). A következő grafikon (1. ábra) az aszfaltanyagok tipikus térfogatösszetételét mutatja be. A kőanyagok szárítása és az aszfalt-kötőanyag megfelelő folyadékáramának elérése érdekében a megfelelő keveréshez mind az aggregátumot, mind az aszfalt-kötőanyagot (bitumen) fel kell hevíteni a keverés előtt [7].

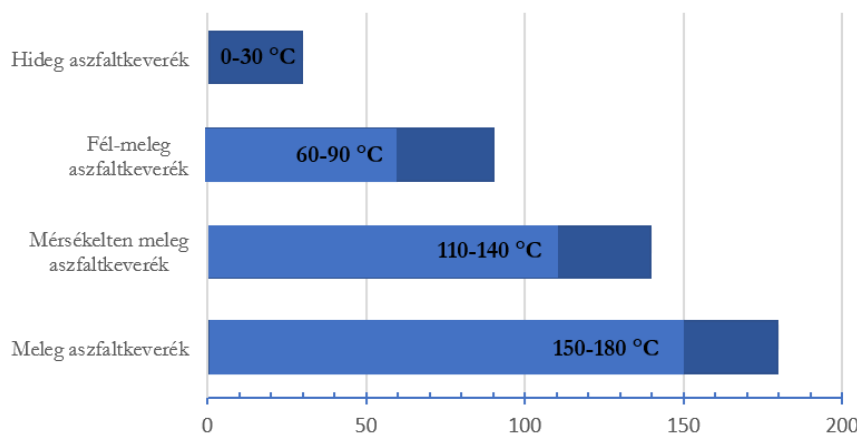


1. ábra: Aszfaltkeverék alkotóelemeinek általános megoszlása.

Az aszfaltkeverékek típusait meg lehet különböztetni a keverék gyártásának hőmérséklete alapján (2. ábra), az alábbiak szerint:

- Meleg aszfalt (Hot Mix Asphalt, HMA) – 150-180 °C
- Mérsékeltlen meleg aszfalt (Warm Mix Asphalt, WMA) – 110-140 °C
- Fél-meleg aszfalt (Semi Warm Mix Asphalt) – 60-90 °C
- Hideg aszfalt (Cold Mix Asphalt) – 0-30 °C

Aszfaltkeverék előállításának hőmérséklete

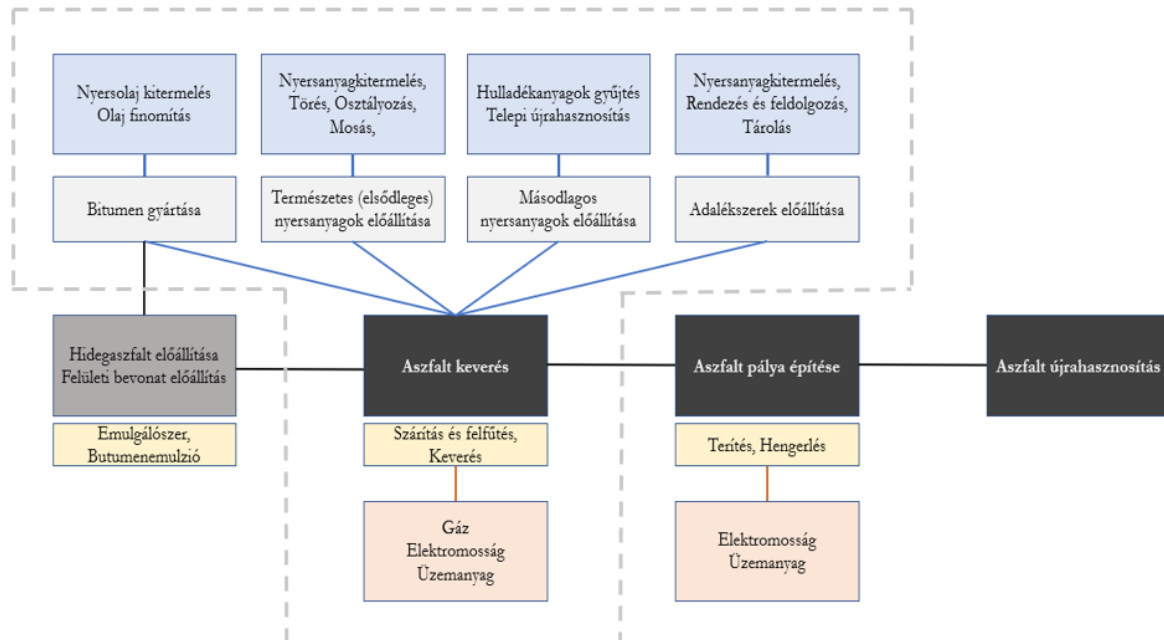


2. ábra: A különböző aszfalt-típusok keverési hőmérséklete.

Útpályaszerkezetek építése során jelenleg továbbra is a hagyományos meleg aszfalt (HMA) a legelterjedtebben alkalmazott keverék típus, azonban a fenntarthatóság elterjedésének eredményeként, az energiaigények csökkentése céljából, a mérsékeltlen meleg aszfalt (WMA) egyre elterjedtebb technológiai alternatíva. Ez az alacsonyabb hőmérsékleti igényt organikus adalékanyagok, kémiai adalékanyagok vagy habosítási eljárások alkalmazásával éri el (ásványi adalékanyagokkal, vízbázisú mechanikus rendszerrel vagy a kettő kombinációjával). A kevesebb hőigény következtében a WMA előállítása kevesebb energiát igényel és kevesebb káros emissziót bocsát ki. A hideg aszfaltot hideg adalékok és bitumenemulziók vagy habosított bitumenek által készítik, amelyeket főként az útkarbantartásban és az újjáépítésben használnak.

1.1.2. ASZFALT NYERSANYAGOK ELŐÁLLÍTÁSA ÉS GYÁRTÁSI FOLYAMATA

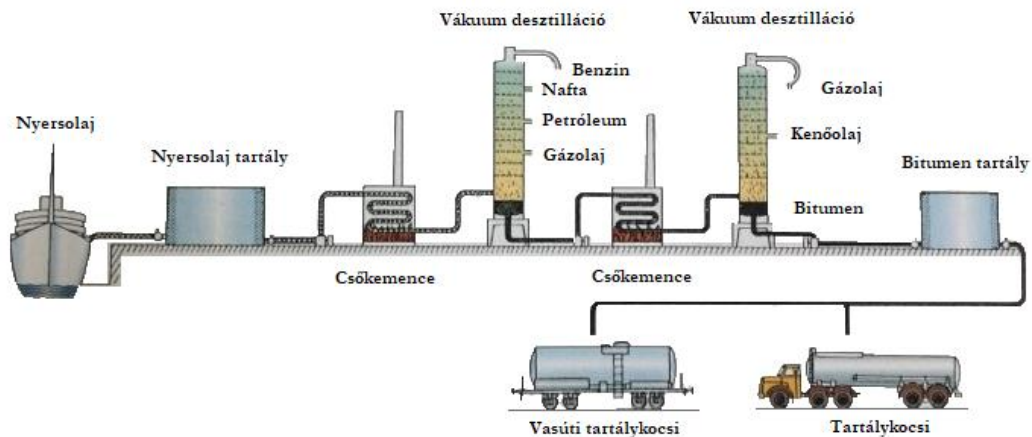
Az aszfaltkeverési folyamat igényli - a nyersanyag-kitermelés mellett - a legnagyobb mennyiségű energiameennyiséget, valamint az aszfaltburkolat életciklusa során a legnagyobb mennyiségű CO₂eq-kibocsátást eredményezi [8]. A 3. ábra bekeretezett része az aszfaltgyártás folyamatábráját mutatja be a [9] [10] [11] alapján.



3. ábra: Aszfalt pályaszerkezet gyártásának és életének folyamatábrája.

Bitumen előállítása

Az aszfalt pályaszerkezetek általában 3-8% bitument tartalmaznak melynek kötőanyag funkciója van. Általában kétféle aszfalt-kötőanyag létezik, az vagy természetesen fellelhető, vagy a nyersolaj (ásványolaj) finomításának terméke. Mindkét esetben az aszfalt-kötőanyag a kőolaj frakcionált desztillációjának eredménye, akár rövid ideig, mint például a finomítói folyamatban, vagy hosszabb ideig, mint a természetben [12]. A bitumen előállítása során lényegében elválasztják a könnyebb, alacsony forráspontú frakciókat a nyersolajtól, így magas forráspontú, nagy molekulatömegű, nagyon alacsony illékonyosságú terméket kapnak. Mivel a bitumen előállításának kiindulási anyaga a nyersolaj desztillációjából származó kőolajmaradvány, a bitumen tulajdonságai és minősége nagy mértékben függ a nyersolaj(ok) minőségétől [13]. A finomítási folyamat vázlatát a 4. ábra mutatja be.



4. ábra: A nyersolajfinomítás folyamatának sematikus ábrája (Hutschenreuther&Wörner) [14].

A desztillációt általában két lépésben hajtják végre. Először a nyersolajat nagy kemencében kb. 650 °C-ra hevítik és részben elpárologtatják. Ezután egy vákuum-desztillációs toronyba vezetik, ahol a legkönnyebb alkotóelemek elpárolognak, a tetejére emelkednek, lehűlnek, kondenzálódnak, majd további feldolgozás céljából kiszívják őket. Ezután a hőmérsékletet csökkenteni kell. A desztillációs torony alsó frakciója az az anyag, amelyet kenőolaj előállításához használnak az aszfalt-kötőanyaghoz. A torony felső részén benzin keletkezik, a torony közepén lévő anyagok pedig drágább üzemanyagokat eredményeznek, pl. repülőgép üzemanyag, petróleum és dízel [12]. Mivel a finomítás során több terméket állítanak elő, elengedhetetlen az energiaigény elosztása a bitumen előállításának energiaigényének megállapításakor. Sripplé LCA-tanulmánya szerint [15], az allokációs eloszlás bitumennél kb. 40%, könnyebb termékeknél 60%. A kész bitumenterméket a finomítóból a raktárakba vagy az aszfaltkeverő üzembe szállítják, ahol nagy tartályokban tárolják, és folyamatosan fűtött helyen tartják a folyékonyság biztosítása érdekében.

Természetes adalékanyag kitermelés

A természetes ásványi adalékanyagok általában kemény anyagok a kőzettömegeből, azaz például homok, kavics, zúzott kő, salak vagy kőpor. Ezeket az aggregátumokat természetes forrásokból származnak, főleg kőbányákból és kavicsbányákból. Az épületek, házak és infrastrukturális létesítmények építőanyag-igényének növekedése eredményeként évente 2700 millió tonna adalékanyagot állítanak elő Európában 16 000 vállalkozásának 25 000 kőanyag kitermelési helyén [16]. Az Európai Aggregátumok Szövetsége (European Aggregates Association) alapján az aszfalt előállításához az összes kitermelt kőanyag 10% -át használják fel. Az adalékanyagok gyártása során a legnagyobb energiaigénnyel az alapanyag bányászata, aprítása, szitálása, szűrése és mosása bír. Ezekhez főleg dízelolajat és villamos energiát használnak [15].

Másodlagos nyersanyagok

Mivel a természetes kőanyagok nem megújuló nyersanyagok és sok területen hiány van belőlük, a másodlagos nyersanyagok használata egyre kedveltebb. A másodlagos anyagok általában más ipari folyamatokból származó melléktermékek, például nagyolvasztó salakjai, vagy porcelán agyagmaradékok. Mivel a fenntarthatóság egyre fontosabb kérdéssé válik az építőiparban, megjelent a különböző hulladék anyagok, például gumi, műanyag vagy üveg felhasználása is az aszfaltburkolatokban.

Adalékszerek

Modifikáló- és adalékszerek az aszfaltkeverék tulajdonságainak előnyös megváltoztatásához és javításához szükségesek. A leggyakrabban használt típusok a polimerek (elasztomerek és plasztomerek), kémiai módosítók, extenderek, oxidánsok és antioxidánsok, szénhidrogének, valamint

kipergésálló (antistripping) adalékok. Aszfalt adalékszereket általában az aszfalt-kötőanyaghoz adják, hogy kedvező irányban megváltoztassák a végső aszfaltkeverék jellemzőit.

Aszfaltkeverés

Az aszfalt a kőanyag, finomrész, bitumen-kötőanyag és levegő keveréke (3. ábra), amelyet aszfaltkeverő telepeken állítanak elő. Megkülönböztethetünk fix vagy mobilkeverőtelepeket. Az aszfaltkeverő telepek keverési működésük szerint az alábbiak szerint osztályozhatók:

- szakaszos üzemű aszfaltkeverők
- folyamatos üzemű aszfaltkeverők
- parallel dobbal ellátott keverők
- ellenáramú dob-keverők

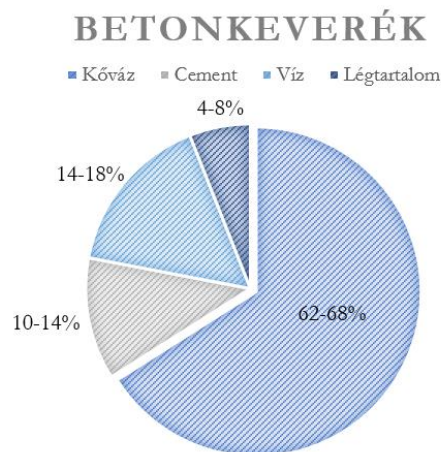
Az aszfaltkeverő telepek elsődleges feladatai [12]:

- a kőanyagok, bitumen és adalékanyagok pontos arányának adagolása
- kőanyagok szárítása, valamint a kőanyagok és kötőanyag keveréshez történő megfelelő hőmérsékletre való felmelegítése
- az aggregátumok, a kötőanyag és az adalékok megfelelő keverése
- a kész keverék megfelelő hőmérsékleten való tárolása
- az aszfaltkeverék mérlegelése és adagolása teherautókba a projekt területére történő szállításhoz.

Az aszfaltkeverés első lépéseként a kimért aggregátumokat össze kell keverni, melegíteni és szárítani. Azokat tehát silókból a szárítóba szállítják, ahol 150-170 °C hőmérsékletre melegítik. Ezután a szárított aggregátumokat a megfelelő keverési hőmérsékleten összekeverik a forró, lecsökkent viszkozitású bitumennel. A keverés után az elegyet a tömörítési hőmérsékleten tömörítik. A tömörítés célja az optimális burkolati hézag (légtartalom) elérése [17]. A hőenergia nagy részét az adalékanyag melegítésére használják. Az aggregátumok nedvességtartalma közvetlenül befolyásolja a szárításhoz szükséges energiát, például a víztartalom 4% -os növekedése 60% -os növekedést jelent az aggregátumok szárításában [18]. Mivel Európában évente mintegy 400 millió tonna aszfaltot termelnek (EAPA és NAPA, 2011), a keverési folyamat energiafogyasztásának csökkentése mind gazdasági, mind környezeti okokból egyre fontosabbá válik.

1.1.3. BETON PÁLYASZERKEZET

A beton - merev - pályaszerkezet előnyeit régóta ismerik és elismerik, így azt széles körben alkalmazzák [19]. Teherbírása és tartóssága miatt a betonburkolatok fő alkalmazási területe az autópályák, repülőterek, kereskedelmi és ipari utak. A tartósság mellett a beton pályaszerkezetek számos előnyt kínálnak, amelyeket a bitumenes keverékek nem teljesítenek. Például kiválóan alkalmas nagy, pontszerű terhelések viselésére, ellenáll a dízel-kiömlésnek és más agresszív anyagoknak, alkalmazható alacsony fokú szilárdság esetén is, ellenáll a magas hőmérsékletnek, növeli a láthatóságot és csökkenti a karbantartási igényeket [20] [21]. A betonkeverékek általában a cement homokkal és vízzel való keveréke, megfelelően tömörítve (5. ábra). A betonburkolatot akár közvetlenül az előkészített altalajra, vagy egyrétegű szemcsés vagy stabilizált rétegre helyezik.



5. ábra: Betonkeverék alkotóelemeinek általános megoszlása.

A technológia fejlődésével másodlagos anyagok, azaz újrahasznosított anyagok hozzáadása a keverékhez is lehetséges, például építési és bontási melléktermékek, pernye, szilikapor kerülhet felhasználásra. A nehéz terhek viselése érdekében erősítő/merevítő anyagokat, azaz acél- és műanyag szálakat használnak a tartósság és a teherbíróképesség növelésére. A beton minőségének, kezelhetőségének, gyorsításának vagy késleltetésének javítása érdekében különféle adalékanyagok használata szintén jellemző.

A legelterjedtebben használt adalékanyagok a következők [22]:

- Kötéskésleltetők: a kémiai reakció késleltetésére, a magas hőmérsékletek hatásának csökkentésére, így több időt hagyva a beton burkolatok befejezésére
- Légbuborék képzők: a fagyasztás-olvasztás tartósságának növelése
- Folyósítók: fajlagos betonszilárdság elérése alacsonyabb cementtartalom mellett
- Kötésgyorsítók: a beton szilárdságának növekedésére vagy a beton szilárdulási idejének csökkentése
- Zsugorodáscsökkentő: a korai és hosszú távú szárítási zsugorodás csökkentésére
- Korroziógátló: a vasbeton acél korróziójának lassításához

A betonkeverékek a felhasznált cement típusa szerint is csoportosíthatók (MSZ EN 197-1: 2000), mint:

| | |
|---------|--------------------------|
| CEM I | Portlandcement |
| CEM II | Összetett portlandcement |
| CEM III | Kohósalakcement |
| CEM IV | Puccoláncement |
| CEM V | Kompozitcement |

Mivel a cementklinker előállításához elsősorban kalcium-oxid (CaO) és szilícium-dioxid (SiO₂), valamint ezen kívül némi alumínium-oxidra (Al₂O₃) és vasra (Fe₂O₃) van szükség, az alapanyagok főként mészkő, kréta, agyag és/vagy pala.

A betonburkolatok csoportosíthatók azok szerkezeti kialakítása szerint [23] [24]. A három különböző pályaszerkezet-típus különbözően kezeli a repedések kialakulásának és a terhelés átvitelének szabályozására szolgáló illesztési rendszert. Ezek:

- Hézagolt betonburkolatok (Jointed plain concrete pavement, JPCP)
A leggyakrabban alkalmazott merev pályaszerkezet-típus. A JPCP a repedéseket úgy szabályozza, hogy a burkolatot felosztja különálló táblákra, amelyeket zsugorodási repedések (contraction joints) választanak el egymástól.
- Hézagolt vasalt betonburkolatok (Jointed reinforced concrete pavement, JRCP)

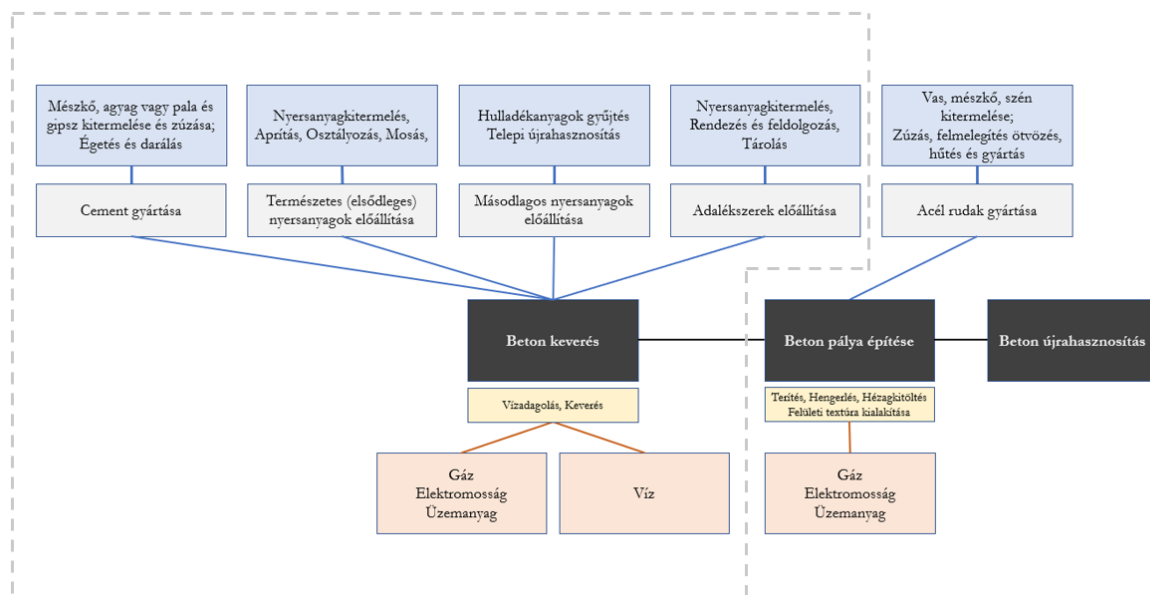
Hasonlóan a JPCP-hez, a JRCP is úgy szabályozza a repedéseket, hogy a burkolatot táblákra osztja fel, amelyeket terjeszkedési hézagok választanak el egymástól. A beágyazott acélbetét megerősítésnek köszönhetően a táblák méretei jelentősen hosszabbak lehetnek.

- Folyamatosan vasalt betonburkolatok (Continuously reinforced concrete pavement, CRCP)
Az ilyen típusú merev pályaszerkezetek esetén sűrű vasalást használnak, nem pedig teherátadó vasakat. A repedések általában 1,1 - 2,4 m távolságban vannak, és szorosan egymás mellett vannak tartva az acél által.

Magyarországon a hézagaiban vasalt betonburkolatok építése a legelterjedtebb.

1.1.4. BETON NYERSANYAGKITERMELÉSE ÉS GYÁRTÁSI FOLYAMATA

A cement – így a beton – gyártása rendkívül nagy energia-igényű folyamat. A következő 6. ábra bekeretezett része a beton gyártásának folyamatábráját és életének folyamatait mutatja be az [25] [26] [27] irodalmak alapján.



6. ábra: Betonkeverék előállítása és életének folyamata.

Betonacél gyártása

Európában a hézagolt betonburkolatok használata a domináns. Annak megerősítésére – vasalására - (kétdimenziós) csak akkor van szükség, ha a lemez hossza meghaladja a lemez szélességének (h) 25-szeresét, ha az az utolsó tábla, vagy ha a táblák süppedése/kivetődése várható. Ehhez acélbetéteket, mozgást biztosító hüvelyeket, horgonyokat és korrózióvédő bevonatokat használnak, így biztosítva a hajlítási, nyírási és teherviselési ellenállást. Az acélbetéteket a beton burkolatának keresztirányú hézagiba helyezik el. A hézagvasak általában 25–38 mm átmérőjűek, 450–500 mm hosszúak és műanyaggal vannak bevonva. Elhelyezésük a pályaszerkezet vastagságának felében történik. Legalább az egyik végének simának és kenhetőnek kell lennie a szabad táguláshoz. Kötőrudakat (tie bars) vagy horgonyokat a pálya két szakaszának összekapcsolására, például hosszhézagok esetén használják. Ezek deformált rudak, általában kisebb átmérőjűek, mint az acélbetétek (12-20 mm), és a burkolat vastagságának 2/3-ában helyezkednek [28].

A vasat ércből állítják elő, amelyet bányásznak. Az érc mellett kocszra, salakképző anyagokra és egyéb segédanyagokra is szükség van a nyersvas előállításához. Az acélgyártás első lépése a nyers vas előállítása, amelyet vasérc nagyolvasztóban való olvasztásával kohászati eljárások segítségével készítenek. Az acél nyersvasból, vas-szén-ötvetet előállításával gyártható, amelyek széntartalma kisebb, mint 2,06%, és ezzel egyidejűleg más kísérő elemek, mint oxidok és ötvözetek mennyisége a tulajdonságok javítása érdekében csökkentve vannak jelen.

Cement gyártása

A portlandcementet mészkő, márvány, homok, agyag vagy agyagpala gondosan elkészített keverékének összetörésével és aprításával állítják elő, majd a keveréket magas hőmérsékleten (1400 °C) égetik, hogy klinker képződjön. A klinkert ezután pihentetik és kis mennyiségű gipszet adnak hozzá, amelyet főként a cement kötési idejének szabályozására használnak, így a folyamat elengedhetetlen alkotóeleme. Lehűlés után az elegyet N°200-as szitára őrlik és az anyagot általában 0,028 m³-es (42,5 kg) zsákokban szállítják [28].

A cementgyártás folyamatát fel lehet osztani nedves és száraz folyamatra. A nedves eljárásnál az üzemi építési költségek meglehetősen alacsonyak és a kiváló minőségű termékeket egyszerűen gyártják. A száraz eljárásnál kevesebb az energiafogyasztás és a működési költségek alacsonyabbak [25], [29]. A Zapata et al. tanulmánya alapján [25] a portlandcement-beton (PCC) előállításának energiafelhasználása – azaz a cement, adalékanyag, a víz és adalékanyagok szállítása, keverése – lényegesen kevesebb, mint maga a cement előállításának energiaigénye.

Természetes adalékanyagok

Az aszfaltburkolatokhoz hasonlóan a természetes durva adalékanyagok szemcsés anyagok, mint például homok, zúzott kavics és zúzott kő, amelyek a víz és a portlandcement mellett a beton alapvető alkotóelemei. Ezek az anyagok nem reagálnak a cementtel. A jó betonkeverékhez az adalékanyagoknak tiszta, kemény, erős részecskének kell lenniük, amelyek mentesek az abszorbeált vegyi anyagoktól vagy az agyag és más finom anyagok bevonatától, amik a beton károsodását okozhatják. A finom adalékanyagok általában természetes homokból vagy zúzott kőből állnak [30]. A finom adalékanyagoknak meg kell felelnie a szabványban meghatározott besorolásnak, a szilárdságnak (fagyás és kiolvadás miatti törésállóság) és a tisztaságnak. Csakúgy, mint az aszfalt esetében, az adalékanyagok gyártása során a legnagyobb energiaigény az alapanyag bányászatához, aprításához, szitálásához, szűréséhez és mosásához köthető. Ezekhez főleg dízelolajat és villamos energiát használnak [15].

Másodlagos adalékanyagok

A másodlagos aggregátumok használata fontos szerepet játszik az erőforrások megőrzésében. A másodlagos adalékanyagok általában cementes vagy tufa melléktermékek, amelyek más ipari folyamatokból származnak, mint például kohósalak, acélsalak vagy pernye.

Adalékszer

Az additívok vagy az adalékok olyan (vegyi) anyagok, amelyeket a cement alapú keverékhez adnak, hogy megváltoztassák a cement teljesítményét. A kívánt hatástól függően különböző típusú adalékok használhatók, amelyek különféle alapanyagokat igényelnek (1. táblázat).

| Adalékszerek típusai | Nyersanyag |
|--|--|
| Concrete plasticizers - Képlékenyítők | Lignoszulfonátok és egyes esetekben melamin-szulfonátok, naftalin-szulfonátok és/vagy polikarboxilátok |
| Superplasticizers - Szuper képlékenyítők | Melamin-szulfonátok és naftalin-szulfonátok és/vagy polikarboxilátok, egyes esetekben lignoszulfonátok |
| Air entraining agents - Légbuborékképzők | Természetes gyantákból, valamint szintetikus, ionos és nem ionos felületaktív anyagokból készült szappanok |
| Retarders – Kötéskésleltetők | Szacharóz, glükonátok, foszfátok, lignoszulfonátok, cinkátok |
| Accelerators - Kötésgyorsítók | Szilikátok, alumínátok, karbonátok, formátumok (hangyasav sói), alumínium-szulfát, kloridok |
| Concrete release agent – Tapadásgátló szerek | Vizes emulzió, oldószer-mentes tapadásgátló szerek ásványolaj alapon |
| Concrete curing agent – Öregedésgátlók | Vizes paraffin diszperzió |

1. táblázat: Betonkeverék adalékszereinek nyersanyagai [31].

Víz

A betonkeveréshez használt víz szervesanyag, olaj, sav és lúg tartalma nem lehet nagyobb, mint az ivóvízben megengedett mennyiség [28]. A betonipar az édesvíz legnagyobb fogyasztója. A globális felmelegedés miatt a vízhiány sok országban problémát jelent. Mehta [32] tanulmánya alapján az éves globális keverővizet felére lehet csökkenteni jobb aggregátum osztályozással, valamint az ásványi adalékanyagok és a szuper-képlékenyítőszer használatainak kiterjesztésével.

Betonkeverék gyártása

A betonburkolatok gyártása különböző típusú keverőtelepeken történhet. Megkülönböztethetünk kis-, közepes- és nagyteljesítményű; szakaszos és folyamatos üzemű; mobil, áttelepíthető és telepített üzemeket. Elrendezésük alapján szintén megkülönböztetünk vízszintes, függőleges vagy vegyes felépítésű üzemeket. Mindegyik esetben – természetesen – a betonkeverő üzemben az aggregátumokat (kőanyag, homok), a cement kötőanyagot, a kémiai adalékokat és a vizet megfelelő mennyiségben a keverőbe adagolják és összekeverik a hidraulikus cementbeton előállításához. A betonkeverés egyik előnye az aszfaltgyártással szemben, hogy nincs szükség az adalékanyagok szárítására. Ezért a keverési folyamat kevesebb energiát igényel, mint az aszfaltkeverésnél. Azonban a beton víztartalma és a szilárdság kapcsolata miatt fontos a megfelelő vízadagolás, ebből kifolyólag folyamatosan vizsgálni kell az adalékanyagok víztartalmát és az alapján meghatározni a hozzáadott víz mennyiségét.

2. UTAK ÉPÍTÉSÉNEK ENERGIAIGÉNYE

A fenntarthatóság iránti fokozott figyelem eredményeként a „zöld építkezés”, a „fenntartható fejlesztések”, „energiahatékonyság” és a „környezeti hatásvizsgálat” gyakorlata széles körben elfogadottá vált [33]. Mivel a fenntarthatóság egyre nagyobb jelentőséggel bír az építőiparban – így az útépítésben is – számos kutatás és fejlesztés középpontjában az energia, a nyersanyag-fogyasztás és az erőforrások megőrzése állt. Ezek a tanulmányok elősegíthetik a természetes és ember által létrehozott erőforrások optimális felhasználását az útburkolat élettartama alatt, és segíthetnek csökkenteni az utak megépítésével vagy rehabilitációjával járó környezeti károkat. Az aszfalt és a beton burkolatok összehasonlítására az útépítés területén évtizedek óta figyelmet fordít a szakma. A témáról számos tanulmány érhető el, mind a kutatók, mind az ipar részéről. Mindazonáltal ezek a tanulmányok a szerző/társaság preferenciájától függően enyhe különbségeket is mutathatnak. Az előbbi okokból kifolyólag tehát érdemes ezeket az eredményeket fenntartásokkal kezelni és ennek tudatában felhasználni.

Energiaigény értékek irodalomkutatás alapján

Bár számos kutatási anyag, cikk, könyv és prezentáció létezik a pályaszerkezetek energiafogyasztásáról és az energiaszámításról, a meghatározott értékek jelentős különbségeket mutatnak. A fejezet célja a kapcsolódó irodalmak összegyűjtése, elemzése és az ott meghatározott energiaigények – a pályaszerkezetek építésének különböző szakaszai alatti – összehasonlítása. Ehhez a [8] [9] [10] [11] [15] [18] [25] [26] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] szakmai anyagok lettek áttekintve.

A fent említett irodalmak némelyike – például Santero et al. [44], Santoro and Kripka [48], Zapata and Gambatese [25], Chehovits and Galehouse [33], Bueche and Dumont [36] or Dorchie [37] – szintén összegyűjtött releváns életciklus-elemzési vagy energiaszámítási tanulmányokat. Ezek a tanulmányok általános áttekintést adnak a témához kapcsolódó legfontosabb publikációkról és azok témájáról, vagy a különböző anyagok és folyamatok rendelkezésre álló energiafogyasztásait prezentálják az aszfalt-és/vagy betonutak építéséhez. A pályaszerkezetek energiaigényének kiszámításával kapcsolatban rendelkezésre álló tanulmányok elemzése után megállapítható, hogy a publikációk többsége (részben vagy egészben) ugyanazon adatforrásokat használják számításaikhoz. Ezek a következők:

1. Stripple (2001), Life Cycle Assessment of Road; A Pilot Study for Inventory Analysis [15]

2. Stammer and Stodolsky (1995), Assessment of the energy impacts of improving highway-infrastructure materials [49]
3. Häikkinen and Mäkelä (1996), Environmental adaptation of concrete: Environmental impact of concrete and asphalt pavements [46]
4. Chappat and Bilal (2003). The Environmental Road of the Future: Life cycle Analysis, Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions, Colas group [50]
5. Eurobitume, a Bitumenipar Európai Szövetsége
6. IVL Svéd Környezetkutató Intézet
7. Építőipari vállalatok nemzeti vagy regionális felmérései

A fent említett irodalmak, azok adatai alapján a cikk összegyűjtötte a releváns energiaértékeket a nyersanyag-kitermeléshez, a cement és bitumen előállításához, az aszfaltkeveréshez, a betonkeveréshez és a különféle alapanyagok előállításához. Mivel ezen energiaértékekről összegyűjtött információk bizonyos esetekben jelentősen eltérők, a különböző folyamatokhoz és anyagok előállításához felhasznált energiaértékek meghatározása nehézségeket okozhat. Az egyik módszer a talált energiaadatok átlagértékének meghatározása lehet. Másik módszer azon érték meghatározása, amelynek körülményei a legjobban egyezik meg a vizsgált nemzet vagy régió tulajdonságaival. Sok esetben azonban az összegyűjtött értékek pontos adatai, gyártási körülményei nem jól részletezettek. Ezért ebben a cikkben az átlagértékek kerültek figyelembevételre. A következő 2-4. táblázat bemutatja a különböző anyagok és folyamatok összegyűjtött energiaigényeit.

| Beton pályaszerkezet nyersanyagkitermelése | | | | | | |
|---|-----------------|--|------------------------|----------------|-------------------|---------------|
| Az anyagok gyártásának kilogrammonkénti energiaigénye | | | | | | |
| Adatforrás | Anyag | | Elektromosság MJ/kg | Dízel MJ/kg | Fűtőolaj kg/kg | Szén kg/kg |
| Anastasiou and Papayianni (2015) | Klinker | | 0,263 | | 0,0258 | 0,0362 |
| | Cement | | 0,36 | | | |
| | Mészkeő kőanyag | | 0,00828 | 0,0005 | | |

2. táblázat: Különbööz folyamatok energiaigényei – Beton nyersanyag.

| Cement gyártása [J/t] | | | | | | |
|---|--|--|--|------------------|--|--|
| Portlandcement Association (1990) | | | 6,33 | *10 ⁹ | | tartalmaz: dízel nyersanyagok bányászatához és szállításához (1,75 kg nyersanyag 1 kg cementhez) |
| | | | | | | |
| Stammer and Stodolsky (1995) | | | 6,7 | *10 ⁹ | | |
| Häikkinen and Mäkelä (1996) | | | 5,35 | *10 ⁹ | | tartalmaz: nyersanyagok kitermelésének és szállításának energiaigénye, nyersanyagok gyártása, klinker égetése és cement őrlése |
| | | | | | | |
| Berthiaume and Bouchard (1999) | | | 5,35*10 ⁹ -10,2*10 ⁹ | | | száraz/nedves folyamat |
| Stripple (2001) | | | 4,77 | *10 ⁹ | | |
| Twinshare (2003) | | | 6,36 | *10 ⁹ | | |
| Athena&IVL Chappat&Bilal (2003) | | | 4,976 | *10 ⁹ | | |
| German Cement Works Association (2007), Gschösser et al. (2012) | | | Villamosenergia | | | |
| | | | 99,7 | kWh/t | | |

| Bitumen gyártása [J/t] | | | | |
|------------------------------------|-----------|------------------|---|--|
| NCSA (1977) | 0,42 | *10 ⁹ | | |
| Stammer and Stodolsky (1995) | 0,63 | *10 ⁹ | | |
| Häikkinen and Mäkelä (1996) | 6 | *10 ⁹ | tartalmaz: nyersolaj előállítás, szállítása és finomítása | |
| Stripple (2001) | 2,93 | *10 ⁹ | tartalmaz: a kőolaj venezuelai kitermelése, szállítása a finomítóhoz, finomítása, 40% bitumen - 60% könnyebb termékek kiosztása | |
| Eurobitume, Chappat&Bilal (2003) | 4,9 | *10 ⁹ | | |
| Eurobitumel (2011) | 5,1 | *10 ⁹ | a közvetlen (straight-run) bitumen előállításához szükséges energia | |
| Nyersanyagkitermelés (kőváz) [J/t] | | | | |
| Stammer and Stodolsky (1995) | 74 | *10 ⁶ | | |
| Häikkinen and Mäkelä (1996) | 24 | *10 ⁶ | kavics | |
| Häikkinen and Mäkelä (1996) | 52 | *10 ⁶ | zúzott nyersanyagok | |
| | | | tartalmaz: kőfejtés, törés, aprítás és szállítás | |
| NCSA (1997) | 21,1-63,3 | *10 ⁶ | átlag: 53*10 ⁶ | |
| Berthiaume and Bouchard (1999) | 22,2 | *10 ⁶ | | |
| Stripple (2001) | 38,18 | *10 ⁶ | zúzott nyersanyagok | |
| Athena&IVL | 40 | *10 ⁶ | | |
| Athena&IVL | 30 | *10 ⁶ | | |

3. táblázat: Különböző folyamatok energiaigényei – Cement és bitumen gyártása, nyersanyagkitermelés.

| Aszfalt keverőtelep energiafogyasztása | | | | |
|--|-----------------|--------|------------------|-----|
| Ang et al. (1993) folyamatos üzemi telep | n.a. | 320 | *10 ⁶ | J/t |
| Ang et al. (1993) szakaszos üzemi telep | n.a. | 375 | *10 ⁶ | J/t |
| Groz, Alvarez et al. (1996) | n.a. | 260,43 | *10 ⁶ | J/t |
| Stripple (2000) | Üzemanyag, áram | 276 | *10 ⁶ | J/t |
| Stripple (2001) | Üzemanyag, áram | 321 | *10 ⁶ | J/t |
| Chappat and Bilal (2003) | n.a. | 275 | *10 ⁶ | J/t |
| Abdo, Agnesina et al. (2005) | n.a. | 251,7 | *10 ⁶ | J/t |
| Ventura, Monéron et al. (2009) | Gáz, áram | 189 | *10 ⁶ | J/t |
| Cholava (2009) | Gáz, áram | 285,85 | *10 ⁶ | J/t |
| Gonzalez, Ligier et al. (2009) | Gáz | 227,18 | *10 ⁶ | J/t |
| Gschösser et al. (2012) | n.a. | 305,4 | *10 ⁶ | J/t |
| Beton keverőtelep energiafogyasztása | | | | |

| | | | | |
|--|-------|---------|-------|----------------------------|
| Stammer and Stodolsky (1995) | 13,9 | $*10^5$ | Btu/t | Hézagolt vasalt betontábla |
| Chappat and Bilal (2003) | 14 | $*10^6$ | J/t | betontüskék nélkül |
| Zapata and Gambates (2005) | 6,875 | $*10^6$ | J/t | |
| Anastasiou and Papayianni (2015) | 2,07 | $*10^6$ | J/t | |
| Alapréteg gyártás, Chappat and Bilal (2003) | | | | |
| Hidraulikus kötőanyagú alap | 14 | $*10^6$ | J/t | |
| Bitumenemulziós alapréteg | 14 | $*10^6$ | J/t | |
| Kötőanyag nélküli szemcsés alapréteg | 14 | $*10^6$ | J/t | |

4. táblázat: Különböző folyamatok energiaigényei- Aszfalt és cement keverőtelep, alapréteg anyagainak gyártása.

Az ezen adatokból számolt átlagos energia-értékek:

- Portlandcement gyártás: $6,04*10^9$ [J/t]
- Bitument gyártás: $3,33*10^9$ [J/t]
- Adalékanyagok kitermelése: $41,67*10^6$ [J/t]
- Aszfalt keverőtelep: $280,60*10^6$ [J/t]
- Beton keverőtelep: $7,67*10^6$ [J/t]

Az előbbi értékek alapján kijelenthető, hogy a portlandcement előállításához van szükség a legnagyobb energiaigényre ($6,04*10^9$ [J/t]). Ez az érték lényegesen nagyobb, mint a betonkeverék előállításához szükséges energiamennyiség ($7,67 * 10^6$ [J/t]). A cement előállítása kb. kétszer annyi energiát igényel, mint a bitumen előállítása. Ez megfelel az elvárásoknak, mivel a klinker gyártása rendkívül magas hőmérsékletet (1400 °C) igényel. Ezenkívül a bitumen és a kőolajfinomítók esetében a könnyebb termékek felhasználása által okozott terhelés-elosztást is figyelembe kell venni.

3. ENERGIAGÉNYEK SZÁMÍTÁSA BETON ÉS ASZFALT PÁLYASZERKEZETEK ESETÉN

Ez a fejezet egy mind a beton, mind aszfaltburkolattal megtervezett autópályaszakaszt mutat be, azok energiaigényének összehasonlítása céljából. Az 1 km útszakasz a magyar szabványok alapján lett megtervezve. A keresztmetszet kialakítása a „rendkívül nehéz” forgalmi terhelési osztálynak megfelelően lett meghatározva, ahol tervezési forgalom (TF) F100 meghaladja a 30 000 000-t. Az útkategória és környezeti állapota alapján a tervezett sebesség 110 km/h. A tervezett sebesség meghatározza a tervező elemek szélsőséges értékeit, például a függőleges vagy vízszintes lekerekítés minimális sugarát, a minimális és a maximális esést, valamint a megállási vagy előzési látótávolság minimális hosszát. Az alkalmazott értékek minden esetben a szabályozásnak megfelelő értékeken belül lettek meghatározva.

A számítás során elemzett keresztmetszet 1 forgalmi sávot tartalmaz. Mivel a cikk célja az aszfalt és beton pályaszerkezetek energiaigényének összehasonlítása, az csak az utak különböző kialakításainak eltérő elemeit vizsgálja, így például a földmunkát, vagy az úttartozékokat, mint a jelzéseket, táblákat, lámpákat és a felületi jelöléseket, valamint a biztonsági ütközéskorlátokat nem veszi figyelembe a számítás során.

A számított szakasz dimenziója:

- Forgalmi sáv szélessége – 3,75 m
- Forgalmi sávok száma – 1
- Szakasz hossza: 1000 m

A hajlékony és merev pályaszerkezetek tervezésének a legfőbb különbségei a rétegek anyagigénye, a keverék gyártása és az építés technológiája (gépigény). A pályaszerkezet tervezése a magyar szabályozásnak (Magyar Útügyi Műszaki Előírás) megfelelően történt mind beton, mind aszfalt pályaszerkezet alkalmazása esetén.

A keveréktervezés és számítás menetét a cikk hosszának korlátait miatt a publikáció nem mutatja be. Az eredmények összefoglalását a következő fejezet ismerteti.

Aszfalt- és betonpályaszerkezetek energiaigényének összehasonlítása

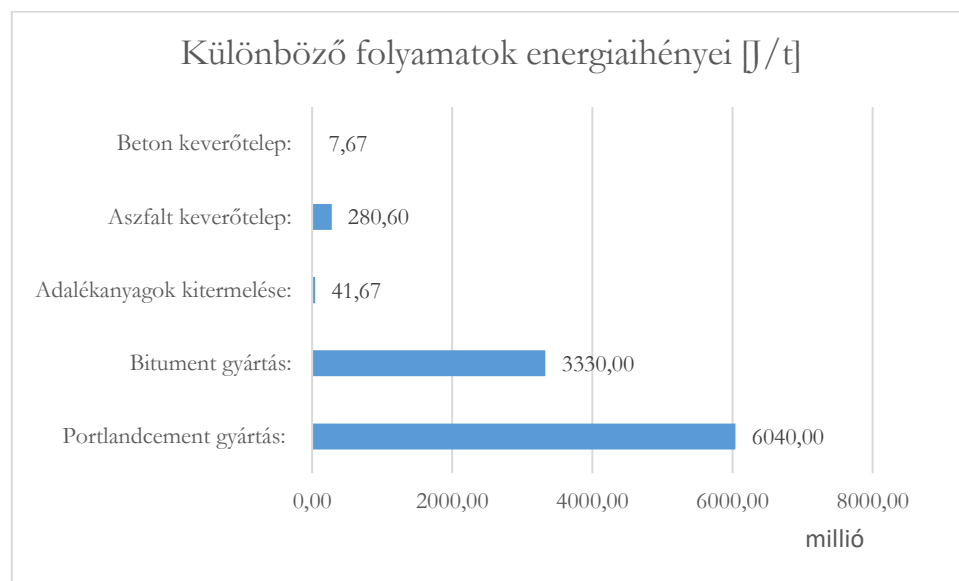
A cikk célja az útpályaszerkezetek építésének energiaigényének vizsgálata, ideértve:

- nyersanyag kitermelés, keverési folyamat (a pályaszerkezeti anyagok gyártása)
- építési tevékenységek
- az anyagok szállítása az építkezésre

Ehhez a különböző folyamatok energiaértékeit az előző fejezetben, különböző szakirodalmak alapján lettek meghatározva. Az alkalmazott átlagértékek:

- Cement gyártás $6,04 \cdot 10^9$ [J/t]
- Bitumen gyártás $3,33 \cdot 10^9$ [J/t]
- Kőanyag kitermelés $41,67 \cdot 10^6$ [J/t]
- Aszfaltkeverék előállítás $280,60 \cdot 10^6$ [J/t]
- Betonkeverék előállítás $7,67 \cdot 10^6$ [J/t]

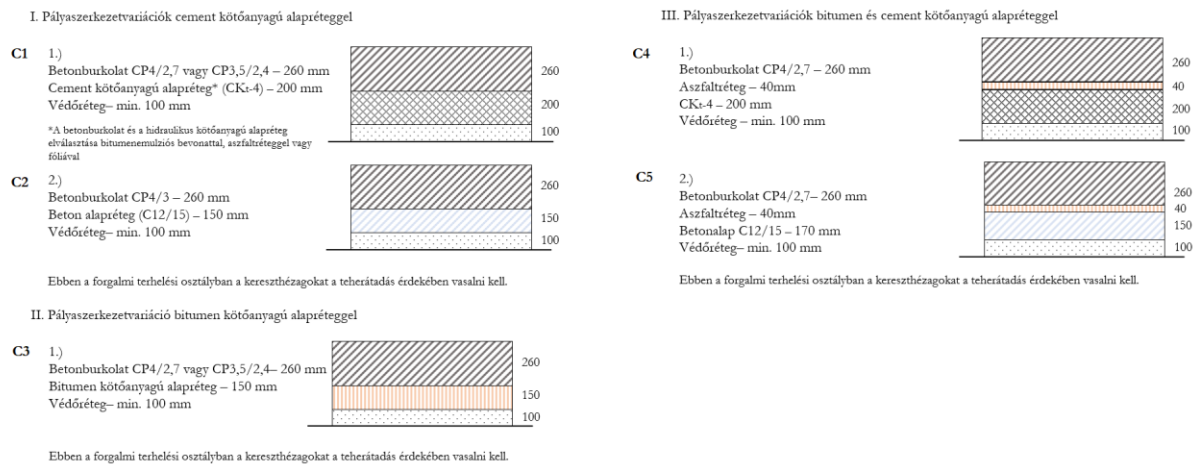
A jobb láthatóság érdekében az eredményeket a 7. ábra szemlélteti.



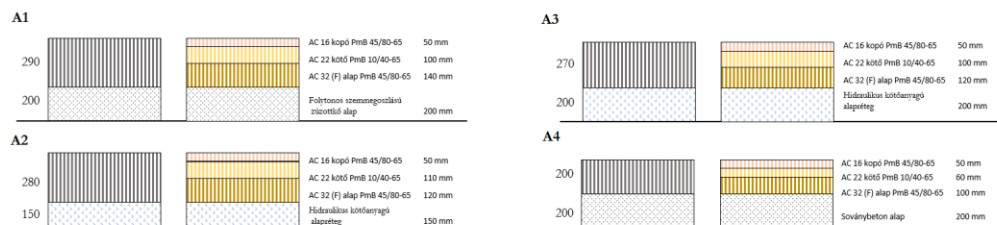
7. ábra: Különböző pályaszerkezetek folyamatainak energiaigényének átlagos értéke irodalomkutatás alapján.

A különféle folyamatok energiaértékeinek meghatározása után kiszámításra került a magyarországi autópályaszakasz energiaigénye. Miután a forgalmi kategória a „rendkívül nehéz” kategóriába lett sorolva, az út szerkezeti kialakítását a vonatkozó előírások szabályai alapján lett megtervezve mind az aszfalt, mind a beton pályaszerkezeti kialakítások esetén. Ebben a kategóriában, a szabvány 5 különböző lehetőséget kínál betonburkolat alkalmazása esetén és 4 lehetőséget aszfaltszerkezetekre. Ezt a 8. ábra mutatja be.

Vizsgált pályaszerkezetvariációk "R" terhelési osztályra - Betonburkolat



Vizsgált pályaszerkezetvariációk "R" terhelési osztályra - Aszfaltburkolat



8. ábra: UME szerinti vizsgált pályaszerkezetvariációk.

Az egyes típusok (C1-C5, A1-A4) alapanyagigényének, azok kitermelésének, gyártásának és a keverési folyamatának, az építkezésre történő szállítási igények, valamint az építőipari gépek dízfogyasztásának energiaigény meghatározása után, az egyes szerkezeti kialakítások összehasonlíthatóvá válnak. A cikk 50 km szállítási távolsággal és 32 tonna kapacitású nehézgépjárművekkel számol, ahol azok egyszer teljes kapacitással egyszer pedig üresen teszik meg a távot. Stripple [15] tanulmánya alapján az ilyen teherautók fogyasztása 0,47 l/km (teli) and 0,29 l/km (üres). A tanulmány szintén kimondja, hogy a járművek energiafogyasztása ilyen feltételekkel (teli és üres járat) 13,3 MJ/km. Betonburkolat acélerősítés mennyiségének meghatározása szintén a szabvány alapján történt. Mivel esetünkben a burkolat vastagsága $h = 260$ mm, az alkalmazható betonlap mérete: $6,5 \text{ m} * 3,75 \text{ m}$, a szükséges acélmennyiség ezáltal $7,8 \text{ kg/m}^2$. Mivel a vizsgált szakasz felülete 3750 m^2 , a számítás 29250 kg acélt ad. A keresztmetszeti és vastagsági adatokból szintén meghatározható, hogy a vizsgált szakasz 154 hézagot tartalmaz, melynek kitöltéséhez a cikk bitumen alapú kitöltőanyaggal számol az *ÚT 2-3.701 (e-UT 05.02.42) Útburkolatok hézagkitöltő anyagai* [51] alapján. A számításhoz használt keverékterv az *e-UT 06.03.21.21:2018 Útpályaszerkezetek aszfaltburkolati rétegeinek követelményei* [52] és az *ÚT 2-3.201 Beton pályaburkolatok építése; Építési előírások, követelmények* [53] alapján lett megtervezve. Az alaprétegek megtervezése az *ÚT 2-3.204 Útépitési beton burkolatok: Követelmények* [54], *ÚT-2-3.208 Útépitési beton burkolatalapok* [55] és az *e-UT 06.03.53:2018 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú betonburkolat alapok* [56] előírásokon alapul.

A számítás eredményeit az 5. táblázat tartalmazza.

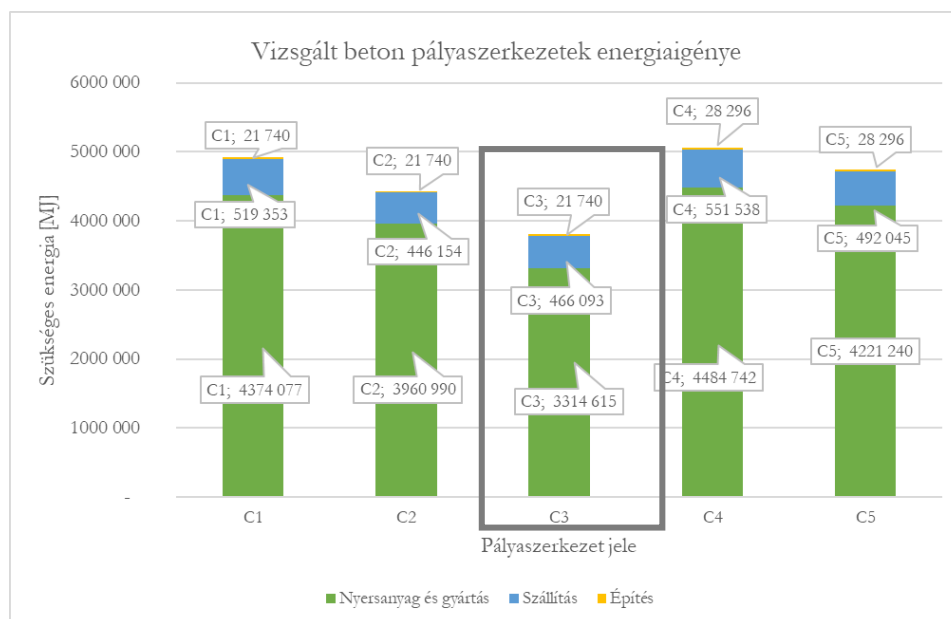
| Pályaszerkezet jele | Nyersanyag és gyártás | Szállítás | Építés | Teljes | Egység |
|---------------------|-----------------------|-----------|--------|-----------|--------|
| C1 | 4 374 077 | 519 353 | 21 740 | 4 915 170 | MJ |
| C2 | 3 960 990 | 446 154 | 21 740 | 4 428 883 | MJ |
| C3 | 3 314 615 | 466 093 | 21 740 | 3 802 448 | MJ |
| C4 | 4 484 742 | 551 538 | 28 296 | 5 064 577 | MJ |
| C5 | 4 221 240 | 492 045 | 28 296 | 4 741 581 | MJ |

| Pályaszerkezet jele | Nyersanyag és gyártás | Szállítás | Építés | Teljes | Egység |
|---------------------|-----------------------|-----------|--------|-----------|--------|
| A1 | 1 198 412 | 205 890 | 26 073 | 1 430 375 | MJ |
| A2 | 2 195 748 | 114 449 | 25 501 | 2 335 698 | MJ |
| A3 | 2 542 722 | 198 367 | 25 501 | 2 766 590 | MJ |
| A4 | 2 282 847 | 157 595 | 25 501 | 2 465 943 | MJ |

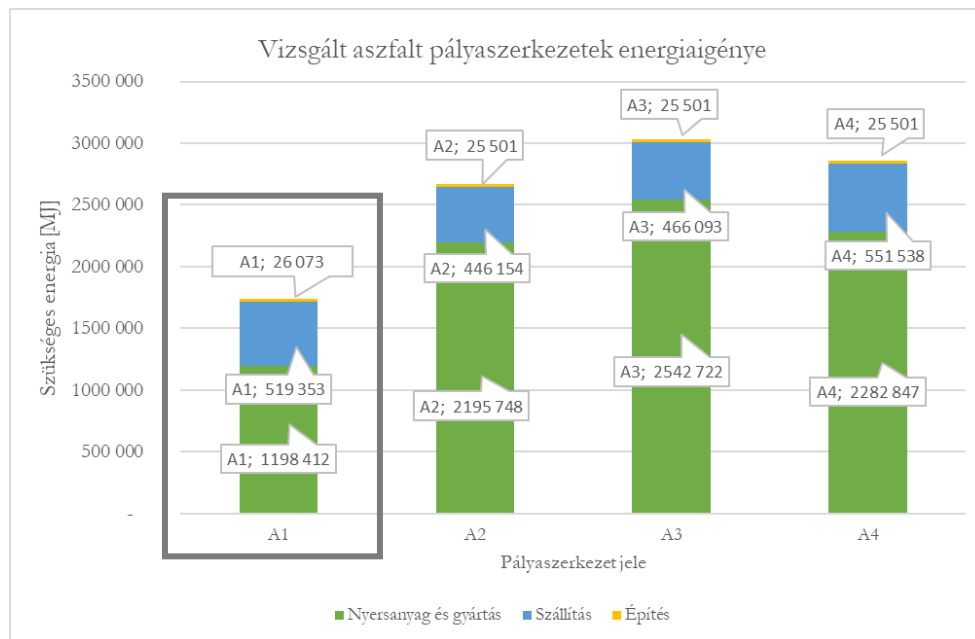
5. táblázat: A C1-C5 és A1-A4 jelű pályaszerkezetvariációk energiaigényei.

Az eredményeket a 9. és 10. ábra szemlélteti.

Az eredményekből látható, hogy a betonból a legalacsonyabb energiaérték a C3 szerkezethez tartozik. Ennek oka az, hogy bár az összes opció 260 mm vastag betonfelületet igényel, ez a kialakítás alapja aszfalt, ezért kevesebb cementet igényel, mint a többi, cementel kezelt alap vagy beton alap. Aszfalt esetében az A1 érték a legalacsonyabb. Ez a szerkezet FZKA alapanyagot használ, amely kötőanyagként nem tartalmaz bitument vagy cementet, ezért az A1 energiaigénye lényegesen alacsonyabb, mint a többi lehetőségnél.



9. ábra: A vizsgált beton pályaszerkezetek számított energiaigényei.



10. ábra: Vizsgált aszfalt pályaszerkezetek számított energiaigényei.

A beton és az aszfalt szerkezetek eredményeit összehasonlítva elmondható, hogy a beton szerkezetek megközelítőleg 60% -kal több energiát igényelnek, mint az aszfalt pályaszerkezetek. Ennek oka kétségtelenül a használt cement energiaigénye. Hangsúlyozni kell azonban, hogy ez az eredmény az esettanulmány energiaigényét képviseli, más pályaszerkezet-kombinációk esetében az eredmények kissé eltérhetnek. Ezenkívül a más forrásokból származó egyéb energiaértékek felhasználása szintén megváltoztathatja a számítás eredményét.

4. ÖSSZEZÉS

A cikk célja az útpályaszerkezetek energiaigényének vizsgálata, annak eredményének bemutatása. Ehhez a cikk összegyűjtött irodalmak alapján meghatározta a különböző építési folyamatok energiaigényeit, valamint egy 1 km-es autópálya szakasz segítségével, ami a magyar előírásoknak megfelelően (UME) mind aszfalt és betonburkolattal lett megtervezve, bemutatta azok energiaigényeinek összehasonlítását. Eredményként elmondható, hogy a betonburkolatok átlagosan 60%-kal több energiaigénnyel bírnak, mely a cement előállításából adódik. Hangsúlyozni kell azonban, hogy ez az eredmény az esettanulmány energiaigényét képviseli, más pályaszerkezet-kombinációk esetében az eredmények kissé eltérhetnek.

Szintén fontos megemlíteni, hogy a cikk hatálya a nyersanyag-előállítástól az útszakasz építéséig terjed, a fenntartási és üzemeltetési munkák energiaigényét nem tartalmazza, valamint nem számol a pályaszerkezetek élet-végi folyamataival. Noha az előző értékeket felhasználva érzékelhető lehet, hogy még ezekkel a fenntartási igényekkel történő számítás esetén is, pl. az aszfaltburkolat felületének felújítása, repedések kiöntése, egyéb felületkezelések stb., az aszfaltszerkezetek alacsonyabb eredményeket fognak hozni.

A tanulmány jövőbeni fejlesztése céljából előnyös lenne a számítások során alkalmazott feltételezések hatásainak elemzésére és az energiaértékek meghatározására érzékenységi vizsgálatot végezni. Mivel a legnagyobb energiaigény a portlandcement (CEM I.) gyártásában rejlik, szintén érdekes lehet a különféle - környezettudatosabb típusú cementek - azaz a CEM II.-CEM IV - vizsgálata, valamint mérsékelt meleg aszfaltkeverékek alkalmazásának elemzése is. Emellett rendkívül fontos jövőbeni fejlesztés szempontjából az irodalomból vett nemzetközi energiaértékek helyett hazai adatok alkalmazása a számításához.

5. HIVATKOZÁSOK

- [1 Transportation Research Board, 2005: Integrating Sustainability into the Transportation Planning Process, Federal Highway Administration, Washington D.C.
- [2 A. Erdélyi, O. Fenyvesi, V. Gábel, A. Gál, 2019: Betonút csak a Lajtán túl? (1. rész), *Útügyi Lapok*, 12. szám, 7. évfolyam, pp. 53-57. <https://doi.org/10.36246/UL.2019.1.06>.
- [3 theconstructor.org, “theconstructor.org,” 2019. [Online]. Available: <https://theconstructor.org/transportation/types-of-pavement-flexible-and-rigid-pavement/9570/>. [Accessed 05 07 2019].
- [4 A.T. Papagiannakis & E.A. Masad, 2008: Pavement Design and Materials, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [5 S. Adlinge & A.K.Gupta, 2013: Pavement Deterioration and its Causes, *IOSR Journal of Mechanical & Civil Engineering ISSN: 2278-1684*, pp. 09-15.
- [6 European Asphalt Pavement Association (EAPA), “eapa.org,” EAPA, [Online]. Available: <https://eapa.org/asphalt/>. [Accessed 07. 2019].
- [7 Asphalt Institute, 2014: Asphalt Mix Design Methods, 7th Edition, USA.
- [8 M. I. Giani, G. Dotelli, N. Brandini and L. Zampori, 2015: Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling, *Resources, Conservation and Recycling*, p. 15. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>
- [9 A. Mukherjee, 2016: Life Cycle Assessment of Asphalt Mixtures in Support of an Environmental Product Declaration, National Asphalt Pavement Association, Lanham.
- [10 Y. Huang , R. Bird, M. Bell & B. Allen, 2010: Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements, In: The 11th International Conference on Asphalt Pavements. August 1-6, 2010, Nagoya, Aichi, Japan, Nagoya: ISAP.
- [11 N. Santero, 2010: Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research, Lawrence Berkeley National Laboratory..
- [12 Federal Highway Administration, Highway Materials Engineering Course, Module F Asphalt Materials and Paving Mixtures Participant.
- [13 Asphalt Institute Inc. & European Bitumen Association–Eurobitume, 2015: The bitumen industry, ISBN 978-1-934154-73-1, USA: Third Edition.
- [14 J. Hutschenreuther and T. Wörner, 2017: Asphalt im Straßenbau, Germany: Kirschbaum, ISBN-10 : 378121950X.
- [15 H. Stripple, 2001: Life Cycle Assessment of Road; A Pilot Study for Inventory Analysis, Swedish National Road Administration, Gothenburg, Sweden.
- [16 UEPG (European Aggregates Association), 2019: Annual Review 2017-2018, UEPG, Brussels, Belgium.
- [17 Y. Yildirim, M. Solaimanian, & T. W. Kennedy, 2000: Mixing and compaction temperatures for hot mix asphalt concrete; Research Report Number 1250-5, Center for Transportation Research, Texas.
- [18 L. P. Thives & E. Ghisi, 2017: Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 473-487. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>
- [19 Portland Cement Association, “www.cement.org,” [Online]. Available: <https://www.cement.org/cement-concrete-applications/products/concrete-pavement>. [Accessed 12 07 2019].

- [2] The Constructor, “theconstructor.org,” theconstructor.org, [Online]. Available: 0] <https://theconstructor.org/concrete/types-concrete-pavements-construction-applications/17182/>. [Accessed 12 07 2019].
- [2] Wisconsin Concrete Pavement Association, „<http://www.wisconcrete.org>,” [Online]. 1] Available: <http://www.wisconcrete.org/why-concrete-2/>. [Hozzáférés dátuma: 12 07 2019].
- [2] J. Rodriguez, „www.thebalancesmb.com,” [Online]. Available: 2] <https://www.thebalancesmb.com/common-used-concrete-admixtures-845036>. [Hozzáférés dátuma: 12 07 2019].
- [2] American Concrete Pavement Association, “<http://www.acpa.org/>,” [Online]. Available: 3] http://wikipave.org/index.php?title=Welcome_to_ACPA%27s_Concrete_Pavement_Wiki. [Accessed 12 07 2019].
- [2] Pavement Interactive, „www.pavementinteractive.org,” [Online]. Available: 4] <https://www.pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-types-and-history/pavement-types/pcc-pavement/>. [Hozzáférés dátuma: 12 07 2019].
- [2] P. Zapata and J. A. Gambatese, 2005: Energy consumption of asphalt and reinforced concrete 5] pavement materials and construction, *Journal of infrastructure systems*, vol. 11, pp. 9-20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(9\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(9))
- [2] F. Gschösser, H. Wallbaum & M. E. Boesch, 2012: Life-cycle assessment of the production 6] of Swiss road materials, *Journal of materials in civil engineering*, pp. 168-176, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000375](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000375)
- [2] C. Hendickson, A. Horvath, S. Joshi & L. Lave, 1998: Economic Input-Output Modales for 7] Environmental Life-Cycle Assessment, *Environmental science & thechnology*.
- [2] N. J. Garber & L. A. Hoel, 2009: Traffic and highway engineering; fourth edition, USA. 8]
- [2] R. Ahtisham, 2018: Program Development of Cement Industry at Jamshoro, Sindh. 9] [Performance].
- [3] Portland Cement Association (PCA), “www.cement.org,” Portland Cement Association 0] (PCA). [Online]. [Accessed 22 07 2019].
- [3] Deutsche Bauchemie és Fonds der Chemichen Industrie, „www.vci.de,” 2015. [Online]. 1] [Hozzáférés dátuma: 23 07 2019].
- [3] K. Mehta, 2001: Reducing the environmental impact of concrete, *Concrete international*, pp. 2] 61-66.
- [3] J. Chehovits & L. Galehouse, 2010: Energy Usage and Green House Gas Emission of 3] Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements, *Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation*, pp. 27-42, 15 4.
- [3] E. Anastasiou, A. Liapis & I. Papayianni, 2015: Comparative life cycle assessment of concrete 4] road pavements using industrial by-products as alternative materials, *Resources, Conservation and Recycle*, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.009>
- [3] J. A. Gambatese & S. Rajendran, 2005: Sustainable roadway construction: Energy 5] consumption and material waste generation of roadways, in *Construction Research Congress 2005*, [https://doi.org/10.1061/40754\(183\)21](https://doi.org/10.1061/40754(183)21)
- [3] N. Bueche & A. G. Dumont, 2012: Energy in warm mix asphalt, in *5th Eurasphalt & 6] Eurobitume Congress, 13-15th June 2012, Istanbul*.
- [3] P. T. Dorchie, 2008: The environmental road of the future: Analysis of energy consumption 7] and greenhouse gas emissions, In: *Annual Conference of the Transportation Association of Canada Toronto, Ontario*.

- [3 8] T. D. Miller & H. U. Bahua, 2009: Sustainable Asphalt Pavements: Technologies, Knowledge Gaps and Opportunities, In: *Asphalt Research Consortium*.
- [3 9] J. Stubbles, 2000: Energy use in the U.S. steel industry: An historical perspective and future opportunities, U.S. Department of Energy Office of Industrial Technologies, Washington, DC. <https://doi.org/10.2172/1216250>
- [4 0] T. H. Kim, S. H. Tae, S. J. Suk, G. Ford & K. H. Yang, 2016: An Optimization System for Concrete Life Cycle Cost and Related CO2 Emissions,” *Sustainability*, pp. 1-19. <https://doi.org/10.3390/su8040361>
- [4 1] K. Kermeli, E. Worrell & E. Masanet, 2011: Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Concrete Industry: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers, U.S. Environmental Protection Agency.
- [4 2] Y. Huang, R. Bird & M. Bell & B. Allen, 2010: Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements, Life Cycle Assessment of Asphalt Pavements. In The 11th International Conference on Asphalt Pavements. August 1-6, 2010, Nagoya, Aichi, Japan. Nagoya: ISAP.
- [4 3] M. I. Giani, G. Dotelli, N. Brandini & L. Zampori, 2015: Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling, *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 1-15, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.006>
- [4 4] N. Santero, E. Masanet & A. Horvath, 2010: Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2010, 81 pages.
- [4 5] Athena Institute, 2006: A life cycle perspective on concrete and asphalt roadways: Embodied primary energy and global warming potential, Cement association of Canada.
- [4 6] T. Häkkinen & K. Mäkelä, 1996: Environmental adaptation of concrete: Environmental impact of concrete and asphalt pavements, VTT, Technical research centre of Finland.
- [4 7] Eurobitume, “Life cycle inventory: Bitumen,” European Bitumen Association, Belgium, 2011.
- [4 8] J. F. Santoro & M. Kripka, 2017: Studies on Environmental Impact Assessment of Reinforced Concrete in Different Life Cycle Phases, *International Journal of Structural Glass and Advanced Material Research*, pp. 32-40, <https://doi.org/10.3844/sgamrsp.2017.32.40>
- [4 9] R. J. Stammer & F. Stodolsky, 1995: Assessment of the Energy Impacts of Improving Highway-Infrastructure Materials, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, Illinois.
- [5 0] M. Chappat & J. Bilal, 2003: The Environmental Road of the Future: Life cycle Analysis, Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions, Colas group.
- [5 1] Útügyi Műszaki Előírás, *ÚT 2-3.701 (e-UT 05.02.42) Útburkolatok hézagkitöltő anyagai (Joint Filling Materials of Road Pavements)*, Hungary, 2008.
- [5 2] Útügyi Műszaki Előírás, *e-UT 06.03.21.21:2018 Útpályaszerkezetek aszfaltburkolati rétegeinek követelményei =Requirements of Bituminous Mixtures for Road Construction*), 2018.
- [5 3] Útügyi Műszaki Előírás, *ÚT 2-3.201 Beton pályaburkolatok építése; Építési előírások, követelmények (Construction of Concrete Pavements Specifications, Requirements)*, Hungary, 2006.
- [5 4] Útügyi Műszaki Előírás, *ÚT 2-3.204 Útépitési beton burkolatok: Követelmények (Concrete Subbase for Road Building. Requirements)*, Hungary, 1993.
- [5 5] Útügyi Műszaki Előírás, *ÚT-2-3.208 Útépitési beton burkolatalapok (Concrete Base Course of Pavement Design Requirements)*, Hungary, 2006.

- [5 Útügyi Műszaki ELőírás, *e-UT 06.03.53:2018 Kötőanyag nélküli és hidraulikus kötőanyagú*
6] *betonburkolat alapok (Requirements of non-bonded and hydraulic bonded concrete base layers)*,
Hungary, 2018.
- [5 A. C. P. Association, „<http://overlays.acpa.org>,” 2013. [Online]. Available:
7] [http://overlays.acpa.org/Concrete_Pavement/Technical/Fundamentals/Differences_Between_C](http://overlays.acpa.org/Concrete_Pavement/Technical/Fundamentals/Differences_Between_Concrete_and_Asphalt.asp)
concrete_and_Asphalt.asp. [Hozzáférés dátuma: 10 07 2019].
- [5 P. Chandra, „www.nbmcw.com,” 2017. [Online]. Available: [https://www.nbmcw.com/tech-](https://www.nbmcw.com/tech-articles/roads-and-pavements/36977-flexible-pavement-versus-rigid-pavement.html)
8] [articles/roads-and-pavements/36977-flexible-pavement-versus-rigid-pavement.html](https://www.nbmcw.com/tech-articles/roads-and-pavements/36977-flexible-pavement-versus-rigid-pavement.html).
[Hozzáférés dátuma: 07 2019].
- [5 N. C. f. A. Technology, 2018: Physical and structural characterization of sustainable asphalt
9] pavement sections at the NCAT test track, 277 Technology Parkway, Auburn.
- [6 „Thomas Tallis Science,” [Online]. Available: [https://sciencetallis.weebly.com/7-organic-](https://sciencetallis.weebly.com/7-organic-chemistry.html)
0] [chemistry.html](https://sciencetallis.weebly.com/7-organic-chemistry.html). [Hozzáférés dátuma: 10. 07. 2019.].
- [6 D. L. Stacks, “Pavement Manual,” TxDOT Manual System, 2019.
1]



A gumiabroncs és az útpályaszerkezet érintkezési kapcsolatának elemzése végeelem módszerrel

Király Tamás¹, Primusz Péter²

¹ Stadler Rail AG

² Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet; Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Út és Vasútépítési Tanszék

E-mail: tamas.kiraly1990@gmail.com; primusz.peter@uni-sopron.hu

DOI: [10.36246/UL.2020.2.04](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.04)

KIVONAT

A nehéz szállítójárművek a kerekek terhelését a gumiabroncsok közvetlen q érintkezési feszültségének képében adják át az útpályaszerkezetnek, amit egyszerűen csak a gumiabroncsok belső p légnyomásával megegyezőnek tételezünk fel. Szigorúan véve a $q \approx p$ egyenlőség csak tökéletesen hajlékony, vagyis saját merevséggel nem rendelkező keréktömlő esetén igaz. Abban az esetben, ha a gumiabroncsnak a saját merevségét is figyelembe vesszük, akkor a kontaktfeszültség akár 10-30 százalékkal lehet nagyobb vagy akár kisebb, mint az abroncs belső légnyomása. Ez a nagymértékű bizonytalanság, ami a kontaktfeszültség reális értékének felvételével kapcsolatosan jelentkezik, szinte ellehetetleníti a pontos pályaszerkezet méretezést, és így a gazdaságos útpályaszerkezet kialakítást. Kutatásunkban ezért a modern gumiabroncsok és az útburkolat interakcióját vizsgáltuk a végeelem módszerrel, kapcsolatot keresve az érintkezési nyomása (q), az érintkezési felület (A_c), a gumiabroncs belső légnyomás (p) és a kerékterhelés (F) között. Elemzéseink kimutatták, hogy az ikerabroncs terhelést jól lehet helyettesíteni egy körlapon egyenletesen megoszló erőrendszerrel, ha a q átlagos kontaktfeszültséget reálisan választjuk meg. A kidolgozott gumiabroncs és útpályaszerkezet végeelem modell elég összetett volt az érintkezési kapcsolat részletes elemzéséhez, de megfelelő anyagparaméterekkel tovább fejleszthető, amivel a nagyon költséges helyszíni vizsgálatok jelentős köre kiváltható vagy kiegészíthető lesz a jövőben.

Kulcsszavak: végeelem analízis, gumiabroncs, kontaktfeszültség, kontaktfelület, ABAQUS

ABSTRACT

Heavy transport vehicles transfer the load of the wheels in the form of a direct contact stress of the tires to the road structure, which is simply assumed to be equal to the p internal air pressure of the tires. Strictly speaking, the equality of $q \approx p$ is only valid for a perfectly flexible wheel hose without any stiffness. In case of the tire's stiffness is considered, the contact stress can be up to 10 to 30 percent higher or even lower than the tire's internal air pressure. This high level of uncertainty, which occurs by measuring the real value of the contact stress, makes it almost impossible to determine the pavement structure accurately and thus to design an economical pavement structure. In our research, therefore, we examined the interaction of modern tires and pavements using the finite element method (FEM), looking for a relationship between contact pressure (q), contact area (A_c), internal pressure of the tire (p) and wheel load (F). Our analyzes have shown that the dual tire load can be replaced by an evenly distributed force acting on a circular plate if the value of the average contact stress q is properly chosen. The developed finite element models of the tire and the pavement structure were complex enough for a detailed analysis of their contact relationship, but they can be further developed with appropriate material parameters to supplement or even to replace a significant range of very costly field tests in the future.

Keywords: finite element analysis (FEM), tire, contact stress, contact surface, ABAQUS

Király Tamás

Király Tamás jelenleg a Stadler Rheintal AG végeelem-szimulációs-mérnöke, specializálódva fáradástani, tranzien és nemlineáris feladatokra. Főállású foglalkozása mellett a Soproni Egyetem doktori hallgatója, ahol a kutatási területe a szénszállal erősített gerendák teherbírásnövekedésének optimalizálása szimulációs eljárásokkal, valamint a hozzá tartozó tönkremeneteli modell megalkotása. Továbbá orvosi műszerek tervezésével is foglalkozik, ahol kooperációs partnereivel együtt bejelentett szabadalmi vannak különböző 3D nyomtatott titán gerinc implantátumokra. A következő numerikus eljárásokban van tapasztalata: FEM (Finite Element Method), SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), DEM (Discrete Element Method) és MBD (Multibody Dynamics).

Dr. Primusz Péter

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

1. BEVEZETÉS

A mechanikai-empirikus útpályaszerkezet méretezési rendszerek a pályaszerkezetet rugalmasságtani elven számítható szerkezetként fogják fel, és alapvetően a vékony lemezek vagy a rugalmas rétegek elméletét alkalmazzák (McCullough és Boedecker, 1969). Bármilyen méretezési eljárást is alkalmazzunk, annak előfeltétele, hogy ismerjük az útburkolatra ható erőket, vagyis azt a felületet, amin a terhelés a szerkezetre átadódik. Kezdetben a Boussinesq-féle egyenleteken alapuló módszerek feltételezték, hogy az erő koncentráltan vagy vonalmenti eloszlásban működik a kerék teljes szélességén (Kézdi, 1954). A pneumatikus kerekek elterjedésével már azt gondolták, hogy a terhelés olyan kör alakú érintkezési felületen adódik át, amin a keréksúly egyenletesen oszlik meg. Ez a feltevés sokáig megmaradt, mivel egyszerű számítást tett lehetővé és a rugalmas rétegek parciális differenciálegyenleteinek megoldása is csak erre a terhelési esetre létezett.

Az elméleti megközelítéseket később a probléma kísérleti megoldása egészítette ki: különböző terhelésű kerekeket papírlapok közé helyezett festékes fóliára ráengedve (Kézdi, 1954), vagy azok homok körbeszórásával (Zsichla, 1990), a gumiabroncsok lenyomata meghatározhatóvá vált. Betonburkolatok esetén a kerék és az útburkolat érintkezési felülete ellipszis alakú volt a korra jellemző diagonál abroncsoknál, nagyságát pedig a belső tömlőnyomás és a kerékterhelés határozta meg. A jóval később megjelenő és merevebb radiálabroncsok keresztirányban nem, csak hosszirányban képesek alakváltozást elszenvedni, így lenyomatuk képe inkább téglalapra hasonlított (Gent és Walter, 2006). A kísérleti eredmények ellenére a legtöbb méretezési eljárás – a számítási nehézségekből adódóan – a tehergépkocsi ikerabroncs két ellipszis vagy inkább téglalap alakú lenyomatát a továbbiakban is egy azokkal megegyező nagyságú helyettesítő körfelülettel vette figyelembe. Ezt a megközelítést alkalmazta Nemesdy (1992) is a magyar új építésű típus-útpályaszerkezet katalógusrendszer megalkotásakor. Szakmai körökben viszont újra és újra felerősödtek azok a kritikus hangok, akik ezt az egyszerűsítést nem tartották elfogadhatónak. A számítástechnika fejlődésével ugyanis lehetőség nyílt arra, hogy a szuperpozíció elvét felhasználva a kör alakú terhelési esetre levezett egyenletekkel már kerékelrendezéseket is modellezzünk. Erre mutat példát Adorjányi (2009) aki a 2×25 kN nagyságú ikerabroncs terhelést két egymástól 315 mm-re elhelyezett 210 mm átmérőjű körfelületen egyenletesen megoszló erőrendszerrel veszi számításba. Szokás szerint a megoszló erőrendszer nagyságát, vagyis a felületi nyomást – jó közelítéssel – a gumiabroncsok belső légnyomásával megegyezőnek tételezzük fel. Ezt a gyakorlatot csak nagyon ritkán kérdőjelezzük meg, pedig az érintkezési lenyomatnál sokkal jobban meghatározza a szerkezetben ébredő igénybevételeket.

Cikkünkben a modern gumiabroncsok és az útpályaszerkezetek interakcióját vizsgáljuk a végeelem módszerrel, mivel egy komplex abroncsmodell felépítéséhez nem csak sok anyagparaméterre, de egy triviálisnak nem mondható modellezési technikára is szükségünk van, amellyel a különböző anyagú rétegek egymásra épülő rendszere jól leírható a lehető legkevesebb végeelem számmal. Nagy gyártók, mint pl. a Hankook, a 2000-es évek elején kezdték a manapság használatosnak mondható modellezési

technika kifejlesztését (Kennedy, 2003), amivel ma már a legtöbb abronccsal kapcsolatos probléma jól kezelhető. Reméljük, hogy munkánkkal segíteni tudjuk tisztázni a bevezetőben feltárt vitás kérdéseknek egy részét.

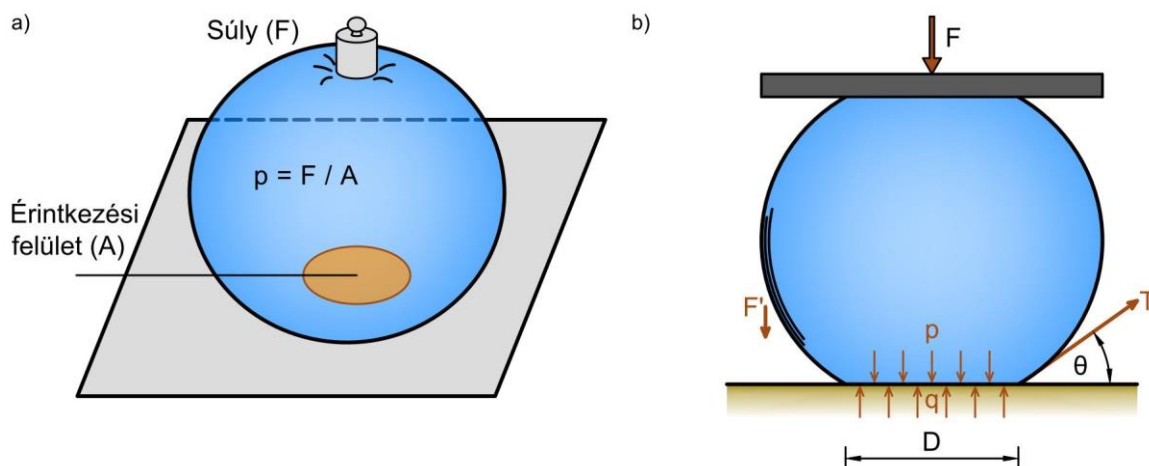
2. ELMÉLETI HÁTTÉR

2.1. A GUMIABRONCS NYOMÁSVISZONYAI

A gépjárművek a kerekeiken keresztül támaszkodnak fel az úttestre. A kerékterhelést pedig a gumiabroncsok adják át az útpályaszerkezetnek. Feltevésünk szerint a járműterhelésből adódó F nyomóerő egyenletesen megoszlik a gumiabroncs A felfekvési felületén (1.a ábra):

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

ahol p a gumiabroncs belső légnyomása, ami közel azonosnak tekinthető a gumiabroncs által a burkolatnak átadott q fajlagos érintkezési nyomásával. Szigorúan véve a $q \approx p$ egyenlőség csak tökéletesen hajlékony, vagyis saját merevséggel nem rendelkező keréktömlő esetén igaz. Abban az esetben, ha a gumiabroncsnak van saját merevsége, akkor a kontaktfeszültség akár 10-30 százalékkal lehet nagyobb vagy akár kisebb, mint az abroncs belső légnyomása a korabeli szakirodalom szerint (Kézdi, 1954; Lawton, 1957; Yoder, 1959; Lister és Nunn, 1968).



1. ábra. A tökéletesen hajlékony (a) és a falmerevséggel rendelkező léggömb (b) erőjátéka sima vízszintes síkkal érintkezve (Van Vuuren (1974) alapján szerkesztve)

Az ellentmondásos eredményekre Van Vuuren (1974) munkája adott később magyarázatot, aki fizikai levezetéssel igazolta, hogy egy léggömb q fajlagos érintkezési nyomása miatt szükségszerűen kisebb, mint annak belső p légnyomása (1.b ábra):

$$q = p - \frac{4T}{D} \sin \theta + \frac{F'}{A} \quad (2)$$

ahol

- q = átlagos kontakt nyomás
- T = húzóerő / egység hossz (a kontakt felület peremén)
- θ = a T húzóerő és a vízszintes által bezárt szög
- A = kontakt körfelület
- D = kontakt körfelület átmérője
- F' = a léggömb fala által közvetített terhelés

Mivel a T húzóerő a belső p légnyomásnak és a külső F erőnek egyaránt függvénye, így a keresett átlagos q kontaktnyomás is p és F függvényének tekinthető, vagyis általánosságban a következő összefüggés fogalmazható meg:

$$q = f_1(p) + f_2(F, p) \quad (3)$$

ahol

$f_1(p)$ = a belső légnyomás függvénye, és

$f_2(F, p)$ = a belső légnyomásnak és a külső terhelésnek az együttes függvénye (hatása).

Van Vuuren (1974) a léggömbre levezetett (3) összefüggést kiterjesztette gumiabroncsokra is, ahol az abroncs fizikai felépítését, méreteit, a futófelület kialakítását, a gumi keménységet és falvastagságot egy C' tényezővel vette számításba:

$$q = f_1(p) + f_2(F, p) + C' \quad (4)$$

A levezett (4) összefüggést Van Vuuren (1974) laboratórium mérésekkel igazolta egy 8.25-20x10 típusú gumiabroncsra:

$$q = (0,013p + 10,5)F + 0,119p + 125,9 \quad (5)$$

ahol q és p kPa-ban, az F kerékterhelés pedig kN-ban értendő. Az (5) tapasztalati összefüggés szerint az érintkezési (kontakt) nyomás a kerékterheléstől, az abroncs belső légnyomásától és nagymértékben az abroncs „hajlékonyságára” jellemző C' konstans értékétől függ.

2.2. A GUMIABRONCS FELÉPÍTÉSE

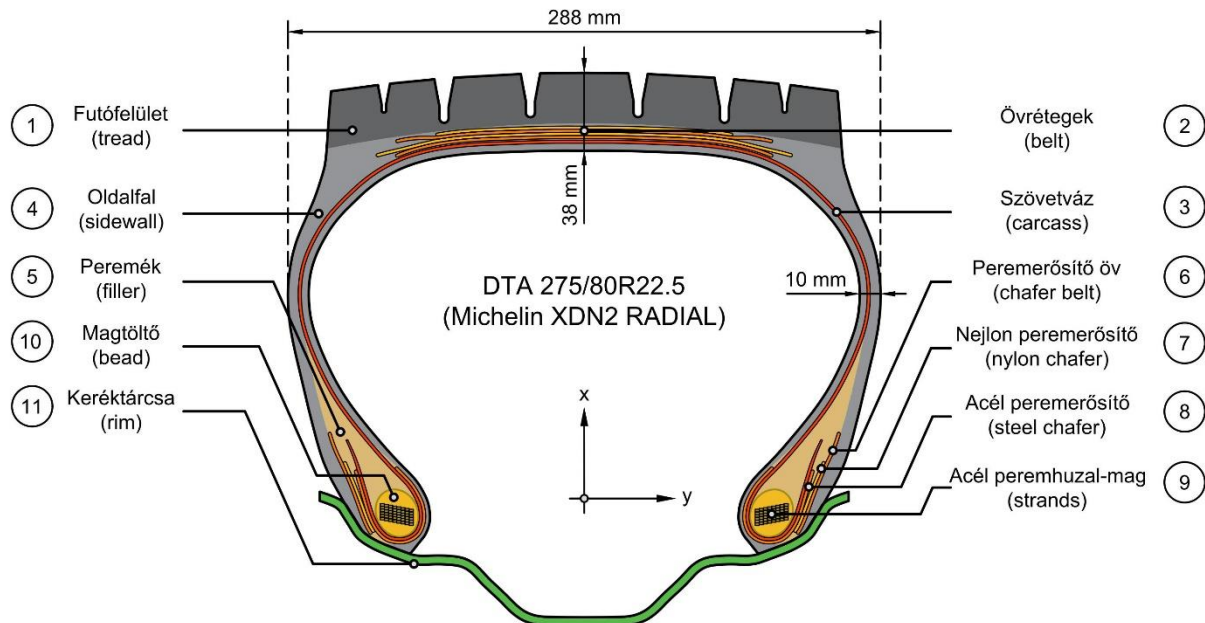
A gumiabroncsok a külső szemlélő számára egyszerű felépítésűnek tűnnek, pedig a modern abroncsok nagyságrendileg 10-20 különböző alkatrészt tartalmaznak, amik együttesen adják a gumiabroncsoktól megkívánt műszaki tulajdonságokat. A modern abroncsok legfontosabb részei a következők (a 2. ábra szerint számozva):

- A futófelület (tread) az abroncs útfelülettel érintkező része, feladata biztosítani a tapadást, a kopásállóságot és a menetstabilitást a járműnek (1). Jellemzően szintetikus és természetes kaucsukból készül.
- Az övrétegek (belt) erősítik az abroncsot, elnyelik az ütések, az optimális menetstabilitást és gördülési ellenállást biztosítják a járműnek (2). Gumírozott nagyszilárdságú acélszálakból készülnek, a szálak helyzete a radiál abroncs felhasználási céljának és terhelhetőségének függvényében $\pm 10-30^\circ$ a középvonalhoz képest.
- A szövetváz (carcass) az abroncs vázát adja, magas légnyomások esetén is megőrzi a gumiabroncs alakját és elosztja a terhelést (3). Gumírozott rayon vagy poliészter textilszálakból készül.
- Az oldalfal (sidewall) természetes gumiból készül, védi a karkaszt az oldalirányú behatásoktól és átviszi a nyomatékot a futófelületre (4).
- A peremék (filler) elősegíti a menetstabilitást, a kormányzási és kényelmi adottságokat, szintetikus gumiból készül (5).
- A peremerősítő öv (chafer belt) fokozza a menetstabilitást és a kormányzás pontosságát (6), anyaga lehet acél vagy nejlon, így megkülönböztettünk nejlon (7) és acél (8) peremerősítőt.
- Az acél peremhuzal-mag vagy huzalkarika (strands) gumiba ágyazott nagyszilárdságú acélhuzalokból készül, ami stabil illeszkedést biztosít a gumiabroncs és a keréktárcsa között (9). Az alkalmazott gyártástechnológiától függően a huzalkarika lehet magtöltős (bead) vagy magtöltő nélküli (10).

A gumiabroncs legbelső rétege légzáró, feladata, hogy megtartsa a gumiabroncsba fűjt levegőt, valamint megakadályozza a pára és nedvesség bejutását.

2.3. A VÉGESELEM MÓDSZER

A végeelem módszer (VEM) egy numerikus eljárás a természettudományok és a műszaki élet feladatainak közelítő megoldására. Lényege, hogy a vizsgált tetszőleges geometriai kialakítású, tetszőleges peremfeltételű és tetszőleges terheléskörülményekkel rendelkező testet véges számú, kicsiny, de geometriailag jól meghatározott ún. véges elemekből felépített modellel helyettesítjük (Molnár, 2011).



2. ábra. A gumiabroncs fő részei, az ábra Hernandez és mtsai. (2017) munkájában (a 21. oldalon) közölt DTA 275/80R22.5 típusú abroncs keresztmetszete alapján készült

Ezek a végelemek csak a csomópontjaikban kapcsolódnak egymással. A csomópontok elmozdulása (u^e) és a csomópontokban ható erők (F^e) közötti kapcsolatot a végelemek viselkedését leíró törvényszerűségek, anyagmodellek (K^e az elem ún. merevségi mátrixa) határozzák meg (Kakucs, 2020):

$$F^e = K^e u^e \tag{6}$$

Az összekapcsolódó végelemek együttes viselkedését egy egyenletrendszer írja le, amelynek megoldása a vizsgált tárgy alakváltozási állapotát adja. A csomópontok egymáshoz viszonyított relatív elmozdulása a végelemek torzulásához vezet, amiből a fellépő feszültségek a már említett törvényszerűségekkel kiszámíthatók (Kakucs, 2020).

A végeelemes módszer kézi számításokra alkalmatlan, mivel nagyon sok elemi művelet elvégzését igényli már egy igen egyszerű feladat is. Ezért ma már mindenhol számítógépes programokat használnak, hogy az iparban is fontos feladatok megoldhatóak legyenek. Az egyik legelterjedtebb végeelem szoftver jelenleg az ABAQUS/CAE (Complete Abaqus Environment) ami hatékony és komplett megoldást jelent az ipari feladatok széles spektrumához. A program implicit és explicit mechanikai, áramlástani és elektromágneses megoldóval rendelkezik, de SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), DEM (Discrete Element Method) és többtest dinamikai problémákat is megoldhatunk vele (Tamás et al. 2014). Fontos alprogramja a TOSCA, ami geometria vagy paraméter optimalizálásra használatos.

2.4. ANYAGMODELLEK

A modern gumiabroncsok felépítésükből következően többféle alapanyagból készülnek, és ezeknek csak egy kis részére igaz, hogy a lineárisan rugalmas (Hooke) anyagmodellt követik. A gumira például a nagyon nagy és nem lineáris deformációk jellemzők. Ezt az anyagviselkedést az ún. hiper-viszkoelasztikus anyagmodellel írhatjuk le, ami egy hiperelasztikus és egy viszkoelasztikus modell összekapcsolásán alapszik (Fazekas és Goda, 2017). Előbbi az anyag időfüggetlen, utóbbi az időfüggő viselkedést jellemzi (Brinson és Brinson, 2015). A mérnöki gyakorlatban a hiper-viszkoelasztikus modellparaméterek meghatározása nem egyértelmű feladat, ezért inkább a szeparált illesztés terjedt el (Fazekas és Goda, 2017). Ez azt jelenti, hogy a hiperelasztikus és a viszkoelasztikus paramétereket külön-külön illesszük a mérésekre, ez viszont pontatlanabb eredményeket ad a direkt módszerhez képest.

A hiperelasztikus anyagmodellben a feszültség és a nyúlás közötti kapcsolatot az alakváltozási energia sűrűségfüggvény írja le. Több általános hiperelasztikus konstitutív törvény ismert, mint pl. a Neo-Hooke, a Mooney-Rivlin, a Yeoh és az Ogden. A Yeoh modell az első deformációs invariáns alapszik, és a háromparaméteres változata jó illeszkedést biztosít a nagy deformációk tartományában (Madocsai, Veress, és Palkovics, 2011):

$$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2 + \frac{1}{D_2}(J_{el} - 1)^4 + \frac{1}{D_3}(J_{el} - 1)^6 \quad (7)$$

ahol

- C_{i0} = anyagparaméterek [Pa]
- \bar{I}_1 = deformációs invariáns
- D_i = összenyomhatatlansági paraméterek [1/Pa]
- J_{el} = elasztikus térfogati állandó

Az anyag időfüggő (t) viszkoelasztikus viselkedése Prony-sorozattal közelíthető az alábbi formában:

$$g_r(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i(1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (8)$$

ahol N a viszkoelasztikus modell elemeinek száma, τ_i az i -edik relaxációs idő, míg g_i az i -edik relatív csúsztató rugalmassági modulus. A dimenziótlan $g_r(t)$ relaxációsmodulus-függvény az időfüggő $G(t)$ és a pillanatnyi (üveges) G_0 csúsztató modulus hányadosaként van értelmezve:

$$g_r(t) = G(t)/G_0 \quad (9)$$

A most bemutatott anyagmodellekről további részleteket olvashatunk Tamás és mtsai. (2014) szabadon elérhető oktatási anyagában.

3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

3.1. GUMIABRONCS ÉS ÚTPÁLYASZERKEZET ADATOK

A mechanikai alapú útpályaszerkezet méretezés alapvetően Burmister (1945a; 1945b; 1945c) elméletét felhasználva a lineárisan rugalmas, homogén és izotróp végtelen féltéren nyugvó, többrétegű hajlékony rétegek rendszerével modellezi a valóságos útpályaszerkezeteket (MLE, Multilayer Elastic). A modellen belül egy h vastagságú réteg mechanikai viselkedését a Hooke-féle anyagtörvénynek megfelelően az E rugalmassági vagy Young-modulus és a μ harántkontrakciós, vagy Poisson-tényező adja meg. A rétegek a szerkezeteken belül egymáshoz tökéletesen tapadnak, vagyis a rétegek nem

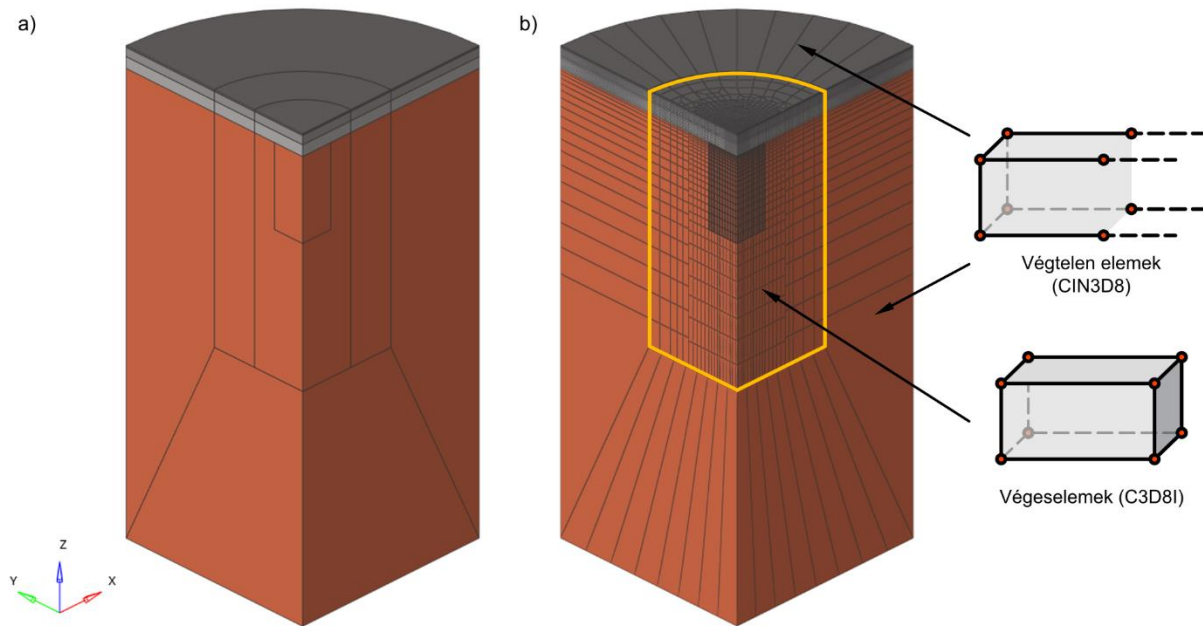
tudnak elcsúszni a határfelületen. A kutatásban vizsgált hajlékony és félmerev útpályaszerkezetek rétegrendjét és a rétegek mechanikai tulajdonságait az 1. táblázatban foglaltuk össze.

| Réteg neve | Vastagság, h [mm] | Young-modulus, E [Mpa] | Poisson-tényező, μ [-] |
|--|-------------------|------------------------|----------------------------|
| A hajlékony útpályaszerkezet felépítése | | | |
| Aszfalt kopóréteg | 40 | 4000 | 0,35 |
| Aszfalt kötő- és alapréteg | 200 | 5500 | 0,35 |
| Zúzottkő alapréteg | 250 | 350 | 0,40 |
| Földmű | 20000 (végtelen) | 50 | 0,45 |
| A félmerev útpályaszerkezet felépítése | | | |
| Aszfalt kopóréteg | 40 | 4000 | 0,35 |
| Aszfalt kötő- és alapréteg | 200 | 5500 | 0,35 |
| CK _T alapréteg | 200 | 2000 | 0,40 |
| Földmű | 20000 (végtelen) | 50 | 0,45 |

1. táblázat: A vizsgált útpályaszerkezetek rétegrendje és a rétegek anyagtulajdonságai.

| # | Elem | Típus | Anyag | Réteg | Szög [°] | Kereszt-metszet | Geom. [mm] | Köz [mm] |
|----|---------------------|--------------|---------------------|-------|----------|-----------------|------------|----------|
| 02 | övrétegek | erősítés | öv-acél | 1 | 50 | kör | R 0,25 | 1,16 |
| | | | | 2 | 78 | kör | R 0,25 | 1,16 |
| | | | | 3 | 102 | kör | R 0,25 | 1,16 |
| | | | | 4 | 78 | kör | R 0,25 | 1,16 |
| 09 | huzalkarika | | huzal-acél | 8×6 | 90 | hasáb | 2,0×1,3 | szoros |
| 03 | szövetváz | | szövet-acél | 1 | 12 | kör | R 0,4 | 0,8 |
| | | | | 2 | -12 | kör | R 0,4 | 0,8 |
| 06 | peremerősítő öv | | peremerősítő-acél | 1 | 90 | kör | R 0,36 | 1,19 |
| 08 | acél peremerősítő | | peremerősítő-acél | 1 | 90 | kör | R 0,36 | 1,19 |
| 07 | nejlon peremerősítő | | peremerősítő-nejlon | 1 | 90 | kör | R 0,36 | 1,00 |
| 01 | futófelület | fő szerkezet | futófelület gumi | | | | | |
| 04 | oldalfal | | oldalfal gumi | | | | | |
| 10 | magtöltő | | magtöltő gumi | | | | | |
| 05 | peremék | | magtöltő gumi | | | | | |
| 11 | keréktárcsa | | görgetett acél | | | | | |

2. táblázat: DTA 275/80R22.5 típusú abroncs kompozit szerkezetének geometriai méretei.



3. ábra. Az útpályaszerkezet vizsgált tartománya (a) és végeelem hálója (b).

A gumiabroncs szerkezetének geometriáját Hernandez et al. (2017) által közölt DTA 275/80R22.5 típusú abroncs keresztmetszeti rajza alapján (21. oldal) rekonstruáltuk, az abroncsok szélessége így (overall width) 288 mm-re, az abroncsok távolsága (dual spacing) pedig 315 mm-re adódott. A 2. ábrán látható abroncs kompozit szerkezetének a geometriai méreteit a 2. táblázat (a részek számozása a 2. ábrán láthatókkal megegyezik), az anyagparamétereket pedig a 3. táblázat foglalja össze irodalmi gyűjtés alapján.

A Yeoh-féle hiperelasztikus, a viszkoelasztikus és a szálerősítés (rebar) anyagparamétereket Yazdandoost és Taheri (2016) és Behroozinia et al. (2020) munkáiból vettük át. A gumiabroncs anyagparamétereinek kísérleti meghatározásáról pedig jó összefoglalást ad Van Blommestein (2016) doktori dolgozata.

| Anyag | Anyagmodell | Modell paraméterek | | Egység | Irodalom |
|---------------------|------------------------|--------------------|-----------|-------------------|--|
| öv-acél | Sűrűség | ρ | 7,80E-09 | t/mm ³ | Behroozinia et al. (2020) Van Blommestein (2016) Wang (2011) |
| | Elasztikus (Hook) | E | 174700 | N/mm ² | |
| | | μ | 0,3 | - | Van Blommestein (2016) |
| huzal-acél | Elasztikus (Hook) | ρ | 5,90E-09 | t/mm ³ | |
| | | E | 206000 | N/mm ² | |
| | | μ | 0,3 | - | |
| szövet-acél | Elasztikus (Hook) | ρ | 1,50E-09 | t/mm ³ | |
| | | E | 16870 | N/mm ² | |
| | | μ | 0,3 | - | |
| peremerősítő-acél | Elasztikus (Hook) | ρ | 1,50E-09 | t/mm ³ | |
| | | E | 9870 | N/mm ² | |
| | | μ | 0,3 | - | |
| peremerősítő-nejlon | Elasztikus (Hook) | ρ | 1,50E-09 | t/mm ³ | |
| | | E | 3970 | N/mm ² | |
| | | μ | 0,3 | - | |
| futófelület gumi | Hiperelasztikus (Yeoh) | ρ | 7,50E-10 | t/mm ³ | Zhang et al. (2020) |
| | | C ₁₀ | 6,16E-01 | N/mm ² | |
| | | C ₂₀ | -1,91E-01 | N/mm ² | |

| | | | | | |
|----------------|--------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| | | C ₃₀ | 4,75E-02 | N/mm ² | |
| | | D ₁ | 8,12E-02 | mm ² /N | |
| | | D ₂ | 8,12E-02 | mm ² /N | |
| | | D ₃ | 8,12E-02 | mm ² /N | |
| | Viszkoelasztikus (Prony) | g _i | 0,3 | - | Behroozinia et al. (2020) |
| | | k _i | 0,0 | - | |
| | | τ _i | 0,1 | s | |
| oldalfal gumi | Hiperelasztikus (Yeoh) | ρ | 1,05E-09 | t/mm ³ | Zhang et al. (2020) |
| | | C ₁₀ | 4,88E-01 | N/mm ² | Yazdandoost és Taheri (2016) |
| | | C ₂₀ | -1,41E-01 | N/mm ² | |
| | | C ₃₀ | 3,86E-02 | N/mm ² | |
| | | D ₁ | 1,03E-01 | mm ² /N | |
| | | D ₂ | 1,03E-01 | mm ² /N | |
| | D ₃ | 1,03E-01 | mm ² /N | | |
| | Viszkoelasztikus (Prony) | g _i | 0,3 | - | Behroozinia et al. (2020) |
| | | k _i | 0,0 | - | |
| | | τ _i | 0,1 | s | |
| megtöltő gumi | Sűrűség | ρ | 1,05E-09 | t/mm ³ | Zhang és mtsai. (2020) |
| | Hiperelasztikus (Yeoh) | C ₁₀ | 8,76E-01 | N/mm ² | Behroozinia et al. (2020) |
| | | C ₂₀ | -2,93E-01 | N/mm ² | |
| | | C ₃₀ | 7,94E-02 | N/mm ² | |
| | | D ₁ | 5,71E-02 | mm ² /N | |
| | | D ₂ | 5,71E-02 | mm ² /N | |
| | D ₃ | 5,71E-02 | mm ² /N | | |
| | Viszkoelasztikus (Prony) | g _i | 0,3 | - | Behroozinia et al. (2020) |
| | | k _i | 0,0 | - | |
| | | τ _i | 0,1 | s | |
| görgetett acél | Sűrűség | ρ | 7,80E-08 | t/mm ³ | Van Blommestein (2016) |
| | Elasztikus (Hook) | E | 210000 | N/mm ² | |
| | | μ | 0,3 | - | |

3. táblázat: DTA 275/80R22.5 típusú abroncs kompozit szerkezetének anyagparaméterei.

3.2. ÚTPÁLYASZERKEZET MODELLEZÉS VÉGESELEM MÓDSZERREL

A többbrétegű rugalmas rendszerek (MLE) elmélete mellett, Duncan, Monismith, és Wilson (1968) munkájának köszönhetően a végeselemes modellezés (VEM) már az 1960-as évek végén megjelenik az útpályaszerkezetek tanulmányozásában, mivel lehetővé teszi az anyag nemlineáris viselkedésének figyelembevételét (Cho, Tóth, és Soós, 2018). A végeselem-módszer egyik jellegzetes velejárója, hogy az analitikus megoldásoknál használt végtelen tartományokat végessé kell tenni. Ez azonban sokszor nem ésszerű, főleg végtelen vagy félvégtelen kiterjedésű kontinuumokra megfogalmazott feladatok esetében. A probléma útpályaszerkezeteknél a legelső homogén végtelen féltérnél, vagyis a földműnél jelentkezik. A megoldást a végtelen végeselemek jelentik, amelyekben már végtelenbe nyúló résztartományok is megtalálhatók (Scharle és Szilágyi, 1986).

Az általunk elkészített végeselem modellben az útpályaszerkezet vizsgált tartománya hengeralakú (3.a ábra), ahol a C3D8I (8 csomópontú lineáris) végeselemeket a határfelületen radiális irányban CIN3D8 (8 csomópontú lineáris) végtelen elemek veszik körül (3.b ábra), és a földmű alulról szintén végtelen elemekbe megy át (amik a lesüllyedés nagyságát szabályozzák). Az ABAQUS programban a végtelen elemek létrehozásakor figyelni kell a csomópontok számozására, mivel a végtelen elemeknek csak az első felületét lehet összekapcsolni a végeselemhálóval. A határfelületből kiinduló élek a végtelennek tekintett irányba tartanak és egy pólus körül helyezkednek el. Az elmélet szerint ezen élek mentén van közelítve a távoli tér megoldása, míg az élek határfelületen belüli meghosszabbításai egy pólusban találkoznak. Ebből fakadóan fontos a végtelen irányban elhelyezkedő csomópontok megfelelő

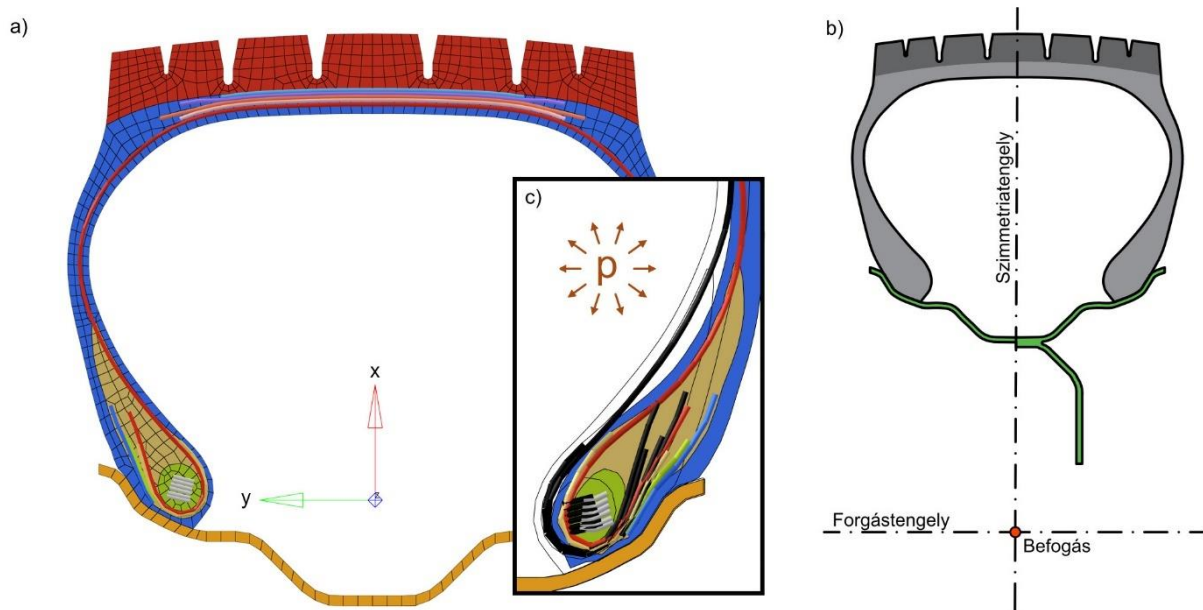
pozicionálása; távolságuk a pólustól kétszer akkora, mint a határfelületen fekvőké. A radiálisan elhelyezett végtelen elemek a henger alakú pályaszerkezet modell forgástengelyébe mutatnak, míg a földmű alján lévő végtelen elemek az útburkolat-gumiabroncs kontaktfelületének és a henger alakú pályaszerkezet modell forgástengelyének metszéspontjában találkoznak.

A gumiabroncs és az útburkolat kontaktfelületének környezetében 6 mm élhosszúságú elemeket hoztunk létre, míg a vizsgált területtől a határfelület felé távolodva rohamosan durvul a háló egészen a 100 mm élhosszig. A háló finomból durvába történő átmenetét lineáris vagy másnéven ragasztott (ún. TIED) kontakttal modelleztük, mivel már a durvább háló elemeiben sem várható nagy feszültséggradiens. Ez az egyszerű megoldás jobb minőségű hálót és gyorsabb futásidőt biztosít. Az útpályaszerkezet minden véges vastagságú rétegében legalább 5 nem-redukáltan integrált elemmel biztosítottuk a hajlításból származó feszültségek megfelelő leképzését. A rétegek egymáson elcsúszni nem tudnak, azokat idealizáltan egymáshoz ragasztva modelleztük. A modellben a térbeli kontinuum elem csomópontjainak 3 elmozdulás (u_1, u_2, u_3) szabadságfoka van, míg a végtelen végelem végtelen irányban elhelyezett csomópontjainak elmozdulásait alulról a z-tengely, oldalról az x- és y-tengely mentén korlátoztuk. A befogásból eredő feszültségi anomáliák lecsengését az adott pályaszerkezeti réteghez tartozó rugalmas anyagtulajdonsággal rendelkező végtelen elemek biztosítják, és így a peremfeltételek elméletileg nem okoznak nagy hibát a szimulációba.

3.3. GUMIABRONCS MODELLEZÉS VÉGESELEM MÓDSZERREL

3.3.1. 2D-S TENGELYSZIMMETRIKUS MODELL

A végelem analízis (bizonyos feltételek teljesülése mellett) lehetőséget ad a 3D-s testek síkbeli vizsgálatára, amivel jelentős számítási idő-, hely- és kapacitás (hardware) spórolható meg. A gumiabroncs felfújásához és keréktárcsára feszítéséhez elegendő egy síkbeli tengelyszimmetrikus feladat megoldása, ami azt jelenti, hogy csak az 1. ábrán látható radiális keresztmetszetet szükséges modelleznünk. Az ABAQUS program megszabja a 2D-s tengelyszimmetrikus feladat leírásához szükséges hengerkoordináta rendszer elhelyezkedését, ahol az x-tengely a sugárirányú (radiális) tengely és az y-tengely a z-tengellyel esik egybe. Ennek megfelelően az abroncs keresztmetszeti modelljét az xy-síkban kell elkészítenünk (4.a ábra).



4. ábra. A gumiabroncs végeelemhálója (a), a tengelyszimmetrikus modell befogása (b) és a gumiabroncs alakváltozása felfújás után (c).

Az ABAQUS programban a tengelyszimmetrikus feladatok definiálásához nem szükséges külön parancsot használni, azonban a hálót kötelezően tengelyszimmetrikus elemekből lehet csak felépíteni. A gumiabroncs modellhez a következő elem típusokat alkalmaztuk:

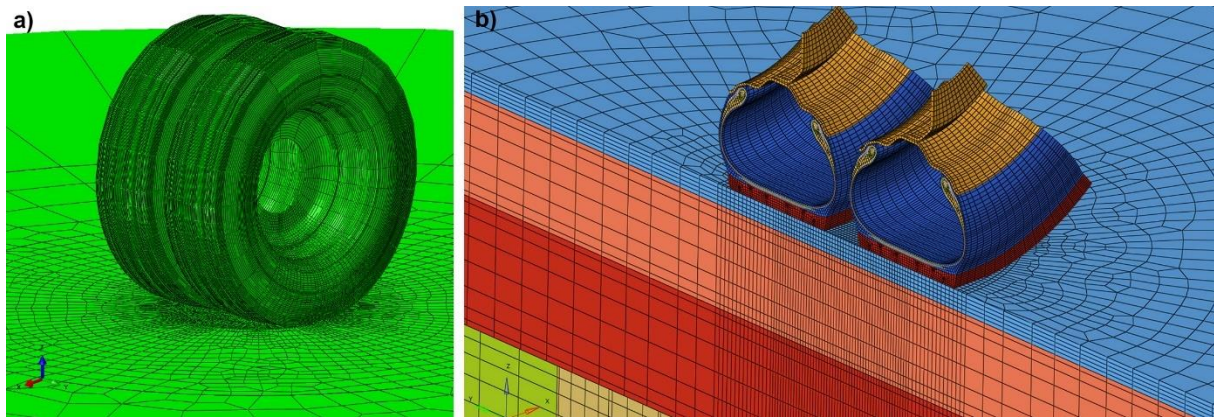
- CAX4 (4 csomópontú bilineáris kontinuum-elem) lineárisan rugalmas vagy elasztoplasztikus anyagokhoz.
- CAX4H (4 csomópontú bilineáris hibrid kontinuum-elem) hiperelasztikus anyagokhoz.
- SFMAX1 (2 csomópontú lineáris membrán-szerű felületelem) a szálerősítéshez.

A felületelemek felépítésüket tekintve vastagsággal nem rendelkező membrán elemek. Általában többsúly definiálásakor vagy felületre ható erők felvitelénél alkalmazzuk őket, de jól megfelelnek a gumiabroncs szálerősítésének (rebar) egyszerűsített figyelembevételéhez is. Az SFMAX1 felületelem nagy előnye, hogy a szálerősítésnek csak a radiális metszetben szükséges a lefutását modellezni, a szálerősítés keresztmetszetét a végelem hálótól független paraméterekkel tudjuk megadni. További előny még, hogy nem kell a felületelemeknek a végelemháló egyéb elemeihez csomópontjaikkal csatlakozniuk, hanem ún. beágyazott elemekként (embeded element) definiálhatók. A gumiabroncs modellnél a gumi anyaga a szálerősítéshez hozzárendelt „gazda-elem”.

A tengelyszimmetrikus modell befogása a kerék forgástengelyének és az abroncs szimmetria tengelyének metszéspontjában van (4.b ábra). A befogási pont 2. (U_2) és 6. (UR_3) szabadságfokát (degrees of freedom, DOF) korlátozni szükséges, hogy a forgástengely mentén ne történhessen elmozdulás, illetve a radiális metszet ne tudjon a síkjába elfordulni. A gumiabroncs modell keresztmetszete az 4.a ábrán még nem a keréktárcsára feszített és nyomás alá helyezett állapotot tükrözi. A keréktárcsa és a gumiabroncs interakcióját Jeong (2016) szálerősítés szakadás vizsgálata alapján dolgoztuk ki. A szimuláció kezdetekor a karikahuzalban – hosszanti irányban – 30 MPa nagyságú húzófeszültséget adunk meg, ami az abroncs peremét finoman a keréktárcsára feszíti. Az abroncs pereme a felfújás közben a keréktárcsán elcsúszhat (a súrlódási tényezőt 0,3-nak választottuk), valamint radikális túlnyomás esetén akár le is válhat arról (4.c ábra). Ennél a pontnál a gumiabroncsban ébredő feszültségeket és a felfújt abroncsalakot már érdemes összevetni a méréseinkkel (Jeong, 2016; Korunovic, Trajanovic, és Stojkovic, 2007). A későbbi gumiabroncs-útburkolat kontaktszimulációra tekintettel már a tengelyszimmetrikus modellnél megadtuk a futófelület érintkezési felületét.

3.3.2. 3D-S TELJES MODELL

A gumiabroncs 2D-s tengelyszimmetrikus modellje a kontaktfelületek ellenére is egy rendkívül gyorsan lefutó szimuláció, ami egy normál munkaállomáson (workstation, 4 CPU, magonként 3.5GHz órajel) egy perc alatti futásidőt jelent. Ugyanez a feladat térben – változatlan gépteljesítmény mellett is – több tíz percet igényel. A következő lépésekhez viszont, ahol az útburkolat és a gumiabroncs interakcióját vizsgáljuk már elengedhetetlen, hogy növeljük a végelem modell komplexitását. Az ABAQUS program szerencsére képes a 2D-s tengelyszimmetrikus modellből a *SYMMETRIC MODELL GENERATION paranccsal 3D-s modellt létrehozni úgy, hogy projektálja a 3D-s hálóra a tengelyszimmetrikus modell feszültségállapotát. Ezt követően még egy egyensúlyi számításra (equilibrium step) van szükség, aminek a hatására az átvetített feszültségi állapot a 3D-s modellben ténylegesen egyensúlyi állapotba kerül.



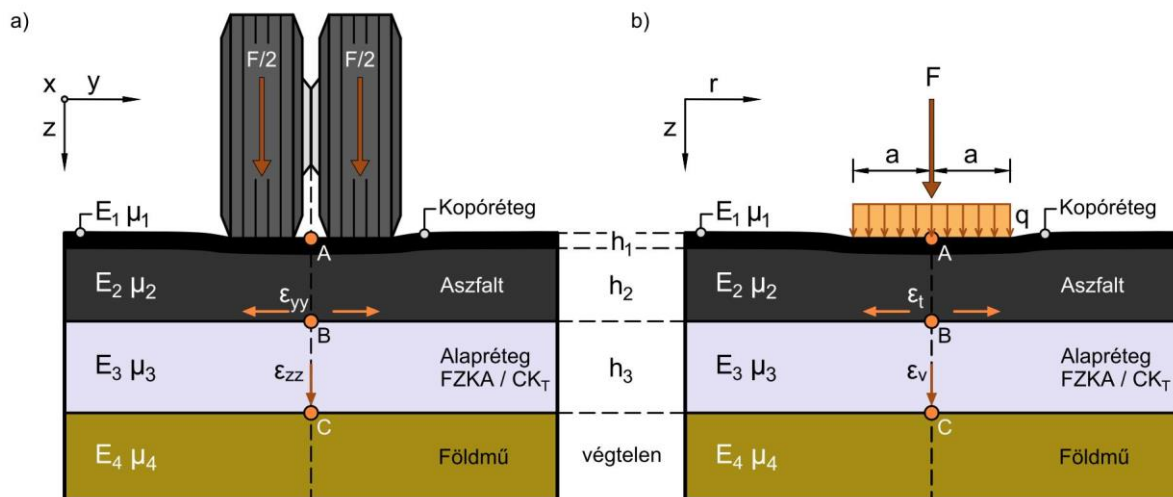
5. ábra. A gumiabroncs-útburkolat interakció teljes 3D-s végelem modellje (a), valamint a finom hálójú abroncsmodell és az útburkolat interakciója (b).

A gumiabroncs 3D-s teljes testmodell generálásánál érdemes azokat a részeket finomabban hálózni, ahol a gumiabroncs-útburkolat interakció várható és a többi elemet durvábban közelíteni, ezzel is spórolva a számításához szükséges idővel és gépteljesítménnyel (5. ábra). A modell durvábbra hálózott részein ezért a CCL12 henger alakú végelemeket alkalmaztuk, amelyek a kerületi irányban elhelyezett plusz csomópontjaikkal az ívelt térrészeket jobban letudják követni. Kontaktfelületnek ajánlatos hagyományos elemeket választani, hogy a megoldás gyorsabban elérje a stabil egyensúlyi helyzetet.

A 3D-s modell generálásakor a tengelyszimmetrikus modellben létrehozott csomópont-, elem- és kontaktfelület csoportok automatikusan létrejönnek, ezért adtuk meg már a 2D-s modellben a gumiabroncs-útburkolat interakcióhoz szükséges kontaktfelületeket. Ennél a lépésnél szükséges az `*INCLUDE` paranccsal az útpályaszerkezet modellt beolvasni. Érdemes az útburkolat hálóját az abroncstól távolabb elhelyezni, hogy azok még ne érjenek össze. A gumiabroncs-útburkolat kontaktszimulációhoz meg kell adni a kontaktpárokat és az interakciós tulajdonságokat. A helyes kontaktdefiniáláshoz a „puhább” anyagot, azaz a gumiabroncs futófelületét szükséges finomabban hálózni és így azt „slave” felületnek választani a kontaktpárban. Mivel jelen munkában csak a statikus terhelés esetét vizsgáltuk, az útburkolat (kopóréteg) és az abroncs között nem definiáltunk komplex súrlódási modellt. Nakajima (2019) és Zhou et al. (2015) is megállapítják, hogy az abroncslenyomat számításához a súrlódásmentes érintkezési kapcsolat valóságosabb eredményeket hoz. Ez azzal magyarázható, hogy a súrlódás hatására az abroncs profilmintájának peremén nyírófeszültségek ébrednek és begyűrődések keletkeznek. Ez a szcenárió az abroncs gördülő mozgásakor, illetve a gördülő mozgásból levezetett álló helyzetében nem jelentkezik. Az abroncs befogása továbbra is azonos pontban történik a 3D-s modellben, azonban mind a 6 szabadságfokot korlátozzuk, valamint az abroncs belső légnymását is megoszló terhelésként vesszük figyelembe.

3.4. GUMIABRONCS-ÚTBURKOLAT KONTAKT SZIMULÁCIÓ

A kutatás elsődleges célja annak megállapítás, hogy az ikerabroncs érintkezési nyomása (q) és felülete (A) hogyan függ a kerékterhelés (F) nagyságától, valamint mekkora igénybevételek lépnek fel a kerékterhelés hatására a vizsgált hajlékony és félmerev szerkezeteken belül. Mivel a klasszikus méretezési eljárások az útpályaszerkezetet terhelő ikerabroncsok lenyomatát egy a sugarú körtárcsán egyenletesen megoszló erőrendszerrel veszik számításba, ezért ezt a terhelési esetet is kiszámoltuk összehasonlításul. A 6.a ábra a valóságos kerékelrendezést és terhelést, míg a 6.b ábra az azzal ekvivalens kontaktfelületű, helyettesítő körtárcsa modellt szemlélteti.



6. ábra. A valóságnak megfelelő ikerabroncs terhelés (a) és az ikerabroncsok lenyomatával azonos felületű helyettesítő körtárcsa modell (b).

A méretezési feladatok megoldásánál rendszerint megelégszünk azzal, hogy csak a terhelés tengelyében a kritikus helyeken ismerjük az igénybevételeket, mivel ezek lesznek mértékadók. A mértékadó igénybevételek helye a kohézióval rendelkező szerkezeti anyagok esetében a terhelés tengelyében a réteg alsó szála, a kohézióval nem rendelkező szerkezeti anyagok esetében (szemcsés rétegek és földmü) a réteg teteje. A 6. ábrán narancssárga pontok jelzik a vizsgálati helyeket:

- A) Burkolat függőleges elmozdulása (behajlása)
- B) Az alsó aszfaltréteg alján ébredő vízszintes ϵ_t fajlagos megnyúlás
- C) A földmüréteg tetején ébredő függőleges ϵ_v fajlagos összenyomódás

A 6.a ábrának megfelelő terhelési esetet vizsgáltuk részletesen a végelem módszerrel (ABAQUS), míg a 6.b ábrán látható modellt a többrétegű rugalmas rendszerek (MLE) elméletét felhasználva számítottuk ki a WESLEA (Waterways Experiment Station Layered Elastic Analysis) programmal (lásd később).

A gumiabroncs-útburkolat végelem kontakt szimuláció az egyensúlyi állapotba helyezett 3D-s abroncsmodell analízisének a folytatása, így itt már nincs lehetőség további módosításokra. Az egyes számítási lépésekben (load step) legfeljebb csak a paraméterek értékén pl. súrlódási tényező tudunk változtatni.

A lenyomat vizsgálat első lépése, hogy az abroncsmodellt hozzányomjuk az útburkolathoz. A konvergencia miatt praktikus – a kontakt létrejöttéig – az abroncs befogására egy rögzített eltolást, mint peremfeltételt megadni. Kezdetben a felfújt gumiabroncs futófelülete és az útburkolat 2 mm-re található egymástól. Az előtolást 6 mm-nek választottuk, ami a befogásban (egy abroncs esetén) mintegy 1600 N ellenerőt jelentett.

| Gumiabroncsnyomás [kPa] | Egy abroncsra jutó F/2 terhelés nagysága [kN] | | |
|-------------------------|---|-------------|--------------------|
| | Üzemi terhelés | Túlterhelés | Extrém túlterhelés |
| 430 | 17,5 | 20,0 | 22,5 |
| 530 | 20,0 | 22,5 | 25,0 |
| 630 | 22,5 | 25,0 | 27,5 |
| 730 | 25,0 | 27,5 | 30,0 |

4. táblázat: Az útburkolat-gumiabroncs kontaktszimulációs matrix.

| F/2 [kN] | p [kPa] | L ₁ [mm] | L ₂ [mm] | a [mm] | q _{max} [kPa] | q [kPa] | A [mm ²] | h _q [mm] | |
|----------|---------|---------------------|---------------------|--------|------------------------|---------|----------------------|---------------------|----------|
| | | | | | | | | hajlékony | félmerev |
| 17,5 | 430 | 240 | 186 | 169 | 825 | 391 | 44757 | 60,8 | 63,2 |
| 20,0 | 430 | 240 | 202 | 176 | 1030 | 413 | 48426 | 56,3 | 58,9 |
| 22,5 | 430 | 240 | 218 | 182 | 1242 | 431 | 52204 | 51,5 | 54,2 |
| 20,0 | 530 | 240 | 189 | 170 | 789 | 440 | 45455 | 66,7 | 69,8 |
| 22,5 | 530 | 240 | 200 | 175 | 967 | 469 | 47974 | 62,4 | 65,3 |
| 25,0 | 530 | 240 | 221 | 184 | 1151 | 471 | 53079 | 64,3 | 67,8 |
| 22,5 | 630 | 240 | 194 | 172 | 874 | 484 | 46488 | 71,9 | 75,4 |
| 25,0 | 630 | 240 | 202 | 176 | 919 | 516 | 48450 | 67,6 | 71,1 |
| 27,5 | 630 | 240 | 225 | 185 | 1077 | 510 | 53922 | 72,1 | 76,5 |
| 25,0 | 730 | 240 | 197 | 173 | 953 | 530 | 47170 | 74,8 | 78,5 |
| 27,5 | 730 | 240 | 205 | 177 | 1010 | 560 | 49107 | 71,8 | 75,6 |
| 30,0 | 730 | 240 | 224 | 185 | 1054 | 557 | 53860 | 75,6 | 80,0 |

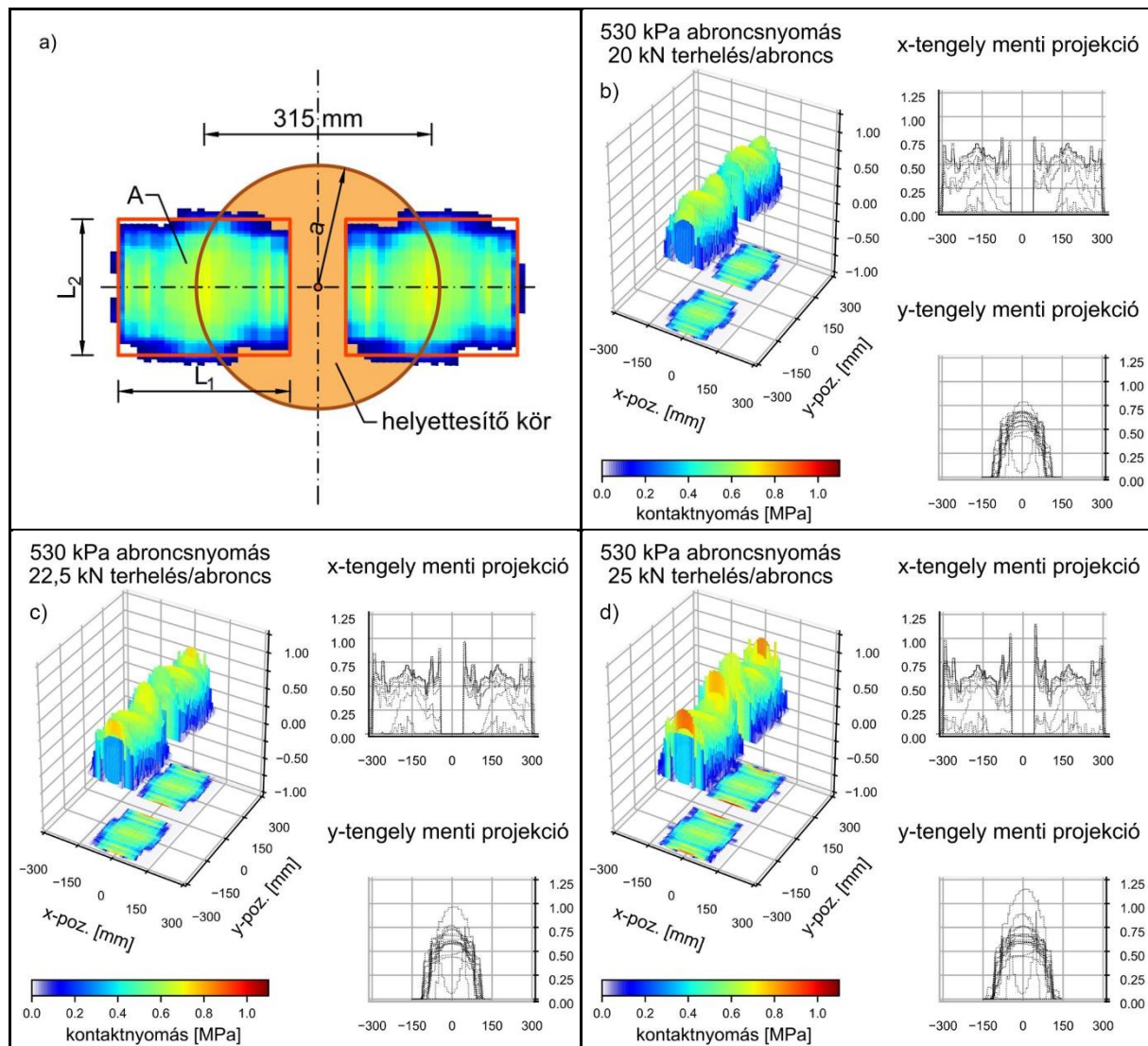
5. táblázat: Az útburkolat-gumiabroncs kontaktszimuláció eredményei.

A szimuláció további részében fokozatosan ráadtuk a pontszerű függőleges kerékterhelést a modellre, aminek hatására a kontaktfelület kiterjedt. A lenyomat létrejöttéig fontos, hogy a súrlódást nullának válasszuk, mert az abroncs profilja így jobban szét tud terülni az útburkolaton, nem ébrednek magas nyírófeszültségek a lenyomat kialakulása közben, és így a gumiabroncs deformációja is jobban megegyezik a gördüléskori állapottal. A gumiabroncs-útburkolat kontakt szimuláció mátrixot a 4. táblázat foglalja össze, aminek összeállításánál figyelembe vettük az abroncsgyártó (megengedett terhelés és gumiabroncsnyomás) ajánlását is. Ennek megfelelően nem csak az előírt üzemi terhelésnyomásérték szcenáriót, hanem az alacsony nyomású gumiabroncs viselkedést is szimuláltuk.

4. EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

A gumiabroncs-útburkolat kontakt szimulációt a 4. táblázat minden gumiabroncsnyomás és kerékterhelés esetére lefuttattuk a hajlékony és a félmerev útpályaszerkezeteken. Eredményül a szerkezetekben fellépő igénybevételeket és az útburkolaton kialakuló abroncslenyomatokat és kontaktfeszültségeket kaptuk, amik jól visszaadták a szakirodalomban közölt értékeket (W. Wang, Yan, és Zhao, 2013; Zhou et al. 2015). Mind a két szerkezet típusnál az érintkezési felület alakját legjobban egy $L_1 \times L_2$ nagyságú téglalappal tudtuk közelíteni (7.a ábra), az ikerlenyomatok nagyságát (A), a helyettesítő kör sugarát (a) és a fellépő kontaktfeszültségeket (q_{max} és q) pedig az 5. táblázatban foglaltuk össze. Mivel az elemzések azt mutatták, hogy a vizsgált két útpályaszerkezet felépítés semmilyen hatással nem bírt a gumiabroncs-útburkolat érintkezési kapcsolatra, ezért az 5. táblázat értékei mind a két szerkezet típusra érvényes.

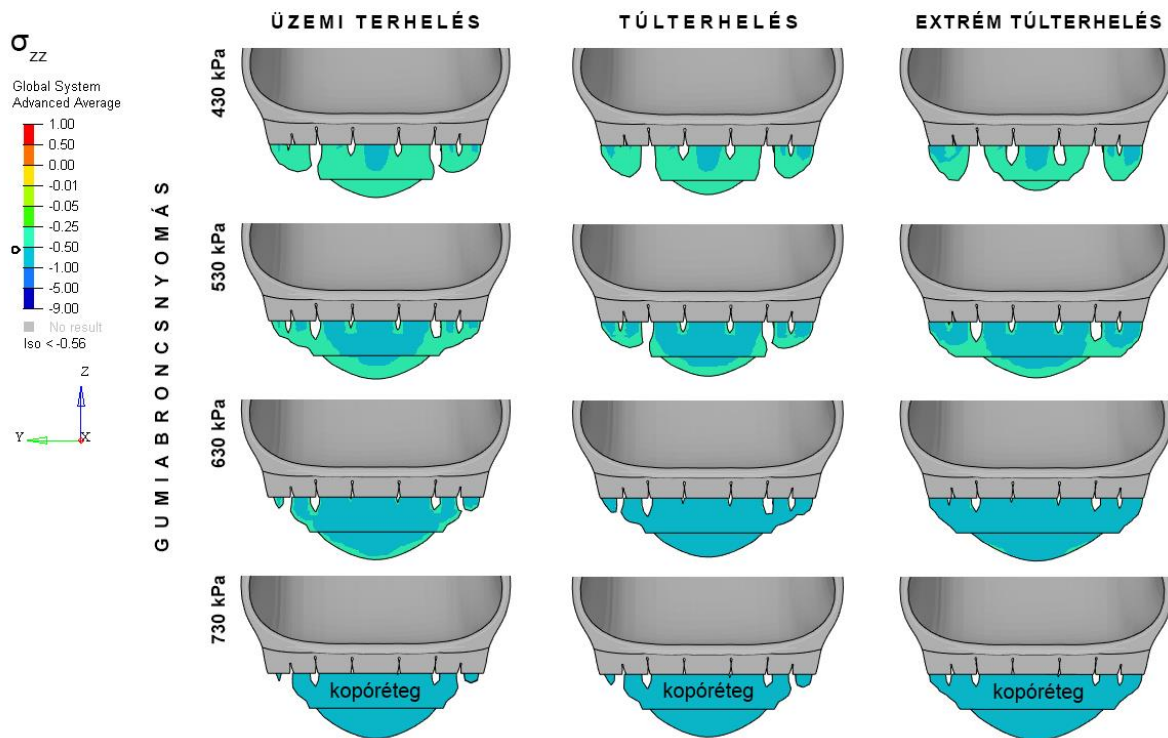
Üzemi nyomás és legnagyobb megengedett kerékterhelés mellett a kontaktfeszültségek eloszlása ellipszoidnak tekinthető (7.b ábra), de alacsony abroncsnyomásnál a futófelület egyenlőtlenül érintkezik az útfelülettel, az abroncs közepe kissé elemelkedik és a terhelést a gumiabroncs merevségéből következően már annak két oldala veszi fel.



6. táblázat: Részlet az ikerabroncs kontaktszimuláció eredményekből: a) ikerabroncs lenyomat és a lenyomattal azonos felületű helyettesítő kör; b) ajánlott abroncsnyomás és terhelés; c) alulfűjt gumiabroncs, terhelés 22,5 kN; d) alulfűjt gumiabroncs, terhelés 25,0.

Az elmondottakból következik, hogy a teherelosztás nem lesz egyenletes (7.c-d ábra) és a kialakuló feszültségcsúcsok (q_{max}) az átlagos kontaktnyomás 2,5-3,0 szorosát is elérhetik. Ez azonban nem okoz problémát, ha nem a kopóréteg igénybevételeit vagy a nyomvályúképződés folyamatát vizsgáljuk, mivel méréseink szerint az útburkolat felszíne alatt $h_q = 5 - 8$ centiméterre már ezek a túlnyomások kiegyenlítődének. A 8. ábraszorozat mutatja be a q átlagos kontaktnyomásnál nagyobb feszültségzónákat az ikerabroncsok alatt. Jól látható, hogy a 6. ábrán jelölt B pont jóval mélyebben helyezkedik el, mint a q átlagos feszültségpontokat összekötő görbék maximuma, így az ott ébredő igénybevételeket q_{max} elhanyagolása már nem befolyásolja jelentősen. A félmerev útpályaszerkezetenél 3-5 mm-rel nagyobb h_q határmélységet mutattunk ki, mint a hajlékony útpályaszerkezetenél. Ez a merevebb szerkezetek túlterhelésre való érzékenységevel magyarázható. Összességében a kontakt szimuláció eredményei jól visszaadták a valódi gumiabroncsokról szerzett ismereteinket, így az abroncsmodellt további elemzésekre alkalmasnak ítéltük.

A továbbiakban kapcsolatot kerestünk az átlagos q kontaktnyomás, az F kerékterhelés és a p gumiabroncsnyomás között. Felhasználtuk Van Vuuren (1974) laboratórium mérésekre alapozott (5) számú empirikus összefüggését (9.a ábra). A függvény együtthatóit a legkisebb négyzetek módszerével határoztuk meg az 5. táblázat adatait felhasználva ($R^2 = 0,99$):



7. ábra. A hajlékony útpályaszerkezetben ébredő – a gumiabroncs átlagos q érintkezési nyomásánál nagyobb vagy azzal megegyező – függőleges normális σ_{zz} nyomófeszültségek (a negatív előjel nyomás, a pozitív húzás).

$$q = 6,22F + 0,3p + 158,7 \tag{10}$$

A kontaktszimuláció szerint a p és F együttes (kevert) hatása nem kimutatható, ellenben az abroncs „hajlékonyságára” jellemző C' konstans fontosságát a végeelem szimuláció is megerősítette. Figyelembe véve, hogy az abroncsgyártók az üzemi működésre megadják a megengedett gumiabroncsnyomás és kerékterhelés értékeket, a fenti (10) összefüggés tovább egyszerűsíthető (9.b ábra). Gyártói adatlap alapján a megengedett kerékterhelés és abroncsnyomás összefüggést egy lineáris függvénykapcsolat adja meg ($R^2 = 0,99$):

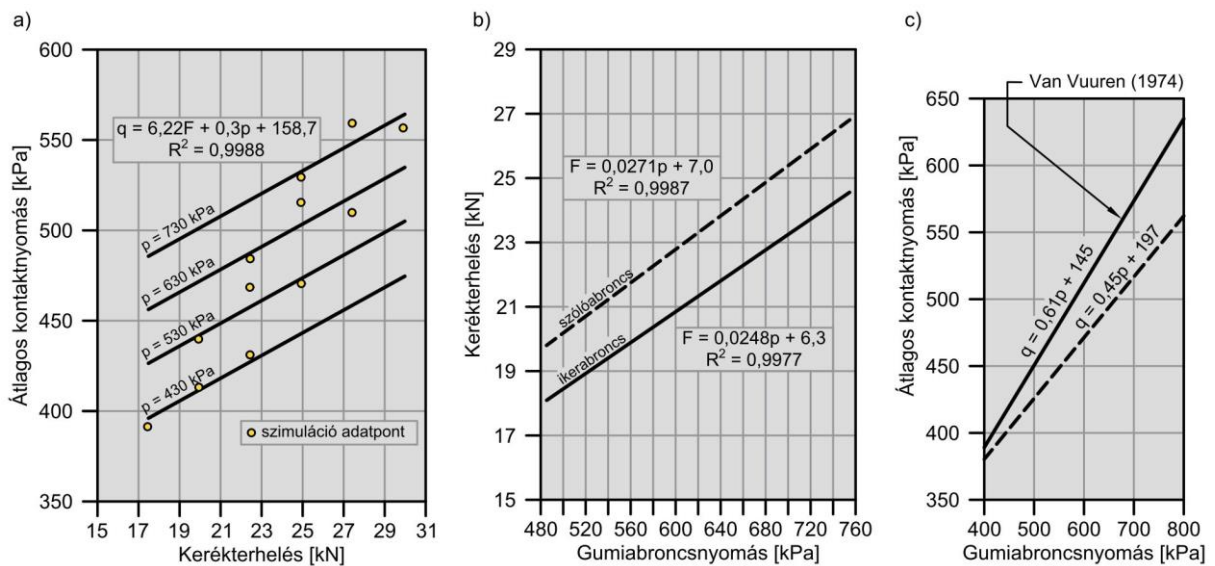
$$F = 0,0248p + 6,30 \tag{11}$$

Végül (11) egyenletet behelyettesítve a (10) egyenletbe kapjuk az üzemi körülményekre vonatkozó átlagos kontaktnyomás és gumiabroncsnyomás összefüggést:

$$q = 0,454p + 197,87 \tag{12}$$

A (12) összefüggéssel a burkolatra jutó átlagos q kontaktfeszültséget a gumiabroncs belső p légnomásából tudjuk megbecsülni. Van Vuuren (1974) eredeti munkájában több gyártó pl. Michelin, Firestone, Goodyear, General gumiabroncsra is elvégezte a fenti elemzést, és a laboratóriumi mérések átlagolásával hasonló lineáris összefüggésre jutott, mint mi. Ábrázolva a két modellegyenest (9.c ábra), jól láthatjuk, hogy az egy abroncsra lefuttatott végeelem szimuláció eredménye az „átlagos” egyeneshez igen közel esik, így azt igazoltnak tekinthetjük. Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a (12) egyenlet csak radiális kialakítású és nem gördülő abroncsra igaz. De Beer és mtsai. (1997) szerint Van Vuuren (1974) modellje gördülő diagonál gumiabroncsoknál alábecsüli az ébredő kontaktfeszültséget és használatát nem javasolják.

Gyakorlati számításoknál pl. burkolat megerősítésnél az ikerabroncsok által terhelt felületet olyan körrel helyettesítjük, aminek a felülete megegyezik a tényleges érintkezési felülettel (Soós és Tóth 2016). A helyettesítő kör átmérőjét Baksay (1974) az alábbi összefüggéssel közelítette (Boromisza, 1997):



8. ábra. Az ikerbronz átlagos kontaktnyomása a gumibroncsnyomás és az egy bronzsra jutó (F/2) kerékterhelés függvényében (a), az abroncsgyártó által üzemi működésre javasolt gumibroncsnyomás és egy bronzsra jutó (F/2) kerékterhelés összefüggés (b) és az átlagos kontaktnyomás és az üzemi gumibroncsnyomás összefüggése (c).

$$D \approx 11,25\sqrt{F/p} \tag{13}$$

ahol

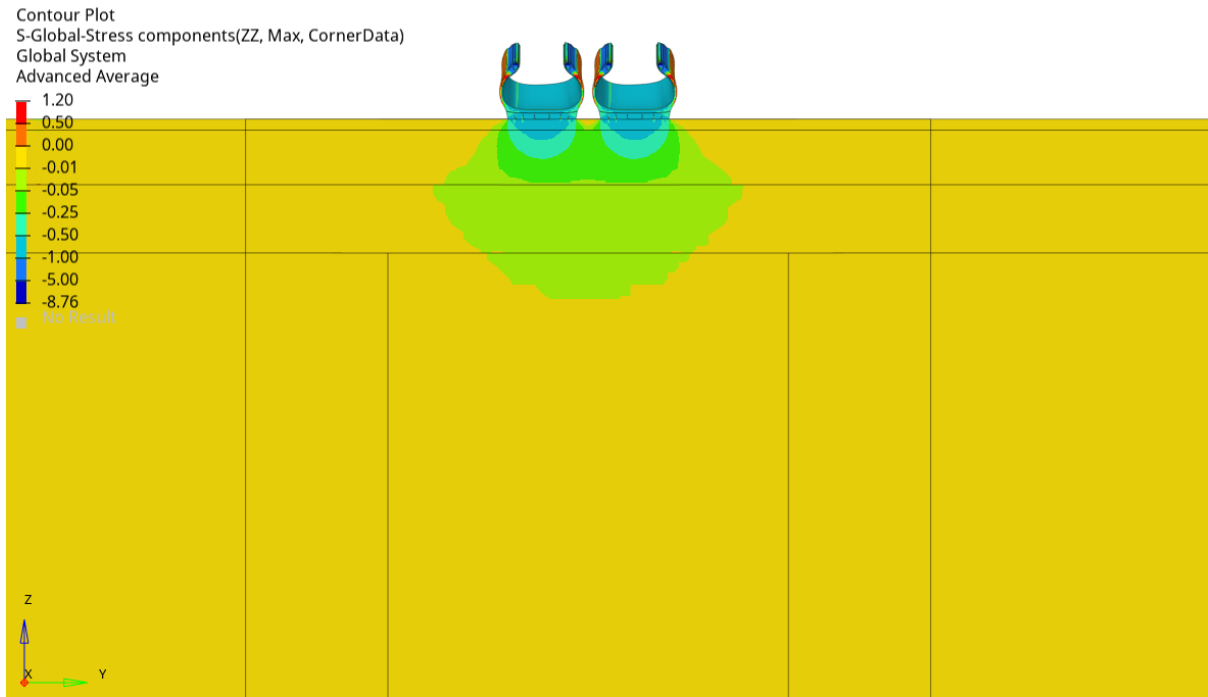
- D = a helyettesítő kör átmérője [cm]
- F = a kerékterhelés [kN]
- p = a gumibroncs belső nyomása [bar]

Mivel a (12) összefüggés szerint q a p függvénye, ezért a (13) összefüggésben a $p = q$ helyettesítéssel már nagyon pontosan megkapjuk a keresett helyettesítő kör a sugarát:

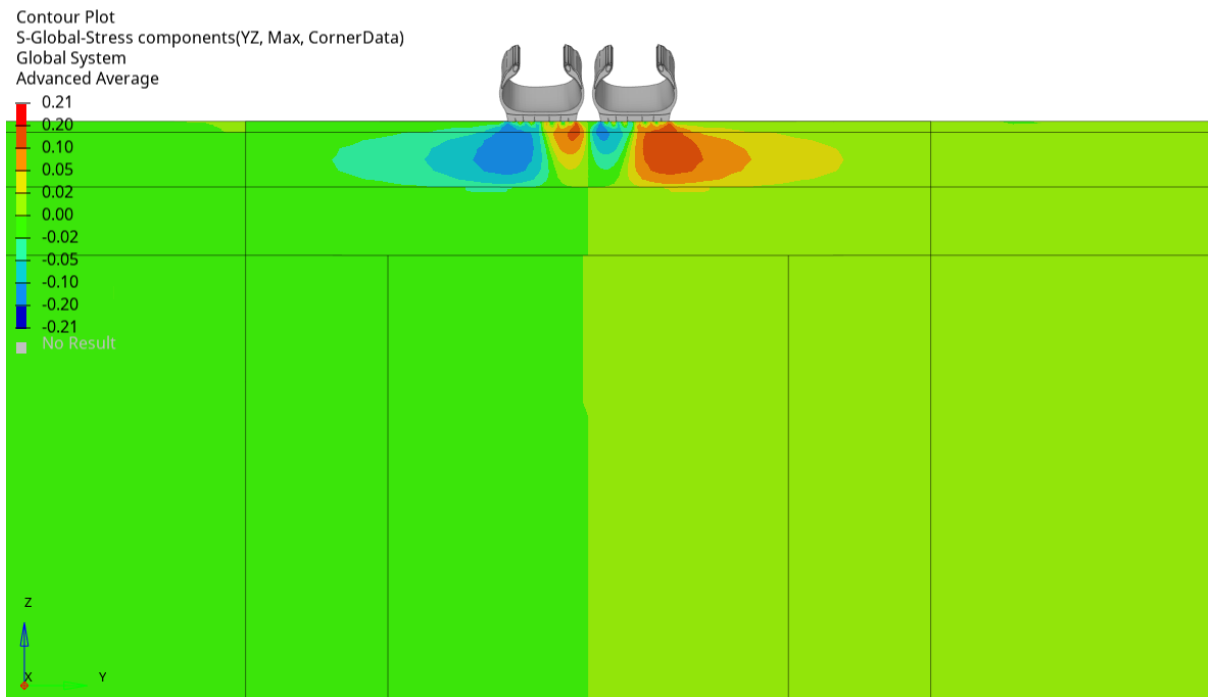
$$a \approx 562,5\sqrt{F/q} \tag{14}$$

ahol a mm-ben és q kPa-ban van értelmezve. A (14) összefüggés az 5. táblázat adatait tökéletesen visszaadja. Baksay (1974) az abroncslenyomat felületének tényleges megmérése alapján számította ki a helyettesítő kör méreteit és állította fel összefüggését, amit a mi végeelemes szimulációnk is megerősített.

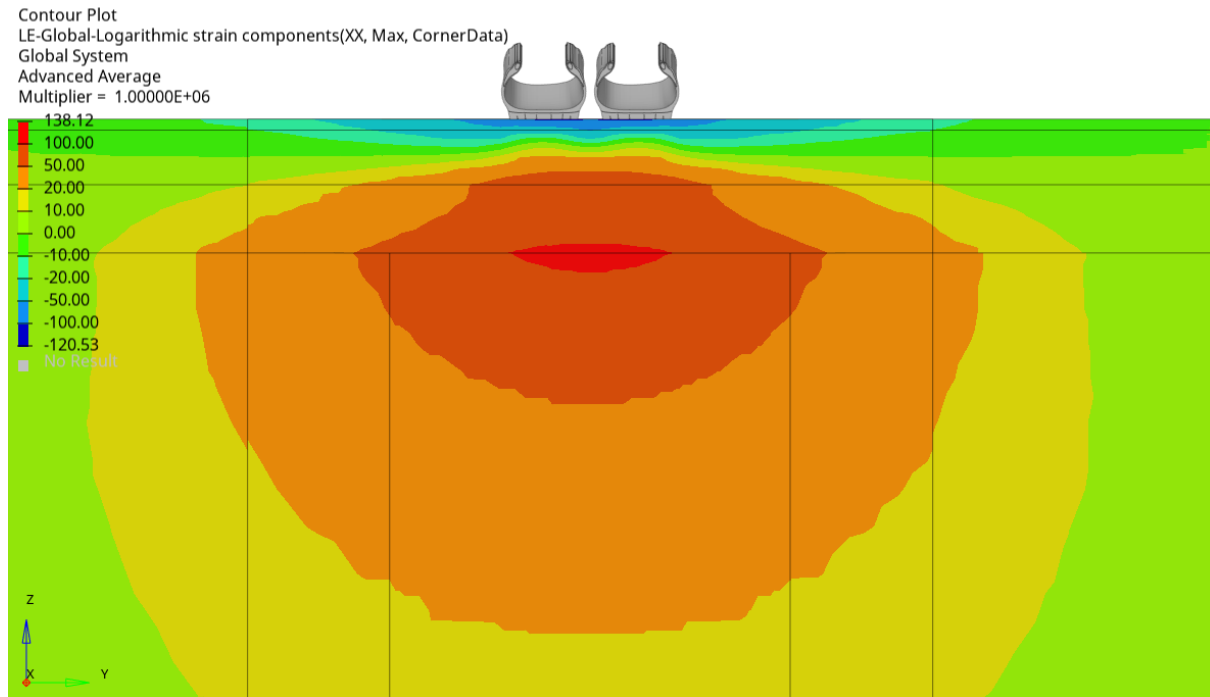
Az átlagos q kontaktnyomások ismeretében a WESLEA programmal kiszámoltuk a hajlékony és félmerev szerkezetek kritikus pontjaiban (A, B, C) az igénybevételeket, és azokat összehasonlítottuk az ikerbronz végeelem kontaktszimuláció eredményeivel (6. táblázat). A legnagyobb eltéréseket a 6. táblázat adataiban a függőleges u_{zz} elmozdulásoknál, vagyis a behajlásoknál találtuk (A pont). Mind a két vizsgált szerkezetnél a végeelem pályaszerkezeti modell – a végtelen elemek ellenére is – jelentősen kisebb (hajlékony 40%, félmerev 50%) behajlásokat eredményez, mint a rugalmas rétegek elméletén alapuló számítás. Ennek egyik magyarázata, hogy ikerbronzok esetén a maximális elmozdulás nem a terhelés szimmetriatengelyében, hanem az egyes kerekek tengelyében lép fel, amit a 10. ábra függőleges normális σ_{zz} nyomófeszültség eloszlása is jól igazol. Másrészt a Burmister (1945a; 1945b; 1945c) elméletén alapuló WESLEA program a függőleges fajlagos alakváltozásokat a végtelenig összegzi, így az a valósághoz képest nagyobb elmozdulásokat ad. A behajlásoknál tapasztalt nagy eltérésekre leginkább a függőleges alakváltozáson alapuló teherbírásmérési módszerek pl. Benkelman-gerenda, Lacroix-mérőkocsi vagy Curviameter eredményeinek kiértékelésénél kell odafigyelnünk (Tóth, 2007; Tóth és Tóth, 2008).



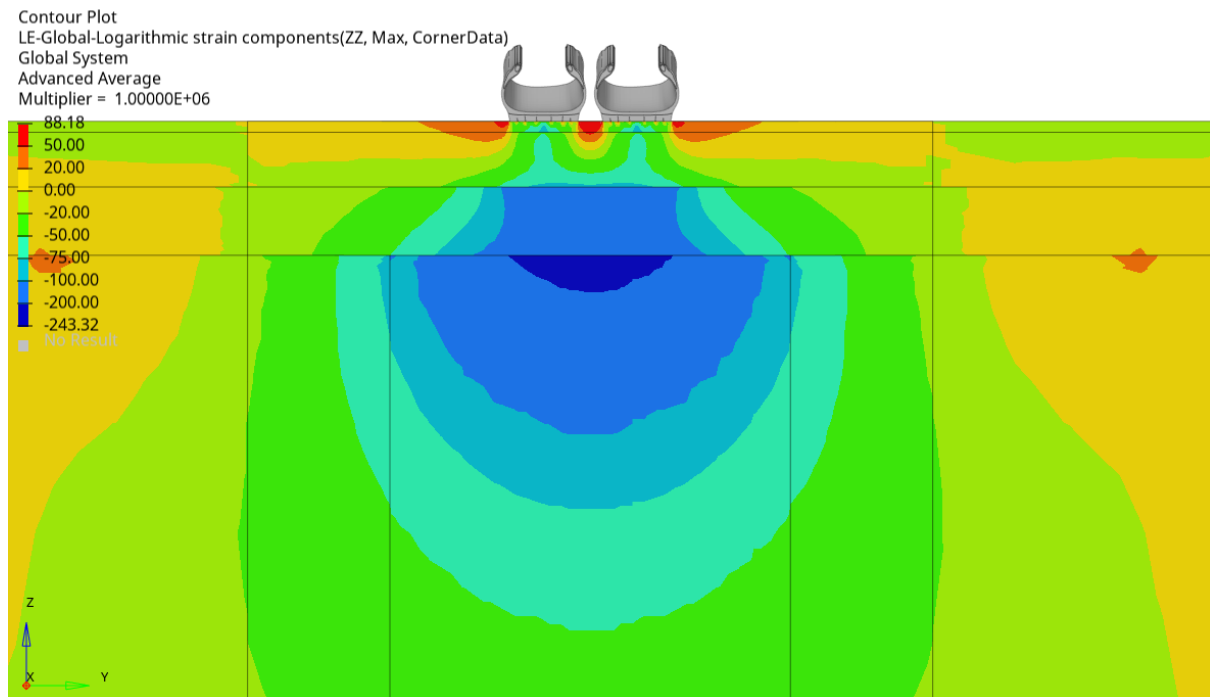
9. ábra. A függőleges normális σ_{zz} nyomófeszültségek eloszlása (kifelé mutató (húzó-) erő pozitív, a befelé mutató (nyomó-) erő negatív előjelű), hajlékony útpályaszerkezet, kerékterhelés 2×25 kN, gumiabroncsnyomás 730 kPa.



10. ábra. A τ_{xy} nyírófeszültségek eloszlása (a pozitív normálerő irányát 90° -kal az óramutató járásával megegyezően elforgatva kapjuk a pozitív irányt, ellenkezően a negatívát), hajlékony útpályaszerkezet, kerékterhelés 2×25 kN, gumiabroncsnyomás 730 kPa.



11. ábra. A vízszintes ϵ_{xx} fajlagos alakváltozások eloszlása (a nyúlást a pozitív, míg az összenyomódást a negatív előjel jelzi), hajlékony útpályaszerkezet, keréktérhelés 2×25 kN, gumiabroncsnyomás 730 kPa.



12. ábra. A függőleges ϵ_{zz} fajlagos alakváltozások eloszlása (a nyúlást a pozitív, míg az összenyomódást a negatív előjel jelzi), hajlékony útpályaszerkezet, keréktérhelés 2×25 kN, gumiabroncsnyomás 730 kPa.

| F/2 [kN] | q [kPa] | Ikerabroncs (VEM) | | | | Helyettesítő körtárcsa (MLE) | | |
|--|---------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------------------|--------------|--------------|
| | | A [μm] | B [μstrain] | | C [μstrain] | A [μm] | B [μstrain] | C [μstrain] |
| | | u_{zz} | ϵ_{xx} | ϵ_{yy} | ϵ_{zz} | u_{zz} | ϵ_t | ϵ_v |
| A hajlékony útpályaszerkezetben ébredő igénybevételek | | | | | | | | |
| 17,5 | 391 | 190 | -64,23 | -37,33 | 172,79 | 310 | -68,83 | 195,19 |

| | | | | | | | | |
|---|-----|-----|---------|--------|--------|-----|---------|--------|
| 20,0 | 413 | 217 | -72,65 | -43,00 | 196,97 | 352 | -75,76 | 221,19 |
| 22,5 | 431 | 244 | -80,73 | -48,67 | 220,97 | 394 | -82,27 | 246,77 |
| 20,0 | 440 | 217 | -73,05 | -42,19 | 196,69 | 354 | -78,34 | 222,87 |
| 22,5 | 469 | 243 | -81,51 | -47,80 | 220,82 | 397 | -86,81 | 249,89 |
| 25,0 | 471 | 270 | -89,68 | -53,42 | 244,75 | 439 | -93,68 | 275,79 |
| 22,5 | 484 | 242 | -81,71 | -46,99 | 220,25 | 398 | -87,58 | 250,38 |
| 25,0 | 516 | 269 | -90,18 | -52,56 | 244,31 | 441 | -96,19 | 277,48 |
| 27,5 | 510 | 296 | -98,42 | -58,14 | 268,24 | 483 | -102,56 | 303,03 |
| 25,0 | 530 | 268 | -90,17 | -51,71 | 243,31 | 442 | -96,92 | 277,95 |
| 27,5 | 560 | 294 | -98,63 | -57,24 | 267,32 | 485 | -105,41 | 304,96 |
| 30,0 | 557 | 321 | -106,92 | -62,77 | 291,21 | 527 | -111,93 | 330,61 |
| A félmerev útpályaszerkezetben ébredő igénybevételek | | | | | | | | |
| 17,5 | 391 | 125 | -29,71 | -14,01 | 110,34 | 249 | -32,34 | 130,02 |
| 20,0 | 413 | 143 | -33,51 | -16,28 | 125,73 | 284 | -35,94 | 149,88 |
| 22,5 | 431 | 161 | -37,12 | -18,57 | 140,97 | 318 | -39,32 | 167,48 |
| 20,0 | 440 | 143 | -33,78 | -15,73 | 125,59 | 285 | -36,76 | 150,69 |
| 22,5 | 469 | 160 | -37,61 | -17,97 | 140,95 | 320 | -40,57 | 168,75 |
| 25,0 | 471 | 178 | -41,27 | -20,22 | 156,16 | 353 | -43,41 | 185,80 |
| 22,5 | 484 | 159 | -37,76 | -17,43 | 140,62 | 320 | -41,03 | 169,20 |
| 25,0 | 516 | 177 | -41,60 | -19,64 | 155,94 | 355 | -44,92 | 187,34 |
| 27,5 | 510 | 195 | -45,32 | -21,87 | 171,15 | 388 | -47,47 | 204,08 |
| 25,0 | 530 | 176 | -41,65 | -19,11 | 155,33 | 356 | -45,35 | 187,77 |
| 27,5 | 560 | 194 | -45,49 | -21,29 | 170,61 | 390 | -49,16 | 205,83 |
| 30,0 | 557 | 211 | -49,23 | -23,49 | 185,81 | 424 | -51,80 | 222,66 |

6. táblázat: A kritikus igénybevételek a vizsgált pontokban az ikerabroncs végeelem szimuláció (VEM) és a helyettesítő körtárcsamodell (MLE) alapján.

A kialakuló τ_{xy} nyírófeszültségeloszlás szimmetrikus, ahol a szimmetriatengely a két abroncs között van, maximuma a kopóréteg alatt, a kerékterhelés szélén lép fel (11. ábra), ami a nagyszilárdságú kötőréteg fontosságára hívja fel a figyelmet. Az aszfaltréteg alsó szálában a B pontban ébredő vízszintes x- és y-irányú ε_{xx} és ε_{yy} fajlagos nyúlások értékei az ikerabroncs végeelem modellben jelentősen eltérnek egymástól ($\varepsilon_{xx} > \varepsilon_{yy}$), míg a helyettesítő tárcsamodellnél – a terhelési szimmetriából következően – megegyeznek egymással ($\varepsilon_t = \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$). A méretezés szempontjából a mértékadó, a haladó kerék hosszmetsetével megegyező ε_{xx} vagy ε_t fajlagos nyúlásértékek fontosak a számunkra. A végeelem szimuláció és a WESLEA program eredményei mind a két szerkezet típus esetében nagyon szoros, kb. 5-8%-os eltéréssel mutattak egyezést, mivel a 12. ábra alapján az ikerabroncs elrendezésnél is a terhelés tengelyében ébrednek a legnagyobb nyúlások. A földműréteg tetején a C pontban ébredő függőleges ε_{zz} vagy ε_v fajlagos összenyomódásoknál már magasabb, kb. 10-15%-os eltérést tudunk kimutatni az analitikus megoldás javára, de ezt még mindig igen jó egyezésnek mondhatjuk. A 13. ábra alapján az ikerabroncs elrendezésnél nem az egyes kerekek tengelyében, hanem a terhelés szimmetriatengelyében lép fel a maximális fajlagos ε_{zz} összenyomódás. A 6. táblázat adatai alapján az állapítható meg, hogy az aszfaltrétegek fáradási (B pont) és az altalaj-összenyomódási (C pont) kritériumokhoz a mértékadó igénybevételeket az ikerabroncs terhelést helyettesítő tárcsamoddellel jól meg lehet becsülni, ha a q átlagos kontaktfeszültségeket reálisan választjuk meg. A lehajlási kritériumhoz szükséges mértékadó behajlás (A pont) számításánál, már nem igaz ez a megállapítás.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az ABAQUS programban sikerült több lépésen keresztül felépítenünk a gumiabroncs-útburkolat érintkezési kapcsolatának komplex végeelem modelljét. A kiindulást a gumiabroncs 2D-s tengelyszimmetrikus modellje adta, amivel az abroncs felfújását és keréktárcsára feszítését tudtuk szimulálni. A következő lépésben a 2D-s tengelyszimmetrikus modelltől létrehoztuk a 3D-s teljes

testmodellt, ami az ABAQUS programban egyetlen paranccsal megoldható. Az így keletkezett 3D-s hálóra átvettítettük a tengelyszimmetrikus modell feszültségi állapotát, majd egyensúlyi állapotba helyeztük azt. A gumiabroncs után következett az útpályaszerkezetek végeelem modelljének elkészítése. Az útpályaszerkezetek legalsó rétegét (a földművet) végtelen elemekkel modelleztük, így jelentősen tudtuk csökkenteni a szükséges végeelemek számát és a számítási időt. Meghatároztuk a gumiabroncs-útburkolat kontaktszimulációhoz a kontaktpárokat és az interakciós tulajdonságokat. Végül az ikerabroncs kerékterhelést ráhelyeztük a vizsgált hajlékony és félmerev útpályaszerkezetekre. A létrejövő kontaktlenyomatok és kontaktfeszültségek jól visszaadták a szakirodalomban közölt értékeket. A végeelem szimuláció elkészítésében nagy segítségünkre volt az ABAQUS program kézikönyve (Dassault Systèmes, 2014), amiben rendkívül sok hasznos információt és egyszerűbb példákat is találunk. Nehézséget okozott viszont a gumiabroncs modell összeállításánál, hogy a fellehető források nagy részében hiányos a dokumentáció, aminek egy része valószínűleg a nem publikus gyártói információkkal magyarázható.

Mivel a szimuláció eredményei, vagyis a kontakt feszültségek és lenyomatok jól egyeztek a szakirodalmi adatokkal, ezért a továbbiakban kapcsolatot kerestünk az átlagos q kontaktnyomás, az F kerékterhelés és a p gumiabroncsnyomás között. Vizsgálataink azt mutatták, hogy Van Vuuren (1974) laboratórium mérések alapján felállított összefüggése még mindig jól használható az átlagos q kontaktfeszültség számítására, mivel a túlterhelt abroncsokra jellemző nem egyenletes teherelosztás következtében ébredő feszültségcsúcsok az útburkolat felszíne alatt 5-8 centiméterre már kiegyenlítődnek. A kontaktlenyomatokkal egyenértékű helyettesítő kör sugarát Baksay (1974) által javasolt (13) összefüggés pontosan megadja a $p = q$ helyettesítéssel. Az átlagos q kontaktfeszültség és a helyettesítő kör a sugarának ismertében összehasonlító számításokat végeztünk az ikerabroncs végeelem szimuláció és a helyettesítő körtárcsamodell között. A legnagyobb eltérést a központi behajlásnál találtuk, az útpályaszerkezetek többi vizsgált pontjában a végeelem szimuláció eredményei jó egyezést mutattak a WESLEA program számításaival. Ezért az aszfaltréteg fáradási és az altalaj-összenyomódási kritériumokhoz a mértékadó igénybevételeket a helyettesítő körtárcsamoddellel számíthatjuk, ha a q átlagos kontaktfeszültséget ismerjük.

Jelen munkában bemutatott gumiabroncs végeelem modell elég összetett volt az érintkezési kapcsolat részletes elemzéséhez, de megfelelő anyagparaméterekkel a modell további vizsgálatokhoz is felhasználható, mint amilyen például: a használat közbeni hőképződés (termikus kölcsönhatás), a gördülési zaj (noise, vibration, and harshness, NVH), a vízre felúszás (aquaplaning) vagy az abroncskopás jelensége. Az útpályaszerkezetek végeelem modellje szinte változatlan felépítése mellett továbbfejleszhető a viszkoelasztikus (vagy akár a viszkoelasztoplastikus) anyagmodell és a rétegek közötti elmozdulás figyelembevételével. Az ilyen irányú fejlesztésekkel pedig a jövőben olyan „virtuális útpályaszerkezet labor” alakítható ki, amivel a nagyon költséges helyszíni vizsgálatok jelentős köre kiváltható vagy kiegészíthető lesz, valamint a vitás szakmai kérdések gyors megválaszolására nyílik lehetőség.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikáció elkészítését az EFOP-3.6.2-16-2017-00018 („Termeljünk együtt a természettel - az agrárerdészet mint új kitörési lehetőség”) projekt támogatta.

7. IRODALOMJEGYZÉK

Adorjányi, K. 2009: Bemenő paraméterek bővítése az aszfaltburkolatú pályaszerkezetek méretezésénél. *Közlekedésépítési szemle* 59 (7): 11–17.

Behroozinia, P., Seyedmeysam, K., Saied, T. & Reza, M. 2020: „An Investigation Towards Intelligent Tyres Using Finite Element Analysis”. *International Journal of Pavement Engineering* 21 (3): 311–21. <https://doi.org/10/ghcp2m>

Boromisza, T. 1997: *Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezésének gyakorlata: Méretezési Praktikum*. Közúti Közlekedési Füzetek 16. Budapest: Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium.

Brinson, Hal F. & L. Catherine, B. 2015: *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity*. Boston, MA: Springer US <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7485-3>

Burmister, D. M. 1945a: The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems. I. *Journal of Applied Physics* 16 (2): 89–94. <https://doi.org/10/cvd4kk>

———. 1945b: The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. II. *Journal of Applied Physics* 16 (3): 126–27. <https://doi.org/10/b9zg45>

———. 1945c: The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. III. *Journal of Applied Physics* 16 (5): 296–302. <https://doi.org/10.1063/1.1707590>

Dassault Systèmes. 2014: Abaqus 6.14 Online Documentation. 2014. április 23. <http://ivt-abaqusdoc.ivt.ntnu.no:2080/texis/search/?query=wetting&submit.x=0&submit.y=0&group=bk&CDB=v6.14>.

De Beer, M., Fisher, C. & Jooste, F. J. 1997: Determination of Pneumatic Tyre/Pavement Interface Contact Stresses Under Moving Loads and Some Effects on Pavements with Thin Asphalt Surfacing Layers. In *Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Seattle Usa; August 10-14, 1997: Paper*, szerkesztette H. J Ertman Larsen, 1:179–227. Roskilde: Road Directorate, Danish Road Institute.

Duncan, J. M., Monismith, C. L. & Wilson, E. L. 1968: Finite Element Analyses of Pavements. *Highway Research Record* 228: 18–33.

Fazekas, B. & Goda. T. 2017: Gumiszerű anyagok hiper-viszkoelasztikus anyagmodell paramétereinek meghatározása. *Gép LXVIII.* (3): 54–57.

Alan Neville, G., & Walter, J. D. 2006: *The Pneumatic Tire*. DOT HS 810 561. The University of Akron. http://works.bepress.com/joseph_walter/7/.

Hernandez, J. A., Gamez, A., Shakiba, M. & Al-Qadi, I. L. 2017: Numerical Prediction of Three-Dimensional Tire-Pavement Contact Stresses. Technical Report ICT-17-004. Texas A&M University. <http://hdl.handle.net/2142/95142>.

Jeong, K. M. 2016: Prediction of Burst Pressure of a Radial Truck Tire Using Finite Element Analysis. *World Journal of Engineering and Technology* 04 (02): 228–37. <https://doi.org/10/gf9tdc>

Kakucs, A. 2020: A végeelem-módszer alapjai. Jegyzet. Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem.

Kennedy, R. H. 2003: Experiences with Cylindrical Elements in Tire Modeling. In *ABAQUS Users' Conf*, 247. http://www.simulia.com/download/solutions/automotive_cust%20references/tires_experience_auc03_hankook.pdf.

Kézdi, Á. 1954: *Talajmechanika II*. Budapest: Tankönyvkiadó.

Lawton, W. L. 1957: Static Load Contact Pressure Patterns Under Airplane Tires. In *Highway Research Board Proceedings*, 36:233–39. Highway Research Board.

Lister, N. W. & Nunn, D. E. 1968: *Contact Areas of Commercial Vehicle Tyres*. London: Transport and Road Research Laboratory. <https://trl.co.uk/sites/default/files/LR172.pdf>.

Madocsai, G., Veress, Á. & Palkovics, L. 2011: Gumialkatrészek viselkedésének vizsgálata jármű-mechatronikai rendszerekben. In *Innováció és Fenntartható Felszíni Közlekedés 2011*, 21–33. Budapest.

McCullough, B. F., & Boedecker, K. J. 1969: Use of Linear-Elastic Layered Theory for the Design of CRCP Overlays. *Highway Research Record* 2: 1–13.

Molnár, L. 2011: *CAD alapjai*. EDUTUS Főiskola.

Nakajima, Y. 2019: *Advanced Tire Mechanics*. Singapore: Springer [Singaporehttps://doi.org/10.1007/978-981-13-5799-2](https://doi.org/10.1007/978-981-13-5799-2)

Nemesdy, E. 1992: Az új magyar típus-útpályaszerkezetek mechanikai méretezésének háttere. *Közlekedésépítés- és mélyépítéstudományi szemle: a Közlekedéstudományi Egyesület lapja* 42 (8): 293–306.

Scharle, P. & Szilágyi, Gy. 1986: *A végeelem-módszer vegyes analitikus eljárásai*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.

Seouyoung, C., Tóth, Cs. & Soós, Z. 2018: Finite Element Method Analysis for Mechanistic Design in Flexible Pavement, Review: From How to Build a Material in FE Analysis to Complexity in Reality. *Építőanyag - Journal of Silicate Based and Composite Materials* 70 (6): 204–8. <https://doi.org/10/gfvbkb>

Soós, Z. & Tóth, Cs. 2016: Simple Overlay Design Method for Thick Asphalt Pavements Based on the Method of Equivalent Thicknesses. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, december. <https://doi.org/10/gfkpqb>

Tamás, P., Bojtos, A., Décei-Paróczy, A. & Fekete, T. R. 2014: *Végelem módszerek*. Budapest: BME MOGI.

Tóth, Cs. 2007: A teherbíróképesség meghatározásának ellentmondásai és lehetőségei. *Közúti és Mélyépítési Szemle* 57 (8): 13–20.

Tóth, Cs. & Tóth, J. 2008: „Útpályaszerkezetek roncsolásmentes diagnosztikai lehetőségei”. *Közúti és Mélyépítési Szemle* 58 (5–6): 10–15.

Van Blommestein & Willem, B. 2016: Experimentally Determined Material Parameters for Temperature Prediction of an Automobile Tire Using Finite Element Analysis. PhD Thesis, Stellenbosch, South Africa: Stellenbosch University.

Van Vuuren, J. D. 1974: Relationship Between Tire Inflation Pressure and Mean Tire Contact Pressure. *Transportation Research Record* 523: 76–87.

Wang, H. 2011: Analysis of Tire-Pavement Interaction and Pavement Responses Using a Decoupled Modeling Approach. PhD Thesis, Urbana, Illinois: College of the University of Illinois.

Wang, W., Shan, Y., & Shugao, Z. 2013: Experimental Verification and Finite Element Modeling of Radial Truck Tire Under Static Loading. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 32 (7): 490–98. <https://doi.org/10.1177/0731684412474998>

Yazdandoost, F. & Saied, T. 2016: Finite Element Tyre Model for Antilock Braking System Study. *International Journal of Vehicle Design* 72 (3): 248–261.

Yoder, Eldon J. 1959. *Principles of Pavement Design*. New York: John Wiley and Sons, Inc.

Zhang, Z., Hongxun, F., Xuemeng, L., Xiaoxia, C., & Di, T. 2020: Comparative Analysis of Static and Dynamic Performance of Nonpneumatic Tire with Flexible Spoke Structure. *Strojniški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 66 (7–8): 458–66. <https://doi.org/10/ghcfjh>

Zhou, H., Guolin, W., Yangmin, D., Jian, Y., Chen, L., & Jing, F. 2015: Effect of Friction Model and Tire Maneuvering on Tire-Pavement Contact Stress. *Advances in Materials Science and Engineering* 2015: 1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/632647>

Zsichla, L. 1990: A mértékadó behajlás számítása mechanikai módszerrel. *Közlekedéstudományi és mélyépítéstudományi szemle: a Közlekedéstudományi Egyesület lapja* 40 (10): 370–75.



Tapadásjavító mészhidráttal kezelt alacsony zúzottüveg adagolású AC 11 kopó keverékek teljesítménye a hazai szabályozás alapján

Rosta Szabolcs¹

¹ Széchenyi István Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Műszaki tudományi Kar,
Közlekedéscépesítési és Vízmérnöki Tanszék

E-mail: rosta.szabolcs01@gmail.com

DOI: [10.36246/UL.2020.2.05](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.05)

KIVONAT

Ez a tanulmány Magyarországon közepes forgalmi terhelésű utak esetén alkalmazható AC 11 kopó (F) B 50/70-es aszfaltbeton keverék teljesítményének meghatározásával foglalkozik különböző zúzottüveg adagolások mellett (a kőanyagkeverékre vonatkoztatva 15 m% és 30 m%). Továbbá egy tapadásjavító adalékszer, mészhidrát (a kőanyagkeverékre vonatkoztatva 4 m%) aszfaltkeverékre gyakorolt hatását hivatott feltárni. A keverékeket laboratóriumi keveréssel állítottuk elő, törekedve arra, hogy azok szemeloszlásai minél jobban megközelítsék egymást, az összehasonlíthatóság érdekében. Első lépésként ezen keverékek optimális bitumentartalmai kerültek meghatározásra Marshall-eljárással, legalább 3 különböző bitumentartalom adagolás mellett. Ezt követően vizsgáltuk az optimális bitumentartalmú keverékek vízérzékenységet, merevséget és plasztikus deformációs hajlamát az *MSZ EN 12697-12:2009 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Próbatetek vízérzékenysége és az MSZ EN 12697-26:2012 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Merevség, C melléklet hasító-húzó vizsgálat, illetve MSZ EN 12697-22:2003 A1.2008 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Keréknyomképződés kiskerekű berendezés „B” módszer szerint*. A tanulmány végén a laboratóriumi vizsgálatok kiértékelését figyelembe véve egy ajánlás található a fentiek szerint előállított üvegaszfalt keverékek felhasználhatóságára, a hazai szabályozás értelmében.

Kulcsszavak: üvegaszfalt, zúzott hulladéküveg, mészhidrát, vízérzékenység, plasztikus deformációs hajlam

ABSTRACT

This study deals with the determination of the performances of AC 11 kopó (F) B 50/70 asphalt mixture at different crushed glass dosages (15 m% and 30 m% based on the aggregate mass), which is used in Hungary for surface courses in case of medium traffic loads. Furthermore, it is intended to reveal the effect of hydrated lime as an anti-stripping additive (4 m% based on the aggregate mass), on the asphalt mix. The mixtures were prepared by laboratory mixing with the aim of making their partial size distribution very similar to each other in the field of comparability. As a first step, the optimal bitumen contents of these mixtures were determined by the Marshall method with at least 3 different bitumen contents. Subsequently, the water sensitivity, stiffness and plastic deformation behaviour of the mixtures with optimal bitumen content were investigated by the *MSZ EN 12697-12: 2009 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of specimen and MSZ EN 12697-26: 2012 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. Annex C IT-CY, and MSZ EN 12697-22: 2003 A1.2008 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracing test. Small wheel equipment, according to method "B"*. At the end of the study, taking into account the evaluation of the laboratory tests, there is a recommendation for the usability of the glass asphalt mixtures produced as described above, based on the Hungarian regulation.

Keywords: crushed waste glass, glassphalt, hydrated lime, water sensitivity, plastic deformation behaviour

Rosta Szabolcs

Széchenyi István Egyetem Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola PhD hallgatója (Közlekedésepítési és Vízmérnöki Tanszék). A Duna Aszfalt Zrt. innovációs főmérnöke.

1. BEVEZETÉS: ZÚZOTT HULLADÉKÜVEG ÚJRAHASZNOSÍTÁS LEHETŐSÉGEI

A gyors gazdasági növekedés és a folyamatosan növekvő fogyasztás mellett nagy mennyiségű üveghulladék keletkezik. Az ökológusok számára nem feltétlenül a meglévő hulladék jelenti a legfőbb problémát, hanem az, ha hiányoznak azok az intézmények és technológiák, amelyek segítségével a hulladék keletkezését el lehetne kerülni, és amelyekkel meg lehetne oldani a hulladék visszaforgatását és újrahasznosítását. A hulladékgazdálkodás a 21. század legjelentősebb feladata, amely magába foglalja a hulladék keletkezésének megelőzését, csökkentését, a keletkezett hulladék elkülönítését, gyűjtését, kiválogatását és hasznosítását, valamint a nem hasznosítható hulladék környezetszennyezés nélküli átmeneti tárolását és ártalmatlanítását (Jony et al., 2011).

Ezen feladatok megoldására már elméletek, modellek jelentek meg, amelyet az úgynevezett 4R környezetvédelmi intézkedési program fogalmaz meg hierarchiába rendezve:

- **Reduce:** a hulladék keletkezési helyeinek felkutatása és a hulladék mennyiségének csökkentése a hulladékok, esetleg veszélyes anyagoknak más, kevésbé problémás anyagokkal történő helyettesítése.
- **Reuse:** hulladék *újrahasználat*a. Különösebb fizikai beavatkozás nélkül ugyanarra a célra, ugyanarra a tevékenységre használjuk.
- **Recycling:** Az anyagok szelektív gyűjtése után azok *újrahasznosítása*a. Az anyagában történő hasznosítás, hulladékból újra terméket állítunk elő.
- **Recovery:** A hulladéknak vagy valamely összetevőjének a termelésben vagy szolgáltatásban történő felhasználása. Ez a folyamat irányulhat hulladékban lévő különböző anyagok visszanyerésére, újrafeldolgozására (anyagában történő hasznosítására), vagy a hulladék anyagaiban rejlő energia felhasználására (energetikai hasznosítás).

Bármely infrastruktúra ágazat építése kapcsán számos hulladék hasznosítási módszer terjedt már el világszerte. Ezek előnye nem csak az, hogy csökkentik a hulladékok mennyiségét, hanem jelentős megtakarításokat lehet velük elérni az új építési anyagokkal szemben (Hawken et al., 2013).

Az üveg használatba történő visszaforgatásának két módja van. Az első a visszaváltás, amikor szortírozzák szín szerint a beérkező üvegeket, majd megfelelő tisztítás és fertőtlenítés után újratöltik azokat (*újrahasználat*). Másik, amikor a vegyes hulladékot szortírozzák színük és fajtájuk szerint, megtisztítják, majd beolvasztásra kerülnek, majd új üvegterméket állítanak elő belőlük (*újrahasznosítás*). Jelenleg ezen felhasználás a legelterjedtebb a világon. Bár az összegyűjtött hulladéküveg összmennyisége nagy lehet, azonban a teljes mennyiségnek csak a töredékét lehet új üveg előállításához felhasználni az újrafeldolgozás szigorú korlátai miatt. Az újrafeldolgozás során figyelembe kell venni a hulladéküveg származását. Az üvegeket hagyományosan különböző színekben kell összegyűjteni és rendezni. A nem szétválogatható üvegek jellemzően törnek vagy összekeverednek az összegyűjtési fázisban olyan hulladéküveg anyagokkal, melyek tartalmaznak szennyező anyagokat (fa, műanyag, fém, papír, kavics, kerámia). Ezen frakciókat már nem mindig gazdaságos szétválogatni, viszont technikailag alkalmatlanok az új üveg gyártására. Mindössze 5-20 g nem újrahasznosítható üveg elegendő 1 tonna újrahasznosítható üveg szennyezéséhez (Afshinnia et al. 2015). Ezen problémának egyik vonzó megoldása a zúzott hulladéküveg használata építési anyagok alternatívájaként, például aszfaltkeverék alapanyagként. Mint ahogy sok más másodlagos hasznosítási terület az építőiparban, a zúzott hulladéküveg felhasználása nehezen dönthető el, hogy *újrahasználati*, vagy *újrahasznosítási* tevékenység lenne. Általában inkább újrahasznosítás kategóriába sorolják többször, a felhasználási cél

megváltoztatása miatt. Az viszont bizonyos, hogy sok esetben gazdaságosabb megoldást jelenthet, mint az új üveg előállítás. A hazai üvegfeldolgozás helyzetéről és másodlagos hasznosítási lehetőségekről részletesebben a diplomamunkámban számoltam be (Rosta, 2019).

2. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS ÉSZAK-AMERIKAI TAPASZTALATOK

A világon egyre nagyobb problémát jelent az üveghulladékok keletkezése. Hulladéküveg újrahasznosítás egy alternatívája lehet, ha azt megfelelő frakciókra törve és osztályozva az aszfaltkeverékek alapanyagául szolgáló zúzottkövek helyettesítésére használjuk fel. Az ilyen módon gyártott melegen hengerelt aszfaltbeton keverékeket nevezzük üvegaszfaltnak.

A pályaszerkezeti aszfaltrétegekben nedvesség jelenlétében a kötőanyag-szemcse tapadása lecsökkenhet, anélkül, hogy láthatóvá válna a kötés megbomlása, mivel a víz befolyásolhatja a kötőanyag kohéziós erejét. A víz okozta legkorábbi problémák (melyek szélsőséges éghajlat és nagy forgalom esetén még korábban jelentkeznek) a szemek kipergése, hámlás, további kohézió csökkenés következtében felületi repedések, később pedig kátyúk kialakulása.

Zúzott hulladéküveg felhasználása aszfaltkeverékekben az 1960-as évek végétől kezdődött el az Amerikai Egyesült Államokban. Legkorábbról származó kutatás Missouri-Rolla Egyetem egy környezetvédelmi szervezettel folytatott projektje, amelyben 33 db üvegaszfalt (glasphalt) próbaszakaszt építettek. 1969 és 1972 között 19 különböző kanadai és egyesült államokbeli szervezet épített üvegaszfaltot a régióban, ahol az átlagosan adagolt üveg mennyisége 1970-ben 73%-volt míg 1972-ben 46 %-ra csökkent ez a mennyiség. Toledo és New York City voltak az első városok, ahol a legnagyobb mennyiségben üvegaszfaltot használtak fel. Az üvegaszfalt korai használatának nagy része parkolók aszfalt alaprétegei voltak, azonban városi utak és lakó utcák esetében is használták, kisebb mennyiségben kopórétgként is (Chesner et al. 1987).

1983-ban egy Christman nevezetű mérnöki tanácsadó cég dolgozott Connecticut állam néhány városával egy olyan kopórétg kialakításán, amely 50% -ban osztályozott tört üvegből állt. Az 50% -os zúzottüveg keveréket tesztelték. A beépített kopórétg csúszási ellenállás vizsgálata alapján úgy döntöttek, hogy az üvegtartalmat 20-25% közöttire csökkentik. Egy 1991-es Christman-jelentés szerint az üvegburkolatok „elfogadható használhatóságot” biztosítanak (Dembicki, 1992).

1988-ban a New York állam Közlekedési Minisztériuma kísérleti jelleggel épített be New York Cityben üvegaszfaltot 5-15%-os finom rész (<4,75 mm) helyettesítéssel. Brooklynban a New York City tulajdonában lévő és működtetett aszfaltüzem minőségellenőrzési vezetője 1989 után végeztette el a csúszásellenállási teszteket, és az üvegaszfalt megfelelt a normál keverékkel szemben támasztott követelményeknek. Ezt követően 1990-1995 között New York Cityben kb. 250 000 t üvegaszfalt került beépítésre.

1994-ben összesen 6 állam jelentett üveg felhasználását aszfaltkeverék beépítéseknél, azonban 10 másik állam számolt be kutatási tevékenységről üvegaszfalt témakörben. (Maupin, 1998) Üvegaszfalt felhasználása a 2000-es évek elején Egyesült Államok néhány államában (K-i partvidék), Kanada néhány tartományában, Japánban, és néhány Európai országban volt lehetséges, mivel ezekben az országokban, vagy régiókban került valamilyen formában a nemzeti útépítési előírásban a zúzottüveg, mint aszfalt alapanyag (Su et al., 2002).

A kezdeti baltimore-i és New York-i szakaszokon repedések jelentek meg. Ennek kapcsán a 1990 körül vizsgálatokat hajtottak végre, amelyben felülvizsgálták az 1970-es években beépített üvegaszfaltokat. A korai kutatók potenciális problémaként azonosították a lapos és hosszúkás szemcséket, amelyek hozzájárulhatnak a szemek kipergéséhez, tapadóképesség csökkenéséhez, a gyenge csúszásellenálláshoz, a rendellenesen magas gumiabroncsok kopásához és a túlzott csillogáshoz. Mivel az üveg nem képes abszorbeálni a bitument, és mivel az üveg is "hidrofil", a nedvességkárosodás különös aggodalomra ad okot, különösen akkor, ha a magas százalékos arányokat és nagy névleges szemnagyságú üvegzúzalékhalmozokat használnak aszfalt kopórétegek esetén. A korai kutatók közül sokan azt javasolták, hogy mészhidrátot kell a keverékhez adni, ami tapadásjavító tulajdonságokkal rendelkezik. A felülvizsgált adatokból arra a következtetésre jutottak, hogy korai üvegaszfalt

projektekben jellemzően használt magas adagolási mennyiség (a keverék 25 tömegszázalékát meghaladó) és magas névleges szemcseméretű üvegüzalék halmazok (12,7 mm-nél nagyobbak) valószínűleg hozzájárultak a legtöbb, az 1970-es években beépített üvegaszfalt próbaszakaszok kipergési, és repedezési problémáihoz (Chesner et al., 1987; Petrarca, 1988; Hughes, 1990; Chesner, 1992; Dembicki, 1992; Flynn, 1993)

A legfontosabb ajánlásokat és követelményeket az Egyesült Államok Közlekedési Minisztériumához tartozó Szövetségi Autópálya Felügyelet (FHWA) már 1990-ben kiadta, és azóta többször is megújította azt. Számos államban jelenleg is érvényben van. A FHWA legfontosabb előírásai és a korai kutatók megállapításai a következők:

- Az üveg szemcsék lassabban hűlnek le, mint az aggregátumok, azok hővezető képességük különbségei miatt. Ez lehet előnyös tulajdonság hideg időben, mivel több időt biztosít a tömörítésnek. Melegebb időjárás esetén azonban a keverékek instabilak lehetnek az építési hengerek alatt.
- A vizsgált felületek megfelelő csúszásellenállósági tulajdonsággal rendelkeztek.
- Szemeloszlás: kopórétegekben használt zúzottüveg halmazok névleges szemnagysága maximálisan 4,75mm és feleljen meg az AASHTO T27 követelményeinek. Nagyobb névleges szemnagyságú halmazok 4,75-15,3 mm aszfalt alaprétegek keverékeihez alkalmasak.
- Testsűrűség: Az üveg kb. 10-15%-kal alacsonyabb térfogatsúllyal rendelkezik az általánosan használt útépitési zúzottköveknél. Ennek köszönhetően az üvegaszfalt testsűrűsége alacsonyabb, az aszfaltbeton testsűrűségénél, amely nagyobb termelékenységet eredményezhet a kivitelezésnél.
- Mechanikai tulajdonság: az üveg törékeny anyag, a 4,75 mm-nél nagyobb szemcsék tömörítés hatására törhetnek, ezért javasolt kizárólag $D < 4,75\text{mm}$ halmazt használni kopórétegek esetén. Kevésbé érzékeny a nedvességre (0,3% és 0,4% közötti vízfelvétel).
- A csúszásellenállás vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a hulladéküveg burkolatok az ajánlott csúszásellenállás vizsgálati határok közé esnek. Mindazonáltal a nagyobb méretű (>9,5 mm) hosszú lapos szemek nem használhatók, mert azok tömörítés hatására „besimulnak” és rontják a keverék csúszási ellenállását.
- A megfelelően zúzott üveg szögletes alakja és nagy súrlódási szöge (kb. 50 °) hozzájárul a jó oldalirányú stabilitáshoz. Ez pozitív tulajdonság, különösen akkor, ha a keveréket fokozott fékezési és gyorsulási helyszínekre tervezik.
- Az üveg gyenge tapadóképességének javítása érdekében valamilyen tapadásjavító szer alkalmazása javasolt.
- Az AASHTO T283 Lottman teszt alapján igazolni kell minden esetben az üvegaszfalt keverékek megfelelőségét. (Vízérzékenység).
- 15 %-nál nagyobb adagolás esetén már számottevően megnőhet a burkolat fényvisszaverő képessége. Annak mértékét a nagyobb szemek használata még jobban befolyásolja. Esztétikai szempontból kedvező ez a tulajdonság, illetve éjszakai vezetésnél is optikai vezetést tud biztosítani gépjármű sofőrjének. Nedves felületen nappal viszont ez problémát okozhat. (FHWA, 1998)

3. KEVERÉKTERVEZÉS

A szakirodalom tanulmányozását követően meghatároztam a keverékeim típusát, az üvegadagolás mennyiségeit, a tapadásjavítószer típusát és adagolási mennyiségét.

A kutatás során egy AC 11 kopó (F) B 50/70 es keveréket vizsgáltam különböző zúzottüveg adagolással (a köanyagkeverékre vonatkoztatva 15 m% és 30 m%.) Vizsgáltam továbbá egy tapadásjavító szer, a mészhidrát hatását (köanyagkeverékre vonatkoztatva 4 m%). Így 5 különböző keveréket állítottam elő. Első körben meghatároztam ezen keverékek optimális bitumentartalmát

Marshall-eljárással. Majd az optimális bitumentartalmú keverékeken elvégeztem az e-UT 05.02.11:2018- *Útpályaszerkezeti aszfaltburkolatok keverékeinek követelményei* hazai előírásban foglalt teljesítmény vizsgálatokat (1. táblázat). Az előírt követelmények alapján értékelttem az alacsony üvegadagolással készített keverékek felhasználhatóságát különböző forgalmi terhelésű utak esetén.

| AC 11 kopó | | | |
|---|-------------------------------------|---------------|--|
| Tervezési forgalom (F100 millió darab) | 0-0,03 | 0,03-0,3 | 0,3-10 |
| Forgalmi terhelési osztály | A alatt | A, B | C, D, E |
| Igénybevételi kategória | (P) | (N) | (F) |
| Aszfaltkeverék jelzete | (N) | | (F) |
| Megnevezés | Aszfaltkeverék követelményei | | |
| Kötőanyag-tartalom, tömeg%, legalább | 5,3 | | MSZ EN 12 697-1, vagy MSZ EN 12 697-39 |
| Hézagtartalom, V, térfogat%, legalább | 2,5 | | MSZ EN 13 108-20C.1.2,2×50 ütés |
| legfeljebb | 4 | | |
| Vízérzékenység, ITSR, %, legalább | 80 | 80 | MSZ EN 12 697-12 2×35 ütés, 15 °C |
| Maradó alakváltozási ellenállás, PRD _{AIR} , %, legfeljebb | – | 7 | MSZ EN 12 697-33 MSZ EN 12 697-22 kiskerekű, „B” módszer levegőn, 60 °C |
| Merevség, S, MPa, legalább | – | NR, megadandó | MSZ EN 12 697-26 IT-CY: 20 °C, 124 μs |
| Fáradás, ε ₆ , microstrain, legalább | – | NR, megadandó | MSZ EN 12 697-24 2PB-TR: 10 C, 25 Hz, vagy 4PB-PR: 20 °C, 30 Hz |

1. táblázat: AC 11 kopó (N) B 50/70 és AC 11 kopó (F) B 50/70 jelű keverékek követelményei (e-UT 05.02.11:2018).

5 különböző keverék jelölése:

AC 11 kopó (F) B 50/70 jelölése: ¹AC11_0_²

AC 11 kopó (F) B 50/70+15% zúzottüveg jelölése: ¹AC11_15_²

AC 11 kopó (F) B 50/70+30% zúzottüveg jelölése: ¹AC11_30_²

AC 11 kopó (F) B 50/70+15% zúzottüveg + 4% mészhidrát jelölése: ¹AC11MH_15_²

AC 11 kopó (F) B 50/70+30% zúzottüveg + 4% mészhidrát jelölése: ¹AC11MH_30_²

Továbbá keverések során alkalmazott különböző szemeloszlásokat (¹sorszám) és bitumen tartalmakat (²százalék megadása) szintén feltüntettem a jelölésekben. A laboratóriumi vizsgálatokat az Eulab Laboratóriumi és Technológiai Kft. dunakeszi központi laboratóriumában végeztük.

3.1. ALAPANYAGOK ÉS KEVERÉKTERV MEGHATÁROZÁSA

A vizsgálatokhoz a Swietelsky Magyarország Kft. egyik típusvizsgálatát (SW DK 083 2016 AC 11 kopó (F) vettük alapul, amelynek a kővázát eruptív andezites nógrádkövesdi kőanyaghalmoz alkot. A keverékek előállításához OMW B 50/70 típusú utépítési bitument használtunk fel.

| Szita méret (mm) | Áthullott tömegszázalék |
|------------------|-------------------------|
|------------------|-------------------------|

| | Tatabánya Mészköliszt | Calmit Mészhidrát | Nógrádköves d NZ 0/2 | Nógrádköves d NZ 0/4 | Fer-Marik ZÜ 0/5 | Nógrádköves d KZ 4/8 | Nógrádköves d KZ 8/11 |
|--------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 16 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 11,2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 89 |
| 8 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 91 | 17 |
| 5,6 | 100 | 100 | 100 | 100 | 92 | 29 | 5 |
| 4 | 100 | 100 | 100 | 86 | 70 | 2 | 5 |
| 2 | 100 | 100 | 89 | 54 | 50 | 1 | 3 |
| 1 | 100 | 100 | 55 | 31 | 30 | 1 | 3 |
| 0,5 | 100 | 100 | 30 | 15 | 17 | 1 | 2 |
| 0,25 | 100 | 100 | 15 | 6 | 11 | 1 | 2 |
| 0,125 | 98 | 98 | 6 | 1 | 6 | 1 | 2 |
| 0,063 | 87,8 | 79,2 | 1,7 | 0,4 | 4,2 | 0,4 | 1,7 |

2. táblázat: A kőanyag-halmazok, a zúzottüveghalmaz, a töltőanyag és a tapadásjavító töltőanyag szemeloszlásai.

A keverékekhez Fer-Marik Kft.-től származó zúzottüveget vizsgáltam. A zúzottüveg és a többi kőanyagkeverék szemeloszlásai a 2. táblázatban láthatók. A zúzottüveg szemeloszlása kissé durvább a nógrádkövesdi NZ0/4-nél, továbbá az *e-UT 05.01.15:2018- Útépítési kőanyag-halmazok* útügyi műszaki előírás szerinti NZ, KZ, Z 0/4-es és ZK 0/8-as határértékek közé esik, előbbinél durvább, utóbbinál finomabb. A szemeloszlás tulajdonságára utalva a felhasznált zúzottüveg a 0/5-ös jelölést kapta. A töltőanyagként használt Tatabánya mészköliszt és Calmit mészhidrát szemeloszlása alapján elmondható, hogy a mészhidrát szemeloszlása kis mértékben durvább, azonban feleslegesen bitument felvenni képes apró szemek szinte teljesen egyenlő arányban vannak jelen a két töltőanyagban. (3. táblázat) D₁₀ szemmagyság mindkét esetben 0,003 mm finom iszap tartományba esik.

| d _i -nél kisebb szemcsék [%] | homok | | | iszap | | | agyag | | | |
|--|-------|------|-------|-------|------|--------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 0,5 | 0,25 | 0,125 | 0,063 | 0,02 | 0,0063 | 0,002 | D ₆₀ | D ₃₀ | D ₁₀ |
| Calmit Mészhidrát | 100 | 100 | 98 | 79,2 | 77,1 | 26,3 | 0 | 0,011 | 0,007 | 0,003 |
| Tatabánya Mészköliszt | 100 | 100 | 98 | 87,8 | 72,1 | 40,3 | 0 | 0,008 | 0,004 | 0,003 |

3. táblázat: A mészköliszt és mészhidrát agyag iszap tartalmának meghatározása.

Az MSZ EN 1097-6:2013 *Kőanyag-halmazok mechanikai és fizikai tulajdonságainak vizsgálata 6. rész: A testsűrűség és vízfelvétel meghatározása* szerint meghatároztuk a felhasznált alapanyagok testsűrűségeit és vízfelvételeit.

| | Tatabánya Mészköliszt | Calmit Mészhidrát | Fer- Marik ZÜ 0/5 | Nógrádkövesd NZ 0/2 | Nógrádkövesd NZ 0/4 | Nógrádkövesd KZ 4/8 | Nógrádkövesd KZ 8/11 |
|---|--------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| Testsűrűség ρ_a [Mg/m³] | 2,801 | 2,789 | 2,488 | 2,855 | 2,863 | 2,837 | 2,821 |
| Testsűrűség ρ_{ssd} [Mg/m³] | | | 2,455 | 2,751 | 2,759 | 2,74 | 2,737 |
| Vízfelvétel WA₂₄ [%] | | | 0,4 | 2,2 | 2,1 | 2,0 | 1,7 |

4. táblázat: Alapanyagok testsűrűsége és vízfelvétele.

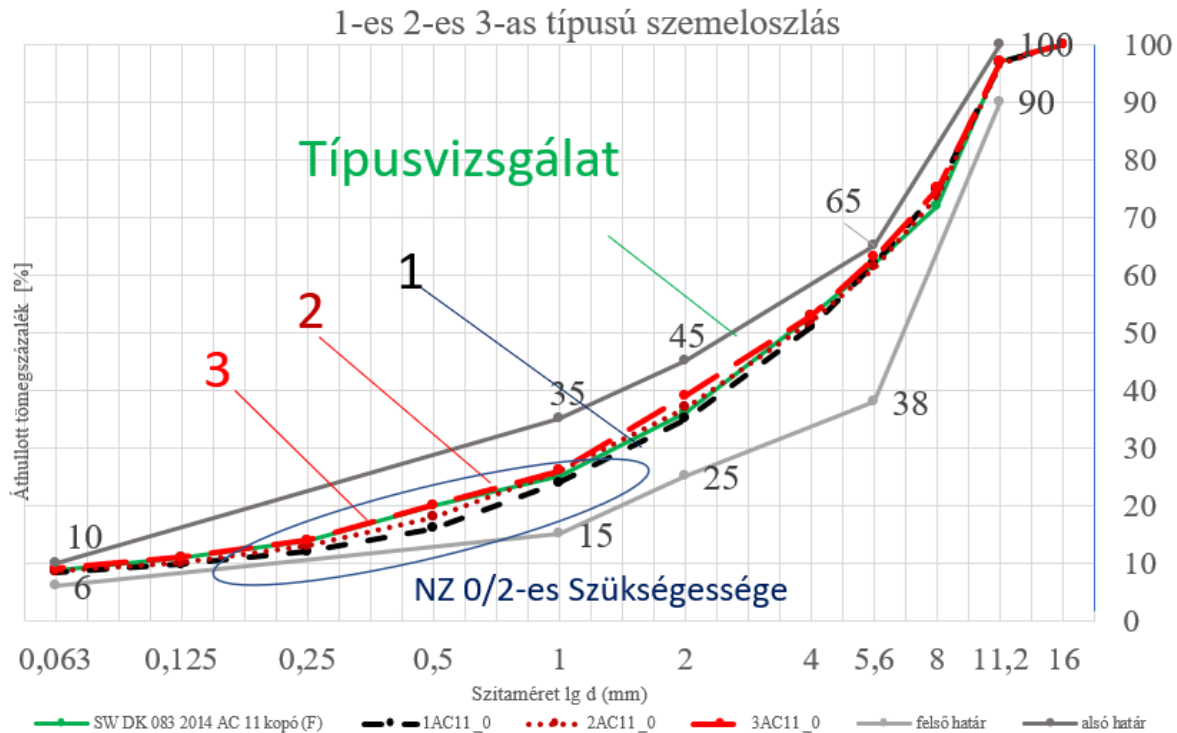
A 4. táblázatból látható, hogy a zúzottüveg testsűrűsége ~13%-kal alacsonyabb az NZ 0/4-es zúzottkő testsűrűségénél, és cca~ 80%-kal alacsonyabb vízfelvétele az összehasonlításban szereplő andezit zúzottkőnél.

3.2. OPTIMÁLIS BITUMENTARTALOM MEGHATÁROZÁSA MARSHALL ELJÁRÁSSAL

Az aszfaltkeverékek optimális bitumentartalmát Marshall-eljárással határoztam meg. A keverékek optimális bitumentartalmát legalább 3 összetétellel előállított próbatestek vizsgálatain alapultak. A

vizsgált jellemzők empirikus jellegűek, elsősorban a hézagtartalom, de emellett egyszerűbb mechanikai tulajdonságok voltak, mint a Marshall-stabilitás és a Marshall-folyás.

A keverékek optimális bitumentartalmának meghatározásához, mindegyik esetben a lépcsőközüket 0,3%-os bitumentartalomra határoztam meg. A referencia szemeloszlást a SW DK 083 2016 AC 11 kopó (F) típusvizsgálatban megadott szemeloszlás adta.



1. ábra: 1-es 2-es 3-as típusú szemeloszlás.

Első lépésben meghatároztam a referenciakeverék optimális szemeloszlását 1-es 2-es 3-as egyre finomodó szemeloszlás közül (1.ábra), majd mindegyiknek az optimális bitumentartalmát 4,9%, 5,2%, 5,5%, 5,8% bitumentartalom mellett. Az optimális bitumentartalmat 3,5-os hézagtartalomra terveztük, azokat kis mértékben korrigáltam a Marshall-vizsgálatokból született eredmények alapján.

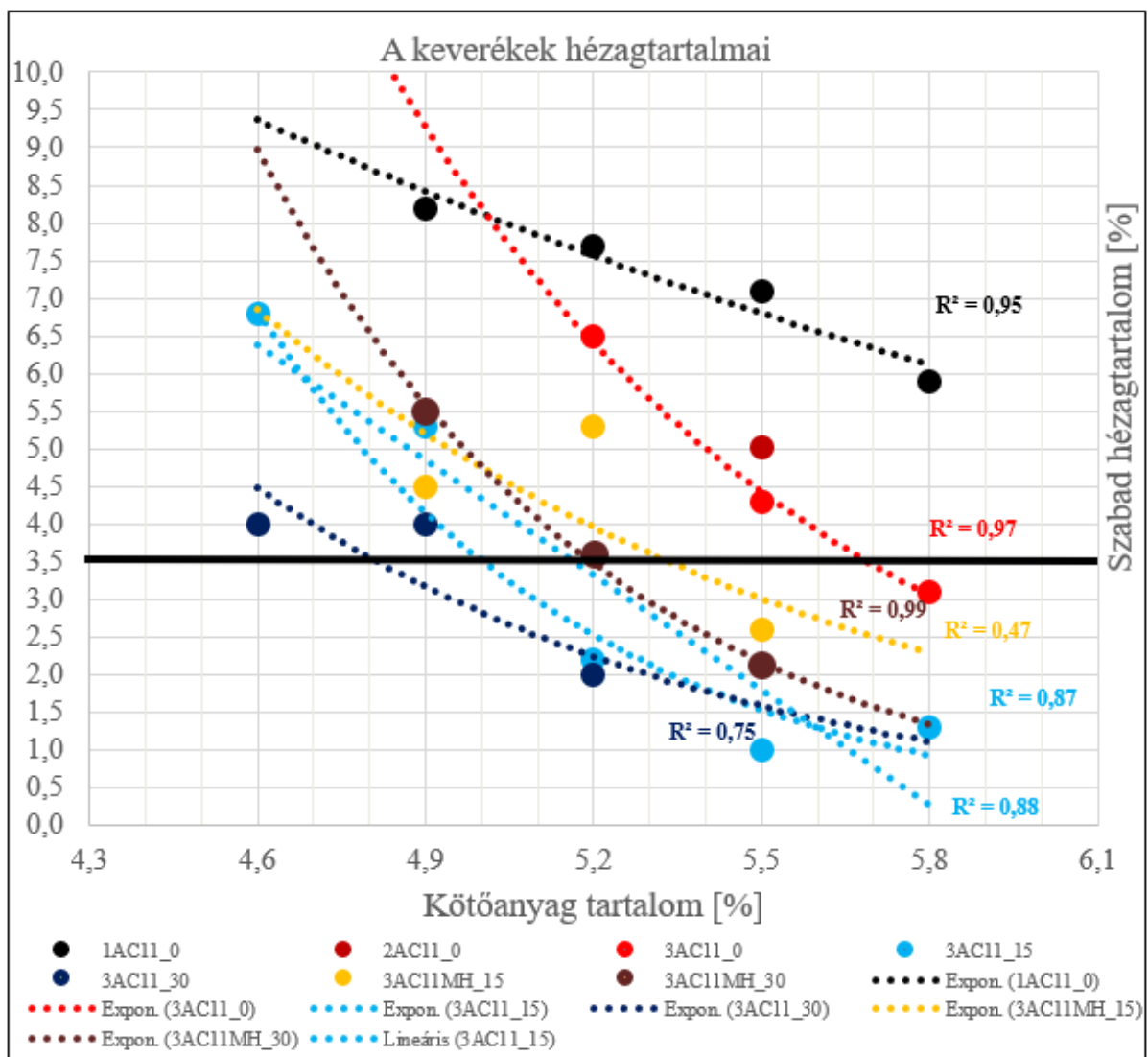
Az optimális bitumentartalmú referencia keverék: 3AC11_0_5,7.

Ezt követően meghatároztam a 3AC11_15, 3AC11_30, 3AC11MH_15, 3AC11MH_30 keverékek zúzottüveg, zúzottkő, mészköliszt és mészhidrát adagolási arányait, hogy azok szemeloszlásai a lehető legjobban illeszkedjenek a 3-as típusú szemeloszláshoz (ez ±1%-os felezőszítán áthullott anyagmennyiségek mellett volt lehetséges). A keverékekhez a bemérési arányokat az 5. táblázatban foglaltam össze.

| Keverékek jelölése | Tatabánya ML | Calmit Mészhidrát | Fer-Marik ZÜ 0/5 | Nógrádköves d NZ 0/2 | Nógrádköves sd NZ 0/4 | Nógrádköves sd KZ 4/8 | Nógrádköves sd KZ 8/11,2 | Σ |
|--------------------|--------------|-------------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----|
| 1AC11_0 | 9 | 0 | 0 | 0 | 49 | 13 | 29 | 100 |
| 2AC11_0 | 9 | 0 | 0 | 5 | 42 | 14 | 30 | 100 |
| 3AC11_0 | 9,5 | 0 | 0 | 10 | 37,5 | 14 | 29 | 100 |
| 3AC11_15 | 9 | 0 | 15 | 7,5 | 27 | 12,5 | 29 | 100 |
| 3AC11_30 | 8,5 | 0 | 30 | 10 | 12 | 11,5 | 28 | 100 |
| 3AC11MH_15 | 5 | 4 | 15 | 7,5 | 27 | 12,5 | 29 | 100 |
| 3AC11MH_30 | 4,5 | 4 | 30 | 10 | 12 | 11,5 | 28 | 100 |

5. táblázat: Különböző alapanyagok adagolási mennyiségei a kőváza vonatkoztatva tömegszázalékban, keverékenként.

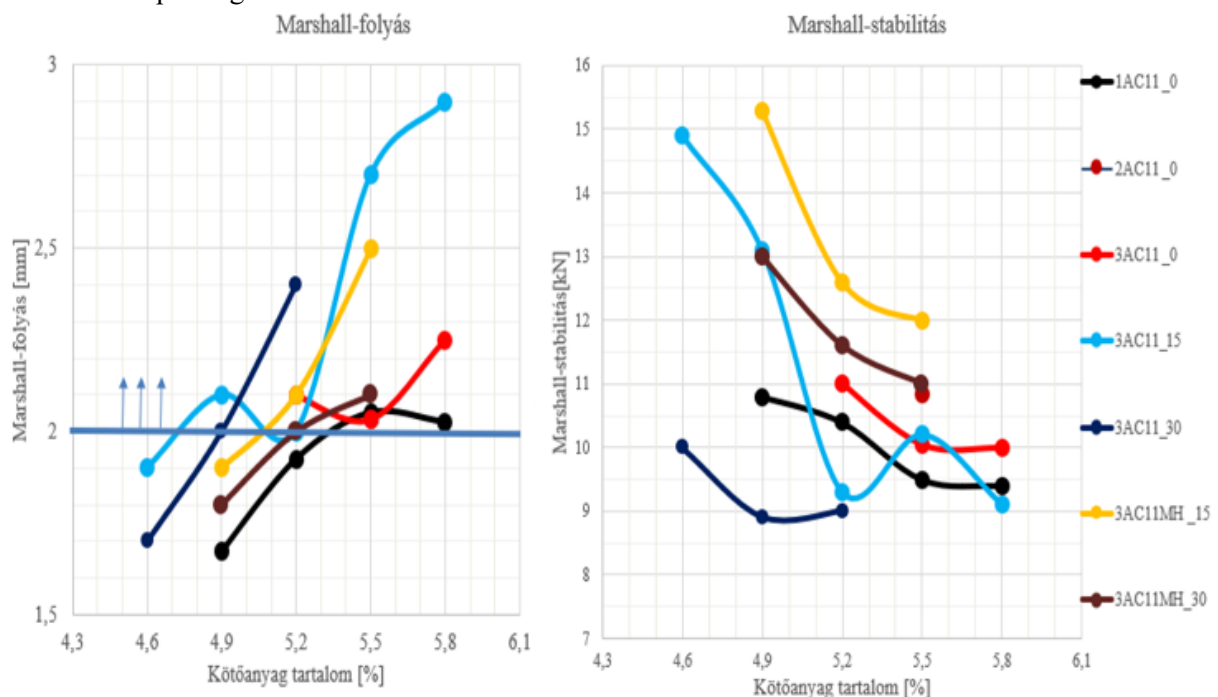
Ezt követően meghatároztam a négy üvegaszfalt keverék optimális bitumentartalmát. A pontos bitumentartalom kiválasztásához lineáris és exponenciális regressziós görbéket használtam (a hézagtartalmakat ábrázoltam a bitumentartalom függvényében), és vizsgáltam, hogy a görbék hol metszik a 3,5%-os hézagtartalmat. A 3AC11MH_15 keverékeknél a trend nem szoros $R^2=0,47$ determinációs együttható mellett, annak ellenére, hogy a hézagmentes testsűrűség és szabad hézagtartalom vizsgálatok a megengedett terjedelmek között maradtak. Itt feltételezhető, hogy egyéb mérési vagy beadagolási hiba történt az 5,2%-os bitumentartalmú keverék esetén. Meg kell jegyezni, hogy mindegyik esetben hasonló szorossággal illeszkedtek a vizsgálati eredmények a lineáris regressziós görbére is. Számottevő különbség a 3AC11_15 esetén prognosztizálható hiszen exponenciális regresszió esetén $R^2=0,87$ és lineáris regresszió esetén $R^2=0,88$, viszont az optimális bitumentartalom az első esetben 5,0 m% míg a második esetben 5,2 m%, ami már jelentősebb különbséget jelent (a többi esetben tizedre kerekítve ugyanazok az eredmények adódtak). A keverékek szabad hézagtartalmait a bitumentartalom függvényében a 2. ábrán látható.



2. ábra: A keverékek hézagtartalmait a bitumentartalom függvényében.

Az MSZ EN 12697-34:2004+A1:2008 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Marshall-vizsgálatból származó Marshall-stabilitás és folyás kikerült a nemzeti értékelési rendszerünkől, azonban az ASTM D 1559 (2008) Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixture using Marshall Apparatus szabványban leírtak alapján közepes forgalmi igénybevétel esetén ($10^4 - 10^6$

ET) stabilitási értékre minimum 5 336 N, míg folyás értékekre 2-4,5 mm az elvárható teljesítmény aszfaltbeton kopórétegek esetén.



3. ábra: A keverékek Marshall-folyás és Marshall-stabilitás értékei a kötőanyagtartalom függvényében.

Marshall-folyás minimumának elérése érdekében, a 3AC11_30 jelű keveréknek 0,2 m%-os bitumentartalom növelését hajtottam végre. A 3AC11_15 jelű keveréknél a Marshall-folyás teljesítése, és a burkolati hézag eredményeinél alkalmazott exponenciális és lineáris függvényből származó bizonytalanság miatt 5,2 m%-os bitumentartalmat állapítottam meg optimálisnak.

| | 3AC11_30 | 3AC11_15 | 3AC11MH_30 | 3AC11MH_15 | 3AC11_0 |
|--------------------------------------|----------|----------|------------|------------|---------|
| optimális bitumentartalom [%] | 4,8→5,0 | 5,2 | 5,2 | 5,3 | 5,7 |

6. táblázat: A keverékek optimális bitumentartalmai.

Megfigyelhető, hogy a zúzottüveg növekvő adagolása mellett a keverékek bitumenigénye csökken. A kutatásban használt kötőanyag és kőanyagok használata esetén az optimális 5,7%-os bitumentartalom 15%-os zúzottüveg adagolás esetén 0,4-0,5%-kal csökken, míg 30%-os adagolás esetén kb. 0,5-0,7%-kal. A jelenséget azzal lehet magyarázni, hogy az üvegszemcsék minimális porozitása miatt, azok sokkal kevésbé képesek bitument abszorbeálni a zúzottkövel szemben.

Ezt a tulajdonságát a keveréknek mások is megállapították. Egy jordániai kutatásban (Zaydoun et al., 2018) $D_{max}=4,75mm$ zúzottüveggel gyártott kopóréteg keveréket terveztek Marshall-eljárással. A tervezett 4%-os hézagtartalom mellett az optimális bitumentartalom a következőképp alakult:

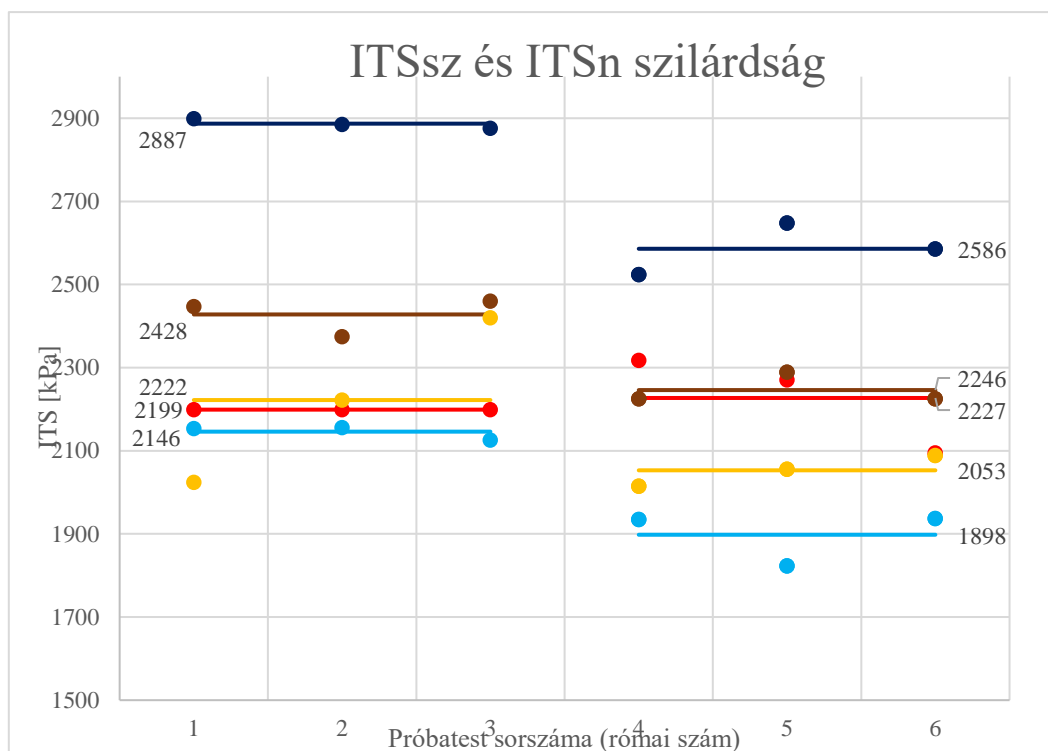
- 0%-os zúzottüveg → 5,80 % bitumen
- 5%-os zúzottüveg → 5,45 % bitumen
- 10%-os zúzottüveg → 5,50 % bitumen
- 15%-os zúzottüveg → 5,40 % bitumen
- 20%-os zúzottüveg → 5,35 % bitumen

Egy iráni kutatásban a finom zúzottüveg 20 %-os adagolása az optimális bitumentartalom 1,0%-os csökkenését eredményezte egy aszfaltbeton kopóréteg tervezésekor (Shafabakhsh et al., 2014).

4. VÍZÉRZÉKENYSÉG

Az aszfaltbeton kopórétegek felületéről a víz képes a pórusokon keresztül a rétegbe bejutni. Ha ez a pórusokból nem tud azonnal távozni, pangó víz alakul ki. Amikor a pályán egy nagy tömegű gépjármű halad egy ilyen rétegen, a jármű abroncsnyomásával arányos mértékben préselődik szét a víz az egyébként terheletlen felületek felé. A nagynyomású öblítő hatás képes kimosni az aszfalt habarcs részét, így a nagy szemcsék közötti érintkezési felületen létrejövő bitumen-szemcse kapcsolatot károsítani képes. Ezek ellen a hatások ellen a kötőanyag és a szemcse közötti tapadás minősége a mértékadó. Ennek ellenőrzésére alakították ki a vízerzékenység vizsgálatot, amely az EN termékszabványok megjelenésével típusvizsgálatként kötelezően elvégzendő vizsgálatná vált (Ambrus, 2006).

MSZ EN 12697-12:2009 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Próbatestek vízerzékenysége vizsgálat eredményekből látszik (4. ábra), hogy a legmagasabb ITS értékek 30%-os zúzottüveg adagolása mellett adódtak. A 15%-os zúzottüvegű keverékek hasonló szilárdsággal rendelkeznek (nedves csoport), mint a referencia keverék.



4. ábra: ITS hasító-húzó szilárdság eredményei.

A hasító-húzószilárdság hányadosát „vízerzékenység” ($ITSR = ITS_n / ITS_{sz} * 100$) tekintve (7. táblázat) a legmagasabb értéket a referencia keverék érte el. A kiváló vízerzékenységi ellenállást mutatja, hogy a nedves csoport átlagos ITS értékei 1,3%-kal a száraz csoport ITS értékeinél magasabbra adódtak. Ez ellentmond a vizsgálatban végrehajtott leromlási procedúra elvének, azonban jó szemcse-bitumen tapadással rendelkező keverékeknél ez az anomália előfordulhat. Megfigyelhető, hogy az üvegaszfalt keverékek is kedvező tulajdonságot mutattak a vizsgálat szerint. A mészhidrát tapadásjavító tulajdonsága nem mutatkozott olyan markánsan jelen esetben, mint amit több más kutató is bemutatott.

| | 3AC11_0_5,7 | 3AC11_15_5,2 | 3AC11_30_5,0 | 3AC11MH_30_5,2 |
|----------|-------------|--------------|--------------|----------------|
| ITSR [-] | 101,3 | 88,5 | 89,6 | 92,4 |

7. táblázat: ITSR hasító-húzó szilárdság hányados eredményei.

Általában a kutatásokban a keverékek kb. 5-10 %-kal magasabb TSR értékekről számolnak be mészhidrát adagolás mellett. (Maupin, 1998; Lesueur et al., 2013; Behbahani et al., 2015) A kutatási eredményeim alapján mindössze 2-3 %-kal adódtak alacsonyabb értékek mészhidrát adagolása nélkül. Hozzá kell tenni, hogy a hivatkozott kutatásokban *módosított Lottman-teszt* alapján 150 mm átmérőjű zsirátoros tömörítéssel gyártott próbatesteken határozták meg a keverékek vízerzékenységét.

A szakirodalomban leírt üvegarány adagolás melletti vízerzékenység növekedés 15%-os adagolásig jelen esetben is megfigyelhető. Azonban további leépülés nem mutatkozott sem a mészhidrát adagolás nélküli 3AC11, sem a mészhidrát adagolással készített 3AC11MH keverékek esetén a fenti cikkekben tapasztaltakkal ellentétben.

5. IT-CY MEREVSÉG

A merevségi modulus (S_m) fontos tényező a pályaszerkezetek dinamikus terheléssel szembeni ellenállásának előrejelzésében. Az IT-CY merevségi modulus az axiális terhelés feszültség-feszültségváltozásának sebessége, amely az aszfaltkeverék viselkedését mutatja terhelési körülmények között. Mivel az aszfaltkeverékek viselkedése érzékeny a hőmérsékletre és a terhelés időtartamára, a merevségi modulus ezen paraméterek függvénye, amely kapcsolat különböző keverékek esetében eltérő.

A hazai előírásban előírtak szerint könnyű és normál igénybevételi kategóriában nincs előírt érték aszfaltbeton keverék esetén merevségre. Fokozott igénybevételi kategória esetén, megadandó paraméterként kell szerepeltetni *MSZ EN 12697-26:2012 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Merevség, C melléklet hasító-húzó vizsgálat* IT CY merevségeit. A szabványban leírtak szerint 2x50 ütési Marshall-próbatesteken kell elvégezni a vizsgálatot 20 °C-on 124 µs erőfelfutás mellett. Az eredmények az 5. ábrán láthatók.

| | 3AC11_0_5,7 | 3AC11_15_5,2 | 3AC11_30_5,0 | | 3AC11MH_30_5,2 |
|-------------------|-------------|--------------|--------------|------|----------------|
| S_m [Mpa] átlag | 4935 | 6211 | 5882 | 6823 | 6420 |

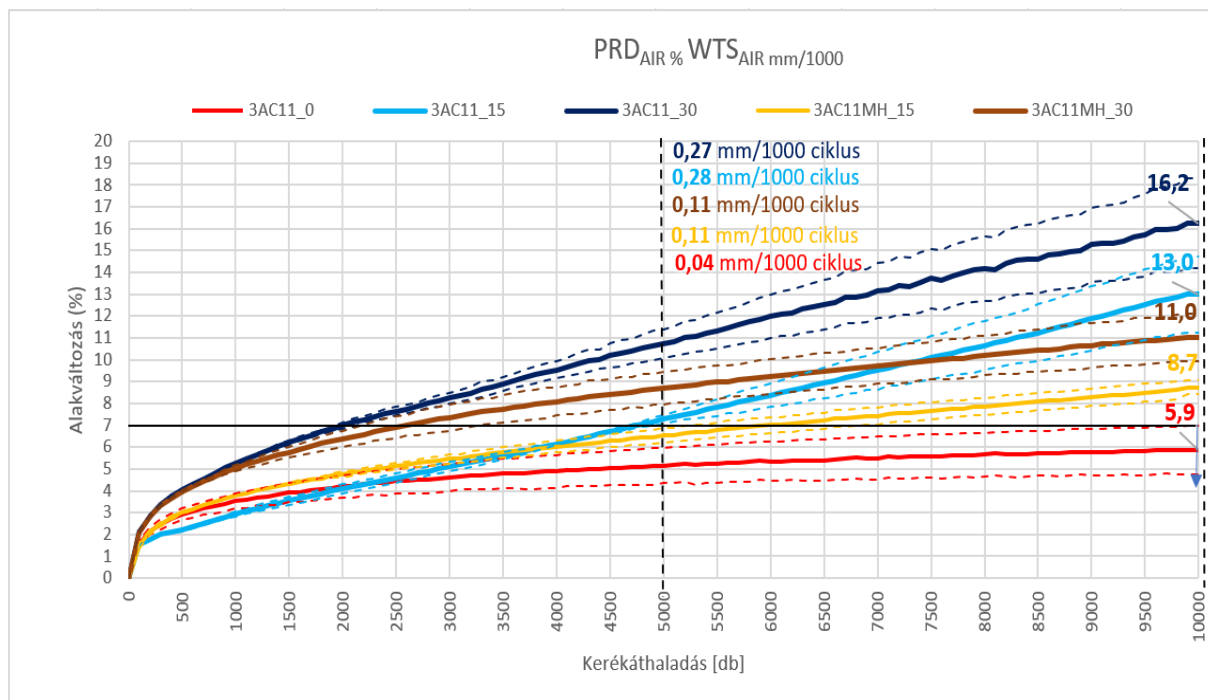
8. táblázat: IT CY merevség átlagai 20 °C 124 µs erőfelfutás esetén.

Összeségében elmondható, hogy a legalacsonyabb merevség értéke a referencia, 0%-os zúzottüveg adagolású keveréknek adódott. Megfigyelhető, a zúzottüveg adagolás 15%-ig merevség növekedést eredményezett. A referencia keverékhez képest 15% zúzottüveg adagolású keverék mészhidrát nélkül 25%-kal, míg mészhidrát adagolás mellett 38%-kal növelte meg a vizsgált merevségét a keveréknek. Azonban a 30%-os adagolás esetén kis mértékű visszaesés figyelhető meg a merevségek értékeiben. A megnövekedett merevség a zúzottüvegek aszfaltkeverékbe történő hatékony beágyazódásának köszönhető. A köváznak megnövekedett belső súrlódási szögét az üvegszemcsék nagyobb mértékű szögletessége adja, illetve a bazalt és üveg közti szilárdság különbség. Azonban feltételezhető, hogy egy optimális értéket elérve ezen szemcsék bősége miatt egyre több üvegszemcse-üvegszemcse kapcsolat alakul ki, amelyek nem képesek a bitument hatékonyan felvenni, így egymáson elcsúszni képesek, ami a merevség csökkenését eredményezheti. A merevségek ezen tendenciáját más kutatók is megállapították. A csökkenő tendencia kezdetét aszfaltbeton kopóréteg esetén $D_{max}=4,75$ mm zúzottüveg adagolás mellett kb. 15-20%-ban állapították meg. (Arabani, 2011; Shafabakhsh et al., 2014; Arabani et al., 2014). Megfigyelhető továbbá, hogy mészhidrát tapadásjavítóval kezelt keverékek merevségei 12-15 %-kal magasabbra adódtak, mint a tapadásjavító adalékszer nélkül készített próbatesteké.

6. KERÉKNYOMKÉPZŐDÉS

Az öt keverék plasztikus deformációs hajlamát az MSZ EN 12697-22:2003 A1.2008 Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverékek vizsgálati módszerei. Keréknyomképződés szabványban előírtak szerint hajtottam végre.

A hazai előírás alapján könnyű és normál igénybevételi kategóriában nem támaszt az előírás követelményt keréknyom-képződési ellenállás tekintetében. Fokozott igénybevétel esetén B 50/70-es útépítési bitumen használata mellett kiskerekű berendezéssel levegőn mért keverék fajlagos nyommélysége 10 000 terhelési cikluson maximálisan 7% lehet. A 6. ábrán látható a keverékeken mért fajlagos nyommélységek és azok átlagai. A referencia keverék ellenálló tulajdonságát mutatja, hogy teljesíti a fokozott igénybevételi kategória előírt értékét, amely határt egyik üveg adagozalt keverék sem érte el. Keréknyomképződés tekintetében megfigyelhető, hogy az üveg adagolási mennyiségének növekedése a vizsgált keverékek esetében keréknyomképződési hajlam növekedést eredményez. Azonban 4% mészhidráttal adagolás esetén ennek mértéke csökkent.



5. ábra: Fajlagos nyommélység a vizsgált keverékeken.

A 3AC11MH_15 keverék megközelíti az előírt határértéket, kissé módosított összetétellel feltételezhető, hogy teljesíteni is tudná azt. Érdekes, hogy a 3AC11_15 keveréknél még a 4 % mészhidráttal készült 30%-os üveg adagolású keverék is kedvezőbb keréknyomképződési ellenállást mutatott, ami még inkább annak jótékony hatását igazolja.

Érdekes megfigyelni a 3AC11_15 típusú keverékek görbéjének alakulását. A vizsgálatban megszokott trendtől egy gyors kezdeti alakváltozást követően már kevesebb, mint 1000 ciklus után figyelhető meg egy szinte teljesen lineáris szakasz. Ez általában és a többi keverék esetén is későbbi ciklusszám után következik be.

A 6. ábrán feltüntetett WTS_{AIR} (wheel tracking slope) a kondicionálási szakasz (5000 kerékáthaladás) utáni grafikonrész meredekségét jelenti milliméterben 1000 ciklusra számítva. Úgy kell meghatározni, hogy a 10000. ciklusban mért deformáció értékéből kivonjuk az 5000. ciklusban mért deformáció értékét, és elosztjuk 5-tel.

Ezt a paramétert nem befolyásolja a keverék kezdeti összenyomódása, ami nagyban függ a keverék térfogatváltozásából. Finomszemcsés keverékek esetén például a spanyol PG3-szabályozás 0,07- 0,1 mm /1000 ciklusú WTS határértéket határoz meg az EN 12697-22 kiskerekű berendezéssel vizsgált eljárásában, az éghajlati viszonyoktól és forgalmi terheléstől függően. (García et al., 2012)

A hazai szabályozás nem támaszt követelményt ezen paraméterrel szemben. A vizsgálataim alapján a referencia keverék 0,04 mm/1000 ciklus WTS érték, tehát kifejezetten ellenálló tulajdonságra utal. Érdekes megfigyelni, hogy a mészhidráttal előállított keverékek fajlagos nyommélység görbe

meredekségei és mészhidrát nélkül előállított üvegaszfalt keverékek 15% és 30 % zúzottüveg adagolás mellett szinte megegyeznek egymással. Az utóbbi viszont majdnem háromszor meredekebb deformációs meredekséget mutat. A 0,11 mm/1000 ciklus WTS értékek a mészhidrát tapadásjavító adalékszer, plasztikus deformációs hajlamra való jótékony hatását mutatja.

A mészhidrátot nem tartalmazó keverékek eredményei a szakirodalomban sokkal inkább kiemelt vízerzékenységi hajlamnál talán még érzékenyebb tulajdonságára hívják fel a figyelmet az üvegaszfalt keverékeknek.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatban felhasznált zúzott hulladéküveg kb. 10-15%-kal alacsonyabb térfogatsúllyal rendelkezik az általánosan használt útépítési zúzottköveknél (a kutatásban használt Nógrádkövesd NZ 0/4 2,86 kg/Mg, míg Fer-Marik ZÜ 0/5 2,49 kg/Mg). Ennek köszönhetően az üvegaszfalt testsűrűsége alacsonyabb, az aszfaltbeton testsűrűségénél, amely nagyobb termelékenységet eredményezhet beépítéskor.

Alacsony (0-30%) zúzottüveg adagolási tartományban az üveg adagolásának növelése mellett a keverékek bitumen igénye csökken. A kutatásban használt kötőanyag és kőanyagok használata esetén az optimális 5,7%-os bitumentartalom 15%-os zúzottüveg adagolás esetén 0,4-0,5%-kal csökken, míg 30%-os adagolás esetén kb. 0,5-0,7%-kal.

A Marshall-vizsgálat eredmények tekintetében elmondható, hogy a keverékek optimális bitumentartalma mellett magas stabilitási értékeket kaptunk. Az ASTM 1559 (2008) Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixture using Marshall Apparatus szabványban előírt 5,36 kN -os határértéket mindegyik keverék kielégíti, ez főként a megfelelő minőségű kőanyagalmazok és üveghalmaz minőségét igazolja. A legmagasabb érték a mészhidrátal kezelt keverékekénél adódott. A Marshall-folyás eredményei is szintén kielégítik a szabványban előírt 2 mm-4,5 mm közötti követelményt, annak alsó határához közelítenek. A kapott eredmények 2,0-2,4 mm közötti szűk tartományban mozognak.

Finomszemcséjű zúzottüveg adagolása mellett ($D_{max}=4-5$ mm) kb. 15-20 %-ig az aszfaltkeverékek merevsége növekszik, kőváznak megnövekedett belső súrlódási szöge az üvegszemcsék nagyobb mértékű szögletessége, illetve a bazalt és üveg közti szilárdság különbség miatt. Egy optimumot elérve, azonban egyre több üvegszemcse-üvegszemcse kapcsolat alakul ki, amelyek nem képesek a bitument hatékonyan felvenni, így egymáson elcsúszni képesek, ami a merevség csökkenését eredményezi. Mészhidrát adagolás esetén a kötőanyag szemcse tapadás növekedése miatt a vizsgálatokból 10-15 %-os merevség növekedés látszik.

A vizsgálat szerint 30%-os zúzottüveg adagolásig a fokozott igénybevételi kategóriába tartozó ITSR 80% követelmény megfelelő keveréktervezéssel biztosítható, de mészhidrát adagolása mellett a vízerzékenység kockázata még jobban csökken, a keverék tartóssága kedvezőbben biztosítható.

30%-os adagolásig könnyű (P) és normál (N) igénybevételű utaknál kopórétegbe beépíthetőnek bizonyulnak a vizsgálati összetételű keverékek. Fokozott (F) igénybevételi kategória esetén alacsonyabb forgalmi terhelésű utaknál (C esetleg D) 5-15 %-ban tapadásjavítószer használata esetén (pl. mészhidrát) alkalmas lehet kopórétegben. Magasabb adagolás és adalékszer hiányában kritikus lehet, keréknyomképződési ellenállása a keveréknek.

8. IRODALOMJEGYZÉK

Arabani, M. 2011: Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete, *Constraction and Building Materials* 25, 1181-85; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.043>

Ambrus, K. 2006: Az SNM 46 jelű syntumen adalékkal készített aszfaltkeverék vizsgálatai, *Közúti és Mélyépítési Szemle* 56(1)

- Afshinnia, K., & Rangaraju, P. R. 2015: Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali–silica reaction in mortars, *Construction and Building Materials* 81, 257–67; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041>
- Behbahani, H., Ziari, H., Kamboozia, N., Mansour Khaki, A. & Mirabdolazimi, S. M. 2015: Evaluation of performance and moisture sensitivity of glassphalt mixtures modified with nanotechnology zycosoil as an anti-stripping additive, *Construction and Building Materials*, 78, 60-68; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.053>
- Chesner, W. 1992: *Waste Glass and Sewage Sludge Ash Use in Asphalt Pavement, Utilization of Waste Materials in Civil Engineering Construction*. American Society of Civil Engineering
- Chesner, W. & Petrarca, R. 1987: *Report on Glass Aggregate Pavement for the Browning Ferris Industries Merrick Transfer Station Located in Hempstead, New York*
- Dembicki, M. 1992: Glassphalt paves an alternate route, *Waste Age Magazine*, 23, 87–92
- Federal Highway Administration Research and Technology, 1998: *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction*, WASTE GLASS, Publication Number: FHWA-RD 97-148
- Flynn, L. 1993: *Glassphalt Utilization Dependent on Availability, Roads and Bridges*
- García-Travé, G., Martínez-Echevarria, M. J., Rubio Gámez, M. C. & Moreno-Navarro, F. 2012: Bituminous mix response to plastic deformations: comparison of the Spanish NLT-173 and UNE-EN 12697-22 wheel tracking tests. *Dyna* 174, 51–57
- Hawken, P., Lovins, A. B. & Lovins L. H. 2013: *Naturalcapitalism: the next industrial revolution*, 1sted. US Green Building Council
- Hughes, C. S. 1990: *Feasibility of using recycled glass in asphalt*, Virginia Transportation Research Council, VTRC 90-R3 Charlottesville
- Jony, H. H., Al-Rubie, M. F. & Jahad, I. Y. 2011: The Effect of Using Glass Powder Filler on Hot Asphalt Concrete Mixtures Properties, *Engineering and Technology Journal* 29, 44-57
- Lesueur, D., Petit, J. & Ritter H. J. 2013: The mechanisms of hydrated lime modification of asphalt mixtures: a state of the art review, *Road Materials and Pavement Design*, 14, 1–16; <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.743669>
- Maupin, G. W. 1998: *Effect of glass concentration on stripping of glassphalt*, Virginia Transportation Research Council Final Report, 1-20
- Nazirizad, M., Kavussi, A. & Abdi, A. 2015: Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 84 (Supplement C) 348–53; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.024>
- Petrarca, R. 1988: *Use of Glassphalt*, Paper Presented to the Long Island Society of Asphalt Technologists
- Rosta, Sz. 2019: *Zúzott hulladéküveg felhasználhatóságának vizsgálata aszfaltbeton kopórétegben*, MSc. Diplomamunka Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 7-19
- Shafabakhsh, G. H. & Sajed, Y. (2014): Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials, case study, Glass cullet; *Case Studies in Construction Materials*, 96-103; <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.05.002>
- Su, N. & Chen, J. S. 2000: Physical properties of glass asphalt concrete and its applications. The first conference on roadway pavement, Taiwan, 12–26
- Zaydoun T. Abu Salem, Taisir S. Khedawi, Musa Bani Baker & Raed Abendeh 2018: Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures, *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 11 (1)



Az üveghab-granulátum útépítésben való alkalmazásának vizsgálata

Szendefy János^{1,2}, Bán Zoltán^{1,2}, Lődör Kristóf^{1,2}

Waleed S. Mustafa¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Geotechnikai és Mérnökgeológia Tanszék

² EFERTE Mérnöki Tanácsadó és Szolgáltató Kft.

E-mail: szendefy.janos@epito.bme.hu; ban.zoltan@eferte.hu; lodor.kristof@eferte.hu; waleed.mustafa@epito.bme.hu

DOI: [10.36246/UL.2020.2.06](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.06)

KIVONAT

Az üveghab granulátum hazánkban még kevésbé ismert anyag, amit üveghulladékból állítanak elő. Az üveghabot táblásított formában hőszigetelő anyagként használják, azonban granulátum formában földműanyagként is alkalmazható. A skandináv országokban utak alatti átfagyás elleni hőszigetelésre használják, hazánkban eddig épületek padlója alatti hőszigetelő ágyazatként került alkalmazásra. A hazai útépítési földműveknél alapvetően alacsony halmazsűrűsége miatt lehetne előnyösen használni. Az üveghab granulátum földművek tervezéséhez, építéséhez szükséges mechanikai tulajdonságai kerültek meghatározásra, amikkel különböző útépítési földművek építése került modellezésre végeselemes programokkal. A számítógépes vizsgálatok alapján az üveghab granulátum kis halmazsűrűségét kihasználva hatékonyan csökkenthető a töltések alatti altalaj süllyedés és minimalizálható az ehhez szükséges konszolidációs idő. Az üveghabot háttöltés anyagként felhasználva számottevően csökkenthető a hídfőkre háruló vízszintes földnyomás értéke, ami miatt kisebb nyomatékok és nyíróerők adódnak a hídfőben és az alapozásként szolgáló cölöpökben. A cikk a kutatás során meghatározott mechanikai jellemzőket és azok segítségével végzett útépítési mintaszámításokat mutatja be.

Kulcsszavak: üveghab, földmű, könnyű anyagú feltöltés, háttöltés, hídfő

ABSTRACT

Foamglass aggregate is not known material in Hungary, which are produced from glass waste. Foamglass tables is basically used as a thermal insulation material, but its aggregate form can be used as earthwork material. In the Scandinavian countries it is used for thermal insulation against freezing under roads, in Hungary it has been used as a thermal insulation bedding layer under the floors of buildings. It could be used advantageously in Hungarian road earthworks mainly due to its low bulk density. The mechanical properties of the foamglass aggregate were determined in a researching project, and various road construction earthworks was modelled with finite element programs. Based on computer studies, the low bulk density of foamglass aggregate can be used to effectively reduce settlements under embankments and minimize the consolidation time. By using foamglass as a backfill material in bridge abutments the horizontal ground pressure on the abutments can be significantly reduced, resulting in lower bedding moment and shear forces in the abutment and the foundation piles. The article presents the mechanical characteristics determined during the research and the road construction sample calculations performed with their help.

Keywords: foamglass, earthwork, light fill material, backfill, bridge aboutment

Dr. Szendefy János

A BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének adjunktusa, valamint az EFERTE KFT tulajdonos-ügyvezetője. A fő kutatási területe a földművek és az ágyazati anyagok mechanikai tulajdonságainak, valamint a talajjavítási módszereknek a vizsgálata.

Bán Zoltán

A BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének doktor jelöltje, valamint az EFERTE KFT munkatársa. A fő kutatási területe a talajok megfolyósodásának laboratóriumi és helyszíni vizsgálatai, valamint a megfolyósodással szembeni biztonság meghatározása.

Lődör Kristóf

A BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének PhD hallgatója, valamint az EFERTE KFT munkatársa. A fő kutatási területe a talaj és szerkezet kölcsönhatásának vége-selemes modellezése, rigid-inclusion alapozási módszer tervezési eljárásának kidolgozása.

Waleed S. Mustafa

A BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének PhD hallgatója. A fő kutatási területe az üveghab granulátum mechanikai tulajdonságainak vizsgálata, amin belül első sorban az anyag statikus és ciklikus terheléssel szembeni teherbírásának meghatározása.

1. BEVEZETÉS

Földünk egyik legnagyobb kihívása a fenntartható életmód megteremtése. A föld egyre gyarapodó népessége és életszínvonalának jelentős emelkedése felpörgette a mezőgazdasági és ipari tevékenységet, aminek következtében nagy mértékben nőtt a hulladéktermelés is. A megnövekedett termelésnek kettős negatív hatása van környezetünkre, egyik a nyersanyagkészletek kimerülése, míg a másik a hulladék mennyiségének jelentős növekedése. A probléma felismerése tettekre sarkallta a világot, ezért a negatív folyamatok mérséklésére és a környezetünk jövőbeni védelmére az elmúlt évtizedekben nagy erőfeszítéseket tettek az államok, a kutatók, az ipari szereplők és természetesen a lakosság is. Ennek egyik kiemelt eredménye a szelektív hulladékgyűjtés, aminek segítségével a még későbbiekben felhasználható hulladékot különválogatva tárolják, esetleg újrahasznosítják, csökkentve ezzel a nyersanyagok felhasználását és a szemétmennyiség képződését.

Az üveghulladék újrahasznosításának egyik módja az üveghab gyártás, amely hazánkban eddig kevéssé volt ismert. Az üveghabot alapvetően hőszigetelő anyagként alkalmazták, épületek, vegyi üzemek hőszigetelésénél, amelyek között néhány hazai példát is találhatunk. Azonban az elmúlt évtizedekben, amióta granulátum formát is gyártanak, -az USA-ban, Nyugat- és Észak Európában- használata elterjedt az út és csarnoképítésben is. Felhasználása több rétegű, van, ahol könnyű fajsúlya miatt alkalmazzák a töltésepítések során, más esetekben hőszigetelő képességét is kihasználva csökkentik a fagybehatolás mélységét az utak alatt vagy csarnoképületek padlója alatti hőszigetelő ágyazatot építenek belőle.

Az üveghab gyártás bonyolult folyamatának hazai kifejlesztését egy debreceni cég tűzte ki céljául 2014-ben, amit meg is tudott valósítani 2017-re. Az elkészült termék építőmérnöki tulajdonságainak vizsgálatát a BME és az EFERTE Kft. végezte 2018-ban laboratóriumi és nagymodell vizsgálatok segítségével. A paraméterek további vizsgálatát és az üveghab-granulátum felhasználási területeken való alkalmazhatóságát a gyártó céggel közösen a BME-n diplomázók és PhD hallgatók jelenleg is végzik. Az elsődleges hazai felhasználás az ipari padlók alatti hőszigetelő ágyazat volt, amelynek tervezési metódusát 2018-ban egy kutatási program keretében meghatároztuk (Szendefy-Huszák, 2018). Az ipari padlóknál való felhasználása azóta valósággá vált, több tíz beruháznál került beépítésre, ahol a helyszíni beépítéseket nyomonkövethettük és back-analíziseket végeztünk. A magasépítésben is megismerkedtek az anyaggal, így könnyű feltöltésként került alkalmazásra budapesti mélygarázsok felett, amikre parkok, kültéri burkolatok épültek meg.

A nemzetközi gyakorlatban már látott útépitésben való felhasználás meghonosítása érdekében hazai úttervező és kivitelező cégekkel konzultáltunk és számba vettük a felhasználási lehetőségeket. Ezen lehetőségek közül néhányra számításokat végeztünk különböző aktuális útépitési projekteknél. A számítások során a korábban meghatározott anyagjellemzőket használtuk, az eredmények értékelésekor pedig a jelenleg használatos földműépítési gyakorlatban használt anyagok számításaival végeztünk összehasonlítást.

2. AZ ÜVEGHAB ANYAG ISMERTETÉSE

Habosított üveget az 1930-as évek óta alkalmaznak hőszigetelő anyagként táblásított formában. Nem sokkal a kifejlesztését követően, már 1935-ben szabadalmaztatták az USA-ban a technológiát. Habár rengeteg pozitív tulajdonsága miatt már kifejlesztésekor a jövő hőszigetelő anyagának tulajdonították lakossági alkalmazása a mai napig nem mondható elterjedtnek. Az ipari szereplők azonban hamar felismerték az üveghab számos előnyét és gyorsan elterjedt ipari épületek esetében a táblás üveghab hőszigetelő anyag használata. Elsősorban az olaj- és gáziparban terjedt el a táblásított üveghab használata köszönhetően inert tulajdonságainak.

Az üveghabot elsősorban hulladéküvegből gyártják (sík- és öblösüvegből egyaránt), azonban előállítható kifejezetten üveghab gyártásához előállított üvegből is. Az üveget először liszt finomságúra őrlik, majd habosító anyagot (szénpor, mészpor) hozzáadva sütik ki. A legegyszerűbb esetben, amikor táblás formában állítják elő, alagútkemencében sütik ki az üveghabból és habosító anyagból álló port. A sütés során a hőmérséklet nem olyan magas, hogy az üveg teljesen folyékonnyá váljon, csupán 700 – 900 °C. A sütés során az üveg kissé megolvad és a hozzáadott habosító anyag pedig gázt képez benne, így létrehozva a belső pórusszerkezetet. A kapott táblás üveghabot – szemben az üveghab-granulátummal – több lépésben hűtik le, hogy ne keletkezzenek benne belső feszültségek.

A táblás üveghab gyorsan elterjedt olyan területeken, ahol előnyös fizikai és kémiai tulajdonságai, elsősorban a tűzállósága és inert kémiai viselkedés elsődleges fontosságú. Az alapanyagául szolgáló üveg egyáltalán nem éghető, nem savas, sem pedig bázikus vegyszerekkel nem lép reakcióba és érzéketlen az UV (UV-A, UV-B, UV-C) sugárzásra is. Így felhasználható volt valamennyi olyan iparágban és területen, ahol erős kémiai hatásoknak volt kitéve vagy magas a tűzveszély kockázata. További előnyös tulajdonsága a mérettartása. Mivel nem öregszik, így mind fizikai mind kémiai tulajdonságait tekintve évekkel beépítése után is azonosan viselkedik a beépítéskori állapotával. Ezek az inert tulajdonságok a mélyépítésben, az útépitésben is fontosak, hiszen a beépítése során a talajjal, talajvízzel nem lép reakcióba, napsugárzás és egyéb környezeti hatásokra nem érzékeny, nem bomlik, így tartós földműanyagként tud szolgálni. További előnyös tulajdonsága – igaz ez csak a XXI. században lett fontos szempont -, hogy környezetbarát. Alacsony energiabefektetéssel gyártható hulladék alapanyagból és szinte végtelenül újrahasznosítható.

Egészen az 1980-90-es évekig csak táblás formában gyártották és alkalmazták ipari hőszigetelő anyagként, ezt követően kezdődtek meg a kísérletek granulátum formájú üveghabbal. Az első kísérletek során Svájcban könnyű feltöltésként alkalmazták, majd később Norvégiában folytattak átfogó kutatásokat az üveghab mechanikai – elsősorban hőszigetelő - tulajdonságára vonatkozóan. Az üveghab alapanyagául szolgáló üvegliszt szemcsesűrűsége 2300 kg/m³, míg a kész üveghabé csupán 150 – 250 kg/m³, vagyis az üveghab több mint 90% pórusokból áll, a vázszerkezet a térfogatának csupán 5-10%-a. Az üveghab-granulátum gyártása hasonlóan történik, mint a táblásított üveghab esetében, azzal a lényegi különbséggel, hogy az anyagot hirtelen hűtik le, így abban belső feszültségek keletkeznek. Ezeknek a belső feszültségeknek köszönhetően törik össze többé-kevésbé szabályos, azonos méretű szemcsékre a gyártási folyamat végén. Az üveghab-granulátum szemcséi nagyon ridegek, és részben a porózus szerkezet miatt, hajlamosak az aprózódásra rakodás, terítés, bedolgozás során. Nem jellemző, hogy az üveghab-granulátumot rostálják – részben aprózódásra való hajlama miatt -, hanem a gyártás során előállított szemcsemérettel szállítják. Alacsony sűrűségének köszönhetően nagy mennyiségben is könnyen szállítható, akár 90-120 m³ is egy szállítmánnyal.



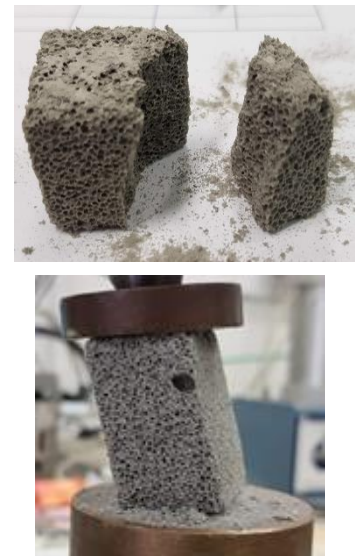
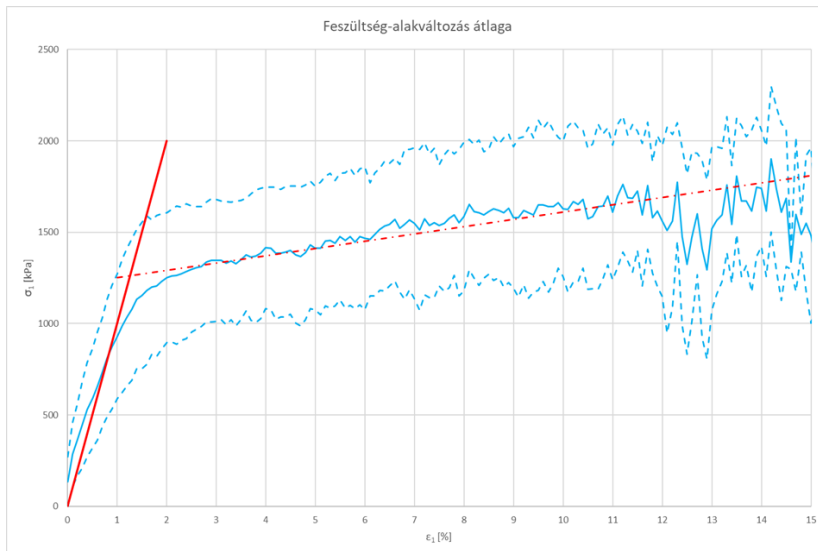
1. ábra: Üveghab-granulátum és üveghab szemcse.

3. AZ ÜVEGHAB ANYAG MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI

Az anyag építőipari alkalmazhatóságának első feltétele, hogy meghatározzuk a mérnöki szerkezetek tervezéséhez szükséges mechanikai paramétereket. A gyártó elsődlegesen iparipadlók alatti hőszigetelő ágyazati anyagként kívánta hasznosítani, ezért a fő cél az alakváltozási paraméterek meghatározása volt. A termék alapvetően szemcsékből álló halmaz, így tulajdonságait a halmaz tulajdonságai fogják meghatározni, azonban jelentősen eltér a talajoktól, így a talajmechanika általános elméleteiben feltételezettéktől is oly módon, hogy a szemcsék nem kellően szilárdak ahhoz, hogy terhelés hatására ne törjenek össze.

3.1. SZILÁRDSÁG VIZSGÁLAT

A szakirodalomban döntően az anyag összetevőkre és a gyártási folyamatokra található adatok, illetve a táblás üveghab szigetelések szilárdságára vonatkozóan. Mivel a granulátum gyártási folyamata a hűtési folyamat során eltér a táblásított anyagétól, ezért a laboratóriumi vizsgálatokat az üveghab szemcse nyomószilárdságának meghatározásával kezdtük. A vizsgálathoz összesen 12 db próbatestet faragtunk ki a szemcsékből és végeztünk rajta egyirányú nyomóvizsgálatot. A próbatestek előállítása során némi műszaki kompromisszumot kellett elfogadnunk, hiszen a szemcsék miatt a minták mérete igen kicsi és változatos volt (3-6cm oldalhosszúság) és az 1: 1,5 magasság-szélesség arány sem volt minden mintánál megoldható. De ezeket a kompromisszumokat szükségesnek tartottuk, hogy a valódi anyagot vizsgálhassuk, hiszen lassabb hűtési folyamat mellett létrehozott nagyobb szemcséjű anyagban mások lehetnek a belső feszültségek. A vizsgálat során a minták döntően húzási tönkremenetelt szenvedtek és hosszában repedtek el, míg egyes mintáknál külpontosság miatti alakváltozás vezetett a törési feltétel kielégítéséhez. A nagy számú vizsgálat eredményeinek értékelése alapján jól kirajzolódik a rugalmas és képlékeny állapot határa, ami $\sigma_{ny} \sim 1250 \text{ kPa}$ nyomófeszültség körül definiálható (2. ábra). Ehhez a nyomófeszültséghez még viszonylag kis alakváltozás tartozik $\varepsilon \sim 1,25\%$, így a rugalmas szakasz $E_{\text{rugalmas}} = 100 \text{ MPa}$ rugalmassági modulussal jellemezhető. Az anyag dinamikus terhelésre való tönkremenetelét, például lágyulás vagy megfolyósodás bekövetkezését ciklikus terheléssel vizsgáltuk. Az alkalmazott 10.000 db ciklus hatására szilárdság csökkentést vagy tönkremenetelt nem tapasztaltunk.

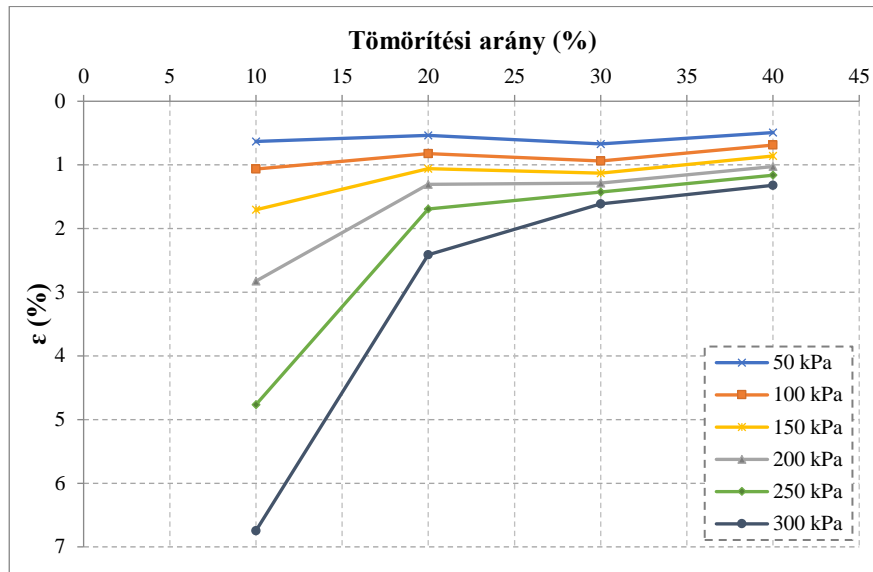


2. ábra: Elemi hasábok átlagos és szórással számított alsó-felső határoló görbéje, illetve néhány vizsgálat során készült fénykép (Szendefy-Huszák 2018).

3.2. KOMPRESSZIÓ VIZSGÁLAT

A halmazvizsgálat során az összenyomódási modulus (E_s) meghatározása volt a cél. A vizsgálatok különböző tömörségek mellett kerültek elvégzésre annak érdekében, hogy meghatározásra kerüljön milyen tömörítési arányt célszerű a beépítés során alkalmazni. A tömörítési arányok az alábbiak voltak: 1:1,1; 1:1,2; 1:1,3 és 1:1,4, ahol a számok a tömörített rétegvastagság és a lazán elterített rétegvastagságot mutatják. Az üveghab-granulátum általánosan 30-60mm szemmagysággal jellemezhető, így a talajmechanikában megszokott 20mm magas kompressziós gyűrűben nem lehetséges a halmaz vizsgálata. A vizsgálat elvégzése érdekében ezért egy egyedi, 300mm átmérőjű hengeres edényt készítettünk a vizsgálatokhoz, hogy kellően nagy számú szemcse legyen beépíthető, amivel már megfelelően modellezhetővé válik a valódi szemcsehalmaz és az abban végbemenő folyamatok. A méretválasztás során szintén fontos szempont volt a szakirodalom által javasolt 5D szemcseátmérő biztosítása. Az edény magassága 250 mm volt. Az 1:1,1 és 1:1,2 arányú minták egy rétegben kerültek bedolgozásra, tehát 22cm és 24cm vastagságban került az anyag az edénybe beszorásra, majd egy döngölőlappal kézi erővel 20cm vastagságúra lett tömörítve. Az 1:1,3 és 1:1,4 tömörítési arányok esetében már nem lehetett az anyagot egy rétegben betömöríteni, ezért két rétegben került sor a tömörítésre. A vizsgálatok során a talajmechanikában járatos 50kPa-os terhelési lépcsőket alkalmaztuk egészen 300 kPa feszültségig. A vizsgálatok során mindegyik tömörítési arányhoz 5-5 db vizsgálat készült a mérési bizonytalanságok mértékének megfigyelése érdekében.

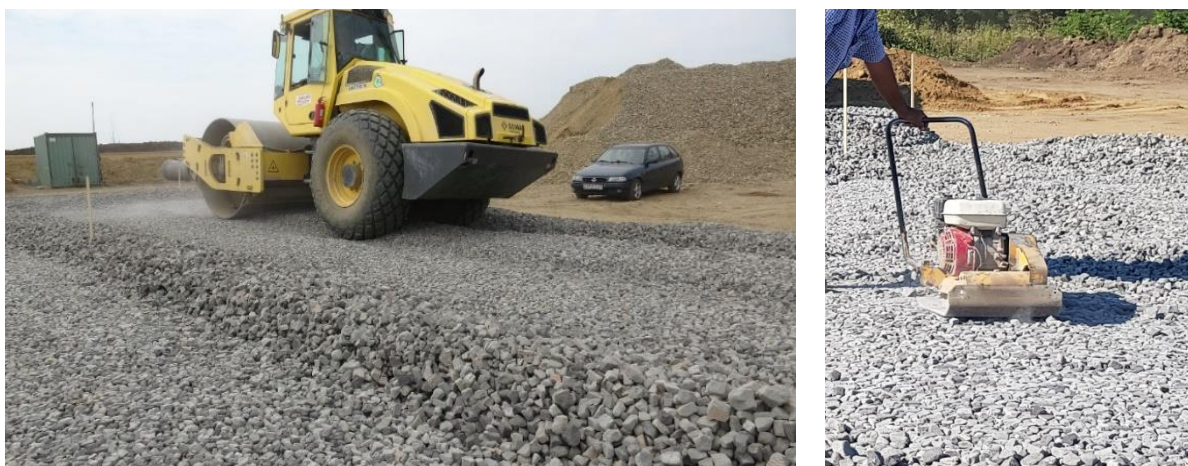
A vizsgálati eredmények alapján az E_s értéke 4-20MPa között változott, ahol az alacsonyabb értékek az 1:1,1 tömörítési aránynál (10%), míg a magasabb értékek a magasabb 1,1:4 tömörítési aránynál (40%) adódtak. A 3. ábra mutatja a tömörítési arányoknál mért fajlagos alakváltozási értéket a különböző terhelési lépcsőknél. Az ábra arra mutat rá, hogy az 1:1,1 és 1:1,2 tömörítési arányoknál rendkívül kompresszibilis az üveghab-granulátum halmaz, az összenyomódási modulusok puha, közepesen jó talajokhoz hasonlíthatók. Ebből kifolyólag ilyen alacsony tömörségi aránynál való bedolgozást nem javasolunk, esetleg csak olyan helyeken tartjuk alkalmazhatónak, ahol nem kerül rá számottevő teher és burkolat, az esetleges utólagos süllyedések nem okoznak sem szerkezeti, sem pedig használhatósági problémát. Az 1:1,3 és 1:1,4 tömörségi arányok lényegesen merevebb, jó állapotú talajokra (pl.: homok, kavicsos homok) jellemző E_s értéket mutattak, ami alapján az üveghab-granulátumot megfelelő feltöltő anyagnak véljük utak, kültéri burkolatok és ipari padlók alá. Az üveghab szemcséhez hasonlóan megvizsgáltuk a halmaznak is a dinamikus terheléssel szembeni viselkedését. Felpuhulás vagy megfolyósodás nem történt a halmazban 10.000 db ciklust követően sem, így dinamikus terhekkel szemben megfelelően ellenálló az anyag.



3. ábra: Halmaz kompresszió vizsgálat eredményei különböző tömörítési arányok alkalmazásával.

3.3. TEHERBÍRÁS (E_2) MÉRÉS

Az útépitési földmunkáknál és az ipari padlók ágyazatánál az egyik legfontosabb mérőszám az E_2 teherbírás értéke. A földművek, javítórétegek és ágyazatok teherbírás méretezéséhez elengedhetetlen az anyag teherbírásai sajátmodulus értékének (E_{2d}) a meghatározása. Az üveghab-granulátum E_{2d} értéke nagy modell vizsgálattal, próbaszakasz beépítésével került meghatározásra. A próbaszakasz készítése egyben azt a célt is szolgálta, hogy megvizsgálásra kerüljön az üveghab beépítés metodikája, az alkalmazható építőgépek fajtái. A próbaszakaszok építése során a nagytömegű földmunka és az ipari padlók ágyazatépítése 12t vibrohengerrel, míg a kisebb feltöltések és családi házak alatti tömörítések kivitelezési munkái padkahengerrel és lapvibrátorral kerültek modellezésre. A próbaszakaszok építésekor különböző hengerjáratyszámok kerültek alkalmazásra, amikkel eltérő tömörségi arányokat hoztunk létre. Az E_{2d} érték meghatározása céljából 1m vastagságú üveghab feltöltés készült, hogy az altalajnak már ne legyen hatása a feltöltés tetején mért teherbírás értékekre. A nagytömegű henger esetében 50cm vastag, míg a kisebb tömörítőeszközöknél 30cm vastagságban történt az üveghab elterítése. Az anyag helyszínrészállítását nyerges vontatók, az elterítést forgófelsővázak kotró végezte. Az anyagkiszállítás során az üveghab kis súlya miatt egy szállítmány 90m³, ami normál talajoknál tízszer hatékonyabb és környezetkímélőbb szállítást eredményez.



4. ábra: Tömörítés a nagytömegű kombihengerrel és a kisebb lapvibrátorral.

A tömörítési arányokat a hengerezést követően szintezőműszerrel 5 pontban mérve határoztuk meg a rétegek beépítését követően. A hengerjáratok számával arányosan növekedtek a tömörítési arányok, aminek eredményeképpen 1:1,2, a külföldi ajánlásokban olvasható 1:1,4 és egy kvázi túltömörített 1:1,6 állapotot hoztunk létre. A teherbírás értékek a vártak megfelelően tendenciózusan növekedtek a tömörítés mértékével, így a legkisebb teherbírás a leglazább, míg a legnagyobb teherbírás a legtömörebb állapothoz adódott.

A betömörített üveghabon 1db statikus tárcsás (E_2) teherbírást mérést és 5 db könnyűejtősúlyos teherbírást mérést (E_{vd}) végeztünk. Az ejtősúlyos vizsgálatból azért készült több, mert ezzel kívántunk a teherbírás szórását ellenőrizni, valamint a statikus és dinamikus mérés korrelációját vizsgálni. Az ejtősúlyos mérések viszonylag kis szórást mutattak, így a statikus tárcsás teherbírást mérés eredményeit elfogadhatónak tartottuk. A 12t vibrohengerrel végzett próbaszakasz mérési eredményeit az 1. táblázat mutatja be, ahol az E_{vd} az ejtősúlyos mérések átlagértéke került feltüntetésre. A külföldi ajánlásoknak megfelelő tömörítési arány (1:1,4) mérési eredményei alapján az üveghab teherbírási sajátmodulusát $E_{2d}=50\text{MPa}$ értékben határoztuk meg. Ezt az értéket a megépült csarnok épületek ágyazatépítése során végzett minősítő teherbírási mérések során végzett ellenőrző számításaink is visszaigazolták. Az E_2/E_{vd} aránya ~ 2 -re adódott, ami jó egyezést mutatott a szakirodalomban a talajokra vonatkozó teherbírási arányokra (Tompai, 2008).

| Járatszámok | 1 db s + 2db oda v és vissza s | 1 db s + 4db oda v és vissza s | 1 db s + 6db oda v és vissza s |
|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Tömörítési arány | 1,20 | 1,40 | 1,60 |
| Teherbírás-E_{2d} (MPa) | 32 | 47 | 73 |
| Teherbírás-E_{vd} (MPa) | 15,3 | 23,0 | 25,4 |

v=vibro, s=sima

1. táblázat: Teherbírás értéke a 12t-ás kobihengerrel tömörített próbaszakasz esetében.

A padkahengerrel tömörített szakaszok teherbírása szintén 5-5db ejtősúlyos teherbírást mérésével lett vizsgálva. A mérési eredmények alapján a hasonló tömörségi arányra betömörített üveghab teherbírása a nagy hengerrel betömörített anyagével volt egyenlő (2. táblázat). Ami alapján a kisebb felületeken végzett kis méretű tömörítőeszközzel is létrehozható az a tömörség és teherbírás, ami a nagytömegű földmunkához használt munkagépekkel.

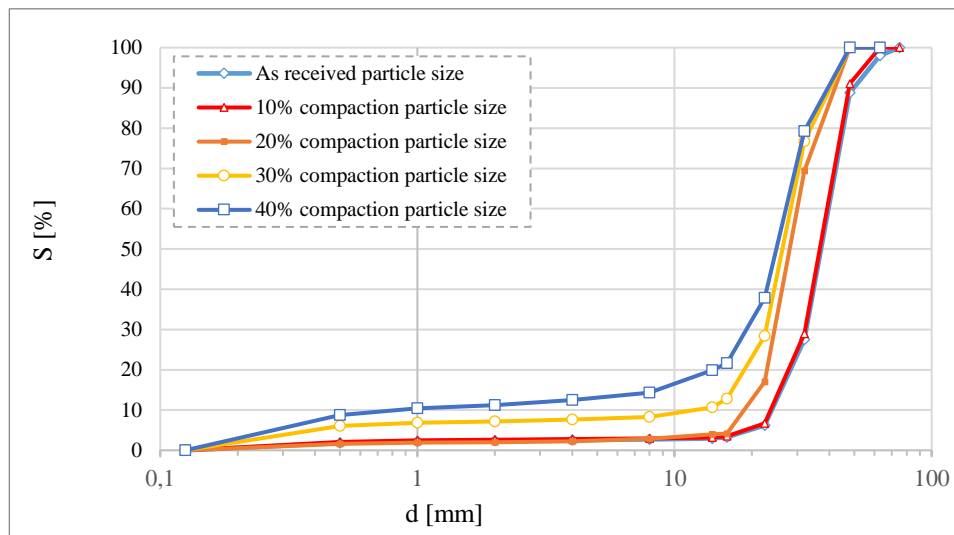
| Járatszámok | 4 sima | 4 vibro | 2 sima + 2 vibro |
|---|--------|---------|------------------|
| Tömörítési arány | 1,20 | 1,49 | 1,38 |
| Teherbírás - E_{vd} (MPa) | 18,4 | 27,5 | 21,5 |

2. táblázat: Teherbírás értéke a 2,8t-ás padkahengerrel tömörített próbaszakasz esetében.

3.4. SZEMELOSZLÁS, APRÓZÓDÁS VIZSGÁLAT

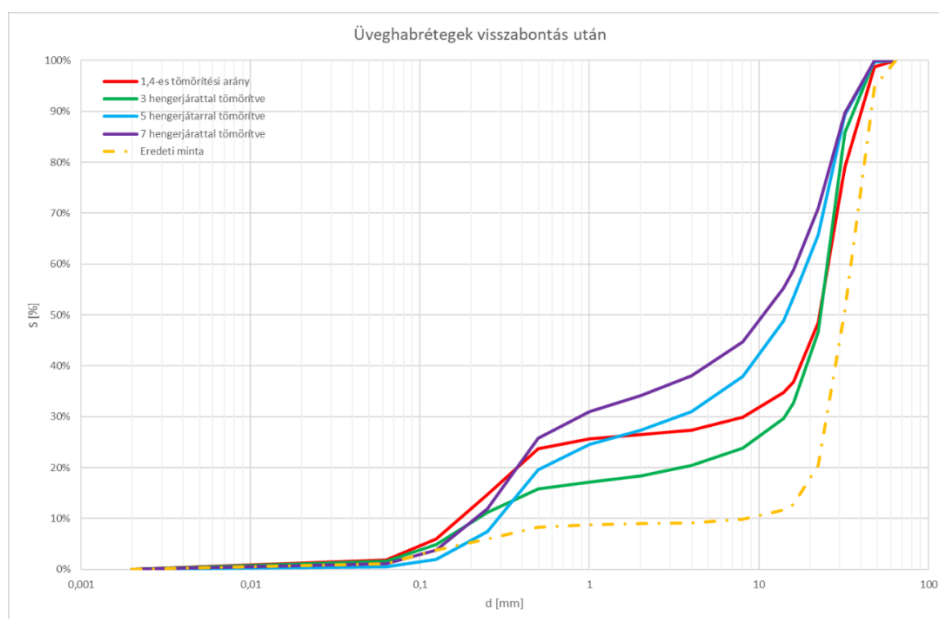
A felhasználókban és bennünk is felmerült a kérdés, hogy vajon milyen mértékben aprózódik az üveghab. Ennek vizsgálata céljából szemeloszlás vizsgálatok készültek a laboratóriumi halmaz kompresszió vizsgálat és a helyszíni nagymodell kísérletet követően is.

A laboratóriumi vizsgálatok során végzett döngölés során az 1:1,1 arányú betömörítés gyakorlatilag nem okozott aprózódást, míg az egyre nagyobb tömörítési arány eléréséhez szükséges döngölés egyre nagyobb aprózódást eredményezett. A szemeloszlás görbék lefutása alapján a legjelentősebb változás a 20-40mm tartományban következett be, ami arra utal, hogy a szemcsék kb. 15-20%-a kettő vagy három részre törött szét.



5. ábra: A laboratóriumi tömörítés hatására bekövetkező szemcseaprózódás.

A nagymodellvizsgálat során a 12t-ás kombihengerrel tömörített rétegekből vett minták szemeloszlás vizsgálatai hasonlóságot mutattak a laboratóriumi vizsgálat során mért aprózódással. Az 1:1,4-es tömörségi arányhoz tartozó próbafelület aprózódása közel megegyező volt a 20-40mm közötti tartományban, azonban a 0,3-10mm közötti tartományba eső szemcsék száma nagyobb lett. Így a nagyobb tömörítőeszköz alatt nem csak néhány darabra törtek szét a szemcsék, hanem további kisebb darabokra is aprózódtak. A finomszemcsék aránya ($S_{>0,063}$) még az aprózódást követően elenyésző (1-2%) volt, így az üveghab-granulátum durvaszemcsés anyagként jellemezhető.



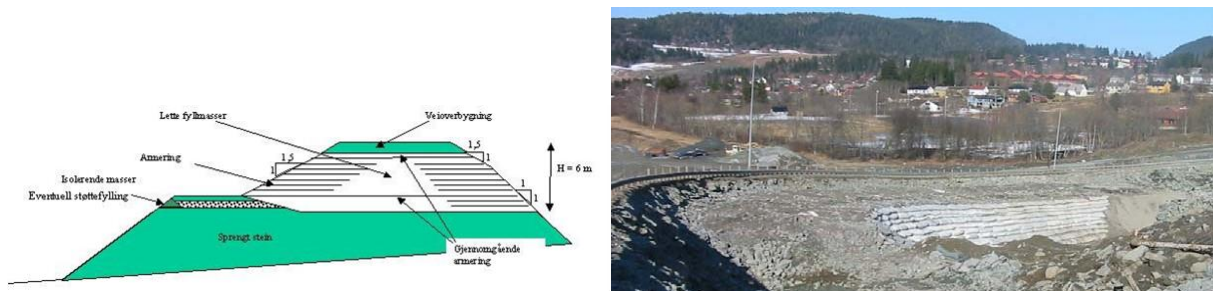
6. ábra: A 12t-án hengerrel tömörített szakaszok építése során bekövetkező szemcseaprózódás.

4. AZ ÜVEGHAB ÚTÉPÍTÉSI FELHASZNÁLÁSI LEHETŐSÉGEI

Az üveghab-granulátummal Svédországban, Norvégiában és Finnországban kezdenek el a 1990-es években kísérletezni. Kihasználták az üveghab hőszigetelő tulajdonságát, hogy a talaj átfagyását csökkentsék, ezáltal is enyhítve a fagykárokat az útszerkezetekben. Norvégiában az 1950-es és '60-as évek óta kísérleteznek könnyű feltöltésekkel puha altalajon. Eleinte faipari melléktermékeket alkalmaztak, majd könnyű agyag aggregátummal (LWA) folytatták a kísérleteket. Az 1970-es évektől

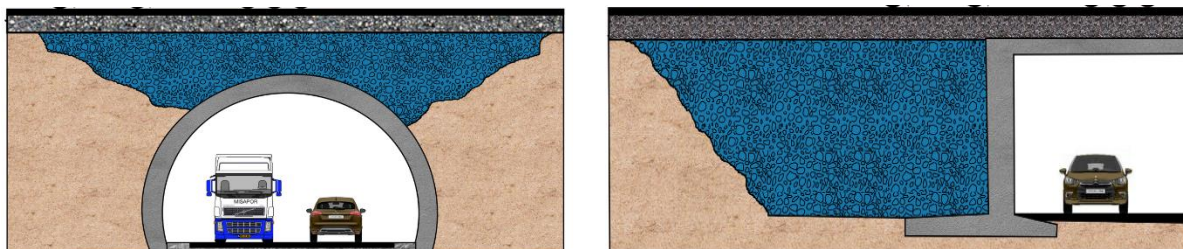
pedig a széles körben elterjedt polisztirol habot építettek be a földművekbe. Az 1998-2004 között építettek be üveghabot kísérleti jelleggel mellékutak pályaszerkezetébe a hőszigetelő tulajdonsága miatt.

Az útpályaszerkezetekbe jellemzően kis mennyiségben, vékonyabb rétegekben építették be, hogy XPS habbal tudják összevetni a hőszigetelő képességét. Emellett épült néhány helyen nagytömegű feltöltés is üveghabból, többek között mintegy 6 m magasságú ideiglenes autópálya-töltés. Ott dózerrel végezték mind a terítést, mind pedig a tömörítést (3 dózerjáráttal), a mintegy 1 m vastagságú rétegekben terített üveghabon. Az alacsony terhelésből nem keletkeztek számottevő kúszási alakváltozások.



7. ábra: Autópálya feltöltés részben üveghabból kialakítva (Állami Közútkezelő Norvégia 2007).

A norvég kísérletsorozathoz hasonló vizsgálatokat végeztek el Finnországban is, ahol pernyével együtt vizsgálták az üveghabot mint másodlagos nyersanyagot. Ezen vizsgálatoknál nem egyetlen paraméter (hőszigetelőképeség) vizsgálata volt a cél, hanem az, hogy az építőipar által felhasznált elsődleges nyersanyagokat (kő, kavics) helyettesítsék másodlagos nyersanyagokkal. A kísérletek során háttöltésben, töltésben és ágyazati rétegben egyaránt beépítették az üveghabot és vizsgálták mechanikai tulajdonságait. Vizsgálataik alapján az üveghab belső súrlódási szöge $36-45^\circ$, halmazsűrűsége pedig $220-280 \text{ kg/m}^3$.



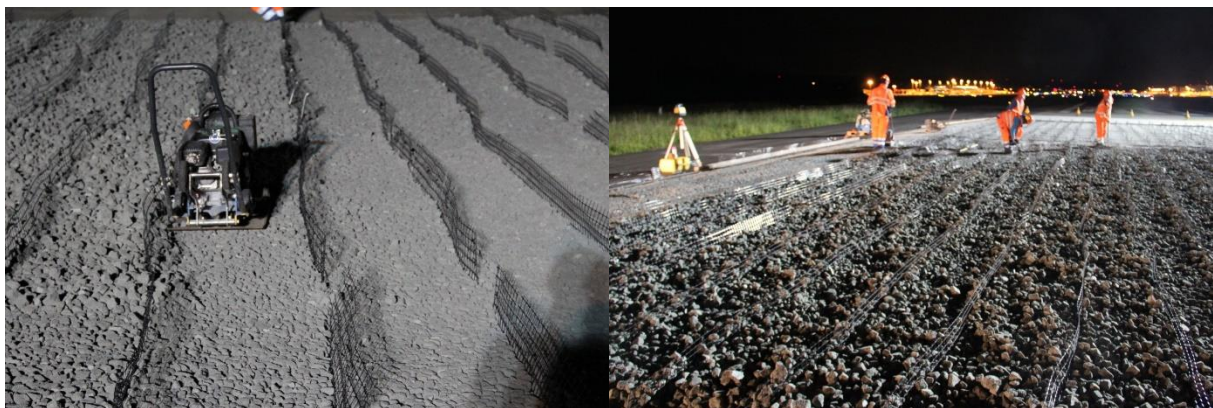
8. ábra: üveghab alkalmazása alagút feletti visszatöltésben és hídfő háttöltésben.

Amellett, hogy nagy tömegben földmunkában vagy ágyazati rétegeként építik be az üveghabot, alacsony sűrűsége miatt alkalmazzák kisebb tömegben is közműárkok visszatöltésére vagy közművek (pl.: távhővezeték) hőszigetelésére. De lehetséges alkalmazási területe még a zajvédő vagy kerítésként funkcionáló gabion falak kitöltő anyaga. Gabion támfalak esetében nem alkalmas a gabion háló kitöltésére, mivel a gabion támfalak súlytámfalként működnek, az üveghab alacsony fajsúlya pedig nem biztosítja a szükséges állékonyságot.



9. ábra: Zajvédő fal üveghab kitöltéssel.

Nagyon különleges felhasználási területe a repülőterek kifutópályáján a túlfutó területek borítása. Ezek olyan területek a kifutópálya két végén, ami a túlfutó repülőgépek kontrollált lelassítását szolgálja. A Zürichi reptéren épült speciális, georáccsal erősített túlfutó terület.



10. ábra: Reptéri kifutópálya túlfutó területe üveghabból.

4.1. HÍDHÁTTÖLTÉS VIZSGÁLATA

A külföldi példák alapján számításokat végeztünk hazai útépítési beruházásoknál az üveghab felhasználási lehetőségére. A hidak esetében a hídfők kialakítása műszakilag rendkívül összetett feladat. A hídfőkre jelentős függőleges teher adódik a hídszerkezetből, ezen kívül a hídra felvezető töltés földnyomásából adódó vízszintes földnyomást is fel kell tudja venni. A jelentős vízszintes erő hajlítást okoz a hídfő cölöpálozolásában is. A cölöpözött hídfők süllyedése igen csekély, csupán néhány centiméter, míg a mögötte megépülő töltés akár 60-120cm-t is süllyedhet. A jelentősen eltérő

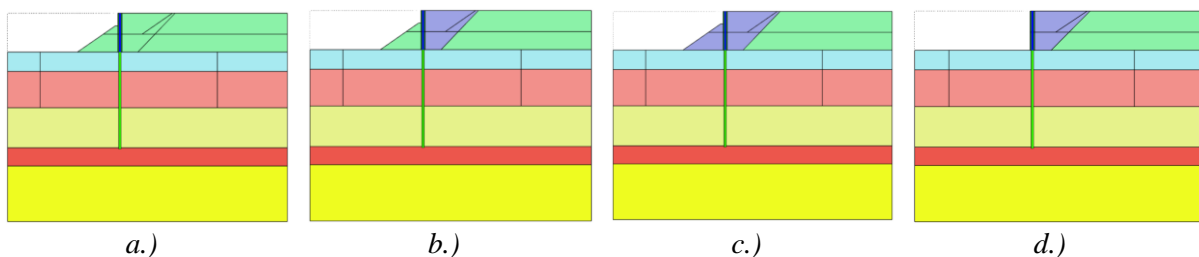
süllyedések mértéke és azok időbeli lefutása mind műszaki, mind pedig építéstechnológiai nehézségeket, problémákat generál.

Az egyik számítási példánk egy alföldi autópálya lehajtó hídjához készültek, ahol a konszolidációs idő csökkentése volt a cél. A számításokat kiterjesztettük a hídfőre ható erők és igénybevételek vizsgálatára is.

A számításokhoz Plaxis 2D geotechnikai végeeselemes szoftvert használtunk, amely lehetőséget biztosít az altalaj és a szerkezet együtt modellezésére, így a modellfuttatásoknál síkbeli modellgeometriát definiáltunk a hídfő keresztmetszetében. A vizsgálatok során 4 különböző esetet vizsgáltunk, amelyek az alábbiak voltak:

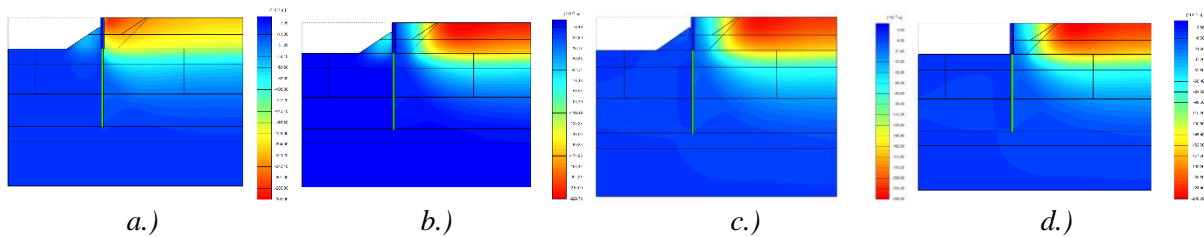
- Referencia modell: Mind az előtöltés, mind a háttöltés hagyományos útépitésben használt földműanyagból (M-1/M-2) készült.
- 1. eset: Az előtöltés hagyományos földműanyagból, míg a háttöltés Energocell üveghab-granulátumból készült
- 2. eset: Az előtöltés és a háttöltés is Energocell üveghab-granulátumból készült.
- 3. eset: Előtöltés nincs, a háttöltés Energocell üveghaból készült (esetleges útpályaszélesítés szimulációja).

A számítások során elsősorban az építési folyamatok utáni állapotban elemeztük a hídfő környezetének deformációs viselkedését, továbbá a szerkezeti elemekben ébredő igénybevételek alakulását a különféle lehetséges geometriai kialakítások során. Jelen eredmények bemutatásánál az építési hatásokra fókuszáltunk, azonban vizsgáltuk a folyótöltés felső síkján működő megoszló terhelés (forgalmi teher) hatását is, továbbá a hídfő felső részén ható fékezőerőből keletkező többlet igénybevételeket és mozgásokat. A vázolt 4 eset felépített modellgeometriája az 11. ábrán látható, ahol az üveghab feltöltést a szürke szín jelöli.

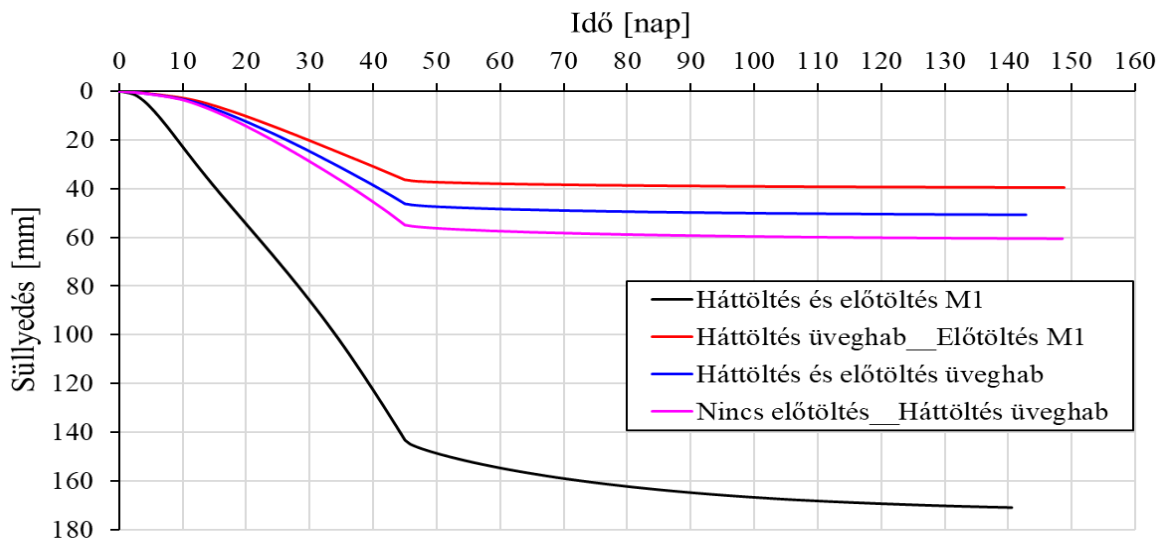


11. ábra: Modellgeometria - Referencia modell (a.); 1. eset (b.); 2. eset (c.); 3. eset (d.).

Az építési állapot utáni konszolidációs folyamatok hatására bekövetkező végleges elmozdulásokat 12. ábrán, míg a konszolidációs süllyedések időbeni alakulását 13. ábrán szemléltettük. Az építési időre a modellfuttatások során 45 napot definiáltunk, majd az építési fázis után egy konszolidációs számítást iktattunk be, ami addig fut, amíg a süllyedés el nem éri a 90%-os konszolidációs fokhoz tartozó alakváltozási értéket. A konszolidációs görbéken látható, hogy a süllyedések jelentős része már a 45 napos építési idő után lejátszódik, azonban hagyományos útépitésben használt földműanyagból készült elő- és háttöltés esetében további 3,00-3,50cm-es alakváltozások várhatóak az építés után megközelítőleg 3-3,5 hónapig, ezzel szemben üveghab-granulátum alkalmazásával asüllyedés véglegesnek tekinthető a földmunkák elkészítését követően. Ez a tendencia az üveghab alacsony önsúlyából ered, aminek köszönhetően nincs jelentős mértékű konszolidáció, valamint öntömörödés. Megfigyelhető, hogy az üveghab-granulátum alkalmazásával a maximális süllyedés közel az $1/4 \div 1/3$ -ra csökken, ami a konszolidációs idő felgyorsulására is hatással van.

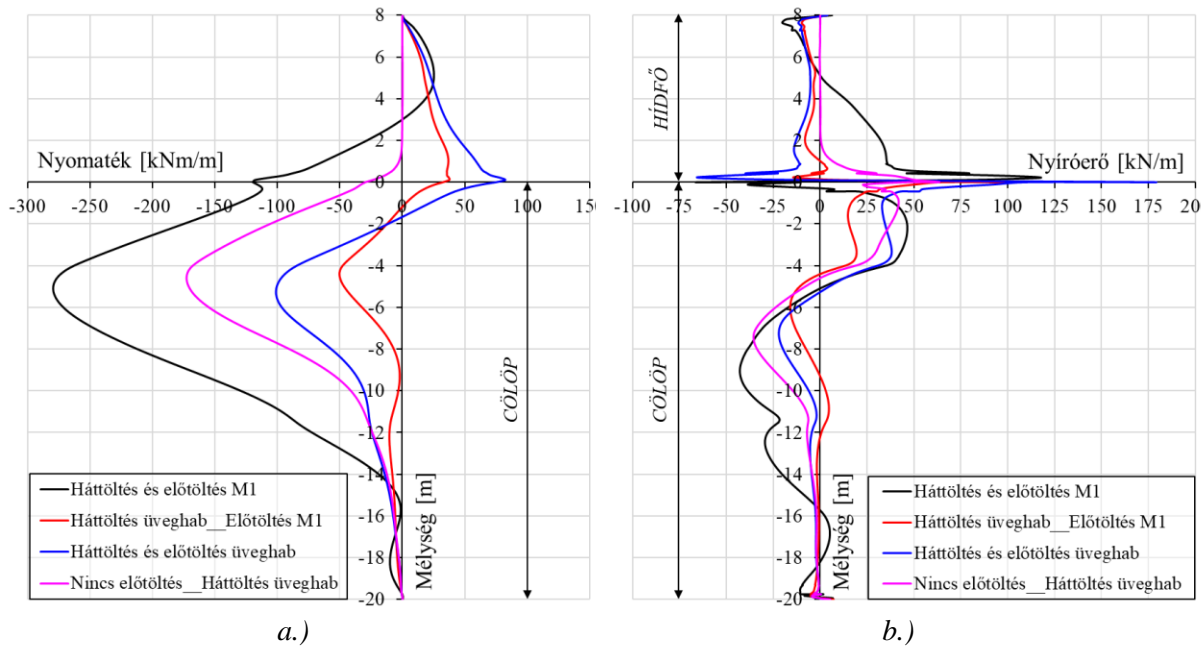


12. ábra: Alakváltozási ábra - Referencia modell (a.); 1. eset (b.); 2. eset (c.); 3. eset (d.).



13. ábra: Konszolidációs görbék.

A 14. ábrán a hídfőben és a cölöpökben ébredő igénybevételek alakulását ábrázoltuk a különböző elő- és háttöltés anyagok és geometriák hatására. Látható, hogy üveghab alkalmazása a háttöltés anyagaként kedvező hatással van a szerkezeti elemekben ébredő igénybevételekre is, nem csak az általaj alakváltozásaira. Az alacsony önsúly és a magas belső súrlódási szög miatt a hídfőfalra ható földnyomások mértéke jelentősen lecsökken, így az igénybevételek is. Mind alakváltozási, mind szerkezeti igénybevétel szempontjából optimálisabb esetnek bizonyul, ha a háttöltés üveghab-granulátumból, míg az előtöltés hagyományos útépítésben használatos földműanyagból készül, ugyanis az előtöltés ebben az esetben nagy mértékben stabilizálja a hídfőfal oldalirányú alakváltozásait magas önsúlyából adódóan. Ha az előtöltés üveghabból készülne, vagy teljes mértékben elhagyásra kerülne, úgy az igénybevételek és a mozgások is nagyobbak lennének, azonban még így is jelentősen kedvezőbb eredmény érhető el, mint hagyományos M-1/M-2 minőségű földműanyagból készülő háttöltések esetén.



14. ábra: Szerkezeti elemek igénybevételei – Nyomaték (a.); Nyíróerő (b.).

A konszolidáció gyorsítására, illetve előterhelés alkalmazására vonatkozó mennyiségeket, költségeket a tervezés során gyakran nem veszik figyelembe, holott ezek jelentős tételek is lehetnek, ami üveghab alkalmazásával szintén kiküszöbölhető.

Kedvezőtlen általajú területen (és gyakran még jó általajon is) a süllyedések mérséklése miatt alapozzák cölöpökre a hidakat, holott talajtörés elleni biztonságra gyakran már a cölöpösszefogó méretével azonos síkalap is megfelelő lenne. Azonban a süllyedések egy jelentős része a csatlakozó töltés miatt kialakuló süllyedési teknő miatt van. A könnyű háttöltésanyag alkalmazásával mind a háttöltés süllyedése, mind a konszolidációs idő jelentősen lecsökken, így már a hídfő is esetleg alapozható lenne síkalappal. Ezzel elmaradhat a cölöpözés, illetve a konszolidációs idő miatti szervezési problémák, többletköltségek.

Az egyes autópályák kapacitásbővítése során a főpálya szélesítéséhez, esetleg új csomóponti ágak építéséhez oldalirányban helyre van szükség, ami az előtöltés elbontásával oldható meg úgy, hogy a főpálya felett átívelő, meglévő hidakat meg lehessen tartani és ne legyen szükség azok elbontására, átépítésére. A vizsgálati eredmények alapján ebben az esetben is kedvezően alkalmazható üveghab-granulátum a háttöltés anyagaként, ugyanis az alacsony önsúlyának, illetve kedvező szilárdsági és alakváltozási paramétereinek köszönhetően megfelelően képes korlátozni a hídfőfalra ható földnyomások mértékét, valamint a pályaszerkezet alakváltozásait.

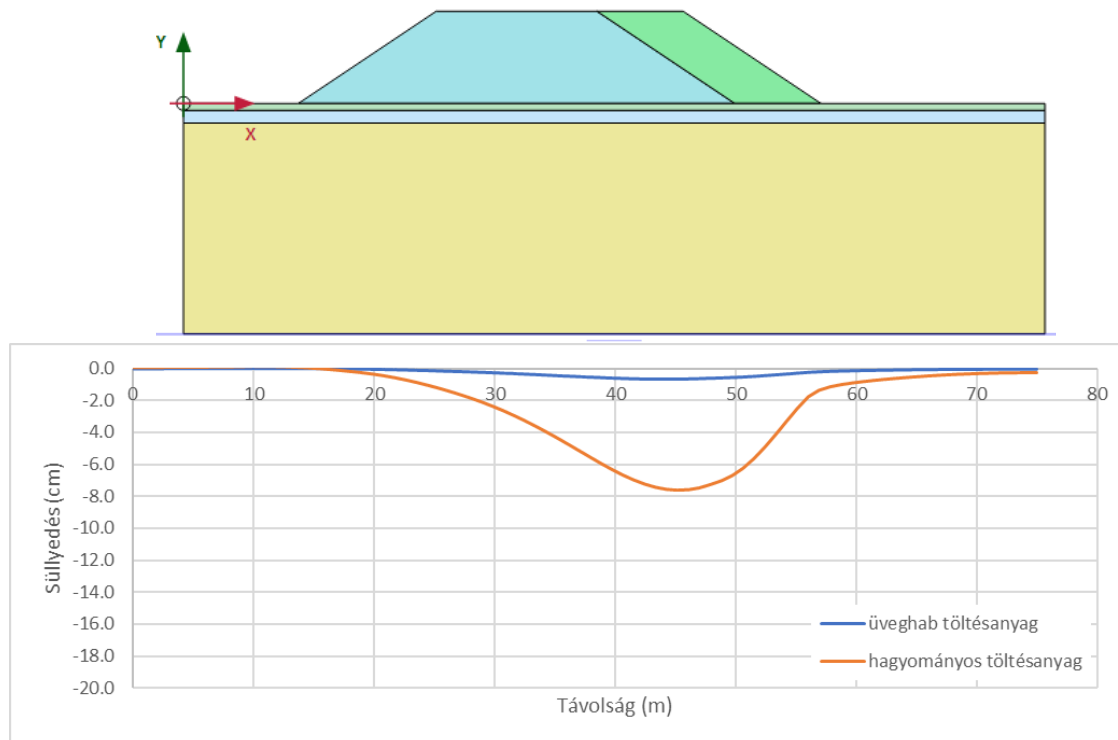
4.2. ÚTPÁLYA SZÉLESÍTÉS VIZSGÁLATA

Utak és autópályák szélesítésénél sokszor gondot okoz, hogy a töltéstest szélesítése többletsüllyedést generál a meglévő töltésrész alatt is, melynek hatására a meglévő burkolat megrepedezhet és károsodhat. Az ehhez hasonló süllyedések és károsodások elkerülése érdekében szintén célszerű lehet az üveghab töltésanyagként való alkalmazása, melynek térfogatsúlya egy nagyságrenddel kisebb a hagyományos földműanyagokénál, így a kialakuló süllyedések is jóval kisebbek lesznek. Az üveghab alkalmazásának lehetőségét egy Észak-Magyarországon található 2 sávú út négy nyomúsításának tervezéséhez készítettük.

Az út egy szakaszán egy 8 méter magas, 14 m koronaszélességű, 1:1,5-es rézsűjű útpálya töltés szélesítését vizsgáltuk, melynek keretében a koronaszélesség a megnövekedett forgalmi igények fogadása érdekében 22 m-re növekszik. Az általajt változó plaszticitású, de döntően közepes és kövér agyagok alkotják, melyben a konszolidáció igen lassan megy végbe. Az eredeti töltést hagyományos

töltésépítési anyagokból lett kialakítva, melynek hatására kialakuló süllyedések és alakváltozások az építés óta eltelt évtizedek során már lejátszódtak.

A töltésszélesítés hatására bekövetkező süllyedés meghatározására szintén a Plaxis 2D geotechnikai végeleemes szoftvert használtunk. A vizsgálat során két scenáriót elemeztünk: egyrészt azt az esetet, melynek során hagyományos, M-1/M-2 kategóriájú földműanyagból készül a szélesítés; míg a másik scenárióban üveghabból készül, melynek térfogatsúlya a szokványos töltésanyag 10%-a. A modellgeometriát és a kapott süllyedésprofilokat a 15. ábrán mutatjuk be.



15. ábra: Végeleemes modell és a számítás eredményeként kapott süllyedésprofil.

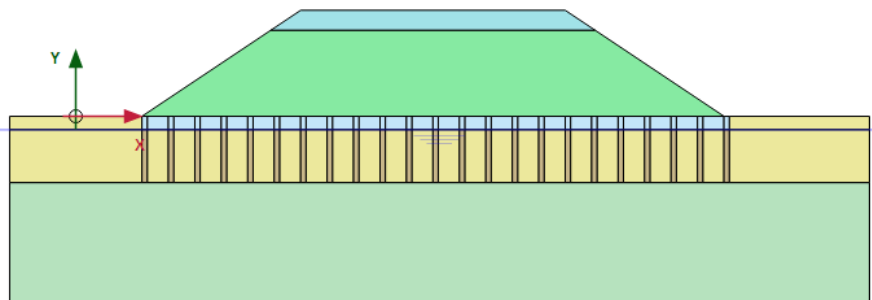
Ahogy azt a süllyedésprofilok is mutatják, üveghab alkalmazásával jelentős mértékben csökkenthetők a kialakuló süllyedések. Hagyományos kavicsos homokból készülő töltéstest esetén a várható süllyedés 8 cm körüli, míg üveghab alkalmazása esetén ez 7 mm-re csökkenthető. A süllyedések csökkentése nem csak a káros deformációk elkerülése szempontjából fontos, hanem a konszolidációs idő lerövidítése is jótékony hatással van a beruházás idő és költség keretére, ugyanis ezzel elkerülhető a konszolidációs folyamat kivárása, mely akár több hónapot hozzáadhat a kivitelezési ütemtervhez, illetve szintén elkerülhetők a többletköltséggel járó konszolidáció gyorsító beavatkozások (túltöltés, szalagdrének alkalmazása stb.).

4.3. PUHA, SZERVES TALAJON VEZETETT ÚT VIZSGÁLATA

A korábbiakhoz hasonlóan a vizsgált eset most is aktuális útépitéshez kapcsolódik, ahol az autópálya egy tőzeges szakaszon halad át. A tervezéshez készült talajmechanikai feltárások alapján a felső 5 m-es talajzónában nagyon puha tőzeg található, melynek összenyomódási modulusa az 1 MPa-t sem éri el.

A tervezett útpálya azon a szakaszon, ahol jelentős vastagságú tőzeget keresztez, két szakaszra lett felosztva: az első szakaszon a töltés 4,5 m magasságú, míg a második szakaszon egy hídra való felvezetés miatt 8 m magasságot ér el. A töltéstest felső 1,5 m vastag zónáját a pályaszerkezeti követelmények miatt hagyományos anyagokból, tehát a pályaszerkezetet aszfalt és Ckt anyagból, valamint az alatta lévő földmű felső 100cm vastag javító-védő rétegét M-1/M-2 anyagból vettük figyelembe a modellezés során. Az altalaj felső 1 m vastag zónájában talajcserét alkalmaztunk annak érdekében, hogy a töltés megépíthető legyen a puha tőzeges talajkörnyezetben. A süllyedések

csökkentése és a konszolidáció gyorsítása érdekében 5 m hosszúságú kavicscölöpök is betervezésre kerültek a töltés alá $D=60$ cm átmérővel és 2,0 m-es raszter kiosztással (16. ábra), melyek a mélyebben elhelyezkedő merev iszap rétegre támaszkodnak rá.



16. ábra: Végeselemes modell.

A süllyedések modellezését ebben az esetben is a Plaxis 2D geotechnikai végeselemes szoftverrel végeztük el. A számítások során vizsgáltuk a kialakuló süllyedéseket kavicscölöp nélküli kialakítás esetén is mind hagyományos, mind pedig üveghab töltésanyag esetére. A számításokat a mozgásokat legjobban modellező HSsmall talajmodell segítségével végeztük el, mely a talaj merevségét a feszültségviszonyok alapján veszi fel, így a süllyedések nagysága sokkal realisztikusabbra adódik, mint egyszerűbb anyagmodellek alkalmazásával. Az egyes kialakításokkal kapott süllyedéseket a 3. táblázatban összegeztük.

| Töltés magassága | 4,5 m | 8 m |
|---------------------------------------|-------|------------|
| Hagyományos töltésanyag | 59 cm | talajtörés |
| Hagyományos töltésanyag + kavicscölöp | 29 cm | 49 cm |
| Üveghab töltésanyag | 23 cm | 25 cm |
| Üveghab töltésanyag + kavicscölöp | 10 cm | 15 cm |

3. táblázat: Végeselemes modellezés során kapott töltéssüllyedések különböző töltésmagasság és kialakítások esetén.

Amint azt a táblázat is mutatja, üveghab töltésanyag és kavicscölöp alkalmazásával az eredetileg több tíz centiméter nagyságrendű süllyedések 10 cm környékre szoríthatók le. Süllyedés korlátozás szempontjából az üveghab alkalmazása hatékonyabb megoldásnak tűnik a pusztán kavicscölöppel történő alátámasztásnál, mivel előbbi esetében a süllyedések 30-50cm nagyságrendet adnak, míg utóbbi esetében a süllyedések ~25cm körül maradnak.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A hulladékok újrahasznosítása segíti a fenntartható világ megteremtését. A hulladékból előállított termékek használatával elősegíthetjük a hulladék újrahasznosítást és csökkenthetjük a nyersanyagkészletek felhasználását. Az üveghab-granulátum üveghulladékból készülő, külsősgben és talajfizikai jellemzőkben a szemcsés talajokhoz hasonlító anyag.

A megszilárdult hab anyag, zárt pórusrendszerrel rendelkezik, aminek köszönhetően jó hőszigetelő képessége van, vizet nem vesz fel és a térfogatsűrűsége 1/10-e a talajénak. Durvaszemcsés anyagként jó vízvezető, a halmaznyírószilárdsági paramétere a zúzottkőhöz hasonló a törtfelületű szemcsék miatt. Bár a szemcsék szilárdsága a talajszemcséknél jóval kisebb, azonban az útépitési földművekben adódó feszültségeknek biztonsággal ellenállnak. Az anyag tulajdonságai nagyon hasonlóak a szemcsés talajokéhoz, összenyomódási modulusa és E_{2d} teherbírási sajátmodulusa a homok talajokéhoz hasonlítható. Szemcsés tulajdonsága miatt jól tömöríthető, a hazai gyakorlatban használt építőgépekkel elvégezhető a bedolgozása. Az üveghab-granulátum inert anyag, így a talajjal és a talajvízzel nem lép

kémiai reakcióba, nem bomlik és nem szennyezi a környezetét, ezen tulajdonsága elengedhetetlen a mélyépítésben való felhasználásnál.

A talajoknál jóval kisebb önsúlya miatt az üveghab-granulátum az útépítésben számos műszaki problémára megfelelő megoldást tud adni. Az alacsony önsúly miatt rendkívül kis terhelést ad át az altalajra. Ennek köszönhetően az üveghab-granulátumból épített töltések esetében a süllyedések mértéke elhanyagolhatóan kicsi lesz, amik nagyon gyorsan le is zajlanak. A kis süllyedések és a konszolidációs problémák elkerülése megoldást jelenthet a híd háttöltések és a hídszerkezet közötti süllyedéskülönbségből eredő problémák hatékony kezelésére. Az elhúzó konszolidáció miatt a hídépítés szervezési nehézségein is hatékonyan tud segíteni. Az alacsony önsúly miatti kis függőleges feszültségek elhanyagolható vízszintes földnyomást okoznak a hídfőn, így annak hídszerkezete és alapozása a hagyományosan alkalmazottakhoz képest átgondolható, optimalizálható lenne.

A puha, kompresszibilis altalajokon vezetett töltések esetében a talajtörés megakadályozását és a süllyedések csökkentését szolgáló töltésalapozások elhagyhatóak vagy csökkenthetőek lennének. Ezt kihasználva a kedvezőtlen területeken épülő töltések építése felgyorsítható lenne és vélhetően még a költségek is optimalizálhatóak lennének.

A munkánk során az üveghab talajmechanikai tulajdonságainak meghatározását és a vizsgálati eredményeket mutattuk be, amely paraméterekkel numerikus modellezéseket végeztünk különböző útépitési feladatok esetére. A számításaink szerint az üveghab-granulátumból készülő feltöltések készítésével az útépitésben tapasztalt műszaki problémák egy része hatékonyan megoldható lenne. Úgy véljük célszerű lenne az üveghab-granulátum útépitésben való felhasználhatóságát és előnyeit kihasználni, valamint további vizsgálatokat végezni az anyag további tulajdonságainak megismerése és a felhasználási kör bővítése érdekében.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- Állami Közútkezelő Norvégia 2007: 2445. sz. Technológiai beszámoló
- Arulrajah, Arul et al. 2015: Engineering and Environmental Properties of Foamed Recycled Glass as a Lightweight Engineering Material. *Journal of Cleaner Production* 94: 369–75. <https://doi.org/10.1061/9780784480151.002>
- Bernardo, E., R. Cedro, M. Florean & S. Hreglich. 2007: Reutilization and Stabilization of Wastes by the Production of Glass Foams. *Ceram. Int.* 33(6): 963–68. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2006.02.010>
- Chindapasirt, P., & Ubolluk, R. 2011: Shrinkage Behavior of Structural Foam Lightweight Concrete Containing Glycol Compounds and Fly Ash. *Materials and Design* 32(2): 723–27. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.036>
- Guo, H. W., Wang, X. F., Gong, Y. X., Liu, X. N., Gao, D. N. 2010: Improved Mechanical Property of Foam Glass Composites Toughened by Glass Fiber. *Materials Letters* 64(24): 2725–27. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.09.012>
- Huszák, T., Papp, T. B., Szendefy, J., Mustafa, W., S. 2019: Az üveghab granulátum alakváltozási paramétereinek vizsgálata statikus terhelés hatására In: Huszák, Tamás (szerk.) 5. Kézdi Konferencia Pécs, Magyarország : Magyar Geotechnikai Egyesület, pp. 317-329. , 13 p.
- Horpibulsuk, S., Wijtchot, A., Nerimitknornburee, A., Shen, S. L. & Suksiripattanapong, C. 2014: Factors Influencing Unit Weight and Strength of Lightweight Cemented Clay. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 47(1): 101–9. <https://doi.org/10.1144/qjegh2012-069>
- Lu, J., Onitsuka, K., 2004: Construction Utilization of Foamed Waste Glass. *J. Environ. Sci.* 16(2): 302–7.
- Méar, F., P. Yot, M. Cambon, & M. Ribes 2006: The Characterization of Waste Cathode-Ray Tube Glass. *Waste Management* 26(12): 1468–76. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.11.017>
- Midha, S., Kim, T. B., Wouter van den B., Lee, P. D., Jones, J. R., Mitchell, C. A. 2013: Preconditioned 70S30C Bioactive Glass Foams Promote Osteogenesis in Vivo *Acta Biomaterialia* 9(11): 9169–82. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.07.014>

Qian, M., Q. Wang, L. Luo, and Ch. Fan 2018: Preparation of High Strength and Low-Cost Glass Ceramic Foams with Extremely High Coal Fly Ash Content *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 397(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/397/1/012071>

Sasmal, N., M. Garai, & B. Karmakar 2015: Preparation and Characterization of Novel Foamed Porous Glass-Ceramics *Materials Characterization* 103: 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.03.007>

Scheffler, M., Colombo, P. 2005: Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim*: 669. <https://doi.org/10.1002/3527606696>

Szendefy J., Huszák T. 2018: Üveghab hőszigetelő ágyazati anyag mechanikai tulajdonságai *Geotechnika 2018 Konferencia, Velence, Magyarország*

Szendefy, J., Huszák, T. 2019: Geotechnical characterization of foamglass aggregate ECSMGE 2019 Reykjavik

Tompai, Z. 2008: Földművek és kötőanyag nélküli alaprétegek teherbírásának és tömörségének ellenőrzése könnyű ejtősúlyos módszerekkel *PhD értekezés BME Építőmérnöki Kar*

Tompai, Z. 2005: Tapasztalati határértékek - A statikus és dinamikus teherbírás modulus átszámíthatóságáról, *Mélyépítés*, 2005. július-szeptember, pp. 22-25.

Wang, Y. W., & Bai, X. T. 2012: Experimental Study of the Foam Agent in Lightweight Aggregate Concrete. *Applied Mechanics and Materials* 226–228: 1776–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.226-228.1776>

Yot, P. G., & F. O. Méar. 2009: Lead Extraction from Waste Funnel Cathode-Ray Tubes Glasses by Reaction with Silicon Carbide and Titanium Nitride. *Journal of Hazardous Materials* 172(1): 117–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.137>



Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezése hőmérséklet profil alapján

**Seoyoung Cho¹, Pethő László², Tóth Csaba¹,
Lakatos Éva³**

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Út és Vasútépítési Tanszék

² Fulton Hogan Infrastructure Services

³ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék

E-mail: hotaru128@hanmail.net, laszlo.petho@fultonhogan.com.au, toth.csaba@epito.bme.hu, lakatoseva@mail.bme.hu

DOI: [10.36246/UL.2020.2.07](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.07)

KIVONAT

A hajlékony útpályaszerkezetek viselkedésének tanulmányozásában, az aszfaltréteg kötőanyagtartalmának köszönhetően a hőmérséklet hatása nagy jelentőséggel bír. A jelenlegi szakmai gyakorlat ezt a problémát az ún. ekvivalens hőmérséklet segítségével igyekszik kiküszöbölni, azaz rétegenként, olyan egyenértékű hőmérséklet és ennek eredményeként olyan aszfaltmodulus értékeket használ, amelyek, ha a teljes év alatt változatlanok lennének, akkor ugyanakkora fáradási kár keletkezne a pályaszerkezetben, mint a különböző hőmérsékletek eltérő aszfaltmodulusaival számolt igénybevételek összegzett hatása. Cikkünkben azt vizsgáljuk, ha egy ún. meteorológiai évet veszünk valós hőmérsékleti adatokkal, akkor a modellezett pályaszerkezet elméleti viselkedése hogyan alakul a hagyományos méretezési elvekkel számított eredményekhez képest.

Kulcsszavak: hőmérsékleti profil, hajlékony pályaszerkezet modellezés, végelemmódszer

ABSTRACT

In the study of the behavior of flexible pavements, the effect of temperature is of great importance due to the binder content of the asphalt layers. The current professional practice tries to eliminate this problem with the help of the equivalent temperature. Therefore, such an equivalent temperature and as a result of it such an asphalt modulus values have been applied layer by layer and, which, if left unchanged throughout the year, would cause the same fatigue damage in the pavement as the sum of the loads calculated for different asphalt modulus at different temperatures. In our article, we examine if we take a meteorological year with real temperature data, then how the theoretical behavior of the modeled pavement changes compared to the results, which calculated with traditional pavement design method.

Keywords: temperature profile, flexible pavement design, finite element method

Seoyoung Cho

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék PhD hallgatója.

Dr. Pethő László

Pethő László regisztrált szakmérnök több mint 19 év nemzetközi tapasztalattal az aszfaltkeverék tervezés, minőségvizsgálat és pályaszerkezet méretezés területén. Jenleg a Fulton Hogan Infrastructure Services-

nél pályaszerkezet szakértőként dolgozik, ahol többek között pályaszerkezetek teljesítményével és innovatív technológiák alkalmazásával foglalkozik.

Dr. Tóth Csaba

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

Dr. Lakatos Éva

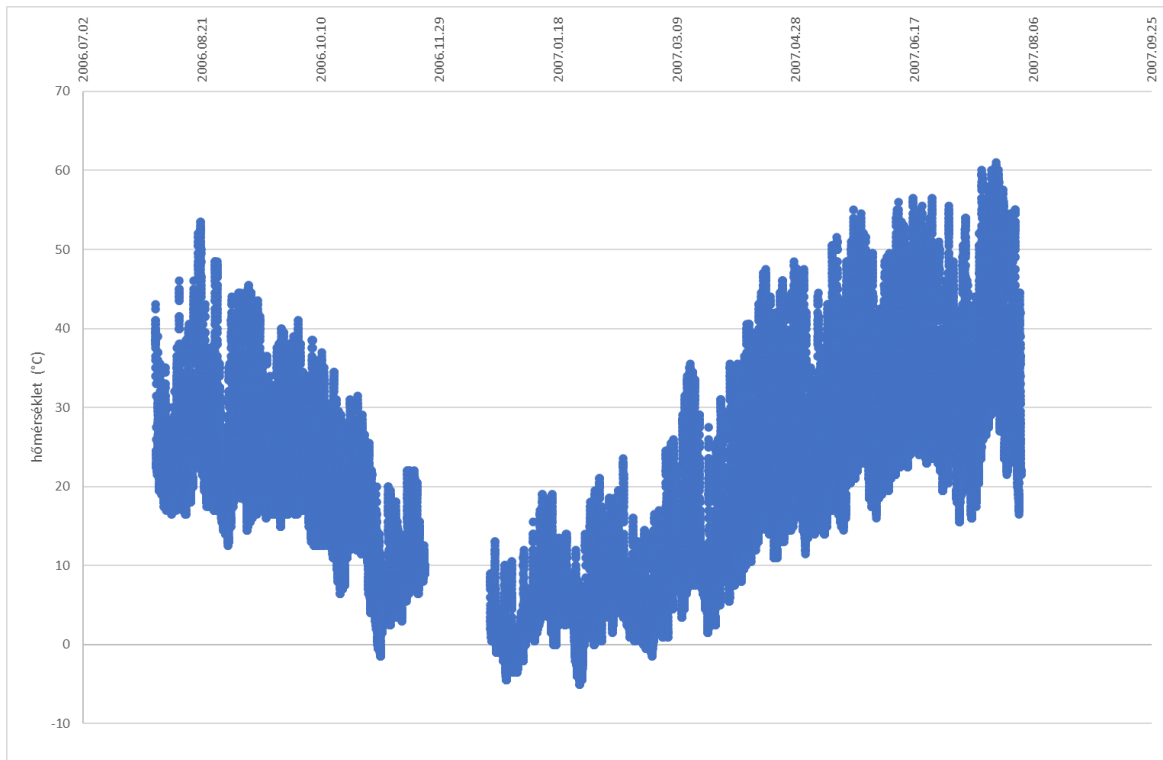
A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME), Tartószerkezetek Mechanikája Tanszékének munkatársa. Fő kutatási területe a biomechanika – biológiai anyagok és implantátumok vége-selemes vizsgálata, porózus szilárd anyagok szerkezeti és anizotrop tulajdonságai.

1. AZ ASZFALTBURKOLAT FELÜLETI HŐMÉRSÉKLETÉNEK ÉVES ELOSZLÁSA

Ha egy aszfaltburkolatú útpályaszerkezet különböző mélységeiben kialakuló hőmérsékletet szeretnénk megbecsülni, első lépésként célszerű a felületi hőmérsékletéből kiindulni, hiszen az közvetlenül is mérhető.

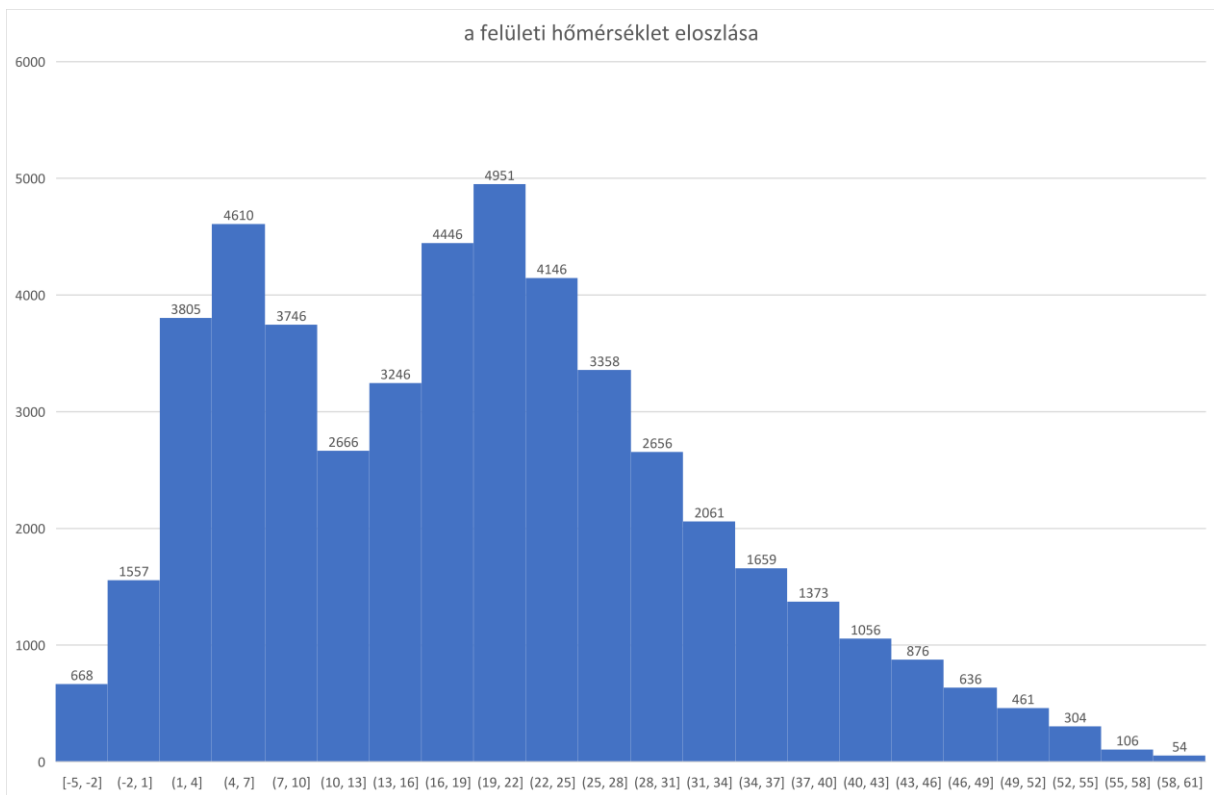
Aszfaltburkolaton mért hőmérsékleti eloszlás relatív gyakoriságát egy korábban létrehozott (Pethő, 2008) – több publikációban is szereplő – meteorológiai állomástól kapott hőmérsékleti adatgyűjtésből számítottuk. A meteorológiai állomást 2006-ban szerelték fel, mi a 2006.01.01-jétől 2007.7.31-ig tartó intervallum adatait kaptuk meg és használtuk fel. A meteorológiai állomás 10 percenként mérte és naplózta az adatokat, ami a kiválasztott egy év esetén mintegy 48 441 darab mérési adatnak felelt meg. A mérési adatok a felületi hőmérséklet mellett a környezeti hőmérsékletet, illetve adott mélységben – jellemzően az egyes pályaszerkezeti rétegek középvonalában – 2, 7, 14, 29 és 49 cm-en – mért hőmérsékleti adatokat tartalmazta.

Az 1. ábra a felületi hőmérséklet változását mutatja ezen egy év alatt. A magyar éghajlati viszonyok vonatkozásában az adatok viszonylag magas felületi-hőmérsékleteket mutatnak, ezt magyarázhatja az időjárás állomás körüli lokális éghajlati viszonyok, mivel az állomás egy aszfaltkeverőtelep sűrűn beépített, magas épületekkel leárnyékolt udvarán található. Az adatsor megszakadása a meteorológiai állomás két hétig tartó leállításának következménye, ezen időszakban az adatok gyűjtése elmaradt, ez azonban megítélésünk szerint elhanyagolható hatással van az éves hőmérsékleti eloszlásra.



1. ábra: A felületi hőmérséklet változása egy év alatt.

A 2. ábrán látható hisztogram a 3 °C osztályközzel képzett, 22 darab hőmérsékleti osztály megoszlását mutatja.



2. ábra: Hőmérsékleti eloszlás hisztogramja.

Az ábrából megállapítható például, hogy a leggyakrabban előforduló hőmérsékleti tartomány a 19-22 °C közötti tartományba esett. Elosztva ezen hőmérsékleti intervallumba eső értékek előfordulást az összes mért darabszámmal az alábbiak szerint:

$$\frac{4951}{48441} = 0,1022$$

kapjuk, hogy a 19 és 22°C közötti hőmérsékleti tartományban az év 10,22 %-ában fordult elő.

2. AZ ASZFALTBURKOLATI RÉTEGEK HŐMÉRSÉKLETÉNEK BECSLÉSE

Annak érdekében, hogy modellezni tudjuk a hőmérséklet lefutását a mélység függvényében a pályaszerkezetben, az elemzéshez egy 19 cm össz-aszfaltvastagságú, három aszfaltrétegből álló szerkezetet modelleztünk az alábbiak szerint:

- 4 cm kopóréteg
- 6 cm-es kötőréteg
- 9 cm-es aszfalt felső alapréteg.

Az egyes aszfaltrétegekben kialakuló hőmérsékletek becslésére az alábbi német módszert alkalmaztuk (Kayser, 2007; RDO, 2009). A módszer az 1. egyenlet szerint a felületi hőmérséklet ismeretében ad becslést az aszfaltrétegek tetszőleges mélységében ébredő hőmérsékleti viszonyokra.

$$y = a \cdot \ln(0,01 \cdot x + 1) + T \tag{1}$$

ahol: „y” aszfalt becsült hőmérséklete [°C] „x” mélységben, „x” a burkolat felszíne alatti mélység [mm], „T” a felület hőmérséklete [°C], „a” paraméter a „T” függvényében (1. táblázat).

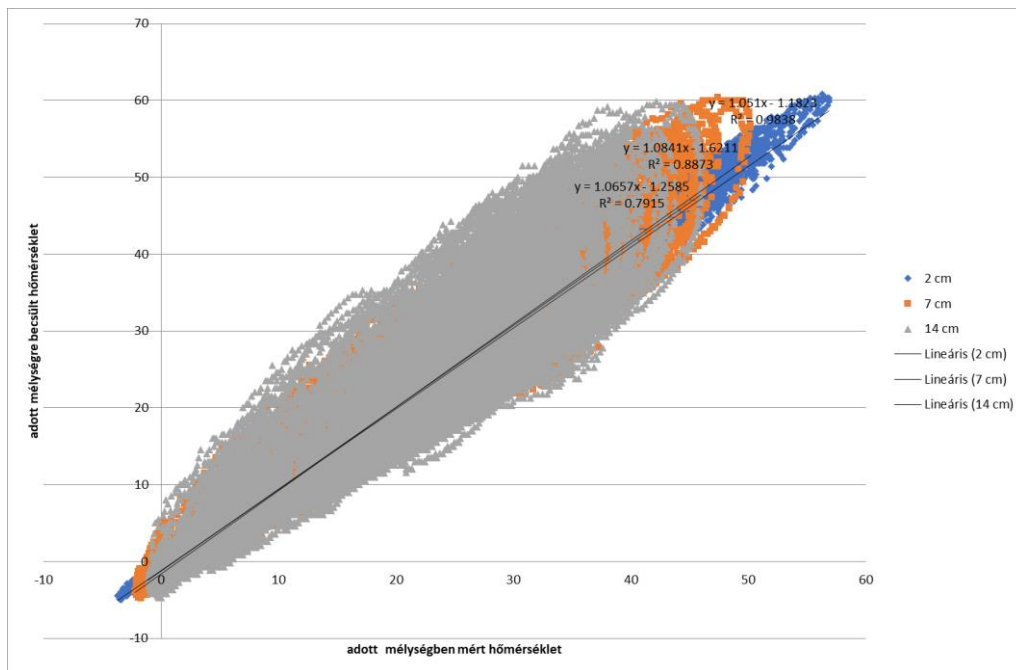
| Hőmérséklet | a |
|-------------|-------|
| <-10 | 6.5 |
| <-5 | 4.5 |
| < 0 | 2.5 |
| < 5 | 0.7 |
| < 10 | 0.1 |
| < 15 | 0.3 |
| < 20 | 0.4 |
| < 25 | -1.6 |
| < 30 | -4.0 |
| < 35 | -6.2 |
| < 40 | -8.5 |
| < 45 | -10.5 |
| > 45 | -12.0 |

1. táblázat: „a” paraméterek a felületi hőmérséklet függvényében.

A pályaszerkezeti rétegek hőmérsékletét elsőként a 2, 7 és 14 cm mélységben a fentiekben ismertetett német módszerrel becsültük és összevetettük a meteorológiai mérőállomástól kapott, az azonos mélységben mért adatokkal. A becsült és a meteorológiai állomásról gyűjtött adatokat összevetve, megállapítottuk, hogy erős kapcsolat igazolható, mivel a korreláció szorosságát kifejező R² értékek a következőképpen alakultak:

- 2 cm mélység: 0,98
- 7 cm mélység: 0,89
- 14 cm mélység: 0,79

A 3. ábra a becült hőmérsékletet mutatja a különféle mélységeken mért hőmérséklet függvényében.



3. ábra: Becült hőmérséklet a mért hőmérséklet függvényében.

A modellt tovább finomítva a teljes aszfaltvastagság 19 centiméterét 1 centiméteres, 19 különálló alrétegre bontottuk. Figyelembe véve továbbá, a felszíni hőmérséklet eloszlást 22 hőmérsékleti tartományra osztottuk, amint azt a fentiekben kifejtettük, a pályaszerkezet éves hőmérsékleti viszonyait megfelelő részletességgel a 2. táblázatban megadott 19x22-es mátrix írja le.

| A pályaszerkezeti modell sorszama | 1 | 2 | 3 | ... | 20 | 21 | 22 |
|--|------|------|-----|-----|------|------|------|
| a hőmérsékleti tartomány alsó határa (°C) | -5 | -2 | 1 | ... | 52 | 55 | 58 |
| a hőmérsékleti tartomány felső határa (°C) | -2 | 1 | 4 | ... | 55 | 58 | 61 |
| a hőmérsékleti tartomány átlagértéke (°C) | -3.5 | -0.5 | 2,5 | ... | 53,5 | 56,5 | 59,5 |
| 10 mm | -3.3 | -0.3 | 2,6 | ... | 52,4 | 55,4 | 58,4 |
| 20 mm | -3.0 | 0.0 | 2,6 | ... | 51,3 | 54,3 | 57,3 |
| 30 mm | -2.8 | 0.2 | 2,7 | ... | 50,4 | 53,4 | 56,4 |
| 40 mm | -2.7 | 0.3 | 2,7 | ... | 49,5 | 52,5 | 55,5 |
| 50 mm | -2.5 | 0.5 | 2,8 | ... | 48,6 | 51,6 | 54,6 |
| 60 mm | -2.3 | 0.7 | 2,8 | ... | 47,9 | 50,9 | 53,9 |
| 70 mm | -2.2 | 0.8 | 2,9 | ... | 47,1 | 50,1 | 53,1 |
| 80 mm | -2.0 | 1.0 | 2,9 | ... | 46,4 | 49,4 | 52,4 |
| 90 mm | -1.9 | 1.1 | 2,9 | ... | 45,8 | 48,8 | 51,8 |
| 10 mm | -1.8 | 1.2 | 3,0 | ... | 45,2 | 48,2 | 51,2 |

| | | | | | | | |
|--------|----------|-----|---------|-----|----------|----------|----------|
| 110 mm | - 1.6 | 1.4 | 3. 0 | ... | 44. 6 | 47. 6 | 50. 6 |
| 120 mm | - 1.5 | 1.5 | 3. 1 | ... | 44. 0 | 47. 0 | 50. 0 |
| 130 mm | - 1.4 | 1.6 | 3. 1 | ... | 43. 5 | 46. 5 | 49. 5 |
| 140 mm | - 1.3 | 1.7 | 3. 1 | ... | 43. 0 | 46. 0 | 49. 0 |
| 150 mm | - 1.2 | 1.8 | 3. 1 | ... | 42. 5 | 45. 5 | 48. 5 |
| 160 mm | - 1.1 | 1.9 | 3. 2 | ... | 42. 0 | 45. 0 | 48. 0 |
| 170 mm | - 1.0 | 2.0 | 3. 2 | ... | 41. 6 | 44. 6 | 47. 6 |
| 180 mm | - 0.9 | 2.1 | 3. 2 | ... | 41. 1 | 44. 1 | 47. 1 |
| 190 mm | - 0.8 | 2.2 | 3. 2 | ... | 40. 7 | 43. 7 | 46. 7 |

2. táblázat: A 19*22-es mátrix szemléltetése.

3. A KÖTŐANYAG ÉS AZ ASZFALTKEVERÉK PARAMÉTEREINEK MEGHATÁROZÁSA A HŐMÉRSÉKLET FÜGGVÉNYÉBEN

A számításokhoz a kötőanyag tulajdonságait úgy tekintettük, hogy azok PG 64 -22 fokozatnak felelnek meg. A PG (Performance Graded) jelölés a bitumen viselkedése fokozatára utal, a két számérték pedig a környezeti feltételeket leíró magas, illetve alacsony burkolattervezési hőmérsékleteket jelenti. Ebben az esetben egy PG 64-22 fokozatú kötőanyag a szabványban foglalt előírásokat 64 °C-nál kisebb, átlagos 7 napos magas burkolathőmérsékletre és -22 °C-nál nagyobb, alacsonyabb éves átlagú burkolathőmérsékletre vonatkozóan elégíti ki.

A bitumen hőmérsékletfüggő viszkozitás értékeit a 2 és 3 egyenletekkel határoztuk meg (NCHRP, 2011).

$$\log\log(\eta) = A + VTS\log(T_R), \text{ ha } T_R > T_{\text{kritikus}} \quad (2)$$

$$\log\log(\eta) = 1.095, \text{ ha } T_R \leq T_{\text{kritikus}} \quad (3)$$

Ahol, „ η ” viszkozitás [cP], „ T_R ” hőmérséklet [Rankine]. A PG 64-22 minőségű kötőanyagokra az alábbi paraméterek vonatkoznak:

$A = -3.680$ és $VTS = 10.980$.

A részletes modellezéshez a különböző aszfaltrétegeket a kopó, kötő és alaprétegbe építhető keverékekre jellemző összetételekre vonatkozó – eltérő – paraméterekkel vettük figyelembe. Ezen paramétereket a 3. táblázat foglalja össze, ahol a paraméterek a dél-koreai követelmények alapján lettek megadva (Molit, 2015) azonban hazai előírásokkal is jellemzően összhangban vannak.

| Rétegek | p ₃₄ | p ₃₈ | p ₄ | p ₂₀₀ | v _a | v _{beff} | f (Hz) |
|-----------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|----------------|-------------------|--------|
| kopóréteg | 0 | 38,75 | 72,5 | 10 | 3,08 | 12,2 | 25 |
| kötőréteg | 2,5 | 24 | 45 | 6 | 4,159 | 10,5 | 25 |
| alapréteg | 13 | 35 | 51 | 4 | 3,777 | 9,3 | 25 |

3. táblázat: A különböző aszfaltrétegek modellezéséhez felhasznált paraméterek.

Tekintve a 2. táblázat első oszlopát, amely a (-5) és (-2) °C felületi hőmérsékleti tartományra, (-3,5) °C középérték figyelembevételével az 1. egyenlet alapján, centiméterenként tartalmazza a becsült hőmérsékleti értékeket, amelyek bemeneti paramétereket biztosítanak a kötőanyag dinamikus viszkozitásának előrejelzésére, amelyet a 2 és 3 egyenlet szerint számíthatunk ki.

A kötőanyag viszkozitásának ismeretében pedig becsülhető a keverék merevsége az alábbi (4) egyenlet segítségével. Ez az összefüggés az úgynevezett Witczak-egyenlet, amellyel meg lehet becsülni az aszfaltréteg modulusát a kötőanyag dinamikus viszkozitásának és az aszfaltkeverék tulajdonságainak függvényében (MOLIT, 2015).

$$\log|E^*| = 6.940166 - 0.00176(P_{200}) + 0.003889(P_4) - 0.08776(V_a) - 1.33426 \frac{V_{eff}}{V_{eff}+V_a} + \frac{(-3.63992-0.03114(P_4)+0.015546(P_{38})+0.010469(P_{34}))}{1+\exp(-0.09942+0.162727 \times \log f + 0.180695 \times \log \eta)} \quad (4)$$

A számítást példaként a (-5) – (-2) °C hőmérsékleti tartományra az alábbiakban közöljük, ahol az aszfaltréteg-modulust a 4. táblázatban foglaltak szerint számítottuk.

| Pályaszerkezeti rétegek | Mélység (mm) | Kötőanyag dinamikai viszkozitása (10 ⁶ Poise) | Aszfaltmodulus (MPa) |
|-------------------------|--------------|--|----------------------|
| kopóréteg | 10 | 25 820 | 23,211 |
| | 20 | 23 725 | 22,832 |
| | 30 | 21 955 | 22,489 |
| | 40 | 20 438 | 22,176 |
| kötőréteg | 50 | 19 125 | 27,784 |
| | 60 | 17 976 | 27,489 |
| | 70 | 16 963 | 27,215 |
| | 80 | 16 062 | 26,959 |
| | 90 | 15 255 | 26,719 |
| | 100 | 14 529 | 26,494 |
| alapréteg | 110 | 13 872 | 32,697 |
| | 120 | 13 275 | 32,452 |
| | 130 | 12 729 | 32,220 |
| | 140 | 12 228 | 31,999 |
| | 150 | 11 768 | 31,789 |
| | 160 | 11 342 | 31,589 |
| | 170 | 10 947 | 31,398 |
| | 180 | 10 581 | 31,214 |
| | 190 | 10 239 | 31,039 |

4. táblázat: Anyagparaméterek becsült értékei (T= -3.5°C).

Hasonló módon a számítások a további 21 hőmérsékleti tartományra elvégezhetőek, és ebben az esetben előállítható az egyéves időszak hőmérsékleti viszonyait lefedő, azt kellőképpen reprezentáló 22 pályaszerkezeti modell aszfaltrétegekre vonatkozó része.

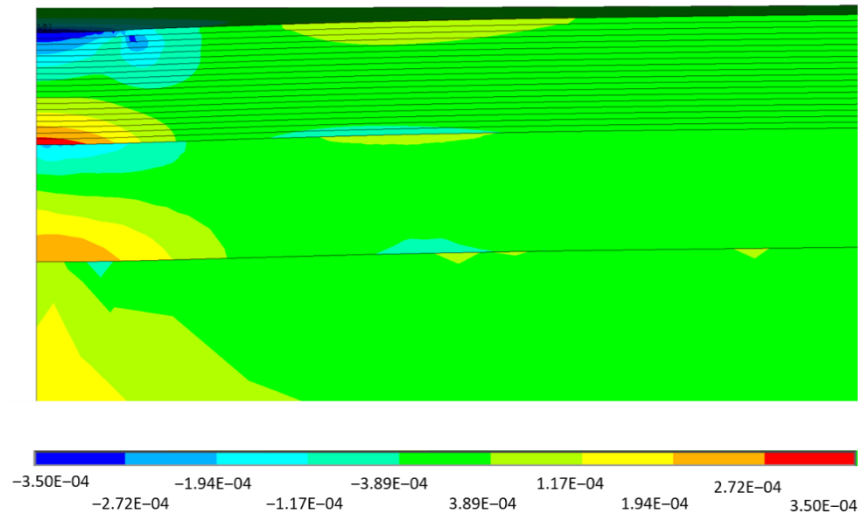
4. A VÉGESELEM MODELLEK ELEMZÉSE

Annak érdekében, hogy a teljes pályaszerkezet viselkedését modellezni tudjuk, az eddig vizsgált aszfaltrétegek alá, amelyeket 19 darab 1 cm vastag aszfalt al-réteggel jellemeztünk, 20 cm vastag, 350 MPa modulusú, nem kötött szemcsés alapréteget és 50 MPa általaj teherbírást tételeztünk fel.

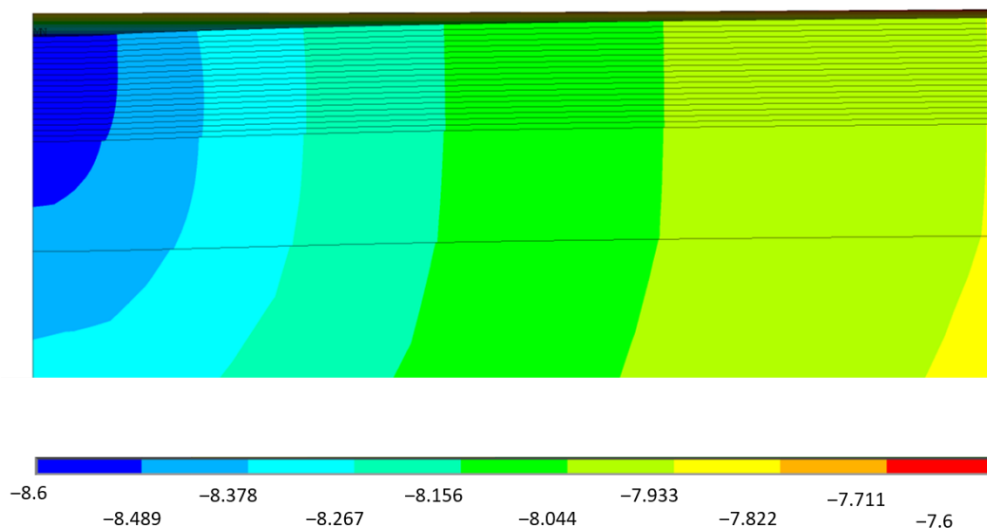
Az így már teljes pályaszerkezetet az (NCHRP/TRB, 2004) ajánlása alapján 9m x 9m x 9m, köbös VEM modellé alakítottuk, biztosítva, hogy a vízszintes alsó és függőleges oldalsó peremek ne közelítsék meg a terhelő felület középpontját az ajánlott 50, illetve 12 keréksugárnál jobban. Feltételeztük, hogy a szokványos 50 kN-os kerékterhelés egyenletesen oszlik meg egy kör alakú, 15 cm sugarú felületen. Az aszfalt, az alapréteg és az általaj anyagára 2,3, 2,0 és 1,5 t/m³ önsúlyterhet alkalmazunk, ebben a sorrendben. A végeelem-modellben a tartomány negyedét vettük figyelembe, és szimmetrikus

peremfeltételeket alkalmaztunk a szimmetria felületeire, míg az alsó réteg legalsó pontjait függőleges elmozdulásokkal, az egész tartományt merevtestszerű elmozdulásokkal szemben megtámasztottuk. A végeelem modellben nyolc csomópontú 3D szerkezeti szilárd testelemeket alkalmaztunk (az ANSYS szoftverben SOLID185 elemtípus), minden csomóponton három szabadságfokkal. A 19. aszfalt alréteg a szemcsés alaphoz, valamint a szemcsés alap az altalajhoz súrlódásmentes kontakt elemekkel kapcsolódtak.

A vízszintes fajlagos nyúlásokat az aszfaltrétegek alján (4. ábra) és a függőleges elmozdulást a földmű tetején kiszámítottuk (5. ábra).



4. ábra: A vízszintes megnyúlások [-] alakulásának szemléltetése a 22. számú modellben



5. ábra: A függőleges eltolódások [mm] szemléltetése a 22. számú modellben

Mind a 22 pályaszerkezeti modellre végeelemes számítás segítségével kiszámított igénybevételeket a 7. táblázat foglalja össze.

5. A PÁLYASZERKEZET KUMULATÍV FÁRADÁSA

Annak érdekében, hogy a vizsgált pályaszerkezet viselkedését modellezni tudjunk, tételezzük fel, hogy a várható forgalmi terhelés 1 millió egységtengely, amely évközben egyenletesen oszlik el. Azaz a 22 darab pályaszerkezeti modellre a forgalmi terhelés megoszlása megegyezik a felületi hőmérséklet eloszlással, amint azt az 5. táblázat mutatja.

| A hőmérsékleti osztály sorszáma (1-22) | Mért hőmérsékleti adatok száma (-) | Adott hőmérséklet gyakorisága (%) | Tényleges tervezési forgalom (Ni, tényleges) |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|--|
| 1 | 668 | 1,38 | 13 790 |
| 2 | 1557 | 3,21 | 32 142 |
| 3 | 3805 | 7,85 | 78 549 |
| 4 | 4610 | 9,52 | 95 167 |
| 5 | 3746 | 7,73 | 77 331 |
| 6 | 2666 | 5,50 | 55 036 |
| 7 | 3246 | 6,70 | 67 009 |
| 8 | 4446 | 9,18 | 91 782 |
| 9 | 4951 | 10,22 | 102 207 |
| 10 | 4146 | 8,56 | 85 589 |
| 11 | 3358 | 6,93 | 69 321 |
| 12 | 2656 | 5,48 | 54 830 |
| 13 | 2061 | 4,25 | 42 547 |
| 14 | 1659 | 3,42 | 34 248 |
| 15 | 1373 | 2,83 | 28 344 |
| 16 | 1056 | 2,18 | 21 800 |
| 17 | 876 | 1,81 | 18 084 |
| 18 | 636 | 1,31 | 13 129 |
| 19 | 461 | 0,95 | 9 517 |
| 20 | 304 | 0,63 | 6 276 |
| 21 | 106 | 0,22 | 2 188 |
| 22 | 54 | 0,11 | 1 115 |
| Total | 48441 | 100,00 | 1 000 000 egységtengely |

5. táblázat: A hőmérsékleti értékek gyakorisága alapján a forgalmi terhelés megoszlása.

A megengedett forgalmi terhelést a Shell által kidolgozott alapösszefüggés ausztrál változatával (Austroads Ltd., 2017.), az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$N = \frac{SF}{RF} \left[\frac{6918(0.856V_b + 1.08)}{E^{0.36} \mu\epsilon} \right]^5 \tag{5}$$

ahol: „N” a megengedett teherismétlődések száma, „μϵ” megengedett megnyúlás aszfalt felsőalapréteg alsó síkján (microstrain), „V_b” bitumen térfogat%-a az aszfaltrétegben [%], „E” aszfalt modulus [MPa], „SF” eltolási tényező a laboratóriumi és az üzem fáradtsági élettartamok között (feltételezett érték = 6), „RF” megbízhatósági tényező (6. táblázat).

| Megbízhatóság | | | | | |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-------|
| 50% | 80% | 85% | 90% | 95% | 97.5% |
| 1.0 | 2.4 | 3.0 | 3.9 | 6.0 | 9.0 |

6. táblázat: Megbízhatósági tényező (RF).

A (5) egyenlet segítségével az VEM modellszámítások eredményeként kapott aszfaltmegnyúlások felhasználva, mind a 22 pályaszerkezeti modell esetén meghatározható a megengedett tengelyterhelés értéke, amelyet a 7. táblázat tartalmaz.

| Pályaszerkezeti modell sorszama (1-22) | Becsült vízszintes megnyúlás (microstrain) (ANSYS) | Megengedett forgalmi terhelés (Ni, engedett) a (4) egyenlet szerint |
|--|--|---|
| 1 | 48 | 30,039,423 |
| 2 | 56 | 20,120,211 |
| 3 | 60 | 15,579,040 |
| 4 | 68 | 10,986,355 |
| 5 | 79 | 7,431,197 |
| 6 | 91 | 4,999,914 |
| 7 | 105 | 3,460,413 |
| 8 | 120 | 2,412,376 |
| 9 | 127 | 1,974,324 |
| 10 | 143 | 1,422,479 |
| 11 | 149 | 1,216,528 |
| 12 | 167 | 899,067 |
| 13 | 174 | 771,340 |
| 14 | 181 | 670,285 |
| 15 | 201 | 512,766 |
| 16 | 210 | 444,640 |
| 17 | 231 | 348,753 |
| 18 | 244 | 299,301 |
| 19 | 267 | 240,659 |
| 20 | 290 | 196,196 |
| 21 | 314 | 162,043 |
| 22 | 339 | 135,481 |

7. táblázat: A VEM modell segítségével megkapott megnyúlások az alsó aszfalréteg alsó síkjában és az ez alapján becsült megengedett forgalmi terhelés értékek

Ezen értékeket (7. táblázat, utolsó oszlop) összevetve a feltételezett forgalmi terheléssel (5. táblázat utolsó oszlop) minden egyes pályaszerkezeti modell esetére meghatározható a kumulált fáradás mértéke, ahol 0: a terheletlen szerkezet és 1: a kifáradt szerkezetet szimbolizáló szélsőérték. A kumulatív károsodási tényezőt (CDF) a Miner hipotézissel (6. egyenlet) számítottuk:

$$CD = \sum_{MINER} = \frac{N_{1,tényleges}}{N_{1,megeng}} + \frac{N_{2,tényleges}}{N_{2,megeng}} + \frac{N_{3,tényleges}}{N_{3,megeng}} + \dots + \frac{N_{22,tényleges}}{N_{22,megeng}} \leq 1 \tag{6}$$

ahol: „N_{i,tényleges}” (i = 1...22), a forgalmi terhelés tényleges száma „i” pályaszerkezeti modellnél, „N_{i,megeng}” (i = 1...22), megengedett tengelyterhelés „i” pályaszerkezeti modellre.

1 millió egységtengely és 95% -os megbízhatósági szint mellett a CDF-érték 0,72; következésképpen a pályaszerkezet mintegy 28%-os szerkezeti kapacitással (fáradási tartalékkal) rendelkezik. Abban az esetben, ha a forgalmi terhelést 1,34 millióra növeljük, a CDF-értéket 0,99-re emelkedik és megközelíti az elméleti határát, azaz a vizsgált pályaszerkezet ennél magasabb fáradási igénybevételt nem képes elméletileg elviselni.

6. A KAPOTT EREDMÉNYEK ÖSSZEVETÉSE REFERENCIASZERKEZETTEL

Annak érdekében, hogy a VEM modellel kapott eredményeket értékelni tudjuk, az így kapott eredményeket egy ún. hagyományos, 5 rétegű modellszámítás eredményeivel vetettük össze, ahol a hőmérséklet hatását az ún. ekvivalens hőmérsékleten keresztül vettük figyelembe. Ebben a számításban egyetlen pályaszerkezeti modellt hoztunk létre.

Az ekvivalens hőmérséklet számítását ebben a cikkben nem tárgyaljuk, értékére 20 °C-ot állapítottunk meg (Gribovszki et al., 2016) és ehhez a hőmérsékleti értékhez tartozó modulus értékekkel számoltunk, a 8. táblázatban foglaltakkal összhangban.

| Pályaszerkezeti rétegek | Modulus (MPa) |
|--------------------------|---------------|
| 4 cm aszfalt kopóréteg | 4,000 |
| 6 cm aszfalt kötőréteg | 5,800 |
| 9 cm aszfalt alapréteg | 4,500 |
| 20 cm szemcsés alapréteg | 350 |
| altalaj | 50 |

8. táblázat: Referencia pályaszerkezeti modell.

A számításokat Shell BISAR programmal elvégezve az aszfaltrétegek alsó síkjában kiszámított vízszintes nyúlás 143 (mikronnyúlás vagy microstrain) adódott, amelyhez 4 250 836 egységterengely terhelés tartozik 95% -os megbízhatósági szint mellett.

A két megközelítés közötti különbség jól látható és számszerűsíthető. A hőmérsékleti hatások részletesebb figyelembevétele jelentősen csökkentette az elméletileg meghatározható megengedett forgalmi terhelést.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Az aszfaltrétegekre gyakorolt hőmérsékleti hatás figyelembevétele döntő tényező a pályaszerkezet méretezésénél. Ebben a cikkben az alsóbb aszfaltrétegek hőmérsékletét a német irányelvek alapján becsültük meg. A becsült értékek megfelelő összefüggésben voltak a korábban létre hozott meteorológiai állomásról gyűjtött valós adatokkal, és jó korrelációt kaptunk. Ezt a lépést követően meghatároztuk a hőmérséklet-eloszlás relatív gyakoriságát.

A pályaszerkezetünk aszfaltrétegeinek modelljét 19 darab 1 cm vastag rétegekből építettük fel, annak érdekében, hogy megfelelően tükrözze a hőmérséklet-változást, amit pedig a kötőanyag viszkozitásának és az aszfalt modulusának becsléséhez használtunk fel.

Az így elvégzett modellszámítások és az ún. ekvivalens (egyenértékű) hőmérsékleti módszerrel végzett egyszerűsített számítások összehasonlítása azt mutatta, hogy a cikkben vázolt részletes modell jobb előrejelzést nyújthat a pályaszerkezet valós, teljes szerkezeti kapacitásáról. Ennek oka az, hogy a hagyományos módszer nem tudja figyelembe venni az aszfaltburkolat szerkezetére gyakorolt hőmérsékleti hatások komplexitását.

A módszer rávilágít arra, hogy a részletes hőmérsékleti profil alkalmazásával végzett számítás valóságosabb bemenetet nyújt a szerkezet kialakításához, és realiztikusan mérlegelhető a különféle aszfaltkeverékek, polimerrel vagy gumival modifikált keverékek, ill. ún. nagy modulusú aszfaltkeverékek közötti teljesítményeltérések hatása.

8. HIVATKOZÁS

Austrroads. 2017: Guide to Pavement Technology Part 2: Pavement Structural Design, Sydney: Austrroads Ltd.

Gribovszki, Z., Igazvölgyi, Z., Kalicz, P., Pethő, L., Kisfaludi, B., Tóth, C., Markó, G., Soós, Z., Péterfalvi, J., Szentpéteri, I. Primusz, P., Tódor, D. 2016: Alternatív méretezési eljárásokra vonatkozó tanulmány és az alternatív módszerek bevezetését segítő irányelv. Kutatási jelentés. Megrendelő: Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ.

Kayser, S. 2007: Berücksichtigung klimatischer Bedingungen bei der rechnerischen Dimensionierung von Oberbauten für Verkehrs-flächen, Dissertation, TU Dresden.

MOLIT. 2015: Mechanistic-empirical pavement design specification, Seoul: Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea .

NCHRP. 2011: LTPP Computed Parameter: Dynamic modulus, US Department of Transportation Federal Highway Administration.

Pethő, L. 2008: A hőmérséklet eloszlás alakulása az aszfalt burkolatú útpályaszerkezetekben és ennek hatása a pályaszerkezeti rétegek fáradási méretezésére, technológiai tervezésére. PhD értekezés.

RDO. 2009. Guidelines for mathematical dimensioning of foundations of traffic surfaces with a course asphalt surface, Research society for roads and traffic, Berlin.



Szabad-e közúti hídjainkon műgumi szőnyegszerű dilatációt építeni?

Hajós Bence¹

¹ Első Lánchíd Mérnöki és Szolgáltató Bt.

E-mail: elsolanchid@elsolanchid.hu

DOI: [10.36246/UL.2020.2.08](https://doi.org/10.36246/UL.2020.2.08)

KIVONAT

A környezeti A közúti hidak legtöbbször meghibásodó része a dilatáció. Közelmúltban a szabályozás jelentősen korlátozta a szőnyegszerű műgumi dilatációk alkalmazását. Jelen tanulmány a szőnyegszerű dilatáció alkalmazásának kérdéseit mutatja be, különös tekintettel a gyártók és tervezők feladatára.

Kulcsszavak: közúti híd, dilatációk, saruk, hidak mozgása, szőnyegszerű műgumi dilatáció

ABSTRACT

Environmental The most failure part of road bridges are the expansion joints. Recently the reinforced rubber expansion joints have limited for bridge construction. This short issue presents some questions and other details about practice of reinforced rubber expansion joints, special reference to manufacturers and designers.

Keywords: road bridge, expansion joints, bearings, movements of bridges, reinforced rubber road joints

Hajós Bence

Okleveles építőmérnök, okleveles mérnöktanár. Hídszakértő, hídtervező. Korábban az állami közútkezelő hidász mérnöke volt. Elsődleges szakterülete a hidvizsgálat, hidak teherbírás vizsgálata.

1. BEVEZETŐ

Nemcsak a Föld mozog, hanem minden mérnöki alkotás is, nem kevés feladatot adva ezzel a tervezőnek, építőnek és üzemeltetőnek.

A hídjainkat számos hatás mozgásra kényszeríti: hőmérséklet, hasznos terhelés, szél, földrengés, etc. A szabad, gátolt, vagy irányított mozgásokat a hídszerkezet sarui határozzák meg. Ezekben koncentrálnak a támaszok reakció ereje és a felszerkezet eredő elmozdulása.

A hídon átvezetett pálya folyamatosságát a mozgási zónákban a dilatáció biztosítja. Lehetővé kell tenni a híd mozgását és mégis legyen komfortos, zökkenőmentes a pálya? Egymásnak ellentmondó igények a hidak legkényesebb szerkezeti elemét teremtette meg, amivel mindig csak a baj van: kerék zökken, víz bejut, csattog, zörög, török, szakad.

Saru és dilatáció párban jár. E két szerkezet együtt értelmezhető. Saru meghibásodása a dilatációt is tönkretelheti, az átázó dilatáció a legjobb sarut is kikészíti.

A hidak ezen két legkényesebb eleméről szinte alig található hazai irodalom, publikáció. Jelen rövid tanulmány ezen óriási témakörből csupán a műgumi szőnyegszerű dilatációval kíván foglalkozni. A téma aktualitását adja, hogy a vonatkozó utügyi műszaki szabályozás 2018-ban szinte száműzte a szőnyegszerű dilatációkat a közúti hidak világából. A szigorítás oka nem más volt, mint a megszámlálhatatlan katasztrofális üzemeltetési tapasztalat.

2. MŰSZAKI SZABÁLYOZÁS

2.1. SZABVÁNYOK ÉS ÚTÜGYI MŰSZAKI ELŐÍRÁSOK

A közúti híddilatációkra vonatkozó európai harmonizált szabvány nincs ugyan, de 2013-ban megjelent a közúti híddilatációk Európai Műszaki Engedélyezésének részletes útmutatója (EOTA - ETAG no 032), melynek elvei a magyar Útügyi Műszaki Előírásainkban 2018-ban jelent meg. Ekkor lépett érvénybe a közúti hidak sarui és dilatációs szerkezetei című, e-ÚT 07.03.11 előírás. Közelmúltban, 2020. szeptemberben az előírás első módosítása (M1) is megjelent.

Mivel a beépítendő közúti híddilatációk lényegében mind gyári termékek és nem egyedi tervezésűek, a 3/2003 (I. 25.) BM-GKM-KvVM rendelet szerint a dilatációkat a hivatkozott ETAG alapján végzett ETA tanúsítvánnyal minősítik. Érvényes ETA hiányában a termék minősíthető Nemzeti Műszaki Értékeléssel is (NMÉ), melyet az ÉMI Nonprofit Kft. bocsáthat ki és csak hazai alkalmazáshoz elegendő.

Az ETA vagy NMÉ tanúsítványok jellemzően egy oldalas iratok, műszaki szakembereknek fontos információk ennek mellékletében (Technical Assessment) találhatóak. Ezek beszerzése és megismerése a termék betervezéséhez (tervezők!), beépítéséhez (kivitelezők!), ellenőrzéséhez (műszaki ellenőrök!) és üzemeltetéséhez (kezelők!) nélkülözhetetlen. E dokumentumok a termékek fogalmazóitól beszerezhetőek.

A hazai előírásunk (e-UT) 2018 előtt alig tartalmazott előírást a dilatációkra vonatkozóan, elsősorban a szigetelés csatlakozását tárgyalta. Az előírásnak akkor összesen két oldala foglalkozott a dilatációkkal. 2018 óta egy lényegesen részletesebb és szabatosabb előírásból dolgozhatunk.

A Közúti hidak tervezése (KHT) 1. e-UT 07.01.11:2011. augusztus 4.3 pontja szerint 20 méternél rövidebb és keskenyebb vasbeton hidak esetében nem kell dilatáció, ha minden támasza lekötött. 20 és 100 méter közötti hidak esetén egyedi mérlegelés szerint kell dilatációt beépíteni, 100 méter felett pedig kötelező. Vitatható ama hazai tervezési gyakorlat elsősorban előregyártott hídgerendás szerkezetek esetén, hogy 100 m szerkezeti hossz alatt olykor a mozgásigények elemzése nélkül lekötött hídfők épülnek.

A dilatáció biztosítsa a zavartalan forgalmat, a mozgásokat viselje el és legyen vízzáró. Lehetőleg a dilatációk, pályamegszakítások száma legyen minél kevesebb.

A dilatáció acélelemének és gumielemének legalább 3 mm-rel a csatlakozó burkolat szintje alatt kell lennie. Ezen rendkívül fontos előírás sajnos a gyakorlatban sokszor nem teljesül.

A dilatációs szerkezetet a burkolathoz, mint különböző hőtágulási szerkezeti részek között szükséges, tartósan rugalmas bitumenes habarcs hézagkitöltéssel kell csatlakozni.

Az e-UT 07.03.11 Közúti hidak sarui és dilatációs szerkezetei bevezetett négyféle forgalmi fontossági osztályt. Az ŰME M5.2. pont 4. bekezdés (az idézettel teljesen azonos követelményt tartalmaz az e-ÚT 3.2. fejezetének 6. táblázata és 7. táblázata is):

„Alkalmazása csak 3. és 4. nehézforgalmi intenzitási kategóriájú hidak esetén megengedett, legfeljebb 100 mm-es mozgástartományig. Az elemkopás hatásának csökkentésére a számítás szerinti mértéket 20%-kal meghaladó mozgásképességű szerkezet építendő be.”

A szőnyegszerű dilatációknak megengedett két osztály: III. fontossági osztályú híd minden állandó jellegű híd amely re a következő állítások közül egyik sem igaz: támaszköze ≥ 50 m; teljes hossz ≥ 300 m; gyorsforgalmi úton vagy gyorsforgalmi út felett, egy- és kétszámjegyű főúton lévő hidak; fővárosi fenntartású híd. IV. fontossági osztály: ideiglenes hidak.

Az ŰME 3.9.2.1. fejezetben a csavarkapcsolatokra vonatkozó előírás igen szigorú:

„Csavarkapcsolattal rögzített dilatáció vagy dilatációs rész (pl. fésűs vagy szőnyegdilatáció) esetén a dilatációs szerkezet ágyazata teljes szélességben tömör, sík és nagy szilárdságú legyen. Az ágyazó anyag legyen önterülő, vízzáró, fagyálló, nyomószilárdsága legyen legalább két osztállyal magasabb, mint a csatlakozó betonszerkezeté.

A dilatációs szerkezeteket érő nagy intenzitású és ismétlésszámú igénybevételek miatt a dilatációs szerkezet csavarozott lekötése csak olyan konstrukcióban alkalmazható, amelyben a lekötő elem

(csavarszár) a fogadó szerkezet módosítása, bontása, átépítése nélkül cserélhető, a gyári állapot visszaállítható. Betonba horgonyzott (pl. ragasztott) csavarozott lekötések nem alkalmazhatók.”

2.2. EGY KIS SZÓMAGYARÁZAT

Mivel a sarukhoz és dilatációkhoz több olyan anyagot is használunk, amelyek a hídépítés egyéb területein nem használatosak, hasznos ezek rövid áttekintése, a helyes szóhasználat érdekében.

Polimer: Ismétlődő monomerekből felépülő igen hosszú molekulalánc. A polimerek legismertebb képviselője a polietilén (PE).

Elasztomer: Elasztikus polimer két szó összeolvadásából alkotott fogalom, jelentése rugalmas polimer.

Kaucsuk: Jelentése „könnyező fa”. Évszázadok óta ismert alapanyag. Előállításuk lehet természetes (pl. kaucsukfából) vagy mesterséges polimerizációval (műkaucsuk). A kaucsuk elasztomer, a gumigyártás legfontosabb alapanyaga.

Gumi: Kis erővel is nagymértékben deformálódó rugalmas anyag, amely tehermentesítve ismét felveszi eredeti alakját. A gumi alapanyaga a kaucsuk. Megszámlálhatatlan fajtáját gyártják.

Műgumi: Mesterségesen előállított gumi megnevezése. Mivel lényegében ma már minden gumi mesterségesnek tekinthető, a megkülönböztető „mű-” előtag jelentéstartalma így csekély.

NR: Természetes gumi (natural rubber), tulajdonságai: nagyon jó dinamikus tulajdonságokkal rendelkezik, kicsi hiszterézisű, jó a kopásállósága. Felhasználása: műgumi dilatációk tömbeleme, gumisaruk, fazéksaruk.

CR: Kloropéngumi (chloroprene rubber) fő alkotórésze a polikloropén. Felhasználása: műgumi dilatációk tömbeleme, gumisaruk, fazéksaruk.

Neoprén: A kloropén (CR) leggyakoribb kereskedelmi változata a neoprén. Felhasználása a kloropénnal azonos. Mivel kereskedelmi terméknev, műszaki specifikációban kerülendő kifejezés.

EPDM: Etilén-propilén-dién terpolimer (ethylene propylene diene monomer) speciális gumi, tulajdonságai: kitűnő időjárás- és ózonállóság, hőállóság, vegyszer- és örögedésállóság. Nem olajálló. Felhasználása: moduláris dilatációban tömítő-alakváltozó gumiszalagként, fésűs dilatációban vízelvezető gumilíráként. Az EPDM gumit esetenként belső szövet-réteggel erősítik.

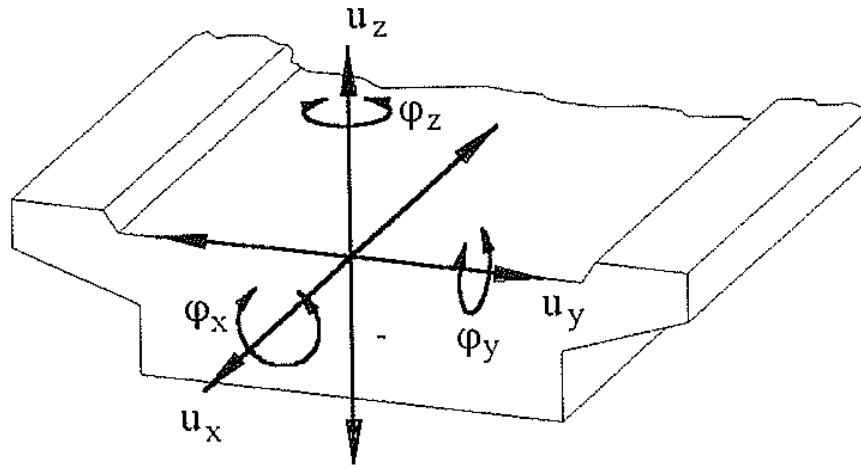
Vulkanizálás: A vulkanizálás kémiai folyamat, amely során a hosszú polimerláncok között keresztmetszetek alakulnak ki, ezáltal nő a rugalmassági modulusz, a gumi egyre merevebb és keményebb lesz, a magas hő és nyomás hatására. Vulkanizálásnak nevezzük tágabb értelemben a fém–gumi kémiai kötéseket is. Mivel a tiszta acél a gumihoz nem tapad, ezért először a acél alkatrészt tapadást biztosító réteggel (ragasztóval) kell ellátni. A fém–gumi kötések technológiájában az elmúlt évtizedekben hatalmas fejlődés volt, elérhető a gumi saját szakítószilárdságánál is erősebb fém–gumi kötés.

3. HIDAK MOZGÁSÁRÓL

3.1. MOZGÁSOK MODELLEZÉSE

A dilatációk tervezéséhez elengedhetetlen a híd mozgásának pontos ismerete. A mozgás a szerkezetet érő hatásokra adott válasz reakciója, melyet a tervezés során meghatározott szerkezeti kialakítással szabályozott mederben kívánunk tartani.

A híd különböző mozgásainak vizsgálatakor adott esetben szükséges mind a hat szabadságfok elemzése. Nyilván a hossz tengely irányú elmozdulás (x) a legfontosabb összetevő, azonban nem feledkezhetünk meg a két másik elmozdulás (kereszt irányú, függőleges) és a három elfordulásról sem. Az elfordulások közül legfontosabb a híd tengelyre merőleges tengely (y) körüli elfordulás (véglap-elfordulás), második a függőleges tengely (z) körüli elfordulás és utolsó a hossz tengely körüli (x) elfordulás.



1. ábra: A hídszerkezet mozgási szabadságfokai (Ramberger, 2002).

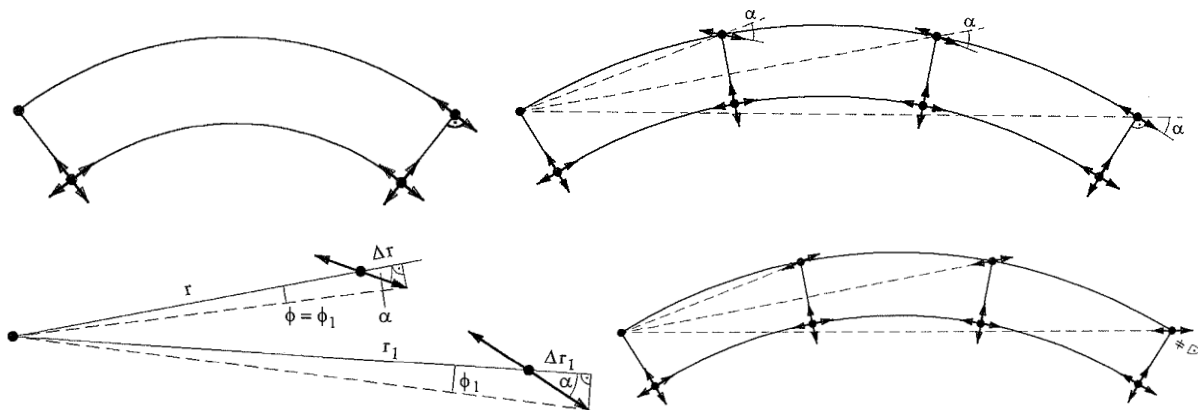
A modellalkotás a számítás alapja. Figyelembe kell venni, hogy a szerkezet globális mozgásait, alakváltozásait alapesetben a semleges tengelyre vonatkoztatva számoljuk, amely különbözik mind a támaszponttól (saruk), mind a kocspályától (dilatációk). Egyedi vizsgálat kérdése, hogy ezt elhanyagolhatjuk, vagy pontos mozgási modellt kell használnunk.

A mozgósaruk elhelyezése a mozgási sík tekintetében kétféleképpen lehetséges, vízszintes helyzetben vagy a pályaszinttel párhuzamos helyzetben. Ez utóbbira nagyobb hosszúságú, illetve nagyobb mozgásigényű támaszoknál van szükség. Vízszintes saruk esetén ellenőrizni kell, hogy a vízszinttel szöget bezáró pálya a tervezett mozgás szélsőértékei esetén nem okoz-e elfogadhatónál nagyobb magassági lépcsőt, a dilatációnak túlzott igénybevételt.

Szintén függőleges elmozdulást okoz dilatációknál a dilatáció és a hozzá tartozó saru közötti konzolhossz le- és felhajlásából eredő elmozdulás. Ez Gerber-csuklós befüggesztett szerkezet esetén akár mértékadó is lehet.

A hídszerkezet mozgása és így a saruk elrendezése bonyolódik ferde, illetve íves hidak esetében. Ferde alátámasztások esetén legkedvezőbb, ha a hegyes szögű hídsarkok alatt lehetőleg minden irányba elmozduló sarukat helyezünk.

Íves felszerkezet esetén az egy irányba elmozduló saruk tengelyének és az egyes saruktól a fixsarukhoz húzott egyenes szögének azonosnak kell lennie. Dilatáció szempontjából kedvező, ha a hídvégi egy irányba mozgó saru saját tengelye párhuzamos a felszerkezet tengelyével, mert ekkor a fő mozgásirány nem terheli keresztirányban a dilatációt. Az mindenképpen hibás, ha az íves, többtámaszú felszerkezet valamennyi egy irányba mozgó sarujának tengelye azonos a felszerkezet tengelyével.



2. ábra: Íves felszerkezet saruzása: a) kéttámaszú, dilatációra merőleges saruzás (fent balra); b) többnyílású, dilatációra merőleges saruzás (fent jobbra); c) egyirányú mozgósaruk beállítás azonos szögre (lent balra); d) többnyílású híd $\alpha=0$ saruzással (lent jobbra) (Ramberger, 2002).

3.2. HATÁSOK

Általában a hőmérséklet változás okozza abszolút értékben a legnagyobb elmozdulásokat. Egyenletes hőmérséklet változás hatására változik a teljes hídszerkezet hossza. Egyenlőtlen hőmérséklet változás hatására különféleképpen változhat a híd alakja.

A hasznos terhelés okozta mozgások amplitúdója lényegesen kisebb a hőmozgásnál, azonban gyors ismétlődés miatt ezek összegzett elmozdulása egy nagyságrenddel nagyobb, mint a hőmozgás esetében (Hakenjos et al. 1985). Németországi kísérlet során mérték egy 185 m hosszú városi híd hosszmozgásait, amelyen naponta 60 000 közúti egységjármű és 500 villamos haladt át. A vizsgált egy év alatt hőmérsékletváltozásból eredő összegzett elmozdulás 10 m, míg a forgalom okozta összegzett elmozdulás 145 m volt.

Vizsgálni kell beton- és öszvérhidak esetében a lassú alakváltozás hatását is. A lassú alakváltozás (kúszás, zsugorodás) kihathat a hossza és a hídalakra is.

Egyéb hatások közé sorolhatjuk az építéstechnológiából származó mozgásokat (utófeszítés), illetve a fenntartással járó esetleges hatásokat, így például sarucsere esetén a szerkezet megemelését.

3.3. HÍDMOZGÁSOK SEBESSÉGE

A híd mozgásait csoportosíthatjuk sebesség szerint lassúra, lélegzőre és gyorsra.

Lassú mozgáshoz tartozik az egy napon belüli és az egy éven belüli hőmozgás is, valamint a beton lassú alakváltozása, támaszmozgás és a hőteherből származó mozgás.

Lélegző jellegű, azaz másodpercekben mérhető mozgási periódust okoz alapvetően a hasznos terhelés és a szél.

Gyors, azaz ütés, impulzus jellegű mozgást okoz a hasznos terhelés rezgési tartománya, járműtengely ütése, járműütközés, kiskiklás és földrengés.

Azon dilatációknál, melyek saját alakváltozásukkal biztosítják a mozgásképességet, külön kell választani a lassú mozgás tartományát és a lélegző, illetve gyors mozgások tartományát. E két utóbbi, jellemzően a lassú mozgási érték töredéke, de adott esetben mértékadó is lehet, illetve fontos szempont szerkezet típus kiválasztása esetén. A szönyegszerű dilatációk valamennyi mozgástípust jól viselik.

3.4. A HÍDMOZGÁSOK IRÁNYÍTÁSA

A hidak mozgásainak kialakítása elsősorban a szerkezeti rendszer kiválasztásakor dől el. Folytatólagos szerkezet, vagy több lélegző szakaszból álló szerkezeti sor, befüggesztett tartórész és egyéb szerkezeti megoldások. Alapesetben fenntartási okokból cél a dilatációs helyek minimalizálása, azonban nagy hidak csoportjában ez rendkívüli mozgás-összegződések eredményezhet, melyet egyszerűbb lehet kisebb részekre osztva kezelni.

Szerkezeti kialakítást tekintve szabad mozgásról akkor beszélhetünk, ha a saruk a híd mozgásait nem akadályozzák, nem csökkentik, csak irányítják (a saruellenállástól itt most eltekintve). Ekkor a saruk alkotta mozgási rendszer lehet határozott vagy határozatlan.

A hidépítésben az alapeseteken túl számos egyedi és különleges megoldást is alkalmazhatunk. Erre példa a 49 sz. főúton található kocsordi Kraszna-híd. Kéttámaszú, vonóvasas vasbeton ívhíd az egyik hídfőben fix, a másik hídfőben mozgó sarukkal. Azonban az ívre függesztett vasbeton pályalemez, hogy vízszintes vonóerőt ne vehessen fel, a fix sarus hídvégen a végkereszttartóra mozgó hossztartó-sarukkal csatlakozik. Így a fix saru felett is mozgó dilatáció van, a két dilatáció a mozgásokat a gyakorlati tapasztalat alapján 1/3 – 2/3 arányban megosztva viseli.

Szót érdemel a hídmozgások átrendeződése, amely az eredeti, tervezett mozgásmodellt gyökeresen felboríthatja. Beszorult saru, eltömedékelt dilatációs rés, bennfejtett építési segédanyag, zsalu, hungarocell, szerkezeti törés és még sorolhatnánk. A hatások változatlanok, így a híd mozgásigénye is. Ha bármely rendellenesség miatt valamelyik támasznál a mozgáslehetőség csökken vagy megszűnik, a hídszerkezet a legkisebb ellenállás irányába törekszik, azaz a mozgások elsődlegesen átrendeződnek, másodsorban tervezetten felüli igénybevételek ébrednek. Jellemző példa erre, ha egy híd egyik

hídfőjében a dilatációs rés eltömődése miatt a felszerkezet a hídfőnek feszül, akkor a másik hídvég mozgásához a gátolt mozgás hozzáadódik, akár az ottani saru és dilatáció károsodását is okozva.

3.5. HŐMÉRSÉKLETVÁLTOZÁS, AVAGY MI MENNYI?

A méretezéskor számítandó hőmérsékleti határértékek a saruk és dilatációk tervezéséhez is szükségesek, azonban az egyes előírások részben eltérő értékeket tartalmaznak, részben nem is tartalmaznak pontos értékeket.

A Közúti hidak tervezése (KHT) 1. e-ÚT 07.01.11 szerint egyenletes hőmérséklet változást acél és öszvérhidak esetében $+55\text{ °C}$ és -35 °C ($\pm 45\text{ °C}$), beton és vasbeton esetében pedig $+45\text{ °C}$ és -25 °C ($\pm 35\text{ °C}$) határértékekkel kell számolni. A középhőmérséklet hazánk átlaghőmérsékletéhez igazodóan 10 °C . (A szerkezet méretezésekor a KHT 2. Erőtani számítás 2.2.6.1. pontja szerint acél és öszvér esetében $\pm 35\text{ °C}$, illetve beton esetében $\pm 20\text{ °C}$ értékkel kell csak számolni.)

Miután ismerjük a szerkezet kialakítását és a hőmérsékleti hatásokat, számítható a hőmozgás. Az egyes hídépítési alapanyagok hőtágulási együtthatója a következő:

$$\alpha_{\text{acél, vas}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C};$$

$$\alpha_{\text{beton, vasbeton}} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C};$$

$$\alpha_{\text{téglafal}} = 9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C};$$

$$\alpha_{\text{kőfal}} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C}.$$

Dr. Pallós Imre szíves közlése nyomán, tájékoztató jelleggel:

$$\alpha_{\text{hengerelt aszfalt}} = 20-25 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C};$$

$$\alpha_{\text{öntött aszfalt (B 7,8\%)}} = 30-32 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C};$$

$$\alpha_{\text{öntött aszfalt (B 9\%)}} = 35-38 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C};$$

$$\alpha_{\text{aszfaltdilatáció}} = 60 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C}.$$

3.6. A HŐMÉRSÉKLET ÉS A MOZGÁSOK MEGFIGYELÉSE, MÉRÉSE

A mozgások megfigyelésére legkedvezőbb, ha a saruk mozgását tudjuk mérni, minél nagyobb mérési gyakorisággal – természetesen a szerkezeti hőmérséklet rögzítésével együtt.

Az első probléma a szerkezet hőmérsékletének meghatározása. Mivel a híd kiterjedése nagy, szinte sose adódik teljesen egyenletes hőmérséklet. Méréskor számolni kell a felszerkezet hőtehetetlenségével is. Éppen ezért ideális, ha a környezeti hőmérséklet hosszú időn keresztül (6-8 órán keresztül) lényegében állandó, nincs napsütés, nincs heves szél és a híd kvázi egyenletesen fel tudja venni a környezetének hőmérsékletét. Ez a gyakorlatban télen gyakran adódik (ködös napokon rendszeres, hogy az egész napi környezeti hőmozgás csak $1-2\text{ °C}$. Nyáron lényegesen nehezebb a hőmérséklet meghatározása, mert a fenti elvnek megfelelő körülményeket $18-20\text{ °C}$ felett aligha várhatunk, márpedig a mozgások szélső értékének ismeretéhez a legmelegebb órákra lenne szükség.

Megoldás a mérést végző hidász leleményességén és szerkezet ismeretén múlik. Érdekes jellemző helyeken megmérni a környezet és a híd hőmérsékletét és ezen értékekből mérnöki bölcsességgel átlagolni a híd hőmérsékletét. A helyszíni hőmérés nélkülözhetetlen eszköze a gyors reagálású tapintó hőmérő.

A saruknál sokszor nem vagy aránytalanul nehezen lehet méréseket végezni. A saruk adott esetben megközelíthetetlenek segédeszköz (vizsgálódaru, csónak, létra) nélkül, illetve különösen télen fokozottan balesetveszélyes a fagyott hídszerkezeten való közlekedés.

Saruk közvetlen mérése helyett lehetséges a dilatációk mozgásának mérése is. Ennek előnye, hogy megközelítése egyszerű, a mérés körülményei kedvezőek, mérés igen gyorsan elvégezhető. Hátránya, hogy a mérés pontatlanabb.

Az alábbi fényképek példát mutatnak a dilatáció mérés egyszerű, de minden szükséges adatot tartalmazó dokumentálására.



3. ábra: Dilatáció-mérés fényképes dokumentálása –külön jegyzőkönyv nélkül.



4. ábra: Dilatáció-mérés korlátdilatációra állandósított rozsdamentes vonalzóval.

Permanens mérés esetén digitális adatrögzítő gyűjti a hőmérsékleti adatokat és az elmozdulás-értékeket esetleg beállított gyakorisággal. A permanens mérés a megfigyelés, vizsgálat kiváló eszköze, amely számos további vizsgálódáshoz adhat jól feldolgozható alapadatot.

4. DILATÁCIÓS SZERKEZETEK

4.1. DILATÁCIÓS SZERKEZETEK KIVÁLASZTÁSA, ELHELYEZÉSE ÉS VÍZELVEZETÉSE

A jelenlegi gyakorlatban a dilatációk méretezése csak hosszirányú mozgásra történik. Emellett, a KHT 2. ÚME előírja, hogy a dilatációs szerkezet által kifejtett erőre a csatlakozó részeket és a kapcsolatokat méretezni kell. Mivel a szőnyegszerű dilatációk alakváltozása jelentős vízszintes erőhatást okoz, szükséges ezek elemzése is.

A dilatációk esetében meg kell határozni a középhőmérsékletet, ami Magyarországon 10 °C. Egyes dilatációk mozgásképessége a középhőmérsékletre szimmetrikus, azonban jellemzően a szőnyegszerű dilatációk mozgásképessége a semleges – azaz terheletlen alakhoz képest nem szimmetrikus – ezt a beépítésnél figyelembe kell venni!

A közúti forgalom mintegy 75 %-a az autópályákon és főutakon bonyolódik le. Éppen ezért indokolt az autópályákon és főutakon fokozott tartósságú dilatációs szerkezetek beépítése. 2011-ben az Állami Autópálya Kezelő szakvéleményt készített a dilatációs szerkezetek kiválasztási gyakorlatához (Pallós et al 2011). A szakvélemény dilatáció kiválasztásra az alábbi javaslatot adja mozgástartományi kategóriák szerint:

- 50 mm-ig: rugalmas aszfaltdilatáció, vagy egylamellás dilatáció
- 80 mm-ig: egy lamellás dilatáció
- 800 mm-ig: fésűs dilatáció, vagy több lamellás dilatáció
- 800 mm felett: kizárólag korszerű alátámasztású több lamellás dilatáció

A szakvélemény hozzájárult a szőnyegszerű műgumi dilatációk visszaszorításához. A tanulmányban szereplő elvek 2018-ban beépültek a dilatációkat szabályozó ÚME-be.

A dilatáció tervezésekor gondoskodni kell a vízelvezetésről is, mind a pályaszinten, mint a szigetelés szintjén. A hosszésésnek megfelelően, a dilatáció felé a szigetelésen szivárgó vizeket szivárgó-csepegtetővel a szerkezetből ki kell vezetni. Ha a kivezetés víznyelővel közösen történik, akkor úgy kell kiképezni, hogy a szivárgó a víznyelő eltömődése esetén is működőképes maradjon. A dilatáció előtt a fenti célból létesített burkolat keresztiszivárgó csak egyéb megoldás hiányában javasolt, mivel a pályaszerkezetet elvékonyítva gyengíti azt, ráadásul a dilatáció közvetlen szomszédságában, ahol eleve zavart zónája van a burkolatnak egyrészt a különböző merevségű szakaszok találkozása, másrészt a beépítés-technológiai kötöttségek miatt. Legideálisabb, ha a dilatáció alépítménye önmagában biztosítja a szigetelés víztelenítését is a pályaszerkezet gyengítése nélkül.

Dilatáció elé helyezett víznyelővel csökkenthető a dilatációt terhelő közvetlen csapadék-terhelés.

A dilatáció és a kocsipálya burkolatának csatlakoztatása minden dilatáció kritikus pontja. A szőnyegszerű dilatációk csatlakoztatási módjai lehetnek tartósan rugalmas kiöntéses (pl. aszfalt – tartósan rugalmas kiöntés – szőnyegelem), lehet közbenső acél alépítmény megtámasztású (pl. aszfalt – kiöntés – acél alépítmény – kiöntés – szőnyegelem), lehet betongerendás is (pl. aszfalt – kiöntés – betongerenda – kiöntés – szőnyegelem). A választás körültekintő mérlegelést igényel, ezek a következők: új beépítés vagy felújítás, beépítés sorrendisége, későbbi cserélhetőség, csatlakozó pályaburkolat állapota, tervezett élettartam.

A dilatációhoz csatlakozó aszfaltburkolat lokális erősítésére használatos a csatlakozó sávok (pl. 1-1 méter) ferde, 45-fokos befűrészelése és PC habarcs megtámasztóbordás merevítése. Így jelentősen csökken a csatlakozó aszfaltburkolat nyomvályúsodási hajlama, tartós és egyenletes pályaszint-csatlakozást teremtve a dilatációhoz.

Csatlakozó pályaburkolat előtti dilatáció elhelyezés esetén nehéz feladat az aszfaltszintek terv szerinti alakjának biztosítása, továbbá a dilatáció előtti és utáni bedolgozási megszakítás gyengíti annak tartósságát (tömörítési elégtelenségek).

Csatlakozó pályaburkolat megépítése utáni dilatáció beépítés esetén a dilatáció előtti és utáni aszfaltrétegek egyszerre, megszakítás nélkül megépíthetőek, így ideálisabb körülmények között lehet aszfaltozni (amennyiben az egyéb munkafolyamatok miatt ez lehetséges). Ez esetben azonban nehézségbe ütközhet a dilatáció és szigetelés teljes értékű kapcsolódása.

Célszerű minél később, a végleges sarukra helyezés után elhelyezni a dilatációs szerkezetet. Betonhidak esetében a későbbi beépítés esetén lejátszódhat a beton zsugorodásának, kúszásának nagyobb része.

A dilatációk beépítésére komoly árnyékot vet ama általános körülmény, hogy a hídépítés legvégén jellemző időhiány, kapkodás és az egyes szakágak egymást zavarása sokszor lehetetlen feltételeket teremtenek. Előfordul, hogy az építési körülmények eleve kizárják a dilatáció jó minőségű beépítését.

4.2. ÜZEMELTETÉS, FENNTARTÁS

A dilatációk vizsgálatát, ellenőrzését a hídfelügyelet részeként, illetve nagyobb dilatációk esetében célszerűen sűrűbben kell végezni. Elsősorban szemrevételezéssel kell ellenőrizni a csavarok esetleges lazulását, melyet jól mutat a csavar környezete.

Ellenőrizni kell a dilatáció vízzárását is, kezdődő átázásokat viszont csak intenzív esőzés közben lehet észlelni. Akut átázások környezete a korróziós károk miatt jól megfigyelhető. Dilatáció cseréje, javítása esetén célszerű a dilatáció alatti szerkezeti részek (legalább lokális) korrózióvédelmi felújítása, átfestése,

hogy az esetleges átázások gyorsan észlelhetőek legyenek. Ellenőrzés fontos része a mozgások mérése, dokumentálása is. Hídkezelő feladata a dilatáció tisztán tartása, rendszeres takarítása és mosása.

Az üzemeltetés feladata tipikusan a takarításon kívül: lazulások megszüntetése, csavarpótlás, repedéskiöntés, csatlakozó átmeneti részek javítása, csatlakozó kocsipálya burkolathibáinak javítása.

A gondos üzemeltetés nélkülözhetetlen, azonban még a legalaposabb üzemeltetés sem ellensúlyozza a dilatáció tervezésekor, illetve beépítésekor elkövetett eredendő hibákat (fekszinhibák, helytelen beállítás, tőcsavar elhelyezés hibái, etc).

4.3. MŰGUMI SZŐNYEGSZERŰ DILATÁCIÓK

A műgumi szőnyegszerű dilatáció az 1990-es években terjed el hazánkban szélesebb körben. A dilatáció műgumi tömb testének nyírózó részei képesek az alakváltozások felvételére, a műgumi elem belsejébe vulkanizált acélelemek pedig biztosítják a szükséges merevséget, teherbírást. A műgumi szőnyeg-darabokat horgony (dűbel) csavarokkal rögzítik a dilatáció alépítményéhez.

Számos gyártó terméke volt, illetve van hazánkban forgalomban. Ezek közül a legfontosabbak: SHW-Multiflex, Freyssinet-Cipec-M, Freyssinet-Multiflex, Serviflex, Transflex, RW-Euroflex, FIP-GPE, AlgaFlex, mageba RM, AGOM AGFLEXJ, stb. Az egyes gyártók dilatációinak mérete, mozgásképesség-nyírózó felület aránya, vulkanizált acél inerciája és egyéb paraméterei között nagy különbségeket is találunk.

A különböző mozgástartományú műgumi dilatációk két nagy csoportja az egy-egy torzuló felülettel tervezett „szimpla”, illetve a két-két torzuló felülettel tervezett „dupla” típus. Ezen kívül van számos egyéb típus is: a közbenső acélelem nélküli mini, a három-három nyírt részből álló tripla, valamint kiegészítő csúszó-harmonikás, stb.

Külső megjelenését tekintve a dilatáció felülről lényegében zárt, a mozgást biztosító hornyok és csavarlekötések jól ellenőrizhetőek. A forgalom a dilatáció gumi felületén jár, ami csúszásmentes (egy típus, a Serviflex esetében a középső gumielem tetejére vulkanizálták a rovátkolt alumíniumbetétet, így az látványban megjelenik).

A mini-műgumi dilatációk alakváltozó része fokozottan érzékeny a mechanikai sérülésekre (átszűrődés, lópatkó, szennyeződés).

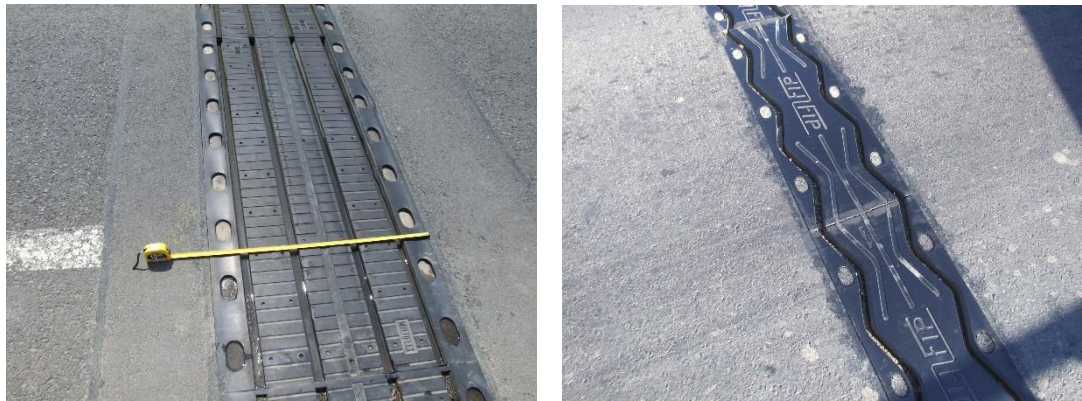
A műgumi dilatációk táblaméretének hossza különféle, 900 és 2000 mm között. Az egyes táblák csatlakoztatása a vízbejutás elkerülése érdekében legtöbbször csapos-hornyos, melynek mérete egyes termékeknél markáns (pl. Algaflex), egyes termékeknél azonban egészen minimális, szinte nincs (pl. FIP). A mély horony jó vízzáró kapcsolatot biztosít, azonban a keresztmetszeti szögtöréseket nehezen követi.

A csapokat-hornyokat beépítéskor egymáshoz kell ragasztani. Mivel az elemközi illesztések teljes vízzárása így is sok problémát okozott, több gyártó bevezette, hogy a műgumi szőnyeg alá egy gumilirát is be kell építeni, a mélyvonalban kicsöpögtetve az abban összegyülekező vizeket, vagy egyirányú kereszteséssel a híd szélén szabadon kivezelve a szivárgó vizeket. Ez utóbbi esetben a gumilirá tisztsága, működése ellenőrizhető, akár tisztítható. A gumilirával azonban vigyázni kell, hogy a beépítés módja ne okozzon a lecsavarozott elemeknek túlzott rugalmasságot, elválasztást a szilárd alépítménytől.

A dilatáció tervezésekor a tervező feladata az elemkiosztás elkészítése. A leszási-elhelyezési terv során figyelni kell az alábbiakra: a tehergépkocsi keréknyomba lehetőleg ne essen illesztés, minden elemet legalább oldalanként 2-2 csavar rögzítsen, lehető legkevesebb szögtörés legyen.

A dilatációs elemeket csak lassú szalagfűrészszel szabad darabolni, hogy a műgumi megégését és a gumi lenyúzását elkerüljük. Flexszel vágni tilos. A vágott felületeket korrózióvédelemmel és műgumi javítóval kell bevonni.

A műgumi dilatáció alakváltozását biztosító, nyírózó gumi felületek a dilatációs elemre merőlegesek mindegyik gyártónál, kivéve a FIP termékcsaládját, amelynél cikk-cakk vonalban vezet a nyírózó gumisáv.

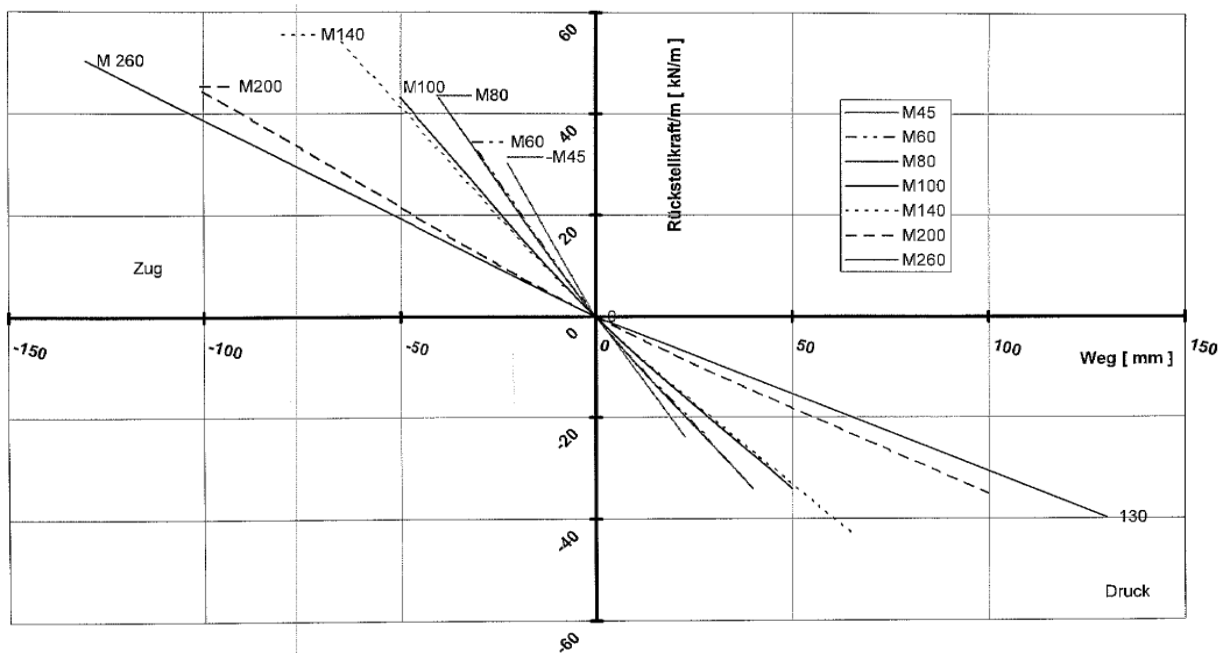


5. ábra: SHW-Multiflex (balra, Csenger, 1994) és FIP-GPE (jobbra, Kocsord, 2011).

A FIP által alkalmazott cikk-cakk alaprajzi elrendezés jelentősen növeli az elem hajlító-merevségét, mivel a belevulkanizált acélelem is követi a cikk-cakk vonalat.

A műgumi dilatációk adják át a lehetséges dilatáció típusok közül a legnagyobb vízszintes erőket az alépítményeknek, így a hídvégre, térdfalakra. Tervezés során a lehorgonyzást erre az erőre is méretezni kell. Mekkora ez az erő?

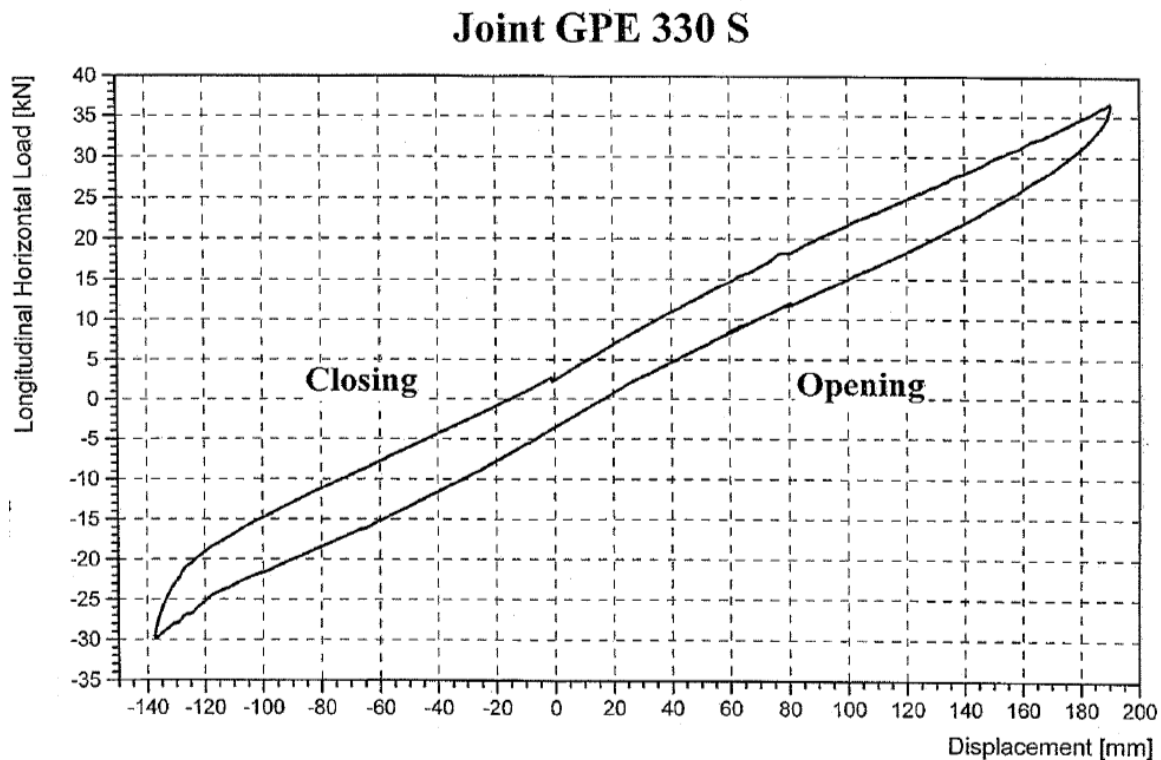
Az RW Euroflex termékcsaládjának technikai leírása tartalmaz erre vonatkozó diagramot. A szélső értékekhez tartozó erő húzáskor 30-55 kN/fm, összenyomáskor pedig 25-42 kN/fm között változó. A grafikonon látható, hogy a dilatáció mozgásképességét a gyártó a feszültségmentes alakra szimmetrikusan határozta meg, szemben más műgumi dilatáció termékekkel.



6. ábra: Elmozdulás-erő tervezési diagram [RW-Euroflex MSZF].

A vízszintes erő felvétele különösen fontos olyan hídfelújítások esetében, ahol a megelőző dilatáció vízszintes erőt nem, vagy alig adott át. Ennek elmulasztása akár a térdfal eltöréséhez is vezethet!

Az olasz FIP dilatációgyár közreadta a GPE sorozatú műgumi dilatáció legnagyobb tagjának, a 330 mm mozgásképességű FIP GPE 330 S jelű dilatációs elem erő-elmozdulás kísérletének diagramjait.



7. ábra: A dilatáció erő-elmozdulás (hosszirányú) diagramja [FIP-GPE MSZF].

A dilatáció erő-elmozdulás diagramja a főirányban kimozdított egy méter széles dilatációban ébredő erőt mutatja -140 mm és +190 mm mozgástartományban. Érdeemes megfigyelni, hogy a dilatáció mozgásképesége a feszültségmentes beépítéshez képest nem szimmetrikus, azaz e típus beépítése klasszikus dilatációs mozgás esetén a középhőmérsékletnél melegebb hőmérséklet mellett kedvezőbb. A szélső értékekhez tartozó hosszirányú vízszintes erő +37 kN/m és -30 kN/m.

A szőnyegszerű dilatáció kereszt irányú elmozdulás kereszt irányú vízszintes erőt is okoz a dilatáció lehorgonyzásában. Az ébredő kereszt irányú erő függ a dilatáció hosszirányú nyitottságától.

A vízszintes erőre méretezett csavaroknál vasbeton aléptítmény esetében az erőátadás alapfeltétele, hogy az aléptítmény vasalása a horgonycsavarokat körülölelje, azaz a vasbeton aléptítménynek lehetőleg koszorú vasalása legyen, melynek kengyelei, felső sor vasalása és külső sor vasalása és a horgonycsavart takarja, ölelje. Az erőtanilag és tartósságilag szükséges sűrű vasalás miatt célszerű betonozás előtt a horgonycsavarok helyeit a zsaluzatban kitűzni és a betonacélokat úgy rögzíteni, hogy a horgonyvasak kifúrásakor a betonacélok ne sérüljenek. Az előre gondolkodás és pontos kitűzés a horgonyok dübelezésekor megtérül. A dilatáció tervén éppen ezért mindenképpen ábrázolni kell a csatlakozó vasbeton szerkezetek vasszerelését is.

A vízszintes erő-átadás miatt nem érdemes a horgonyvasak hosszát minimalizálni. Sajnos több műgumi dilatáció gyártó már szemre is igen rövid dübeleket ír elő.

Noha egyetlen gyártó sem írja elő, érdemes megfontolni rozsdamentes horgonycsavarok alkalmazását abból a célból, hogy több év távlatából is bontható, visszaépíthető legyen. Esetleges dübel-cserét nehezíti, hogy annak alaprajzi helyzete kötött.

Ha a dilatáció magassági beállítása miatt kiegyenlítő réteget kell beépíteni, az hatványozottan csökkenti a dübelek vízszintes bekötöttségét, mivel a kiegyenlítés miatt az aléptítmény vasalása még mélyebbre kerül. Törekedni kell a lehető legkisebb kiegyenlítő réteg alkalmazására.

Számos 1990-es években nagy reményekkel beépített műgumi dilatáció aléptítményi kapcsolódás miatt ment tönkre: vasalatlan térfal, vasalt betonba alig belefűrt dübelek, meglévő gyenge betonminőség, vastag (3-5, sőt 10! cm) epoxihabarc kiegyenlítés stb.

A dilatáció alá szükséges kiegyenlítő réteg beépítésére példaértékű az Algaflex beépítési engedély-dokumentációja. Négy vastagsági tartományban szabják meg a beépítés módját.

Az Algaflex 0 és 20 mm között epoxi kiegyenlítést ír elő. 20 és 25 mm között szálerősítésű, cementbázisú habarcs-kiegyenlítést kell alkalmazni. 25 és 60 mm között ugyancsak szálerősítésű cementbázisú habarcsot kell alkalmazni, de 8 mm-es ledübelezett hossz és keresztirányú vasalással. 60 mm felett a vastagság függvényében kell vasszerelést alkalmazni, beton kiegyenlítést építve.

Hídkezelői oldalról a legkedvezőbb nyilván a kiegyenlítés elmaradása, amelyhez azonban rendkívül pontos alépítmény előkészítés szükséges. Ekkor egyedüli lehetséges utólagos korrekció, az elkészített, növelt betonfedésű alépítmény csiszolásos finom-szintbeállítás – kétséggel ez a leginkább munkaigényes is (Tiszavasvári 2012).

A műgumi dilatációk tervezésének-beépítésének másik fontos részletéről kell szólnunk, mégpedig a dilatáció-aszfalt átmenetről. A dilatáció fekszintjének bele kell simulnia a pálya esésviszonyaiba (hossz- és keresztirányban) azzal az eltéréssel, hogy a dilatáció járószintjét 2-5 mm-rel a csatlakozó pályaszint alá kell süllyeszteni. Ennek célja, hogy az alakváltozó aszfaltburkolat milliméteres utántömörödése után se álljon ki a dilatáció a járósíkból, a gépjárművek kereke ne okozzon vízszintes ütést a dilatációnak (fellepve arra), illetve a hóéke ne sérthesse meg a dilatációt.



8. ábra: Műgumi dilatáció (és kopóréteg!) mechanikai sérülése hókékezés miatt.

A műgumi és a csatlakozó aszfalt eltérő rugalmassága és ágyazási tényezője miatt a kettő csatlakozását külön kezelni kell. Az átmenet azért is kritikus, mert az egyik károsodása a másik, szomszédos szerkezet károsodását okozhatja.

Legrosszabb esetben a műgumi dilatáció gyártója nem is foglalkozik az átmenet kérdésével. Egyes gyártók PC polimerbeton (habarcs) gerendás átmenetet írnak elő, más gyártó vasalt beton keresztgerenda kiképzését javasolja. További lehetőség az aszfalt dilatációnak vezetése, közvetlen bitumenes habarcs kiöntés-csatlakoztatással, a mini-aszfaltdilatációs (kb. 5-5 cm-es) csatlakoztatás, illetve acél alépítménnyel kettéválasztott és megtámasztott csatlakoztatás. A kis keresztmetszetű és vasalatlan PC polimerbeton vagy epoxi csatlakoztatás a forgalom hatására mindenhol rövid idő alatt tönkrement. A mintegy 5x5 cm keresztmetszetű, keresztirányban több méter hosszú gerenda először szakaszokra széttörik, majd ezeket a forgalom a helyéről teljesen kirázza, „kátyút” eredményezve az aszfalt vége és a műgumi elem között. Rugalmas ágyazás szempontjából a PC gerenda egy kvázi végtelen merev alátámasztást eredményez a rugalmas aszfalt és szintén rugalmas műgumi között, így az PC vagy epoxi gerendát érő dinamikus igénybevétel nagyon magas. Lehetséges megoldás vasalt beton keresztgerenda építése, alépítménnyel összevasalva. Így lényegében egy kis „betonburkolat” szakaszt képzünk az aszfalt és dilatáció között. Másik megoldás az aszfalt dilatációs csatlakozás, illetve a 2 cm-es tartósan rugalmas bitumenes habarcs kiöntés csatlakoztatás. A mérlegelést nehezíti, hogy minden eset egyedi, sokszor összehasonlíthatatlan, a csatlakozó aszfalt rétegek és vastagságok eltérő hatásai miatt. A legbonyolultabb csatlakoztatási mód acél alépítményes megtámasztás, amikor az alépítmény részét képező falszerű merev acélelem a burkolatszintet majdnem eléri (-5 mm), megtámasztva egyik irányból rugalmas kiöntés útján az aszfaltot, illetve műgumi

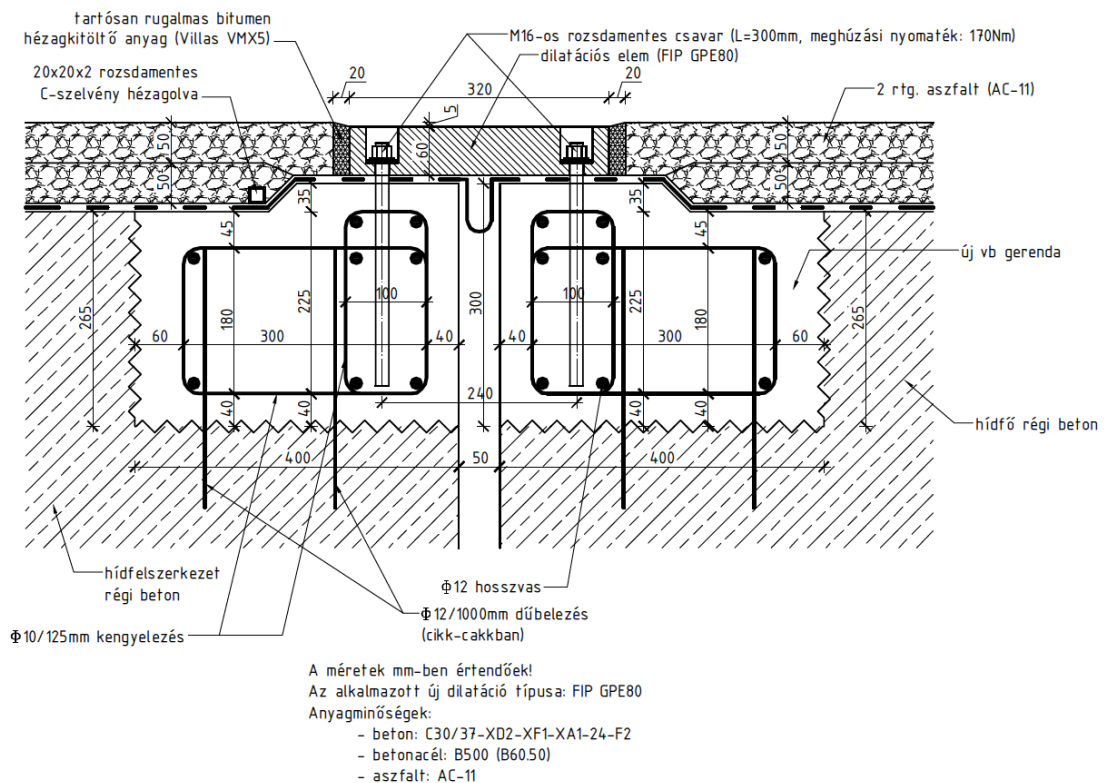
dilatációt. Ebben az esetben a beépítés összetettebb, azonban később a dilatáció sérelme nélkül lehet a csatlakozó aszfaltot, szigetelést javítani, illetve a szigetelés és aszfalt sérelme nélkül lehet a dilatációt felnyitni, cserélni (Tokaj, 2008).

Műgumi dilatáció esetében tökéletes beépítés esetén sem beszélhetünk a híddal azonos élettartamról – szemben más dilatációkkal. Az elasztomer műgumi öregedése miatt a dilatáció alapanyaga 20 év alatt már jelentősen öregedik, a felületén repedések jelennek meg.



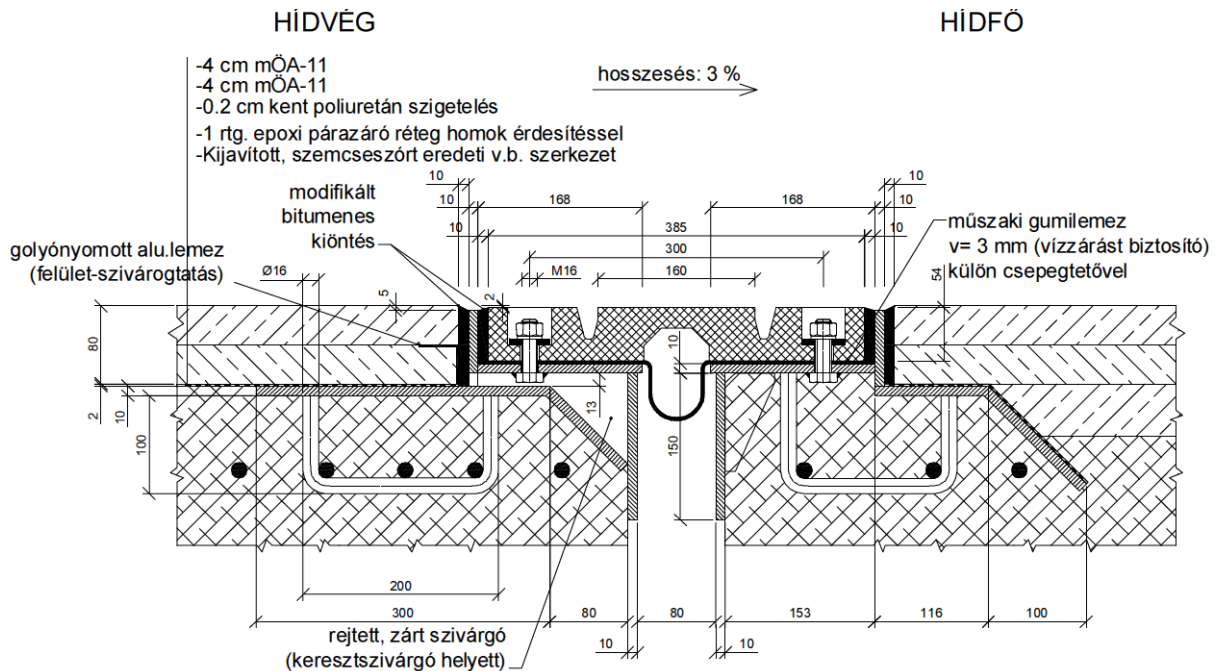
9. ábra: Az elasztomer műgumi öregedési repedései amúgy tökéletes rögzítésű, 18 éves dilatáción (balra) és vulkanizációs hibára visszavezethető gumilválás (jobbra).

Az alábbi ábrákon beépítési módra látunk példákat. Az első esetben érdemes a jól tervezett alépitményt megfigyelni, amelyhez bitumenes habarcsos hézagkitöltést társítottak.



10. ábra: Műgumi dilatáció beépítés vasbeton alépitménycserével (Tiszavasvári, 2012).

A következő példa acél alépitményt mutat. A túlméretezett alapozás egy túlzott reakció a számos alépitmény tönkremenetelre. Az acélalépitménybe kombinált keresztzivargó révén el lehetett hagyni a dilatáció előtti klasszikus keresztzivargót, ami a burkolatot óhatatlanul gyengíti éppen a zavart burkolatvég zónában. Az acél alépitmény előnye, hogy a dilatáció és csatlakozó szigetelés-aszfalt javítása egymástól függetleníthető.



11. ábra: Rejtett zárt szivargó-alépitményes műgumi dilatáció beépítés (Tokaj, 2008).

„Dupla”, azaz két-két nyírt elasztomer szakaszból álló, nagyobb mozgásképeségű dilatációs elem középső része az alépitményen csúszik. ezért noha nem mindegyik gyártó írja elő, ez esetben mindenképp szükséges legalább a csúszó szakaszokon koracél csúszólemez alépitmény beépítése.

A kis és közepes mozgástartomány legelterjedtebb dilatációja a műgumi szőnyegdilatáció, kedvező beépítési költsége miatt. A jellemzően minimális mozgásokra alkalmazott aszfalt dilatációkat nem számítva legtöbb dilatáció műgumi szőnyegszerű, már csak emiatt is ez a leggyakrabban meghibásodó típus is. Mindezek önmagukban azonban nem indokolják ezen költséghatékony szerkezet teljes száműzését a hídépítési palettáról. Itt is megjegyezzük, hogy dilatáció javítása esetén fel kell tárnunk az előző dilatáció tönkremenetelének pontos okait! A feltárt hibákat elemezni és a tapasztalatokból okulni kell!



12. ábra: Alátámasztását veszített műgumi dilatációs elem (balra) és 10 cm vastag epoxi kiegyenlítés kagylós kitörése (jobbra).



13. ábra: Berágódott csavarkapcsolat (balra) és rögzítését veszített dilatációs elem (jobbra).

Magyarországon a szőnyegszerű műgumi dilatációk az SHW Multiflex termékcsaláddal jelentek meg, elsősorban az Isobau Rt. kivitelezésében. 60-230 mm mozgástartományban számos beépítés készült az 1990-es évektől. Fokozatosan több más gyártó terméke is megjelent a hazai hidakon (Serviflex, Transflex, Freyssinet Multiflex, stb). Ezeket követte a Reisner & Wolff (RW) Euroflex terméke, a FIP GPE családja és az Algaflex. A Freyssinet cégcsoporthoz tartozó CIPEC szőnyegdilatáció felülnézete rombikus mintázatú, ilyen is épült Magyarországon több hídnál. E terméknek egyedisége, hogy készítettek a szegély csomópontához íves elemeket is! Újabb beépítésnél az olasz AGOM termékeivel is találkozhatunk – ez a cég gyártotta 2014-ig az RW szőnyegelemeit.

| Ssz. | Dilatáció neve | mozgás [mm] | H [mm] (elemszélesség) | W [mm] (elemmagasság) | L [mm] (elemhossz) |
|------|---------------------------|-------------|------------------------|-----------------------|--------------------|
| 1 | SHW Multiflex T60 | 60 | 326 | 48 | 2000 |
| 2 | SHW Multiflex T80 | 80 | 391 | 53 | 2000 |
| 3 | SHW Multiflex T140 | 140 | 470 | 78 | 2000 |
| 4 | Serviflex 50 | 51 | 271 | 44 | 1830 |
| 5 | Serviflex 75 | 75 | 406 | 55 | 1830 |
| 6 | Freyssinet Multiflex S80 | 80 | 357 | 46 | 2000 |
| 7 | Freyssinet Multiflex S100 | 100 | 391 | 53 | 2000 |
| 8 | Freyssinet Multiflex S150 | 150 | 485 | 80 | 2000 |
| 9 | Transflex 150 | 38 | 240 | 35 | 1750 |
| 10 | Transflex 200 | 50 | 274 | 40 | 1830 |
| 11 | Transflex 250 | 65 | 356 | 46 | 1830 |
| 12 | Transflex 300 | 80 | 432 | 54 | 1830 |
| 13 | RW Euroflex M45 | 45 | 271 | 33 | |
| 14 | RW Euroflex M60 | 60 | 274 | 42 | |
| 15 | RW Euroflex M80 | 80 | 357 | 44 | |
| 16 | RW Euroflex M100 | 100 | 391 | 53 | |
| 17 | RW Euroflex M140 | 140 | 465 | 78 | |
| 18 | FIP GPE 50S/100 | 50 | 314 | 57 | 900 |
| 19 | FIP GPE 50S/175 | 50 | 389 | 57 | 900 |
| 20 | FIP GPE 50S/250 | 50 | 464 | 57 | 900 |
| 21 | FIP GPE 80 | 80 | 320 | 61 | 900 |
| 22 | FIP GPE 120 | 120 | 372 | 78 | 900 |
| 23 | AlgaFlex T80 | 80 | 275 | 42 | 2000 |
| 24 | AlgaFlex T100 | 100 | 355 | 46 | 2000 |
| 25 | AlgaFlex T120 | 120 | 390 | 53 | 2000 |
| 26 | AlgaFlex T160 | 160 | 470 | 78 | 2000 |
| 27 | AlgaFlex T180 | 180 | 500 | 82 | 2000 |
| 28 | Freyssinet Cipec M-65 | 65 | 210 | 55 | 1050 |
| 29 | Freyssinet Cipec M-80 | 80 | 210 | 55 | 1050 |
| 30 | Freyssinet Cipec M-100 | 100 | 280 | 65 | 1050 |
| 31 | AGOM AGFLEXJ 30 | 30 | 269 | 32 | 2000 |
| 32 | AGOM AGFLEXJ 50 | 50 | 272 | 41 | 2000 |
| 33 | AGOM AGFLEXJ 80 | 80 | 358 | 46 | 2000 |
| 34 | AGOM AGFLEXJ 100 | 100 | 388 | 53 | 2000 |
| 35 | AGOM AGFLEXJ 120 | 120 | 427 | 69 | 1000 |
| 36 | AGOM AGFLEXJ 140 | 140 | 465 | 80 | 2000 |
| 37 | AGOM AGFLEXJ 160 | 160 | 498 | 84 | 2000 |

14. ábra: Szimpla szőnyegszerű műgumi dilatációk összehasonlító táblázata.

4.4. SZABAD-E KÖZÚTI HÍDJAINKON MŰGUMI SZŐNYEGSZERŰ DILATÁCIÓT ÉPÍTENI?

A fentiek után következzen a címbéli kérdés vizsgálata, elsősorban a szerző részben szubjektív megítélését tükrözve.

Nem gyárt szőnyegszerű dilatációt a két meghatározó európai gyár: sem a Maurer, sem a mageba. A szőnyegszerű dilatáció kétségtelenül lényegesen olcsóbb termék, mint az erősebb alternatívák (moduláris, fésűs). Az elérhető árelőny vajon hogy viszonyul a tartóssághoz?

Mint láthattuk a szőnyegszerű dilatációk skálája igen széles, aligha lehet az összes ilyen terméket egy kalap alá sorolni.

A táblázatban bemutatott dilatációelemek gyártó által megadott mozgásképessége igen változatos.

Változatos a dilatációkba vulkanizált acélelemek mérete, megmunkálása is. Van gyártó, amelyik az acéllemezek élét gömbölyíti beépítés előtt, másik gyártó túléles sarokkal vágott acéllemezeket vulkanizál a termékébe. Beépítési tapasztalatok szerint (dilatáció fűrészelése) olykor már gyári állapotban sem volt tökéletes az acéllemezek és a tömbgumi kapcsolata.

Bizalmatlanságot kelt, hogy a 357x46 mm befoglaló méretű elemek megadott mozgásképessége 80, vagy 100 mm, a 391x53 mm befoglaló méretűeké 80, vagy 100, vagy 120 mm, a 465 x 80 mm méretű elemeké pedig 140, vagy 150, vagy 160 mm.

Bizalmatlanságot kelt, hogy egyik gyártó szerint a szőnyegelem mozgásképessége a semleges állapotra szimmetrikus, másik gyártó szerint pedig jelentősen aszimmetrikus.

Bizalmatlanságot kelt, hogy több gyártó nem foglalja a szigetelés csatlakozás csomópontjával, részlet kérdéseivel.

Bizalmatlanságot kelt, hogy több gyártó nem tesz megkötést a kiegyenlítő réteg vastagságára, s közben grafikusán mintarajzain kifejezetten vastag kiegyenlítést ábrázolnak. És ezt a sort még folytathatnánk.

Bizalmatlanságot kelt, mikor a gyártó által biztosított dilatáció alatti gumilíra anyaga 6-8 év után szétfeszlik.

Látható, hogy egyes termékek műszaki alkalmazási feltételei elnagyoltak, olykor pedig kifejezetten rosszak. A gyártó műszaki beépítési előírásait pedig a tervezőnek nem kellene felülmúlnia.

A dilatációk elhelyezését, szigetelés-csatlakoztatását a hídtervezőnek külön meg kell terveznie (KHT 1. 4.7.5. pont)! Ez azonban sokszor elmarad. „Dilatációt tervezze csak meg a szerkezet forgalmazója!” – így a tervező. „A csatlakozó szigeteléshez, burkolathoz, vízvezetéshez semmi közöm!” – így pedig a dilatációt forgalmazó. Ezen pathhelyzet feloldása nélkül sose lesz tartós végeredmény, sose lesz jó dilatáció.

A dilatáció, annak alépitményi kapcsolata, rögzítése, a szigetelés, a burkolat, a vízvezetés és ezek csomópontjai (szegélykiállítás, híd széle, közműüttörés, stb) csak komplex módon együtt kezelhető és ez a híd tervezőjének feladata, akinek keze alá kell dolgozzon a dilatáció forgalmazója, gyártója (lásd KHT 1. 4.7.5 pont). Későbbi viták elkerülése érdekében célszerű, ha a részletes dilatáció elhelyezési-beépítési tervet a felelős hídtervezőn kívül a dilatáció gyártója-forgalmazója is aláírja.

A közbeszerzésre vonatkozó szabályok szerint nem lehet konkrét terméket előírni. Erre hivatkozva előszeretettel hagyják el a dilatációk részletes tervezését. Ehelyett a dilatációt egy konkrét típusra meg kell rajzolni, minden járulékos vonzatával együtt, s ha a kivitelező másik dilatációt kíván beépíteni a szabad verseny jegyében, akkor azt az előírt műszaki paramétereken belül a szükséges tervek kidolgozásával és elfogadtatásával végezheti el.

5. ÖSSZEGZÉS

A szőnyegszerű mógumi dilatációkat – összhangban az ÚME szellemiségével csak korlátozottan javasolom használni. Ezen korlátozó tényezők a forgalom nagyság, továbbá forgalom jellemző sebessége, szükséges mozgástartomány. Indokolt a szükségesnél nagyobb mozgásképességű elemek beépítése, de a keresztmetszetében kettőnél többször nyírt elemek mellőzését javasolom.

Indokolt a hatályos ÚME szabályozás szándéka, hogy a komoly forgalmú hidakon ne épüljön ilyen szerkezet – bár az előírás korlátozása e szándékot az útkategórián keresztül fogja meg, illetve fővárosi fenntartással, s bizonyosan ez nem a legpontosabb körül határolása az alkalmazhatóságnak.

Ugyanakkor lehetne szőnyegszerű dilatáció tartós és jó szerkezet akár gyorsforgalmi utakon is. Ehhez azonban három feltételnek kell teljesülnie: 1) legyen jó a termék (lásd szőnyeg paraméterei, belevulkanizált acéllemez megmunkálása, rögzítésének rendszere); 2) legyen jól megtervezve (elemek alatti kiegyenlítés, vízvezetés, szigetelés csatlakoztatás, stb); 3) valamint legyen jól megépítve.

A három feltétel biztosítása azonban bizonyosan túlmutat a szokásos dilatáció tervezés-beépítés előkészítési mélységén. Mint láthattuk nem kerülhető meg már a gyártástól a legszigorúbban nyomon követni a termék készítését, alkalmazva a tartósság érdekében javasolt módosításokat is.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- Borbás, M. 2010: Freyssinet dilatációk az M31-esen. In Gazdasági Tükörcép Magazin 2010/8
- Darvas, E., Balázs, Z. 1975: Hídszerelvények és tartozékok fejlődése. In. Uvaterv Műszaki Közlemények, 1975/1-2
- Ramberger, G. 2002: Structural Bearings and Expansion Joints for Bridges. Structural Engineering Documents 6, IABSE, Zurich.
- Hakenjos, V., Richter, K., Gerber, A., Wiedermeyer, J. 1985: Untersushung der Bewegunden von Brückenbauwerken infolge Temperatur und Verkehrsbelastung am Beispiel einer Stahlbrücke. In. Stahlbau, 1985/2
- Közúti hidak építési és fenntartási zsebkönyve 1988. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- Németh, Gy., Tóth, Z. 1991 Dilatációs szerkezetek összehasonlító vizsgálata. SZIMI, Győr.
- Pallós, I., Török, K., Vértes, M. 2011: Korszerű híd dilatációs szerkezetek kiválasztási szempontjai, alkalmazási, javítási, fenntartási módjuk. Kutatás, szakértés, szakvélemény. ÁAK
- Dornsife, R. J. 2000: Expansion Joints. In. Bridge Engineering Handbook Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan, CRC Press LLC.

A képek és ábrák forrása a képaláírás szögletes zárójelbe helyezett irodalomjegyzék hivatkozása, illetve konkrét termék műszaki szállítási feltétele, prospektusa. Szögletes zárójel nélküli ábrákat a szerző készítette.