



# A klimatikus jellemzők hatásai az útpályaszerkezetre

**Gribovszki Zoltán<sup>1</sup>, Kalicz Péter<sup>1</sup>, Herceg András<sup>1</sup>,  
Primusz Péter<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet

E-mail: [zgribo@gmail.com](mailto:zgribo@gmail.com); [kaliczp@gmail.com](mailto:kaliczp@gmail.com); [herceg.andras@uni-sopron.hu](mailto:herceg.andras@uni-sopron.hu); [primusz.peter@uni-sopron.hu](mailto:primusz.peter@uni-sopron.hu)

DOI: [10.36246/UL.2020.1.01](https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.01)

## 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 a figyelembe vehető. Bár a hőmérséklettől függő aszfalt merevségi modulust a tényleges, reálisan várható aszfalthőmérséklet alapján célszerű felvenni. Viszont ezen mérések csak korlátozott számban állnak rendelkezésre, a léghőmérséklet mérések viszont igen jól lefedik az országot ezért felhasználhatóak az aszfalthőmérsékletek becslésére (elsősorban szezonálisan, havi gyakorisággal).

Jelen cikk a léghőmérséklet és a csapadék általános változási tendenciáit mutatja be és hasonlítja össze Magyarországon három vizsgálati időszakra: 1951-1980; 1981-2010; 2016-2045.

*Kulcsszavak:* alacsony pályaszerkezet méretezés, klímaváltozás, klimatikus jellemzők, hőmérséklet, csapadék

## ABSTRACT

Environmental parameters (primarily temperature, precipitation, air humidity, freeze-thaw cycles and groundwater depth) have a significant impact on the condition and lifespan of pavements, therefore they can be taken into account as critical factors during pavement design methods.

In calculating the durability of asphalt pavements, temperature, fluctuations of temperature, and precipitation can be taken into account, which are generally available meteorological parameters. Although the temperature-dependent asphalt stiffness modulus should be determined based on the actual, realistic expected asphalt temperature. However, these measurements are only available in a limited number, instead of air temperature measurements that cover the country very well and nevertheless can be used to estimate asphalt temperatures (mainly seasonally, on a monthly basis).

This paper presents and compares general trends of changes in air temperature and precipitation in Hungary for three investigational periods: 1951-1980; 1981-2010; 2016-2045.

*Keywords:* pavement design, climate change, climatic parameters, temperature, precipitation

### **Prof. Dr. Gribovszki Zoltán**

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

**Dr. Kalicz Péter**

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

**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 Vízgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése.*

---

## 1. BEVEZETÉS

A környezeti jellemzők jelentős hatást gyakorolnak az útburkolatokra így a pályaszerkezetek méretezésénél is fontos tényezőként vehetők figyelembe. A környezeti jellemzők közül a hőmérséklet, a csapadék, a légnedvesség, a fagyás-olvadás ciklusok és a talajvíz mélysége befolyásolják leginkább az útburkolatok állapotát és élettartamát. Különösen fontos a környezeti jellemzők alaposabb vizsgálata az alsóbbrendű vagy mezőgazdasági utaknál, illetve az erdők feltáráshálózatánál valamint az agroerdészeti rendszerek kiszolgáló útjainál. Ezeknél az úthálózatoknál az időjárásnak való kitettség a vékonyabb pályaszerkezet miatt erőteljesebben is érezteti hatását.

Minden klimatikus jellemző szezonális változékonysággal bír, tehát célszerű a pályaszerkezet méretezését is ezekhez a szezonális változásokhoz kapcsolni (Gupta, 2014). A hajlékony pályaszerkezetek méretezésénél három fő környezeti jellemző változását célszerű figyelembe venni:

- Az aszfalt rétegek hőmérsékletének változásai. Ez a paraméter azért lényeges, mert az aszfaltkeverékek modulusai nagyon érzékenyek a hőmérsékletváltozásra. 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 & Tóth, 2008).
- Az alsó rétegek (elsősorban a földmű) talajnedvességének változásai. A földmű modulusok általában az optimális talajnedvességre és sűrűsége (tömörségre) vonatkoznak. Sok esetben viszont az optimálistól eltérő jellemzőkre korrekciós faktorok szükségesek.
- 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, ennek ingadozása és a csapadék a figyelembe vehető tényezők (Boromissza, 1997). Jelen cikk e két paraméter általános változási tendenciáit mutatja be Magyarországon.

## 2. A HŐMÉRSÉKLET ÉS CSAPADÉK

Az aszfaltkeverékek terheléssel szembeni ellenállása tehát hőmérsékletfüggő. Jelenleg három jellegzetes hőmérséklet tartományhoz rendelik a tönkremeneteli formákat (Pethő, 2008):

- alacsony hőmérsékleti tartomány (<0 Celsius), repedésképződés az aszfaltburkolatban;
- közepes hőmérsékleti tartomány (5-15 Celsius), az aszfaltkeverékek fáradása;

- magas hőmérsékleti tartomány (>30 Celsius), plasztikus deformációs hajlam (keréknyomképződés).

A valós környezeti változásoknak kitett és igénybevétellel terhelt pályaszerkezeteken az előbbieken felsorolt tönkremeneteli formák együttesen, illetve egymásra hatást gyakorolva jelennek meg (Pethő, 2008).

A magas hőmérséklet hatása a következő. A sötét felszínű aszfaltburkolat, a kisebb albedója miatt, a hőmérsékletet általában akkumulálja. A léghőmérséklet és a burkolat hőmérséklet általában nem azonos. A burkolat hőmérséklete általában magasabb, sőt tartósan magasabb. A hőmérséklettől függő aszfalt merevségi modulus tehát nem a léghőmérséklet, hanem a tényleges, reálisan várható aszfalthőmérséklet alapján célszerű felvenni (Boromissza, 1997). Mivel azonban az aszfalthőmérsékletek mérések csak korlátozott számban állnak rendelkezésre, a léghőmérséklet mérések viszont igen jól lefedik az országot ezért felhasználhatóak az aszfalthőmérsékletek becslésére. A léghőmérséklet, mint egyetlen paraméter azonban inkább szezonálisan, havi gyakorisággal használható az aszfalt pályaszerkezetek hőmérsékletének becslésére. A pillanatnyi aszfalthőmérséklet ugyanis nemcsak a léghőmérséklettől, hanem az ezt megelőző időszak (órák, sőt napok) időjárásától is függ. Ezért nehéz nagy időbeli felbontásban általános érvényű összefüggést adni.

A hőmérsékletfüggő aszfaltmodulus befolyásolja a talajra jutó feszültséget, tehát közvetve az egész pályaszerkezet teherbírását is. Érdemes kiemelni, hogy az összefüggés exponenciális, így a magasabb hőmérsékleti kategóriákban a hatás hatványozott (Pethő, 2008). Hazai viszonyok között az 50 Celsius fokos aszfalthőmérsékletek sem ritkák (Boromissza 1997), amelyek mellett a modulus értéke igen jelentősen megváltozik. A hatás egyébiránt a klímaváltozás kapcsán még jelentősebb lehet.

Az alacsony hőmérsékletek esetén a pályaszerkezet méretezést jelentősen befolyásolja a talajfagy mélysége és tartóssága. Az aszfaltburkolat tartósságára pedig a fagyás-olvadás ciklusok száma és a napi hőmérsékletingadozás gyakorol jelentősebb hatást.

A csapadék mennyisége főként az elnedvesedésén keresztül elsősorban a talaj teherbírását befolyásolja. Mivel a vegetációs időszakban a párolgás igen jelentős mértékű (általában meghaladja a csapadékot), ezért az éves csapadékmennyiség mellett a téli félév csapadékát is célszerű meghatározni. A magyar pályaszerkezet méretezési utasítás a 600 mm feletti átlagos csapadékú vidékeket „kedvezőtlennek” minősíti, és ezt a teherbírásnál is figyelembe veszi.

### 3. A KLÍMAVÁLTOZÁS UTAKRA VALÓ LEHETSÉGES HATÁSAI

Az éghajlatváltozás sajátos jellemzője, hogy a megváltozó környezeti feltételek visszahatnak a klímaváltozást elsősorban indukáló társadalmi gazdasági tevékenységre. A következmények megjelenhetnek útjaink állapotában is. Különösen lényeges a kérdés az alsóbbrendű vagy mezőgazdasági, ill. erdészeti utak esetében, amelyek a környezeti jellemzőkre, különösen a földmű nedvességtartalmával kapcsolatos változásokra érzékenyebbek.

Fontos kérdés, hogy infrastruktúránk éghajlati szempontból mennyire időálló. A jelenben zajló tervezések szempontjából pedig meghatározó kérdés, hogy a tervek során kivitelezett utak pályaszerkezetei mennyire állják ki majd a változó klíma hatásait. Ezt a kérdést alapvetően meghatározza, hogy a tervezés során figyelembe vett tervezési paraméterek (egyenletek állandói, zónahatárok, zónákra jellemző faktorok) mennyire aktuálisak, és mennyire tekintenek esetleg előre az elkövetkező időszak jellemzőit is figyelembe véve. Az előrejelzések szerint ugyanis a klimatikus jellemzők változása valószínűleg a szélsőséges időjárási események gyakoriságának növekedése (Bartholy et al., 2011). A legfontosabb befolyásoló események példaként a hóhullámok, a korai és a kései fagyok, a jelentős szélviharok, a nagy intenzitású felhőszerkezetű esőzések és ennek vízelvezetési problémái, valamint a nyári időszakokban fellépő hosszabb aszályos időszakok megjelenése (Bartholy et al., 2011).

Az utakra való hatásokat elemezve néhány példát érdemes kiemelni:

- A rövid idő alatt lehulló, nagy intenzitású csapadékok alámoshatják a közúti töltéseket, partfalakat (Bartholy et al., 2011). Az útpályaszerkezetek gyors tönkremenetelét okozhatja,

ha azok az „alulról jövő víz” (talajvíz, belvíz vagy árvíz) hatása alá kerülnek. Kiemelten problémás a helyzet akkor, ha a földművet nem szemcsés talajból (pl. homok) építették (Gáspár, 2007). Óriási jelentőségű tehát az utak megfelelő vízevezetési rendszere.

- A tartós aszály a kedvezőtlenebb talajadottságú területeken okozhat állékonyságromlást (földmű/részű összerepedezése).
- Az aszályos időszakok kedvezőtlenül érinthetik az utakat, autópályákat szegélyező növényállományok vitalitását, csökkentve ezáltal a növények szélsőségeket mérséklő hatását. Így a kedvezőtlen hatások még erőteljesebben megjelenhetnek a pályaszerkezetekben (Bartholy et al., 2011).
- Az egyre forrószodó nyári hónapokban fokozott aszfaltkárosodásra számíthatunk. A gyakrabban megjelenő hőségnapok, hőségperiódusok a burkolat nyomvályúsodásának erősödéséhez vezethetnek. Ez a hatás különösen fokozott lehet, ha a napi átlaghőmérséklet legalább három napon keresztül nem süllyed 26 Celsius fok alá (Bartholy et al., 2011).
- A fagypont körüli hőmérséklet és a gyakrabban változó halmazállapotú csapadék is kedvezőtlenül befolyásolhatja az útburkolatok állagát. A fagy hatására megnyíló repedéseken keresztül az aszfaltrepedésekbe szivárgó víz a kátyúsodás erősödéséhez vezethet, hiszen a fagypont alatti és fölötti hőmérsékletek gyorsabban váltogatják majd egymást (Bartholy et al., 2011).
- A gyakoribbá váló fagyás felengedés ciklusok a kritikus időszakokban a földmű fokozottabb elnedvesedéséhez így teherbírás csökkenéséhez vezethetnek (Gáspár, 2007).
- A városokban az aszfaltozott utak, a városok ritkásabb növényzete, az egyre sokasodó nagy üvegfelületekkel rendelkező épületek, és az ezek hűtését szolgáló légkondicionálók használata erősíti majd a klímaváltozás indukálta hőmérsékletemelkedést (Pongrácz et al., 2006). Ez a hatás tehát a városi területeken a még fokozottabb nyomvályúsodáshoz vezethet.

Az előbbieket összefoglalva megállapítható, hogy a klímaváltozás a megváltozó környezeti jellemzők miatt a pályaszerkezetek tervezési paramétereinek, esetleg magának a tervezési elveknek a módosítását indukálja.

#### **4. KLIMATIKUS JELLEMZŐK ÉS VÁLTOZÁSUK**

##### **4.1. MÚLTBELI TENDENCIÁK AZ ÉGHAJLATBAN**

###### **4.1.1. A HŐMÉRSÉKLET ÉS CSAPADÉK ÁTLAGOK ÁLTALÁNOS TENDENCIÁI**

A műszeres mérések kezdet óta az elmúlt 30 évben mutatta Magyarország éghajlata a legintenzívebb változást.

Az évszakok közül a nyarak átlaghőmérséklete emelkedett a leginkább, mértéke az utóbbi 30 évben elérte a 2 Celsius fokot (Bartholy et al., 2011; Lakatos et al., 2012). A nyári melegedési tendenciára azért is érdemes figyelni, mivel az aszfaltkeverékek merevségi modulusai, különösen a plasztikus deformációra való hajlam is erősen változik kedvezőtlen irányba a hőmérséklet emelkedésével. A kapcsolat pl. exponenciális függvénnyel jól leírható (Pethő, 2008), így a változás mértéke a hőmérséklet emelkedésével rohamossá válik.

A csapadék hazánkban, térben és időben egyaránt változékony paraméter, ezért a csapadékváltozások, nem követnek olyan egyértelmű trendet, mint pl. a hőmérsékletemelkedés (Bartolty et al., 2011; Lakatos et al., 2012). Az éves csapadékösszeg a XX. század elejétől országos mértékben enyhén csökkent. A csökkenés mértéke a Dunántúlon az országos átlagnál nagyobb mértékű volt (Gálos és Vig, 2014; Bartolty et al., 2011). A csapadékoság a pályaszerkezet méretezés szempontjából elsősorban a pályaszerkezet alatti talaj teherbírását befolyásolhatja. Itt is inkább a nagycsapadékok, valamint a téli csapadékösszeg kiemelt jelentőségére érdemes a figyelmet felhívni.

#### 4.1.2. A CSAPADÉK ÉS A HŐMÉRSÉKLET SZÉLSŐSÉGEINEK TENDENCIÁI

Az elmúlt 30 évben gyakoribbá váltak a szélsőségesen meleg időjárási helyzetek (Gálos et al., 2007; Lakatos et al., 2012). Példaként a nyári napok száma (napi maximum >25 Celsius fok) átlagosan 8 nappal, a hóhullámos napok száma (napi átlag >25 Celsius fok) 5 nappal nőtt. A fagyos napok száma (napi minimum hőmérséklet <0 Celsius fok) az általános melegedésnek megfelelően viszont 10 nappal csökkent (Lakatos et al., 2012).

A csapadék időbeli eloszlása is megváltozott az elmúlt néhány évtizedben. A csapadékos napok száma csökkent, így az aszályos nyarak megjelenése gyakoribbá vált (Szalai & Mika, 2007). A nyári csapadékkintenzitás átlagosan növekedett az országban, de térben osztva a problémát már nem ilyen egyértelmű a helyzet. A nyári csapadékkintenzitás növekedése a legerőteljesebb Komárom-Esztergom és Pest megyében, a Délnyugat-Dunántúlon viszont a csapadékkintenzitás csökkenése figyelhető meg (Lakatos et al., 2012).

#### 4.2. JÖVŐBELI ÉGHAJLATI TENDENCIÁK

##### 4.2.1. HŐMÉRSÉKLET ÉS CSAPADÉK ÁTALAGINAK JÖVŐBELI PROGNÓZISA

A regionális klíma-előrejelzések alapján az egész európai kontinens területén, minden évszakban felmelegedés várható, amelynek mértéke a 21. század vége felé fokozódik (Christensen et al., 2007, van der Linden et al., 2009; Jacob et al., 2008; Jacob et al., 2013). A melegedés mértéke 2-5 °C az alkalmazott klímamodell és emissziós forgatókönyvtől függően.

Vautard et al. (2014) kutatásai alapján a globális 2 °C-os átlagnál nagyobb melegedés várható Európában az 1971-2000-es referencia-időszakkal összevetve. A változások Európa szerte eltérőek, ami konkrétan a globálisnál enyhébb melegedést jelent a nyugati régiók, de intenzívebbet Dél-Európára nyáron, illetve Észak- és Kelet-Európára télen. A kutatás 30 éves periódust ölel fel, az SRES globális klímamodell A1B klíma forgatókönyvét alapul véve, 25 km-es felbontásra leskálázva.

Az éves csapadékösszegek tekintetében Európában 21. század második felére az északi régiók valószínűsíthetően nedvesebbek, míg a déli térségek szárazabbak lesznek (Kjellström et al., 2011). Ezt, a már korábban is előrevetített trendet erősíti meg az IPCC 2014-es jelentése is (IPCC, 2014), finomabb felbontású modellek eredményei alapján (Jacob et al., 2014; Vautard et al., 2013).

Magyarországon a jelen század végére akár 3-4 Celsius fokkal magasabbak is lehetnek a hőmérsékletek, az évszakok közül pedig a nyarak hőmérséklete emelkedhet a leginkább (Bartolly et al., 2011).

A csapadékösszeg tekintetében hazánkra vonatkoztatva nem szignifikáns a jövőbeli változás, mivel úgynevezett átmeneti zónában helyezkedik el. Az évszakok közül viszont nyáron minden klímamodell eredménye szerint a csapadékmennyiség jelentősebb csökkenése várható a század végére, míg ugyanakkor a telek csapadékosabbá válhatnak (Szépszó, 2008; Gálos et al., 2014). Hazánkra a szabálytalan csapadékeloszlás jellemző, így ugyanolyan valószínűséggel jelentkezhetnek heves csapadékesemények, mint erős szárazság (Gálos et al., 2015; Nováky & Bálint, 2013).

##### 4.2.2. A HŐMÉRSÉKLET ÉS A CSAPADÉK SZÉLSŐSÉGEINEK JÖVŐBELI PROGNÓZISA

A jövőben, Európában megnövekedhet az előfordulása a szélsőséges napi maximum hőmérsékleteknek, a szélsőséges napi csapadékoknak és az evvel kapcsolatos árvizeknek. A hőmérséklet és a csapadékkintenzitás növekedés magával vonja a hidrológiai ciklus általános felgyorsulását is (Kjellström et al., 2011). Európa egész területén gyakoribbá válhatnak a hóhullámok, ez a hatás a mediterrán területeken még fokozottabb lesz (IPCC, 2014).

Magyarországon a napi maximum és minimumhőmérsékletek tekintetében egyaránt növekedés várható a XXI. század során. Az előrejelzések szerint gyakoribbá válnak majd a meleg hőmérsékleti szélsőségek (hőség és forró napok), azonban a hideg szélsőségek (téli és fagyos napok) száma csökken (Szépszó, 2008).

A csapadék időbeli eloszlása is átalakul majd a prognózisok szerint. A század végére a csapadékos napok száma tovább csökken a jelenhez képest is. A nagycsapadékok (20mm<) előfordulása általában (a nyár kivételével) növekedni látszik (Lakatos et al., 2012). A nagycsapadékok következtében előforduló villámárvizek gyakoribbá válhatnak. A hosszabb csapadékmentes periódusok viszont szélsőségesebb aszályokat indukálnak majd (Gálos et al., 2007).

### 4.3. A KLIMATIKUS JELLEMZŐK JELENBELI (1981-2010) ALAKULÁSA MAGYARORSZÁG TERÜLETÉN

Magyarországon az éghajlati elemek szempontjából nagyjából egységes éghajlati körzetekre osztható. A felosztást, az éghajlati paraméterek elemzésé, az egyes közigazgatási régiókhoz célszerű kötni, hiszen a támogatások is valószínűleg régiókhoz köthetők majd. Az egyes régiók a következők: Dunántúl, Közép-Dunántúl, Közép-Magyarország, Észak-Alföld, Dél- Alföld, Nyugat-Dunántúl, Észak-Magyarország. Mindemellett az egyes közigazgatási régiók elhelyezkedései viszonylag jól követi a csapadék és a hőmérséklet országos megoszlást is. A régiók területfoglalását az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A magyarországi régiók elnevezése (rövidítés) és területfoglalása.

Régió elnevezése	Régió rövidítése	Terület [km <sup>2</sup> ]
Dunántúl	D	14443
Közép-Dunántúl	KD	11526
Közép-Magyarország	BK	7092
Észak-Alföld	EA	18116
Dél-Alföld	DA	18565
Nyugat-Dunántúl	NYD	11382
Észak-Magyarország	EM	13686

A paraméterekre a klimatikus vizsgálatokban is szokásos 30-éves átlagokban történnek a számítások. A későbbiekben jelennek hivatkozott időszak az 1981-2010-es periódus értékeire vonatkozik. A múlt alatt az 1951-80-as időszakra utalunk. A Jövő esetében a rendelkezésre álló regionális klímamodellek adatai közül a Közép-Európára leginkább megfelelő REMO (Jacob et al., 2007) regionális klímamodell bias korrekcióval módosított adatait használtuk fel. A jövőbeli értékelési időszak a 2016-2045 közötti periódus, mivel a felhasznált adatbázisban csak 2016-tól állnak rendelkezésre a jövőre vonatkozó adatok. Az értékeléshez az A1B scenáriónak megfelelő változásokat vettük alapul. A kutatási munkához a FORESEE adatbázist használtuk fel (Dobor et al., 2013).

#### 4.3.1. HŐMÉRSÉKLETEK

Az éves átlaghőmérséklet 11,1 Celsius fok, a legalacsonyabb átlaghőmérséklet Észak-Magyarországon jellemző a Bükk-fennsík 10,14 fokos értékkel (2. táblázat). Ha az orográfia hatását nem számítjuk, akkor az ÉK-i területek a leghűvösebbek 9-9,5 Celsius fokos átlaghőmérséklettel. Átlaghőmérséklet tekintetében a legmelegebb terület a Dél-Alföld, ill. a Dunántúl déli része 11,6 és 11,53 Celsius fokkal. Az átlaghőmérséklet régiók szerinti megoszlást a 2. táblázat tartalmazza. A táblázatban az átlag az egyes régiókba eső pixelek éves átlaghőmérsékleteinek területi átlaga. A minimum és a maximum, valamint a szórás az adott régió belüli pixelek éves átlagértékeire értelmezett térbeli statisztikák.

2. táblázat: Az éves átlaghőmérsékletek térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (1981-2010).

Régió	Min.[Celsius]	Max.[Celsius]	Átlag [Celsius]	Szórás
D	11,06	11,96	11,53	0,20
KD	9,68	11,78	11,08	0,45
BK	9,52	11,87	11,24	0,49
EA	10,16	11,64	10,79	0,45
DA	11,066	11,96	11,60	0,19
NYD	10,37	11,58	10,97	0,21
EM	8,34	11,28	10,14	0,61

A 2. táblázat alapján megállapítható, hogy az orográfia hatását elhanyagolva a leghidegebb ÉK-i rész és a legmelegebb D-i rész között 3-3,5 Celsius fokos átlaghőmérséklet különbségek vannak, ami indokolhatja a régiók kialakítását, a pályaszerkezet méretezés hőmérsékleti korrekciójának szempontjából.

Az átlagok mellett a hőmérséklet szezonális menete is lényeges kérdés, hiszen a pályaszerkezet méretezés a havi jellemzők figyelembevételén alapul. A hőmérsékletek havi eloszlását a 3. táblázat mutatja.

3. táblázat: A napi átlaghőmérsékletek szezonális megoszlása (1981-2010).

Hónap	Min. [Celsius]	Max. [Celsius]	Átlag. [Celsius]	Szórás	0 Celsius alatt	30 Celsius fölött
Jan.	-20,7	12,6	-0,57	4,69	53,75%	0,00%
Febr.	-16,9	15,2	1,45	4,76	36,32%	0,00%
Már.	-12,6	18,0	6,09	4,27	7,39%	0,00%
Ápr.	-2,0	21,7	11,68	3,73	0,04%	0,00%
Máj.	4,2	26,1	16,73	3,44	0,00%	0,00%
Jún.	8,3	29,9	19,63	3,33	0,00%	0,00%
Júl.	10,8	32,5	21,68	3,03	0,00%	0,19%
Aug.	10,1	30,6	21,26	3,10	0,00%	0,01%
Szept.	5,7	28,2	16,74	3,22	0,00%	0,00%
Okt.	-2,0	22,9	11,55	4,14	0,23%	0,00%
Nov.	-11,3	19,6	5,25	4,27	10,85%	0,00%
Dec.	-15,6	16,8	0,66	4,35	42,90%	0,00%

A 3. táblázat alapján megállapítható, hogy a havi átlaghőmérsékletek a -0,6 (január) és a 21,7 (július) Celsius fok között változnak. A napi átlaghőmérsékletek esetében a leghidegebb az 1981-2010 közötti időszakban -20,7 Celsius fok, míg a legmelegebb 32,5 Celsius fok volt. A legtöbb fagypont alatti átlaghőmérsékletű nap januárban volt, átlagosan 17 nap a hónapból. Fagypont alatti hőmérsékletű napok októbertől-áprilisig, a 30 °C fölötti átlaghőmérsékletű napok pedig dominánsan júliusban voltak jellemzőek (átlagosan 0,06 nap a hónapban).

#### 4.3.2. CSAPADÉK

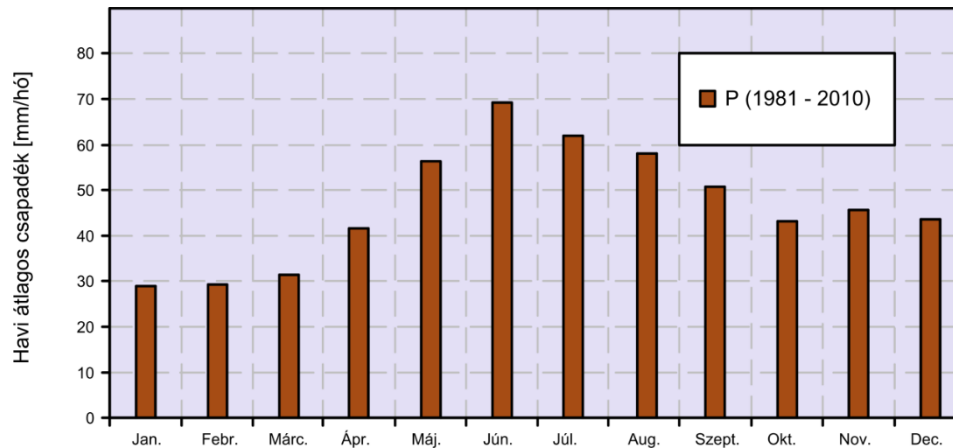
A csapadék esetében 586 mm/év az országos átlag az 1981-2010 közötti időszakban. A legkisebb éves átlagos csapadékösszeg Közép-Magyarországon és a Dél-Alföldön jellemző 480-490 mm/év, míg a legnagyobb csapadékú a nyugat-dunántúli régió (614 mm/év). A csapadék területi eloszlását a 4. táblázat mutatja.

4. táblázat: Az éves átlagos csapadékösszegek [mm/év] térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (1981-2010).

Régió	Min. [mm]	Max. [mm]	Átlag [mm]	Szórás
D	512	713	586	47,19
KD	501	651	554	34,09
BK	487	649	523	36,22
EA	499	622	546	33,56
DA	490	570	521	16,32
NYD	505	764	614	66,84

EM	505	671	574	36.80
----	-----	-----	-----	-------

A csapadék havi eloszlását szemlélteti a 1. ábra, amely szerint a nyár eleji csapadékmaximum jellemző hazánkra és talajnedvesség szempontjából kritikus téli-tavaszi hónapok inkább átlagos vagy az alatti csapadékkal bírnak.



1. ábra: A havi átlagos csapadékösszegek [mm/hó] szezonális eloszlása az 1981-2010-es időszakban.

A földmű modulusaira tekintettel a tavaszi modulusok lehetnek jelentősen kisebbek alapvetően az olvadás következtében előálló felázottság miatt (Fi et al., 2012). A felázottság a magasabb talajnedvesség értékekben jelentkezik, amire leginkább a nyugalmi időszak (november-április) csapadékösszege van hatással, ezek a csapadékok akkumulálódnak a talajban, növelve annak nedvességtartalmát. A vegetációs időszak csapadékait azért nem érdemes figyelembe venni ebből a szempontból, mert a nyári időszakban a potenciális párolgás általában magasabb, mint a csapadék, így a talajnedvesség készlet csökkenő tendenciát mutat. Az alacsonyabb talajnedvesség pedig (a szélsőségesen száraz, aszályos viszonyoktól eltekintve) egy kedvezőbb földmű modulusban nyilvánul meg. A nyugalmi időszak (téli félév) csapadékok területi eloszlást mutatja az 5. táblázat, amely szerint a hegyvidéki részekon kívül a Nagyalföld ÉK-i része, valamint a Dunántúl DNY-i területei rendelkeznek magasabb téli csapadékösszeggel.

A téli félév csapadékösszege átlagosan 146 és 231 mm között van, 178 mm-es átlag értékkel. Mivel a nyugalmi időszak párolgása durván 80-100 mm körüli (Kovács, 2011), ezért a lefolyást is figyelembe véve (a csapadék kb. 10%-a, ami durván 20 mm) átlagosan 20 és 130 mm közötti csapadék áll rendelkezésre a talaj nedvességekészletének feltöltésére. A 100 mm fölötti csapadékmennyiség így, a kedvezőtlen agyagos talajú területeken, általában elegendő arra, hogy a gravitációs pórusméret alatti hézagokat telítse, a felső 1m-es talajrétegben, a szántóföldi vízkapacitásig. Az előbbi megállapítás még akkor is igaz, ha előzőleg a vegetációs időszakban a párolgás a hervadásponthoz víztartalomig leürítette a talaj nedvességekészletét (ami csak a szélsőségesen száraz években igaz). Számszerűen az egyes régiókra a következő átlagos téli csapadékösszegek a jellemzőek (5. táblázat).



5. táblázat: Az átlagos téli csapadékösszegek [mm] térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (1981-2010).

Régió	Min.[mm]	Max. [mm]	Átlag [mm]	Szórás
BK	158	221	174	15,09
D	171	230	190	13,94
DA	160	192	174	6,41
EM	146	217	168	14,90
NYD	162	231	185	17,40
KD	168	210	182	8,98
EA	150	207	175	14,07

#### 4.4. A KLIMATIKUS JELLEMZŐK MÚLTBELI (1951-1980) ALAKULÁSA MAGYARORSZÁG TERÜLETÉN

A múltra vonatkozóan, hogy a változási tendenciákat megláthassuk érdemes a hőmérséklet és csapadékadatokat, valamint egyes levezetett jellemzőket egy korábbi azonos hosszúságú időszak méréseinek statisztikai adataival összevetni. Ez az időszak az 1951-1980 közötti periódus.

##### 4.4.1. HŐMÉRSÉKLET

Az éves átlaghőmérséklet 10,3 Celsius fok, ami 0,7-0,8 fokkal alacsonyabb, mint a jelenre vonatkoztatott érték (1981-2010: 11,1 Celsius fok), a legalacsonyabb átlaghőmérséklet Észak-Magyarországon jellemző a Bükk-fennsíkon 7,8 (1981-2010: 8,3 Celsius fok) Celsius fokos értékkel. Ha az orográfia hatását nem számítjuk, akkor az ÉK-i területek a leghűvösebbek 8,5-9,0 Celsius fokos (1981-2010: 9,0-9,5 Celsius fok) átlaghőmérséklettel. Átlaghőmérséklet tekintetében a legmelegebb terület a Dél-Alföld, ill. a Duna-Tisza köze keleti része, ahol 11 Celsius fokot kissé meghaladó (1981-2010: 12 Celsius fok) átlaghőmérsékletek jellemzőek. Az átlaghőmérséklet régiók szerinti megoszlást a 6. táblázat tartalmazza:

6. táblázat: Az éves átlaghőmérsékletek térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (1951-1980).

Régió	Min.[Celsius]	Max.[Celsius]	Átlag [Celsius]	Szórás
D	10,04	11,05	10,49	0,26
KD	8,81	11,15	10,56	0,49
BK	10,56	11,13	10,88	0,11
EA	7,81	10,67	9,62	0,60
DA	9,30	10,36	9,89	0,20
NYD	8,64	10,97	10,11	0,49
EM	9,76	10,89	10,33	0,32

A 6. táblázat alapján megállapítható, hogy az orográfia hatását elhanyagolva a múltban is a leghidegebb ÉK-i rész és a legmelegebb D-i rész között 2-2,5 °C átlaghőmérséklet különbségek voltak (1981-2010: 3-3,5 °C), ami a múltban még kevésbé indokolta volna a régiók kialakítását, a pályaszerkezet méretezés hőmérsékleti korrekciójának szempontjából.

A hőmérsékletek havi eloszlását a 7. táblázat mutatja az 1951-80-as időszakban.

7. táblázat: A napi átlaghőmérsékletek szezonális megoszlása az 1951-80-as időszakban.

Hónap	Min.[Celsius]	Max.[Celsius]	Átlag [Celsius]	Szórás	0 Celsius alatt	30 Celsius fölött
Jan.	-21,9	11,6	-1,88	4,63	60,45%	0,00%
Febr.	-16,4	15,6	0,88	4,58	38,38%	0,00%
Már.	-13,3	17,5	5,24	4,55	12,84%	0,00%
Ápr.	-0,3	22,3	10,75	3,69	0,00%	0,00%
Máj.	2,6	26,2	15,45	3,55	0,00%	0,00%
Jún.	6,3	28,8	19,07	3,15	0,00%	0,00%
Júl.	9,8	29,7	20,49	2,87	0,00%	0,00%
Aug.	10,1	30,8	19,98	2,94	0,00%	0,03%
Szept.	3,6	26,5	16,23	3,47	0,00%	0,00%
Okt.	-1,2	22,3	10,85	3,76	0,02%	0,00%
Nov.	-8,7	17,8	5,39	4,13	9,73%	0,00%
Dec.	-16,2	11,8	0,58	4,01	42,51%	0,00%

A 7. táblázat alapján megállapítható, hogy a havi átlaghőmérsékletek a következő értékek között változnak: -1,9 Celsius fok a januári (-0,6 a január az 1981-2010) és 20,5 Celsius fok a júliusi (21,7 Celsius fok a július az 1981-2010). A napi átlaghőmérsékletek esetében a leghidegebb az 1951-80 közötti időszakban -21,9 Celsius fok (az 1981-2010 közötti időszakban -20,7 Celsius fok), míg a legmelegebb 30,8 Celsius fok volt (az 1981-2010 közötti időszakban 32,5 Celsius fok). A legtöbb fagypont alatti átlaghőmérsékletű nap 1951-80 között januárban volt, átlagos 18,7 nap a hónapból (1981-2010 átlagosan 17 nap a hónapból). Fagypont alatti hőmérsékletű napok, 1951-80 között is, októbertől-áprilisig voltak jellemzőek. A 30 Celsius fok fölötti átlaghőmérsékletű napok az 1951-80 közötti időszakban csak augusztusban fordultak elő minimális mértékben átlagosan 0,01 nap a hónapban (1981-2010 átlagosan 0,06 nap július hónapban), más nyári hónapban egyáltalán nem fordultak elő. Az összehasonlítás alapján kiderül, hogy a két harminc éves periódus között a napi átlaghőmérsékletek minimumai 1,5 Celsius fokkal emelkedtek, míg a maximális napi átlaghőmérsékletek 1,2 Celsius fokkal magasabbak. Ezek szerint a szélsőségek változásának mértéke jelentősebb, mint az átlagokban jelentkező 0,7-0,8 Celsius fokos növekedés. A fagypont alatti átlaghőmérsékletű napok 1,7 nappal csökkentek januárban, míg a 30 Celsius fok fölötti napok nőttek, 0,05 nappal több jelentkezett júliusban 1981-2010 között, mint 1951-80 között. A pályaszerkezetek vonatkozásában a fagy jelentőségének csökkenése mellett a magas hőmérsékletek (hőségnapok számának) emelkedése várható, ami a keréknyomképződés fokozódásához vezethet.

#### 4.4.2. CSAPADÉK

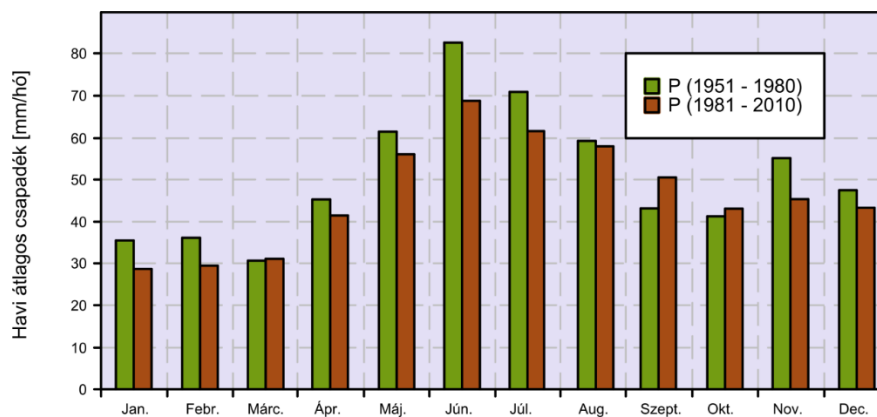
Az éves átlagos csapadék eloszlását a 8. táblázat mutatja. A csapadék esetében 609 mm/év az átlagos évi csapadékösszeg az 1951-80 közötti időszakban (586 mm/év az országos átlag 1981-2010 között). A legkisebb éves átlagos csapadékösszeg 1951-80-as időszakban Közép-Magyarországon és a Dél-Alföldön jellemző 560-580 mm/év (jellemző 480-490 mm 1981-2010 között), míg a legnagyobb csapadékú a nyugat-dunántúli régió 650 mm/év körüli értékkel (1981-2010: 614 mm/év).

8. táblázat: Az éves átlagos csapadékösszegek (mm/év) térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (1951-80).

Régió	Min.[mm/év]	Max.[mm/év]	Átlag [mm/év]	Szórás
D	561	752	651	46,72
KD	551	693	604	29,16
BK	540	706	580	39,13
EA	547	659	594	31,96
DA	524	619	559	14,67
NYD	554	794	652	65,17
EM	565	742	639	37,56

A csapadék havi eloszlását szemlélteti a 2. ábra, amely szerint az 1951-80-as periódushoz képest az 1981-2010-es időszakban nagyobb mértékű nyár eleji és abszolút értékben véve kisebb mértékű téli

csapadékcsökkenés volt jellemző. A kora őszi csapadékok megnöttek az ősz közepe és a tavasz eleje közel azonos csapadékú. A pályaszerkezetek szempontjából a fagy és olvadási károk téli időszakában a klíma kissé szárazabbá vált, de a mértékadó kora tavaszi időszakban alig történt változás.



2. ábra: A havi átlagos csapadékösszegek [mm/hó] szezonális eloszlása az 1951-80, valamint az 1981-2010-es időszakban.

A nyugalmi időszak (november-április) csapadékösszegei akumulálódva növelik jelentősen a kritikus tavaszi időszakban a földmű nedvességtartalmát.

A téli félév csapadékösszege átlagosan 181 mm (1981-2010: 146 mm) és 257 mm (1981-2010: 231 mm) között van, 205 mm-es (1981-2010: 178mm) átlag értékkel az országban. Az átlagos tendencia tehát 27 mm átlagos csökkenés 30 év alatt, de a szárazabb területeken a csökkenés erősebb, míg a nedvesebb területek csökkenése kevésbé jellemző (9. táblázat).

Itt is megjegyezzük, hogy a téli párolgást és a lefolyást figyelembe véve alapvetően a 100 mm fölötti csapadékmennyiségek lehetnek kedvezőtlenek az alapvetően kötött talajú területeken.

9. táblázat: Az átlagos téli csapadékösszegek [mm] térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (1951-1980).

Régió	Min.[mm]	Max.[mm]	Átlag [mm]	Szórás
BK	187	250	203	15,74
D	197	255	220	14,48
DA	181	220	196	5,70
EA	187	230	203	12,85
EM	187	246	206	12,76
KD	190	238	206	9,04
NYD	183	257	206	19,45

#### 4.5. A KLIMATIKUS JELLEMZŐK JÖVŐBELI (2016-2045) ALAKULÁSA MAGYARORSZÁG TERÜLETÉN

A jövőben lehetséges változási tendenciák értékelésére egy a jövőre vonatkozó, klimatikus szempontból már mértékadó és azonos hosszúságú időszakot, a 2016-2045 közötti periódus lett felhasználva és összevetve a jelen (1981-2010) méréseinek statisztikai adataival.

A regionális klímamodellek közül a Közép-Európára leginkább megfelelő REMO (Jacob et al., 2007) regionális klímamodell bias korrigált adatai lettek felhasználva. A bias korrekció az 1981-2010 közötti időszak mért adatai (FORESEE adatbázis) és a REMO regionális klímamodell ugyanerre az időszakra vonatkozó futtatásai alapján készült.

##### 4.5.1. HŐMÉRSÉKLET

Az évi középhőmérséklet eloszlását hazánkban a 2016-2045 közötti időszakban a 10. táblázat mutatja. Az éves átlaghőmérséklet 12,0 Celsius fok, ami 0,9 Celsius fokkal magasabb, mint a jelenre vonatkoztatott érték (1981-2010: 11,1 Celsius fok), a legalacsonyabb átlaghőmérséklet Észak-

Magyarországon jellemző a jövőben is a Bükk-fennsíkon 9,3 (1981-2010: 8,3 Celsius fok) Celsius fokos értékkel. Ha az orográfia hatását nem számítjuk, akkor az ÉK-i területek, valamint az Alpokalja a leghűvösebbek 11,0-11,5 Celsius fokos (1981-2010: 9,0-9,5 Celsius fok) átlaghőmérséklettel. A legmelegebb terület a Dél-Alföld, ill. a Duna-Tisza köze nyugati része, valamint a Dél-Dunántúl déli és keleti része, ahol 12,5-13 Celsius fokos (1981-2010: 12 Celsius fok) átlaghőmérsékletek jellemzőek. Az átlaghőmérséklet régiók szerinti megoszlást a 10. táblázat tartalmazza.

10. táblázat: Az éves átlaghőmérsékletek térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (2016-2045).

Régió	Min.[Celsius]	Max.[Celsius]	Átlag [Celsius]	Szórás
BK	10,41	12,81	12,18	0,50
D	11,98	12,93	12,46	0,22
DA	12,01	12,89	12,54	0,19
EA	11,17	12,59	11,76	0,43
EM	9,32	12,25	11,12	0,61
KD	10,53	12,71	11,96	0,47
NYD	11,16	12,47	11,79	0,23

A 10. táblázat alapján megállapítható, hogy a REMO regionális klímamodell prognózisa alapján, az orográfia hatását elhanyagolva, a jövőben a leghidegebb ÉK-i rész és a legmelegebb D-i rész között 3,5 Celsius fokos átlaghőmérséklet különbségek valószínűsíthetők (1981-2010: 3-3,5 Celsius fok). Ez a területi különbség a jelenhez közel hasonló mértékben teheti indokolttá régiók alkalmazását a pályaszerkezet méretezés hőmérsékleti korrekciójának szempontjából.

A hőmérsékletek havi eloszlását a 11. táblázat mutatja az 2016-2045-ös időszakban.

11. táblázat: A napi átlaghőmérsékletek szezonális megoszlása az 2016-2045-ös időszakban.

Hónap	Min.[Celsius]	Max.[Celsius]	Átlag [Celsius]	Szórás	0 Celsius alatt	30 Celsius fölött
Jan.	-16,00	11,90	-0,05	4,40	50,76%	0,00%
Febr.	-16,70	15,50	2,81	4,85	24,53%	0,00%
Már.	-6,80	20,50	6,64	3,97	5,93%	0,00%
Ápr.	-2,10	24,30	12,26	3,46	-0,10%	0,00%
Máj.	3,90	26,60	17,45	3,78	0,00%	0,00%
Jún.	9,50	31,40	20,48	3,49	0,00%	0,76%
Júl.	8,70	35,20	22,77	3,27	0,00%	3,07%
Aug.	12,00	32,30	22,56	3,07	0,00%	2,14%
Szept.	7,50	32,00	18,06	3,20	0,00%	0,34%
Okt.	-0,20	22,90	13,01	4,26	0,22%	0,00%
Nov.	-2,80	17,40	5,87	3,88	8,20%	0,00%
Dec.	-14,90	16,50	1,44	4,07	36,67%	0,00%

A 11. táblázat alapján megállapítható, hogy a havi átlaghőmérsékletek a -0,1 Celsius fok a januári (-0,6 a január az 1981-2010) és 22,8 Celsius fok a júliusi (21,7 Celsius fok a július az 1981-2010) között változnak. A napi átlaghőmérsékletek esetében a leghidegebb a 2016-2045 közötti időszakban -16,7 Celsius fok (az 1981-2010 közötti időszakban -20,7 Celsius fok), míg a legmelegebb 35,2 Celsius fok (az 1981-2010 közötti időszakban 32,5 Celsius fok) mint jövőben várható értékek. Az összehasonlítás alapján kiderül, hogy a két harminc éves periódus között a napi átlaghőmérsékletek minimumai emelkednek, míg a maximális napi átlaghőmérsékletek jelentősen (több fokkal) magasabbak is lehetnek. Ezek szerint a szélsőségek változásának mértéke a meleg nyári hónapokban jelentősebb lesz, mint az átlagokban jelentkező növekedés. A fagypon alatti átlaghőmérsékletű napok csökkennek a téli időszakban (mintegy 6-7 nappal évente). Míg a 30 Celsius fok fölötti napok száma is nő és már nemcsak júliusban és augusztusban, hanem májustól szeptemberig előfordulhatnak majd. A pályaszerkezetek vonatkozásában a fagyos napok jelentősége csökken, ami az oladási károkkal sújtott időszak hosszának

növekedését jelentheti. Míg a magas hőmérsékletek (hőségnapok számának) emelkedése várható, ami a keréknyomképződés fokozódásához vezethet.

#### 4.5.2. CSAPADÉK

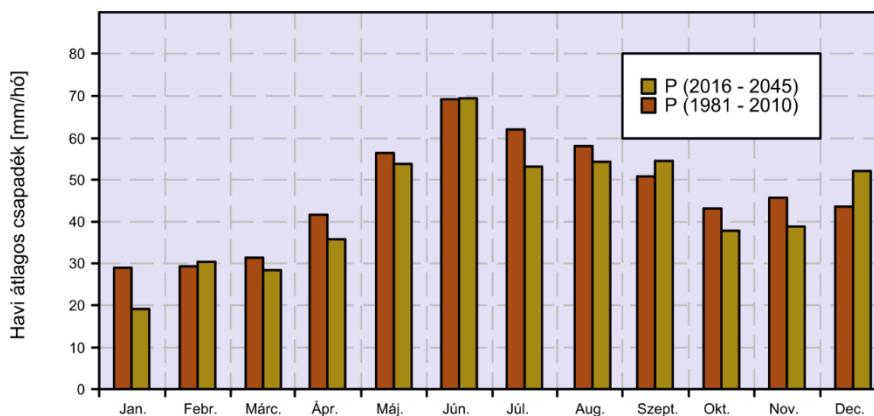
Az éves átlagos csapadék eloszlását a 12. táblázat mutatja. A csapadék esetében 527 mm/év az átlagos évi csapadékösszeg a 2016-2045 közötti időszakban (586 mm/év az országos átlag az 1981-2010). A legkisebb éves átlagos csapadékösszeg 1951-80-as időszakban a Kiskunság Északi részén jellemző 400-450 mm (de az egész Nagyalföld középső részén 500 mm/év alatt marad az éves csapadék), míg a legnagyobb csapadékú a délnyugat-dunántúli régió 604 mm/év körüli értékkel (1981-2010 614 mm/év).

12. táblázat: Az éves átlagos csapadékösszegek [mm/év] térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (2016-2045).

Régió	Min.[mm/év]	Max.[mm/év]	Átlag [mm/év]	Szórás
BK	442	629	482	44,04
D	456	691	554	54,27
DA	443	545	489	25,13
EA	452	585	505	33,24
EM	461	646	543	41,72
KD	458	621	521	38,89
NYD	497	731	604	55,85

A Boromissza-féle méretezési praktikum (Boromissza, 1997) térképével összehasonlítva megállapítható, hogy a 600 mm/éves izohiéta közel azonos helyen áll, mint az 1981-2010-es időszakban. Az 1981-2010 közötti időszakkal összehasonlítva az Alföld középső része és a Keleti országrész szárazodó tendenciát mutat.

A csapadék havi eloszlását szemlélteti a 3. ábra, amely szerint az 1981-2010-es periódushoz képest az 2016-2045-ös időszakban a téli csapadékösszeg közel változatlan volta mellett (kisebb növekedés decemberben) a nyári csapadékösszeg jelentősebb csökkenése várható. A pályaszerkezetek szempontjából a fagy és olvadási károk téli időszakában a csapadékösszeg hasonló marad. Az elemzéshez azonban érdemes hozzáfűzni, hogy a klímamodellek csapadékeloszlása jelentősen eltérhet a valós csapadékeloszlástól, így ezeket az eredményeket fenntartással érdemes kezelni.



3. ábra: A havi átlagos csapadékösszegek [mm/hó] szezonális eloszlása a 2016-2045, valamint az 1981-2010-es időszakban.

A jelenhez hasonlóan a lehetséges jövőre vonatkozóan elemezzük a nyugalmi időszak (november-április) csapadékösszegeit, hiszen ezek a csapadékok akkumulálódva növelhetik majd a kritikus tavaszi időszakban a földmű nedvességtartalmát.

A téli félév csapadékösszege átlagosan 131 mm (1981-2010 146 mm) és 254 mm (1981-2010 231 mm) között van, 171 mm-es (1981-2010 178 mm) átlagos értékkel az országban. Az átlagos tendencia tehát alig 7 mm átlagos csökkenés a térbeli szélsőségek növekedése mellett (13. táblázat). Az előbbieket szerint a téli félév csapadékösszege mintegy 15 mm-es csökkenéssel jellemezhető majd. A tavasz

csapadékcsökkenése ennél jelentősebb lesz, a melegedés pedig valószínűleg többletpárolgással jár majd. Ezek a hatások valószínűleg csökkentik majd a tavaszi talajnedvességeket.

Itt is megjegyezzük, hogy a téli párolgást és a lefolyást figyelembe a 100 mm fölötti téli csapadékösszegek lehetnek kedvezőtlenek az alapvetően kötött talajú területeken.

13. táblázat: Az átlagos téli csapadékösszegek [mm] térbeli statisztikái a magyarországi régiókban (2016-2045).

Régió	Pixel	Min. [mm]	Max. [mm]	Átlag [mm]	Szórás [mm]
BK	7079	137.852	207.871	155.64	17,91
D	14429	148.293	246.401	186.48	22,80
DA	18545	138.541	191.915	162.07	11,08
EA	18041	132.370	214.544	162.56	18,52
EM	13438	130.870	205.357	155.98	16,60
KD	11454	148.216	208.271	177.65	14,93
NYD	11177	172.161	254.821	204.78	19,06

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben, a klimatikus jellemzők hatásai az útpályaszerkezetre a három vizsgálati periódusban (1951-1980; 1981-2010; 2016-2045) a következőképpen foglalhatók össze:

A jövőre (2016-2045) vonatkoztatott éves átlaghőmérséklet 12,0 °C, ami 0,9 Celsius fokkal magasabb, mint a jelenre (1981-2010: 11,1 °C), és 1,7 fokkal magasabb, mint a múltban (1951-1980: 10,3 °C) kapott értékek.

Ha az orográfia hatását nem számítjuk, akkor az ÉK-i területek, valamint az Alpokalja a leghűvösebbek 11,0-11,5 Celsius fokos átlaghőmérséklettel (1981-2010: 9,0-9,5 °C; 1951-1980: 8,5-9,0 °C). A legmelegebb terület a Dél-Alföld, ill. a Duna-Tisza köze nyugati része, valamint a Dél-Dunántúl déli és keleti része, ahol 12,5-13 °C átlaghőmérsékletekkel számolhatunk (1981-2010: 12 °C; 1951-1980: 11 Celsius fokot kissé meghaladó). A jövőben a leghidegebb ÉK-i rész és a legmelegebb D-i rész között 3,5 °C átlaghőmérséklet különbségek valószínűsíthetők (1981-2010: 3-3,5 °C; 1951-1980: 2-2,5 °C). Ez a területi különbség a jelenhez közel hasonló mértékben teheti indokolttá régiók alkalmazását a pályaszerkezet méretezés hőmérsékleti korrekciójának szempontjából.

Az 1981-2010 és a 2016-2045 periódus között a napi átlaghőmérsékletek minimumai emelkednek, míg a maximális napi átlaghőmérsékletek jelentősen (több fokkal) magasabbak is lehetnek. Ezek szerint a szélsőségek változásának mértéke a meleg nyári hónapokban jelentősebb lesz, mint az átlagokban jelentkező növekedés. Az 1951-1980 és a 1981-2010 periódusok között a napi átlaghőmérsékletek minimumai 1,5 °C-kkal emelkedtek, míg a maximális napi átlaghőmérsékletek 1,2 °C-kkal magasabbak. A szélsőségek változásának mértéke tehát jelentősebb, mint az átlagokban jelentkező 0,7-0,8 Celsius fokos növekedés.

Az 2016-2045-ös periódusban fagypont alatti átlaghőmérsékletű napok csökkennek, mintegy 6-7 nappal évente az 1981-2010-es, és 7,7-8,7 nappal a 1951-1980-as periódushoz képest. Míg a 30 °C fölötti napok száma nő a jövőben. A pályaszerkezetek vonatkozásában a fagyos napok jelentősége tehát csökken, ami az olvadási károkkal sújtott időszak hosszának növekedését jelentheti, a hőségnapok számának emelkedése pedig a keréknyomképződés fokozódásához vezethet.

A csapadék esetében 527 mm/év az átlagos évi csapadékösszeg a 2016-2045 közötti időszakban (1981-2010: 586 mm/év; 1951-1980: 609 mm/év).

A legkisebb éves átlagos csapadékösszeg 2016-2045-ben a Nagyalföld középső részén várható (<500 mm/év). Az 1951-80-as időszakban Közép-Magyarországon és a Dél-Alföldön 580 mm/év, míg 520 mm/év 1981-2010 között. A legnagyobb csapadékú a délnyugat- dunántúli régió 604 mm/év értékkel (1981-2010: 614 mm/év; 1951-1980: 650 mm/év).

A csapadék havi eloszlása szerint az 1981-2010-es periódushoz képest a 2016-2045-ös időszakban a téli csapadékösszeg közel változatlan volta mellett a nyári csapadékösszeg jelentősebb csökkenése



várható. A csapadék havi eloszlása szerint az 1951-80-as periódushoz képest az 1981-2010-es időszakban nagyobb mértékű nyár eleji és abszolút értékben véve kisebb mértékű téli csapadékcsökkenés volt jellemző. A kora őszi csapadékok megnöttek az ősz közepe és a tavasz eleje közel azonos csapadéku.

A pályaszerkezetek szempontjából a fagy és olvadási károk téli időszakában a csapadékoság hasonló marad mindhárom vizsgálati periódusban. Az elemzéshez hozzáfűzendő, hogy a klímamodellek csapadékeloszlása jelentősen eltérhet a valóstól, így ezeket az eredményeket fenntartással érdemes kezelni. A nyugalmi időszak (november-április) csapadékösszegei akkumulálódva növelik jelentősen a kritikus tavaszi időszakban a földmű nedvességtartalmát.

A téli félév csapadékösszege átlagosan 171 mm (1981-2010 178 mm; 1951-1980: 205 mm) az országban. Az átlagos tendencia tehát alig 7 mm átlagos csökkenés a jövőben, a jelenhez, de 34 mm-es csökkenést a múlthoz képest, a térségi szélsőségek növekedése mellett. A tavasz csapadékcsökkenése várhatóan jelentős lesz, a melegedés pedig többletpárolgással jár majd. Ezek a hatások valószínűleg csökkentik majd a tavaszi talajnedvességeket.

A téli párolgást és a lefolyást figyelembe véve a 100 mm fölötti téli csapadékösszegek lehetnek kedvezőtlenek az alapvetően kötött talajú területeken.

## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS:

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

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

Bartholy, J., Bozó L. & Haszpra L. (szerk.) 2011: Klímaváltozás – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére. Magyar Tudományos Akadémia és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke, Budapest, p. 281.

Boromissza, T. 1997: Méretezési Praktikum, Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek méretezési gyakorlata, Közúti közlekedési füzetek 16, Közlekedési, Hírközlési és Vízügyi Minisztérium, Budapest, p. 82.

Boromissza, T., Detre, Gy., Lazányi, I. & Szalai, S. 2007: Az útépitési fagyhatárzónák pontosítása. Közúti és mélyépítési szemle, 6. szám: 16-21.

Christensen, J. H. & Christensen, O.B. 2007: A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century, Climatic Change 81:7–30, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9210-7>

Fi, I., Boncs, P., Pethő, L. & Tóth, Cs. 2012: Útburkolatok méretezése. Terc Kft. ISBN 978 963 9968 349, p. 457.

Gálos, B., Lorenz, Ph. & Jacob, D. 2007: Will dry events occur more often in Hungary in the future? Environ. Res. Lett., 2, 034006 (9pp), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/3/034006>

Gálos, B., Antal V., Czimer, K. & Mátyás, Cs. 2014: Forest ecosystems, sewage works and droughts – possibilities for climate change adaptation. In: Santamarta J.C., Hernandez-Gutiérrez L.E., Arraiza M.P. (eds) 2014. Natural Hazards and Climate Change/Riesgos Naturales y Cambio Climático. Madrid: Colegio de Ingenieros de Montes. ISBN 978-84-617-1060-7, D.L. TF 565-2014, 91-104, <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3947.6963>

Gálos, B. & Vig, P. 2014: Éghajlati tendenciák a Kárpát medencében és Zala megyében. In: Bidló A., Király A., Mátyás Cs. (szerk.) Agrárklíma: Az előrevetített klímaváltozás hatáselemzése és az alkalmazkodás lehetősége, Nyugat-Magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, 2014. 7-16. (ISBN:978-963-334-204-6)

Gáspár, L. 2007: A klímaváltozás és az útburkolatok. Közúti és mélyépítési szemle. 2007 március, 3. szám: 1-6.

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

IPCC 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Jacob, D., Barring, L., Christensen, Ob., Christensen, JH., Castro, M., DeUe, M., Giorgi, F., Hagemann, S., Hirschi, M., Jones, R., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Sanchez, E., Schar, C., Seneviratne, SI., Somot, S., Van Ulden, A. & Van Den Hurk, B. 2007: An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. *ClimChange*, 81:31-52, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9213-4>

Jacob, D., Kotova, L., Lorenz, P., Moseley, C. & Pfeifer, S. 2008: Regional climate modeling activities in relation to the CLAVIER project. *Időjárás* 112: 141–153.

Jacob, D., et 38 coauthors EURO-CORDEX 2014: newhigh-resolution climate change projections for European impact research, *RegEnvironChange*, <http://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

Kovács, Á. 2011: Tó- és területi párolgás becslésének pontosítása és magyarországi alkalmazásai. PhD értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem.

Lakatos, M., Szépszó, G., Bihari, Z., Krüzselyi, I., Szabó, P., Bartholy, J., Pongrácz, R., Pieczka, I. & Torma, CS. (szerk.) 2012: HREX jelentés: Éghajlati szélsőségek változásai Magyarországon: Közel múlt és jövő. [http://www.met.hu/doc/IPCC\\_jelentes/HREX\\_jelentes-2012.pdf](http://www.met.hu/doc/IPCC_jelentes/HREX_jelentes-2012.pdf) [Climate extreme changes in Hungary: recent past and future] (in Hungarian)

van der Linden, P. & Mitchell, J.F.B. (eds.) 2009: ENSEMBLES: ClimateChange and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. 160pp, Met Office Hadley Centre, FitzRoyRoad, Exeter EX1 3PB, UK

Nováky, B. & Bálint, G. 2013: Shifts and Modification of the Hydrological Regime Under Climate Change in Hungary; <http://doi.org/10.5772/54768>

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.

Pongrácz, R., Bartholy, J. & Miklós, E. 2011: Analysis of projected climate change for Hungary using ENSEMBLES simulations. *Applied Ecology and Environmental Research*, 9(4), 387-398, [https://doi.org/10.15666/aecr/0904\\_387398](https://doi.org/10.15666/aecr/0904_387398)

Szalai, S. & Mika, J. 2007: A klímaváltozás és időjárási anomáliák előrejelzése az erdőtakaró szempontjából fontos tényezőkre. In Mátyás Cs., Vig P. (szerk). *Erdő és klíma V*. Sopron.

Szépszó, G. 2008: Regional change of climate extremes in Hungary based on different regional climate models of the PRUDENCE project, *Időjárás* 112 265–83.

Ureczky, J., & Tóth, Cs. 2008: A hőmérséklet teherbírásra gyakorolt hatásának vizsgálata. *Közúti és mélyépítési szemle.*, 2008 április, 3. szám. 9-14.

Vautard, R., Gobiet, A., Jacob, D. et 25 coauthors 2013: 41: 2555. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1714-z>

Vautard, R., Gobiet, A., Sobolowski, S., Kjellström, E., Stegehuis, A., Watkiss, P., Menglik, T., Landgren, O., Nikulin, G., Teichmann, C. & Jacob, D. 2014: The European climate under a 2 °C global warming, *Environ. Res. Lett.* 9 034006 (11pp), <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034006>





# Elméleti utcahálózatok forgalomlebonyolító képességének vizsgálata makroszkopikus modellezési eljárással II. - Eredmények

Háznagy Andor Gellért<sup>1</sup>, Fi István<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Közlekedési Központ

<sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék

E-mail: [andor.haznagy@bkk.hu](mailto:andor.haznagy@bkk.hu), [fi.istvan@epito.bme.hu](mailto:fi.istvan@epito.bme.hu)

DOI: [10.36246/UL.2020.1.02](https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.02)

## KIVONAT

Településrészek utcahálózatának felépítése és a rajta hálózati szinten megjelenő forgalom lefolyása közötti kapcsolat elemzésével megállapítható, hogy az összetett utcahálózatok felépítése milyen hatással van a rajta megjelenő forgalom minőségére és lefolyására. A több részes cikksorozatban bemutatásra került kutatás négyzetrács alapú elméleti utcahálózatok forgalmi vizsgálatával arra kereste a választ, hogy az utcahálózatokat felépítő építőelemek, a közúti csomópontok és utcaszakaszok eltérő elhelyezkedése és kialakítása, mint paraméter, milyen hatással van a közúti hálózaton megjelenő forgalom lebonyolódására. A kutatás során az utcahálózatok felépítését tekintve 8 eltérő utcahálózati paraméterrel 23 utcahálózati modell került megvizsgálásra. A vizsgálatokat változó nagyságú forgalmi ráterheléssel, makroszkopikus környezetben, 8 forgalomminőséget jellemző paraméter alapján végeztem el. Az eredmények alapján, amelyet a cikksorozat második része tartalmaz, megállapítható, hogy a belső utcahálózatok kialakítása és kapacitása kisebb mértékben, míg a külső közúti infrastruktúrához kapcsolódó utcaszakaszok és csomópontok száma, elhelyezkedése és forgalmi kapacitása erősebben befolyásolja a forgalom lefolyását a 8 vizsgált forgalomminőséget jellemző paraméter alapján.

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

## ABSTRACT

One of the most important challenges in urban design is planning an appropriate street network, satisfying the demand of users with different transport modes. Understanding the nature of road networks has been thoroughly studied problem for many years and extensive professional literature is now available in this respect. Junctions and streets are the main parts of street network. Their effects to everyday traffic could be analysed with grid street network in the neighbourhood aspect. For this reason, I analysed in more articles, 8 different street network elements were analysed with 23 theoretical grid street network model, and macroscopic traffic modelling approach was used in this work. The outcomes were analysed with 8 different traffic quality characteristic measures. The second article of series contains the results of the research project. The outcomes showed, the connection types of street networks to outer road network were much more important than inner layout of street networks in the aspect of traffic flow. Furthermore, some similarities were found in terms of street network elements behaviour in this paper.

*Keywords:* urban street network layout, Grid street plan, Network analysis, Traffic modelling, Traffic quality

**Háznagy Andor Gellért**

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

**Dr. habil Fi István**

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

**1. BEVEZETÉS**

A cikksorozat első részében bemutattam a kutatás során alkalmazott vizsgálati módszertant. Külön kitértem a területi és forgalmi modell felépítésére. Részletesen ismertettem a vizsgálat során elemzett 23 elméleti, négyzetrács alapú utcahálózati modellt, a 8 vizsgálati paramétert és az eredmények kiértékelését szolgáló 8 forgalomminőséget jellemző változót (Háznagy & Fi 2019).

A cikksorozat második része a kutatás eredményeit és azok kiértékelési módszertantát tartalmazza a vizsgálatból származó következtetések levonásával.

**2. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK****2.1. KUTATÁS SORÁN ELEMZETT FORGALOMMINŐSÉGET JELLEMZŐ MENNYISÉGEK**

A kutatás során az egyes vizsgálati paraméterek és a hálózatot felépítő építőelemek forgalomra gyakorolt hatásának kimutatása érdekében, összesen 8 forgalom minőséget jellemző mennyiség került elemzésre. E jellemzők KPI-ok (Key Performance Indicator – fő teljesítménymutató), olyan indikátorok, amelyek alapján egy adott területre vonatkozó beavatkozások hatása meghatározható (Parmenter, 2015) (PIARC, 2019). Mindegyik vizsgálatához egyedi célt rendeltem, amelyek az alábbiak.

*(i) Átlagos utazási idő alakulása forgalomnagyság függvényében*

A megvizsgált utcahálózatokon megjelenő közúti forgalom átlagos utazási idő-forgalomnagyság összefüggésének elemzési célja az volt, hogy az utcahálózatokon 1 órás időintervallum alatt megjelenő, változó nagyságú forgalmi terhelés függvényében megállapítható legyen a hálózaton megjelenő forgalom és átlagos utazási idő kapcsolata.

*(ii) Átlagos sebesség alakulása a forgalomnagyság függvényében*

A megvizsgált utcahálózatokon megjelenő közúti forgalom átlagos sebesség-forgalomnagyság összefüggésének elemzési célja az volt, hogy az utcahálózatokon 1 órás időintervallum alatt megjelenő, változó nagyságú forgalmi terhelés függvényében megállapítható legyen a hálózaton megjelenő forgalom és átlagos sebesség kapcsolata.

*(iii) Használt utcahálózat aránya a teljes utcahálózatához viszonyítva a forgalomnagyság függvényében*

A megvizsgált utcahálózatokon megjelenő közúti forgalom által használt utcahálózat aránya és a rendelkezésre álló teljes utcahálózatához viszonyított aránya elemzésének célja az volt, hogy az utcahálózatokon 1 órás időintervallum alatt megjelenő, változó nagyságú forgalmi terhelés függvényében megállapítható legyen a közúti forgalom által használt utcaszakaszok aránya a teljes utcahálózatához viszonyítva.

*(iv, v) Használt utcaszakaszokon kialakuló torlódás hossza, és torlódott és a használt utcaszakaszok aránya a forgalomnagyság függvényében*

A megvizsgált utcahálózatokon megjelenő közúti forgalom által használt utcaszakaszokon kialakuló torlódások hosszának és a használt utcaszakaszok arányának elemzési célja az volt, hogy az utcahálózatokon 1 órás időintervallum alatt megjelenő, változó nagyságú forgalmi terhelés függvényében megállapítható legyen az utcaszakaszokon kialakuló torlódások hossza és a torlódás során érintett utcaszakaszok egymáshoz viszonyított aránya. Az eredmények kiértékelése során az utcahálózatokon kialakuló torlódások hosszát, és a torlódás során érintett utcaszakaszok arányát a használt utcaszakaszhoz viszonyítva került elemzésre.

*(vi) Használt utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága a forgalomnagyság függvényében*

A megvizsgált utcahálózatokon megjelenő közúti forgalom által használt utcaszakaszok kapacitáskihasználtság-forgalomnagyság összefüggésének elemzési célja az volt, hogy az utcahálózatokon 1 órás időintervallum alatt megjelenő, változó nagyságú forgalmi terhelés függvényében megállapítható legyen az utcahálózatokon közlekedő járművek által érintett utcaszakaszok közúti forgalmi kapacitásának kihasználtsága.

*(vii) Fajlagos utazási idő alakulása az átlagos sebesség függvényében*

A megvizsgált utcahálózatokon megjelenő közúti forgalom fajlagos utazási idő-átlagos sebesség összefüggésének elemzési célja az volt, hogy az utcahálózatokon 1 órás időintervallum alatt megjelenő, változó nagyságú forgalmi terhelés függvényében megállapítható legyen, hogy az utcahálózatokon megjelenő közúti forgalom milyen hatással van a fajlagos utazási idő alakulására. A fajlagos utazási idő megadja az egységnyi út megtételéhez szükséges idő mennyiségét (Koller, 1986).

*(viii) Átlagos csomóponti áthaladási idővesztés alakulása kijáratok esetében*

A megvizsgált utcahálózatokon megjelenő közúti forgalom átlagos csomóponti áthaladási idővesztésének alakulása kijáratok esetében az elemzés célja az volt, hogy az utcahálózatokon 1 órás időintervallum alatt megjelenő, változó nagyságú forgalmi terhelés függvényében megállapítható legyen, hogy az utcahálózatokon megjelenő közúti forgalom milyen hatást gyakorol a kijáratok csomóponti áthaladási idővesztésére. A kijáratok csomópontok körforgalomként kerültek definiálásra.

## 2.2. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSÉNEK METÓDUSA

A forgalmi ráterhelések elvégzését követően rendelkezésre állt minden belső és külső forgalmi zóna közötti útvonal, az útvonalakat bejárt járművek száma és az útvonalakhoz tartozó forgalmi jellemzők. A forgalmi jellemzőket (úm. sebesség, utazási idő, kapacitáskihasználtság, torlódás, csomóponti áthaladási idővesztés és a járművek által bejárt utcaszakaszok) a bejárt útvonalakhoz tartozó előfordulásuk gyakorisága alapján súlyozott átlaggal került megállapításra. Az eredmények kiértékelése során a függvényillesztéshez az Origin Pro programot használtam.

Az átlagos utazási idő és a forgalomnagyság, valamint az átlagos sebesség és forgalomnagyság összefüggések lefolyását tekintve a vizsgált utcahálózati modellek két csoportba bonthatók.

Az első csoportba tartoznak azok a vizsgált esetek, amelyeknél a forgalom kritikus értékű ráterhelése mellett, a telítetlen forgalmi állapotból túltelített lesz, a forgalom kismértékű növekedésekor az átlagos sebesség hirtelen csökken, illetve az átlagos utazási idő hirtelen növekszik. Ez megfigyelhető, amikor a kijáratok csomópontokhoz tartozó kijáratok utakon, azaz a kijáratok csomóponti ágakon megjelenő forgalom ezen utak forgalmi kapacitását meghaladja, a hálózatot elhagyó forgalom feltorlódik a kijáratok csomóponti ágak előtt, az utcahálózat belsejében. A kijáratok csomóponti ágak összegzett forgalmi kapacitásának hatását mutatja az is, hogy azon forgalomnagyságok mellett, amelyeknél a teljes közúti hálózat forgalmi áteresztő képessége jelentősen csökken, a kijáratok csomópontok szolgáltatási szintje ágaként 'B vagy 'C' szolgáltatási szint körül adódik. Ekkor nem a kijáratok csomópontok, vagy a vizsgált

területen belüli utcahálózat következtében jelentkezik hirtelen változás a forgalmi teljesítőképességben, hanem a kijárat csomóponti ágak összegzett forgalmi kapacitása függvényében. Ez megfigyelhető a III. és V. csoportba tartozó modellek esetén. A forgalmi határérték ( $F_h$ ) nagysága az utcahálózatok azon elemeinek összesített forgalmi kapacitásának környékén adódik, amelyek összesített kapacitása a forgalom lefolyása során először alacsonyabb, mint a hálózaton megjelenő teljes forgalom nagysága, azaz értékét a kritikus elhelyezkedésű legszűkebb keresztmetszetű hálózati elemek forgalmi kapacitása adja meg.

A második csoportba tartozó többi esetben a határérték nem látható ilyen erőteljesen, az az *átlagos sebesség-forgalomnagyság* és *átlagos utazási idő-forgalomnagyság* esetében az eredményekre illeszthető folytonos függvény inflexiós pontja körül jelentkezik, amely összefügg a vizsgálat során alkalmazott ellenállásfüggvényekkel.  $F_h$  a telítetlen és a túltelített állapot határán található és e forgalomnagyság környezetében kezd a vizsgált utcahálózatokon a torlódás kialakulni, lásd 4. ábra. A kijárat csomópontok szolgáltatási szintjeinek elemzése során minden vizsgált kialakítás esetében a határértékhez tartozó forgalomnagyságnál a kijárat csomópont szolgáltatási szintje (a csomóponti ágak szolgáltatási szintjeinek átlagaként) eléri az 'E' *szolgáltatási szintet*. Ebben az esetben a járművek csomóponti áthaladási idővesztése 35 s és 50 s közötti értéket vesz fel, és ez az I., II., IV., VI. csoport esetében jelentkezik.

Az *átlagos utazási idő-forgalomnagyság* és *átlagos sebesség-forgalomnagyság* összefüggések esetén az eredményekre függvényt illesztettem a forgalmi határértéket megelőző és az azt követő esetekre. A forgalmi határérték mellett a függvényillesztésre hatással volt az utcaszakaszok telített és túltelített eseteinek kapcsolata (Akcelik, 2003) és a HCM metódusban megjelenő E szolgáltatási szint fontossága (Transportation Research Board National Research Council, 2010).

A függvényillesztés során az eredményeket minden esetben két részre osztottam. Első csoportba a minimális vizsgált forgalomnagyság ( $F_{min}$ ) és a forgalmi határérték forgalomnagysága ( $F_h$ ) közötti forgalomnagyságok ( $F$ ) tartoznak, második csoportba a forgalmi határérték forgalomnagysága ( $F_h$ ) és a maximális vizsgált forgalomnagyság ( $F_{max}$ ) közötti értékek kerültek. Mindkét esetben az eredményekre exponenciális függvényt illesztettem, amelyek 0,95-nél magasabb regressziós értékkel rendelkeznek. Az alkalmazott exponenciális függvény a következő volt.

$$y = y_0 + Ae^{(R_0x)} \tag{1}$$

A függvényillesztéseket a 1. ábra és 2. ábra tartalmazza. Az ábrákon az első csoportba tartozó illesztéseket szaggatott vonal, míg a második csoportba tartozó illesztéseket pontozott vonal jelöli. A grafikonokon az első csoportba tartozó forgalmi ráterheléseket kitöltött pontok ( $F_{min} < F \leq F_h$ ), míg a második csoportba tartozó forgalmi ráterheléseket kitöltetlen pontok ( $F_h \leq F < F_{max}$ ) jelölik. A mért átlagos utazási idő-forgalomnagyság és sebesség-forgalomnagyság összefüggésekre illesztett függvények a teljes vizsgálati tartományt tekintve nem folytonosak, az alkalmazott metódus azonban alkalmas a vizsgálat lefolytatásához. A forgalmi jellemzők közötti kapcsolatot a közúthálózat kialakítása jelentősen befolyásolja a vizsgált esetekben. Emiatt nem a vizsgált hálózatok forgalomlefordulási görbéjének egységes leírása, hanem az összehasonlító elemzése volt a kutatás célja.

Vizsgált tényezők közül a fajlagos utazási idő-átlagos sebesség kapcsolat esetében is az alábbi alakú exponenciális függvényt illesztettem az eredményekre.

$$y = y_0 + A_1e^{-x/t_1} + A_2e^{-x/t_2} + A_3e^{-x/t_3} \tag{2}$$

Az eredményeket a 6. ábra tartalmazza és minden esetben közel azonos lefutást követnek az eredményekre. Megfigyelhető, hogy a vizsgálatra kiválasztott utcahálózatok típusától és azok alkotóelemeinek a forgalomra gyakorolt hatásától az eredmények csak kis mértékben függenek. Az eredményekre illesztett harmadrangú exponenciális függvény 0,95-nél magasabb korrelációval rendelkezik.

Az *átlagos csomóponti idővesztés* vizsgálata során különösen kijáratok csomópontokon jelentkező áthaladási idővesztések esetében megfigyelhető volt az áthaladási idővesztés exponenciális felfutása, amelyet a 7. ábra tartalmaz.

### 2.3. FORGALMI VIZSGÁLAT EREDMÉNYEI

A kutatás során kapott eredmények feldolgozása az alábbi 8 utcahálózati paraméter alapján történt, amelyeket 6 csoportba soroltam a vizsgálat kiértékelése során és a 1. táblázat tartalmaz

1. táblázat: Vizsgálatra kiválasztott utcahálózati modellek csoportosítása

Paraméter vizsgálat (vizsgálat célja)	Felhasznált modellek	Vizsgálatra kiválasztott modellek jellemzése (vizsgálat paraméterek)	
		Azonos paraméter	Eltérő paraméter
A	B	C	D
I. Ugyanolyan alakú, de eltérő méretű területek vizsgálata	- s8_1000_8x8 - s8_391_5x5 - s8_563_6x6 - s8_766_7x7	- Kijáratok csomópontok elhelyezkedése - Kijáratok csomópontok száma - Kijáratok csomópontok kijáratok csomóponti ágszáma - Terület alakja - Belső utcahálózati raszter - Gyűjtőút elhelyezkedése - Egyirányúsítás	- Terület mérete
II. Eltérő alakú területek vizsgálata	- s8_1000_8x8 - s8_625_8x5 - s8_750_8x6 - s8_875_8x7	- Kijáratok csomópontok elhelyezkedése - Kijáratok csomópontok száma - Kijáratok csomópontok kijáratok csomóponti ágszáma - Belső utcahálózati raszter - Gyűjtőút elhelyezkedése - Egyirányúsítás	- Terület mérete - Terület alakja
III. Kijáratok csomópontok számának és elhelyezkedésének vizsgálata	- s8_1000_8x8 - e3_1000_8x8 - e4_1000_8x8 - s3_1000_8x8 - s4_1000_8x8 - s6_1000_8x8	- Terület mérete - Terület alakja - Belső utcahálózati raszter - Gyűjtőút elhelyezkedése - Egyirányúsítás	- Kijáratok csomópontok elhelyezkedése - Kijáratok csomópontok száma - Kijáratok csomópontok kijáratok csomóponti ágszáma
IV. Belső utcahálózat sűrűségének vizsgálata	- s8_1000_8x8 - s8_1000_8x5 - s8_1000_8x6 - s8_1000_8x7	- Kijáratok csomópontok elhelyezkedése - Kijáratok csomópontok száma - Kijáratok csomópontok kijáratok csomóponti ágszáma - Terület mérete - Terület alakja	- Belső utcahálózati raszter

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gyűjtőút elhelyezkedése</li> <li>- Egyirányúsítás</li> </ul>	
V. Gyűjtőutak elhelyezkedésének vizsgálata	<ul style="list-style-type: none"> <li>- s8_1000_8x8</li> <li>- e4_1000_8x8</li> <li>- e4k_v0_1000_8x8</li> <li>- e4k_v1_1000_8x8</li> <li>- e4k_v2_1000_8x8</li> <li>- e4k_v3_1000_8x8</li> <li>- e4k_v4_1000_8x8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Terület mérete</li> <li>- Terület alakja</li> <li>- Belső utcahálózati raszter</li> <li>- Egyirányúsítás</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kijárat csomópontok elhelyezkedése</li> <li>- Kijárat csomópontok száma</li> <li>- Kijárat csomópontok kijárat csomóponti ág száma</li> <li>- Gyűjtőút elhelyezkedése</li> </ul>
VI. Utcahálózat egyirányúsításának vizsgálata	<ul style="list-style-type: none"> <li>- s8_1000_8x8</li> <li>- s8_egy_1000_nr_8x8</li> <li>- s8_egy_1000_mr_8x8</li> <li>- s8_egy_1000_kr_8x8</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kijárat csomópontok elhelyezkedése</li> <li>- Kijárat csomópontok száma</li> <li>- Kijárat csomópontok kijárat csomóponti ág száma</li> <li>- Terület mérete</li> <li>- Terület alakja</li> <li>- Belső utcahálózati raszter</li> <li>- Gyűjtőút elhelyezkedése</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Egyirányúsítás</li> </ul>

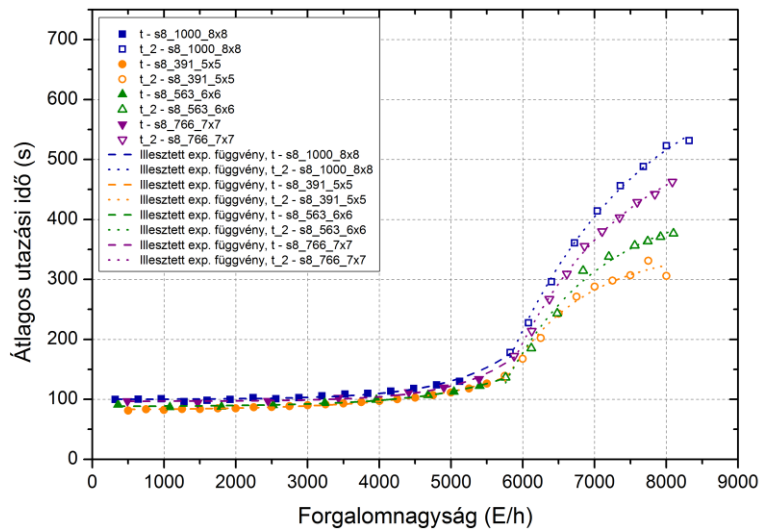
Az 1. táblázat sorai tartalmazzák a vizsgálati csoportosításokat. A táblázat C és D oszlopában a vizsgálatra kiválasztott modelleket jellemeztem, dőlt betűvel emeltem ki a D oszlopban a kiválasztott modellek eltérő tulajdonságait. Az eredmények könnyebb összehasonlítása érdekében az alapmodellnek tekintetem az s8\_8x8\_1000 elnevezésű modellt, amely mindegyik vizsgálati csoportnak a része. A forgalmat leíró jellemzők kiértékelése során az utcahálózati modellekhez tartozó eredményeket először grafikusán tartalmazza a cikk, majd ezt követi az eredmények szöveges kiértékelése. A kiértékelés során először az általános megállapításokat tartalmazza a cikk, jelölve a kapcsolódó csoportokat (pl.: I., II., VI. csoport), majd a csoportonként elemzés jelenik meg a cikkben azokban az esetekben, ahol egyedi tulajdonságok figyelhetők meg.

Néhány szóban szükséges megemlíteni a forgalmat leíró vizsgált jellemzők közötti összefüggések fontosságáról. Ilyen fontos szempontnak tekinthető a használt útvonalak aránya a rendelkezésre álló teljes hálózathoz képest, illetve azok kapacitáskihasználtsága a csomóponti áthaladási idővesztés mellett. Ezáltal változó nagyságú forgalmi terhelés hatására kialakuló forgalmi jellemzők, úm. sebesség és utazási idő, mögött jelentkező összefüggések egyértelműsíthetők. Az eredmények kiértékelése során a vizsgált forgalomminőséget jellemző mennyiségek közötti kapcsolat megjelenik.

Az utcahálózaton megjelenő forgalmat ebben a kutatási lépésben makroszkopikus szintű forgalmi modellezési eljárással került elemzésre, azaz a forgalmi vizsgálat nem a hálózaton megjelenő járművenként került lemodellezésre, mint mikroszkopikus forgalmi ráterhelések (VISSIM szoftver) esetében, hanem matematikai egyenletek alapján. Ennek következtében csak olyan éleken jelent meg forgalom, amelyek hasznossága megfelelő, avagy nincsenek „kóborló” és útvonalkereső járművek a ráterhelési eredményekben.

A vizsgálatból származó eredmények grafikusán csak az I. vizsgálati csoport esetében kerültek ábrázolásra. Az eredményekből levont következtetéseket táblázatban foglaltam össze.

### 2.3.1. ÁTLAGOS UTAZÁSI IDŐ ALAKULÁSA FORGALOMNAGYSÁG FÜGGVÉNYÉBEN



1. ábra: Átlagos utazási idő - forgalomnagyság összefüggési az I. csoport esetében.

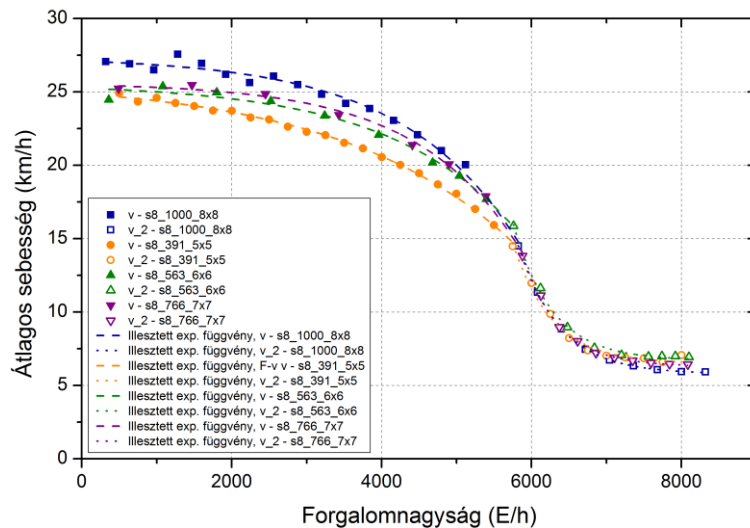
A vizsgálat során elemzett átlagos utazási idő és forgalomnagyság közötti összefüggések eredményeit grafikusán az 1. ábra jeleníti meg, míg szövegesen a 2. táblázat tartalmazza összefoglalóan.

2. táblázat: Átlagos utazási idő - forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése

Csoportosítás	Átlagos utazási idő – forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése
általános észrevétel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalmi terhelés esetén az eredmények értéke közel azonos (I., II., III., IV., VI. csoport).</li> <li>- <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalmi terhelés esetén, minél nagyobb méretű a hálózat, annál nagyobb az utazási idő, azonos forgalomnagyság mellett (I., II., IV. csoport). A hosszabb bejárando útvonal következtében, illetve egyre több belső csomópontot érint a forgalom, amellyel a csomóponti áthaladási idővesztés növekszik.</li> <li>- <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalmi terhelés esetén az eredmények eltérnek egymástól (I., II., III., IV., V., VI. csoport). A torlódás mértéke növekszik, illetve használat útszakaszok aránya növekszik.</li> <li>- <math>F_h</math> környezetében az átlagos utazási idő hirtelen megnő (III., V. csoport).</li> </ul>
I. csoport	-
II. csoport	-
III. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kijáratok csomópontok száma, valamint azok összesített kapacitása minél alacsonyabb, <math>F_h</math> értéke annál kisebb forgalom esetén jelentkeznek. Azonos forgalomnagyság mellett magasabb átlagos utazási idő figyelhető meg. Ezáltal a vizsgált terület elhagyására ezért kisebb forgalmi kapacitás áll rendelkezésre az úthálózaton, és kijáratok csomópontok elhelyezkedése (él, sarok) minimálisan befolyásolja az eredményeket.</li> <li>- Kijáratok csomóponti ágak száma, valamint azok összesített kapacitása minél alacsonyabb, <math>F_h</math> értéke annál kisebb forgalom esetén jelenik meg. Azonos forgalomnagyság mellett magasabb átlagos utazási idő jelentkezik. Ezáltal a vizsgált területek elhagyására kisebb forgalmi kapacitás áll rendelkezésre az úthálózaton.</li> </ul>
IV. csoport	- Minél sűrűbb egy terület belső utcahálózata, annál nagyobb az utazási idő, azonos forgalomnagyság mellett. Egyre több belső csomópontot érint a forgalom, a csomópontokban jelentkező áthaladási idővesztés növekszik, amely érték nagyobb, mint az utcaszakaszon jelentkező idővesztés.
V. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A vizsgálat eredményei közel megegyeznek egymással, ha a vizsgált területet feltáró gyűjtőutak a terület határán található (határoló gyűjtőút az utcahálózati modell 4 oldalán), vagy ha a terület belsejében vezetett az utcahálózati modellek függőleges és vízszintes szimmetriatengelyén helyezkednek el (belső gyűjtőút), a kijáratok csomópontok azonos helyzete esetén.</li> <li>- Az utcahálózatok belsejében áthaladó gyűjtőutak egymással alkotott csomópontjainak távolságának növelése a terület súlypontjától növeli az utazási időt. Többet kell a járműveknek csökkentett sebességű területeken haladnia. A hálózat forgalmi teljesítménye</li> </ul>

	legkisebb, amikor a terület belsejében haladó gyűjtőutak elérik a terület határát (terület 2 oldalán gyűjtőtűt).
VI. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál alacsonyabb forgalmi terheléskor a vizsgált utcahálózati modellek közötti eltérés minimális.</li> <li>- <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalom terheléskor az utazási idő növekedését tekintve növekvő sorrendben egymást követi a négyzetes-, Malcher- és körös-rendszerű egyirányú forgalmi renddel rendelkező vizsgált modellek.</li> </ul>

2.3.2. ÁTLAGOS SEBESSÉG ALAKULÁSA A FORGALOMNAGYSÁG FÜGGVÉNYÉBEN



2. ábra: Átlagos sebesség - forgalomnagyság összefüggési az I. csoport esetében.

A vizsgálat során elemzett átlagos sebesség és forgalomnagyság közötti összefüggések eredményeit grafikusán a 2. ábra jeleníti meg, míg szövegesen a 3. táblázat tartalmazza összefoglalóan.

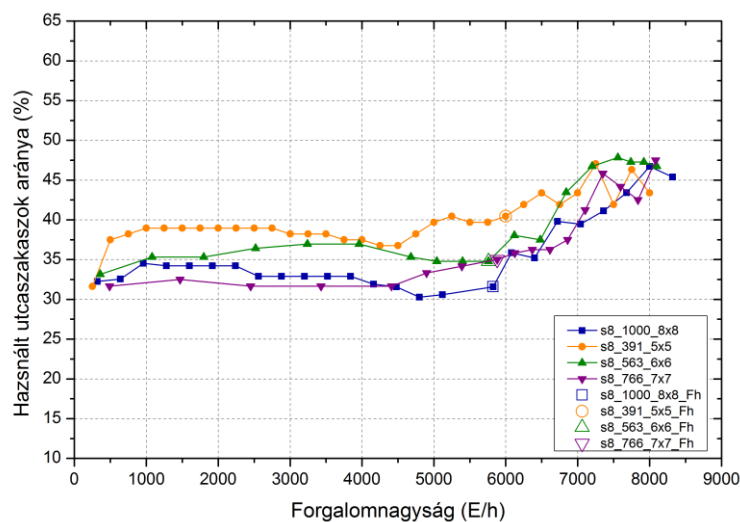
3. táblázat: Átlagos sebesség - forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése

Csoportosítás	Átlagos sebesség – forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése
általános észrevétel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalom esetén, minél hosszabb a terület utcahálózata, illetve nagyobb az modell területe, annál nagyobb az átlagos sebesség értéke Azonos forgalomnagyság mellett (I., II., IV. csoport) arányaiban több jármű használja a gyűjtőutakat.</li> <li>- <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalom esetén eltűnik az eredmények közötti kezdeti különbség (I., II., IV., VI. csoport). A kisebb utcahálózatok esetén nagyobb az utazási sebesség, kisebb torlódás alakul ki a hálózaton. Kevesebb csomópontot érint a hálózaton megjelenő forgalom, illetve alacsonyabb a csomóponti áthaladási idővesztés.</li> <li>- <math>F_h</math> környezetében az átlagos sebesség kis forgalmi terhelés hatására hirtelen csökken (III., V. csoport)</li> </ul>
I. csoport	-
II. csoport	-
III. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kijárat csomópontok helyzete alapján <math>F_h</math>-nál kisebb forgalomnagyság mellett sarkokban elhelyezkedő csomópontot esetén nagyobb átlagos sebesség alakul ki a hálózaton, mint élek mentén elhelyezkedő csomópontok esetében. Amennyiben az utcahálózat minél több kijárat csomóponttal rendelkezik, úgy <math>F_h</math> értéke annál nagyobb forgalom mellett jelentkezik. Amennyiben a kijárat csomóponti ágak száma, valamint azok összegzett forgalmi kapacitása állandó.</li> <li>- Kijárat csomóponti ágak száma, valamint azok összesített kapacitása befolyásolja a forgalmi jellemzőket. Amennyiben a kijárat csomóponti ágak száma, valamint azok összegzett forgalmi kapacitása minél nagyobb, annál nagyobb átlagos sebesség alakul ki az utcahálózaton, a kijárat csomópontok azonos helyzete mellett.</li> </ul>
IV. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalom esetén a legtrikább utcahálózaton jelentkezik a legnagyobb átlagos sebesség. Az eredmények közötti különbség összefügg a 'használt utcaszakaszok aránya' és a 'használt utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága' közötti különbséggel.</li> </ul>



V. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalmi terhelés esetén az utcahálózatok belsejében áthaladó gyűjtőutak egymással alkotott csomópontjainak távolságának növelése a terület súlypontjától csökkenti az átlagos sebesség értékét.</li> <li>- <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalmi ráterhelés esetében az azonos kijáratú csomópontszámmal és kijáratú csomóponti ágszámmal rendelkező utcahálózatoknál a vizsgált modellekhez tartozó forgalomminőségi jellemző közel azonos értékkel rendelkezik</li> <li>- A csoporton belüli többi vizsgálati esettel azonos számú kijáratú csomóponti ágszámmal, de kevesebb kijáratú csomóponttal rendelkező e4_v4k_1000_8x8 utcahálózati modell eredményei alacsonyabb értéket vesznek fel a többi esetenél.</li> </ul>
VI. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalomnagyságnál az egyirányú utcákból álló hálózatok alacsonyabb az átlagos sebesség értékkel rendelkeznek, mint a mindkét irányból járható utcákból felépült hálózatok. Az egyirányú kialakítások esetében a hálózatokon kifejtett sebesség csökkenő sorrendben "négyzetes-, Malcher-, körös-rendszer". <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalmi ráterheléskor a vizsgált utcahálózatokhoz tartozó eredmények közel azonosak.</li> </ul>

### 2.3.3. HASZNÁLT UTCAHÁLÓZAT ARÁNYA A TELJES UTCAHÁLÓZATHOZ VISZONYÍTVA A FORGALOMNAGYSÁG FÜGGVÉNYÉBEN



3. ábra: Használt utcaszakaszok aránya a teljes utcahálózathoz viszonyítva a forgalomnagyság függvényében az I. csoport esetében.

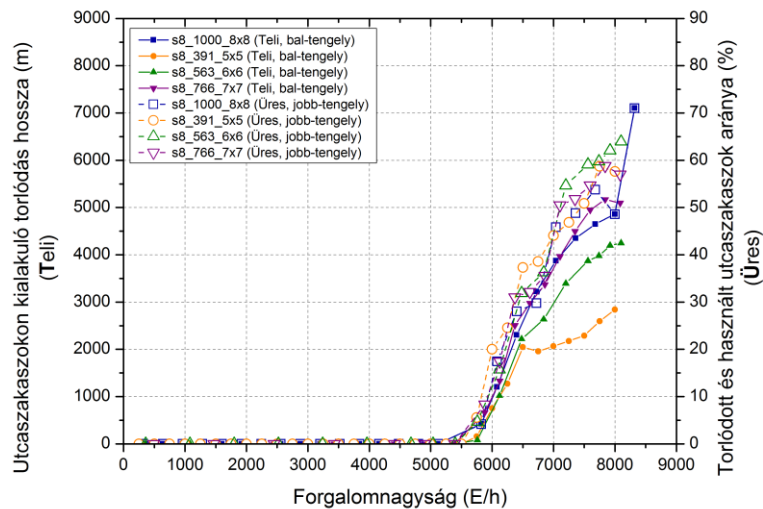
A vizsgálat során elemzett használt utcaszakaszok aránya a teljes utcahálózathoz viszonyítva a forgalomnagyság függvényében vizsgálat eredményeit grafikusán a 3. ábra jeleníti meg, míg szövegesen a 4. táblázat tartalmazza összefoglalóan.

4. táblázat: Használt utcahálózat aránya a teljes utcahálózathoz viszonyítva - forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése

Csoportosítás	Használt utcahálózat aránya a teljes utcahálózathoz viszonyítva – forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése
általános észrevétel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalmi terhelés esetén a használt utcaszakaszok aránya közel állandó (I., II., III., IV., V., VI. csoport). Ezekben az esetekben a járművek által használt utcaszakaszokon nem alakul ki torlódás, az utazási idő és sebesség közel állandó. A hálózaton közlekedő járművek nem keresnek új útvonalat.</li> <li>- <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalmi terhelés esetén a használt utcaszakaszok aránya a növekvő forgalmi terhelés hatására folyamatosan nő (I., II., III., IV., V., VI. csoport). Minél nagyobb az utazási idő növekedése a használt utcaszakaszokon, annál nagyobb lesz a használt utcaszakaszok aránya. A kedvezőbb utazási idő érdekében a forgalom szétterül a hálózaton. A kialakuló torlódások hatására megnövekedett utazási idő új útvonalak használatára terelik a közlekedőket. A torlódás növekedése azt jelenti a használt utcaszakaszok állandósult értéke mellett, hogy a járművek újabb utcaszakaszokat nem érintenek. A hálózatokon a forgalom szétterülése egy maximális értéket vesz fel, amely az utazási idő szempontjából optimálisnak tekinthető.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A használt utcaszakaszok aránya a változó nagyságú forgalmi terhelések mellett maximálisan 50% körüli használati arányt mutatnak (I., II., III., IV., V., VI. csoport). Az utcahálózati modellek tartalmazzák olyan éleket, amelyekben nem jelenik meg forgalom a makroszkopikus szemléletű forgalmi vizsgálat miatt.</li> <li>- Az utcahálózatok méretének hatása az eredményekben nem jelenik meg egyértelműen (I., II., IV. csoport).</li> </ul>
I. csoport	-
II. csoport	-
III. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalomnagyságok esetén azonos forgalomnagyság mellett a sarkokban elhelyezkedő kijárat csomópontok esetén magasabb a használt útszakaszok aránya, mint élek menti elhelyezkedő csomópontoknál. Minél több kijárat csomóponttal rendelkezik a hálózat, valamint azok összegzett kapacitása minél nagyobb, annál magasabb a használt utcaszakaszok aránya azonos forgalomnagyság mellett. Minél több kijárat csomóponttal rendelkezik a hálózat, valamint azok összegzett kapacitása minél nagyobb, annál magasabb a használt utcaszakaszok aránya azonos forgalmi terhelés mellett.</li> <li>- A felsorolt megfigyeléseket indokolják, hogy a kijárat csomópontok száma növelésével a forgalom szétterül a hálózaton. Minél aszimmetrikusabb a hálózat a kijárat csomópontok elhelyezkedése alapján (3 db sarok mentén vagy élek mentén elhelyezkedő csomópontok), annál csatornázottabban jelenik meg a forgalom a hálózaton. Sarkokban elhelyezkedő kijárat csomópontok jobban szét tudják teríteni a hálózati forgalmat, mint az élek mentén elhelyezkedő kijárat csomópontok. Kijárat csomóponti ágak összesített kapacitása befolyásolja a hálózati forgalomlefolysást.</li> <li>- Az utcahálózati modellek eredményei egymás közötti sorrendje az <math>F_h</math>-nál nagyobb mértékű forgalmi terhelést követően megváltozik. A kijárat csomópontok száma minél kevesebb, valamint azok összegzett kapacitása minél alacsonyabb, annál magasabb a használt utcaszakaszok aránya, illetve annál magasabb a használt utcaszakaszok aránya, és azok értéke élek mentén elhelyezkedő kijárat csomópontok esetén magasabb, mint sarok mentén elhelyezkedő kijárat csomópont esetén.</li> </ul>
IV. csoport	-
V. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalmi terhelés esetén a gyűjtőt elhelyezkedése nem gyakorol jelentős hatást az eredményekre. <math>F_h</math> értékkel közel megegyező forgalmi terheléskor a belső gyűjtőt és a kijárat csomópontok elhelyezkedése az eredményekben kezd megjelenni. Az utcahálózatok belsejében elhelyezkedő gyűjtőtök minél távolabb helyezkedik el terület súlypontjától, annál magasabb a használt utcaszakaszok aránya.</li> <li>- <math>F_h</math> környezetében kis forgalmi növekmény hatására jelentősen megnövekszik a használt utcaszakaszok aránya.</li> <li>- <math>F_h</math> forgalomnagyságnál nagyobb forgalmi terhelések hatására az utcahálózatok belsejében áthaladó gyűjtőtök egymással alkotott csomópontjainak távolságának növelése a terület középpontjától növeli a használt utcaszakaszok arányát és azok kapacitáskihasználtságát. A hálózatokon közel azonos mértékű torlódás alakul ki, de a használt utcaszakaszok kapacitáskihasználtságában jelentős különbség adódik.</li> </ul>
VI. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalom esetén a "Malcher-rendszer"-nál alacsonyabb a használt utcaszakaszok aránya, mint "négyzetes- és körös-rendszer" esetekben. Illetve ezek az értékek egyirányúsítással rendelkező utcahálózatok esetében magasabbak, mint kétirányú belső utcahálózati modell (s8_1000_8x8) esetében. A használt utcaszakaszok számának magasabb használtsága a rendelkezésre álló útszakaszok alacsonyabb számának köszönhető.</li> <li>- <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalmi terhelés esetén a "körös-rendszerhez" tartozik a legmagasabb a használt utcaszakaszok aránya az egyirányú utcahálózatok között. Az egyirányú utcaalakításhoz tartozó eredmények magasabbak, mint a kétirányú belső utcahálózattal rendelkező modell értékei. Az eredmény összefügg a használt útszakaszokon kialakuló torlódás hosszával, a torlódott és a használt útszakaszok arányával és a használt útszakaszok kapacitáskihasználtságával.</li> </ul>

**2.3.4. HASZNÁLT UTCASZAKASZOKON KIALAKULÓ TORLÓDÁS HOSSZA ÉS TORLÓDOTT ÉS A HASZNÁLT UTCASZAKASZOK ARÁNYA A FORGALOMNAGYSÁG FÜGGVÉNYÉBEN**



4. ábra: Használt utcazakaszokon kialakuló torlódás hossza-forgalomnagyság, és torlódott és a használt utcazakaszok aránya-forgalomnagyság összefüggése az I. csoport esetében.

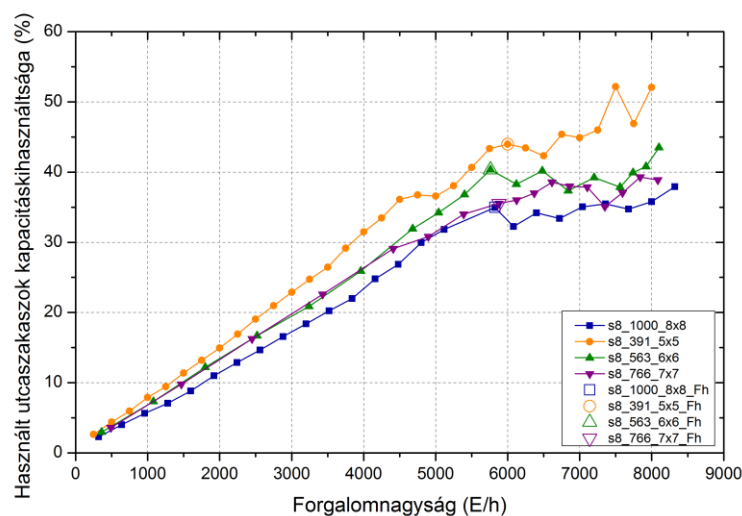
A vizsgálat során elemzett használt utcazakaszokon kialakuló torlódás hossza-forgalomnagyság, és a torlódott és a használt utcazakaszok aránya-forgalomnagyság közötti összefüggések eredményeit grafikusán a 4. ábra jeleníti meg, míg szövegesen a 5. táblázat tartalmazza összefoglalóan.

5. táblázat: Használt utcazakaszokon kialakuló torlódás hossza-forgalomnagyság, és torlódott és a használt utcazakaszok aránya-forgalomnagyság közötti összefüggések jellemzése

Csoportosítás	Használt utcazakaszokon kialakuló torlódás hossza, és a torlódott és a használt utcazakaszok aránya – forgalomnagyság közötti összefüggéseinek jellemzése
általános észrevétel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalmi terheléskor nem alakul ki torlódás a hálózatokon, míg <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalmi terhelés esetén fokozatosan növekszik mind a hálózaton kialakuló torlódások hossza, mind pedig a torlódott és a járművek által használt utcazakaszok aránya (I., II., III., IV., V., VI. csoport).</li> <li>- A hálózatok eltérő felépítése és a kialakítása miatt nem elegendő csak a torlódás hosszát figyelembe venni. A torlódott és a használt utcazakaszok aránya alapján láthatóvá válik a vizsgált utcahálózatok hasonló viselkedése torlódott állapotban (I., II., III., IV., V., VI. csoport).</li> <li>- Kisebb hálózatokon rövidebb torlódás alakul ki, de a torlódott és használt utcazakaszok aránya alapján azonosan alakul a forgalom lefolyása, modellek területének mértékétől függetlenül, a kijáratok csomópontok és a kijáratok csomóponti ágak azonos száma és elhelyezkedése esetén (I., II., IV. csoport).</li> <li>- Torlódások közel azonos forgalomnagyság esetén kezd el kialakulni <math>F_h</math> környezetében (I., II., IV. csoport).</li> </ul>
I. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A legkisebb hálózat esetében (s5_391_8x8) <math>F_h</math>-t meghaladó terheléskor a torlódás kialakulásának tendenciája megváltozik, kisebb mértékben növekszik, mint a többi vizsgált eset. Torlódások az utcahálózatokon <math>F_h</math>-t meghaladó forgalmi terheléskor közel azonosan alakulnak.</li> <li>- A legnagyobb hálózat esetében (s8_1000_8x8) a legmagasabb forgalmi terheléskor hirtelen megnő a torlódás hossza, ugyanakkor a használt utcazakaszok aránya lecsökken. A torlódott és használt utcazakaszok arányát tekintve az eredmények átlagosan a többi vizsgált modellhez illeszkednek.</li> </ul>
II. csoport	-
III. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minél kisebb a kijáratok csomópontok és kijáratok csomóponti ágak száma, valamint azok összegzett forgalmi kapacitása, annál kisebb forgalom esetén kezd el a torlódás kialakulni a hálózatokon <math>F_h</math>-val közel forgalmi terhelés mellett.</li> <li>- Sarkok mentén elhelyezkedő kijáratok csomópontok esetén nagyobb torlódás alakul ki a hálózaton mértékében és arányában, mint élek mentén elhelyezkedő csomópontok esetén. Sarki helyzetű kijáratok csomópontok jobban becsatornázzák a forgalmat.</li> </ul>
IV. csoport	-

V. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Területet feltáró gyűjtőút elhelyezkedése a torlódás alakulása szempontjából nem releváns, azonos számú kijárat csomóponttal és kijárat csomóponti ággal rendelkező modellek esetén.</li> <li>- A e4k_v4_1000_8x8 utcahálózati eset 3 kijárat csomópontot és 4 kijárat csomóponti ágat tartalmaz. E modell esetén nagyobb torlódás alakul ki azonos forgalom nagyság mellett a hálózaton, mint a vizsgálati csoport többi eleme esetében.</li> </ul>
VI. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A vizsgált utcahálózatokon kialakuló torlódás hossza a teljes vizsgálati tartományban közel azonosan alakulnak. A legnagyobb forgalmi ráterhelésekor a „körös” rendszerben kisebb az utcahálózaton kialakuló torlódás értéke, mint a másik három esetben.</li> <li>- Egyirányú utcaszakaszokat tartalmazó hálózatok között a torlódott és a használt utcaszakaszok aránya között nem alakul ki jelentős különbség és a kétirányú utcahálózattal közel azonosan alakul.</li> </ul>

### 2.3.5. HASZNÁLT UTCASZAKASZOK KAPACITÁSKIHASZNÁLTÁGA A FORGALOMNAGYSÁG FÜGGVÉNYÉBEN



5. ábra: Használt utcaszakaszok átlagos kapacitáskihasznáلتsága a forgalomnagyság függvényében az I. csoport esetében.

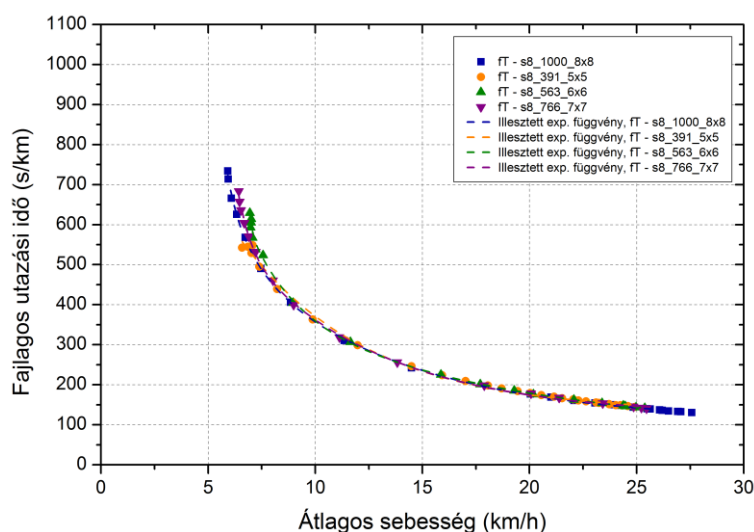
A vizsgálat során elemzett használt utcaszakaszok átlagos kapacitáskihasznáلتsága és forgalomnagyság közötti összefüggések eredményeit grafikusán az 5. ábra jeleníti meg, míg szövegesen a 6. táblázat tartalmazza összefoglalóan.

6. táblázat: Használt utcaszakaszok átlagos kapacitáskihasznáلتsága - forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése

Csoportosítás	Használt utcaszakaszok kapacitáskihasznáلتsága – forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése
általános észrevétel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fh-nál kisebb forgalom esetén a használt utcaszakaszok kapacitáskihasznáلتsága szigorúan monoton növekszik, azt követően csak tendenciájában növekedik a kapacitáskihasznáلتság (I., II., III., IV., V., VI. csoport).</li> <li>- minél kisebb egy utcahálózat a területe a hálózatot felépítő utcák összesített hossza és darabszáma alapján, a használt utcaszakaszok kapacitáskihasznáلتsága annál magasabb azonos forgalomnagyság mellett (I., II., IV. csoport).</li> <li>- legnagyobb forgalmi terhelés mellett a használt utcaszakaszok kapacitáskihasznáلتsága 40% körül adódik (I., II., IV. csoport).</li> </ul>
I. csoport	-
II. csoport	-
III. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fh-nál kisebb forgalom esetén a sarkokban elhelyezkedő kijárat csomópontokat tartalmazó modellekhez magasabb kapacitáskihasznáلتság tartozik, mint élek mentén elhelyezkedő kijárat csomópontok esetén. Minél kevesebb kijárat csomóponttal rendelkezik egy hálózat, valamint azok összegzett forgalmi kapacitása minél kisebb azonos forgalomnagyság mellett, annál magasabb a használt utcaszakaszok kapacitáskihasznáلتsága.</li> </ul>

	- $F_h$ -t meghaladó forgalom esetén azonos forgalomnagyság mellett minél több kijárat csomóponti ággal rendelkezik az utcahálózati modell. Azok összesített kapacitása, annál magasabb az utcaszakaszok kapacitáskihasználtság azonos kijárat csomópontszám és azok elhelyezkedése esetén. A kijárat csomópontok sarki helyzete esetén magasabb az utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága, mint élek mentén elhelyezkedő csomópontok esetében. Azonos forgalomnagyság mellett, a kijárat csomópontok száma minél magasabb, valamint azok összesített kapacitása minél nagyobb, annál alacsonyabb a használt utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága.
IV. csoport	-
V. csoport	- Az utcahálózatok belsejében áthaladó gyűjtőutak egymással alkotott csomópontjainak távolságának növelése a terület súlypontjától növeli a használt utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága.
VI. csoport	- $F_h$ -nál kisebb forgalom esetén az egyirányú kialakítással rendelkező utcahálózatok közötti eredmény növekvő sorrendben „körös-, négyzetes- és Malcher-rendszer”, illetve az „alap” kétirányú utcahálózaton a használt utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága a legalacsonyabb, illetve 4000E/h forgalmi terhelést meghaladó forgalmi terhelés esetén a „körös- és a négyzetes-rendszer” között helyezkedik el. - $F_h$ -nál nagyobb forgalom esetén jelentkezik az egyirányú utcaszakaszok csatornázottsága az utcaszakaszok magasabb kapacitáskihasználtságban. Amely érték jelentősen nagyobb lesz, mint kétirányú belső utcahálózattal rendelkező esetben. A „Malcher- és négyzetes-rendszerhez” nagyobb kapacitáskihasználtság tartozik, mint „körös-rendszerhez”. Mindegyik egyirányú esetben a használt utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága magasabb, mint az alap, kétirányú belső utcahálózattal rendelkező modell esetén.

2.3.6. FAJLAGOS UTAZÁSI IDŐ ALAKULÁSA AZ ÁTLAGOS SEBESSÉG FÜGGVÉNYÉBEN



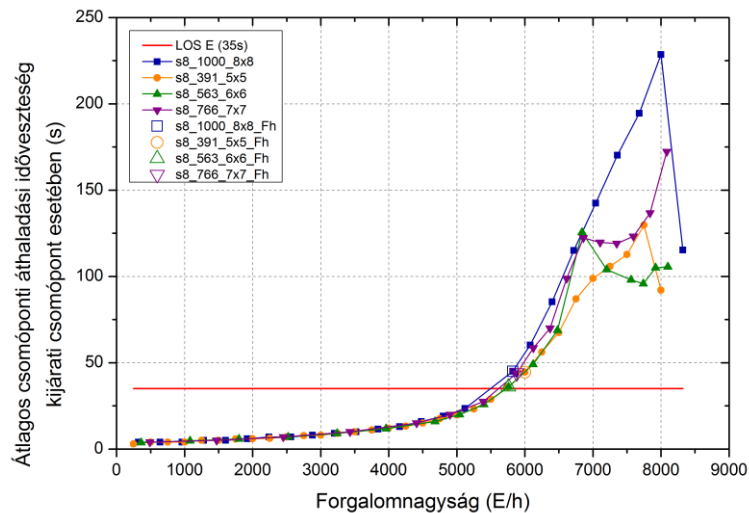
6. ábra: Fajlagos utazási idő – átlagos sebesség összefüggés az I. csoport esetében.

A vizsgálat során elemzett fajlagos utazási idő és átlagos sebesség közötti összefüggések eredményeit grafikusán a 6. ábra jeleníti meg, míg szövegesen a 7. táblázat tartalmazza összefoglalóan. A vizsgálatból származó eredmények közel azonosak, a vizsgálati csoportokhoz tartozó kiértékelést emiatt nem készítettem.

7. táblázat: Fajlagos utazási idő - átlagos sebesség jellemzése

Csoportosítás	Fajlagos utazási idő – átlagos sebesség összefüggéseinek jellemzése
általános észrevétel	- Vizsgált modellek eredményeiben a geometriai különbségek nem jelentkeznek, minden eredményre közel azonos görbe illeszthető (I., II., III., IV., V., VI. csoport). A közlekedők fajlagos utazási ideje és átlagos sebessége között szoros összefüggés van függetlenül az úthálózat geometriájától.

### 2.3.7. ÁTLAGOS CSOMÓPONTI ÁTHALADÁSI IDŐVESZTESÉG ALAKULÁSA KIJÁRATI CSOMÓPONTOK ESETÉBEN



7. ábra: Átlagos csomóponti áthaladási időveszteség kijárati csomópontok (körforgalmak) esetén a forgalomnagyság függvényében az I. csoportot tekintve.

A vizsgálat során elemzett átlagos csomóponti áthaladási időveszteség a kijárati csomópontban és a hálózati forgalomnagyság közötti összefüggés eredményeit grafikusán a 7. ábra jeleníti meg, míg szövegesen a 8. táblázat tartalmazza összefoglalóan.

8. táblázat: Átlagos csomóponti áthaladási időveszteség kijárati csomópontok esetében - forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése

Csoportosítás	Átlagos csomóponti áthaladási időveszteség kijárati csomópontok esetében – forgalomnagyság összefüggéseinek jellemzése
általános észrevétel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kijárati csomópontok „B” vagy „C” szolgáltatási szinttel rendelkeznek maximálisan, ahol a kijárati csomóponti ágak összesített kapacitása alacsonyabb, mint a hálózaton megjelenő forgalom nagysága (III., V. csoport). Ahol a kijárati csomóponti ágak összesített kapacitása befolyásolja az eredményt, az áthaladási időveszteség értéke változatlan marad. A hálózaton nagyobb forgalom jelenik meg, mint a kijárati csomóponti ágak összesített kapacitása. Ez a kapacitáshiány erősen visszahat a közúti hálózat csatlakozó elemeire. Az eredmény a vizsgálatához felhasznált modellezési környezet következménye.</li> <li>- „E” szolgáltatási szint ott jelenik meg, ahol a kijárati csomóponti ágak összesített kapacitása nagyobb, mint a hálózaton megjelenő forgalom nagysága adott nagyságú forgalmi ráterhelés esetén. (I., II., IV., VI. csoport).</li> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalmi ráterhelés esetén a vizsgált utcahálózati modellekhez tartozó eredmények közel azonosak (I., II., IV., VI. csoport).</li> <li>- Amennyiben a kijárati csomópontokban jelentős áthaladási időveszteség alakul ki, akkor <math>F_h</math>-t jelentősen meghaladó forgalom esetében (kb. 6500 E/h) az áthaladási időveszteség instabil lesz, hálózaton kialakuló torlódás hossza és annak megoszlása hatással lesz az eredmények alakulására (I., II., III., IV., V., VI. csoport). Ez a jelenség a kijárati csomóponti ágak kapacitásával közel megegyező forgalomnagyságok esetén figyelhető meg. Eredmények hatása a használt utcaszakaszok aránya és használt utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága forgalmi jellemzőknél is megjelennek, és a forgalom optimalizált lefolyásának keresésére vezethető vissza. Az s8_1000_8x8 esetben különösen megfigyelhető, hogy a csomóponti áthaladási időveszteség nagy forgalmi terhelés következtében hirtelen lecsökken, amikor az utcahálózaton a torlódás hossza hirtelen megnő. Ezekben az esetekben a csomópont tehermentesül, hálózaton az időveszteség szétterül, amit az átlagos utazási idő tendenciájának változatlansága mutat.</li> </ul>

I. csoport	-
II. csoport	-
III. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>F_h</math>-nál kisebb forgalmi ráterhelés esetében a kijárat csomópontok száma minél kevesebb, annál magasabb a csomóponti áthaladási időveszteség.</li> <li>- Amennyiben a kijárat csomópontok sarok helyzetűek, úgy az áthaladási időveszteség <math>F_h</math>-nál nagyobb forgalmi terhelés esetén magasabb, mint élek mentén csomópontok esetében azonos forgalom nagyság mellett. A kijárat csomópontok saroki elhelyezkedése esetén egy kijárat csomópontot két irányból tud elérni a hálózaton megjelenő forgalom, az élek mentén elhelyezkedő kijárat csomópont esetén három irányból képes azokat elérni a hálózaton kialakuló forgalom. Hálózaton szétterülő forgalom több csomóponti ágról érkezik, így azonos nagyságú forgalom kisebb áthaladási időveszteséggel tudja a kijárat csomópontokon keresztül a vizsgált területet elhagyni.</li> </ul>
IV. csoport	-
V. csoport	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gyűjtőutak és a kijárat csomópontok szimmetrikus elhelyezkedése esetén a legkedvezőbb a kijárat csomópontokon kialakuló áthaladási időveszteség.</li> <li>- Az utcahálózatok belsejében áthaladó gyűjtőutak egymással alkotott csomópontjainak távolságának növelése a terület súlypontjától növeli a kijárat csomópontokon kialakuló áthaladási időveszteség.</li> </ul>
VI. csoport	-

### 3. ÖSSZEZÉS

A közlekedési hálózatok forgalmi kapacitását a forgalom lefolyása szempontjából kritikus elhelyezkedésű (más útvonal használatával nem kikerülhető) legszűkebb keresztmetszet forgalmi kapacitása adja meg. Amennyiben az utcahálózaton a hálózati forgalomlefordulásban betöltött szerepe alapján több, azonos funkciójú, elhelyezkedésű és a környezetéhez hasonlóan kapcsolódó kritikus elhelyezkedésű utcahálózati elem található, akkor azok összegzett kapacitása adja meg az utcahálózat forgalmi kapacitását. Ez az érték a vizsgálat során a telítetlen és a túltelített forgalmi állapot határán elhelyezkedő forgalmi határértékként ( $F_h$ ) került meghatározásra. A vizsgált utcahálózatokon ezen értéket követően kezd torlódás kialakulni.

A vizsgált utcahálózati modellek tekintetében az eredmények alapján ilyen kritikus alkotóelemnek tekinthetők a kijárat csomópontok, a kijárat csomóponti ágak elhelyezkedése, azok száma és összegzett forgalmi kapacitása alapján. E két alkotóelem jelentősen befolyásolta a forgalomminőséget jellemző mennyiségek alakulását és a forgalmi határérték ( $F_h$ ) értékét. Mindezek mellett a kijárat csomóponti ágak forgalmi kapacitása szűkebb forgalmi keresztmetszetet jelentett. Ezek az utcahálózat forgalmi teljesítményét jobban lehatárolta, mint a kijárat csomópontok kapacitása a vizsgálat során. Amíg  $F_h$ -nál alacsonyabb forgalmi ráterhelés esetében a vizsgált forgalomminőségi jellemzők tekintetében kedvezőbb eredményeket adnak az utcahálózatok sarkaiban elhelyezkedő kijárat csomópontok, mert a vizsgált területet kívülről határoló külső gyűjtőutakon nagyobb forgalom jelenik meg. Mindezek mellett  $F_h$ -nál nagyobb forgalmi ráterhelés során az él mentén elhelyezkedő kijárat csomópontokhoz tartoznak kedvezőbb eredmények. A kijárat csomópontok a belső utcahálózatról több irányból is megközelíthetők, ezáltal a kijárat csomópontokra rávezető utcaszakaszok kisebb nagyságú forgalom jelenik meg.

A vizsgált utcahálózati modellek mérete, alakja és belső utcahálózatának sűrűsége az eredményekre kisebb mértékben volt hatással. A topológiai mérőszámok közötti minimális eltérés a vizsgálat eredményeiben kisebb mértékben jelentkezett. A vizsgált területek mérete, alakja, a belső utcahálózat felépítése és sűrűsége jellemzően az  $F_h$ -t meghaladó forgalom nagyságok esetén van hatással az eredményekre. A forgalom utcahálózaton való szétterülése, az érintett utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága és a torlódás mértéke mind megjelenik az átlagos utazási idő és az átlagos sebesség alakulásában. Minél nagyobb egy utcahálózat, az átlagos utazási idő értéke  $F_h$ -t meghaladó forgalom nagyságok esetében annál nagyobb. Minél nagyobb az utcahálózat annál kisebb az utcaszakaszok kapacitáskihasználtsága, valamint a használt utcaszakaszok aránya. Ez különösen az egyirányú belső utcaszakaszokból álló utcahálózati modellek esetében, ahol az utcahálózaton közlekedő járművek számára a közlekedésre rendelkezésre álló utcaszakaszok száma jelentősen kevesebb.

A cikksorozat harmadik részeként a vizsgálati módszertant kiterjesztem valós, lakótelepi utcahálózatok vizsgálatára is. Az elméleti utcahálózatok során megállapított következtetések valós környezetbe kerülnek kiterjesztésre az alkalmazott keretrendszert használva.

#### 4. IRODALOM

Akcelik, R. 2003. Speed-flow models for uninterrupted traffic facilities. Akcelik & Associates Pty Ltd, 1–34.

Háznagy, A., & Fi, I. 2019. Elméleti utcahálózatok forgalomlebonyolító képességének vizsgálata makroszkopikus modellezési eljárással I. - Kísérleti módszertan. Útügyi Lapok, 7(12), 68–79, <https://doi.org/10.36246/UL.2019.1.07>

Koller, S. 1986. Forgalomtechnika és közlekedéstervezés. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.

Parmenter, D. 2015. Key performance indicators: developing, implementing, and using winning KPIs. John Wiley & Sons.

PIARC. 2019. Performance Indicators. Retrieved from <https://rno-its.piarc.org/en/rno-basics-road-user-needs-measuring-performance/performance-indicators>; Elérve: 2020.03.02.

Transportation Research Board National Research Council. 2010. Highway Capacity Manual “HCM2010.” Washington, D.C.





# A közlekedők magatartásának, attitűdjének elektronikus felmérése(ESRA projekt: E-Survey of Road Users' Attitudes)

**Holló Péter<sup>1</sup>, Pauer Gábor<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft., Közlekedésbiztonsági  
Kutatóközpont

E-mail: [hollo@kti.hu](mailto:hollo@kti.hu), [pauer.gabor@kti.hu](mailto:pauer.gabor@kti.hu)

DOI: [10.36246/UL.2020.1.03](https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.03)

## KIVONAT

Az ESRA a világ minden táján megtalálható közlekedésbiztonsági és közszolgálati intézmények, kutatóközpontok és magán támogatók közös kezdeményezése. Célja: közlekedésbiztonsági teljesítményre vonatkozó összehasonlítható adatok gyűjtése és elemzése. Az ESRA projekt kezdeményezője és koordinátora a belga Vias Institute (Brüsszel), együttműködve 11 irányító partnerrel, köztük olyan nagynevű kutatóintézetekkel, mint a BAST, BfU, KfV, SWOV, stb.

Az ESRA „lelke” a közösen kifejlesztett és szakemberek által nemzeti nyelvre fordított kérdőív, melynek témái az önbevalláson alapuló magatartás, az attitűdök és vélemények a veszélyes közlekedési magatartásról, a rendőri ellenőrzésre vonatkozó tapasztalatok, továbbá a közlekedéspolitikai intézkedések támogatása. A kérdőív különféle közlekedésbiztonsági problémákat vizsgál, mint például gépjárművezetés alkohol, drog, vagy orvosság hatása alatt, gyorsajtás, biztonsági öv, gyermekülés használata, figyelemelterelés. A megkérdezettek a személygépkocsiban utazók, motorkerékpár és moped-vezetők, kerékpárosok és gyalogosok voltak.

A felmérés eredményei alapján a baleseti adatok szerint kedvezőtlen hazai közlekedési morál nem rosszabb az európai átlagnál az önértékelésen alapuló válaszok szerint. További kutatást igényel azonban, hogy az online felmérés eredményei mennyire tükrözik a valóságot az egyes magatartási jellemzők esetén.

*Kulcsszavak:* gépjárművezetői attitűd, önbevalláson alapuló közlekedési magatartás, közlekedésbiztonsági teljesítménymutatók, rendőri ellenőrzés, önvezető gépjárművek

## ABSTRACT

ESRA (E-Survey of Road Users' Attitudes) is a joint initiative of road safety institutes, research centres, public services, and private sponsors, from all over the world. The aim is to collect and analyse comparable data on road safety performance, in particular road safety culture and behaviour of road users. The ESRA data are used as a basis for a large set of road safety indicators. These provide scientific evidence for policy making at national and international levels. Vias institute in Brussels (Belgium) initiated and coordinates ESRA, in cooperation with eleven core group partners (e.g. BAST, BFU, KFV, SWOV, etc.).

At the heart of ESRA is a jointly developed questionnaire survey, which is translated into national language versions. The themes covered include: self-declared behaviour, attitudes and opinions on unsafe traffic behaviour, enforcement experiences and support for policy measures. The survey addresses different road safety topics (e.g. driving under the influence of alcohol, drugs and medicines, speeding, distraction) and targets car occupants, motorcycle and moped drivers, cyclists and pedestrians. According to the survey results, traffic morale in our country is not worse than the European average based on the self-reported responses. However, further research is needed to determine the extent to which the results of the online survey reflect the real behaviour of road users.

*Keywords:* driver attitude, self-reported traffic behaviour, road safety performance indicators, police control, autonomous vehicles

**Prof. Dr. Holló Péter**

*Okleveles gépész- és gazdasági mérnök, az MTA doktora, a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. kutató professzora.*

**Pauer Gábor**

*Okleveles közlekedésmérnök, a KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. tudományos munkatársa, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépjárműtechnológia Tanszékének PhD hallgatója.*

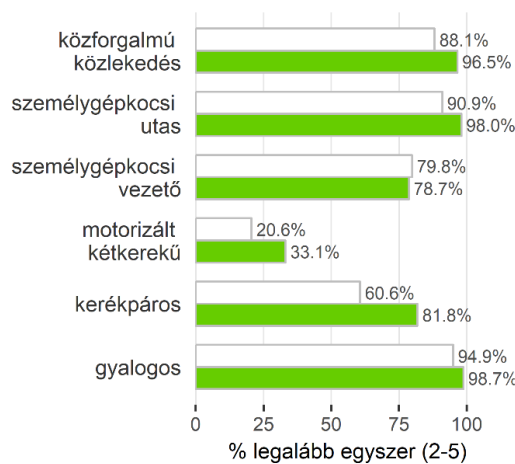
**1. HÁTTÉR:**

Jelen cikk a második ESRA felmérés legfontosabb eredményeibe nyújt betekintést. Az adatgyűjtést 2018-ban végezték 32 országban. Az online felmérés összesen 35 000 közlekedő válaszait gyűjtötte össze, ebből Magyarországról 1014 személyét. Fontos következtetések vonhatók le a hazai eredmények és az európai átlagértékek összehasonlításából. A következő ábrákon a magyar adatokat a zöld oszlop, míg az ESRA2 felmérés európai átlagértékeit a fehér oszlop jelzi. Az ESRA2 európai átlagértékeket azon 20 európai ország adataiból határozták meg, amelyek részt vettek a felmérésben, vagyis: Ausztria, Belgium, Cseh Köztársaság, Dánia, Finnország, Franciaország, Németország, Görögország, Magyarország, Írország, Olaszország, Hollandia, Lengyelország, Portugália, Szerbia, Szlovénia, Spanyolország, Svédország, Svájc, Egyesült Királyság.

**2. EREDMÉNYEK:**

**Közlekedési mód**

Milyen gyakran használta az elmúlt 12 hónapban a következő közlekedési módokat? (5 pontos skála, 1 = soha, 5= legalább 4-szer egy héten)

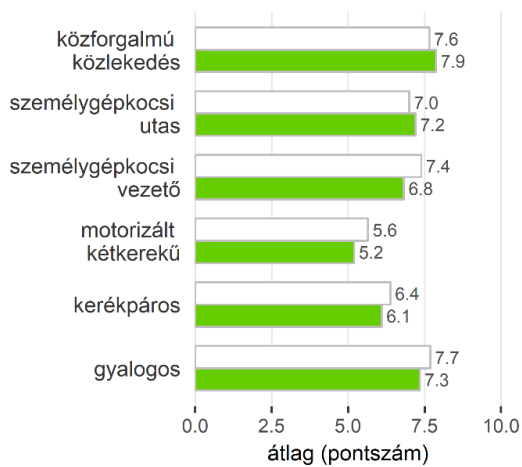


1. ábra: A különböző közlekedési módok használati arányai

A különböző közlekedési módok használati arányában nincs jelentős eltérés az európai átlag és a hazai érték között. A motorizált kétkerekű járművek és a kerékpárok használati aránya Magyarországon nagyobb az európai átlagnál.

### Biztonságérzet

Mennyire érzi magát biztonságban a következő közlekedési mód használatakor? (11 pontos skála, 0=nagyon bizonytalan, 10=nagyon biztonságos)



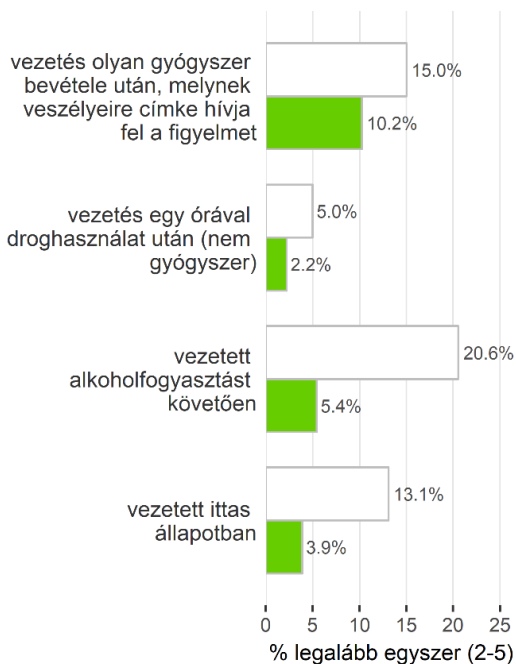
2. ábra: Szubjektív biztonságérzet

Jelentősebb eltérés itt sem tapasztalható. Legkevésbé a motorkerékpárok és mopedek vezetői, leginkább a közforgalmú közlekedést használók érzik magukat biztonságban. Alig marad el mögöttük a gyalogosok biztonságérzete, ami a baleseti statisztikai adatok szerint nem tükrözi a valós baleseti kockázatot.

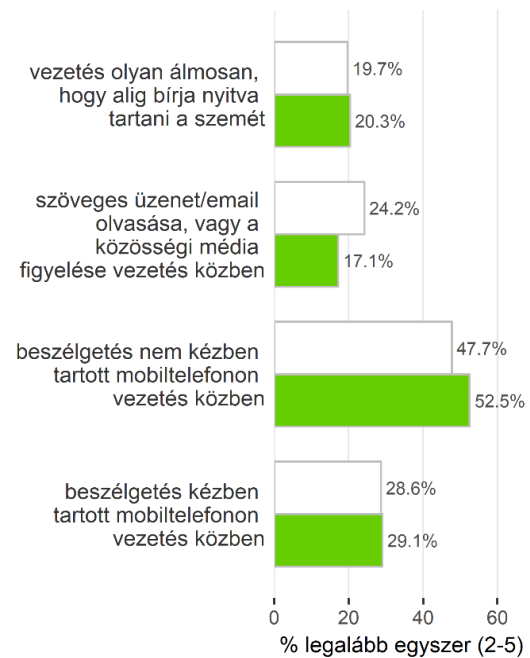
### 3. ÖNBEVALLÁSON ALAPULÓ MAGATARTÁS:

Az elmúlt 30 napban milyen gyakran fordult elő Önnel?  
(5 pontos skála, 1=soha, 5=(majdnem) mindig)

#### személygépkocsi vezetése befolyásoltság alatt



#### személygépkocsi vezető fáradtsága, figyelemelterelése



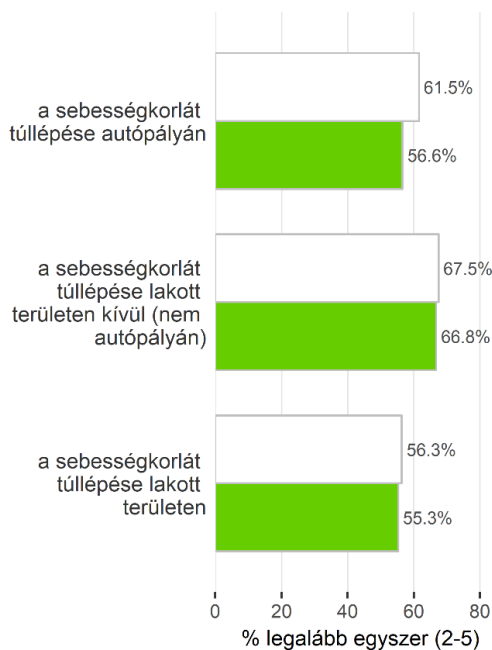
3. ábra: Önbevalláson alapuló magatartás (1)

A befolyásoltság alatti személygépkocsi vezetést illetően a hazai adatok minden tekintetben jelentősen kedvezőbbek az európai átlagnál. Azok aránya, akik alkoholfogyasztás után gépjárművet vezettek, mintegy egynegyede Magyarországon az európai átlagnak. (Ennek nem csak a szigorú hazai szabályozás lehet az oka, hanem az is, hogy más országokban őszintébbek a válaszadók.)

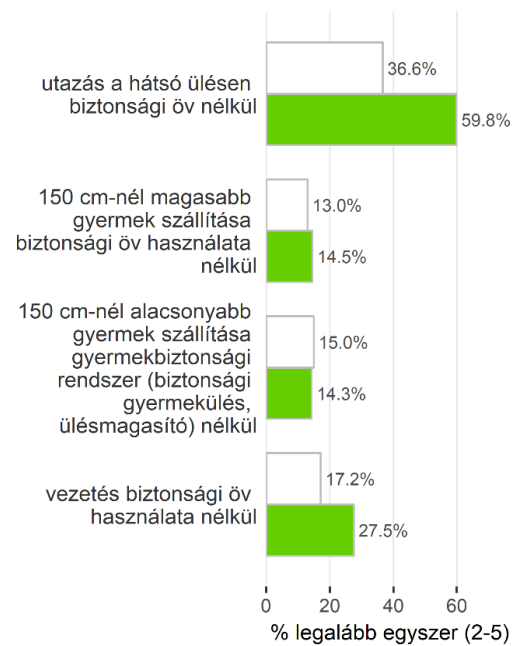
Álmoság tekintetében nincs különbség, mint ahogy a kézben tartott mobiltelefonon való beszélgetés tekintetében sem, annak ellenére, hogy ez utóbbit nálunk jogszabály tiltja. A nem kézben tartott mobiltelefonon hazánkban kissé többen beszélnek vezetés közben, de ezt a jogszabály engedélyezi. Az okostelefonok egyéb funkcióinak használata vezetés közben Magyarországon némileg kedvezőbbnek tűnik az európai átlagnál.

Az elmúlt 30 napban milyen gyakran fordult elő Önnel?  
(5 pontos skála, 1=soha, 5=(majdnem) mindig)

**gyorshajtás személygépkocsi vezetőként**



**biztonsági öv használata személygépkocsiban**



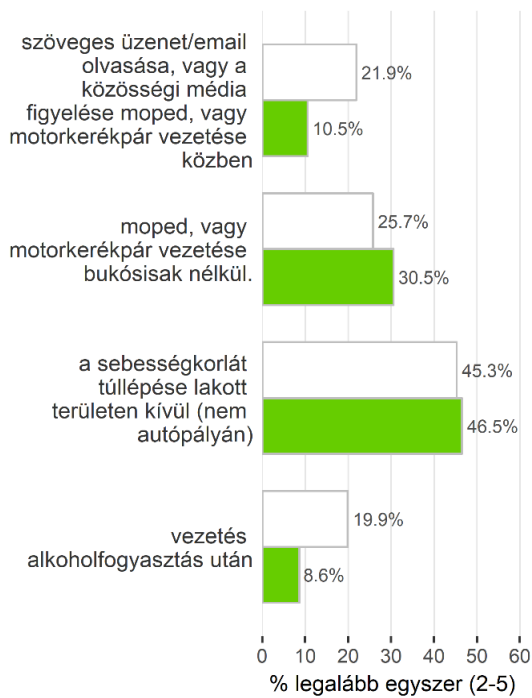
4. ábra: Önbevalláson alapuló magatartás (2)

A gyorshajtást illetően szintén alig van eltérés az európai átlag és a hazai értékek között. Annak ellenére van ez így, hogy a tettenérés tényleges valószínűsége kutatási eredmények szerint Magyarországon számottevően kisebb, mint a környező országokban.

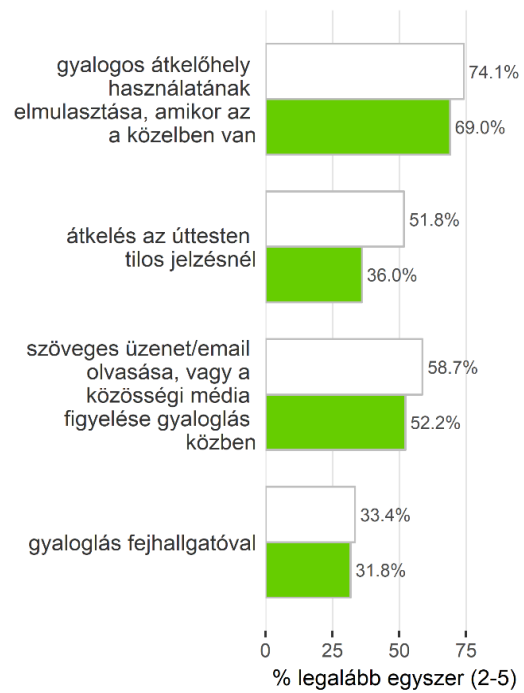
Személygépkocsiban a biztonsági öv használata tekintetében szignifikáns különbség mutatkozik, főként a hátsó ülések tekintetében. Magyarországon a hátul utazók közel 60%-a – saját bevallásuk szerint – nem visel biztonsági övet. (Hasonlót erősítettek meg az út menti felmérések is). A gépjárművezetők biztonsági övviselési aránya is kedvezőtlenebb némileg az európai átlagnál, ha nem is olyan mértékben, mint a hátsó ülések utasainál. Itt a biztonsági övet nem viselők aránya Magyarországon 28%, míg az európai átlag 17%.

Az elmúlt 30 napban milyen gyakran fordult elő Önnel?  
(5 pontos skála, 1=soha, 5=(majdnem) mindig)

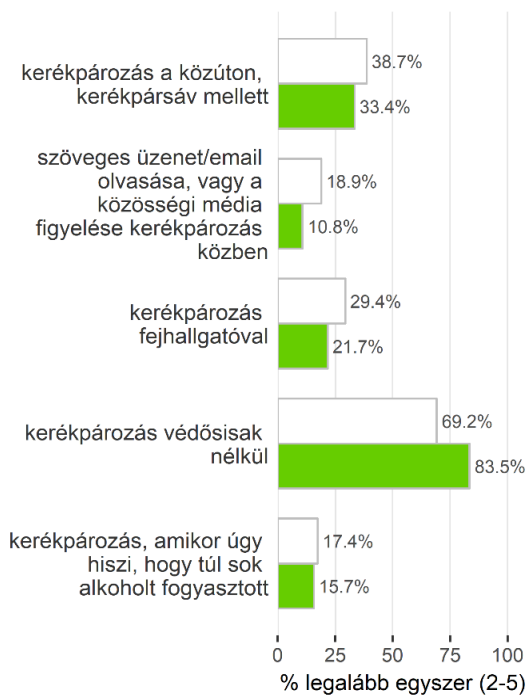
**motorizált kétkerekű**



**gyalogos**



**kerékpáros**



5. ábra: Önbevalláson alapuló magatartás (3)

A motorizált kétkerekűek gyorsajtása tekintetében nincs értékelhető különbség. A bukósívak viselési hajlandóság Magyarországon némileg kisebb az európai átlagnál. Az ittas vezetés ritkábban fordul elő hazánkban az európai átlagnál, mint ahogy az okostelefonok beszélgetésen kívüli funkcióinak menet közbeni használata is.

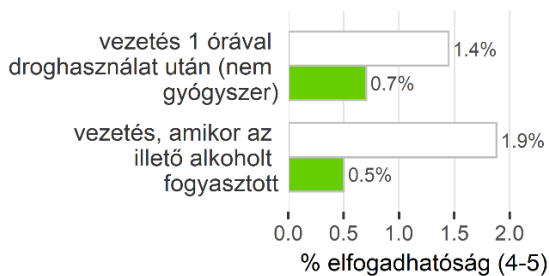
A gyalogosok hazai szabálybetartási szintje valamennyi kérdésben kissé jobb az európai átlagnál, egyedül a tilos jelzésnél való átkelés esetében tapasztalható nagyobb hazai előny, amit a személyes tapasztalatom nem igazán erősít meg.

A kerékpározásra adott válaszok alapján majdnem minden kérdésnél kismértékű hazai előny mutatkozik, még az ittas kerékpározás esetén is, ami meglehetősen hihetetlen, ismerve a hazai szabályozást. Egyedül a védősisak viselési hajlandóság tekintetében vannak jelentősebb hátrányban a hazai kerékpárosok az európai átlaghoz képest (69, illetve 84% nem visel védősisakot).

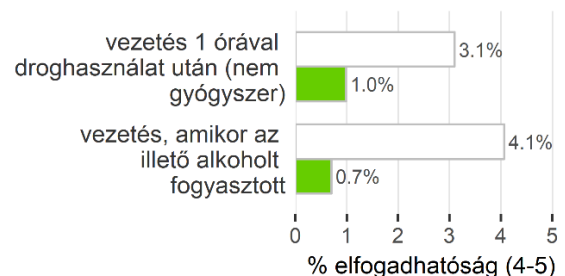
**4. SZEMÉLYES ELFOGADHATÓSÁG, ILLETVE MÁSOK ELFOGADHATÓSÁGA:**

Mennyire érzi elfogadhatónak, ha egy személygépkocsi vezetője az alábbi teszi? (5 pontos skála, 1=elfogadhatatlan, 5=elfogadható)	Az Ön környezetében a többi ember mennyire tartja elfogadhatónak, ha egy személygépkocsi vezetője az alábbi teszi? (5 pontos skála, 1=elfogadhatatlan, 5=elfogadható)
---	---

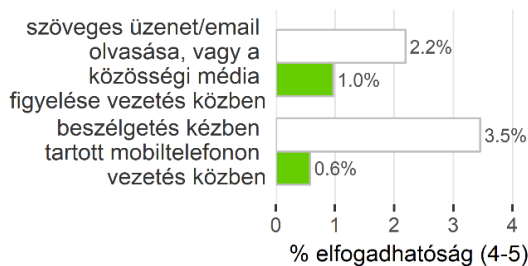
**befolyásoltság alatti vezetés**



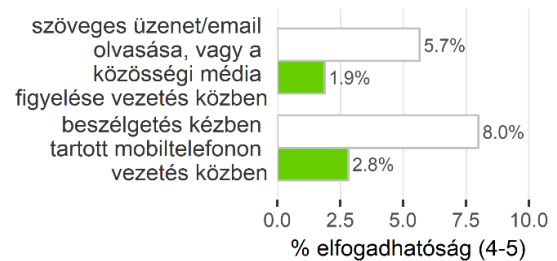
**befolyásoltság alatti vezetés**



**figyelemelterelés**



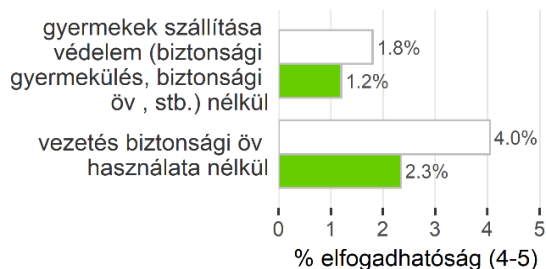
**figyelemelterelés**



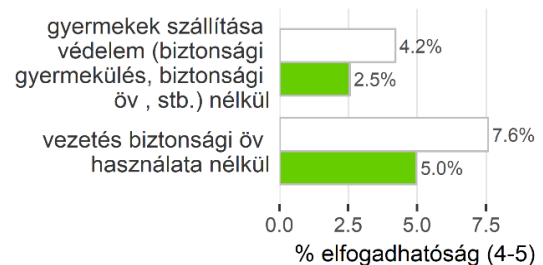
6. ábra: Személyes elfogadhatóság, illetve mások elfogadhatósága (1)

Mennyire érzi elfogadhatónak, ha egy személygépkocsi vezetője az alábbi teszi? (5 pontos skála, 1=elfogadhatatlan, 5=elfogadható)	Az Ön környezetében a többi ember mennyire tartja elfogadhatónak, ha egy személygépkocsi vezetője az alábbi teszi? (5 pontos skála, 1=elfogadhatatlan, 5=elfogadható)
---	---

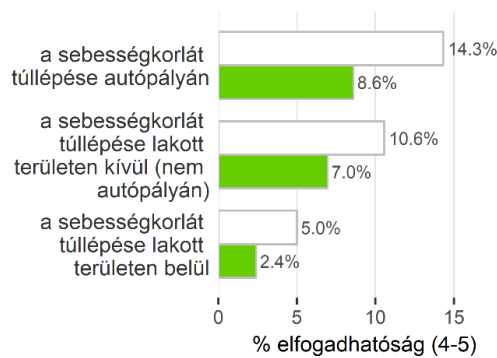
**biztonsági öv**



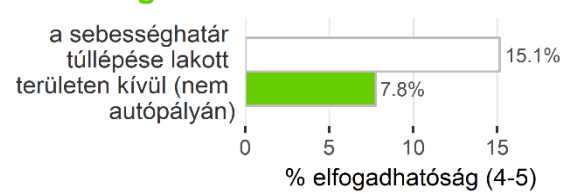
**biztonsági öv**



**sebesség**



**sebesség**



7. ábra: Személyes elfogadhatóság, illetve mások elfogadhatósága (2)

A személyes elfogadhatóság értékelése alapján a hazai válaszadók sokkal kevésbé toleránsak minden egyes kérdésben (befolyásoltság alatti vezetés, figyelemelterelés, biztonsági öv, sebesség), mint az európai átlag.

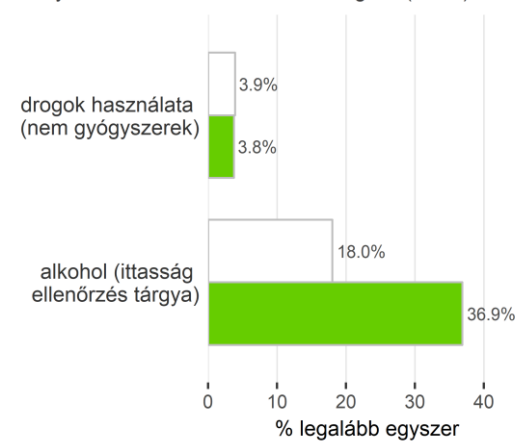
A többi közlekedő megítélése során (mások elfogadhatósága) a magyar válaszadók szintén minden tekintetben szigorúbbak az európai átlagnál.

**Rendőri ellenőrzés**

Mennyire tartja valószínűnek, hogy egy szokásos utazása közben gépkocsi vezetőjeként a rendőrség ellenőrzi Önt.....(7 fokú skála, 1=nagyon valószínűtlen, 7=nagyon valószínű)



Az elmúlt 12 hónapban (gépkocsi vezetőjeként) hányszor ellenőrizte Önt a rendőrség..... (szám)

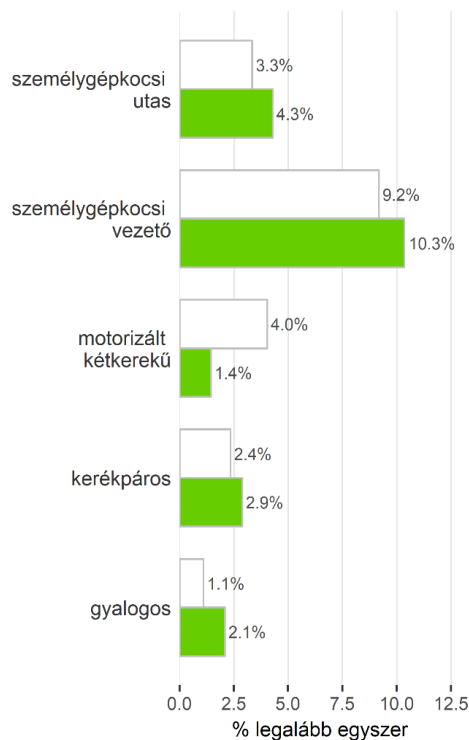


8. ábra: Rendőri ellenőrzésre vonatkozó kérdések eredményei

Meglepő, hogy a hazai vélemények majd minden tekintetben nagyobb ellenőrzési valószínűséget mutatnak, mint az európai átlag. Adatok igazolják, hogy ez sajnos nem valós fenyegetettség. A leginkább meglepő, hogy a megkérdezettek csaknem 37%-át legalább egyszer ellenőrizte a rendőrség ittasság szempontjából. A droghasználat ellenőrzési gyakorisága megfelel az európai átlagnak.

### Részvétel közúti balesetben

Az elmúlt 12 hónapban hányszor volt közúti baleset részese, mint.....? (szám)



9. ábra: Válaszadók érintettsége közúti közlekedési balesetekben

Egyedül a motorizált kétkerekűek baleseti részesedése mutatkozik kisebbnek az európai átlagnál.

### 5. KÖVETKEZTETÉSEK:

Az ESRA2 felmérés szerint a katasztrófálisnak mondott és a baleseti adatok szerint valóban kedvezőtlen hazai közlekedési morál – legalább is az önértékelésen alapuló válaszok szerint – nem rosszabb az európai átlagnál.

Korábbi kutatásaink során megállapítottuk, hogy pl. a biztonsági öv viselési és gyermekülés használati arány tekintetében nincs szignifikáns különbség az online felmérés és az út menti megfigyelések eredményei között, Kérdés, hogy ez mennyire igaz a többi magatartási jellemző esetén? Erre csak további kutatások adhatnak választ.

A szerzők fontosnak tartják a közlekedésbiztonsági teljesítménymutatók minél nagyobb körének út menti megfigyelésekkel való felmérését, mert az itt bemutatott adatok alapján élnek a gyanúperrel, hogy több kérdés esetén a kapott eredmény erősen ellentmond a mindennapi tapasztalatnak, vagyis, a megkérdezettek – nem lévén biztosak a felmérés anonim voltában - több esetben kedvezőbb választ adnak a valóságnál. Ez szintén további kutatásokat igényel.

### 6. FELHASZNÁLT IRODALOM:

Holló, P., Henézi, D. & Berta, T. 2018: Comparison of Self-reported and Observed Road Safety Performance Indicators, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, Vol 46 No 3 (2018), <https://doi.org/10.3311/PPtr.12127>

Vias institute 2019: Country fact sheet Hungary. ESRA2\_2018survey (E-Survey of Road User's Attitudes). Brussels, Belgium: Vias institute.





# Közúti infrastruktúra elemeinek szeizmikus teljesítőképességének vizsgálata

**Hübner Balázs<sup>1</sup>, Mahler András<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és  
Mérnökgeológia Tanszék

E-mail: [hubner.balazs@epito.bme.hu](mailto:hubner.balazs@epito.bme.hu), [mahler.andras@epito.bme.hu](mailto:mahler.andras@epito.bme.hu)

DOI: [10.36246/UL.2020.1.04](https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.04)

## KIVONAT

Hazai gyakorlatban a földrengésre való méretezést az Eurocode-8, illetve annak nemzeti mellékletei szabályozzák, melyek a különböző infrastruktúra szerkezetek méretezése során első sorban a tönkremenetellel szembeni biztonság meghatározását célozzák. A különböző infrastruktúra és vízépítési műtárgyakhoz kapcsolódóan a szerkezetek használhatósága már a tönkremenetelt megelőzően is korlátozódhat, ezért a biztonsági tényező meghatározása mellett fontos a szeizmikus teher hatására történő várható elmozdulások és a szeizmikus teljesítőképesség ismerete is. Az elmozdulásokat talajválasz elemzés eredményeként határozhatjuk meg. A különböző elmozdulásokat a károk mértékétől függően károsztályokba sorolva, az egyes károsztályok meghaladási valószínűségét meg lehet határozni. Ezt a meghaladási valószínűséget különböző intenzitású szeizmikus hatások esetére a sérülékenységi görbék fogják jellemezni. Cikkünkben bemutatjuk a talajválasz elemzés lehetséges módszereit, különös tekintettel a véges elemes módszerekre, majd egy esettanulmányon keresztül bemutatunk egy, a sérülékenységi görbék meghatározását célzó módszertant.

*Kulcsszavak:* talajválasz elemzés, földrengés, sérülékenység

## ABSTRACT

In domestic practice, the earthquake design is governed by Eurocode-8 and its National Annexes, which are primarily used to determine the safety against failure during the design of various infrastructure elements. The serviceability of these structures may be limited even before their failure, therefore it is important to know not only the safety factors, but also the expected displacements and performance of the structure under seismic loading. These displacements can be determined based on ground response analysis. Classifying the various displacements into damage classes depending on the extent of damage, it is possible to determine the probability of exceeding the damage classes. This probability of exceedance for different seismic intensity is characterized by the seismic fragility curves. In this paper, possible ways for ground response analysis will be presented, with particular emphasis on finite element methods. A practical method to determine the fragility curves will be presented through a case study.

*Keywords:* Ground response analysis, earthquake, fragility

### **Hübner Balázs**

*A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének doktorandusz hallgatója. Kutatási területe a talaj és szerkezet kölcsönhatásának véges elemes vizsgálata szeizmikus teher hatására.*

### **Dr. Mahler András**

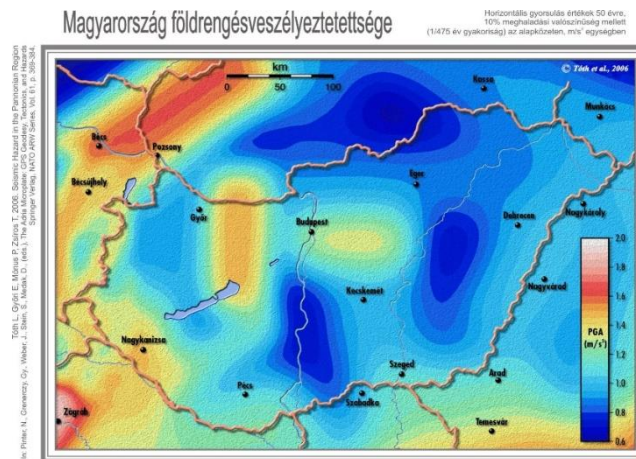
*A Magyar Geotechnikai Egyesület elnöke, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékének docense. Többek között a talajfolyósodás jelenségének vizsgálata, talajválás elemzés és a telítetlen talajok viselkedése tartozik kutatási területei közé.*

## 1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedben a nemzetközi szakirodalomban a korábbinál nagyobb figyelem fordult a mérnöki szerkezetek szeizmikus teherre való méretezésére, aminek eredményeként több nemzetközi együttműködés is indult újfajta vizsgálati módszerek kidolgozására, melyek segítségével a földrengések hatásai jellemezhetőek. A mérnöki gyakorlatban a magasépítési szerkezetek földrengésre való teljesítőképességének vizsgálatára bevett módszerek léteznek, ugyanakkor a közúti infrastruktúra különböző szerkezeteinek, földműveinek vizsgálata a mai napig jellemzően egyszerűsített, pszeudostatikus módszerekkel történik, annak ellenére, hogy ezen a szerkezetek vizsgálatára a nemzetközi szakirodalomban számtalan javaslat lelhető fel. Az infrastruktúra különböző elemeinek vizsgálata, a vizsgálati módszerek pontosítása különösen fontos lehet egy szeizmikus esemény bekövetkezése esetén, ugyanis ezek adják legtöbb esetben a mentési munkálatok elsődleges útvonalait. Ahhoz, hogy az építményeink szeizmikus teljesítőképességét számszerűsíteni lehessen, a várható károk mértékét, azok bekövetkezésének valószínűségét kell megbecsülnünk. Erre az egyik legelterjedtebb módszer az egyes szerkezetek sérülékenységi görbéinek meghatározása, melyek valamely szeizmikus intenzitásparaméterhez tartozóan különböző kárstípusok meghaladási valószínűségét mutatják meg. A görbék előállítása bevett gyakorlat magasépítési szerkezetek esetén, infrastruktúra földművek esetén azonban hazai gyakorlatban a szeizmikus hatások vizsgálatában kevés hangsúlyt kap. A görbék meghatározásához szeizmikus talajválás elemzésre van szükség. Erre a mai napig leggyakrabban alkalmazott módszerek az ekvivalens lineáris, illetve a nemlineáris, egydimenziós elemzések, melyek azonban nem képesek a különböző szerkezetek geometriájának a hatásának a figyelembe vételére. Infrastruktúra szerkezetek vizsgálatához jellemzően legalább 2 dimenziós elemzést kell végrehajtani, mely jellemzően véges elemek vagy véges differenciák módszerén alapuló számításokat jelent. A talajválás elemzés alapján meghatározhatók az egyes szerkezetek különböző szeizmikus intenzitás melletti viselkedése, majd erre alapozva a sérülékenységi görbék előállíthatók.

## 2. FÖLDRENGÉS-VESZÉLYEZTETETTSÉG

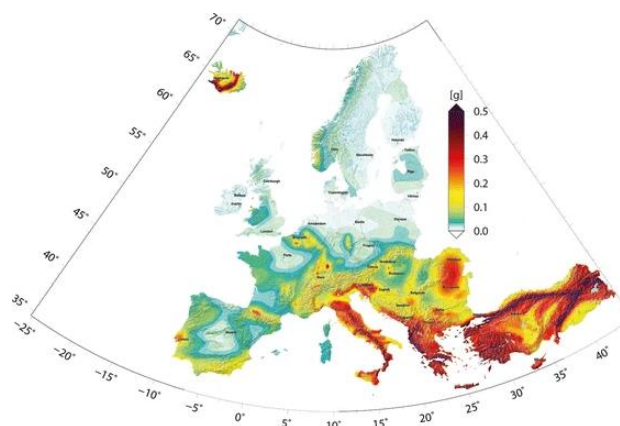
A különböző tartószerkezetek földrengésre való tervezése során bevett módszer az Eurocode-8-ban meghatározott, 5%-os szerkezeti csillapításhoz tartozó rugalmas válaszspektrumok alkalmazása az adott szerkezet szeizmikus válaszána vizsgálatára. Ezek a válaszspektrumok különböző periódusidejű, egyszabadságfokú rendszerek által elszennvedett legnagyobb gyorsulások burkológörbéi, melyek alapján a különböző szerkezetek szeizmikus terhekre való válasza meghatározható. Az analízis alapjaként szeizmikus veszélyeztetettségi analízisek eredményeként meghatározott, alapköveti gyorsulások értékei, valamint az alapkövetre jellemző válaszspektrum alakja szolgál. Különböző rézsűkre, illetve bevágásokra vonatkozóan a szabvány megengedi a véges elemek és véges differenciák, valamint merev blokkok elcsúszásának elvén való analízist (MSZ EN 1991-1-7, 2006), ezek mellett pedig lehetőséget ad egy ezektől jelentősen egyszerűbb, pszeudostatikus vizsgálat elvégzésére. Hasonló módszerek állnak rendelkezésre nagyobb vízépítési műtárgyak, pl. völgyzárógáták szeizmikus vizsgálatára is (Nagy & Illés 2020). A földrengésveszélyeztetettség tartószerkezetek és különböző infrastruktúra és vízépítési földművek esetén is az Eurocode 8 nemzeti mellékletében meghatározott szeizmikus zónatérképpel (MSZ EN 1991-1-7 NB, 2006) vehető figyelembe, mely a 475 éves visszatérési idejű, alapkövetre megadott horizontális gyorsulások értékeit mutatja be. A szabványban bevezetett zónatérkép az 1. ábrán látható földrengésveszélyeztetettségi térképen alapul (Tóth et al., 2006).



1. ábra: Magyarország földrengésveszélyeztetettsége 475 éves visszatérési idejű alapkőzeti horizontális gyorsulások értéke (Tóth et al., 2006)

Hasonló alaptérképek más országokban is elérhetők, azonban a jelenlegi szabályozások nem biztosítják az országhatárokon az azonos gyorsulási értékeket így olyan esetek is előfordulnak, hogy az országhatárt átlépve az alapkőzeti gyorsulások jelentősen csökkennek vagy növekednek. Ennek az ellentmondásnak a feloldását célozta meg a SHARE projekt (Giardini et al., 2014), mely eredményeinek mérnöki gyakorlatba való átvezetése azonban még a jövőbeni szabályozások feladata.

A földrengések intenzitásának jellemzésére leggyakrabban a legnagyobb gyorsulás (Peak Ground Acceleration, PGA) értékét alkalmazzák a szakirodalomban, a hazai földrengésveszélyeztetettségi térképek is ezt a jellemzőt adják meg. A legnagyobb gyorsuláson túl azonban az adatsor idő szerinti integrálásával a rögzített sebességek, valamint elmozdulások adatsora is meghatározható. A rögzített legnagyobb elmozdulás értékével (Peak Ground Displacement, PGD) többek között a szerkezetek által elszenvedett elmozdulások is jellemezhetőek, mely töltések és rézsúk vizsgálatának alapjául szolgálhat. A PGA értéke mutatja az egyes rengések során rögzített legnagyobb gyorsulás értékét, ugyanakkor nem alkalmas a földrengés során felszabaduló energia meghatározására. Ennek a jellemzésére többek között az Arias-intenzitás (Ia), vagy az összegzett abszolút sebesség (CAV) alkalmazható (Kramer, 1996).



2. ábra: Share projekt keretében meghatározott ESHM13 modell 475 éves visszatérési idejű alapkőzeti horizontális gyorsulások értékeivel (Woessner et al., 2015)

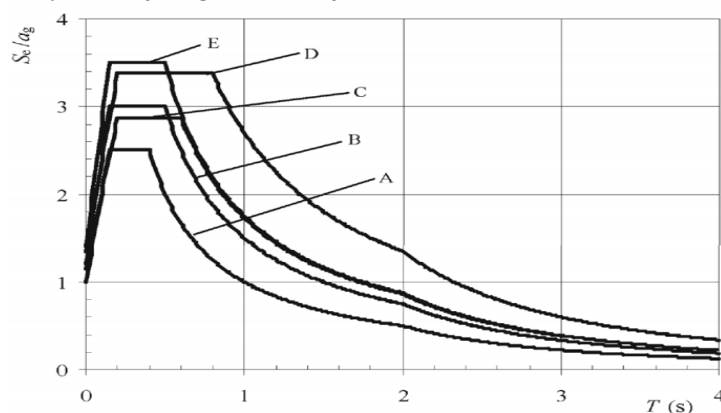
Mérnöki értelemben alapkőzetként a 700-800 m/s-nál magasabb nyíróhullám terjedési sebességgel rendelkező kőzeteket tekintjük (a SHARE projekt, illetve a hazai szabályozások is 800 m/s értéket vesznek figyelembe). Általánosságban a nem kőzetszerű viselkedést mutató talajok nyíróhullám terjedési sebessége ennél jelentősen alacsonyabb, alapkőzetként jellemezhető talajokat csak akár 60 m-nél is nagyobb mélységekben találunk különböző hazai talajrétegződéseket vizsgálva. A felszín felé

csökkenő nyíróhullám terjedési sebesség módosítja az alapkőzet felől érkező rengéshullámokat, melyek hatását a jelenlegi szabályozásokat követve az Eurocode 8-ban meghatározott talajszorzókkal vehetjük figyelembe. A talajszorzók értéke alapvetően az adott helyszíni talajrétegződés felső 30 m-es mélységében jellemző átlagos nyíróhullám terjedési sebesség ( $V_{s,30}$ ) alapján határozható meg. A mérnöki gyakorlatban csak ritkán készülnek olyan vizsgálatok, melyek célja a nyíróhullám-terjedési sebesség mérése, ezért a szabvány a rétegsor rövid leírásával, valamint egyéb, egyszerűbb, és jellemzően olcsóbban elvégezhető módszerekkel is meghatározható paramétereket is megad az egyes talajosztályokhoz.

1. táblázat: Eurocode 8-ban meghatározott talajosztályok (MSZ EN 1997-1-7, 2006)

Általajosztály	Leírás	Paraméterek		
		$V_{s,30}$ (m/s)	N <sub>SPT</sub> (ütés/30cm)	$c_u$ (kPa)
<b>A</b>	Szilárd kőzet vagy kőzetszerűen viselkedő geológiai képződmény, amely felett legfeljebb 5m gyengébb van	> 800	-	-
<b>B</b>	Nagyon tömör homok-, kavics-, vagy kemény agygrétegek, legalább több 10 m vastagságban, a mechanikai jellemzők a mélységgel fokozatosan növekednek	360 – 800	> 50	> 250
<b>C</b>	Tömör vagy közepesen tömör homok-, kavics- vagy merev agygrétegek, több tíz vagy akár több száz m vastagságban.	180 - 360	15 – 50	70 - 250
<b>D</b>	Laza vagy közepesen tömör kohézió nélküli talaj (némi puha kötött réteggel vagy anélkül), vagy túlnyomóan puha – gyúrható kötött talaj	<180	< 15	< 70
<b>E</b>	Felszíni üledékréteg, amely a $V_s$ értékek szerint C vagy D osztályú, 5-20 m vastagságú, alatta 800 m/s-nál nagyobb nyíróhullám-sebességű, merevebb agyag			
<b>S<sub>1</sub></b>	Puha agyagból/iszapból álló vagy legalább egy 10 m vastag agyagot/iszapot tartalmazó, nagy plaszticitású ( $I_p > 40$ ) és víztartalmú rétegek	<100	-	10 - 20
<b>S<sub>2</sub></b>	Folyósodásra hajlamos talajok, érzékeny agyagok vagy más olyan talajrétegek, amelyek nem sorolhatók az A-E vagy S1 osztályba			

A különböző talajosztályokhoz különböző alakú válaszspektrumok tartoznak, melyek fő paramétereit alapvetően a jellemző periódusidők, valamint a különböző talajszorzók határozzák meg. A talajokra vonatkozó paramétereken túl a szerkezetek duktilitása, fontossági osztálya, valamint a szerkezeti csillapítás mértéke befolyásolhatja a görbék alakját.



3. ábra: MSZ EN 1998-ban meghatározott válaszspektrumok a talajosztályokhoz (MSZ EN 1991-1-7, 2006)

2. táblázat: Általajosztályokhoz tartozó talajtényezők (MSZ EN 1991-1-7, 2006)

Talajosztály	S talajtényező
A	1,00
B	1,20
C	1,15
D	1,35
E	1,40

Különböző rézsűk pszeudostatikus vizsgálata esetén a szeizmikus terhet a talajtömegre ható függőleges és vízszintes erőként kell figyelembe venni az Eurocode-8 javaslatait követve. A vízszintes teher ( $F_h$ ) értéke az alapközeti gyorsulás ( $a_g$ ), a gravitációs gyorsulás ( $g$ ) és a talajszorzó ( $S$ ), valamint az elcsúszó talajtömeg súlyának ( $W$ ) együttes figyelembe vételével határozható meg az alábbi formában. A függőleges teher értéke a horizontális erő függvényében határozható meg.

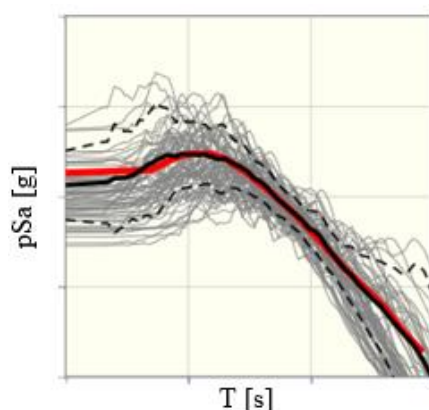
$$F_h = 0.5 \cdot \frac{a_g}{g} \cdot S \cdot W \quad (1)$$

Az előzőekben összefoglalt módszerek segítségével az adott szerkezet szeizmikus teherre való teljesítőképessége meghatározható, egy biztonsági tényező számítható. A különböző földművek, rézsűk, bevágások esetén az Eurocode-8 nem rendelkezik egyértelműen a szeizmikus hatásokra való megkövetelt biztonság értékéről, a tervezés során a tönkremenetellel szembeni biztonságot 1,25-1,35 között javasolja figyelembe venni, de a pontos érték meghatározását a tervező belátásra bízta. A közúti infrastruktúra különböző szerkezetei, illetve vízépítési földművek esetén ugyanakkor sokszor nem a tönkremenetellel szembeni biztonság, hanem a földrengések hatására elszendvedett elmozdulások nagysága a mértékadó a szerkezetek használhatósága szempontjából.

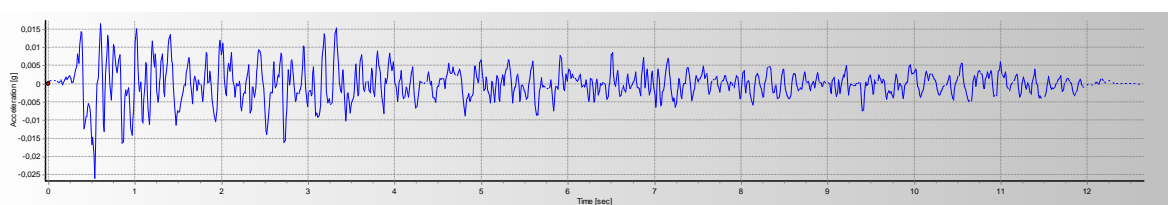
A kialakuló elmozdulások meghatározása talajválasz elemzés segítségével történik. Ebben az esetben a talajoszlop módosító hatását nem a szabványban megadott talajszorzók alkalmazásával vesszük figyelembe, hanem az adott helyszínen feltárt talajrétegződés módosító hatását vizsgáljuk különböző módszerekkel. A vizsgálat eredményeként az adott helyszínen pontosan meghatározható, hogy az alapközet felől érkező földrengéshullámok hatása (pl. gyorsulások, elmozdulások) hogyan változik a felszín felé haladva. Az ilyen jellegű talajválasz-elemzés pontosabban jellemzi a helyszíni viszonyokat, és jellemzően a szabványos módszerekhez képest alacsonyabb igénybevételeket eredményez.

### 3. TALAJVÁLASZ ELEMZÉS

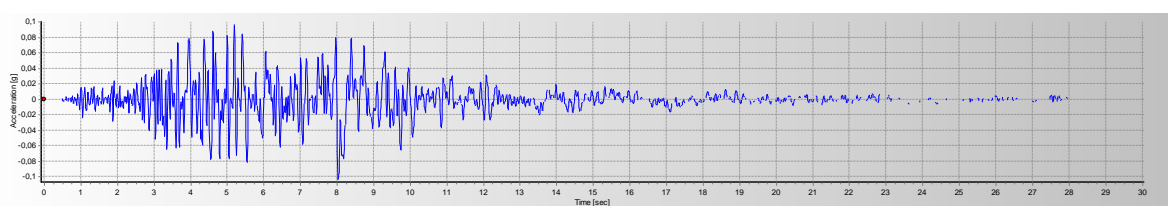
A talajválasz elemzést ebben az esetben az alapközeti válaszspektrum alakját követő földrengés-adatsorok alapján javasolt elvégezni. Különböző regisztrátumok kiválasztása számos nyilvánosan elérhető adatbázisból történhet. Európai szinten a SHARE projekt keretében kidolgozott RESORCE (Akkar et al., 2013) adatbázis foglalja össze a különböző adatbázisokban fellelhető adatsorokat, míg az amerikai földrészen a PEER, 2013 különböző adatbázisai nyújtanak hozzáférést különböző földrengés-adatsorokhoz. Ezekon felül különböző szoftverek is elérhetők, melyek segítséget nyújtanak a különböző adatbázisokhoz való hozzáféréshez. Az alkalmazott rengéseket úgy kell megválasztani, hogy azok jellemzői egybeessenek a vizsgált területen várhatóan bekövetkező földrengések különböző paramétereivel (pl. fészekmélység, epicentrális távolság, magnitúdó, törésvonal jellege, talajosztály), valamint az egyes rengések adatsora alapján számítható 5%-os szerkezeti csillapításhoz tartozó rugalmas válaszspektrum alakja a lehető legjobb egyezést mutassa az alapközeti válaszspektrum alakjával. A rengéseket javasolt „A” osztályú altalajon rögzített adatsorok közül kiválasztani, mely esetben nincs szükség további dekonvolúciós számításokra az alapközeti rengés adatsorának meghatározásához. A 4. ábra különböző regisztrátumok alapján számítható rugalmas gyorsulások válaszspektrumok illeszkedését mutatja az alapközeti válaszspektrumhoz. Az 5-6. ábrán a fentiek szerint megadott feltételeknek megfelelő idő-gyorsulás adatsorok láthatók.



4. ábra: A PEER adatbázisból megadott paramétereknek megfelelő földrengések válaszspektrumai a feltételként megadott rugalmas spektrumhoz képest (PEER, 2013)



5. ábra: San Fernando rengés



6. ábra: Northridge-01 rengés

Az input adatsorok kiválasztását követően a talajválasz elemzés elvégzésre különböző módszerek állnak rendelkezésre, melyek a számítástechnika fejlődésével egyre bonyolultabbá váltak és melyek segítségével a talajok viselkedését egyre pontosabban képesek vagyunk leírni. A folyamatos fejlődés ellenére azonban egyik módszer sem képes maradéktalanul leírni a viselkedést, ezért minden esetben egyszerűsítésekkel kell élnünk. A módszereket ezek alapján lineáris, ekvivalens lineáris, illetve nemlineáris módszereként szokás osztályozni. Az analíziseket általában 1D talajoszlopokra végezzük el, a talajrétegeket végtelen kiterjedésűnek és vízszintes felületűnek feltételezve. Az 1D analízisek azonban nem képesek figyelembe venni a különböző szerkezetek geometriájának miatti módosító hatásait. Amennyiben ennek a vizsgálata a cél, 2D vagy 3D analízis elvégzése szükséges. Háromdimenziós vizsgálatok jellemzően csak speciális esetekben (pl. nukleáris erőművek, kiemelt fontosságú épületek) kerülnek elvégzésre, az analízisek számítási igénye miatt jellemzően 2D vizsgálatok készülnek, melyek az infrastruktúra jellemzően vonalas szerkezetei esetén jó közelítéssel alkalmazhatók. Bár a talajok viselkedését jobban leíró módszerek is rendelkezésre állnak, a mérnöki gyakorlatban a mai napig a legelterjedtebb az ekvivalens lineáris analízisek alkalmazása.

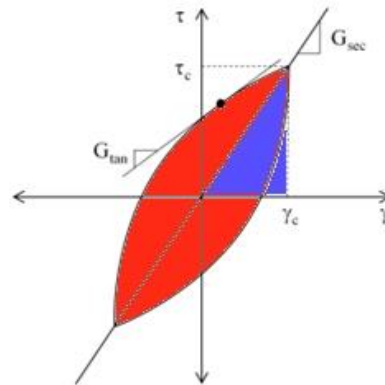
Az egyes módszerek között a talajok viselkedésének a modellezésében lehet különbséget tenni, ezért ezek vizsgálata előtt röviden a talajok ciklikus terhelésre való viselkedését kell tárgyalnunk.

#### 4. TALAJOK CIKLIKUS TERHELÉSRE VALÓ VISELKEDÉSE

A talajok ciklikusan ismétlődő terhelésre való viselkedését elősorban két paraméter határozza meg: a nyírési modulus és az anyagi csillapítás mértéke. Egy talajkörnyezetből kiragadott elemi hasáb ciklikus



teherre való viselkedése a hasábban ébredő nyírófeszültségeket és nyírási alakváltozásokat vizsgálva hiszterézises viselkedést mutat, a nyírási alakváltozások változásával a nyírófeszültségek nemlineárisan változnak. A görbe meredeksége meghatározza az adott ciklusra jellemző nyírási modulus (érintő- $(G_{tan})$ , vagy húrmodulus ( $G_{sec}$ )) értékét. A görbe alatti terület pedig az energiadisszipáció mértékét mutatja meg.



7. ábra: Feszültségpálya tehermentesítés - újratelhelés ciklus során

Egy ciklus alatti energia-vesztesség mértékét a csillapítási tényező jellemzi, mely a disszipált és a teljes energia arányát fejezi ki. A disszipált energia a hiszterézisgörbe területe, a teljes energia pedig a húrmodulus alatti terület. A húrmodulus a következőképpen fejezhető ki:

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \tag{2}$$

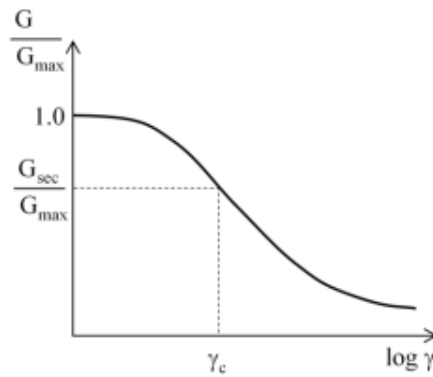
,ahol  $\tau_c$  a nyírófeszültség,  $\gamma_c$  pedig a nyírási alakváltozás egy ciklusra jellemző amplitúdója. A csillapítási tényező pedig a következőképpen határozható meg:

$$\xi = \frac{\Delta W}{4\pi W} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{hurok}}{G_{sec}\gamma_c^2} \tag{3}$$

,ahol  $A_{hurok}$  a hiszterézishurok területe,  $G_{sec}$  a húrmodulus,  $\gamma_c$  pedig a nyírási alakváltozás amplitúdója. Az alakváltozások növekedésével a nyírási modulus értéke csökken, a csillapítási tényező értéke azonban ezzel ellentétesen növekszik.

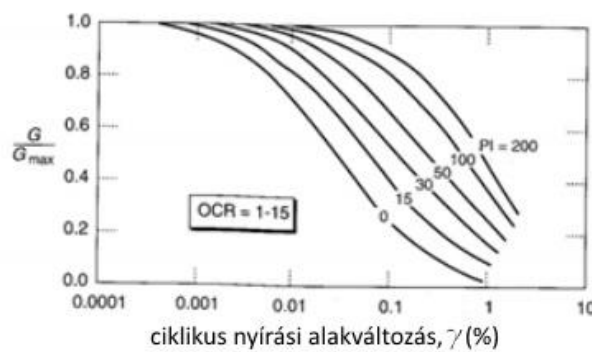
A nyírási modulus értéke tehát a létrejövő alakváltozások függvénye, minél kisebbek az alakváltozások, annál nagyobb a nyírási modulus értéke. Növekvő ciklikus alakváltozások hatására az egyes ciklusokhoz tartozó nyírási modulus értékek megadják a modulus leromlási görbét. Zérus alakváltozás esetében a nyírási modulus értéke maximális ( $G_{max}$ ) értékű. A pillanatnyi nyírási merevség értékét a maximális nyírási modulussal normalizálva a leromlási görbe általános formája állítható fel:



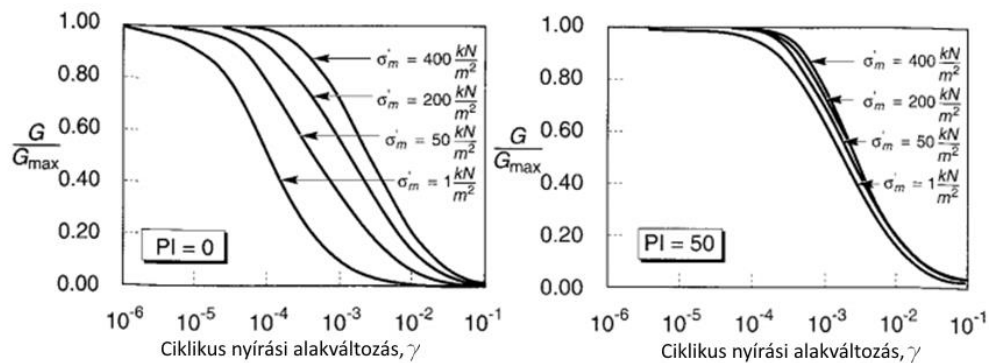


8. ábra: Nyírási modulus megváltozása az alakváltozások függvényében (Vucetic & Dobry 1991)

A kötött talajok nyírási modulusának értéke jelentősen függ a plaszticitásuktól. Laboratóriumi vizsgálatok alapján kimutatható, hogy a leromlási görbe jobbra tolódik kisebb plasztikus index és átlagos feszültségek esetén (Vucetic & Dobry 1991, Darendeli, 2001)



9. ábra: Normalizált nyírási modulus változása kötött talajok plaszticitása függvényében (Vucetic & Dobry 1991)



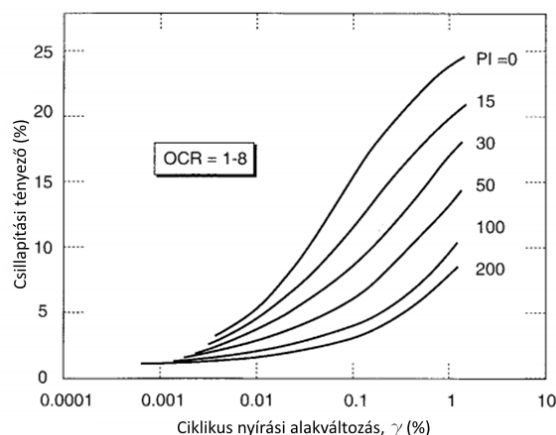
10. ábra: Normalizált nyírási modulus megváltozása az átlagos feszültségek függvényében különböző plaszticitású talajok esetén (Ishibashi & Zang 1993)

A nyírási modulus értéke helyszíni vizsgálatok alapján az adott helyszín in-situ állapotára jellemző feszültségek mellett nyíróhullám terjedési sebességek ( $v_s$ ) és a sűrűség ( $\rho_s$ ) alapján a következő képlettel meghatározható:

$$G_{max} = \rho_s v_s^2 \tag{4}$$

Elméleti megfontolások alapján a talajok egy lineáris viselkedéshez rendelhető alakváltozási határ alatt nem rendelkeznek csillapítással. Az elméletnek laboratóriumi mérések tapasztalatai azonban ellentmondanak, a talajok még nagyon kis alakváltozások mellett is rendelkeznek bizonyos mértékű

csillapítással. A nyírási modulus csökkenéséhez hasonlóan a csillapítási tényező értéke is jelentősen függ a plaszticitás mértékétől (Vucetic & Dobry 1991).



11. ábra: Plaszticitás hatása a csillapítási tényező megváltozására (Vucetic & Dobry 1991)

A csillapítás értékét továbbá az átlagos feszültség mértéke is befolyásolja, különösen alacsony plaszticitású talajok esetében. Ishibashi & Zhang 1993 után a csillapítási tényező kötött és szemcsés talajokra vonatkozóan is becsülhető a következő egyenlettel, ahol PI a plaszticitási indexet jelöli:

$$\xi = 0.333 \frac{(1 + \exp(-0.0145PI^{1.3}))}{2} \left[ 0.586 \left( \frac{G}{G_{max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{max}} + 1 \right] \quad (5)$$

## 5. TALAJVÁLASZ ELEMZÉS MÓDSZEREI

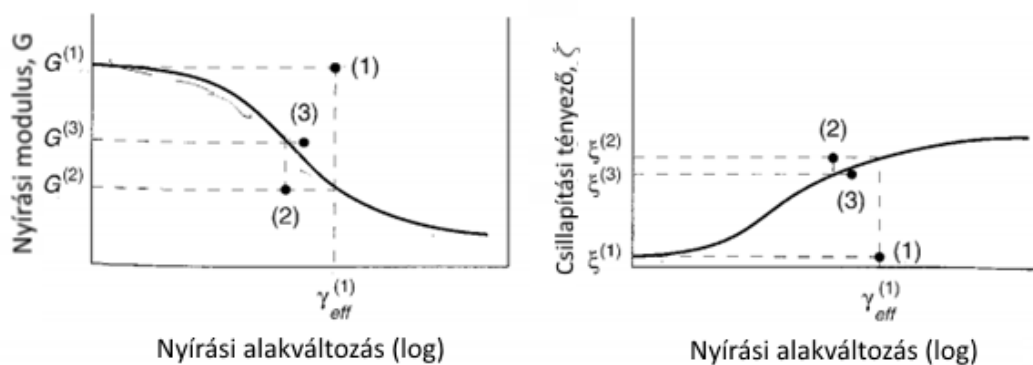
### 5.1. LINEÁRIS MÓDSZEREK

A talajválasz elemzés során alkalmazott lineáris modellek az előzőekben ismertetett viselkedést lineáris közelítésekkel írják le. A nyírási modulus és a csillapítás értékének viselkedése miatt ezek a lineáris közelítések csak kis alakváltozások esetén, mikor az alakváltozás növekedésével való változás még lineáris egyenletekkel megfelelően pontosan leírható, adnak elfogadható megoldást. A lineáris megoldások ebből kifolyólag csak relatív kis alakváltozásokkal járó földrengések esetén alkalmazhatók, ennek ellenére mégis meg kell említeni őket, mivel máig ezek az egyik leggyakrabban alkalmazott módszerek.

Lineáris talajválasz vizsgálat esetén az altalajviszonyok módosító hatását különböző transzferfüggvények írják le, melyek a figyelembe vett talajrétegződés felszínén meghatározott és az alapkőzetben működtetett paraméterek arányát írják le. A transzferfüggvények alkalmazását a földrengés alapkőzetben működtetett adatsorának Fourier-transzformációja teszi lehetővé, melynek segítségével a rengések bonyolult rezgésalakja különböző frekvenciájú harmonikus rezgések összegeként kifejezhető. Az így kapott rezgésalakok együtthatóit a hozzájuk tartozó transzferfüggvénnyel megszorozva a felszíni paraméterek Fourier-sorozata meghatározható, majd ennek az inverz Fourier-transzformációja megadja a módosult felszíni adatsort. Mivel a Fourier-transzformáció szuperpozícióra épül, ezért csak lineáris egyenletek és módszerek esetén alkalmazható.

### 5.2. EKVIVALENS LINEÁRIS MÓDSZEREK

A nemlineáris viselkedés közelítésére a lineáris számítások egyszerűségének megőrzése mellett az ekvivalens lineáris analízis ad lehetőséget, mely a számítások során alkalmazott nyírási modulus és csillapítás értékét a leromlási görbék alapján határozza meg az egyes talajrétegeket jellemző alakváltozásokkal kompatibilisen. A számítás a paraméterek iterációján alapul.



12. ábra: Ekvivalens lineáris számítás iterációs lépései (Kramer, 1996)

Habár a talajok nemlineáris viselkedése ilyen módon közelíthető, a nyírási modulus és a csillapítás értéke az analízis során továbbra is konstans értékű, annak ellenére, hogy a földrengés során az alakváltozások mértéke, ezzel együtt az ekvivalens lineáris paraméterek is nagymértékben változhatnak.

Az egyszerűsítések miatt a lineáris módszerek alkalmazása nagyobb alakváltozásokkal járó földrengések vizsgálata esetén már nem ad a valós viselkedést jól reprezentáló eredményeket, ezekben az esetekben mindenképpen bonyolultabb talajválasz elemzési módszerekhez javasolt fordulni.

### 5.3. NEMLINEÁRIS MÓDSZEREK

Az altalaj valós viselkedésének figyelembe vételére adnak lehetőséget a nemlineáris módszerek. Ezek a talajrétegződés módosító hatását nem a különböző frekvenciák függvényében, hanem az idő függvényében vizsgálják a Newmark-Beta integrálási séma (Newmark, 1959) alkalmazásával. A mozgásegyenletet az időben kis lépésközöket figyelembe véve integrálva bármilyen anyagmodell, legyen az lineáris, vagy bonyolultabb összefüggéseken alapuló, alkalmazható a talajválasz elemzésre. Minden lépés kezdetén a nyírási modulus leromlási görbéje segítségével meghatározható az aktuális feszültség- és alakváltozásviszonyokra jellemző nyírási modulus és csillapítás értéke, így bármilyen bonyolult talajviselkedés megfelelő lépésköz megválasztása mellett lineáris viselkedéssel közelíthető. Ezekkel a módszerekkel a földrengés során folyamatosan változó merevségi viszonyok jól jellemezhetők, bár ez a lineáris, ekvivalens módszerekhez képest jelentősen nagyobb számítási erőfeszítéseket igényel.

A gyakorlatban az adott feladat bonyolultságától függően mind a lineáris, mind az ekvivalens lineáris analízist is alkalmazzák. A számítások alapelvének eltérő volta miatt akár nagy eltérések is lehetnek a kapott eredményekben, ezért minden esetben alaposan meg kell vizsgálni az adott módszer alkalmazhatóságát, valamint a számítások eredményeit. A számítási módszerek rövid összehasonlítása a következőképpen foglalható össze:

- Az ekvivalens lineáris számítás során valótlanul nagy elmozdulások jelenhetnek meg, amennyiben az input mozgás egy jellemző, domináns frekvenciája megegyezik, vagy megközelíti a talajrétegződés rezonanciafrekvenciáját.
- Az ekvivalens lineáris és lineáris analízisek legnagyobb előnye kis számításigényükben rejlik, mely előny azonban a számítási kapacitások drasztikus fejlődésének hatására egyre inkább a háttérbe szorul.
- A nemlineáris analízis során megfelelően megválasztott anyagmodell segítségével a talajoszlop egyéb jellemzőinek megváltozása, mint a pórúsvíznyomás dinamikus hatásra való megnövekedése is figyelembe vehető, így akár a talajfolyósodás veszélye is értékelhető a számítások eredményeképpen.
- A nemlineáris anyagmodellek alkalmazása a leromlási és csillapítási görbék minél pontosabb ismeretét feltételezi, ezért ezek az analízisek jellemzően nagyobb mértékű előkészítő munkát igényelnek.

- Az egyes analízisek alkalmazhatóságát elsősorban a vizsgált földrengés hatására kialakuló alakváltozások mértéke befolyásolja. Alacsony alakváltozásszint esetén (kis magnitúdó, kis mozgások, merev altalaj) az ekvivalens lineáris és a nemlineáris számítások hasonló eredményre vezetnek, ezért ezekben az esetekben az egyszerűsége miatt az ekvivalens lineáris analízis a preferált. Nagy alakváltozások kialakulása esetén a talajrétegződés viselkedése már erős nemlinearitást mutat, ezért az ekvivalens lineáris számítások téves eredményekhez vezetnek. Ekkor mindenképpen nemlineáris analízis elvégzése szükséges.

### 5.3.1. VÉGES ELEMES MÓDSZEREK

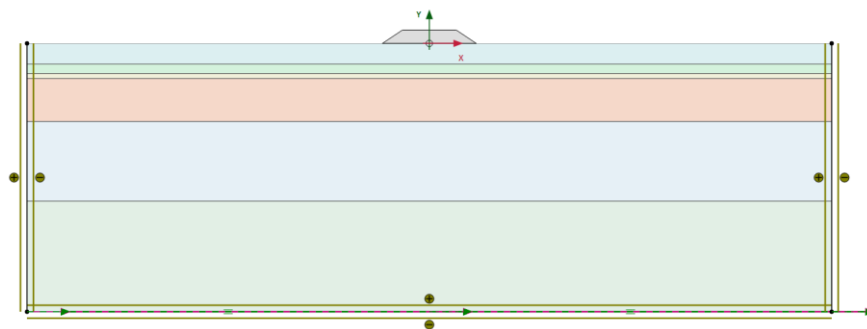
A véges elemes módszerek alkalmazása talajválasz elemzésre a számítási kapacitások drasztikus növekedésével az elmúlt évtizedben vált igazán lehetővé. A rendelkezésre álló módszerek közül a hazánkban legelterjedtebb PLAXIS 2D geotechnikai véges elemes szoftver talajválasz elemzésre való alkalmazását mutatjuk be.

A dinamikus vizsgálatokhoz alkalmazott végeselemes modell tér méretét a statikus vizsgálatokhoz hasonlóan úgy kell felvenni, hogy a modellhatárok szerepe a vizsgált tartománynál már ne érvényesüljön. Irodalmi ajánlások alapján a modellek szélesség/ mélység aránya 8 (Amorosi et al., 2010, Vrettos, 2013) – 30 (Visone et al., 2008) közötti értéket kell felvegyen ahhoz, hogy a peremfeltételek hatásai ne érvényesüljenek a modellközépen található vizsgált tartományában. Mivel a talajválasz analízis célja a talajrétegződés módosító hatásának értékelése, alapkőzeti gyorsulás-idő adatsorra alapozott vizsgálat esetén a talajrétegződést az alapkőzetig kell modellezni, mely 40-60 m-es mélységben található alapkőzet esetén ~300-500m szélességű modelleket is eredményezhet.

Szeizmikus analízisek esetén a véges elemes modell peremfeltételeit a vizsgálni kívánt földrengés szcenárió figyelembe vételével kell meghatározni. Földrengés-adatsor alkalmazása esetén az egyes modellperemeken viszkózus peremfeltételeket kell alkalmazni, melyek a beérkező hullámok egy részét képesek elnyelni, másik részét a modelltér felé visszaverik. A PLAXIS szoftverben alapkőzetben működtetett szeizmikus input esetén a vizsgálatokhoz különböző viszkózus peremfeltételek állnak rendelkezésre, valamint egy további feltétel, mely segítségével egydimenziós talajválasz elemzés végezhető (Plaxis Scientific Manual, 2018). Ezeket a peremfeltételeket röviden az alábbiakban foglaljuk össze.

- Compliant base (félig-elnyelő peremfeltétel) + free field (szabad közeg)

Egy képlékeny peremfeltétel és egy előírt elmozdulás együttes alkalmazását jelenti az alsó modellhatáron. Az előírt elmozdulás lehetővé teszi földrengések regisztrátumának működtetését egy dinamikus szorzó megadásával, miközben a bejövő hullámok energiájának egy része elnyelődik (Joyner & Chen 1975) a modellhatárokon alkalmazott interface elemek segítségével, melyek az energiaelnyelést biztosítják. A modell oldalsó peremein a hasonló elven működő free field peremfeltétellel közösen alkalmazva javasolt a használata szeizmikus vizsgálatokhoz. A peremfeltételek megfelelő figyelembe vételéhez a modell alsó peremén az alapkőzetben rögzített rengés rögzített adatsorának értékeit azok 0,5-szeresére kell csökkenteni a végeselemes egyenletek formulációjából kifolyóan (Plaxis Scientific Manual, 2018). Ez legegyszerűbben a kezdeti elmozdulásként 0,5 m megadásával történhet. A modellperemen inputként gyorsulás, sebesség vagy elmozdulás adatsorok is alkalmazhatók.



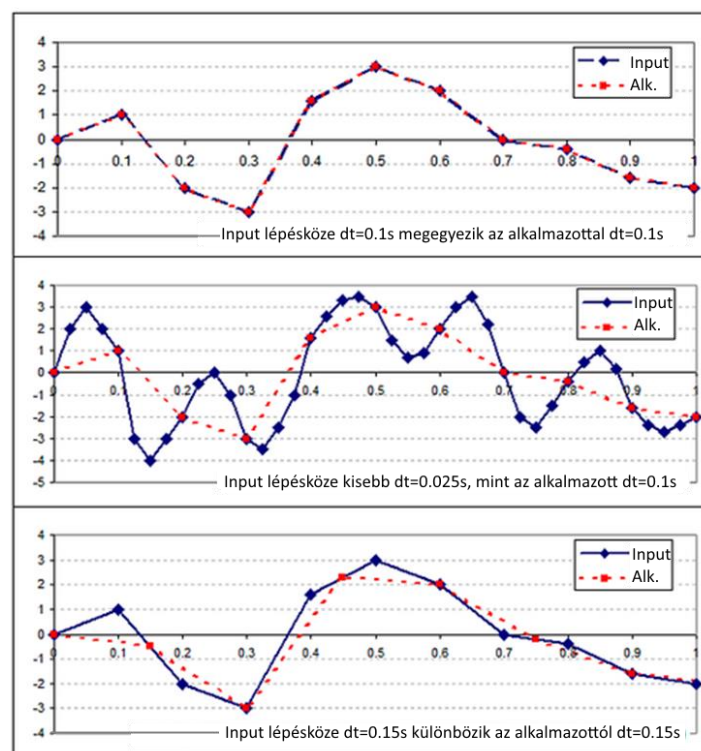
13. ábra: Szeizmikus vizsgálat céljából épített végeselemes modell képlékeny peremfeltételekkel

- Tied degrees of freedom (kapcsolt szabadsági fok)

Alkalmazása lehetőséget ad egydimenziós talajválasz-elemzés elvégzésére. A modell oldalsó határain alkalmazható, egyetlen végeelem szélességű talajoszlop modellezésére. A szoftver 2019.000 verzióját követően lehetőség adódik egy feltárás szelvényében megadott talajrétegződés alapján az egydimenziós talajválasz-elemzés automatikus elvégzésére egy beépített, Python alapú script segítségével. Az automatikus egydimenziós talajválasz elemzés egyszerű lehetőséget ad a kétdimenziós végeelemes modell néhány lépésben történő kalibrálására.

A véges elemes szoftverek az időben változó bemenő adatokat (pl. rögzített gyorsulás-idő adatsort) az implicit Newmark-Beta integrációs séma (Newmark, 1959) alkalmazásával veszik figyelembe, mely az analízis különböző időpontjaiban a megelőző lépéseket veszi alapul a következő időpillanat eredményeinek meghatározásához. Az integrációs séma paramétereinek beállításai manuálisan módosíthatók, ugyanakkor javasolt a  $\alpha = 0.25$  valamint  $\beta = 0.50$  alapértékeket alkalmazni.

Az alapközetben időben változó amplitúdójú adatsorok megadása esetén az adott adatsorhoz kapcsolódóan meg kell határozni az egymást követő lépések között eltelt idő mértékét, mely erőteljesen befolyásolja a megadott adatsor, illetve a számítások során alkalmazott adatsor viszonyát. Az input adatsor adatrögzítési frekvenciájához képest nem megfelelő lépésköz alkalmazása esetén a program az adott időpontokhoz tartozó értékeket veszi figyelembe, majd köztük lineárisan interpolál, mely az adatsor torzításához vezet. Ezt a hatást a 14. ábra szemlélteti. A lépésköz mértékét a szoftver automatikusan meghatározza, azonban javasolt manuálisan a rögzített adatok számával megegyező lépéseket beállítani az analízishez. A PLAXIS legfeljebb 10.000 különböző lépést tud kezelni dinamikus számítások esetén, mely az alkalmazható adatsorok hosszában való korlátként is értelmezhető. Az földrengésregisztrátumok rögzítési frekvenciája jellemzően 100-200 Hz között mozog, az alkalmazott adatsorok hosszát ennek megfelelően 50-100 s időtartamban kell korlátoznunk.



14. ábra: A lépésköz hatása az alkalmazott adatsorra (Visone et al, 2008)

A talajválasz elemzés során a rétegek maximális vastagságát a talajréteg sajátfrekvenciájának ( $f_m$ ) és az adott rétegben a nyíróhullám terjedési sebességének ( $V_s$ ) figyelembe vételével lehet meghatározni a

következő képlettel (Kramer, 1996), amely biztosítja, hogy a rétegek vastagsága nem korlátozza a vizsgált rengés egyes frekvenciatartományainak terjedését a talajoszlopban.

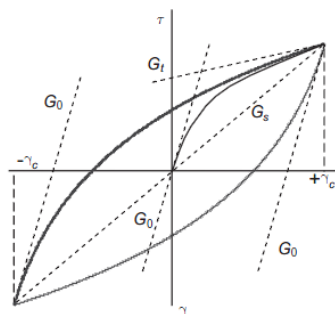
$$H = \frac{V_s}{4 \times f_m} \tag{6}$$

A végeselemes modellekben a feltételt a végeselemek méretére kell megszabni. A szeizmikus inputtól függően az elemméret a vizsgált földrengés-adatsor jellemző frekvenciatartományának maximumához tartozó hullámhossz ( $\lambda$ ) 1/8-a és 1/5-e között kell legyen (Kuhlmeyer & Lysmer 1973), amely kifejezhető a rétegre jellemző nyíróhullám terjedési sebességgel ( $V_s$ ) és a jellemző frekvenciával ( $f$ ).

$$\frac{\lambda}{5 \div 8} = \frac{V_s}{8 \times f} \tag{7}$$

A javasoltnál nagyobb elemméret alkalmazása esetén a számítás kiszűri a rengés magas frekvenciájú tartományát, mert az egyes végeselemek közti távolság nagyobb, mint azok hullámhossza.

A talajok szeizmikus teherre való viselkedését a PLAXIS alkalmazása esetén a Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSSmall) anyagmodellel (Benz, 2007) lehet figyelembe venni. Az anyagmodell segítségével a talajok kis alakváltozások tartományában magasabb nyírási merevsége, valamint annak az alakváltozások növekedésével való csökkenése is modellezhető. A tehermentesítés-újraterhelés ciklusok során a hiszterézises viselkedés a kezdeti feszültségpálya kétszeres növekményeként vehető figyelembe (Brinkgreve et al., 2007, Masing, 1926).



15. ábra: a HSSmall anyagmodellben a Masing-féle hiszterézises viselkedés (Brinkgreve et al, 2007)

Az anyagmodell input paraméterként kezeli a talajok nyírási modulusának kezdőértékét, valamint a nyírási modulus ~70%-ára csökkenéshez tartozó alakváltozás ( $\gamma_{0,7}$ ) nagyságát.

A kis alakváltozásokhoz tartozó nyírási modulus helyszíni geofizikai vizsgálatok alapján közvetve meghatározható a talajok nyíróhullám terjedési sebességének mérésével (MASW, Down-hole teszt, szeizmikus CPT), vagy közvetlenül mérhető speciális laborvizsgálatok alapján. A nyíróhullám-terjedési sebesség mérésére alkalmazott helyszíni módszer megválasztásánál figyelembe kell venni, hogy az egyes módszerek az altalaj különböző kiterjedésű területeit jellemzik (Lin & Stokoe 2008).

Minden előnye ellenére a HSSmall anyagmodell nem képes figyelembe venni a pórusvíznyomás megváltozását a földrengés időtartama alatt. A pórusvíznyomás szeizmikus teherre való változásának figyelembe vétele érdekében fejlettebb anyagmodellek (pl. UBC3D-PLM (UBCSAND), PM4SAND, Hypoplasztikus) (Beatty & Byrne 2011, Laera & Brinkgreve 2015) alkalmazása javasolt.

A talajok anyagi csillapítása többek között a talajszemcsék súrlódása és plaszticitása miatt lép fel. Ugyan a HSSmall anyagmodell képes bizonyos mértékű anyagi csillapítás figyelembe vételére a ciklikus terhelések esetén, ennek mértéke különösen kis alakváltozások esetén a tapasztalatok alapján csekélyebb a valóságban tapasztalható értéknél, ezért a valós viselkedés jobb reprezentációja érdekében többlet csillapítás alkalmazására van szükség. Az anyagi csillapításon felül a Rayleigh-féle csillapítással tudunk többletcsillapítást figyelembe venni, mely frekvenciától függő csillapítás formájában jelenik meg a véges elemes modellekben. A Rayleigh csillapítás paramétereinek meghatározására (a csillapítási

mátrixban  $\alpha_R$  a tömegmátrix;  $\beta_R$  pedig a merevségi mátrix szorzótényezője) több javaslat létezik (Park & Hashash, 2004). A paraméterek  $\sim 100$  m vastagságú talajrétegződés esetén jó közelítéssel meghatározható a talajrétegződés sajátfrekvenciája ( $f_m$ ), illetve egy magasabb rendű, az input rengés jellemző frekvenciatartományába eső sajátfrekvencia ( $f_n$ ) segítségével. Mélyebben fekvő alapkőzet esetén a bővített Rayleigh-formula használata javasolt, legalább négy sajátfrekvencia felhasználásával. A figyelembe vett többlet csillapítási értéke esetén  $\xi_i$  csillapítási tényező állandó, a Rayleigh-formulához szükséges paraméterek ( $\alpha_R$  és  $\beta_R$ ) pedig egyszerűen meghatározhatók a két frekvencia alapján. A többlet csillapítási tényező értékét 1-3% között javasolt figyelembe venni.

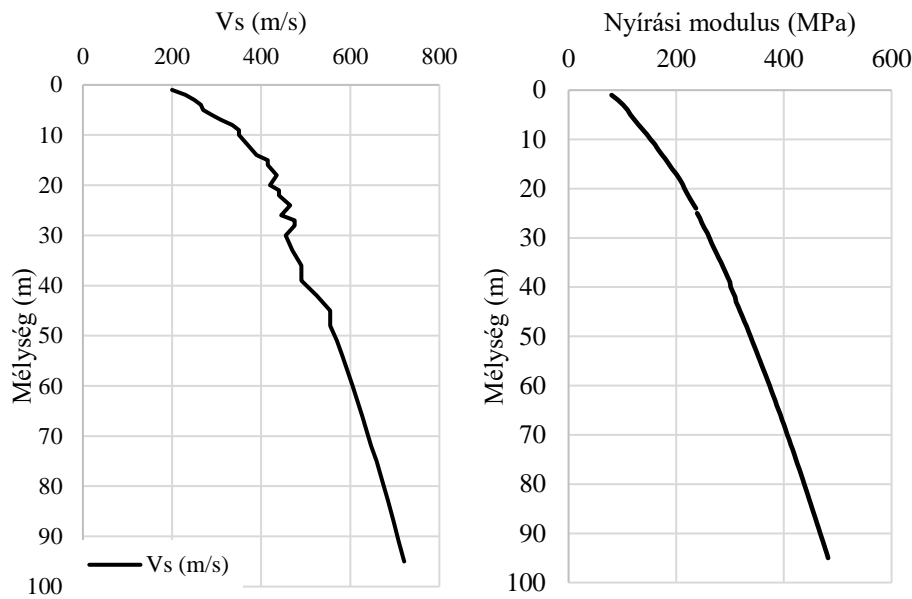
A megfelelően felállított véges elemes modellek eredményeként meghatározható a talajrétegződés módosító hatása.

A véges elemes módszerek lehetőséget adnak bonyolultabb anyagmodellek használatára, valamint egyszerűbb geotechnikai szerkezetek (pl. töltések, bevágások (Argyroudis & Kaynia 2015), útpályák és kifutópályák), vagy bonyolultabb építmények (hídfelek, azok háttöltése (Argyroudis et al., 2016), talajjavítási módszerek (Floroiu, 2016)) szeizmikus teljesítőképességének elemzésére.

Az Eurocode-8 legalább 3 rengés-adatsorra elvégzett talajválasz-elemzés esetén a legkedvezőtlenebb eredmény figyelembevételét javasolja, míg 7 db független rengésre vonatkozóan már az eredmények átlaga vehető figyelembe. A szerkezet viselkedését ugyanakkor jellemezhetjük különböző intenzitású szeizmikus teherre való viselkedés szempontjából is, melyet alapul véve a szeizmikus teljesítőképességét jellemző sérülékenységi görbék meghatározhatók. A különböző infrastruktúra szerkezetek sérülékenységi görbéinek analitikus módszerekkel történő meghatározására többek között a SYNER-G (NGI, 2011) projekt keretében Argyroudis & Kaynia által kidolgozott módszertanok alkalmazhatók.

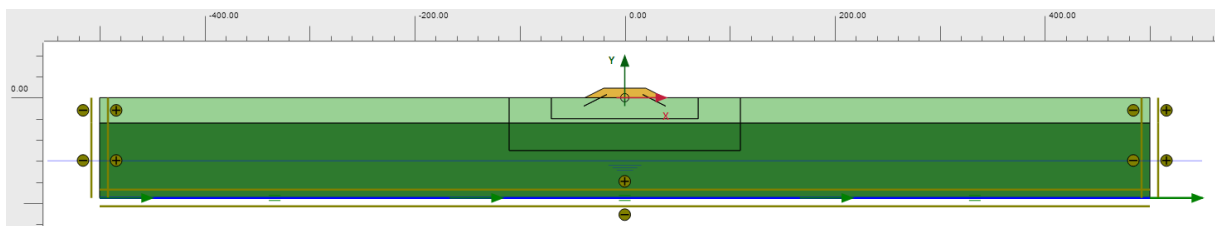
A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Geotechnika és Mérnökgeológia, valamint Hidak és Szerkezetek Tanszékének együttműködésében lehetőségünk adódott Irán fővárosában, Teheránban található autópálya híd rekonstrukciójához kapcsolódóan elvégzett geofizikai (Down-hole teszt) és talajmechanikai feltárások alapján a csatlakozó töltés nemlineáris, véges elemek módszerén alapuló szeizmikus teljesítőképességének vizsgálatára. Az altalaj rétegződését az elvégzett helyszíni feltárások, illetve a talajmechanikai feltárából vett talajminták laboratóriumi vizsgálati eredményei alapján kerültek meghatározásra. A területen a terepszint alatt 24m mélységig homokos iszap, majd sovány agyag talajokat tártak fel, a vizsgált töltés pedig helyi anyagú kavicsos iszapos homok – homokos iszap talajokból készült. A nyíróhullám terjedési sebességek meghatározása céljából készített Down-hole teszt 48 m-es mélységet ért el. A vizsgálat során mért legnagyobb terjedési sebesség 555 m/s értékre tehető, mely nem érte el a területre vonatkozó szabványban az alapkőzetre meghatározott 760 m/s értéket, az alapkőzet mélysége a mért értékek extrapolációjával 95 m-es mélységben határozható meg. A mért és extrapolált nyíróhullám terjedési sebességek, valamint az ezek alapján a 4. egyenlet szerint számítható nyírási modulusok értékét a 17. ábra mutatja. (Hübner & Mahler 2019)





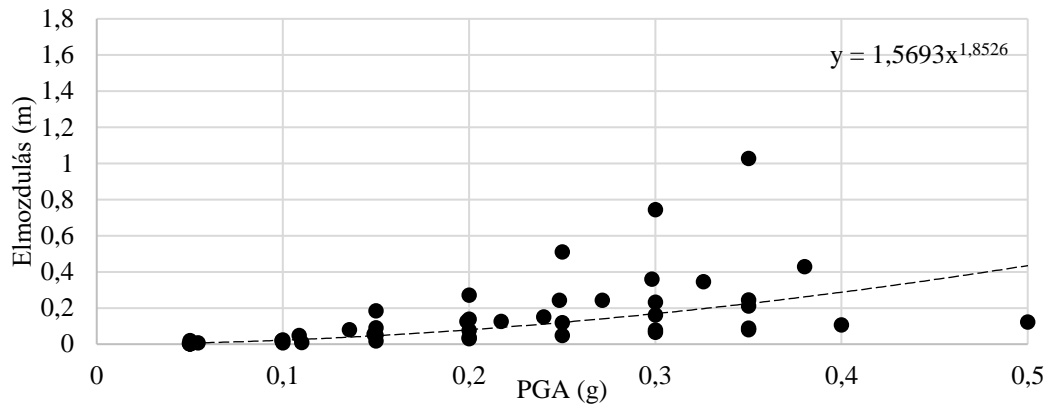
16. ábra: a) Nyíróhullám-terjedési sebesség; b) Nyírási modulus változása (Hübner & Mahler 2019)

A talajválasz elemzés alapjául a PEER adatbázisból kiválasztott, „A” talajosztályú helyszínen rögzített hat földrengésadatsor került alkalmazásra az alapközeti válaszspektrum alakjához igazodva. Az egyes rengések adatsorait 0.05g – 0.35g legnagyobb horizontális gyorsulás értékekre skálázva a felszíni szerkezetek elmozdulásai különböző intenzitású rengések esetére meghatározhatók. Az analízis során különböző magasságú rézsúk kerültek vizsgálat alá, melyek 3.0 m, 6.0m, illetve 9.0 m magassággal, valamint 1:2 rézsúszöggel rendelkeztek. A rézsúk geometriája miatt kétdimenziós talajválasz elemzés szükséges, melynek céljából a PLAXIS geotechnikai véges elemes szoftver lett alkalmazva. A szeizmikus vizsgálatok céljából a ciklikus viselkedés figyelembevételére képes Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSSmall) anyagmodell alkalmazható. A véges elemes modell felépítése során a „compliant base” és „free field” képlékeny peremfeltételek kerültek figyelembe vételre, a Rayleigh-csillapítás mértéke pedig 1,0 %-ban lett megállapítva. A modell geometriáját a 18. ábra mutatja.

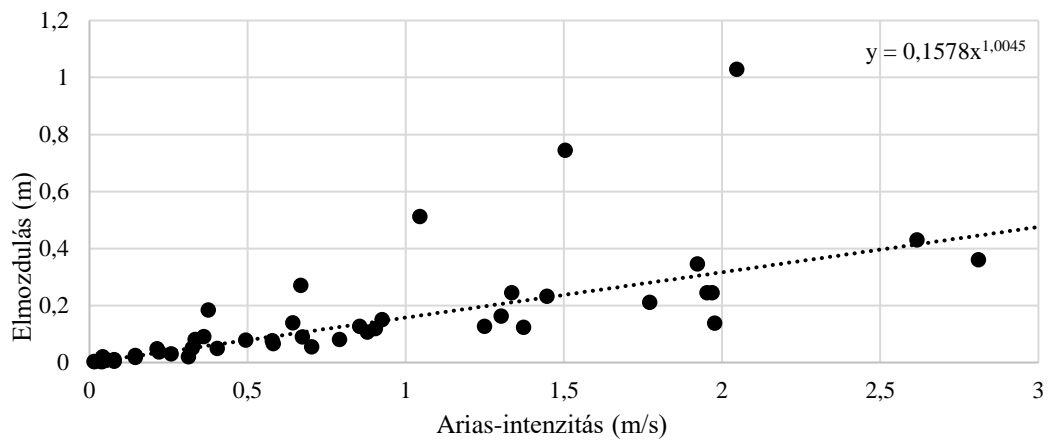


17. ábra: Véges elemes modell geometriája (Hübner & Mahler 2019)

Infrastruktúra szerkezetek esetében a szakirodalom a szeizmikus hatást, illetve a teljesítőképességet leggyakrabban az elszennvedett elmozdulások mértékével jellemzi, melyek az elvégzett talajválasz elemzés eredményeként a különböző szeizmikus intenzitásértékekhez tartozóan meghatározhatók. A töltéskorona elmozdulásait 6,0 m-es töltés esetére a 19. ábra mutat.



18. ábra: 6.0 m magas töltés elmozdulásai különböző maximális gyorsulások mellett (Hübner & Mahler 2019)



19. ábra: Elmozdulás – Arias-intenzitás összefüggés 6,0 m-es töltés esetén (Hübner & Mahler 2019)

A meghatározott diszkrét pontokra hatványfüggvény illeszthető, melynek általános alakja a 8. egyenlet formájában került meghatározásra:

$$PGD = \alpha_{Int} \times Intenzitásjellemező^{\beta_{Int}} \tag{8}$$

A függvény egyes paraméterei különböző intenzitásjellemező és töltésmagasság esetére a 3. táblázatban láthatók. (Hübner & Mahler 2019)

3. táblázat: Hatványfüggvény paraméterei

	PGA		Arias-intenzitás	
	$\alpha_{PGA}$	$\beta_{PGA}$	$\alpha_{Arias}$	$\beta_{Arias}$
9,0	3,7151	2,0004	0,2546	0,9225
6,0	1,5693	1,8526	0,1578	1,0045
3,0	0,9962	2,0384	0,0674	1,0017

A 3. táblázat alapján a PGA szeizmikus intenzitásjellemezőként való alkalmazása esetén közel négyzetes, az Arias-intenzitásra vonatkozóan pedig közel lineáris összefüggés állítható fel (Hübner & Mahler 2019).

A talajválasz elemzés eredményeként meghatározott elmozdulások, illetve az elmozdulások és a szeizmikus intenzitásjellemzők közötti összefüggéseket jellemző hatványfüggvények képezik a sérülékenységi görbék előállításának alapját.

## 6. SÉRÜLÉKENYSÉGI GÖRBÉK

A szerkezetek sérülékenységi görbéinek előállítására különböző módszerek léteznek (Kramer, 1996, Argyroudis et al., 2018), melyek közül az analitikus módszerek elsősorban a mérsékelt szeizmicitású területeken való alkalmazhatóságuk miatt emelkednek ki. Ezek a területeken, mint hazánkban is, kevés tapasztalat, írásos feljegyzés áll rendelkezésre a földrengések hatására bekövetkező károkról, melyek felhasználhatók volnának részletesebb statisztikai elemzések készítésére. Az analitikus módszerek segítségével nagy mennyiségű adat előállítható, melyek segítségével a szerkezetek sérülékenységének jellemzése már lehetővé válik. Magasabb szeizmicitású területeken ezen módszerek kisebb hangsúlyt kapnak, a földrengések során bekövetkezett károk mértékéről és kiterjedéséről készült felmérések nagy mennyisége miatt.

A szerkezetek sérülékenységének jellemzéséhez valamely intenzitásparaméter kiválasztott tartományát kell vizsgálni, melyet úgy kell megválasztani, hogy a szerkezet tervezési élettartama során várható szeizmikus hatásokat lefedje. A szakasz felső határaként szolgálhat többek között a nemzeti mellékletben meghatározott alapközeti gyorsulás értéke, mely esetben hazai szerkezetekre vonatkozóan az alapközeti legnagyobb horizontális gyorsulás értékét  $PGA = 0.15g$  értékben lehet felvenni. Az 5.3.1. fejezetben bemutatott analízis esetében az intervallum  $PGA = 0.05g - 0.35g$  között lett meghatározva. A szeizmikus hatást a tartományba eső különböző intenzitások mellett kell vizsgálni.

Az elmozdulásokat a gyakorlati alkalmazás megkönnyítése érdekében javasolt az elszenvedett károk mértéke alapján osztályozni, majd a sérülékenységi görbéket ezen károsztályok meghaladási valószínűségeként értelmezni. A különböző károsztályok határait a vizsgált szerkezetre vonatkozóan kell meghatározni. Földművekre és azokhoz kapcsolódó szerkezetekre vonatkozóan az alábbi károsztályok alkalmazása javasolt (Argyroudis & Kaynia 2015).

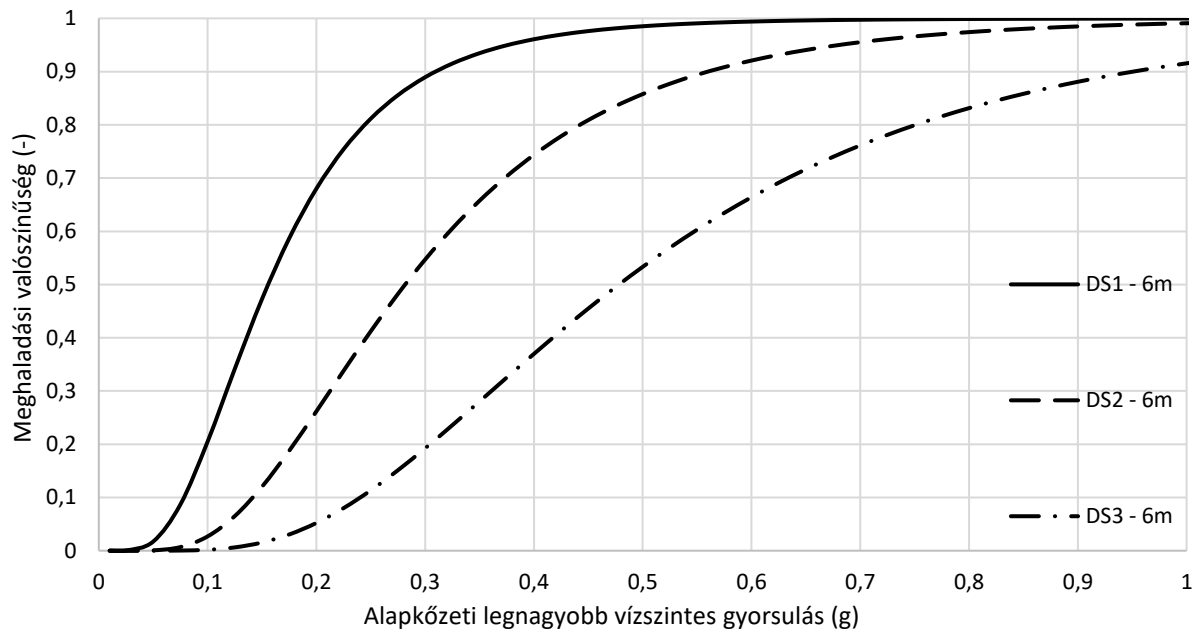
4. táblázat: Földművek jellemzésére javasolt károsztályok (Argyroudis & Kaynia 2015)

	Károsztály	Legnagyobb felszíni elmozdulás (PGD) [m]	
		min	max
Közúti töltés	Kismértékű (DS1)	0,02	0,08
	Középe (DS2)s	0,08	0,22
	Kiterjedt/Teljes (DS3)	0,22	0,58
Vasúti töltés	Kismértékű (DS1)	0,01	0,05
	Közepes (DS1)	0,05	0,10
	Kiterjedt/Teljes (DS1)	0,10	0,30

Annak valószínűségét, hogy a szerkezet által elszenvedett kár (D) meghaladja a vizsgált károsztályt ( $DS_k$ ), a sérülékenységi görbék írják le, melyeket a különböző szakirodalmak leggyakrabban lognormális eloszlású függvényekkel írnak le a 10. egyenlet alakjában, ahol a  $\Phi$  a hibafüggvény,  $\mu$  a medián jellemző,  $\beta$  pedig az analízisben rejlő bizonytalanságokat jellemző szórás értéke.

$$P(D > DS_k) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \Phi \left( \frac{\ln PGA - \ln \mu}{\beta \sqrt{2}} \right) \right] \quad (10)$$

Az elvégzett vizsgálatok bizonytalanságának értékelése során figyelembe kell venni a károsztályok határainak megválasztásában ( $\beta_{DS}$ ), a szerkezetek válaszában ( $\beta_C$ ), valamint a szeizmikus teherben ( $\beta_D$ ) rejlő bizonytalanságokat. A teljes analízis megbízhatósága ezek négyzetösszegeként jellemezhető. Egyéb adatok hiányában szakirodalmi ajánlásokat javasolt figyelembe venni az analízis megbízhatóságának becslésére (NIBS, 2004). A 21. ábra 6.0 m magasságú töltés esetére meghatározott sérülékenységi görbéket mutatja.



20. ábra Különböző károsztályokhoz meghatározott sérülékenységi görbék

A meghatározott sérülékenységi görbék alapján különböző szeizmikus intenzitásjellemző esetére meghatározható a különböző mértékű károk meghaladásának valószínűsége. A 19. ábrán bemutatott görbék alapján  $PGA = 0.15g$  esetén a kismértékű károk meghaladásának valószínűsége ~50%-ra tehető,  $PGA = 0.35g$  érték esetén azonban már 90 % feletti valószínűséggel bekövetkeznek a DS1 károsztályt meghaladó elmozdulások.

## 7. KONKLÚZIÓ

A különböző infrastruktúra szerkezetek szeizmikus terhelésre való vizsgálatára számos lehetőség áll rendelkezésre, ugyanakkor a szabványos keretek között a elvégzendő vizsgálatok jellemzően egy tönkremenettel szembeni biztonság meghatározását célozzák. Az infrastruktúra földművek és egyéb szerkezetek esetében azonban a földrengések hatására elszenvedett elmozdulások mértéke is meghatározó lehet a használhatóság szempontjából. A földrengések hatására különböző szerkezetek által elszenvedett elmozdulások, károk mértékét többdimenziós talajválasz elemzés eredményeként lehet meghatározni, mely eredményeit alapul véve különböző károsztályok meghaladásának valószínűségét jellemző sérülékenységi görbék előállíthatók. A cikkben bemutatásra kerültek a talajválasz elemzés alapjául szolgáló módszerek, különös tekintettel a véges elemes módszerek alkalmazására. A sérülékenységi görbék meghatározását Argyroudis & Kaynia által kidolgozott módszertant követve szemléltettük. A bemutatott módszertan mind a szerkezetek tervezése, mind meglévő építmények ellenőrzése során alkalmazható, valamint egyszerűen adaptálható más jellegű dinamikus terhelésre is (közúti, vasúti teher, árhullámok). Az elvégzett analízis segítségével ugyanakkor üzemeltetési kérdésekre vonatkozóan is hasznos információkkal szolgálhatnak az analízis eredményeként kapott sérülékenységi görbék, az egyes szerkezetek, földművek, műtárgyak gyengepontjai egyszerűen meghatározhatók.

## 8. IRODALOMJEGYZÉK

Akkar S., Sandikkaya M.A., Şenyurt M., Azari Sisi A., Ay B.Ö., Traversa P., Douglas J., Cotton F., Luzi L., Hernandez B. & Godey S. 2013: Reference database for seismic ground-motion in Europe (RESORCE), Bulletin of Earthquake Engineering, in press,

<http://link.springer.com/article/10.1007/s10518-013-9506-8>, <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9506-8>

Amorosi, A., Boldini, D. & Gaetano, E. 2010: Parametric study on seismic ground response by finite element modelling, *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, 515-528, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2010.02.005>

Argyroudis, S. & Kaynia, A.M. 2015: Analytical seismic fragility functions for highway and railway embankments and cuts, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 44. 10.1002/eqe.2563, <https://doi.org/10.1002/eqe.2563>

Argyroudis, S., Mitoulis, S., Kaynia, A. & Winter, M. 2018: Fragility assessment of transportation infrastructure systems subjected to earthquakes. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics V*, Austin, Texas, US, <https://doi.org/10.1061/9780784481479.018>

Argyroudis, S., Palaiochorinou, A., Mitoulis, S.A. & Pitilakis, D. 2016: Use of rubberised backfills for improving the seismic response of integral abutment bridges, *Bulletin of Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0018-1>

Beaty, M. H. & Byrne, P.M. 2011: Ubsand constitutive model. Itasca UDM website 904aR

Benz, T. 2007: Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences, *Mitteilung 55 des Instituts für Geotechnik der Universität Stuttgart*, Germany

Brinkgreve, R., Kappert, M & Bonnier, P. 2007: Hysteretic damping in a small-strain stiffness model. <https://doi.org/10.1201/noe0415440271.ch106>

Darendeli, M.B. 2001: Development of new family of normalized modulus reduction and material damping curves, PhD thesis, University of Texas, Austin.

Floroiu, L.G. 2016: A Contribution to Seismic Ground Response of Improved Foundation Soil, Dissertation, Technische Universität Graz

Giardini, D., Woessner J. & Danciu, L. 2014: Mapping Europe's Seismic Hazard. *EOS*, 95(29): 261-262, <https://doi.org/10.1002/2014eo290001>

Hübner, B. & Mahler, A. 2019: Közúti töltés sérülékenységi görbéinek vizsgálat, In: Baksa A., Bertóti E., Kiss L., Szirbik S. (szerk.): XIII. Magyar Mechanikai Konferencia elektronikus kiadványa. ISBN: 978-963-358-181-0

Ishibashi, I. & Zhang, X. 1993: Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations*, 33:1, 182-191, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(94\)92508-9](https://doi.org/10.1016/0148-9062(94)92508-9)

Joyner, W. B., Chen, A. T. F. 1975: Calculation of nonlinear ground response in earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 65, No. 5, pp. 1315-1336

Kramer, S.L. 1996: *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall

Kuhlmeyer, R. L, Lysmer, J. 1973: Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 99 (n.5), 421-427

Laera, A. & Brinkgreve, R. B. J. 2015: Site Response Analysis and liquefaction evaluation

Lin, Y. C., Stokoe, K. H. II, & Rosenblad, B. L. 2008: "Variability in VS Profiles and Consistency between Seismic Profiling Methods: A Case Study in Imperial Valley, California", the 3rd International Conference on Site Characterization (ISC'3), Taipei, Taiwan. April 2008`

Masing, G. 1926: Eigenspannungen und verfestigung beim messing (Self stretching and hardening for brass), in: *Proceedings of the Second International Congress for Applied Mechanics*, Zurich, Switzerland, 332-335 (in German)

MSZ EN 1991-1-7:2006: Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások. 1-7. rész: Általános hatások. Rendkívüli hatások

MSZ EN 1991-1-7:2006 NB Nemzeti melléklet

Nagy, L. & Illés, Zs. 2020: Völgyzárógáták földrengésbiztos tervezésének fejlődése, Hidrológiai Közlöny (elfogadott cikk)

National Institute of Building Sciences, 2004, HAZUS-MH: User's Manual and Technical Manuals, Report prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. USA

Newmark, N. M. 1959: A method of computation for structural dynamics. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 85 (EM3) 67-94.

Norwegian Geotechnical Institute. 2011: SYNER-G: D.3.7 – Fragility functions for roadway system elements. Deliverable 3.7 for the SYNER-G Project, 1-125

Park, D. & Hashash, Y.M.A. 2004: Soil Damping Formulation in Nonlinear Time Domain Site Response Analysis, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8 (n.2), 249-274, <https://doi.org/10.1080/13632460409350489>

PEER NGA-West2 Database: Timothy D. Ancheta, Robert B. Darragh, Jonathan P. Stewart, Emel Seyhan, Walter J. Silva, Brian S.J. Chiou, Katie E. Wooddell, Robert W. Graves, Albert R. Kottke, David M. Boore, Tadahiro Kishida, and Jennifer L. Donahue, 2013, PEER NGA-West2 Database, Report

Plaxis 2D Scientific Manual, 2018

Tóth et al. 2006: Seismic Hazard in the Pannonian Region, In: Pinter N., Grenczy Gy., Weber J., Stein, S., Medak, D. (eds.): The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards, Springer Verlag, NATO ARW Series, Vol. 61. p. 369-364, [https://doi.org/10.1007/1-4020-4235-3\\_25](https://doi.org/10.1007/1-4020-4235-3_25)

Visone, C., Bilotta E. & Magistris, FS De. 2008: Remarks on site response analysis by using Plaxis dynamic module, Plaxis Buletin Vol. 23, 14-18

Vrettos, C. 2013: Dynamic response of soil deposits to vertical SH waves for different rigidity depth-gradients. Soil Dynamics and earthquake Engineering Vol. 47, 41-50, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.04.003>

Vucetic, M. & Dobry, R. 1991: Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, Issue 1, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(91\)90820-C](https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90820-C)

Woessner, J., Danciu, L., D. Giardini & the SHARE consortium, 2015: The 2013 European Seismic Hazard Model: key components and results, Bull. Earthq. Eng., doi:10.1007/s10518-015-9795-1.



# Kerékpározás az erdészeti utakon: gondolatok egy kerékpáros turisztikai útvonalak értékelésére szolgáló módszer első alkalmazása nyomán

**Munkácsy András<sup>1</sup>, Virág Álmos<sup>1</sup>, Csendes  
Bálint<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Közlekedéstudományi Intézet, Közlekedésmenedzsment Osztály

E-mail: [munkacsy.andras@kti.hu](mailto:munkacsy.andras@kti.hu), [virag.almos@kti.hu](mailto:virag.almos@kti.hu), [csendes.balint@kti.hu](mailto:csendes.balint@kti.hu)

DOI: [10.36246/UL.2020.1.05](https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.05)

## KIVONAT

Egy határon átnyúló turisztikai kínálatfejlesztési projekt keretében kerékpártúra-útvonalak értékelését szolgáló módszer készült. Ennek első alkalmazása a magától értetődő fejlesztési feladatok mellett rávilágított, hogy a kerékpározást szolgáló nem közúthálózati infrastruktúra-elemek esetében számos kérdés vár tisztázásra, többek között a szabályok, a jelzések és a felelősségi viszonyok kapcsán. E cikk első része az értékelési módszert, majd Vas megyei kerékpáros útvonalak felmérését és értékelését ismerteti. A második része a kifejezetten a magánutakkal kapcsolatban felvetett kérdéseket a kerékpározható erdészeti utak esetében vizsgálja, feltárva a fogalmi és jogszabályi kereteket, az útvonalak kijelölését, a nyilvántartást és a tájékoztatást. Fő megállapítása, hogy elengedhetetlen a szabályok egyértelműsítése, az erdő védelmével és a közlekedéssel kapcsolatos előírások összehangolása.

*Kulcsszavak:* erdészeti utak, értékelési módszer, kerékpáros turizmus, kerékpározás, kerékpáros-útvonalak

## ABSTRACT

A method for the assessment of cycle-touring routes has been elaborated in a cross-border project for tourism development. Its first application highlighted that besides essential improvements, many questions have to be clarified in terms of infrastructure elements on non-public roads, including rules, signing, and responsibility issues. The first part of this article introduces the methods and then the survey and assessment of cycle routes in Vas County (Hungary). The second part studies the questions about private roads in the specific case of forest roads, revealing conceptual and legal frameworks, route assignment, road registry, and information provision. The key conclusion is that the rules have to be clarified, as well as, norms of forest protection and transport have to be harmonised.

*Keywords:* cycling, cycle tourism, cycle-touring routes, assessment methods, forest roads

### **Dr. Munkácsy András**

*A Közlekedéstudományi Intézet (KTI) Közlekedésmenedzsment Osztályának tudományos munkatársa, osztályvezetője. Fő szakterülete: utazási szokásvizsgálatok, mobilitásmenedzsment és -tervezés. Érdeklődési területe: a személyközlekedési folyamatok, különösen a közlekedés és turizmus kapcsolatának, valamint a nem motorizált közlekedési módok használatának a vizsgálata.*

### **Virág Álmos**



*A Közlekedéstudományi Intézet (KTI) Közlekedésmenedzsment Osztályának tudományos munkatársa. Fő érdeklődési területe: intermodalitás, fenntartható közlekedési formák (gyaloglás, kerékpározás), mobilitásmenedzsment.*

**Dr. Csendes Bálint**

*A Közlekedéstudományi Intézet (KTI) Közlekedésmenedzsment Osztályának tudományos munkatársa. Fő érdeklődési területe az innovatív térinformatikai feladatok és az adatbázis-programozás.*

## 1. BEVEZETÉS

A kerékpáros turizmus számára kijelölhető infrastruktúra-elemek közül mindeddig kevés figyelmet kaptak a nem közúthálózati létesítménytípusok: az árvízvédelmi töltésen, felhagyott vasútvonalak helyén vezető, valamint erdészeti, mezőgazdasági és egyéb utak. A közlekedés és turizmus összetett viszonyrendszere (részletesen ld. Jászberényi és Munkácsy, 2018) ezeken a helyeken különösen nehéz helyzet elé állítja a szakembereket, ha érvényesíteni kívánják a kerékpárosbarát létesítmények tervezésének és fejlesztésének alapelveit: a hálózatosodást, a fenntarthatóság erősítését, a környezeti összhangot és a magas szintű közlekedésbiztonságot. A témával az ezen elveket rögzítő, Kerékpározható közutak tervezése című útügyi műszaki előírás<sup>1</sup> is csak érintőlegesen foglalkozik:

*„Egyéb kerékpározásra alkalmas infrastruktúra-elemek. Jelen útügyi műszaki előírás a közúthálózat elemeire vonatkozik, nem tehet előírást egyéb infrastruktúra-elemekre. A kerékpárforgalmi hálózat szempontjából azonban nagy jelentőséggel bírnak az árvízvédelmi töltések útjai, az erdészetek által kezelt utak és egyéb magánutak, ezért ezeknél törekedni kell a tulajdonossal/üzemeltetővel történő egyeztetések során a kerékpárforgalom számára történő megnyitásra és fejlesztésük esetén a kerékpárosbarát kialakítás biztosítására.” (38. o.)*

Jelen cikk ötlete egy határon átívelő kerékpáros turisztikai fejlesztéseket megalapozó projekt<sup>2</sup> kapcsán vetődött fel, amely több problémára is rávilágított a magánutak hálózati, jogi, üzemeltetési, (közlekedés)biztonsági helyzetét és szerepét illetően. A cikk ezek közül elsősorban az erdészeti utakkal foglalkozik, amelyekből helyenként önmagukban is kiterjedt hálózatot jelöltek ki a kerékpáros turistáknak. A cél rávilágítani a fő problémákra, vitát kezdeményezni és fejlesztési javaslatokat megfogalmazni. A cikk tulajdonképpen két részből áll: az első egy módszert és első alkalmazását ismerteti, a második pedig az ennek során feltárt néhány problémát jár körül. Utóbbi esetében néhány hazai erdőgazdaság munkatársa – írásban vagy szóban – segítette az anyaggyűjtést.

A bevezető gondolatok után a cikk áttekintést ad a kerékpáros turizmus helyéről és jellemzőiről a kerékpározás és turizmus viszonyrendszerében, különösen az infrastruktúrával szemben támasztott követelményekről. Az esettanulmány ismerteti a külföldi példák (elsősorban a német ADFC értékelési rendszere) alapján adaptált turisztikai kerékpáros útvonalak értékelésére szolgáló módszertant, a 2019 tavaszán lebonyolított adatfelvételt és az eredményeket, tanulságokat. Utóbbiak alapján a cikk következő része áttekinti az erdészeti utak fogalmát, kijelölését kerékpározásra, valamint a kapcsolódó szabályozási kérdéseket.

Összefoglalóan elmondható, hogy a téma szakirodalmi feldolgozása gyerekcipőben jár, hazánkban az elmúlt években alig néhány tanulmány jelent meg a kerékpáros turizmus témakörében (pl. Sulyok–Magyar 2014, Mihálffy és mtsai. 2016, Donka–Gyuricza 2017, Somogyi 2018). Az erdészeti utakkal kapcsolatos irodalmak közül – melyek többsége a Soproni Egyetem erdőfeltárási szakmai műhelyéből

<sup>1</sup> e-ÚT 03.04.13:2019, a nemzeti fejlesztési miniszter 16/2017 (V. 25.) rendelete alapján közzétéve: 2019. május

<sup>2</sup> Magyar oldali szakaszfelmérés és MasterPlan túrakerékpáros és országúti kerékpáros összeköttetések fejlesztésére. A VELOREGIO (ATHU064) „Közös határon átnyúló kínálat fejlesztése és megvalósítása az osztrák–magyar határtérség kerékpáros régióiban” c. projekt (INTERREG V-A Ausztria–Magyarország program, 2018. jan. 1.–2020. dec. 31.) keretében. Megrendelő: Vas Megyei Önkormányzat. Készítette: KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. Témafelelős: Munkácsy András. 2019. május 31. Az elkészült tanulmány egyes részeit jelen cikk 3. fejezete ismerteti.

származik – alább többre is hivatkozunk, bár a téma szempontjából releváns kérdésekkel ezek is csak érintőlegesen foglalkoznak. Jelen cikk tehát e hiány egy részét kívánja pótolni azzal, hogy bemutatja a kerékpáros turisztikai útvonalak nemrég kidolgozott értékelési rendszerét, valamint felvet néhány kérdést a közúthálózaton kívüli infrastruktúra-elemekkel kapcsolatban.

Előrebocsátjuk, hogy a tanulmány alapvetően a kifejezetten turisztikai (és nem sport-) célú kerékpározással foglalkozik, tehát egyebek mellett figyelmen kívül hagyja a hegyikerékpározást és csak az alább ismertetett projekt szempontjából releváns mértékben tér ki az országúti kerékpározás néhány szempontjára. Továbbá jelezzük, hogy a cikk első mondatában felsorolt létesítménytípusok nem csak magánutak lehetnek, például a mezőgazdasági utak jelentős része – a közutak igazgatásáról szóló rendelettel<sup>3</sup> összhangban – a közutak közé tartozik; erre alább nem térünk ki részletesen.

## 2. A KERÉKPÁROS TURIZMUS FOGALMA ÉS SZEREPE

A kerékpáros turizmus definíciószerűen napon belüli vagy többnapos lakóhelyen kívüli tartózkodás, utazás, amelynek során a kerékpározás mint szabadidős tevékenység és helyváltoztatási mód alapvetően és jelentős részben meghatározza a turisztikai élményt. Ez magában foglal minden olyan eseményt vagy tevékenységet, amelynek során az egyén számára az jelenti a legfőbb vonzerőt, hogy egy adott helyet az élmény részét képező kerékpárral keres fel (Munkácsy és Jászberényi, 2018). E meghatározásból is egyértelmű, hogy a kerékpáros turizmust meg kell különböztetni a más célú kerékpározástól; ez esetben az utazás motivációja az aktív kikapcsolódás, mozgás, a szabadidő élménnyel teli eltöltése, azaz valamilyen természeti és/vagy épített látnivaló megtekintése vagy részvétel egy élményt jelentő programon. Mindez speciális infrastruktúrát is feltételez: a turizmus szempontjából útvonalhálózatot, szálláshelyeket, táblarendszert stb. (vö. a Kerékpáros Turizmus Fejlesztési Stratégiája 2010–2015), a közlekedés szempontjából pedig jelzéseket, a közúthálózatot kiegészítő elemeket stb.

Nehéz megbecsülni, hogy a kerékpáros turizmus mekkora súlyt képvisel a nemzetgazdaságban, hiszen nincsenek egyértelmű mutatószámok és kimutatások. Az elmúlt évtizedekben, különösen hazánk EU-csatlakozása után felgyorsult a kerékpározás infrastruktúrájának bővítése, amelynek lendületet adott, hogy hazánkban több nemzetközi vándorútvonal (az EuroVelo 6, 11, 13 és a nemrég kijelölt 14) is áthalad. Több közkezdvelt desztinációban létesültek turisztikai célra (is) jól hasznosítható útvonalak, különösen a folyó- és állóvizeink (Duna, Dráva, Tisza; Balaton, Fertő-tó, Tisza-tó, Velencei-tó) mellett, valamint egyes hegységeinkben (pl. Börzsöny, Bükk, Pilis) az erdészeti útvonalak kijelölésével. Bővültek a kerékpárosbarát szolgáltatások is, amelyek közül az egyre változatosabb igényeknek megfelelő, akár elektromos rásegítéssel működő járműveket is kínáló kerékpárkölszönzést, valamint a helyközi tömegközlekedésben egyre általánosabbá váló vasúti és terjedőben lévő közúti kerékpárszállítást érdemes kiemelni.

A fejlesztések szakpolitikai kereteit a Kerékpáros Magyarország Program 2007–2013, majd a Kerékpáros Turizmus Fejlesztési Stratégiája 2010–2015 jelölte ki. A hatályos dokumentumok közül a 2017-ben elkészült Nemzeti Turizmusfejlesztési Stratégia 2030 tekinthető irányadónak, amely a térségi fejlesztések mellett a „Kerékpáros infrastruktúra, szolgáltatások” fejezetben foglalkozik a témával, megállapítva, hogy „az ország kerékpárút-hálózata folyamatosan fejlődik, bár az utak állapota és kiépítettsége változó színvonalú, hasonlóan a városok belső kerékpározási lehetőségeihez” (69. o). Fejlesztési célként jelenik meg, hogy a jövőbeni hálózatfejlesztésnek egységes koncepció, üzemeltetési stratégia és tervezési irányelvek mentén kell megtörténnie, továbbá a kerékpárutak mellett kiegészítő létesítményeket, esőbeállókat, pihenőket kell építeni, beleértve az elektromos kerékpárok és mobiltelefonok töltéséhez megfelelő hálózatot, a nyilvános vezeték nélküli internet-hozzáférési pontokat. Szorgalmazza a pedelekekre is kiterjedő, országosan egységes közösségi kerékpáros rendszer fokozatos kialakítását. További cél olyan többnyelvű kerékpáros turisztikai honlap létrehozása, amelyen az infrastruktúra alapadatai is folyamatosan rendelkezésre állnak. A stratégia e fejlesztések mellett sürgeti a KRESZ<sup>4</sup> kerékpározásra vonatkozó szabályainak felülvizsgálatát is.

<sup>3</sup> 19/1994. (V. 31.) KHVM rendelet a közutak igazgatásáról

<sup>4</sup> 1/1975. (II. 5.) KPM-BM együttes rendelet a közúti közlekedés szabályairól (2020. január 31-én hatályos állapot)

A kerékpározás és a kerékpáros turizmus jövője szempontjából lényeges, hogy 2016-tól a téma az államigazgatás magas szintjén van képviselve (ITM Kerékpáros Koordinációs Főosztály), 2019-ben megalakult az Aktív és Ökoturisztikai Fejlesztési Központ (AÖFK), valamint tevékeny érdekképviselők (Magyar Kerékpárosklub, MAKETUSZ) működnek. 2017 óta egy kézben, a Magyar Közút üzemeltetésében van továbbá az országos kerékpárút-törzshálózat és a főutakkal párhuzamos lakott területen kívüli kerékpárutak.

### 3. KERÉKPÁROS TURISZTIKAI ÚTVONALAK FELMÉRÉSI MÓDSZERE

A fent hivatkozott VELOREGIO projekt kerékpáros turisztikai fejlesztéseket alapoz meg az osztrák–magyar határtérségben, hazánkban Vas megye területén (kivéve a megye bizonyos déli területeit, például az Őrséget). Itt előzetesen 23 túra- és 3 országúti kerékpáros útvonalat jelöltek ki (rövid szakaszokkal a határ túlsó oldalán). Az alábbiakban ezek komplex értékelését és az ehhez kapcsolódó módszert ismertetjük. A cél az útvonalak kerékpáros turisztikai jellemzőinek komplex értékelése volt, amely alapul szolgál nemcsak az összehasonlításhoz, hanem az egyes útvonalak, valamint a hálózati és határon átnyúló kapcsolatok fejlesztésének megalapozásához. A feladat továbbá kiterjedt az irányjelző és tájékoztató táblák, valamint forgalomszámláló pontok létesítésével kapcsolatos javaslatok kidolgozására is, ezekre azonban a cikk céljaival összhangban az alábbiakban csak utalunk.

#### 3.1. ÉRTÉKELÉSI MÓDSZER

A módszer alapeleme az értékelési rendszer, amely külföldi példák nyomán a hazai körülményekre lett átdolgozva.

##### 3.1.1. KÜLFÖLDI PÉLDÁK

A projektben az ausztriai partnerek is végeztek értékelést, amely általános adatokra (kezdő- és végpont, vonalvezetés stb.), a kerékpárút állapotára (burkolatminőség, jelzések, tömegközlekedési kapcsolatok stb.) és a turisztikai potenciálra (láttnivalók, pihenőhelyek stb.) terjedt ki. Ez azonban a hazai célokkal ellentétben nem az útvonalak valamennyi szakaszára, hanem az útvonalak egészére vonatkozik. A magyarországi útvonalak esetében különösen – de nem kizárólag – a burkolatminőség sarkalatos értékelési szempont, amely reálisnak tűnő előzetes feltételezések szerint a 18–177 km hosszú útvonalak esetében szakaszonként igen változatos képet mutat. Nem célszerű tehát egyetlen (az ausztriai esetben egyébként 0–3 közötti) mutatóval értékelni.

Az értékelési rendszerhez támpontokat adott a holland Fietsplatform<sup>5</sup> módszertana (Beanland 2013) is, amelyben nem komplex mutatót képeznek, hanem hat témakörben (tájkép, megközelíthetőség, a kerékpárút-hálózat minősége, az útvonal menti kényelmi szolgáltatások, a hálózat fenntartása és az útjelző táblák karbantartása) mérőszámok segítségével jellemzik az útvonalakat (pl. az attraktivitást a láttnivalók egy km<sup>2</sup>-re eső átlagos számával, a kerékpárosbarát szálláshelyeket pedig az egyéjszakás elszállásolást biztosító szálláshelyek 100 km-re eső átlagos számával).

A fő alapot a német ADFC<sup>6</sup> által kidolgozott kerékpárút-értékelési módszertan szolgáltatja, amelynek segítségével Németországban a 100 km-nél hosszabb útvonalakat évente értékelik. Ilyenből egyébként több mint 230 található, amelyek mind jelölt, névvel ellátott regionális kerékpárutak. Az értékelés során az útvonalakat 50 km-es egységekre bontják, melyeket ezután kilométerenként fotódokumentációval kiegészítve értékelnek. Végeredményként minden útvonal 0 és 5 csillag közötti minősítést kap. Az 5 csillaggal minősített útvonalak ún. prémium kerékpárutakká válnak, amelyeket a turisták előnyben részesítenek az útvonaltervezés során, ami tehát jelentős marketingértéket képvisel a turisztikai piacon.

<sup>5</sup> A holland kerékpáros szervezetek szövetsége (Stichting Landelijk Fietsplatform) 1987-ben alapított ernyőszervezet. A módszertan alapján 2012-ben 4500 km kiterjedésű hálózatot értékeltek.

<sup>6</sup> A német kerékpáros klubot (Allgemeiner Deutscher Fahrrad-Club, ADFC) 1979-ben alapították, megközelítőleg 185 ezer tagja van. A kerékpárutak felmérésével kapcsolatos dokumentumok itt érhetők el: <https://www.adfc.de/dossier/radreiseanalyse/> (utolsó hozzáférés: 2020. január 31)

Az ADFC módszere az alábbi szempontokat részletezi: kerékpározhatóság (pl. szélesség, szűk keresztmetszetek), burkolatminőség (pontozás kilométerenként), tájékoztató táblák (pontlevonás hiány vagy hiba esetén), útvonalvezetés (pontlevonás pl. túlzott lég- vagy porszennyezés esetén), gépjárműforgalom, turisztikai infrastruktúra (pl. szálláslehetőségek, vendéglátóhelyek), tömegközlekedési kapcsolatok, marketing (pl. térképek, útikönyvek, kerékpárbérlési lehetőségek).

A módszer kialakításakor szem előtt tartottuk az EuroVelo fejlesztésével kapcsolatos szempontokat, alapelveket is, különösen annak fényében, hogy a felmérésre váró terület közvetlenül (EV13) és közvetve (EV14) is bekapcsolódik az európai kerékpáros vándorútvonalak hálózatába.

### 3.1.2. ÉRTÉKELÉSI PONTRENDSZER

A külföldi gyakorlat figyelembevételével jött létre az alábbi értékelési pontrendszer:

- Burkolatminőség (legfeljebb 10 pont, értékelési súlyszám: 29%):
  - Burkolt út esetén: 4–10 pont
  - Burkolatlan út esetén: 0–4 pont  
(részletes értékelési szempontok alapján)
- Kerékpározhatóság (13 pont, 34%):
  - 5%-nál meredekebb emelkedő vagy lejtő esetén: 2 pont levonás;
  - forgalomterelés, átjárhatatlan akadály esetén: 2 pont levonás;
  - a túraútvonal részben vagy egészben négy vagy öt számjegyű mellékúton halad: 2 pont levonás (kifejezetten országúti kerékpárosok számára ajánlott túraútvonal esetén nincs levonás);
  - a túraútvonal részben vagy egészben harmad- vagy másod- vagy elsőrendű főútvonalon halad: 7 pont levonás.
- Útjelző táblák (5 pont, 14%): a túraútvonal egyes szakaszain található kerékpáros útvonaljelző táblák száma (1–5 pont a területi lefedettség függvényében);
- Közforgalmú közlekedési kapcsolatok (3 pont, 9%): a túraútvonalon elérhető kerékpárszállításra alkalmas tömegközlekedési kapcsolat alapján (1–3 pont);
- Turisztikai szempontok, hálózatosodás (4 pont, 11%):
  - a túraútvonalon található kerékpáros pihenő: 1 pont;
  - a túraútvonalon található kerékpárszerviz: 1 pont;
  - a túraútvonalon található turisztikai információs pont (turisztikai iroda, információs tábla): 1 pont;
  - a túraútvonal legalább egy helyen csatlakozik más kerékpáros túraútvonalhoz: 1 pont.

A szempontok többsége teljes útvonalra vonatkozik, a burkolatminőséget azonban a hálózat minden egyes szakaszára egyedileg kell értékelni. Ennek a meghatározása talán a leginkább szubjektív a szempontok közül (a projektben elkészített módszertani útmutató ábrákkal segíti az alkalmazást). A pontozás minőségi szakaszhatáronként történik, a túraútvonal egészére vonatkozó pontszám az egyes szakaszpontszámok hossz szerinti súlyozott átlaga alapján képződik. A módszertan elkészítésekor a legnagyobb dilemmát a burkolatlan utak minőségének osztályozása jelentette, és jelen cikk szempontjából is ez érdemel külön figyelmet. A besorolás nehézségét az jelenti, hogy szemben az aszfaltozott utakkal, a földutak kerékpározhatósága nem állandó, a felületük a csapadék és a mezőgazdasági, erdészeti gépjárművek közlekedése miatt rövid időn belül jelentősen változhat – ugyanakkor egyes jól kiépített és karbantartott burkolatlan utak legalább olyan jól kerékpározhatók, mint egyes elhanyagolt, leromlott burkolt utak. Mint látható, a legjobb minőségű burkolatlan út a legrosszabb minőségű burkolt útszakasszal kap azonos pontszámot.

A további szempontokhoz képest a kerékpározhatóság esetében a pontozás fordított logikával történik: olyan túraútvonalak esetében, ahol 5%-nál meredekebb emelkedő, forgalomterelés,

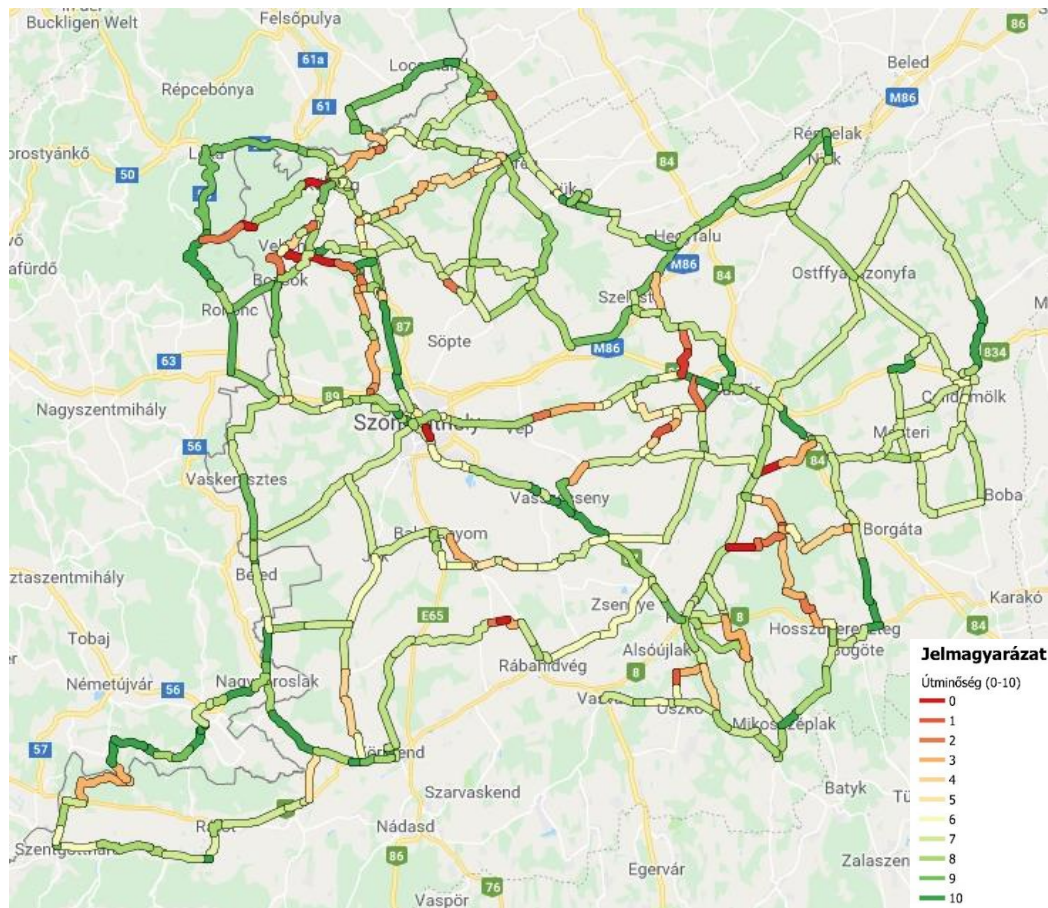
átjárhatatlan akadály található, illetve ha az útvonal az országos közúthálózaton elválasztás nélkül fut, pontlevonás jár az ehhez a szemponthoz tartozó alappontszámból.

### 3.1.3. FELMÉRÉS

A módszer másik fő pillére maga az értékelés, amely részben adatok (pl. domborzati viszonyok, forgalom, tömegközlekedési kapcsolatok) „íróasztal melletti” összegyűjtésére, részben pedig az útvonalak bejárására épül. Jelen projektben utóbbi jórészt kerékpározással, a forgalmas közutak többségén személygépkocsival történt (utóbbi a Vas megyében felmért 861 km-ből 171 km-t, azaz mintegy 20%-ot tett ki). Minthogy a burkolatminőség akár rövid szakaszokon változhat, az ezzel kapcsolatos pontszámok rögzítése térképalkalmazás (Locus Map) segítségével történt, amely további beavatkozás nélkül társítja a helyadatokat a bejegyzésekhez. Ez alkalmasnak bizonyult az egyéb szempontok (pl. pihenőhelyek, útjelző táblák), továbbá fényképek és szöveges megjegyzések elhelyezésére is a térképen.

### 3.2. ESETTANULMÁNY: EREDMÉNYEK, PROBLÉMÁK

A felmérés eredményeként megállapítható, hogy Vas megyében alapvetően kielégítő a kerékpáros turisztikai úthálózat burkolatminősége (átlaga 6,98). A megyének jó a közúti és vasúti elérhetősége és a megye több pontjára rendelkezésre áll a vasúti kerékpárszállítás lehetősége. Megfelelőek a turisztikai infrastrukturális kapcsolatok Ausztria irányában, és folyamatosan bővül a belső, kerékpározást szolgáló infrastruktúra is. A legfeljebb 35 pontra értékelhető útvonalak 15,6–29,2 pont (46–83%) közötti értékeket értek el. A 26 útvonal közül három kivételével valamennyi esetében előfordult „tökéletes” (10 pontra értékelt) burkolatminőségű szakasz, négy útvonalon azonban kerékpározásra alkalmatlan részek is előfordulnak (1. ábra).



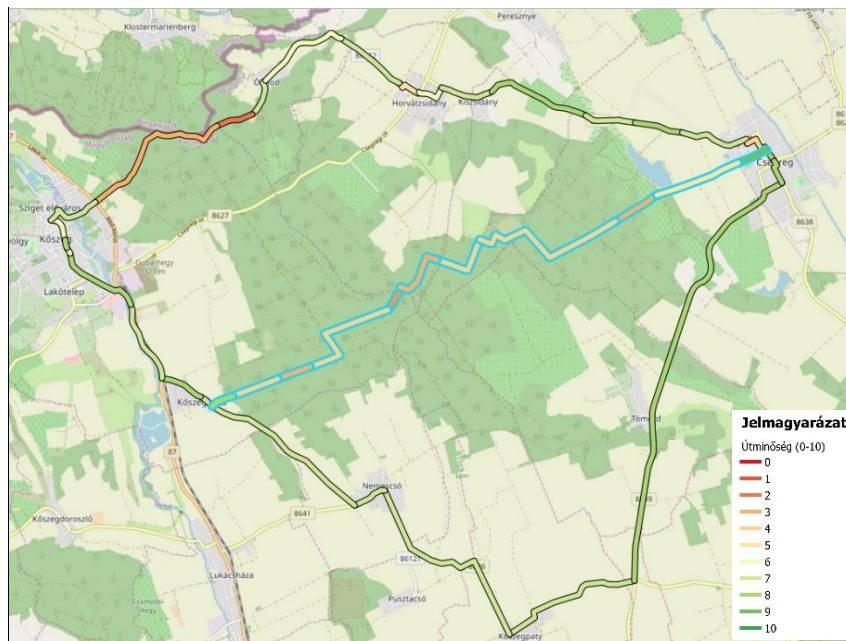
1. ábra: A Vas megyében felmért kerékpáros túraútvonalak burkolatminősége (forrás: saját szerkesztés)

Ezzel összefüggésben több útvonal(szakasz) esetében is felvetődtek az előzetesen kijelölt túraútvonalakkal kapcsolatos problémák, amelyek az alábbiak szerint csoportosíthatók:

- hálózati problémák:
  - jogi akadály:
    - általános behajtási tilalom magánutak esetében: továbbhaladást tiltó tábla vagy fizikai akadály (kerítés, sorompó);
    - kerékpárral behajtani tilos vagy csak célforgalomban szabad egyes kijelölt közúti szakaszokon;
  - vonalvezetés (ha van jobb alternatíva);
- gépjárműforgalom volumene (különösen az első-, másod- és harmadrendű utakon);
- üzemeltetés, fenntartás (pl. naprakész jelzések, a növényzet gondozásának hiánya);
- emberi tevékenység (pl. hulladék lerakása).

Az értékelés alapján több túraútvonal esetében is javaslat készült a nyomvonal módosítására (lehetőleg jól kerékpározható mező- és erdőgazdasági utakon), valamint új, tematikus útvonalak és határon átnyúló kapcsolatok kialakítására. A forgalmas (főleg első-, másod- és harmadrendű fő)utak helyett a legtöbb esetben a párhuzamos, falvakon keresztül haladó alacsonyabb rendű utak kerültek a hálózati javaslatokba. Néhány esetben „párhuzamosan” futó erdészeti utakat is be lehet vonni a hálózatba, mint például Kőszeg és Csepreg között, ahol az egyik kijelölt (a déli) irányban csak forgalmas útvonalon van kapcsolat. Ez jól helyettesíthető a még a másik (az északi) összeköttetésnél is rövidebb, ám több látnivalót is érintő, vonzó környezetben vezető új parkerdei útvonallal (2. ábra), amelynek kijelölését a térség egyik kerékpáros civil szervezete már korábban felvetette.





2. ábra: Erdészeti utakon vezető alternatíva a Csepreg és Kőszeg között korábban kiválasztott, jórészt országúton vezető túraútvonalakra (forrás: saját szerkesztés)

A Vas megyei kerékpáros turisztikai útvonalak kapcsán azonosított, beavatkozást sürgető problémák mellett a felmérés során gyűjtött tapasztalatok a konkrét célterületen túlmutató feladatokra is rávilágítottak. Ilyen például az irányjelző és tájékoztató táblák változatossága országsszerte, amelyre a Bejárható Magyarország Program egységesítési törekvése ígéretes megoldást kínál. Az útvonalak értékelésével foglalkozó projekten túlmutató feladat a kerékpárosbarát szolgáltatások egységes meghatározása, a szolgáltatók minősítése is, ami egyébként a VELOREGIO céljai között is szerepel, de értelemszerűen nem vezet majd országos rendszer bevezetéséhez.

Az általános tapasztalatok közül – elsősorban az erdészeti utak vizsgálata alapján – érdemes kiemelni továbbá *a nem közúthálózati útvonalszakaszokkal kapcsolatos bizonytalanságot*. E bizonytalanság egyrészt a kerékpározó „kérdéseit” jellemzi: hol kezdődnek és hol érnek véget a magán- és közutak; a magánutak biztosan meg vannak-e nyitva a közforgalom előtt; ha nem, és mégis erre célszerű továbbhaladni, annak milyen jogi következményei lehetnek; illetve a közlekedési szabályok (pl. sebességhatárok, elsőbbségi viszonyok) a magánutakon is a közúthoz hasonlóan érvényesülnek-e. Másrészt az érintett szervezetek szempontjából is felvethető (vélt vagy valós) bizonytalanság: ki felel az útvonalak kijelöléséért és üzemeltetéséért; milyen alapelvek és előírások alapján kell ezeket kialakítani; milyenek a felelősségi viszonyok; milyen hatóságnak van joga intézkedni; stb.

Az erdészeti utakon a forgalom összetétele: kb. 60%-a teher-, 40%-a személyjármű (Kosztka, 2012). Kisfaludi (2014b) erdészeti utak forgalmának meghatározásával foglalkozó tanulmányában egy pilisi – turisztikai szempontból vonzó – mintaterületen ettől jelentősen eltérő forgalom-összetételt tapasztalt a tavasztól őszi tartó időszakban: a nem motorizált járművel haladók voltak többségben, az erdőgazdasági célú forgalom (főleg könnyű tehergépkocsik, elenyésző számban közepes tehergépkocsik, lovaskocsik és munkagépek) aránya összességében jóval elmarad a fenti értéktől. Mindez fokozottabban igaz a hétvégi napokon. Bár mindebből a helyszín és az időszak miatt nem lehet általános következtetéseket levonni, nyilvánvalónak tűnik, hogy a turisztikai szempontból vonzó területeken szezonálisan jelentős számú gyalog- és kerékpártúrázó használja az erdészeti utakat, osztozva a szintén turisztikai céllal megjelenő személygépkocsikkal, motorkerékpárokkal, valamint az erdészeti forgalommal. Feltételezhető, hogy a turistáknak csak egy része visszatérő úthasználó, és ezért nem ismeri az út-, terep- és forgalmi viszonyokat. A járműhasználók utazásaik során máshol, közúti környezetben hozzá lehetnek szokva, hogy az út kezelője – elsősorban a közlekedésbiztonsági szempontok szem előtt tartásával – e körülményekről forgalomtechnikai eszközökkel (pl. felfestésekkel,



jelzőtáblákkal, lassító küszöbökkel) tájékoztatást ad, korlátozásokat alkalmaz, a hatóságok pedig közvetlenül (személyesen) vagy közvetve (pl. sebességmérő műszerekkel) érvényt szereznek a közlekedési szabályoknak. Mindez a magánutakon nem ilyen egyértelmű; az alábbiakban az egyik legmarkánsabb példát, a kiterjedt erdészeti utakat vizsgáljuk részletesebben.

#### 4. KERÉKPÁROZÁS AZ ERDÉSZETI UTAKON

##### 4.1. AZ ERDÉSZETI ÚT FOGALMA

A közúti közlekedési törvény<sup>7</sup> (Kkt.) alapján „[a]z úthálózat közutakból és a közforgalom elől el nem zárt magánutakból áll. Az országos közutak az állam tulajdonában, a helyi közutak a települési vagy területi önkormányzatok tulajdonában vannak. Magánútnak minősülnek a természetes személyek és a jogi személyek tulajdonában álló területen lévő utak. Magánútnak minősül továbbá az állam vagy az önkormányzat tulajdonában álló területen lévő, közforgalom elől elzárt út, továbbá az állam tulajdonában, valamint a vízügyi igazgatási szerv kezelésében lévő elsőrendű árvízvédelmi fővonalakon a kerékpáros forgalom számára megnyitott út.” Látható, hogy a közúti közlekedés törvényi szabályozása nem nevesíti az erdészeti utakat, emellett a KRESZ sem fogalmaz meg kifejezetten az erdészeti utakra vonatkozó szabályokat.

Az erdészeti utak definíciószerűen „olyan közlekedési pályák, amelyek az erdőgazdálkodás igényeinek megfelelő szinten kiépítve biztosítják a KRESZ szabályainak megfelelő járművek biztonságos közlekedését. Vonalvezetésüket a gépjárműforgalom igényeinek, vízelvezetésüket az állékonyosság és az ökológiai feltételeknek megfelelően tervezik meg. Nyomvonaluk állandó, az általuk elfoglalt területet az erdő talajának tekintjük, amely hosszabb távon nem termőterület, hanem a többcélú erdőgazdálkodás egyéb feladatait szolgálja” (Primusz, 2015: 8).

Az erdőfeltárás fogalmát és az erdészeti utak jellemzőit – csak a legújabb irodalmakat figyelembe véve – Primusz (2015) és előszavában Kosztka (2012), a környezeti hatásokkal összefüggésben pedig Kisfaludi (2014a) munkája ismerteti. A kerékpározásra kijelölt erdészeti utak a feltáráshálózatnak azok az elemei, amelyek kapcsolatot teremtenek a közúthálózzal, valamint megközelíthetővé teszik a turisztikai attrakciókat az erdő területén (elsősorban feltárási utakat, továbbá kiszállítóutakat). Tulajdoni és jogi szempontból az erdészeti utak állami, önkormányzati vagy magántulajdonban lévő magánutaknak számítanak, ahol a közlekedés alapvetően a KRESZ szabályai alapján történik.

##### 4.2. ERDÉSZETI UTAK NYILVÁNTARTÁSA

A szakirodalom alapján a hazai erdészeti úthálózat hossza kb. 6800 km, amelyből a két forgalmi sáv szélességű, nagy kapacitású (I. osztályú) feltárási út 280 km, az egy forgalmi sáv szélességű, kisebb kapacitású (II. osztályú) feltárási út 2400 km, a kis kapacitású, kevésbé kiépített kiszállítóút 4100 km (Kisfaludi 2014a, Kosztka, 2012). Adatigénylések nyomán megállapítható ugyanakkor, hogy az erdészeti utakról jelenleg nincs pontos, naprakész statisztikai nyilvántartás. A Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal (NÉBIH) kezelésében lévő [erdoterkep.nebih.gov.hu](http://erdoterkep.nebih.gov.hu) weboldalon a hazai erdők online térképi ábrázolású nyilvántartása található, mely beállítástól függően vagy a Google, vagy az Openstreetmap utadatbázisát használja, tehát az erdészeti utak tekintetében nem tekinthető teljesnek. Az erdőgazdaságok és más szakmai szervezetek számára az Erdészeti Szakmai Rendszer erdőgazdálkodás moduljában megtalálható az erdészeti utak térképi alapú nyilvántartása. A modul képes lenne az erdészeti utak hossz alapú nyilvántartására is, azonban erre vonatkozóan nincs törvényi előírás, így az erdőgazdaságok jellemzően csak területalapú statisztikai adatokkal rendelkeznek az erdészeti utakkal kapcsolatban.

Tekintettel jelen cikk fenti esettanulmányára, célszerűnek tűnt a Vas megyei erdészeti utak hosszának feltárása. Az erre vonatkozó adatigénylésre a Szombathelyi Erdészeti Zrt. azért tudott választ adni, mert 2016-ban – egyedileg – felmérték a kerékpározásra már kijelölt útvonalakat: e szerint az erdőgazdaság

<sup>7</sup> 1988. évi I. törvény a közúti közlekedésről (2020. január 31-én hatályos állapot)

70,56 km erdészeti utat kezel. Ebben természetesen nem szerepelnek az erdőgazdaságtól független magántulajdonú erdészeti utak.

Erdészeti utak szabadon hozzáférhető térképi alapú megjelenítése a [turistautak.hu](http://turistautak.hu) weboldalon érhető el. A „Ielkes csapat” által gondozott nonprofit portálon a gyakorlatilag teljes körűen naprakész térkép az erdészeti utakon megjeleníti a turistajelzéseket, és egyben útvonaltervezőként is működik. Az oldal több telefonos alkalmazás számára is kínál térképi adatbázist, így lehetővé téve a terepi offline tájékozódást és útvonaltervezést.

A kerékpárutak adatainak nyilvántartására és térképi megjelenítésére a Magyar Közút üzemeltetésében lévő Kerékpárút Nyilvántartó Rendszer (KENYI, [kenyi.hu](http://kenyi.hu)) szolgál, amely a kerékpáros törzshálózatot és a tervezés alatt álló nyomvonalakat is tartalmazza. Bár az útvonalak kapcsán számos információt (POI-k, burkolat típusa, műtárgyak stb.) tesz elérhetővé, az adatbázisa egyelőre – többek között az erdészeti utakon kijelölt kerékpártúra-útvonalak vonatkozásában is – hiányos. Egyelőre útvonaltervezésre is csak korlátozottan alkalmas.

Az előzők mellett a kerékpározható erdészeti utakról a legteljesebb térképi alapú nyilvántartást a szabadon hozzáférhető, önkéntes módon szerkesztett [merretekerjek.hu](http://merretekerjek.hu) weboldal kínálja. Az internetes böngészőből elérhető térkép az Openstreetmap hetente frissített alaptérképét használja, ezen látható a burkolt utak vonalas kerékpáros infrastruktúrája (kerékpárutak, gyalog- és kerékpárutak, kerékpársávok, egyéb kerékpározásra kijelölt útvonalak). Ezt kiegészíti a kerékpározható földutakon, erdészeti utakon a kerékpáros turistajelzések feltüntetése, mely többé-kevésbé lefedi az erdőgazdaságok által kerékpározásra kijelölt erdészeti úthálózatot. Az online térkép egyben útvonaltervezőként is működik, így távolsági adatok is kinyerhetők belőle, ami természetesen nem pótolja a kilométer-alapú nyilvántartást.

### 4.3. KERÉKPÁROZHATÓ ERDÉSZETI UTAK KIJELÖLÉSE

Erdészeti utak kijelölését kerékpározásra három érdek befolyásolja: a közjóléti érdek (a kerékpártúrázók, tágabb értelemben a természetjárók által bejárni kívánt útvonalak) alapján felvetődő igényeket a gazdasági érdek (elsősorban a fakitermelés és az általa érintett területek) és a védelmi érdek (a védett erdei értékek és ezek elhelyezkedése) szorítja korlátok közé. A három érdek számos esetben ütközik egymással, és elengedhetetlen a kompromisszum, mely bizonyos mértékben egy vagy akár mindhárom érdeket is sértheti. Bizonyos helyeken elkerülhetetlen a megfelelés a (természet)védelmi szempontoknak, ezért napjainkban<sup>8</sup> ez az erdészeti utak tervezésének az egyik fő alapelve, és ez jelentős befolyással lehet a kerékpározásra megnyitott útvonalak kijelölésére is.

Ennek egy példája<sup>9</sup> a Pilisi Parkerdő által kijelölt Pilis Bike kerékpáros útvonalak tervezése, amely 2012 végén kezdődött. A tervezési folyamat konzultációval kezdődött: az erdőgazdaság hegyikerékpáros versenyzők véleményét kérte ki, hogy mely erdészeti utak legyenek kerékpáros túraútvonalaként kijelölve. Az ennek eredményeképpen – a közjóléti érdek szempontjából – a tervezőasztalon létrejött hálózati javaslat természetesen bizonyos mértékben sértette a gazdasági és a védelmi érdekeket, így egy következő tervezési körben felülvizsgálatra került sor. Figyelembe véve az alapcél, mely szerint a kerékpározók igényeit kiszolgálva alapvetően településeket kell összekötni erdészeti utak segítségével, természetvédelmi szempontú egyeztetéseket folytattak annak feltárására, hogy a védendő területek elhelyezkedése milyen mértékben érinti az első körben kijelölt hálózatot. Ennek alapján megtörtént a hálózat szűkítése. Ezt újabb egyeztetési kör követte: a gazdasági érdek és a hálózatosodás elvének figyelembevételével meghatározták a kerékpáros útvonalakat. A tervezést követően az engedélyezési folyamat két évig tartott, az útvonalakat 2016 áprilisában adták át a forgalomnak. (A hálózat később bővült Kesztlőc irányában.) A végső döntés bizonyos mértékben mindhárom fent hivatkozott érdeket sértő kompromisszum eredménye lett.

<sup>8</sup> Korábban az erdészeti utak létesítését gazdasági előnyeivel indokolták, alapelve pedig a tervezési és építési költségek minimalizálása volt, figyelmen kívül hagyva a környezet- és természetvédelmi, útfenntartási igényeket, valamint a forgalmi viszonyokat (Kosztka 2012).

<sup>9</sup> E példa feltárása a Pilisi Parkerdő Zrt. munkatársával készített szakmai interjú segítségével történt.

További fontos tényező az üzemeltetés, fenntartás feladata, amely alapvetően az erdőgazdaságokat terheli. Ezzel szemben áll ugyanakkor az a haszon, mely a hálózat végpontjain elhelyezkedő településeken (és az itt működő vállalkozásoknál és más szervezeteknél) realizálódik a kerékpárosok által generált turisztikai bevételként. A bevételek és kiadások arányosabb elosztása érdekében egyeztetések szükségesek az erdőgazdaság és az érintett önkormányzatok és más érintettek között. Ezek során egyrészt megállapítják a települési úthálózat csatlakozási pontjait a kerékpározásra kijelölt erdészeti úthálózatához, másrészt megállapodást kötnek, hogy az önkormányzatok a kijelölt hálózat mely szakaszainak veszi át a karbantartását. Ezek praktikusán azok a szakaszok, melyek a települések felől biztosítják a bekötést a hálózatba.

Az erdészeti utak tervezése során az erdőgazdaságok – az egyedi tényezők mérlegelésével – jellemzően a következő dokumentumokat alkalmazzák: Erdészeti feltáróhálózatok tervezési irányelvei (Kosztka és mtsai. 2007a), Normatív költségek az erdészeti útépitésben (Kosztka és mtsai. 2007b), illetve a Segédlet az erdészeti utak tervezéséhez (Primusz 2015). A tervezési alapismeretek elsajátítását az Erdészeti útépités – Erdészeti utak építése című egyetemi tankönyv is segíti (Kosztka 2012).

Ezen kívül a feltáróhálózatok tervezését alapvetően meghatározza a rendelkezésre álló alapadatok köre, illetve az informatikai háttér. A dinamikus hálózattervezés megvalósításával lehetővé válik a különböző igények és korlátok figyelembevétele; elemzések elvégzése és a rugalmas alkalmazkodás a változó körülményekhez – ahogy ez látható volt a Pilis Bike példáján is.

Erdészeti utak tervezését felsőfokú erdészeti végzettséggel és tervezői jogosultsággal rendelkező erdészeti szakember végzi. Ezekhez a jogosultságokhoz kapcsolódik még az építményekhez tartozó felelős műszaki vezetés, műszaki ellenőrzés, illetve a különböző műtárgyak, csatornák, tározók tervezése, illetve műszaki ellenőrzése is. Ezekhez a tervezési feladatokhoz nagy segítség, ha a tervező rendelkezik helyismerettel. A tervezési alapelvek az egyes erdőgazdaságok között alapvetően megegyezők, de a jogszabályok által lehatárolt keretek között rendelkeznek mozgástérrel. A tervezés módszertana viszont eltérő lehet a különböző természeti és egyéb adottságtól függően (pl. terepviszonyok, sűrűn lakott vagy védett területek).

#### 4.4. SZABÁLYOZÁS, JOGI PROBLÉMÁK

Az erdőtörvény<sup>10</sup> (Evt.) lefekteti az erdő látogatásával, benne a kerékpározással kapcsolatos szabályokat. Alapvetés, hogy aki nem erdőgazdálkodással összefüggő tevékenységet végez, az az erdő látogatója, akitől a látogatásért díj nem kérhető, de aki kötelezhető a károk megtérítésére. A törvény 91. § értelmében „[a]z erdőben – annak rendeltetésétől függetlenül – pihenés, üdülés, sportolás és kirándulás céljából gyalogosan, emberi erővel hajtott kerékpárral, lóval, valamint az erdészeti feltáróhálózat részét képező erdei úton sport vagy turisztikai célú, lóval vontatott járművel bárki saját felelősségére közlekedhet, illetve ott tartózkodhat, amit az erdőgazdálkodó tűrni köteles...” (kivéve, ha azt más jogszabály vagy az arra jogosult korlátozza). Felvetődik a kérdés, hogy milyen (jog)szabály vonatkozik az erdőben nem a felsorolt céllal tartózkodó látogatóra, tehát például arra, aki munkába vagy iskolába tartva kerékpárral halad át valamely erdőn.

A 92. § rögzíti továbbá, hogy „[a]z erdőben látogatás céljából járművel – ideértve a nem sport vagy turisztikai célú, lóval vontatott járművet, valamint a nem csak emberi erővel hajtott kerékpárt is – közlekedni csak [...] a közforgalom számára megnyitott erdészeti magánúton”, az erdészeti feltáróhálózat részét képező, az erdészeti hatóság által az erdőgazdaság javaslatára vagy egyetértésével járműközlekedésre kijelölt úton, valamint „az erdőgazdálkodó beleegyezésével az erdészeti feltáróhálózat részét képező egyéb erdei úton szabad”. Egyfelől e két egymáshoz közeli jogszabályrészletből az rajzolódik ki, mintha az Evt. az emberi erővel hajtott kerékpárt nem tekintené járműnek (vö. KRESZ 1. sz. függelék), lévén utóbbi szakasz látszólag szűkebb mozgásteret enged a

<sup>10</sup> 2009. évi XXXVII. törvény az erdőről, az erdő védelméről és az erdőgazdálkodásról (2020. január 31-én hatályos állapot)

„járművel” (közte a nem csak emberi erővel hajtott kerékpárral), mint az előbbi a gyalog, lóval vagy kerékpárral közlekedőknek. Másfelől kérdés, hogy a kerékpározók (és persze mások, akik a fentiek alapján jogosultak az erdőben tartózkodni) – egységes jelölés hiányában – hogyan azonosítják az e bekezdésben felsorolt utakat.

Nem mellékes, hogy az erdőben kerékpározók tisztában legyenek a rájuk vonatkozó közlekedési szabályokkal. Napjainkban elvárható, hogy a lényeges információk elérhetőek legyenek az interneten; ugyanakkor a 22 hazai erdőgazdaságból mindössze három, a nemzeti park igazgatóságok közül pedig egy honlapján található tájékoztatás az erdei kerékpározással kapcsolatban (3. ábra). A Pilisi Erdőgazdaság kerékpáros GYIK-et tett közzé honlapján, ami összefoglalja a legfontosabb tudnivalókat. Két erdőgazdaság esetében megjelenik a honlapon, hogy egyrészt a kerékpározóra az erdőben a KRESZ szabályai érvényesek, másrészt az útviszonyoknak megfelelően kell megválasztani a sebességet, amely az erdőben legfeljebb 30 km/h lehet. Ez ugyanakkor nem következik a KRESZ-ből, hiszen az annyit ír elő, hogy lakott területen kívül kerékpárral, ha a kerékpárt hajtó fejező sisakot visel és utast nem szállít, a megengedett sebesség 50 km/h; ha sisakot nem visel, 40 km/h; továbbá kerékpárúton közlekedő járművel 30 km/h.

A téma szempontjából releváns nemzeti parkok közül egyedül a Bükki NPI közöl néhány alapvető viselkedési szabályt, utalva arra is, hogy a természetvédelmi törvény<sup>11</sup> értelmében a hatóság korlátozhatja a közlekedést és a tartózkodást a védett természeti területeken (akár közúton is).

	Pilisi Parkerdő	Ipolyerdő	Vértesi Erdő	Bükki NPI
Általános szabályok az erdei kerékpározással kapcsolatban	●	●	●	●
KRESZ-szabályok előírása	●	●		
30 km/h megengedett sebesség	●	●		
Fákra festett egységes kerékpáros túraútvonal-jelzések	●	●		
Kerékpáros infopontok	●			
P+B pontok	●			
Kerékpáros túraútvonal-leírások	●	●		

3. ábra: Információk és szabályok az erdei kerékpározással kapcsolatban a szervezeti honlapokon (forrás: saját gyűjtés és szerkesztés)

Értelemszerűen lényeges, hogy a kerékpározó tisztában legyen vele, hogy hol tér rá az erdészeti útra, hol vonatkoznak rá a fenti szabályok. Ennek jelölése nem egységes. Egyes helyeken (a Pilisi Erdőgazdaság tájékoztatása szerint az általa fenntartott erdészeti utakon például mindenhol) sorompóval van jelezve, ez azonban értelemszerűen nem egyértelmű jelzése a köz- és magánút határvonalának, sem a sorompó zárt, és különösen nem a nyitott állása esetén. Máshol jelzőtáblát alkalmaznak („Mindkét irányból behajtani tilos”), elvértve kiegészítő („Kivéve...”) táblával. A kerékpározókat ezekben az esetekben a turistajelzésekhez hasonló, kerékpárt ábrázoló jelzések feltüntetésével „jogosítják fel” a behajtásra. Sajátos a 4. ábrán látható – a Vas megyei Alsó-erdő szélén, Kőszegfalván tapasztalt – helyzet: a KRESZ értelmében a „Mindkét irányból behajtani tilos” jelzőtábla alatt elhelyezett „Magánút” tábla azt jelzi, hogy az út a közforgalom elől el van zárva. A képen szereplő villanyoszlopon azonban piros sáv jelzés és kék kerékpáros jelzés látható, amely éppen arra utal, hogy ez egy kerékpáros (és gyalogos) túraútvonal, vagyis a kerékpározók (és gyalogosok) mint „közforgalom” számára meg van nyitva.

<sup>11</sup> 1996. évi LIII. törvény a természet védelméről (2020. január 31-én hatályos állapot)





4. ábra: Közút és erdészeti út találkozási pontja a Szombathelyi Erdészeti Zrt. területén (fotó: Munkácsy András)

A Vas megyei vizsgálat során több alkalommal is előfordult, hogy a felmérő személyzet olyan akadályba (kerítésbe, sorompóba) ütközött a projektben korábban kerékpártúrázásra kiválasztott erdei útszakaszon, amely meggátolta a továbbhaladást. Ezekben az esetekben a fizikai akadály egyben jogi akadályt is jelentett, ami azonban nem volt sem előzetesen, az odavezető úton, sem a helyszínen feltüntetve (bár egyelőre maguk az útvonalak sincsenek véglegesen kijelölve). Ezekben az esetekben a megoldást alternatív útvonal kijelölése jelentheti, továbbá a terület tulajdonosa is engedélyezheti a területen kerékpáros útvonal kijelölését.

## 5. ÖSSZEFOGLALÓ GONDOLATOK ÉS JAVASLATOK

Jelen cikkben egy kerékpáros turisztikai útvonalak felmérésére kidolgozott módszert ismertettünk. Ez alkalmasnak bizonyult a kerékpártúrázásra kijelölt útvonalak átfogó értékelésére, ezért alkalmazását – esetleg kisebb továbbfejlesztéssel – országszerte javasoljuk a hasonló hálózatokon vagy akár önálló vándorútvonalakon. E módszer első, esettanulmányként fent röviden bemutatott alkalmazása során több problémát is lehetett azonosítani a kijelölt túraútvonalakkal kapcsolatban. Ezeknek csak kis része írható a túraútvonalak kidolgozóinak számlájára, ilyen például az a néhány szakasz, amely forgalmas (akár első- vagy másodrendű fő)úton halad, ahol a kerékpározás többnyire csak célforgalomban van engedélyezve.

A további problémák többségére a jobb kommunikáció (kiterjedt tájékoztatás, jelzések egységesítése stb.); a felelősségi viszonyok – szintén jó kommunikáción alapuló – rendezése (pl. a kerékpárút menti növényzet gondozására vonatkozóan); valamint a hatékony ellenőrzés, a törvények betartatása, a közösség és a környezet iránti felelősségérzet növelése, a nevelés (pl. az illegális hulladéklerakás elkerülésére) jelenthet megoldást.

A Vas megyei esettanulmány készítése során jelentős problémaként volt azonosítható továbbá, hogy a kerékpártúrázásra kiválasztott útvonalak egy része nem közúton vezet, és itt a kerékpározónak és a terület érintettjeinek (egyebek mellett tulajdonosának, kezelőjének, a hatóságoknak) aggályuk lehet a vonatkozó szabályok egyértelműsége és a kerékpározás feltételei kapcsán. Ezzel kapcsolatban az alábbi javaslatok fogalmazhatók meg:

- Célszerű lenne lefektetni azokat az alapelveket, amelyek alapján az erdészeti utakat kijelölik a kerékpározásra, továbbá az erdészeti utak tervezési segédleteiben, irányelveiben hangsúlyosabban kellene megjeleníteni a (kerékpáros) turizmussal kapcsolatos szempontokat.
- A fenti esettanulmány egyik lényeges megállapítása, hogy egyes erdészeti utakon a kerékpározást fizikai akadály (sorompó, kerítés) gátolja. Azokban az esetekben, ahol a túraútvonalat célszerű ezeken az utakon vezetni, a kijelölés kezdeményezőjének vagy a fejlesztések állami/önkormányzati felelősének érdemes tárgyalást kezdeményeznie a tulajdonossal a jogi, üzemeltetési és egyéb kérdések tisztázására.
- Érdemes lenne pontosítani, hogy a (közlekedési és más) szabályok és felelősségi viszonyok szempontjából mit jelent, ha egy magánút csak a kerékpárosok (és gyalogosok) közforgalma előtt van nyitva.
- Ha elfogadjuk, hogy a túraútvonalakat éppen azért jelölik ki, mert azokon a turisták tömegszerűen jelen vannak vagy tömegszerű megjelenésükre legalább időszakosan lehet számítani, ezeket a *közlekedés* (a közlekedési infrastruktúra) fogalmkörébe kell sorolnunk. Esetükben egyébként az Evt. is közlekedésük (illetve ott-tartózkodásuk) szabályairól rendelkezik. Ezzel összefüggésben a közlekedés magas szintű jogszabályában célszerű lenne rögzíteni a „magánúton vezető túraútvonal” fogalmát, és ehhez egyértelmű és egységes közlekedési szabályokat kellene rendelni, amely tehát mindenki számára világos – részben természetesen rugalmas – kereteket biztosítana. Ilyen szabály lehetne például az erdők területén napjainkban általánosnak tűnő sebességkorlátozás (legfeljebb 30 km/h), amelynek ismerete így elvárható lenne az ilyen utak használóitól. Más jogszabályok, így elsősorban az Evt. további viselkedési szabályokat is rögzíthetne (ld. a lovaglással kapcsolatos jelenlegi szabályokat).
- Fontos, hogy a kerékpározásra használható erdészeti utak egyértelműen legyenek kijelölve, azaz világosan kiderüljön, hogy hol válik el egymástól a közút és a (kerékpározásra megnyitott) magánút, a „magánúton vezető túraútvonal”. E helyeken – legalább a jelentősebb túraútvonalak esetében – tájékoztató táblákat kellene elhelyezni. Célszerű az útvonalakat a gyalogos turistautakhoz hasonlóan végig jelölni (mint például a Pilis Parkerdő Zrt. területén, ld. 5. ábra), a jelölések karbantartásának felelősét kijelölni (pl. állami szerv, önkormányzat, civil szervezet, erdőgazdaság) és ehhez forrást rendelni. Érdemes továbbá a tilalom egyértelmű jelzése azokon az erdészeti útszakaszokon, ahol a tapasztalatok szerint sokan kerékpároznak, pedig ez nincs is engedélyezve (vagy éppen tiltva van).



5. ábra: Erdei kerékpáros túraútvonal jelölése a Pilisben (forrás: <https://parkerdo.hu/turizmus/pilis-bike/turakereparozas/>, utolsó letöltés ideje: 2020. január 31.)

- E gondolatmenethez kapcsolódva érdemes felhívni a figyelmet, hogy bár számos esetben – jórészt e cikkben és a háttérül szolgáló bizonyos jogszabályokban is – magánutak „megnyitásáról” van szó, a Kkt. az alapvető jogok és kötelezettségek között az alábbiakat rögzíti:

„a közutat és a közforgalom elől el nem zárt magánutat közlekedés céljából gyalogosként vagy – meghatározott feltételek teljesítése esetén – járművezetőként bárki igénybe veheti” (saját kiemelés). Még ha e cikkben nem is vállalkozhatunk a tisztázásra, a kerékpározásra alkalmas erdészeti magánutak kapcsán felvetjük a kérdést: ezek az utak alapvetően „el vannak zárva” a közforgalom elől (tehát bizonyos szempontok mérlegelésével „meg lehetne nyitni”), vagy éppenséggel „nyitva állnak” (azaz jogszabály előírása vagy a kezelő döntése és ezek végrehajtása szükséges, hogy „el legyenek zárva”)? A jogszabályok, útmutatók szövegét célszerű lenne egységes szemléletben megfogalmazni.

- Ahogy erről feljebb szó esett, az Evt. a kerékpárt látszólag nem sorolja a járművek közé. Szükségesnek látszik ennek pontosítása, harmonizálása a közlekedési jogszabályokkal. Továbbá érdemes lenne felülvizsgálni a nem emberi erővel hajtott kerékpárokra vonatkozó megkülönböztetést (más jogszabályokhoz hasonlóan bizonyos teljesítmény alatt a kerékpárokkal azonos szabályok alkalmazásával).
- Az Evt. értelmében az erdő látogatása – ideértve a kerékpározást is – csak saját felelősségre történhet. Célszerű lenne pontosítani, hogy a közlekedéssel összefüggésben hol vannak e felelősség határai (pl. baleset esetén).
- Az Evt. kerékpározással kapcsolatos rendelkezései kifejezetten a szabadidős célú kerékpározást nevesítik, így figyelmen kívül hagyják, ha valaki más céllal (pl. iskolába, munkába, munkavégzés során) kerékpározik az erdőben. Ezt a bizonytalan helyzetet feloldaná, ha a felsorolt célokat (pihenés, üdülés, sportolás, kirándulás) törölnék a jogszabály szövegéből.
- Sürgető feladat a kerékpározható (sőt, nem csak a kerékpározható) erdészeti utak részletes felmérése és a felmérés térinformatikai feldolgozása, az információk térképi alapú közzététele vagy még inkább azok integrálása útvonaltervező alkalmazásba. Mindez segítené az érdeklődőket eligazodni az erdei kerékpáros lehetőségekkel kapcsolatban, hiszen ezek az információk most is csak hézagosan érhetőek el egyes erdőgazdaságok honlapján. A térképi alapú nyilvántartás nagy segítséget nyújtana a túrázók számára az útvonaltervezésben is. Értelemszerűen a naprakész nyilvántartás az erdőgazdaságoknak és más érintetteknek (köztük például az erdészeti utak tervezőinek és a kapcsolódó közutak kezelőinek) is nélkülözhetetlen. Minthogy az információk egy része különböző honlapokon már elérhető, célszerű lehet ezek integrálása.
- A kerékpáros és általában az aktív turizmus ösztönzésére erdeinkben érdemes lenne a térképek mellett egységes vagy közös platformon szöveges, fényképekkel ellátott túraleírásokat közzélni a fontosabb jellemzőkkel (ld. a fent javasolt túraútvonal-értékelés eredményeivel), a célcsoport megjelölésével.
- Az Evt. értelmében az erdőgazdálkodás során – egyebek mellett – biztosítani kell, hogy az erdő betöltse turisztikai szerepét. Bár az erdőgazdaságok a jogszabály szerint a kerékpáros turizmussal kapcsolatos tevékenységet csupán *tűrni* kötelesek, az erdészeti utakkal kapcsolatban fent jelzett „bizonytalanságot” mérsékelné, ha az általános közlekedési szabályokat kísérő helyi viselkedési normákat az összes érintett erdőszet közzétenné (célszerűen a honlapján és az erdőben tájékoztató táblákon). Esetleg készülhetne legalább részben egységes tájékoztató kiadvány, amelyet online (pl. erdőszetek, desztinációmenedzsment- és társadalmi szervezetek, önkormányzatok honlapján) és táblákon (pl. a népszerű útvonalak kiindulópontján) is közzé lehetne tenni.

Ezeket a javaslatokat érdemes vitaindító gondolatoknak tekinteni, lévén célszerű lenne a kerékpározásra kijelölt erdészeti utakkal, más (pl. a sokkal kiterjedtebb mezőgazdasági) utakkal és általában a (kerékpáros) túraútvonalakkal, általánosságban pedig a tágran értelmezett természetjárás infrastruktúrájával kapcsolatos vitákat az érintettek széles körét bevonva *elindítani*, bizonyos kérdésekben *folytatni*. Amellett, hogy jelentős feladat hárulhat az érintett önkormányzatokra, erdőgazdaságokra (és e területek más tulajdonosaira, kezelőire), valamint a civil szervezetekre, a feladat



fő felelőse célszerűen a 2019-ben alakult AÖFK lehet, amelynek küldetése az ország aktív és ökoturisztikai szolgáltatásainak, fejlesztéseinek, programjainak az összefogása.

E gondolatok kapcsán a kutatás folytatása vagy kiterjesztése is jövőbeli feladat. Egyrészt célszerűnek tűnik a fent javasolt módszert követve a kerékpáros turisztikai útvonalak felmérése más területeken is, majd az eredmények értékelése, összevetése, a fejlesztést megalapozó javaslatok kidolgozása. Másrészt napjainkban több kutatási témát is érdemes napirendre venni az erdei kerékpározás kapcsán, ilyen például az elektromos rásegítéssel üzemelő kerékpárok terjedésének következményei (nő a hatótáv, bejárhatóvá válnak meredek útvonalak, stb.) és ezek hatása az erdészeti utakon vagy a kerékpározás (vélt és valós) hatása az erdők élővilágára.

## 6. FELHASZNÁLT IRODALOM

Beanland, A. 2013: Cycle tourism for sustainable rural development: understanding and interpreting lessons from Europe. The Winston Churchill Memorial Trust, London, [https://www.wcmt.org.uk/sites/default/files/migrated-reports/1147\\_1.pdf](https://www.wcmt.org.uk/sites/default/files/migrated-reports/1147_1.pdf) (utolsó hozzáférés: 2020. január 31.)

Donka, A. & Gyuricza, L. 2017: Az állam szerepe az aktív turizmus fejlesztésében. Polgári Szemle, 13(1–3); 176–187, <https://doi.org/10.24307/psz.2017.0915>

Jászberényi, M. & Munkácsy, A. (szerk.) 2018: Közlekedés, mobilitás, turizmus. Akadémiai Kiadó, Budapest. Digitális kiadás, [https://mersz.hu/dokumentum/dj316kmt\\_1/](https://mersz.hu/dokumentum/dj316kmt_1/), <https://doi.org/10.1556/9789634542292>

Kisfaludi, B. 2014a: Erdészeti utak környezeti hatásai. Útügyi Lapok; 7(4).

Kisfaludi, B. 2014b: Erdészeti utak forgalmának meghatározása kamerás megfigyeléssel. Erdészettudományi Közlemények; 4(1): 135–145.

Kosztka, M. 2012: Erdészeti útépités. Erdészeti utak építése. Országos Erdészeti Egyesület.

Kosztka, M. & mtsai. 2007a: Erdészeti feltáróhálózatok tervezési irányelvei. Kutatási jelentés a FVM Agrár-vidékfejlesztési Főosztálya megrendelésére. NyME Erdőmérnöki Kar Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet, Sopron.

Kosztka, M. & mtsai. 2007b: Normatív költségek az erdészeti útépitésben. Kutatási jelentés a FVM Agrár-vidékfejlesztési Főosztálya megrendelésére. NyME Erdőmérnöki Kar Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet, Sopron.

Mihálffy, K. & mtsai. 2016: Kiemelt hazai kerékpáros fejlesztések. Útügyi Lapok; 7(8).

Primusz, P. (szerk.) 2015: Segédlet erdészeti utak tervezéséhez, <https://efa.mmk.hu/dokumentumok/FAP> (utolsó hozzáférés: 2020. január 31.)

Somogyi, B. 2018: A kerékpáros turizmus lehetőségei Magyarországon a vasúti kerékpárszállítás adottságainak függvényében. Turizmus Bulletin; XVIII(3): 32–37.

Sulyok, J., Magyar, Zs. 2014: Az aktív turizmus helyzete Magyarországon. Fókuszban a kerékpározás és a természetjárás. Turizmus Bulletin; XVI(3-4): 15–26.



# A Ramberg-Osgood modell alkalmazása az aszfalt technológiában

Tóth Csaba<sup>1</sup>, Seoyoung Cho<sup>1</sup>, Primusz Péter<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Út és Vasútépítési Tanszék

<sup>2</sup> Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási Intézet

E-mail: [toth.csaba@epito.bme.hu](mailto:toth.csaba@epito.bme.hu), [hotaru128@hanmail.net](mailto:hotaru128@hanmail.net), [primusz.peter@uni-sopron.hu](mailto:primusz.peter@uni-sopron.hu)

DOI: [10.36246/UL.2020.1.06](https://doi.org/10.36246/UL.2020.1.06)

## KIVONAT

A reológiából ismert hőmérséklet-idő hasonlósági elv régóta jól használható eszközt jelent az aszfaltkeverékek viselkedésének tanulmányozásban. Az elv felhasználásával meghatározott ún. mestergörbékkel a különböző hőmérsékleten és frekvencián mért dinamikus merevség értékek részletesen tanulmányozhatók. A mestergörbék elsődlegesen a szigmoid-függvények felhasználásával szokás megkonstruálni, pedig erre a célra más típusú függvények is felhasználhatók lennének. Az egyik ilyen lehetőség a talajok ciklikus viselkedésének modellezésére tervezett Ramberg-Osgood anyagmodell. Jelen cikk arra keresi a választ, hogy az elterjedten alkalmazott mestergörbe meghatározási technikákhoz képest a Ramberg-Osgood anyagmodell alkalmazása milyen pontossággal képes leírni az aszfaltkeverékek anyagi viselkedését és rejt-e olyan többletinformációt, amelyet a hagyományos technikák nem.

*Kulcsszavak:* mestergörbe, eltolási tényező, szigmoid, RAMBO, aszfaltkeverék

## ABSTRACT

The "Time-Temperature Superposition" known from rheology has long been an useful tool for studying the behaviour of asphalt mixture. Dynamic modulus values are measured at different temperatures and frequencies can be thoroughly studied using the master curves defined by using this principle. The master curves are usually constructed using the sigmoid functions. However, other types of functions could be used for this purpose as well. One such option is the Ramberg-Osgood material model designed to model the cyclic behaviour of soils. The present article seeks to find out how accurately the use of the Ramberg-Osgood material model can describe the material behaviour of asphalt mixtures, and if there are any new highlights compared to the commonly used master curve determination techniques.

*Keywords:* master curve, shift factor, sigmoid, RAMBO, asphalt mixture

### 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.*

**Seoyoung Cho**

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

**Dr. Primusz Péter**

*Okleveles erdőmérnök és mérnök informatikus. A Soproni Egyetem Erdőmérnöki Karán a Geomatikai, Erdőfeltárási és Vizgazdálkodási Intézet munkatársa. Fő kutatási területe az útfenntartás és az útpályaszerkezetek méretezése, megerősítése.*

---

## 1. BEVEZETÉS

Közismert, hogy az aszfaltkeverékeknek a viselkedése a terhelés jellegétől és a vizsgálati hőmérséklettől alapvetően függ. Ennek köszönhetően a keverékek élettartamuk jelentős részében viszkoelasztikus anyagnak tekinthetők, azaz a viszkózus és rugalmas tulajdonságok egyidejű jelenléte kimutatható, ami jelentősen megnehezíti nem csak az aszfalt-pályaszerkezetek méretezését, de a keverékek vizsgálatát is.

A hazai gyakorlat szerint a keverékek egyik legfontosabb jellemzője a merevség, ami a komplex modulus abszolút értéke. Leggyakrabban a keverékek merevségét rögzített körülmények (pl. 15 °C-on, 10 Hz terhelés) mellett vizsgálják, mivel ez a paraméter alapvetően függ a hőmérséklettől, illetve a terhelési időtől. A rögzített hőmérsékleten meghatározott egyetlen merevségi értékkel a keverékek egymáshoz képest ugyan minősíthetők, de a keverékek közötti különbségek már nem tárhatók fel teljeskörűen. Erre ad megoldást a reológiából jól ismert hőmérséklet-idő hasonlósági elv felhasználásával létrehozott ún. mestergörbe. A mestergörbével a különböző hőmérsékleten és frekvencián mért dinamikus merevségek részletesen tanulmányozhatók, továbbá - közvetve - a plasztikus deformációs, illetve alacsony hőmérsékletű repedési hajlam is vizsgálható.

A gyakorlatban a mestergörbét jellemzően szigmoid-függvényekkel szokás megkonstruálni, pedig erre a célra más függvénykapcsolatok is jól felhasználhatók. Az egyik ilyen lehetőség a talajok ciklikus viselkedésének modellezésére tervezett Ramberg-Osgood (RAMBO) anyagmodell. Tanulmányunkban arra teszünk kísérletet, hogy a RAMBO modell segítségével az aszfaltkeverék olyan egyedi azonosítóját teremtsük meg, amely mind az aszfaltgyártás, mind a beépítés alatt a minőségbiztosítási rendszerek egyik alapja lehet.

## 2. ELMÉLETI HÁTTÉR

### 2.1. A HŐMÉRSÉKLET-IDŐ HASONLÓSÁGI ELV

Az először Boltzmann által megfogalmazott hőmérséklet-idő szuperpozíciós elv kimondja, hogy a thermoreológiai szempontból egyszerű anyagok relaxációs időállandói a hőmérsékletváltozás hatásra azonos mértékben változnak. Ebből következően a terhelési időtől függő mennyiségek, mint amilyen az aszfaltkeverékek komplex modulusa, az időtengely mentén a hőmérséklettől függő mértékben eltolható, így a különböző hőmérsékleten mért anyagi jellemzők egyetlen diagramon ábrázolhatók, amit mestergörbének nevezünk (lásd 1. ábra).

A hőmérséklet-idő szuperpozíciós alapelv tehát lehetővé teszi, hogy a különböző hőmérsékleti értékek és frekvenciák mellett begyűjtött adatokat egy referencia hőmérsékletre vagy frekvenciához viszonyítva vízszintes irányban elmozdítsuk, és ezzel a különböző izotermákat összehangolva egyetlen mestergörbét alakítsunk ki.

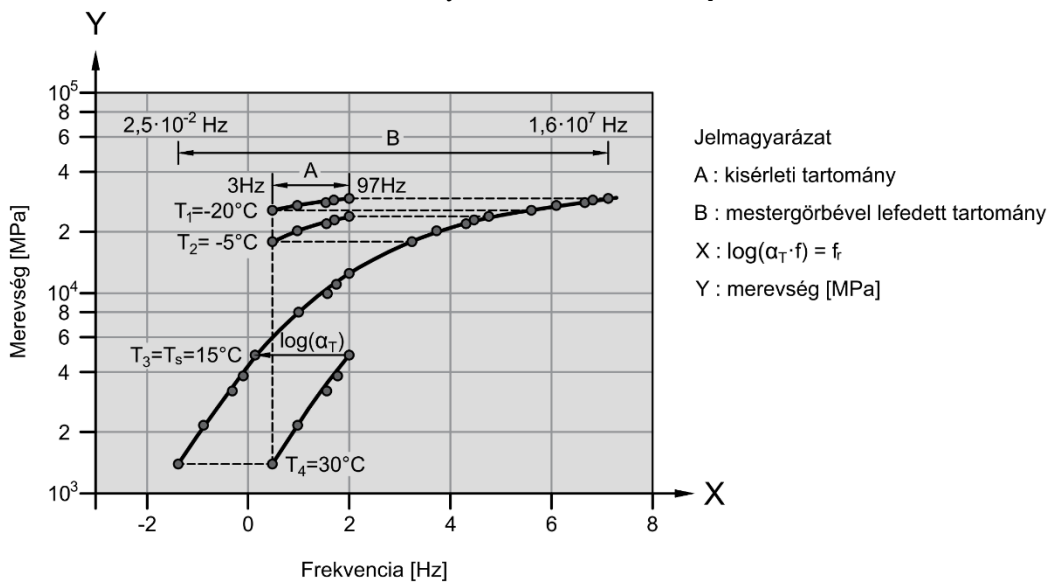
Az „Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 26. rész: Merevség. MSZ EN 12697-26:2018” című szabvány G melléklete külön kitér erre a kérdésre, miszerint: „A merevségi modulus meghatározása a kívánt terhelési időben a kívánt hőmérsékletre érvényes mestergörbe alapján

lehetséges.” A szabvány nagyvonalakban ismerteti a mestergörbe meghatározás elvét és közöl egy példát, hangsúlyozva azonban, hogy a meghatározáshoz számos eljárás használható.

A szuperpozíció matematikailag az ún. redukált frekvencia bevezetésével valósítható meg. Az „ $a_T$ ” eltolási tényező határozza meg a vízszintes tengely mentén kívánt elmozdulást az adott hőmérsékleten. A tényleges „ $f$ ” frekvenciát ezzel az eltolási tényezővel kell szorozni, hogy megkapjuk a mestergörbe redukált frekvencia értékét:

$$f_r = a_T \cdot f \tag{1}$$

A referencia hőmérsékleten az eltolási tényező természetesen:  $a_T = 1$ .



1. ábra: Mestergörbe szerkesztése a hőmérséklet-idő szuperpozíciós elv alapján

## 2.2. AZ ELTOLÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA

Az MSZ EN 12697-26 szabvány általánosságban ismerteti a mestergörbe meghatározásának elvét. Ennek értelmében adott hőmérsékleten mestergörbét úgy kell létrehozni, hogy más hőmérsékleteken felrajzolt izotermákat – szigorúan csak a terhelési időtartam / frekvencia tengelyével párhuzamosan – eltoljuk. A szabvány a példában az eltolási tényező értékének meghatározásához az ún. Arrhenius-féle egyenletet alkalmazza, kiemelve, hogy más összefüggések is használhatók és példaként említi a Christensen-Anderson modellt. Az Arrhenius-féle eltolási tényező összefüggése (Md. Yusoff, Chailleux & Airey 2011):

$$\log(a_T) = \frac{0,4347 \cdot \Delta E_a}{C_A} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) = C_A \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \tag{2}$$

ahol

- $a_T$  = eltolási tényező
- $T$  = kísérleti hőmérséklet (K)
- $T_0$  = referencia hőmérséklet (K)
- $\Delta E_a$  = aktiválási energia (J mol<sup>-1</sup>)
- $R$  = egyetemes gázállandó (8,314 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>)
- $C_A$  = konstans (K)

A reológiában az Arrhenius-féle egyenlet mellett a másik, a közelmúltig leggyakrabban alkalmazott összefüggés az eltolási tényező meghatározására az Williams-Landel-Ferry (WLF) egyenlet volt.

Mindkét klasszikus eltolási tényező használatos bitumenek és aszfaltkeverékek vizsgálatára, de elsősorban polimerekre lettek kidolgozva, ezért alkalmazásuk napjainkban folyamatosan háttérbe szorult (Kim, Mohammad & Elseifi 2015). Az elmúlt években az aszfalttechnológia fejlődése következtében több, aszfaltkeverékre kidolgozott modell is napvilágot látott. Egy nagyszabású amerikai program (National Cooperative Highway Research Program: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. NCHRP 1-37-A, 2004.) eredményeként megszületett eltolási tényező értéke például a kötőanyag hőmérsékletfüggő viszkozitás értékeitől függ, de számos egyéb összefüggés is kidolgozásra került.

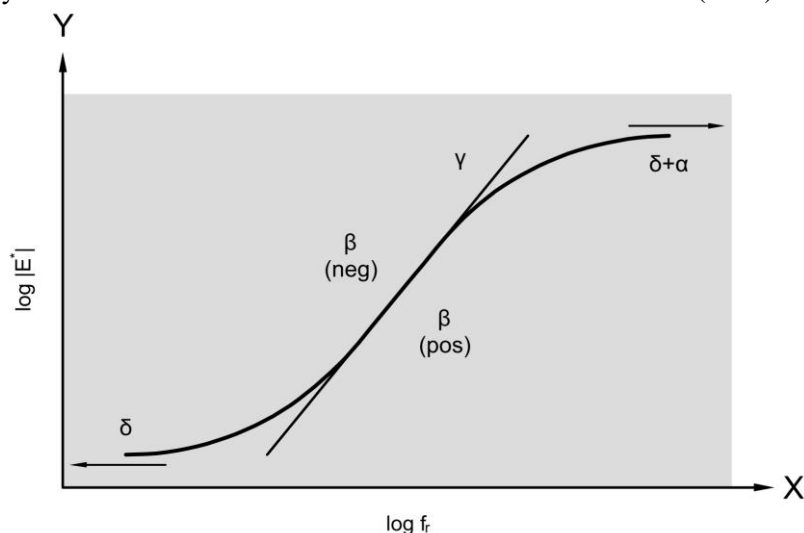
Nagyszámú rendelkezésre álló mérési eredmény esetén azonban lehetséges a klasszikus eltolási tényezők helyett az adatokra legjobban illeszkedő összefüggés paramétereinek valamilyen iterációs technika segítségével történő meghatározásakor az eltolási tényezőt is független változóként kezelni. Az optimalás elvégzésekor az eltolási tényezőt a nemzetközi szakirodalom jellemzően másodfokú függvénnyel javasolja megadni, például:

$$\log(a_T) = a \cdot (T - T_0)^2 + b \cdot (T - T_0) \tag{3}$$

ahol

- $a_T$  = eltolási tényező
- $T$  = kísérleti hőmérséklet
- $T_0$  = referencia hőmérséklet
- $a, b$  = együtthatók

Az eltolási tényezőkről további részletes ismertetőt ad Rowe és Sharrock (2011) kiváló munkája.



2. ábra: A szigmoid modell paramétereinek grafikus értelmezése

### 2.3. MESTERGÖRBE MEGHATÁROZÁS SZIGMOID MODELLEL

Amerikai kutatások (NCHRP 1-37-A 2004) fényében aszfaltkeverék esetén a mestergörbe egy folytonos, nem csökkenő, és szükségképpen alul – felül korlátos függvény, ennek figyelembevételével így egy nemlineáris S-alakú, ún. szigmoid függvénnyel leírható. A függvény alkalmazhatósága egyébként a keverék viselkedésének fizikai megfigyelésével is igazolható. Általános képlete az alábbi:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-a \cdot x}} \tag{4}$$

A mérési eredmények, merevségek birtokában megszerkeszthető a keverék mestergörbéje, amely aszfaltkeverékek esetén az alábbi képlettel írható le a frekvencia függvényében (Tóth, 2010):

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1+e^{\beta+\gamma \cdot \log(f_r)}} \tag{5}$$

ahol

- $|E^*|$  = merevség (MPa)
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  = regressziós paraméterek
- $f_r$  = redukált frekvencia (Hz)

Az (5) sz. egyenletekben,  $\delta$  az  $|E^*|$  merevség minimumértéke, a  $\delta + \alpha$  az  $|E^*|$  merevség maximum értéke,  $\beta$  és  $\gamma$  pedig a szigmoid-függvény paraméterei. A 2. ábra a szigmoid modell paramétereinek grafikus értelmezését mutatja. A modell nagy hátránya, hogy a keverék  $E^*$  komplex modulusa helyett annak csupán abszolút értékét, a merevséget használja, így például a fázisszög segítségével megfigyelhető viszkoelasztikus hatás a keverék viselkedésben nem tanulmányozható.

#### 2.4. A RAMBERG-OSGOOD (RAMBO) MODELL

A mestergörbét elsődlegesen a szigmoid-függvények felhasználásával szokás megkonstruálni, noha erre a célra más típusú függvények is felhasználhatók lennének. Az egyik ilyen lehetőség a talajok ciklikus viselkedésének modellezésére tervezett Ramberg-Osgood anyagmodell (SzilvÁgyi & Ray 2018). A Ramberg-Osgood függvény általános matematikai alakja:

$$x = y + C \cdot y^R \tag{6}$$

Kweon (2008) az aszfaltkeverékek mestergörbéjének leírására az alábbi formában javasolja a fenti függvényt felhasználni:

$$f_r = E_n \cdot f_r + C \cdot (E_n \cdot f_r)^R \tag{7}$$

ahol  $f_r$  a redukált frekvencia,  $E_n = (|E^*| - |E^*|_{\min}) / (|E^*|_{\max} - |E^*|_{\min})$  normalizált dinamikus merevség,  $C$  és  $R$  pedig modellállandók.

A Ramberg-Osgood modellt – a szigmoid-függvényekhez hasonlóan – optimalizációs eljárások segítségével lehetséges illeszteni a mérési eredményekre. Az illesztés eredménye az  $|E^*|_{\min}$ ,  $|E^*|_{\max}$ ,  $C$  és  $R$  paraméterek.

Kweon (2008) munkájában kimutatta, hogy a RAMBO modell paraméterei egymástól független hatást fejtenek ki a mestergörbére (lásd 1. táblázat).

1. táblázat: Az együtthatók hatása a mestergörbére (Kweon 2008)

Paraméter		Mestergörbe			
		Abszolút érték		Alak	
		Min.	Max.	Görbület	Eltolás
Sigmoid-függvény	$\delta$	○	○	×	×
	$\alpha$	×	○	×	○
	$\beta$	×	×	○	×
	$\gamma$	×	×	×	○
Ramberg-Osgood modell	$ E^* _{\min}$	○	×	×	×
	$ E^* _{\max}$	×	○	×	×
	$R$	×	×	○	×
	$C$	×	×	×	○

○: befolyásolja, ×: nem befolyásolja

Az  $R$  a mestergörbe görbületét (dőlését) befolyásolja, a  $C$  pedig – a hőmérséklet-idő eltolási tényezőhöz hasonlóan – a vízszintes tengelyen mozgatja azt. Ez utóbbi megállapítást nem vizsgálja részletesebben a szerző. A RAMBO modell együtthatóinak függetlensége lehetővé teszi a mestergörbe teljes morfológiájának numerikus jellemzését, ami az egyes keverékfajták gyors összehasonlításának lehetőségét rejti magában.

### 3. ANYAG ÉS MÓDSZER

A BME Út és Vasútépítési Tanszékén egy 2015-ös kutatásban a gumival modifikált aszfalkeveréket egy polimerrel modifikált és egy konvencionális kötőanyagú referencia keverékekkel hasonlítottuk össze (Kisgyörgy, Tóth & Geiger 2016). A vizsgálatba bevont három azonos kövázú aszfaltkeverék:

- AC22 kötő 50/70, mint referencia keverék
- AC22 kötő PmB 25/55-65, mint referencia keverék
- AC22 kötő GmB 45/80-55, mint fő vizsgálati keverék

A kutatásban arra kerestük a választ, hogy a keverékek merevségei alapján készített mestergörbék segítségével milyen további információk nyerhetők a gumival modifikált aszfalkeverékről. A három keverék komplex modulusát és fázis szögét SPT (Simple Performance Tester) segítségével határoztuk meg.

A vizsgálat közben mind a három keverékre, három hőmérsékleten, hat különböző frekvencián rögzítettük a merevség értékeket az alábbi kísérleti beállítások mellett:

- Hőmérsékletek ( $T$ ): 10°C, 20°C, 30°C,
- Frekvenciák ( $f$ ): 0,1 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 25 Hz.

Jelen munka során az így rendelkezésre álló komplex modulus adatokból meghatároztuk a keverékek jellemző mestergörbéjét a szigmoid és a Ramberg-Osgood modellek felhasználásával.

Az (5) szigmoid-függvényt a kísérleti és a modell által becsült merevségek négyzetes hibájának minimalizálásával (sum of square error, SSE) határoztuk meg (Md. Yusoff, Chailleux & Airey 2011):

$$SSE = \sum \frac{(\log|E_{exp}^*(f,T)| - \log|E_{pre}^*(a_T(T,T_{ref}) \cdot f, T_{ref})|)^2}{(\log|E_{exp}^*(f,T)|)^2} \quad (8)$$

Az optimalás elvégzésekor az  $a_T$  eltolási tényezőt a (2) Arrhenius-féle egyenlettel számítottuk 20°C referencia hőmérséklet mellett.

A szigmoid-függvény illesztésénél kapott  $f_r$  redukált frekvenciák alapján a (7) RAMBO modell együtthatói ( $|E^*|_{min}$ ,  $|E^*|_{max}$ ,  $C$  és  $R$ ) a kísérleti és a modell által becsült merevségek négyzetes hibájának minimalizálásával ugyancsak ismertnek tekinthetők.

A szigmoid-függvény és a Ramberg-Osgood (RAMBO) modell illeszkedését egyaránt befolyásolja a redukált frekvencia ( $f_r = a_T \cdot f$ ) számításánál használt  $a_T$  eltolási tényező (shift faktor), ami tulajdonképpen csak a terhelési idő tengelyével párhuzamosan tolja el az adatokat. Ez a hatás a RAMBO modellnél a  $C$  paraméter megfelelő értékének felvételével is elérhető. Az eltolódás nagysága a hőmérsékletnek függvénye, így az eredeti RAMBO modellt az alábbi formára hozhatjuk:

$$f = E_n \cdot f + C_T \cdot (E_n \cdot f)^R \quad (9)$$



ahol  $f$  a kísérleti frekvencia,  $T$  a kísérleti hőmérséklet,  $C_T$  az ismeretlen időtényező és  $R$  a mestergörbe dőlése. Az ismeretlen  $C_T = C(T)$  függvénykapcsolat minden hőmérséklet és frekvencia szinten mért kísérleti adatsor birtokában meghatározható lenne. Mivel ez sokszor fizikailag is kivitelezhetetlen, ezért csak valamilyen eltolási tényező összefüggéssel lehet minden hőmérsékletre és frekvenciára kiszámolni a dinamikus merevségeket a kísérleti beállítások alapján. A szigmoid-függvénnyel elvégezhető egy önkényesen felvett hőmérséklet tartományra a laboratóriumi adatok transzformációja, és az így nyert mesterséges  $f - |E^*|$  adatsorra már illeszthető a RAMBO modell.

A feltételezésnek megfelelően azt várjuk, hogy a  $C$  paraméter értékén kívül más nem változik. A GmB keverék esetén az előbbieken ismertetett elemzés eredményeit a 2. táblázat mutatja be.

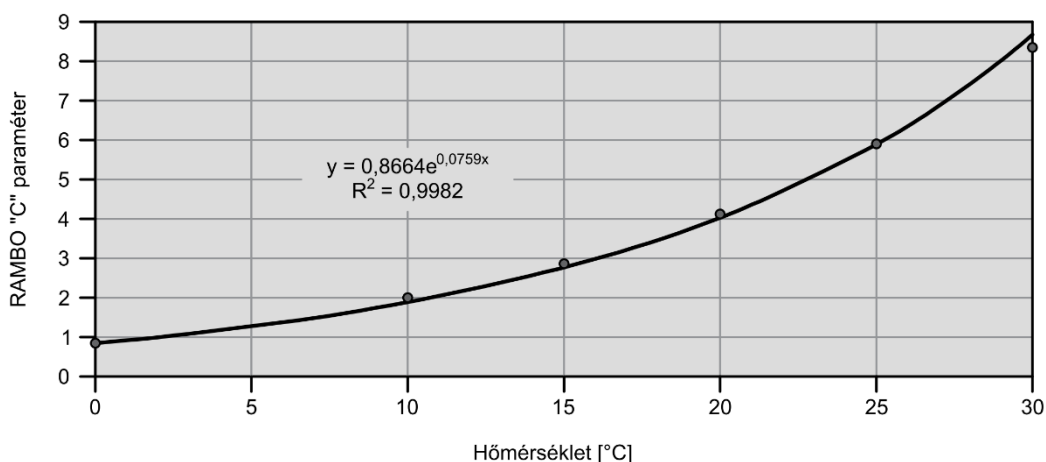
2. táblázat: A RAMBO modell paramétereinek változása a hőmérséklet függvényében

T [°C]	C	R	E <sub>min</sub> [MPa]	E <sub>max</sub> [MPa]
0	0,8282	0,73956	996	44060
10	1,9129	0,74074	1000	45000
15	2,7992	0,74216	962	45056
20	4,0407	0,74216	962	45056
25	5,7613	0,74215	962	45056
30	8,1345	0,74008	1032	43065
<b>ÁTLAG</b>		<b>0,741142</b>	<b>985</b>	<b>44549</b>

Jól látható, hogy csak a  $C$  paraméter értéke változott, a többi együttható tulajdonképpen változatlan maradt. A hőmérséklet függvényében ábrázolva a  $C$  paramétert megkapjuk a keresett függvénykapcsolatot (3. ábra):

$$C_T = k_1 e^{k_2 \cdot T} \tag{10}$$

ahol  $k_1$  és  $k_2$  regressziós állandók,  $T$  pedig a hőmérséklet. A  $k_2$  paraméter valószínűleg az anyagtulajdonságokkal hozható kapcsolatba, de ennek tisztázása további vizsgálatokat igényel.



3. ábra: A RAMBO modell „C” paramétereinek változása a hőmérséklet függvényében

A (9) modell előnye, hogy az aszfaltkeverék merevségének becslésére a különböző hőmérsékleten és frekvencián végrehajtott kísérleti eredményeket egyidejűleg használja fel az ún. időtényező ( $C_T$ ) segítségével, és így az  $a_T$  eltolási tényező elhagyható. A keresett együtthatók a kísérleti és a modell által becsült frekvenciák négyzetes hibájának minimalizálásával nyerhetők:

$$SSE = \sum \frac{(f_{exp} - f_{pre})^2}{(f_{exp})^2} \tag{11}$$

ahol  $f_{exp}$  a kísérletnél beállított frekvencia és  $f_{pre}$  a RAMBO modell által becsült frekvencia a következő összefüggés alapján:

$$f_{pre} = \left[ \frac{k_1 e^{k_2 \cdot T \cdot E_n^R}}{1 - E_n} \right]^{\frac{1}{1-R}} \tag{12}$$

A felparaméterezett RAMBO modell lehetővé teszi az  $a_T$  eltolási tényezőt adott  $T_{ref}$  hőmérsékletre kiszámítani:

$$a_T = \frac{1}{f} \left[ \frac{k_1 e^{k_2 \cdot T_{ref} \cdot E_n^R}}{1 - E_n} \right]^{\frac{1}{1-R}} \tag{13}$$

A szigmoid-függvény és a RAMBO modell illeszkedésének jóságát ( $R^2$ ) a becsült merevségek vagy frekvenciák segítségével egyaránt számíthatjuk. A gyakorlatban az utóbbi terjedt el, pedig a frekvenciák jóval érzékenyebben reagálnak a modell hibáira.

#### 4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

A kutatásban vizsgált háromféle keveréktípusból két sorozat készült és mind a 6 db adatsorra illesztettük a szigmoid-függvényt és az általunk módosított RAMBO modellt. Az aszfaltbeton keverékek eredményeit a 3. és 4. táblázatok foglalják össze.

3. táblázat: A RAMBO modell paraméterei a három vizsgálati keverékre

Keverék fajta	Kód	$E_{min}$	$E_{max}$	R	$k_1$	$k_2$	$R^2$ [f]	$R^2$ [E*]	$T_{ref}$
AC22 kötő 50/70	AG1	1313	40715	0,6584	0,1331	0,1142	0,6471	0,9819	17,7
	AG2	1515	32673	0,6351	0,1304	0,0985	0,7562	0,9878	20,7
AC22 kötő PmB 25/55-65	BG1	2072	29484	0,6266	0,0902	0,1124	0,9943	0,9974	21,4
	BG2	1750	34667	0,6661	0,1538	0,0997	0,8052	0,9945	18,8
AC22 kötő GmB 45/80-55	CG1	1686	25336	0,6351	0,3069	0,0958	0,9734	0,9976	12,3
	CG2	1638	29981	0,6669	0,4304	0,0894	0,9748	0,9969	9,43

4. táblázat: A szigmoid modell paraméterei a három vizsgálati keverékre

Keverék fajta	Kód	$E_{min}$	$E_{max}$	$C_A$	$\gamma$	$\beta$	$\alpha$	$\delta$	$R^2$
AC22 kötő 50/70	AG1	987	34664	12635	0,87	-1,14	1,55	2,99	0,9856
	AG2	1337	28774	10416	1,02	-1,35	1,33	3,13	0,9909
AC22 kötő PmB 25/55-65	BG1	1628	28363	11162	0,99	-1,20	1,24	3,21	0,9978
	BG2	1263	32029	11221	0,84	-1,12	1,40	3,10	0,9956
AC22 kötő GmB 45/80-55	CG1	1467	24353	9985	0,97	-0,13	1,22	3,17	0,9983
	CG2	1431	28363	10142	0,86	-0,03	1,30	3,16	0,9977

A RAMBO modell pontosságát jól mutatja a becsült és beállított frekvenciák alapján számított  $R^2$ , ahol az értéke kisebb mint 0,9 ott az adatsorban kiugró értékek szerepelnek, ami valószínűleg mérési hiba.

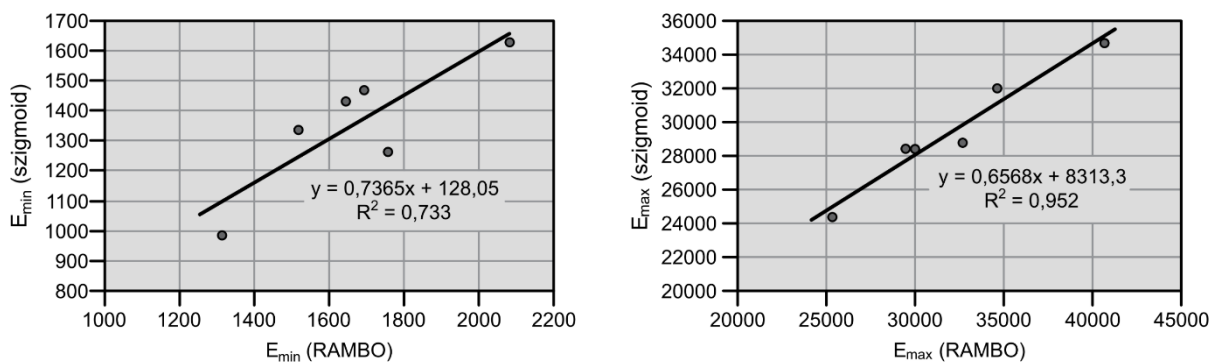
A hagyományos mestergörbe meghatározás egyik alapfeltevése, hogy egy kijelölt referencia hőmérsékleten mért merevségeket „rögzítjük” az eltolási tényezőt egynek véve, és ehhez képest mozdítjuk el a különböző hőmérsékleten mért merevségeket. A RAMBO modell alkalmazásakor ezt a megközelítést nem tettük meg, így a modell illesztésekor a különböző keverékek esetén különböző hőmérsékleten kaptuk meg a legjobb illeszkedést. Alkalmazva, hogy a  $C_T$  időtényező az aszfaltbeton keverékre jellemző „referencia hőmérsékleten” egyenlő eggyel, visszaszámolhatóvá válik egy ún. új referenciahőmérsékletet a következő összefüggés szerint:

$$T_{ref} = -\ln(k_1) \cdot k_2^{-1} \tag{14}$$

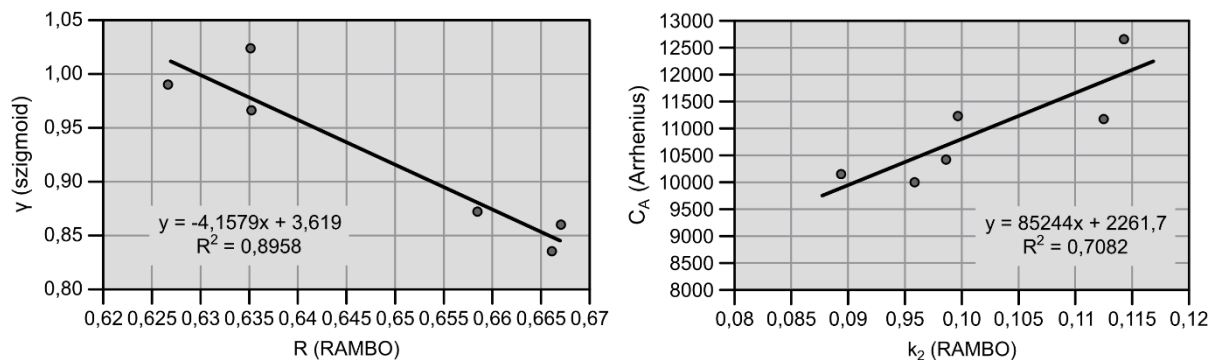
A  $T_{ref}$  hőmérsékleteket ugyancsak a 3. táblázat tartalmazza az egyes keverékekre. Ennek jelentősége, illetve elméleti értelmezhetősége még további kutatást igényel, azonban az első eredmények szignifikáns, anyagspecifikus viselkedést sejtetnek. A gumival modifikált keverékeknél a  $T_{ref}$  érték 9-12°C míg a hagyományos és polimerrel modifikált keverékeknél ez 19-22°C. Az alacsonyabb  $T_{ref}$  érték jobb hidegviselkedést enged feltételezni.

A RAMBO modellel kapott mestergörbéket a szigmoid-függvénnyel készült görbékkel is összevetettük. A szigmoid modell illesztése nyomán, az Arrhenius-féle eltolási tényezőt alkalmazva és annak  $C_A$  paraméterét az optimalizáció alatt változóként kezelve a 4. táblázatban szereplő értékeket kaptuk.

A RAMBO modell eredményeit a hagyományos szigmoid modellel grafikusan összevetve, a 4. ábrán az elméleti minimum, illetve maximum merevségek láthatók. A korreláció szorossága különböző, ugyanakkor a kapcsolat megléte igazolt.



4. ábra: A szigmoid és a RAMBO modell paraméterek közötti kapcsolat I.



5. ábra: A szigmoid és a RAMBO modell paraméterek közötti kapcsolat II.

Az 5. ábrán a hasonló jellegű paraméterek viszonya látszik. A mestergörbe meredekségével kapcsolatba hozható  $\gamma$  illetve  $R$  értékek között szintén szoros a kapcsolat. Az Arrhenius-féle eltolási

tényező anyagspecifikus  $C_A$  paramétere és az RAMBO időtényező  $k_2$  paramétere között szintén igazolható szignifikáns korreláció. Vizsgálatainkkal igazoltuk, hogy a két modell segítségével kapott mestergörbék nagyon hasonló jelleget mutatnak.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Mint arra már korábban többször is utaltunk, az előírt hőmérsékleten meghatározott egyetlen merevségi értékkel ugyan a keverékek jellemezhetők, de keverékek közötti különbségek már nem tárhatók fel teljeskörűen. Egy tekintélyes munkacsoport (CROW-report 2006) az új holland aszfalt pályaszerkezet méretezési rendszer számára tett ajánlásaiban kihangsúlyozta, hogy minden esetben javasolt a mestergörbe meghatározást előírni, tekintettel annak értékes információtartalmára.

Figyelembe véve, hogy a hőmérséklet-idő ekvivalencia megteremti annak a lehetőségét, hogy olyan idő, illetve frekvencia tartományokat is tanulmányozunk, amelyek kísérletileg nem, vagy csak nagyon nehezen állíthatók be, az ehhez szükséges matematikai eszközök fejlesztése, illetve finomítása fontos feladat. Segítségükkel az aszfaltkeverékek mestergörbéjének meghatározása lehetővé teszi az összehasonlítást a különböző frekvencián és hőmérsékleten végzett vizsgálatok között, továbbá az aszfaltkeveréknek a merevség vizsgálatok során a teljes hőmérsékleti skálán megfigyelt fizikai viselkedése is rögzíthetővé válik.

Jelen tanulmányban bemutattuk az aszfaltkeverék mestergörbe meghatározásának egy lehetséges módszerét, a szigmoid-függvény mellett az ún. RAMBO modellt. A RAMBO modell vizsgálataink alapján jól képes helyettesíteni a szigmoid-függvényt a merevségadatok leírásában, együtthatóinak függetlensége pedig lehetővé teszi a mestergörbe teljes morfológiájának numerikus jellemzését, ami mind az aszfaltgyártás, mind a beépítés alatt a minőségbiztosítási rendszerek egyik alapja lehet.

## 6. IRODALOMJEGYZÉK

MSZ EN 12697-26:2018: „Aszfaltkeverékek. Meleg aszfaltkeverék vizsgálati módszerei. 26. rész: Merevség.”

National Cooperative Highway Research Program, 2004: Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. NCHRP 1-37-A

Tóth, C. 2010: Aszfaltkeverékek mestergörbéjének meghatározása; Közlekedéscsillagás Szemle, Vol. 60. No. 2. pp. 14–19.

Kim, M., Mohammad, L. N. & Elseifi, M. A. 2015: Effects of Various Extrapolation Techniques for Abbreviated Dynamic Modulus Test Data on the MEPDG Rutting Predictions. Journal of Marine Science and Technology 23 (3): 353–63. <https://doi.org/10/gfxr36>

Kisgyörgy, L., Tóth, C. & Geiger, A. 2016: Elastic modulus of asphalt with chemically stabilized rubber bitumen. Građevinar 68 (07.): 533–41. <https://doi.org/10/gfx3zw>

Kweon, G.C. 2008: Application of Modified Ramberg-Osgood Model for Master Curve of Asphalt Concrete. International Journal of Highway Engineering 10 (4): 31–40.

Md. Yusoff, N. I., Chailleux, E. & Airey, G. 2011: A comparative study of the influence of shift factor equations on master curve construction. International Journal of Pavement Research and Technology 4 (6): 324–36.

Rowe, G. M. & Sharrock, M. J. 2011: Alternate Shift Factor Relationship for Describing Temperature Dependency of Viscoelastic Behavior of Asphalt Materials. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2207 (1): 125–35. <https://doi.org/10/b7wq7q>

Szilvágyi, Z. & Ray, R. P. 2018: Verification of the Ramberg-Osgood Material Model in Midas GTS NX with the Modeling of Torsional Simple Shear Tests. Periodica Polytechnica Civil Engineering, február. <https://doi.org/10/ggfz62>