

# TARTALOM

## FELELŐS KIADÓ:

Szabó Zoltán (ÁKMI)

## FELELŐS SZERKESZTŐ:

Dr. habil. Koren Csaba

## SZERKESZTŐK:

Dr. Gulyás András

Dr. Lánosz Pál

Rétháti András

Schulek János

## LEKTORI TESTÜLET:

Apáthy Endre

Dr. Boromisza Tibor

Csordás Mihály

Dr. habil. Farkas József

Dr. habil. Fi István

Dr. habil. Gáspár László

Hórvölgyi Lajos

Huszár János

Jaczó Győző

Dr. Keleti Imre

Dr. habil. Mecsi József

Molnár László Aurél

Pallay Tibor

Dr. Pallós Imre

Regős Szilveszter

Dr. Rósa Dezső

Dr. Schváb János

Dr. Szakos Pál

Dr. habil. Szalai Kálmán

Tombor Sándor

Dr. Tóth Ernő

Varga Csaba

Veress Tibor

Címlapfotó:

Papp Gábor

2

**Dr. Koren Csaba**

Az 55. évfolyam elé

3

**Dr. Tóth-Szabó Zsuzsanna**

A járművezetők járműkövetési viselkedésének modellezése mesterséges intelligenciával

7

**Dr. Kisgyörgy Lajos**

A Forgalmi áramlatok kaotikus dinamikája

11

**Boldog Gyöngyi**

Az Öreg híd Mostarban

17

**Dr. Medved Gábor**

Autópálya-fejlesztések és hídjaik

22

**Liegner Nándor**

A vasúti pálya dinamikája

28

**Subert István**

A dinamikus tömörség- és teherbírásmérés újabb paraméterei és a modulusok átszámíthatósági kérdései

33

**Szabó Eszter**

Körforgalmú csomópontok geometriai vizsgálata a biztonság szempontjából

38

**Prof. Jose Manuel Viegas**

Az útdíjas autópályák és a jó minőségű, ingyenes alternatív útvonalak kapcsolata

A cikkekben szereplő megállapítások és adatok a szerzők véleményét és ismereteit fejezik ki, amely nem feltétlenül azonos a szerkesztők véleményével és ismereteivel.

## KÖZÚTI ÉS MÉLYÉPÍTÉSI SZEMLE

Alapította a Közlekedéstudományi Egyesület.

A közlekedésépítési és mélyépítési szakterület mérnöki tudományos havi lapja.

## Az 55. évfolyam elé

Az esztendő első napjaiban, az ünnepek elmúlásával talán egy kicsivel több időnk jut az elmúlt év áttekintésére, értékelésére. A jelenlegi felelős szerkesztő bemutatkozása óta eltelt jó két évben több újítással találkoztak lapunk olvasói. A másfél évvel ezelőtti formai átalakulás számos további apró, kevésbé látványos változást is hozott. A mostanra már megszokott színes címlapot és az újság belső színes oldalait olvasóink örömmel fogadták és beszélgetéseink során dicsérettel említik.

A lapban a korábbinál nagyobb szerepet kaptak a tematikus számok, amelyek egy-egy aktuális téma köré csoportosítják a szakcikkeket. 2003 júliusa óta hét alkalommal: az M9 autóútról és a szekszárdi Duna-hídról, a PIARC Útügyi Világszövetség munkájáról, a rendkívül nehéz terhelésű gyorsforgalmi utak pályaszerkezetéről, az EU csatlakozásról, a számítógépes útnyilvántartásról, a közúti biztonsági auditról és legutóbb a metró kelet-nyugati vonalának felújításáról jelent meg részletes szakmai áttekintést nyújtó tematikus szám. A kapott visszajelzések ösztönzően hatnak további tematikus számok témáinak kiválasztására, cikkeinek elkészítésére, megjelentetésére.

Örömmel folytatjuk e számunkban korábbi sorozatunkat, a Közúti Szakemberekért Alapítvány által díjazott fiatal szakemberek pályaműveinek ismertetését. Jó alkalom ez arra, hogy ifjú kollégáink gyakorlatot szerezzenek egy-egy téma tömör megfogalmazásában. Reméljük, hogy az ismertetéseket olvasva még többen kapnak kedvet saját dolgozat elkészítéséhez, a következő pályázaton való induláshoz.

Lapunk olvasói közül sokan üdvözltek a Nemzetközi Szemle rovatban megjelenő „kedvcsináló” tömörítvényeket. A külföldi szaklapok cikkei dr. Gulyás András hozzáértő vezetésével, több fiatal – és lélekben fiatal – kolléga lelkes munkája nyomán alakulnak át az újság népszerű rovatának cikkeivé. Mivel a fordítók neve csak kezdőbetűvel jelenik meg a hírek végén, ez alkalommal álljon itt a teljes névsor is: dr. Boromisza Tibor, Makó Emese, Szirányi Balázs, dr. Tóth-Szabó Zsuzsanna.

A szerkesztőbizottságban a Csordás Csaba halálával megüresedett helyet Schulek János tölti be. Személyében a mélyépítési szakterület kapott képviselőt a lapot közvetlenül készítő testületben. Itt említendő még dr. Tóth-Szabó Zsuzsanna, aki a felelős szerkesztő mellett, Antal Ágota, aki magyar nyelvi lektorként és Emőkey Balázs, aki informatikai ügyekben segíti a szerkesztők munkáját.

A Közlekedéstudományi Egyesület évente kiadott szakirodalmi nívódíját lapunk szerzői ez alkalommal két cikkel nyerték el: Dr. Ambrus Kálmán – Dr. Karsainé Lukács Katalin – Dr. Pallós Imre – Vinczéné Görgényi Ágnes: Lehetséges pályaszerkezeti változatok a rendkívül nehéz forgalmi terhelésű útszakaszok hosszú életciklusú pályaszerkezeteire a nemzetközi gyakorlat tükrében és Dr. Jankó Domokos: A hazai közúti biztonság aktuális kérdései. A nyertesek a napokban veszik át a díjat a KTE éves küldöttgyűlésén. Gratulálunk!

Az elmúlt évben kaptunk a további fejlődést szolgáló tanácsokat is. Ezek egyikét megfogadva döntöttünk úgy, hogy ettől az évtől kezdve a lap számai teljes terjedelemben elérhetők lesznek az Interneten, a [www.kozut.hu](http://www.kozut.hu) honlapon.

Az új év új székhelyet is hozott. A szerkesztőség új címe megegyezik a felelős szerkesztővel, 9026 Győr, Egyetem tér 1. „Műhelyitokként” elárulható, hogy a szerkesztőbizottság üléseit és a lektori testület találkozóit továbbra is Budapesten, a Fényes Elek u. – Lövőház u. környékén tartjuk.

Reméljük, hogy olvasóink az 55. évfolyam oldalait is érdeklődéssel forgatják, és szerzőink lelkesen írnak – időnként akár vitára indító – cikkeket.

### Sikerekben és megbecsülésben gazdag Boldog Új Évet Kívánunk!

A szerkesztők nevében

**Dr. Koren Csaba**  
felelős szerkesztő

# A járművezetők járműkövetési viselkedésének modellezése mesterséges intelligenciával<sup>1</sup>

Dr. Tóth-Szabó Zsuzsanna<sup>2</sup>

## Bevezetés

A mesterséges intelligencia fogalmát a különböző szakterületeken dolgozó felhasználók és kutatók más és más módon értelmezik. A félreértések javarésze az intelligencia szó pontos definíciójának hiányából ered. Valójában, a mesterséges intelligencia – a továbbiakban MI – lényegében kutatói és mérnöki tudomány, amit alapjaiban meghatároz a modern számítástechnika, a matematika és más tudományok fejlődése. Mivel ez a tudományterület az utóbbi években, évtizedekben nagyon kibővült, az Amerikai Mesterséges Intelligencia Társaság honlapján [1] talált leírások alapján fokozatosan két csoportra válik a témakörhöz tartozó fogalmak, alkalmazások köre. Az „erős MI” elvárásai szerint az alkalmazási folyamat során a számítógép legyen képes emberi módon gondolkodni, és a tudatosság elemei is jelenjenek meg a gép döntési folyamatában. Ezzel szemben „gyenge MI” alkalmazása esetén csak néhány gondolkodásszerű elem beépítésére gondolunk, ami igazából csak még hasznosabb eszközzé teszi számítógépünket. A második csoporthoz tartozó alkalmazások máris széles körben terjednek a legkülönbélebb felhasználási területeken, gondoljunk csak a szakértői rendszerek kialakulására, az „automata” autók, beszédfelismerő rendszerek széles körű megjelenésére. Ám annak az egyszerűnek hangzó, mégis sok vitát kiváltó kérdésnek az eldöntése, hogy valójában hol a határ a valódi gondolkodás és a gondolkodás-szerű elem között, még várat magára.

A mesterséges intelligenciát használó vagy fejlesztő szakemberek mindannyian a programban különböző módon felépített, egyedi célokat szolgáló neurális hálót használnak. A mesterséges intelligencia alapját adó eszköz lényegét – a Warren S. Sarle honlapján közzétett [2] leírás alapján – a következőképpen a legkönnyebb elképzelni. Először is, amikor ilyen neurális hálóról beszélünk, minden esetben a mesterséges neurális hálókra kell gondolnunk. A való életben létező biológiai neurális hálók felépítése és működése sokkal bonyolultabb a modellezéshez használtakénál. Annak, hogy a „mesterséges” jelző hiányzik a háló általánosan használt nevéből, a tudományos lustaság a legnagyobb oka.

Sajnos még nem létezik egységesen elfogadott, minden hálóra egyaránt érvényes definíció. A témában dolgozók többsége talán mégis egyetért abban, hogy a neurális háló lényegében egyszerű processzorok alkotta hálózat (egységek), ahol minden pro-

cesszornak van kis mennyiségű lokális memóriája. Az egységek kommunikációs csatornákkal kapcsolódnak össze (kapcsolatok), amelyek rendszerint numerikus formában tartalmaznak különböző információkat. Az egységek csak saját helyi adataikat és a kapcsolatokon keresztül érkező adatokat képesek felhasználni a döntési folyamatokban. A tanítási folyamatban az egyes műveletek lokálisan megadott korlátai gyengülhetnek. A jelenleg használt mesterséges neurális hálók közül néhány a biológiai neurális háló kapcsolatrendszerét vagy egységstruktúráját veszi alapul, mások azonban egyedi elrendezéseket használnak. A neurális hálók fejlesztését – felépítéstől függetlenül – elsődlegesen mindig az a szándék motiválta, hogy sikerüljön előállítani egy mesterséges rendszert, mely képes kifinomult, mondhatni „intelligens” számításokat elvégezni, melyeket az emberi agy rutinszerűen végez, és ezáltal előrébb juthatunk az emberi agy működésének megértésében.

A neurális hálóknak általában szükségük van valamilyen „tanulási” folyamatra, ami alatt a megadott adatbázis egyes elemei közötti kapcsolatok erősségét szabályozzák be. Mondhatnánk úgy is, hogy a neurális hálók ugyanúgy példákban tanulnak, ahogy a gyerekek, például amikor megtanulják megkülönböztetni egymástól a macskát és a kutyát. A gondos tanítási folyamat eredményeként a neurális háló képes lehet olyan, nem pontosan definiálható összefüggéseket találni a tanítási adatbázisban, amellyel új, még nem használt bemeneti adatok esetén is jó becslési eredményeket kapunk.

A neurális hálóban rejlő lehetőségek számos különböző tudományterület kutatóit motiválják újabb és újabb fejlesztésekre. Az eddig ismert felhasználók köre folyamatosan bővül.

- A számítástechnika tudósai a neurális hálók által feldolgozott nem szimbolikus információk tulajdonságait, és általában a tanulási folyamatot kutatják.
- A statisztikusok a neurális hálót rugalmas, nem lineáris regressziós és osztályozási modellként használják fel kutatásaikban.
- A mérnökök a neurális hálók számos gyakorlati alkalmazását fejlesztik ki különböző területeken, mint például a jelfeldolgozás és az automatikus ellenőrzés rendszere.
- A természettudományok tudósai úgy tekintenek a neurális hálóra, mint a gondolkodás és a tudatosság (vagyis a magas szintű agyfunkciók) egy lehetséges leíró eszközére.
- Az idegi működést vizsgáló neurológusok a neurális hálókat a közepes szintű agyfunkciók (memória, érzékelő rendszer, motorikus működés) leírására használják.

<sup>1</sup> Az MTA Közlekedéstudományi Bizottságának 2004. novemberi ülésén elhangzott előadás alapján

<sup>2</sup> Tudományos munkatárs, Széchenyi István Egyetem Közlekedésépítési és Településmérnöki Tanszék; e-mail: tothzs@sze.hu

- A fizikusok főként a statisztikus mechanikai jelenséges modellezésére, de számos más esetben is alkalmazzák a hálót.
- A biológusok a DNS nukleinsavainak a kialakulási folyamatában használják a neurális háló nyújtotta lehetőségeket.
- A filozófusok és más tudós vagy „amatőr” szakemberek pedig a legkülönbözőbb célokból érdeklődnek a neurális háló iránt.

A neurális háló már említett tanítási folyamatához olyan adatsor szükséges, amely mind a bemenő adatokat, mind a későbbiekben eredményként várt adatokat, vagyis a kijövő adatokat tartalmazza. A sikeres tanítási folyamat célja, hogy a háló eleinte a már ismert, később a teljesen új bemeneti adatokból helyes „következtetésekkel” jó kimeneti adatsort állítson elő. Bár egyszerűen megfogalmazható a sikeres tanítási folyamat, mégis nagyon idő- és adatigényes. Számos alkalmazásban, például a kép- és szövegfeldolgozásnál, a bemenő adatok numerikus formájú előállítás is munkaidényes. A gyakorlati életben könnyen alkalmazhatók a neurális hálók különböző – zárt matematikai formában nem leírható – függvények becslésére vagy azonosítására, ahol elegendő tanító adat áll rendelkezésre, és a becslés kismértékű pontatlansága nem okoz gondot. Elegendő számítógépes kapacitás esetén szinte minden, folytonos értelmezési tartománnyal rendelkező vektorfüggvény tetszőleges pontossággal becsülhető a neurális háló megfelelő alkalmazásával (nem véletlenül ez a neurális hálók leggyakoribb alkalmazási területe).

Végül fontos megjegyezni, hogy nincs olyan tanítási módszer, amellyel elérhető, hogy a neurális háló önállóan alkosson olyan információkat, amelyeket a bemenő adatok nem tartalmaznak.

## A kérdés

A neurális háló széles körű alkalmazásának bemutatása után a kérdés szinte adódik: hogyan tudjuk ezt az eszközt használni a forgalomelemzés során? A neurális háló segítségével eleinte a forgalomban kialakult oszlopokat próbáltuk modellezni. A járműkövetési magatartás modellezésének a fő célja az, hogy le tudjuk írni a járművezetők döntését különböző körülmények között a sebességre, a követési távolságra, a választott haladási sávra vonatkozóan. Mennyi lesz a sebességkülönbség a járművezetők között? Van-e lassító hatás? Megjelenik-e az előzési szándék? A járművezetőkre vonatkozó pszichológiai vizsgálatok kimutatták, hogy a haladási sebességet döntően befolyásolja, hogy az előtte haladó jármű milyen távol van. A másik oldalról viszont a követési távolság a sebesség függvénye. A megfigyelt adatokra támaszkodva, az egyes szolgáltatási szintek a követési távolság alapján világosan elkülöníthetők.

Bebizonyították [3], hogy a járművezetők sebességük megválasztásakor

- nem veszik figyelembe az előttük haladó járművet, ha az 7,5 s-nál nagyobb távolságra van;

- mérsékelten veszik figyelembe, és igyekeznek minél távolabb maradni vagy megelőzni, ha a követési időköz 4,5 és 7,5 s között van;
- meghatározó módon veszik figyelembe, ha a követési időköz 4,5 s-nál kisebb.

Ennek a kutatásnak a célja találni egy hatékony neurális háló alkalmazást a közlekedésben, és elérni egy jó sebesség-előrebecslést az adott eszközökkel és mérési eredményekkel.

## Az eszköz

Az aiNet hatékony és egyszerű eszköz a mesterséges neurális hálók alkalmazásával általában kezelhető problémák megoldására. Számos lefuttatott teszt bebizonyította, hogy az aiNet-tel elért eredmény legalább olyan jó, mint más neurális hálóval elérhető eredmények.

## A jelenség modellezése

A neurális hálók és a neurális háló elvét használó eszközök felépítésüknél fogva becslésre, közelítő értékek előállítására alkalmasak. Egyebek között a nemlineáris függvények becslésére is használhatók, ezért segítségükkel a közlekedésben az egyes statikus vagy dinamikus forgalomáramlási jelenség járműfolyamra gyakorolt hatását próbáljuk közelíteni. Elsőként a járművek sebessége és a követési távolság közötti kapcsolat létét és erősségét kerestük. A vélt összefüggés matematikai formában a következő módon írható le:

$$V=V(t).$$

A neurális háló tanítására szolgáló adatbázis két-sávós, külterületi út egyetlen keresztmetszetének forgalomáramlási adatait, vagyis a kiválasztott keresztmetszeten áthaladó járművek sebességét, érkezési idejét, járműosztályát tartalmazta mindkét sávra. Az adatbázis kialakításához 20 nap (480 óra) teljes forgalmának minden adata megvolt.

A becslési folyamat a következő lépésekből állt:

Először kiválasztottunk 10 000 egymást követő járművet egy sávon, és próbáltunk közelítő becslést adni a követő jármű sebességére, felhasználva a megelőző jármű sebességét és a követési időköz értékét. Sajnos a becsült értékek nagyon eltértek a tényleges értékektől. Ennek oka talán a bemenő adatok (mind a sebességértékek, mind a követési időköz értékei) nagy szórása volt, hiszen az első 10 000 egymást követő jármű egyaránt tartalmazott nappali és éjszakai forgalmi méréseket.

Néhány sikertelen becslési kísérlet után kiválogattuk az oszlopban haladó járműveket, ahol az előzetes megfigyelések alapján a legerősebb a sebesség–követési idő kapcsolat. Kiválasztottunk olyan járműhármasokat, ahol a legelől haladó (0. jármű) és a középső (1. jármű) jármű között, valamint a középső (1. jármű) és az utolsó (2. jármű) jármű között is 4 s-nál kisebb volt a követési időköz. Ekkor a háló tanítására szolgáló, modellvektorokból felépülő adatmátrix a következő volt.

modell-vektor	=	sebesség 1 (km/h)	követési idő 1 (s)	sebesség 2 (km/h)	követési idő 2 (s)
$mv_1$	=	56	3	56	3
$mv_2$	=	57	3	58	2
$mv_3$	=	58	2	52	3
...	=				
...	=				
$mv_n$	=	50	3	49	1

A bemutatott modellvektorokkal elvégzett tanítási folyamat eredményeként kapott becslt értékek tovább javíthatók, ha bevezetünk egy változót. Ennek a változónak a definíciója tetszőlegesen változtatható a folyamat során, de fontos, hogy egy tanítás és a hozzá tartozó becslés alatt állandó legyen a jelentése. A becslt értékek akkor estek a tényleges értékek közelébe, ha a változó definíciójának a középső és az utolsó jármű sebességének különbségét (sebesség 1–sebesség 2) adtuk meg. A tanítási és a becslési folyamat gyorsítása érdekében csak 50 három elemű oszlop adatait használtuk a jelenség leírására. Így a végső mátrixnak 50 sora és 5 oszlopa volt, a következő modellvektorokkal:

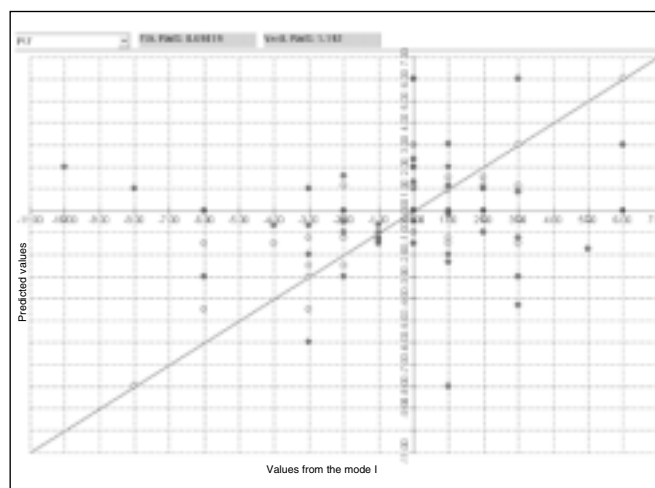
modell-vektor	=	sebesség 1 (km/h)	követési idő 1 (s)	sebesség 2 (km/h)	követési idő 2 (s)	különbség
$mv_1$	=	56	3	56	3	0
$mv_2$	=	57	3	58	2	1
$mv_3$	=	58	2	52	3	-6
...	=					
...	=					
$mv_{50}$	=	50	3	49	1	-1

A becslési és a tanítási folyamat során a bemenő adatokként a sebesség és a követési időköz szolgált, a kijövő – becslt – változó pedig a sebességkülönbség volt.

## Az eredmény

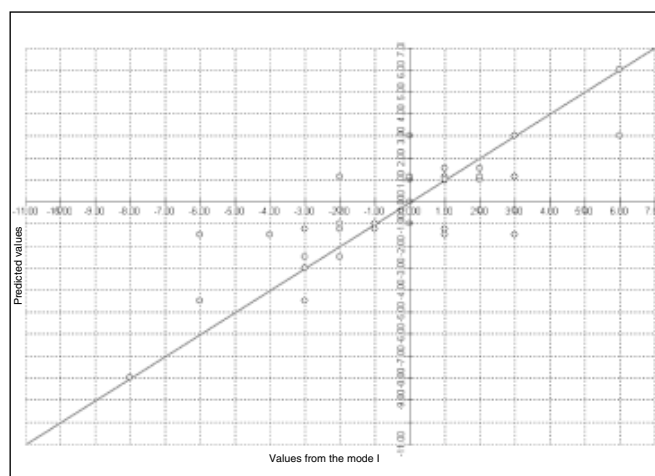
Előfordul, hogy a becslési folyamat során a bemeneti mátrix megváltozik. Ez lehet a modellvektorok elemeinek vagy maguknak a vektoroknak a sorrendje, változhatnak értékek, esetleg a sorok vagy az oszlopok száma a mátrixon belül. Ekkor a használt aiNet program képes a kimeneti oldal újraszámolására. A becslési folyamat során – természetesen – minden program követ el hibákat, hiszen nem konkrét összefüggések alapján számoljuk a kimeneti értékeket. Az aiNet speciális, beépített algoritmussal – az eredeti bemenő adatokhoz becslt és mért kimeneti adatok összehasonlításával – képes meghatározni a becslt értékek hibaszázalékát. Ehhez meg kell határozni az eredmények filtrációját és verifikációját, modellvektoronként.

A program képes a kapott eredményeket grafikus és táblázatos formában is ábrázolni. Az 1. ábra a be-

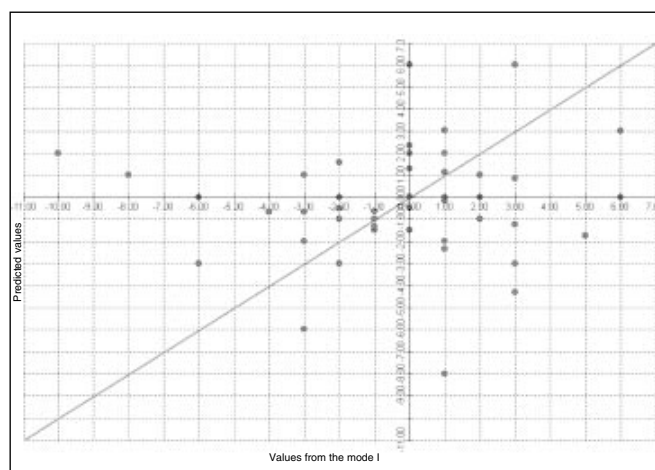


1. ábra: A mért és a becslt értékek közötti korreláció

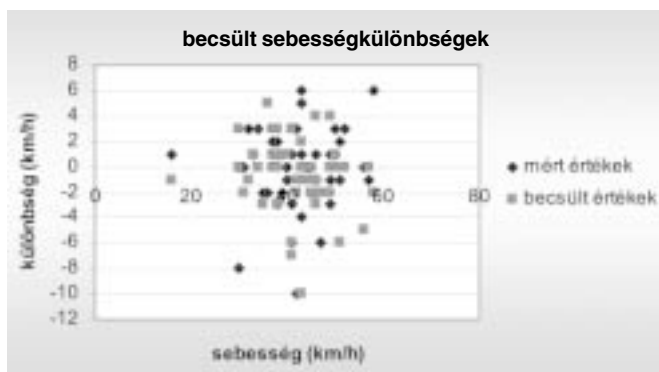
csült és mért értékek közötti korrelációt mutatja. A vízszintes tengelyen a tanítómátrix eredményei szerepelnek, a függőleges tengelyen pedig az aiNet által adott eredmények. Ha a becslt és a kapott eredmények megegyeznek (vagy majdnem megegyeznek), akkor a pontok a 45-os egyenes mentén helyezkednek el. Más szóval: minél közelebb vannak a pontok az átlóhoz, annál pontosabb a program becslése, annál kisebb a verifikációs (piros pontok) és filtrációs (zöld pontok) hiba. A 2. és a 3. ábra külön mutatja a verifikációs, és külön a filtrációs értékeket.



2. ábra: Filtráció



3. ábra: Verifikáció



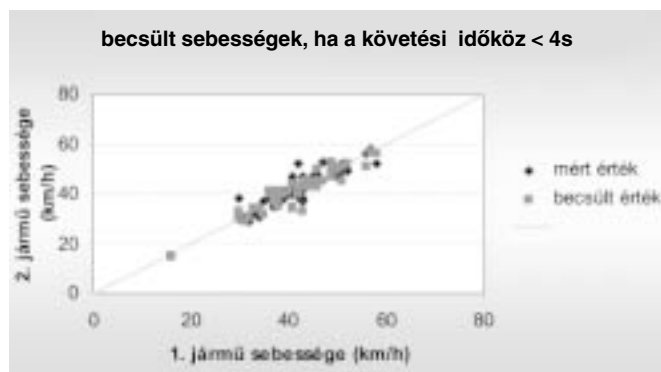
4. ábra: A becsült és a mért sebességkülönbségek összehasonlítása

A munka következő része a becslés során kapott és a valós, mért sebességkülönbségek összehasonlítása. A 4. ábra mutatja a kapott eredményt.

Látható, hogy a sebességkülönbségek becsült és valós értékei közel esnek egymáshoz. Mind a mért, mind a becsült értékek közötti sebességkülönbségek két csoportra oszthatók. Ahol a sebességkülönbség nagy, ott a követő jármű sebessége jelentősen nagyobb, mint az előtte haladóé, ami azt jelenti, a jármű előzéshez készül. Az elemzést folytatva talán jó közelítő értéket kapunk az adott forgalmi körülmények között jelentkező előzési igényről. A valós és a becsült sebességkülönbségekkel számolt haladási sebességértékeket tekintve szemmel látható, hogy a program jól sebesség-értékeket becsült. (5. ábra)

### További felhasználási lehetőségek

Amint látjuk, a mesterséges neurális háló, más szóval a mesterséges intelligencia hasznos lehet a forgalom elemzésekor. Segítségével a forgalom – matematikai oldalról nézve – legkevésbé tényleges elemét, a járművezető viselkedését és egyes szituációkban meghozott döntéseit modellezhetjük. A bemutatott első, ígéretes eredmények, számos reménnyel kecsegtet-



5. ábra: A mért és a valós sebességértékek összehasonlítása

nek a jövő kutatásaira nézve. A neurális háló használatával például:

- eredményesen vizsgálhatjuk a forgalomnagyság és a tehergépjármű-forgalom arányának a hatását a forgalomáramlásra,
- vagy a követési időközök alakulását a tehergépjárművek körül,
- újabb tájékoztatást kaphatunk az egyes szituációkban megjelenő előzési igényről,
- sikerrel elemezhetjük az oszlopban haladó járművek viselkedését,
- vagy a váratlan forgalmi szituációkban a járművezetők viselkedését.

### Irodalom

- [1] American Association for Artificial Intelligence <http://www.aaai.org/>
- [2] <ftp://ftp.sas.com/pub/neural/FAQ.html#A2>
- [3] TÓTH Zs., A kis és közepes forgalomnagyság mellett kialakuló szolgáltatási szintek vizsgálata, meghatározási módjuk és tartósságuk szempontjából. PhD disszertáció BME, Budapest, 2003.
- [4] aiNet manuals 1. part <http://www.ainet-sp.si/>

## Summary

### Estimating car-following behaviour using artificial intelligence

By means of the artificial intelligence (AI) we try to predict the outcomes of the process working not exactly defined mathematical operation. It is a scientific and engineering discipline depending on sophisticated Computer Science techniques, mathematics, etc. One of the main tools in the AI-scientist' hand is the neural network (NN). The question is: how can we use it in traffic analysis? Is the car-following behaviour predictable? What distance will be between the cars, is there a slowing-down effect, is there an intention to overtake? The main target of this research was an efficient NN application in the traffic – and obtain a good prediction of the speed of the vehicles, using by the given tools and results. aiNet is a very powerful and simple tool for solving the problems which are usually solved with artificial neural networks. In this first application of aiNet in the traffic, the model gives visually acceptable visually results.

As the example (detailed in the full paper) demonstrates, the artificial neural network, or with other words – the artificial intelligence could be very useful is the traffic analysis. After this very promising result we are plenty of plans for the future...



## Bevezetés

Az egyszerű, azaz kevés összetevőből álló rendszerek hosszú ideig tartó mozgása gyakran szabálytalan, önmagát nem ismétlő. Ennek oka, hogy az egyszerű nemlineáris egyenleteknek is lehet igen bonyolult a megoldása. Ezt a szabálytalan mozgást *kaotikusnak* mondjuk. A kaotikus viselkedés nem ismétli önmagát, nem jelezhető előre, mert érzékeny a kezdőfeltételekre, valamint a visszatérési szabály bonyolult geometriájú. Számos hétköznapi jelenség, mint például a térsztyagúrás és a turmixgép is kapcsolatos kaotikus folyamattal.

A kaotikus mozgások megértése a hagyományostól eltérő szemléletet és eszközöket kíván. A kaotikus mozgások esetében elkerülhetetlenek a numerikus szimulációk, ezek eredményei alapján lehet bemutatni a kaotikus mozgásokat.

A káosz a kevés összetevőből álló rendszerek időben bonyolult megnyilvánulása, ezért egy jelenség csak akkor tekinthető kaotikusnak, ha sikerül olyan egyszerű modellt találni, amely a szabálytalan viselkedést kellő pontossággal visszaadja.

A kaotikus folyamatok szabályozhatók is. Azokban az esetekben, amelyekben a káoszból fakadó előre jelezhetetlenség hátrányos, jól megválasztott kis külső hatás következményeként elkerülhető a kaotikuság kialakulása. A kaotikus dinamikával kapcsolatos részletesebb leírás az [1]-ben található. Ez a mű az itt látható rövid összefoglalás alapja is.

## A káosz

### A kaotikus dinamika

Kaotikus viselkedés esetében a mozgás áttekintésére a hagyományos, azaz az idő függvényében való ábrázolás nem megfelelő, mert mindig előfordulhat új mozgásforma. A folytonos időben zajló folyamatokat differenciálegyenletekkel lehet leírni. Ha ezek az elsőnél magasabb időderiváltak is tartalmaznak, akkor új változók bevezetésével az idő szerint elsőrendű differenciálegyenletté alakíthatók.

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x})$$

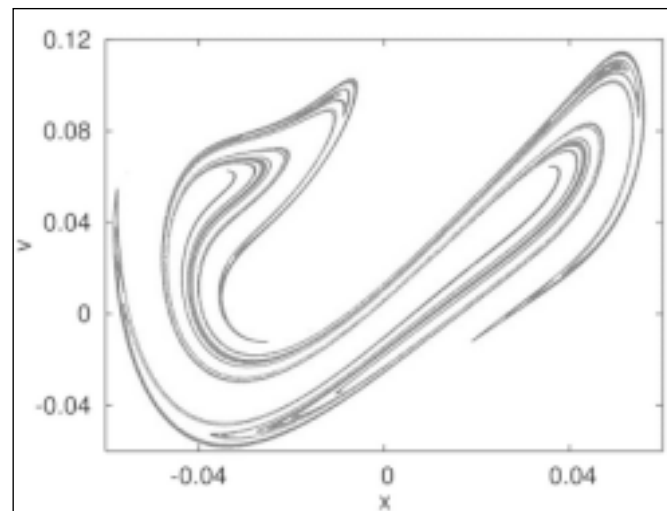
A hely és a sebességváltozók definiálják a rendszer *fázistérét*. A rendszer pillanatnyi állapotának a fázistér  $\mathbf{x}$  pontja felel meg, ahol  $\mathbf{x} \equiv (x_1, x_2, \dots, x_n)$  az ismeretlen időfüggvények, a függő változók  $n$ -dimenziós vektora. Ahogyan az állapot változik, a pont vándorol a fázistérben, s egy trajektóriát rajzol ki. A vizsgált rendszerek döntő többségében az adott kezdőértékekhez mindig egyértelmű megoldások tartoznak, azaz a moz-

gásnak megfelelő fázistérbeli trajektóriák nem metszhetik egymást. A fázistérbeli leírásban az idő nem jelenik meg explicit módon, de a fázistér elvileg az összes lehetséges mozgást tartalmazza.

A fázistérben található olyan pontok, ahol a mozgás állapota nem változik, azaz ahol  $\dot{\mathbf{x}} = 0$ . A fixpont jellegét a stabilitása alapján lehet meghatározni. Vannak stabil (attraktorok) és instabil fixpontok (repellorok), valamint létezik hiperbolikus fixpont is, ahol létezik egy stabil és egy instabil irány is. Instabil állapothoz közeli kezdőpontból kiinduló mozgások egymástól exponenciális időfüggéssel távolodnak. Végtelen sok instabil, hiperbolikus állapot jelenléte szükséges feltétele a káosznak. Az elégséges feltétel az, hogy az instabilitás tetszőleges hosszú ideig fennálljon, újra és újra felbukkanjon. Ezt az állandósult instabilitást nevezzük káosznak.

Periodikus mozgás esetében a mozgás ábrázolható úgy, hogy azonos időközönként mintát veszünk belőle. Ilyen rendszerekben a fixpontnak az állandósult határciklus felel meg. Ha a periódusidő és a mintavételi idő azonos, akkor a határciklus fázistérbeli képe egy pont. A káosz kialakulásának gyakori módja, hogy valamely paraméter változtatása következtében a határciklus-attraktor periódusa megkettőződik. A paraméter véges mértékű változtatására a végtelen periódusú határeset után, megjelenik a kaotikus attraktor.

Kaotikus rendszerek esetében a mozgásokhoz tartozó trajektóriák a fázistér egy részhalmazához konvergálnak, a kezdőfeltételtől függetlenül. Ezt a részhalmazt kaotikus attraktornak nevezzük. A részhalmaz szálas, fonalas szerkezetű, ami jól mutatja, hogy a káoszhoz határozott struktúra tartozik. A lehetséges értékek sehol sem alkotnak folytonos intervallumot. A kaotikus attraktor *fraktál-szerkezetű* (1. ábra).



1. ábra: Pillanatfelvétel a gerjesztett, nemlineáris rugóra erősített test mozgásának attraktoráról. A rugóra erősített test felfüggesztési pontját jobbra-balra periodikusan mozgatva – a súrlódás miatt – az inga végül az attraktor pontjain fut végig, amely időben periodikusan változik. Az ábra egy pillanatfelvételt mutat. (Károlyi Gy. jóvoltából. A részleteket lásd [1])

<sup>1</sup> Az MTA Közlekedéstudományi Bizottságának 2004. novemberi ülésén elhangzott előadás alapján

<sup>2</sup> Egyetemi docens, BME, Út- és Vasútpítési Tanszék; kisgyorgy@uvt.bme.hu

A kaotikus attraktorok vázát az instabil periodikus pályák alkotják. A kaotikus attraktor véges méretű, és az instabil periodikus pályák sűrűn helyezkednek el rajta. A cikluspontok és az aperiodikus mozgáshoz tartozó pontok gyakorisága az attraktoron úgy viszonyul egymáshoz, mint a valós és az irracionális számoké a számegegyenesen. Az attraktoron egy általánosan választott pont nem esik egyik cikluspontra sem, a kaotikus mozgás nem más, mint bolyongás az instabil periodikus pályák között. Ebből következően a kaotikus mozgás soha nem ismétli önmagát.

A sűrűn elhelyezkedő hiperbolikus pályák miatt a szomszédos pályák gyorsan távolodnak egymástól, azaz a rendszer érzékeny a kezdőfeltételekre. Emiatt kaotikus attraktor mentén a mozgásállapot hosszú távú előrejelzése lehetetlen. Az előre jelezhetetlenség ugyanakkor korlátozott, mert csak a kaotikus attraktoron áll fenn. Az attraktor elérését megelőző mozgásról biztosan megállapítható, hogy merre tart. Az attraktoron kialakuló mozgás statisztikai szempontból teljesen pontosan megismerhető.

## A káosz mérőszámai

### Topologikus entrópia

A kaotikus attraktor alapvető sajátossága, hogy a hozzá tartozó periodikus pályáknak minél hosszabb a ciklusa, annál több található belőlük az attraktoron. A tapasztalat szerint a számuk a hosszukkal exponenciálisan nő. Az  $m$  hosszúságú (azaz  $mT$  periódusidejű) instabil pályák  $N_m$  száma a kaotikus attraktoron elegendően nagy  $m$  szám esetében az alábbi összefüggés szerint nő:

$$N_m \sim e^{hm}$$

A  $h$  paramétert topologikus entrópiának nevezik. Egy rendszer akkor kaotikus, ha a topologikus entrópiája pozitív, azaz  $h > 0$ .

### Ljapunov-exponens

A szomszédos pályák gyors eltávolodását, a kezdeti feltételekre való érzékenységet jellemzi a Ljapunov-exponens. Az attraktoron elhelyezkedő  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  pont közelében választott két pont egymástól az  $\mathbf{x}$  ponthoz közel eső periodikus pálya hatványai szerint távolodik:

$$\Delta x_n(\mathbf{x}) = \Delta x_0 \cdot e^{\lambda(\mathbf{x})n}$$

ahol  $\Delta x = \sqrt{(\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_k^2)}$ ,  $\Delta x_0$  a két pont távolsága kezdetben,  $\Delta x_n$  pedig a két pont távolsága  $n \gg 1$  lépés esetén. A  $\lambda(\mathbf{x})$  mennyiség a lokális Ljapunov-exponens. Mivel a kaotikus attraktor bármelyik pontjához rendelhető egy ilyen pozitív kitevő, ezért átlagos értelemben is igaz, hogy a tipikus pontpárok az attraktoron valamilyen  $\bar{\lambda}$  átlagos Ljapunov-exponenssel távolodnak egymástól, azaz:

$$\Delta x_n = \Delta x_0 \cdot e^{\bar{\lambda}n}$$

Kaotikus rendszerben az átlagos Ljapunov-exponens pozitív, azaz  $\bar{\lambda} > 0$ . Minél nagyobb a Ljapunov-exponens, azaz minél gyorsabban távolodnak egymástól

a szomszédos pályák, annál rövidebb az az időtartam, amíg a rendszer mozgása előre jelezhető.

## Fraktáldimenzió

A kaotikus attraktor az instabil irányban folytonos vonaldarab, a stabilban pedig egy Cantor-halmaz jellegű fraktál. Minden kaotikus attraktor enyhén deformált Cantor-szál szerkezetű. Ezért fraktáldimenziója mindig felírható a két parciális dimenzió összegeként:

$$D_0 = 1 + D_0^{(2)}$$

ahol 1-es az instabil irány menti parciális dimenzió,  $D_0^{(2)}$  pedig a stabil irányra vonatkozó parciális dimenzió, amire a  $0 < D_0^{(2)} < 1$  feltétel érvényes.

## Természetes eloszlás

A kaotikus attraktor menti hosszú idejű viselkedést annak megadásával lehet jellemezni, hogy az attraktoron mozgó test állapota milyen valószínűséggel kerül az attraktor adott pontja közelébe. A kaotikus attraktor menti kezdeti eloszlások az iterálásokkal  $P^*$  eloszláshoz tartanak:

$$P_n(x_1, x_2, \dots, x_k) \rightarrow P^*(x_1, x_2, \dots, x_k), \text{ ha } n \rightarrow \infty$$

Ez a  $P^*$  eloszlás csak a kaotikus attraktoron – ami nulla területű halmaz – különbözik 0-tól. Ez a kaotikus attraktor természetes eloszlása, más néven természetes mértéke. A kaotikus rendszerek hosszú idejű jellemzése egyedül a természetes eloszlással lehetséges. A természetes eloszlás egyértelmű, ezért valószínűségi értelemben a káosz teljes pontossággal leírható.

## Idősorok

Sokdimenziójú fizikai rendszerek működése nagyon gyakran csak egyetlen változón keresztül figyelhető meg. Nem ismert a dinamikát leíró alapegyenlet, a múltbeli megfigyelések idősorai azonban periodikus jelleget mutatnak, de nem ismétlik önmagukat. Ez a jelenség arra utal, hogy a folyamatok kaotikusak. Az „időkésleltetés beágyazásának” (*time delay embedding*) módszere [2] általánosan használt az állapotter dinamikájának becslésére. Az  $N$  megfigyelés  $\{x_t\}_{t=1}^N$  skalár idősorából a következő leképezéssel előállítható olyan vektorokból álló idősor, amely topologikusan azonos az eredetivel:

$$x_t \rightarrow (x_t, x_{t-d_e}, \dots, x_{t-d_e-1})$$

ahol  $d_e$  a beágyazási dimenzió. Az optimális beágyazási dimenziót általában geometriai módszerekkel becslik. Az így előállított vektoriális idősorokból a maximális Ljapunov-exponens meghatározható [2]. Sajnos az azonos fizikai rendszer különböző idősoraiból származó Ljapunov-exponensek eltérők, így az idősorok a jelenlegi ismeret szerint csak a kaotikus jelleg igazolására használhatók, az előre jelzéshez szükséges jellemzők meghatározásához nem.

## Térbeli és időbeli káosz

Bizonyos mozgások, mint például a forgalomáramlás, nemcsak időben, hanem térben is szabálytalanok. Ha a mozgásban csak a szabadsági fokok bizonyos cso-



portjai vesznek részt, akkor a mozgás ténylegesen alacsony dimenziós. Ez többé-kevésbé szabályos térbeli mintázatok átvonulását jelenti, melyek ismétlődése sohasem periodikus. A térbeli és időbeli káosz első megközelítésben bizonyos térbeli struktúrák előfordulási gyakoriságában mutatkozik meg. Az ilyen folyamatokhoz alacsonydimenziós kaotikus attraktor is tartozhat.

A térbeli kiterjedéssel is rendelkező rendszerekben bizonyos térbeli mintázatok alakulnak ki. Ezek a mintázatok lehetnek állandók, lehetnek periodikusan vagy aperiodikusan ismétlődők, egymásba alakulók. Aperiodikus ismétlődés esetén a dinamika kaotikus.

## A káosz alkalmazása a forgalomtechnikában

### Az eddigi kutatások

A forgalomlebonylódás és a kaotikus dinamika közötti lehetséges kapcsolat [3]-ban jelenik meg először. A kutatás hirtelen állapotváltozástól számol be bizonyos kritikus járműsűrűség-értéknél. E fölött a forgalmi viszonyok előre jelezhetetlenné válnak, torlódások keletkezhetnek. Ez a megfigyelés, amit numerikus szimulálással is alátámasztanak, a káosz jelenlétére utal. (Megjegyzendő, hogy a szerző itt a káosz szót még nem a kaotikus dinamika értelmében használja.)

A későbbi, kaotikus dinamikával már ténylegesen foglalkozó forgalomtechnikai kutatások lényegében a forgalomlebonylódás kaotikus jellegének kimutatásáról szólnak, idősorok felhasználásával [4],[5]. A gyakorlati tapasztalatok, mérési eredmények igazolják, hogy a forgalomlebonylódás kaotikus jellegű, de az eddigi eredmények nem adnak eszközt a dinamika tanulmányozásához, a forgalmi állapotok előre jelzéséhez, a forgalomlebonylódás irányításához.

### Alapegyenletek

A forgalomlebonylódás kaotikus dinamikájának részletes megismeréséhez az elméleti alapegyenletekhez kell nyúlnunk [6]. Egyirányú, folytonos útszakaszt feltételezve a forgalomlebonylódás kontinuitási egyenlete:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = g(x, t)$$

ahol  $q$  a forgalomnyagosság,  $k$  pedig a járműsűrűség. A  $g(x, t)$  függvény a szakasz mentén a járművek számának változását írja le. Ha nincs a vizsgált szakaszra oldalról beérkező vagy azt oldalra elhagyó forgalom, akkor  $g(x, t) = 0$ . Ebben az esetben a kontinuitási egyenlet a következőképpen néz ki:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial k}{\partial t} = 0$$

A forgalomáramlás sebessége a járműsűrűség függvénye,  $v = f(k)$ . A forgalomáramlási jellemzők közötti kapcsolathoz a fundamentális összefüggéseket használva:

$$q = k \cdot v$$

Az egyszerű kontinuitás-modellnek vannak bizonyos hiányosságai:

- Stacionárius sebesség-járműsűrűség kapcsolatot tételez fel, azaz úgy tekinti, hogy a járműve-

zetők sebességüket azonnal az átlagos sebességhez igazítják. Ez nem igaz, és pontosan a hatások késleltetett terjedése vezet a kaotikus mozgásokhoz.

- Az instabil forgalmi állapotokat megálló-elinduló hullámok jellemzik bizonyos feltételek között, melyek az amplitúdótól függően oszcillálnak. Ezek a mozgások nem vezethetők le az egyszerű kontinuitás-modellből.
- A forgalomlebonylódás bifurkációs viselkedése (amikor a sűrűség meghalad egy bizonyos értéket) a kritikus instabilitási hatás. Ebből a modellből ez sem mutatható ki.

Az egyszerű kontinuitás-modell kiterjesztése során a kontinuitási egyenlet mellé bekerül egy momentum-egyenlet, ami a sebesség időbeli és térbeli változását írja le [6]. Az így kapott egyenletrendszer a következő [ $g(x, t) = 0$  esetén]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial(k \cdot v)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\tau} (v_e(k) - v) - \frac{c_0^2}{k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{\mu_0}{k} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

ahol a második egyenletben  $v_e(k)$  az aktuális sűrűséghez tartozó sebességérték a fundamentális diagram alapján,  $\tau = 1.8$  s a járművezetők reakcióideje a változásokra,  $c_0$  a forgalom dinamikus nyomását leíró tényező (a hidrodinamikával analógiában),  $\mu_0$  pedig a viszkozitási tényező.

Ez az egyenletrendszer már megfelelő a kaotikus dinamikai vizsgálatok számára. Az összefüggésekben a hely szerinti derivált is megjelenik, ez pedig térbeli időbeli kaotikus dinamikára utal.

A sebességnek a hely szerinti második deriváltja is szerepel az egyenletrendszerben, így a numerikus számításokhoz egy új  $w$  változó bevezetése szükséges:

$$w = \frac{\partial v}{\partial x}$$

Az ismeretlen változókat az egyszerűbb írásmód érdekében betehetjük egy vektorba:

$$\boldsymbol{\eta}(x, t) = \begin{pmatrix} k(x, t) \\ v(x, t) \\ w(x, t) \end{pmatrix}$$

Az alapegyenletek felírhatók kvázi-lineáris parciális differenciálegyenlet formájában:

$$A \frac{\partial \boldsymbol{\eta}}{\partial t} + B \frac{\partial \boldsymbol{\eta}}{\partial x} = C$$

Az együtttható-mátrixok a változók normalizálása után a következő formájúak:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} v & 0 & 0 \\ \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{Fr} & 0 & \frac{1}{Re} \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} -kw \\ -uw + v_e(k) - v \\ w \end{pmatrix}$$

Az alapegyenletek két dinamikai paramétert tartalmaznak:

$$\text{Froude-szám} = \frac{\text{kinetikai energia}}{\text{potenciál energia}} = Fr \equiv \left( \frac{v_{free}}{c_0} \right)^2$$



# Az Öreg híd Mostarban

Boldog Gyöngyi<sup>1</sup>

2004. július 23-án – ünnepélyes keretek között – átadták a kilenc évvel ezelőtt lerombolt mostari Öreg hidat. A híd története elválaszthatatlan a város történetétől.

## Mostar és az Öreg híd története

Mostar a Neretva két partján, egy völgykatlanban terül el, Sarajevo és az Adria között félúton. A tengertől a szárazföld belseje felé haladó utak keresztülvezetnek a városon. Mostar évszázadok óta egyik legkiemelkedőbb példája a délről érkező török kulturális hatásnak, és egyben kapocs Nyugat és Kelet között. Mostar néven először 1474-ben említik. Ekkor még csak húsz ház volt a településen, mindegyik a folyó bal partján a híd közelében állt, és itt volt a subasa (= megyei rendőrfőnök) székhelye.

A legrégebbi híd a városban fából készült, láncokon függött, fix pillérek nélkül. Erről a hídról így írt Evlia Cselebi: „Mosztár annyit jelent ‚Híd-város’. A latin történetírók elbeszélése szerint a régi időkben ebben a városban a Neretva folyón egyik oldalról a másikra emberi comb vastagságú erős vasláncból híd volt s erről maradt a város neve.”<sup>2</sup>

A hídnak köszönhetően gyorsan fejlődött a kereskedelem, a kézművesség és maga a város is. Mostar az oszmán kultúra és oktatás központja lett. Az igazi fellendülés II. Szulejmán uralkodása alatt következett be a város életében. Ekkor születtek Mostar legkiemelkedőbb építészeti alkotásai: a kőhíd (Öreg híd), a két nagy és több kisebb mecset, iskolák, gőzfürdők, középületek és lakóházak.

A város kedvező földrajzi fekvése miatt a térség legfontosabb kereskedelmi központjai közé tartozott, és szoros kapcsolatban állt a többi kereskedelmi központtal. Ez olyannyira hatott a helyi ipar fejlődésére, hogy rövid idő alatt már harminc különböző foglalkozás képviselői éltek itt. A 17. sz. végén már tízezer lakója volt, és Mostar lett a mufti székhelye. Mostar a 16. században élte virágkorát és ettől kezdve 1878-ig megszakítás nélkül török uralom alatt állt. 1878-ban az Osztrák-Magyar Monarchia vetett véget Bosznia-Hercegovinában az oszmán uralomnak.

A jórészt kézművességből és kereskedelemből élő város életétől elválaszthatatlan a *bazár*, ez pedig szervesen kapcsolódik az Öreg hídroz. A bazár a híd közvetlen közelében a két parton húzódott és húzódik: a jobb parton szűk, zezugos, a bal parton kissé szélesebb utcáival. A bal parti üzletek legtöbbször rézműves bolt, a jobb part üzleteiben gyümölcsöt, zöldséget árultak. Az üzleti negyedet körülölelték a vendéglők, mecsetek, nyilvános fürdők és néhány malom.

Az épületek jó minőségű vágott kőből épültek. „Van benne 3040 téglapítkészítésű, pala- és kerámittejtű ház. E házak közül sok a folyó keleti részén, a sziklákön van s erkélyeik, előcsarnokuk, számos szobájuk és verendájuk a folyóra néznek ... 350 téglapítkészítésű boltja van.”<sup>2</sup>

A bazár különösen fontos szerepet játszott az Öreg híd építésében. A híd két hídfőjénél álló két torony (jobb parton a Halebija, bal parton a Tara) és a bazárnegyed környező épületei építészeti egységet alkotva kapcsolódtak egymáshoz.

Hercegovina felszíne nagyrészt sziklás, ezért itt a hidakat főleg kőből építették.

A kőhidak építése bonyolultabb és drágább volt, mint a fahidaké így kevesebb épült belőlük, a 15. és 19. század között mindössze ötven. A legszebbeket az 1500-as évek második felében építették, Szulejmán uralkodása alatt. A két talán legismertebb: a Višegradnál épült híd a Drinán Mimar Sinan<sup>3</sup> munkája; a másik, az Öreg híd Mostarban tanítványáé, Mimar Hayreddin.

Mostarban és a környékén már állt kőhíd az Öreg híd építése előtt is: a Kriva Cuprija. 1558 előtt egy malom közvetlen közelében építettek a Radobolje folyón. Kb. száz méterre áll az Öreg hídtól, és onnan, ahol a Radobolje beleömlik a Neretvába. A helyi hagyomány szerint modellként használták az Öreg híd építéséhez.

Az Öreg híd építője tehát Hayreddin építőmester volt. Azt, hogy valóban ő építette a hidat, egy másik építkezés dokumentumaiból tudhatjuk biztosan. Az adriai-tengeri Makarska kikötőjéhez erődítményt építettek 1567-ben.

A Porta megbízólevelében ez olvasható: „Utasítottuk Mimarbasi Sinan főépítést, hogy jelöljön ki egy építést az erőd építéséhez, melyet a makarskai rakodópartra kell építeni. Ő, az építési munkákban szerzett hozzáértésének és tapasztalatának köszönhetően, *Hayreddint – aki a mostari hidat építette* – jelölte ki a fent említett erőd építésére. 1567. (975.) Sevval 9.”<sup>2</sup> A híd 300 000 ezüstbe került, és két évig építették, 1565–1566 között.

Amikor Hayreddin belefogott az építésbe, állt ezen a helyen egy öreg fahíd, és közvetlen szomszédságában két torony, amely a középkori erőd része volt. Ez az erőd jelentette a vidék hírközlő rendszerének központját, és körülötte fejlődött ki a város. Mimar Hayreddin nem változtatott a híd helyén, mert ugyanúgy tudta, mint elődei – akik a fahidat építették –, hogy ez a hely a lehető legalkalmasabb egy híd építéséhez. Itt állt ugyanis az erőd a két parton, a folyómeder itt a legkeskenyebb, de kellően mély ahhoz, hogy egy esetleges árvíz rombolásától megóvja a hidat, közel-

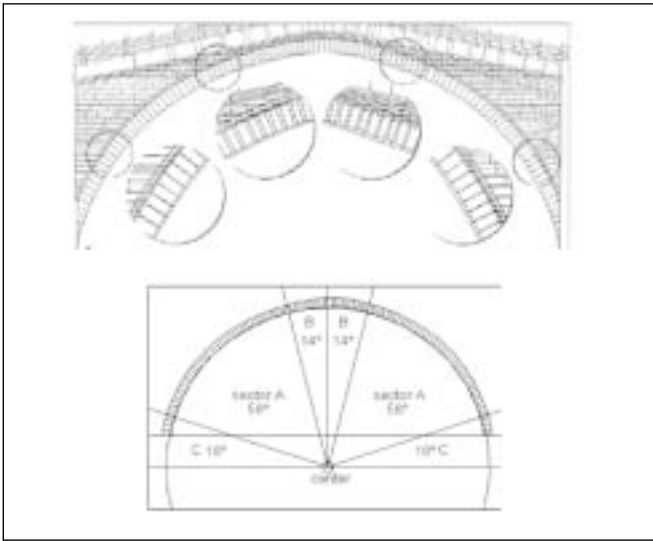
<sup>1</sup> Műszaki könyvtáros, Hídépítő Rt.

<sup>2</sup> Evlia Cselebi török világlátó magyarországi utazásai 1660-1664. Bp., Gondolat, 1985. p.517.

<sup>3</sup> Amir Pašić: The Old Bridge (Stari Most) in Mostar. Isztanbul, IRCICA, 1995. p. 9.

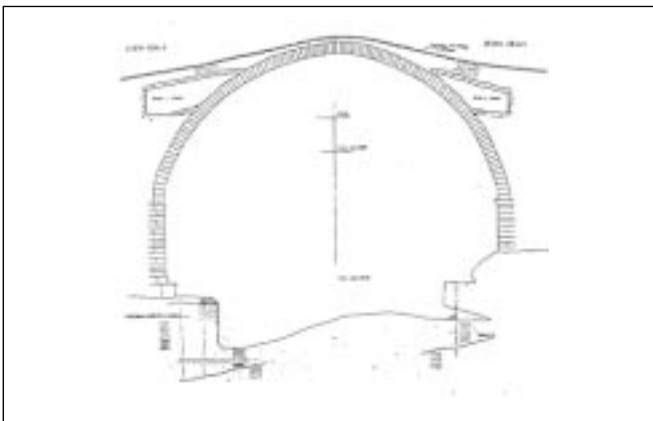
ben a Radobolja torkolata, és a folyónak ez a pontja minden szempontból védett, hiszen csaknem láthatatlan a környező hegyekről.

Az Öreg híd építője nem a megtört „ottomán ív”-et használta, mint pl. Višegradnál, és nem a több helyen használt félkör alakút, hanem egy addig még nem alkalmazott ívet, amely egy ellipszishez áll a legközelebb.



1. kép: Az ív

A híd egyetlen boltívből áll, fesztávja 28,70 m, ívmagassága 12,02 m, íve a parti sziklával összeépített pillérektől indul ki.



2. kép: A híd hosszmetsete

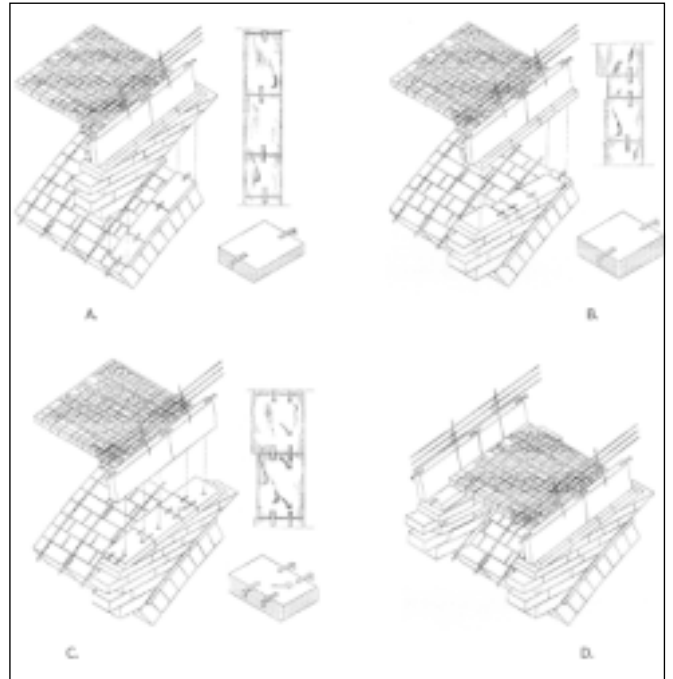
Ezek az arányok különleges megjelenésű, karcsú és elegáns boltívet eredményeztek. A boltív vastagsága a zárókőnél mérve 77 cm, szélessége 397 cm.

Az ív 456 db különböző méretű kézzel faragott kőből épült, magassága megegyezett az ív felső részének magasságával. Azért, hogy a „törékeny” hídszerkezetet ne terheljék túl, a híd belsejét nem töltötték ki kővel, hanem egy háromtámaszú, középen két üreggel ellátott „falat” építettek a boltív fölé, a hídnak a vízfolyás felőli és a vízfolyással ellentétes oldalán.

A hídpálya vonalát a homlokzaton záró párkánnyal emelték ki, mely kinézetre majdnem olyan, mint a párkányzat az ív felett, csak 20-25 cm-rel szélesebb annál. Ez a záró párkányzat 14 cm-re ugrik ki a homlokfal síkjából. A hídpályát övező kőkorlát 23-25 cm vastag és 94,50 cm magas kőlapokból készült, és záró párkány védte.

A hídpályát a következőképpen alakították ki: 1. nagy méretű kővel fedték be az üregeket, 2. erre 10-15 cm vastag, mészkőporból és homokból készült habarcsréteg került, 3. erre fektették az azonos méretűre vágott, egyenként kb. 15 cm vastagságú, közel 4 m hosszú kőveket, melyeket vörösayag, mész és kőpor keverékéből készült habarccsal fogtak össze.

Az építőköveket mérnöki pontossággal faragták és a köztük lévő apró hézagokat gondosan megtöltötték a habarccsal, így megakadályozták, hogy a csapadék károsítsa a hídszerkezetet.



3. kép: Így épült a kétüregű „könnyített hídfal”

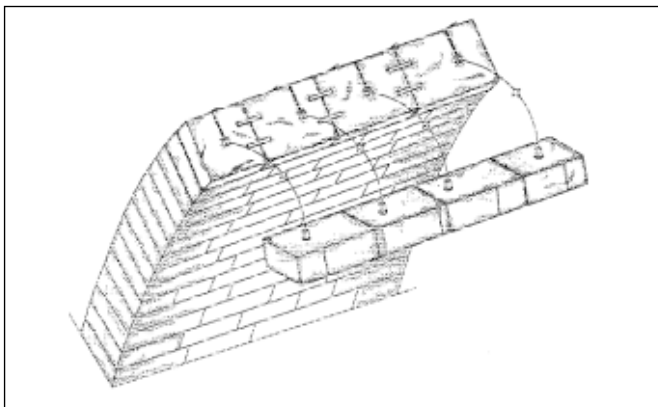
Az elkészült hídpályára kemény mészkőből faragott küszöböket helyeztek (a parttal párhuzamosan). Erre azért volt szükség, mert a hídpálya közepe nagyon magas a partokhoz képest és ezek nélkül a kapaszkodók nélkül az arra járók visszacsúsztak volna a hídfők irányába. A híd szélességében lerakott küszöbök kétoldalt nem értek egészen a korlátokig azért, hogy a csapadék akadály nélkül lefolyhasson a hídról a korlátok mentén.

Az építéshez használt kő a „tenelija”, egy rendkívüli fizikai és kémiai tulajdonságú mészkő, melyet a várostól délre található Mukosa kőbányájában bányásztak. A teneliját használták az egész hídhoz, még a korlátokat is ebből a mészkőből építették. A szabályos téglatestre faragott kőveket kovácsoltvas csapokkal és kapcsokkal fogták össze, majd a vaskapcsoknak előre elkészített vájzatokat ólommal öntötték ki.

A török építészetben bevett szokás volt, hogy a mérnöki alkotásokat kronogrammával<sup>4</sup> látták el. Az Öreg hídon ez a kronogramma állt: „A hatalom boltíve”. Ma már ez nem látható a hídon, csak régi feljegyzésekből tudjuk, hogy valaha létezett.

A falakkal azonos színű szürkés kőlapokkal borított háztetők a híd környékén, a tornyok nyugalmat sugár-

<sup>4</sup> kronogramma: felirat, melynek rómaisám-értékű betűi a benne foglalt esemény időpontját jelölik



4. kép: A boltív köveinek rögzítése egymáshoz

zó geometriai formái és a híd merész íve, építészeti egységet alkotva különleges esztétikai élményt nyújtanak. Szemben az európai vár- és erődépítéssel gyakran rideg, robosztus épületeivel, az Öreg híd épületegyüttese földközi-tengeri könnyedséget sugároz. A Halebija és a Tara félhenger alakú torony.

Eredetileg mindkét tornyon több lőrés volt, de ezek egy részét befalazták. A többszintes jobb parti Halebija torony alsó szintjét – ott, ahol befalazták a lőréseket – börtönnek használták. A híd melletti erőd egyik kapuja összeépült a Halebija falával, és a kapu fölött volt egy čardak (nagy méretű terem v. szoba), ami régen a tanult mostari férfiak találkozóhelye volt, a közelmúlt évtizedeiben pedig kávézó működött benne.

A bal parti nagyobb torony, a Tara, a lőrések befalazása után egészen 1878-ig lőportoronyként szolgált.

### Az Öreg híd „halála”... és „feltámadása”

A délszláv háború idején, 1993-ban egy szélsőséges horvát kapitány és emberei – a város déli határán, a horvátok lakta városrészben álló hegy egyetlen olyan pontjáról, ahonnan csaknem teljes egészében látni lehet a hidat – két nap alatt (november 8-án és 9-én) rommá lőtték a stratégiailag jelentéktelen, csaknem ötszáz éves műemléket.

A háború után, 1997-ben, létrehozták a „Mostar, 2004” elnevezésű alapítványt, melynek feladata a város és az Öreg híd újjáépítése volt. A rekonstrukciós munkák megkezdését azonban még sok mindennek kellett megelőznie...

#### • Kőkiemelés

Mostar vezetése úgy döntött, hogy a hidat nemzetközi összefogással fogják újjáépíteni. Ehhez kérték segítségül az Okučaniban állomásozó SFOR erőket, amellyel a Hídépítő Rt. már korábban felvette a kapcsolatot, felajánlva segítségül szakmai felkészültségét és térítésmentes részvételét a híd újjáépítésében. A mederfeltárást és kőkiemelést a Hídépítő Rt. és a Magyar Műszaki Kontingens végezte, és az rt. megbízást kapott egy ideiglenes gyaloghíd építésére.

A kőkiemelést egy különleges szerkezettel végezték, melyet a Hídépítő Rt. szakemberei terveztek, és amelynek olyan erősnek kellett lennie, hogy alkalmas legyen a vízben fekvő legnehezebb híddarab (becslések szerint 60 tonna) kiemelésére is.

A szerkezet elemeit a cég komlói telepén gyártották, a katonai pontonokat pedig Okučaniban. Amikor elkészültek, 30 teherautóból álló konvojjal – hetven katona és a Hídépítő Rt. szakembereinek kíséretében – szállították Mostarba.

A megérkezés másnapján felállították a katamaránon elhelyezett emelőszerkezetet a Neretván. Ezzel egyidejűleg az rt. megkezdte egy nagy méretű állvány építését is a parton, a híd tövében.



5. kép: A kőkiemelő szerkezet



6. kép: Kőkiemelés

Az első (csaknem három és fél tonnás) követ szeptember 29-én ünnepélyes keretek között emelték ki a folyóból, a helyi lakosok ovációjától kísérve. Virágokat szórtak a vízbe és a műezzinek hangja szólt mindenhol. A követ sárga liliomokkal – Bosznia-Hercegovina címervirágával – díszítették, és a kőről készült fénykép bejárta a világot. A másnapi sarajevói



újság címlapján megjelent rajzon a darura kötözött kő alakja Boszniát idézte, és a kép felirata:

„Ha lesz híd, lesz Bosznia!” volt.



7. kép: „Ha lesz híd, lesz Bosznia!”

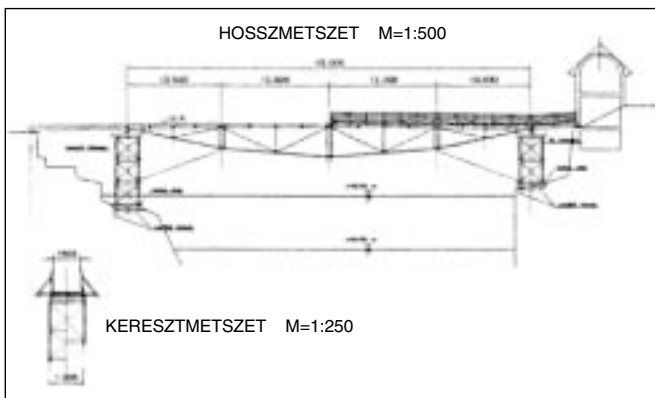
A folyómedret november közepéig kellett megtisztítani a híd roncsaitól. A Hídépítő Rt. szakemberei és az SFOR bűvárai határidőre befejezték a munkát, és a kövek november 20-ra már a Radobolje torkolatánál felépített állványon feküdtek. Az már ekkor látszott, hogy sajnos szinte egyiket sem lehet majd újra felhasználni, mert nemcsak a lövések okoztak súlyos károkat bennük, hanem négy év alatt – amíg a folyó mélyén pihentek – az erős sodrású víz és a hordalék lekerekítette éleiket, és nagyon erősen megkoptatta a köveket.

A híd végleges helyreállításáig új ideiglenes gyaloghíd építésére volt szükség. Állt már ugyan egy gyalogos függőhíd a víz fölött, de ez pontosan a régi híd helyén kötötte össze a partokat, ezért ahhoz, hogy az újjáépítést el tudják kezdeni, ezt a hidat le kellett bontani.

#### • A gyaloghíd

Az új gyaloghíd helyét az Öreg híd felvízi oldalán, attól 20 méterre jelölték ki a helybéli szakemberek. Ez a hely alkalmas volt a hídfők elhelyezésére, és itt lehetett a gyalogosforgalmat elvezetni a két parton. A Hídépítő Rt. mérnökei acélső jármokkal alátámasztott rácsos főtartós, kéttámaszú acélszerkezetű gerendahíd terveztek. A híd ideiglenes jellegét a fából készült korlát és a pályaszerkezet emelte ki.

A többféle előterv után végül karcsú acélszerkezet született, melyet a cég komlói üzemében gyártottak.



8. kép: A gyaloghíd hosszmeteszete

A hidat az alvízi oldalon, az Öreg hídtól néhány méterre álló állvány közelében, egy katamaránra felállított állványrendszeren szerelték össze. Azért választották ezt a helyet, mert itt volt megfelelő a partszakasz a munka elvégzésére.

Amikor elkészültek az összeszereléssel, felúszatták a hidat a beépítés közelébe. Itt aztán 90°-kal elfordult a katamarán a híddal, és a pontos helyére úszott vele.

A műveletet a parton rögzített sodronyokkal és a pontonokon lévő csörlőkkel végezték. Ezután az acélső jármokon elhelyezett konzolos emelőkeretekre felfüggesztették a hidat. Felfüggesztés után elemelték a hidat az állványról, aztán lebontották az állványt a katamaránról, és az visszaúszott az összeszerelés helyére.

Másnap megkezdtek a híd felhúzását tényleges helyére. Támaszonként két-két sajtóval, 6-7 cm-es emelési szakaszokkal – a helybeliek legnagyobb öröme – estére helyén volt a gyaloghíd.

A barátságos mostariak az első naptól az utolsóig éjjel-nappal figyelemmel kísérték a munkát. Nem volt olyan napszak, hogy ne állt volna bámészkodók tömege a két parton.

A híd ünnepélyes átadása 1998. június 3-án volt.



9. kép: Helyén a gyaloghíd

A város lakói örömmel használták a gyaloghidat, és közben folytak az előkészületek az újjáépítés megkezdésére.

Így érkezett el 1999 decembere, amikor több mint száz éve nem látott méretű árvíz fenyegette a várost. A Neretva vízszintje csaknem elérte a valaha mért legmagasabb vízszintet. (1860-ban volt a valaha mért eddigi legmagasabb vízállás: 53,50 m az Adria fölött.) Az egyik neretvai víztározó – félve attól, hogy a rendkívüli esőzések és havazás miatt megemelkedett víz átszakítja a tározó gátját – elengedte az óriási víztömeget. Az pedig farönköket magával sodorva zúdult át a városon. A folyó vízszintje elérte az 53 métert, és a hídnál megrekedt farönkök szabályosan belecsavarták a gyaloghidat a folyóba.

A híd két állványa ép maradt ugyan, de a baloldali állvány közelében a sziklafalat megbontotta az ár. A jobb parti kis étterem tetejét elsodorta a víz, a bal parti étterem konyhájában mennyezetig állt a víz és egészen a bazárbeli boltok küszöbéig ért. A köveket tároló állvány szerencsére szilárdan állt, bár majdnem tel-



jesen víz alatt. A közeli kishidat, a Kriva Cupriját is összedöntötte a víz, lejjebb a Neretván két másik gyaloghíd is elpusztult, és 110 épület ment tönkre. Az ár elvonulása után helybeliek építették újjá a gyaloghídat, felhasználva az épen maradt hídépítős gyaloghíd pilérállványait.

#### • Az újjáépítés

Az Öreg híd újjáépítésére 2001-ben kiírt versenytárgyaláson – több külföldi céggel együtt – horvát és bosnyák partnerekkel együttműködve a Hídépítő Rt. is indult. A beadott ajánlatokat az UNESCO, a Világbank és a helyi szakemberekből álló bizottság bírálta el. A megbízást végül a török ER-BU cég kapta meg, az újjáépítési munkákat tehát Hayreddin utódai végezték. Az újjáépítés költségeit az olasz, a török, a holland, a horvát, a francia állam, a Világbank és az UNESCO állta. Az óváros és a híd rehabilitációs terveit firenzei mérnökökből álló munkacsoport készítette el.

A Tara és a Halebija torony újjáépítésére is pályázatot írtak ki, melyet a szintén török Yapi Merkezi cég nyert el. Ők erősítették meg a híd folyóban lévő alapjait is.

2003. április 14-én kezdték meg a boltív építését. A teljes ív 111 sorban és 4 m szélességben: összesen 456 db, 90 cm magas és 40-50 cm vastag, különböző hosszúságú kőből áll majd. A leghosszabb kötőmb több mint 2 méter.

A köveket ugyanabból a kőbányából bányászták, ahonnan az eredeti építéskor. A közelítő méretre fűrészelt



10. kép: Méretre fűrészelt kődarab



11. kép: A csapok helye



12. kép: Beépítésre várva

szelt köveket először pontos méretre vágták, majd a helyszínen kézi faragással „munkálták meg” a felszínüket. Minden kő saját számot kapott, majd a kőtároló állványra került. Itt aztán mindegyikben kivésték a fémcsapok fészkeit és a kiöntő hornyokat. Ezután 24 órán keresztül vizes medencében áztatták őket, majd toronydaruval a helyükre emelték.

Az összekötéshez az eredeti módszert használták: a fészkekbe kovácsoltvas csapok kerültek, és ezeket ólommal öntötték ki. A kövek közti hézagokat speciális habarccsal töltötték ki, melynek alkotóelemei: 20 hónapos oltott mész, a Neretva felső folyásáról származó homok, égetett agyag őrlemény és víz. Az ötven török építő naponta egy-egy sort készített el a híd ívéből. Az építéshez használt állványt a ZGP Sarajevo készítette.

„A híd alsó lábához betontömböt építettek, melyet fóliával választottak el az eredeti híd köveitől. Erre előre gyártott konzolos beton oszlopokat emeltek, amelyeket feszítéssel horgonyoztak a híd falához. Ezekre a konzolokra mindkét oldalt 2-2 hossztartót szereltek. A hossztartókra keresztartókat és csőoszlopokat állítottak.



13. kép: A beton lábazat és az állvány a boltívvél

Ezek tetejére került a vízszintes síkú darupálya és bakdaru, valamint a járósínt. A különböző hosszúságú csőoszlopokra került a fa mintaboltív és zsaluzat. A csőoszlopokat sűrűn merevítették, és mindegyik állítható méretű.”<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Hoffmann György: Épül Mostarban az új Öreg híd. In: Hídépítők, 2003. 4. sz. p. 13.



14. kép: A számozott kövek a parton

A régi köveket a híd közelében a földön rakták össze úgy, ahogy eredetileg a hídban voltak.

Az építkezés a tervek szerint haladt, és 2004. július 23-a óta újra áll a gyönyörű karcsú híd, amely egyesek szerint lenyűgözőbb, mint a Rialto Velencében, és amelyről Robert Michel osztrák utazó így írt:



15. kép: Újjászületve!

„Ha a világ egyetlen, legcsodálatosabb hídját ki kellene választanom, valószínűleg az Öreg hidat választanám, Mostarban. Állíthatom, hogy még soha egyetlen emberi alkotás nem tett rám olyan erős benyomást, mint ez a híd.”

## Summaries

### **Gyöngyi Boldog: The Old Bridge of Mostar**

This article gives an overview on the 16<sup>th</sup> century construction of the stone bridge on the river Neretva, detailing also the historical and geographical features of the town of Mostar. It describes the efforts made after the destruction of the bridge in 1993, as a result of which at first a pedestrian bridge was constructed on the river in 1997, with the involvement of Hungarian SFOR staff and construction experts of Hídépítő Rt. After the tendering procedure, which started in 2001, the Old Bridge has been fully reconstructed in its original form between April 2003 and July 2004.

### **dr. Lajos Kisgyörgy: Chaotic dynamics of traffic flow (page 7)**

First the paper gives an overview on chaotic dynamics. Afterwards it presents research results on chaos in the field of traffic engineering. From basic continuity equations describing traffic flow a new equation system is derived for the numeric simulation of chaos in space and time. Finally, further research goals and steps are presented.

### **Nándor Liegner: Dynamics of the railway track (page 22)**

The objective of this paper is to highlight the dynamics of the railway track. First the theories to calculate the internal forces induced by dynamic loads are discussed. Afterwards results of track measurements are presented. A further chapter presents laboratory testing of railway steel sleepers and the theoretical Finite-Element modeling to determine the stress pattern inside the material of the sleeper induced by static and dynamic loads. The paper highlights the differences between the theories and the actual track measurements.

### **István Subert: New parameters of the dynamic compaction and bearing capacity tests and the relations between moduli (page 28)**

The Hungarian guidelines for the dynamic compaction and bearing capacity tests have been extended by an alternative test method and a simplified compaction test. The paper evaluates the relations between dynamic and static bearing capacities, whether static moduli can be calculated from the new dynamic test or vice versa.

Dr. Medved Gábor<sup>2</sup>

## 1. Bevezetés

A történelem azt mutatja, hogy nincs folytonos és egyenletes fejlődés a hidak építése terén sem. Vanak nagy korszakok, és van a pangás időszaka. Nagy korszak volt például a 19. és a 20. század fordulója. 1890 és 1896 között – alig negyedszázaddal a vashíd gyártás megindítása után – hat Duna-hidat épített Magyarország.

A két háború között, a gazdasági világválság idején megépült a dunaföldvári Duna-híd. Ezt a Petőfi (akkor Horthy Miklós) híd követte, majd a Felvidék részleges visszacsatolása után a medvei Duna-híd épült meg. A világháború küszöbén elkezdődött az Árpád híd építése is.

A második világháború pusztítását hősi munkával állították helyre a hidászok, de ezt több évtizedes pangás követte, miközben a vezetés tervszerű és arányos fejlesztésről beszélt. Tisza-hidak épültek ugyan, de a Dunán csak az új Erzsébet híd készült el. Ez is inkább helyreállításnak volt tekinthető. Aztán lassú fejlődés kezdődött. Az Árpád híd kiszélesítése, az M0 Hárosi Duna-hídja, a Lágymányosi híd és az esztergomi Mária Valéria híd jelentette a főbb állomásokat mintegy húsz év alatt.

2003 nyarán felavatták az M9 autótú szekszárdi Duna-hídját (1. ábra).



1. ábra: A szekszárdi Duna-híd

Az esztétikus, elegáns vonalozású, párhuzamos övű acél szekrénytartós szerkezet támaszközei 3x65,50+80+3x120+80+3x65,50 m, összes hossza 919,60 m. A szélső 65,50 méteres nyílások beton pályalemezzel együttdolgozó szerkezetűek, a középső nagy nyílások pedig ortotrop acél pályalemezzel készültek. A hidat nagy elemek beúsztatásával és he-

lyére emelésével szerelték, ez a korszerű módszer lassan uralkodóvá válik acélhídjaink építésében. A beruházást a magyar állam képviselőjében a Nemzeti Autópálya Rt. irányította, a tervezők az Uvater Rt. és a Pont-Terv Rt., a mérnök az ÁMI Kft. volt. A híd kivitelezését pedig a Magyar Hídépítő Konzorcium (Vegyépszer Rt., és Ganz Acélszerkezet Rt.), a Mahíd 2000 Rt., a Közgép Rt., a Ganz BVG Kft. és a Hídépítő Speciál Kft. végezte. Reményeink szerint ez a híd jelentheti egy új fellendülés nyitányát.

## 2. Az autópálya-program

A fellendülés alapja az ország autópálya programja. A jelenlegi kereteket a kormány 2044/2003. (III. 14.) számú határozata, majd időben ezt követően – 2003. dec. 22-én – a Magyar Köztársaság gyorsforgalmi közúthálózatának közérdekűségéről és fejlesztéséről hozott 2003. évi CXXVIII. törvény határozta meg. A törvény nagyon ambiciózus, nagy volumenű programot tartalmaz, amelynek megvalósítása esetén Magyarország ellátottsága gyorsforgalmi utakkal ugrásszerű javulást fog mutatni. A számadatokat a táblázat mutatja.

Időszak	Az időszakban átadandó úthossz, km	Gyorsforgalmi utak összes hossza, km
2002 végéig megépített gyorsforgalmi út		625
2004 végéig átadnak	65	690
2005 végéig átadnak	44	734
2006 végéig átadnak	322	1056
2007 végéig átadnak	205	1261

A gyorsforgalmi utak hossza tehát négy év alatt kétszeresére megkétszereződik. A törvény felsorolja a megépítendő autópálya/autótú szakaszokat, azok befejezési határidejével együtt. Nézzünk innen kiragadva néhány jellemző és fontos adatot a teljesség igénye nélkül:

- 2007 végéig meg kell épülnie a Budapestet körülvevő M0 autópályának az M5 és az M3 autópálya között, beleértve az M0 gödöllői átkötését (M31). Ezenbelül az M5 és a 4. sz. főút közötti szakasznak 2005-re kell befejeződnie.
- Meg kell építeni az M0 északi szakaszát – a Duna-hidakkal együtt – 2006 végéig az M2 autópálya és a 11. főút között.
- Ki kell szélesíteni 2007 végéig az M0 déli szakaszát – ugyancsak a Duna-hidakkal együtt – 3+1 sávval teljes autópályává az M1 és az M5 autópálya között.

A fejlesztésekkel 2007-re az M0 autópálya háromnegyed körben körülveszi majd Budapestet az M1 autópályától a 11. sz. főútig.

<sup>1</sup> A 45. hídmérnöki konferencián 2004 májusában Zalaegerszegen elhangzott előadás alapján

<sup>2</sup> Nyug. egyetemi tanár, Kumamoto Egyetem, Japán; hídszakági főmérnök, Nemzeti Autópálya Rt.



- Az M3 autópálya 2004 végéig kiépült Görbeházáig, és az M3-ból Emődnél kiágazó M30 autópályán Miskolcig autózhatunk.
- Az M3 Görbeháza–Nyíregyháza, és az M35 Görbeháza–Debrecen szakaszokat 2006 végéig átadják a két várost elkerülő főutakkal együtt.
- Az M5 2006-ban megnyúlik Szegedig a Kiskunfélegyháza–Szeged szakasz megépítésével.
- Az M6-os autópályán 2006-ban az M0-tól Dunaújvárosig autózhatunk, ott pedig átkelhetünk a Dunán az új M8 autópálya új hídján.
- Autópályává fejleszhető autót út vezet majd 2x2 forgalmi sávval Dunaújvárostól Szekszárdon keresztül Pécsre (M6) 2007-ig.

A felsorolt autópálya-szakaszokkal hét vidéki nagyvárosunk lesz autópályán elérhető. A jobb bekapcsolódás az ország „vérkeringésébe” jelentős gazdasági előnyökkel jár.

- A balatoni M7 autópályánk horvát és szlovén határ menti végén már ma is dolgoznak 29 km hosszon (M7 és M70 gyorsforgalmi út Becsehely, Letenye, Tornyiszentmiklós szakasza), amelyet 2004 végéig forgalomba helyeztek.
- Az M7 autópálya Balatonszárszó és Ordacsehi közötti szakasza 2005 végéig, a Zamárdi–Balatonszárszó, Ordacsehi–Balatonkeresztúr, Nagykanizsa–Becsehely és a Letenye–országhatár közötti szakaszai pedig 2006 végéig helyezendők forgalomba.

A felsorolt szakaszolást áttekintve egyértelmű, hogy a Balatonkeresztúr és Nagykanizsa közötti szakasz megépítése későbbre marad, de ennek előkészítése is megtörténik 2007 előtt. Egy rövid szakaszt kivéve autópályán juthat el a határig az Adriai tenger felé utazó.

- Az M43 autópályának az 5. sz. főúttól Marosleléig terjedő 20 km-es szakasza autópályaként, innen tovább Makó elkerülésével 15 km hosszú útszakasz pedig autótútként épül meg 2007 végéig.

Ez az útszakasz Románia felé irányul Arad térségében. A 2003–2007 közötti időszakban még több gyorsforgalmi utas kapcsolat lesz előkészítve Szlovákia, Ukrajna, Románia és Horvátország felé. Az autópályák közvetlen és távlati fejlesztési tervét a 2. ábrán láthatjuk.

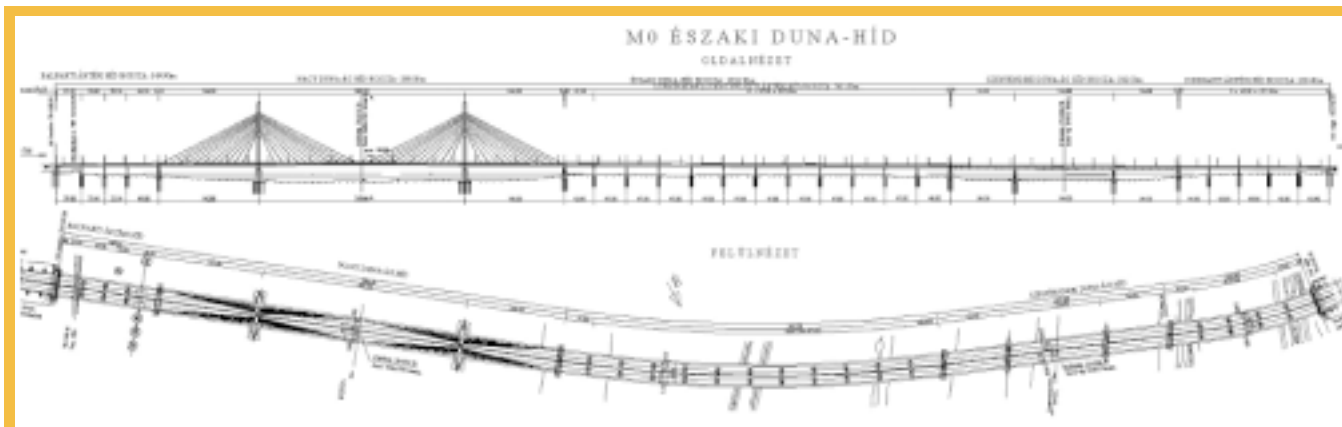


Természetes, hogy a felvázolt autópálya-építési program számtalan híd építését is jelenti. Ezek a kisebb-nagyobb alul- és felüljárók minden autópályán nagy gyakorisággal (1-2 kilométerenként) megtalálhatók. Szinte kizárólag vasbetonból épülnek, feszített beton előre gyártott gerendákkal vagy monolit kivitelben. Előfordulnak acélszerkezetű hidak is, de ezek nem jelentenek az acélszerkezeti ipar számára komolyabb kihívást. Épült egy acél-beton öszvértartós híd Miskolc határában a Sajó felett az M30 autópályán. Elképzelhető több ilyen hídszerkezet építése, például az M3 és az M35 autópályán a Keleti Főcsatorna keresztezésénél vagy más, hasonló nagyságú folyó áthidalásakor. Az M43 autópálya 5. sz. főút és Maroslele közötti szakasza nyilvánvalóan keresztezi a Tiszát. Az ide építendő híd egyik alternatívája az acélszerkezet lehet. Ezekről bizonyosat mondani legfeljebb a vállalatba adást követően lehet.

A 2003. évi CXXVIII. törvény három hidat említ név szerint is: az M0 északi Duna-hídját, az M7 Kőröshegyi völgyhídját és az M8 dunaújvárosi Duna-hídját. Nem említi ugyan a törvény, de nyilvánvaló, hogy az M0 autópálya déli szakaszának autópályává szélesítése nem képzelhető el a Hárosi Duna-híd és a Soroksári-Dunaág-híd kiszélesítése nélkül. A kiszélesítés úgy végezhető el, hogy a jelenlegi híd mellé újabb szerkezetet építenek. A soroksári Dunaág-híd feszített beton szerkezetű, egyértelmű, hogy az ikertestvérenek is ilyennek kell lennie. A Hárosi Duna-híd meglévő, 1990-ben átadott szerkezetét három egység alkotja. A két parton 3x73,50 m támaszközü, a meder felett 3x108,50 m támaszközü szerkezet áll. A párhuzamos övű, ferdegerincű acél szekrénytartó felső övét együttdolgozó, feszített beton pályalemezként tervezték meg, amely a 17,50 m széles, 4 forgalmi sávós kocsipályát hordja, egyik oldalán üzemi járdával, a másikon kerékpárúttal (3. ábra). A híd teljes szélessége 22,05 m.

Az elképzelések szerint az új szerkezet a kifolyási oldalra kerül, meghosszabbított pillérekre. Geometriájában, anyagában, általános megjelenésében a jelenlegi szerkezetet fogja tükrözni, tehát párhuzamos övű acél szekrénytartó lesz, a régivel azonos támaszközzel, és hasonló szerkezeti magassággal. A parti szerkezetek gazdaságossági okokból öszvértartós





4. ábra: Az M0 északi Duna-híd vázlata

kialakításúak maradnak, a meder feletti, 3x108,50 m támaszközü szerkezet pedig ortotrop acél pályalemezzel készülne. Ezzel könnyebben kialakítható a híd megkívánt alakja.

### 3. Az M0 északi Duna-hídja

Az északi Duna-híd szerkezetére mintegy tíz éve készültek az első változatok a főtervező Céh Rt. irodájában. Azóta kialakult a jelenlegi terv. A hídszerkezet öt részből áll (4. ábra), amely voltaképpen kilenc hidat jelent, mivel a Nagy-Duna-híd kivételével két-két híd épül majd egymás mellett, köztük légréssel. A tervezett szerkezetek:

- Bal parti ártéri híd, négynyílású, 149,90 m összes hosszúságú, párhuzamos övű vasbeton szekrénytartóval. A 37,00+2x33,00+45,00 méteres, szokatlanul változó nyílásméreteket a vízművek parti kútjainak kikerülése miatt tervezték.
- A Váci-Duna-ágot, azaz a Duna fő medrét 590,00 m összes hosszúságú ferdekábeles szerkezet hidalja majd át. A háromnyílású híd támaszközei 145,00+300,00+145,00 m.
- A Szentendrei-szigeten párhuzamos övű feszített beton szekrénytartó épül 561,00 m összes hosszúsággal, 42,00+11x47,00 m támaszközökkel. A híd enyhe bal ívben fekszik.
- A Szentendrei Duna-ág felett acélszerkezetű híd építését irányozza elő a terv, 93,00+144,00+93,00 m támaszközökkel, 332,00 m összes hosszúsággal. Párhuzamos övű, ferde gerincű, egycellás acél szekrénytartók ortotrop acél pályalemezt hordanak majd. A 80°-os ferdeségű pillérekre merőleges kialakítású szerkezet támaszkodik.
- A budai (jobb) parton ismét vasbeton szerkezet következik 5x43,50 m támaszközökkel, 219,40 m összes hosszúsággal. Ez a híd is bal ívben fekszik, de a geometriát átmeneti ív bonyolítja.

Az M0 autópálya északi Duna-hídja 1852,30 m összes hosszával az ország második leghosszabb hídja lesz. A hídon 2x2 forgalmi sávú autópályát vezetnek át, leállósávokkal együtt, ami a későbbiekben 2x3 forgalmi sáv kialakítását teszi lehetővé. A pálya két oldalán a kábelek vonalán kívül gyalogjárda és kerékpárút készül. A pályabeosztás: 2x12,75 m kocsi-

pályák és leálló sáv, 1,60 m elválasztó sáv, 2x3,80 m gyalogjárda és kerékpárút + korlátok. A teljes szélesség 34,70 m.

A Nagy-Duna-híd két ferde kábelsíkú, nyaláb kábel-elrendezésű szerkezet. A pillérek fölé 97 m-rel nyúló, A alakú pilonok vasbetonból, üreges négyszög keresztmetszetű lábakkal készülnek majd. A két pilonláb vízszintes összekötése felett átlátszó homlokzatú zárt teret alakítanak ki üzemi célokra. Ez egyben a híd építészeti megjelenésében és esti kivilágításában is szerephez jut majd (5. ábra). A munkaközi állapotban lévő látványtervek még nem a végső állapotot mutatják, de lemérhető az egyszerű, elegáns építészeti eszközök alkalmazására való törekvés.

A merevítő tartót kétoldalt egy-egy keskeny acél szekrénytartó alkotja, ezekbe a szekrénytartókba kötnek be a ferde kábelek. Közöttük van az ortotrop acéllemezes pályaszerkezet, amely alulról nyitott, mivel a két kábelsíkú szerkezet nem igényel csavaró merev-



5. ábra: Az M0 északi Duna-hídja



6. ábra: A dunaújvárosi Duna-híd vázlata

seget. A kábelek párhuzamosan vezetett, horganyzott huzalokból vagy pászmákból készülnek majd, kemény polietilén védőcsőben, kettős korrózióvédelemmel. A magas kifáradási határú kábelvégek megfeszítését akár alul a merevítő tartóban, akár fenn a pilonban elvégezhetik.

A tervezési munka a Céh Rt.-nél és partnereinél (Pont-Terv, MSc) befejeződött. Az építési engedélyt kiadták. A következő hónapokban esedékes a vállalkozók közbeszerzési törvény szerinti versenyeztetése és a szerződés megkötése. A kivitelezést mielőbb meg kell kezdeni.

#### 4. A dunaújvárosi Duna-híd

Ez a szerkezet méltó párja az M0 autópálya északi Duna-hídjának 1680 méteres összes hosszával. A híd 1,46%-os emelkedővel jut fel a sík bal partról a jobb parti magas löszfal tetejére, közben keresztezi a Dunát és egy széles, ártéri jellegű területet. A bal parton négynyílású, (4x75,00 m támaszközű) gerendahíd épül, melyet a Duna feletti 307,80 m-es ívhíd követ. Ehhez csatlakozik a jobb parton tizenhárom nyílás, 12x82,50+75,00 m támaszközökkel. A híd elrendezési vázlatát a 6. ábrán látható.

A hídon átvezetik az autópálya teljes keresztmetszetét, leálló sávokkal együtt. A pályabeosztás 2x12,00 m kocspálya + leálló sáv, 1,60 m elválasztó sáv, 2x3,20 m kerékpárút és korlátok. A teljes szélesség 32 m.

A parti szerkezetek ortotrop acél pályalemezes szekrénytartós gerendahidak. A viszonylag sok, kis nyílás sorozatban ismétlődő, ezért gazdaságosan, nehézségek nélkül gyártható szerkezetet eredményezett. A mederhíd kialakítása viszont közel sem ilyen egyszerű.

A 48 m nyílmagasságú zárt négyszög keresztmetszetű acél ívek ferde síkban állnak, és felül egymásnak támaszkodnak. Az ív alatti, zárt négyszög keresztmetszetű merevítő vonógerenda szintén ferde síkú. A híd Lohse-Nielsen szerkezetként jellemezhető. (A nemzetközi terminológiában Lohse-ívnek nevezik, ha az ívnek és a vonógerendának közel egyenlő a hajlító merevsége; Nielsen-ívnek pedig függesztő rudak helyett kábeleket alkalmaznak.) A vonógerendával együtt dolgozik az ortotrop acél pályaszerkezet is. A függesztő kábelek nem keresztezik egymást, oldalnézetben közel függőlegesek. Mindazonáltal a térben a két ferde síkú ív kábelelei kereszteződő benyomást keltenek. A kábelek kialakítása sokban hasonlít az északi Duna-hídra: ezek is kemény polietilén csőben párhuzamosan vezetett horganyzott pászmákból vagy huzalokból készülnek majd, magas kifáradási határú kábelfejekkel.

A szerkezet gyártása nem lesz könnyű, pontos, gondos munkát kíván majd az acélszerkezeti üzemtől. A

helyszíni szerelést a parton végeznék, majd a – mintegy 8000 tonnás! – szerkezetet beusztatnák a helyre. Ez sem ígérkezik egyszerű feladatnak. Mégis, a sikeres kivitelezés sokat emelhet a résztvevők reputációján, hiszen a világon ilyen nagy Lohse-Nielsen ívet még nem építettek. A híd elegáns, esztétikus megjelenésűnek is ígérkezik, amire a beruházó, a tervező és a kivitelező egyaránt büszke lehet majd. A látványterv (7. ábra) is ilyen benyomást kelt.



7. ábra: A dunaújvárosi Duna-híd

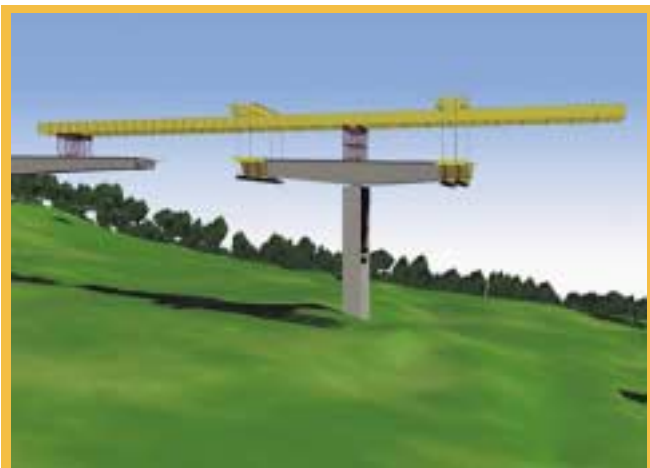
A dunaújvárosi Duna-híd tervezése is befejeződött a főtervező Főmterv Rt.-nél és partnerénél (Pont-Terv). Az építési engedélyt kiadták, a közbeszerzési eljárás lezárult. A kivitelezést a Dunaúj-híd konzorcium (Vegyépszer Rt. és Hídépítő Rt.) végzi majd.

#### 5. A Kőröshegyi völgyhíd

Az M7 autópályán a Séd patak völgyét hidalja át a tervezett híd 60+95+13x120+95+60 m támaszközökkel. Összes hossza 1872 m, ezzel az ország leghosszabb hídja lesz. A szerkezet a kormány 2330/2003 sz. határozatának megfelelően feszített betonból épül, amelyben az játszhatott szerepet, hogy az ország acélszerkezeti kapacitását az előbbieken említett hidak teljesen lefoglalják majd. A híd egyben az ország legmagasabb völgyhídja is lesz, a völgyfenék feletti 85 m-es magasságával, összemérhető az Alpokban található hidakkal. A híd 4000 m sugarú vízszintes ívben fekszik, és teljes hosszában 2,86%-ot esik Budapest felől tekintve. A hídon 2x2 forgalmi sávot vezetnek át, leállósáv nélkül, középen 1 m keskeny sávval elválasztva. Kétoldalt üzemi járdák épülnek. Az alul parabolikus ívelt kiékelésű szerkezet magassága a támaszok felett 7,50 m, amely mezőközépen 3,50 m-re csökken.

Az üreges négyszög keresztmetszetű pillérek 1,2-1,5 m átmérőjű fűrt vasbeton cölöpökre alapozzák. A pillérek felmenő falait kúszószaluzattal építik. A kétcellás ferdegerincű szekrénytartó szabadbetonozásos technikával épül majd, szerelőhíddal (8. ábra).





8. ábra: A Kőrös-hegyi völgyhíd építése

Az építési engedélyt kiadták, a közbeszerzési eljárás győztes vállalkozóval (Hídépítő Rt.) a szerződést megkötötték. A kivitelezési terveket a vállalkozó a Pont-Tervvel közösen készíti.

## 6. Különlegességek

A világon a közelmúltban újfajta szerkezetű hidak jelentek meg, amelyeket angolul „extradosed”-nek neveztek. Megjelenésükben átmenetet jelentenek a ferdekábeles hidak és a szabad kábelvezetésű gerendahidak között. Viselkedésük inkább az utóbbira emlékeztet, megjelenésük pedig az előbbire, de alacsony pilonnal. Az első magyar névjavaslata „függesztett-feszített”, amely korrekt, de talán hosszú. A Hídépítő Rt., amely közismert a műszaki haladás iránti affinitásáról, egy ilyen szerkezetet épített meg Letenye térségében az M7–M70 csomópontban. A híd jó hatást kelt a Horvátország és Szlovénia felől érkező látogatókban.

A Nemzeti Autópálya Rt. kezdeményezésére régészeti park építése kezdődött Polgár térségében, ahol az autópályák régészeti feltárásakor talált tárgyakat állítanak ki, kellemes, pihenésre csábító környezetben.

Ezt a helyet egyben a Hortobágyi Nemzeti Park északi kapujának is kiépítenék, ahova egy gyalogos-kerékpáros hídon lehet majd eljutni. Ez a híd szerkezetében és megjelenésében az egykori erdélyi fedett fahidaknak állítana emléket, amelyeket másfél-két évszázaddal ezelőtt mamut hidaknak neveztek. Az elképzeléseknek az Országgyűléstől kezdve minden érintett szabad utat engedett, megvalósulásuk rövidesen várható.

## 7. Záró megjegyzés

A magyar hídépítő ipar egy évszázaddal ezelőtt felnőtt a feladataihoz. A világ élvonalában volt akár az acélszerkezetek, akár a vasbetonszerkezetek építését tekintve. Ennek vége szakadt a vesztes háborúk, a gazdasági válságok, a hibás politikai és gazdasági döntések miatt. Az egykor elvesztett helyet nyilván nem lehet pár nagy híddal visszaszerezni, a világ szerkezetépítő ipara azóta is haladt. Nagy lépést lehet azonban tenni a felzárkózás felé. A felvázolt hídprogram erre jó lehetőséget nyújt.

## Összefoglaló

A parlament 2003 decemberében törvényt fogadott el az autópályák és autótutak fejlesztéséről. A 2003. évi CXXVIII. törvény szerint 2007 végéig meg kell kétszerezni a magyar gyorsforgalmi úthálózat hosszát (a jelenlegi 625 km-ről 1261 km-re). A munkák során három új Duna-híd felépítése válik szükségessé. Meg kell építeni az M0 autópálya északi Duna-hídját (az ország első ferdekábeles szerkezetét), és az M8 autópálya dunaújvárosi Duna-hídját (egy világrekorder alsópályás vonógerendás ívhíd), valamint ki kell szélesíteni az M0 autópálya déli szakaszán a Hárosi Duna-hídat. Fel kell építeni az M7 autópálya Kőrös-hegyi völgyhídját és az M43 autópálya szegedi Tisza-hídját. Megépül az ország első extradosed hídja és egy történelmi fahíd mintázó szerkezet.

## Summary

### New bridges on motorways in Hungary

The Hungarian Parliament enacted a new bill on the development of the motorway network. According to it, the total length of Hungarian expressways shall be doubled by the end of 2007 (from the present 625 km to 1261 km). Within the frame of development, three new bridges should be constructed over the Danube River. The Northern Bridge of M0 motorway around Budapest will be a cable-stayed bridge with steel deck and concrete towers. It should be constructed parallel with the Danube Bridge at Dunaújváros of the M8 motorway that is a through type steel bowstring arch with 307.8 m world record main span length. Also the third Danube Bridge will be at Budapest, on the Southern section of M0 circular motorway, where the existing steel girder bridge should be widened by constructing alongside a new steel bridge with orthotropic deck plate. The construction of a viaduct has begun this year on M7, by the Lake Balaton at Kőröshegy. It will be the longest and tallest bridge in Hungary. The first extradosed p. c. bridge of Hungary was completed this year on the junction of M7 and M70 motorways, near the Slovenian border.

## 1. Bevezetés

A vasúti vágány felépítményszerkezeti elemeiben ébredő igénybevételek meghatározásához az európai és Európán kívüli vasutak elterjedten használják az Eisenmann-féle valószínűségelmélettel kiegészített, Zimmermann-féle helyettesítő hosszaljas számítási elméletet. Az elmélet a dinamikus terhek hatására ébredő igénybevételek középértékét a sebesség növelésével konstansnak tekinti. A BME Út- és Vasútépítési Tanszék által elvégzett pályamérések és elméleti vizsgálatok a Zimmermann–Eisenmann-elméletet igazolják, azonban néhány említésre méltó eltérést eredményeznek.

## 2. Igénybevételek számítása a keresztaljas vasúti vágány felépítményi elemeiben

### Elméleti igénybevételek számítása [1]

A vasúti felépítmény szerkezeti elemeiben ébredő igénybevételek az európai – köztük a magyar –, valamint több Európán kívüli vasút szerint az Eisenmann-féle valószínűségelmélettel kiegészített, Zimmermann-elmélet alapján helyettesítő hosszaljas számítási eljárással határozható meg. A járműterhek hatására a sínről a vizsgált aljra átadódó erő nagysága az

$$F = \frac{k \cdot Z}{2 \cdot L} \cdot \sum \eta \cdot (1 + t\alpha\varphi) \quad [\text{kN}], \quad (1.)$$

a sín besüllyedése egy tetszőleges  $K$  keresztmetszetben

$$y = \frac{Z}{2 \cdot s \cdot C \cdot L} \cdot \sum \eta \cdot (1 + t\alpha\varphi) \quad [\text{kN}], \quad (2.)$$

a sín vizsgált  $K$  keresztmetszetében ébredő nyomterhek nagysága az

$$M = \frac{Z \cdot L}{4} \cdot \sum \mu \cdot (1 + t\alpha\varphi) \quad [\text{kN}], \quad (3.)$$

összefüggéssel határozható meg, ahol

- $Z$  [kN] – a függőleges irányú statikus kerékterhelés,
- $k$  [mm] – az aljtávolság,
- $L$  [mm] – a helyettesítő hosszaljas merevségi hossza,
- $\sum \eta$  – a vizsgált  $K$  keresztmetszet süllyedési hatásábrája kerékterhek alatti ordinátáinak összege,
- $\sum \mu$  – a vizsgált  $K$  keresztmetszet nyomterhek hatásábrája kerékterhek alatti ordinátáinak összege,
- $t$  – a megkívánt valószínűségtől függő tényező,
- $\alpha$  – a felépítmény állapotától függő tényező,
- $\varphi$  – sebességi szorzó.

A vágányt helyettesítő hosszaljas  $s$  [mm] szélességét az

$$s = \frac{a \cdot b}{k} \quad [\text{mm}], \quad (4.)$$

képletből számíthatjuk, ahol:

- $a$  [mm] – a keresztaljas ágyazatra történő felfekvési hossza,
- $b$  [mm] – a keresztaljas ágyazatra történő felfekvési szélessége,
- $k$  [mm] – az aljtávolság.

$L$  értéke – azaz a helyettesítő hosszaljas merevségi hossza – az

$$L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{Cs}} \quad [\text{mm}], \quad (5.)$$

képletből határozható meg, ahol:

- $E$  [N/mm<sup>2</sup>] – a sín anyagának a rugalmassági modulusa,
- $I$  [mm<sup>4</sup>] – a sín inerciája,
- $C$  [N/mm<sup>3</sup>] – az ágyazási tényező,
- $s$  [mm] – a helyettesítő hosszaljas szélessége.

### A dinamikus, mértékadó igénybevételek meghatározása

Üzemi vágányokban végrehajtott kísérletek igazolják, hogy a mérési eredmények középértéke jó egyezést mutat az elméleti igénybevétel Zimmermann-féle eljárással számított értékével. Az elméleti igénybevétel középérték, melyből a mértékadó igénybevétel valószínűségi alapon határozható meg [2.]. Az igénybevételek eloszlása jól modellezhető a normális eloszlással. Annak a valószínűsége, hogy a vágányban ébredő igénybevétel kisebb vagy egyenlő lesz, mint

$$\begin{aligned} I_E + 1,0 \cdot s &: 0,683 \\ I_E + 2,0 \cdot s &: 0,955 \\ I_E + 3,0 \cdot s &: 0,997 \end{aligned} \quad (6.)$$

ahol:

- $I_E$  – elméleti igénybevétel (középérték),
- $s = \alpha \cdot \varphi$  – a középérték szórása
- $\alpha$  – a felépítmény állapotától függő tényező,
- $\varphi$  – sebességi szorzó [2.].

A vasúti felépítmény szerkezeti elemeit a vasúti üzem biztonsága szempontjából  $t = 3$ -szoros biztonsággal méretezzük.

A Zimmermann-elmélet alapján meghatározott elméleti igénybevételekből mértékadó igénybevételt az európai – köztük a magyar –, valamint több Európán kívüli vasút volt elfogadott és használt, a bemutatott mérési tapasztalatokon alapuló

$$I_M = I_E \cdot \beta \quad (7.)$$

Eisenmann-féle valószínűségelmélettel számíthatunk.

<sup>1</sup> Az MTA Közlekedéstudományi Bizottságának 2004. novemberi ülésén elhangzott előadás alapján

<sup>2</sup> Egyetemi adjunktus, BME Út- és Vasútépítési Tanszék

A mértékadó dinamikus hatást a [1]

$$\beta = (1 + t \cdot \alpha \cdot \varphi) \quad (8.)$$

tényező fejezi ki, amelyben a sebességi szorzót a

$$\varphi = 1,0 + \frac{V - 60}{140} \quad \text{ha } V \geq 60 \text{ km/h,} \quad (9.)$$

$$\varphi = 1,0 \quad \text{ha } V \leq 60 \text{ km/h,} \quad (10.)$$

összefüggés adja meg, ahol

- $I_M$  – mértékadó igénybevétel,
- $I_E$  – elméleti igénybevétel,
- $t$  – a megkívánt valószínűségtől függő tényező,
- $\alpha$  – a felépítmény állapotától függő tényező (0,1: jó, 0,2: közepes, 0,3: rossz),
- $\varphi$  – sebességi szorzó,
- $V$  [km/h] – a jármű sebessége.

Ezek figyelembevételével a (8.) szerint számított mértékadó dinamikus tényező értékét az egyes sebességi kategóriákra és felépítményi állapotokra,  $t = 2,0$  és  $3,0$  biztonság alapulvételével az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

A mértékadó dinamikus tényező értéke az egyes sebességi kategóriákra és felépítményi állapotokra,  $t = 2,0$  és  $3,0$  biztonság alapulvételével

$\alpha$	$t$	Sebesség [km/h]					
		60	80	100	120	140	160
0,1	2	1,200	1,229	1,257	1,286	1,314	1,343
	3	1,300	1,343	1,386	1,429	1,471	1,514
0,2	2	1,400	1,457	1,514	1,571	1,629	1,686
	3	1,600	1,686	1,771	1,857	1,943	2,029
0,3	2	1,600	1,686	1,771	1,857	1,943	2,029
	3	1,900	2,029	2,157	2,286	2,414	2,543

A (7.) - (8.) kifejezésben a vasúti felépítmény szerkezeti elemeiben dinamikus terhek hatására ébredő igénybevételek középtértékei a sebesség növekedésével nem változnak. A BME Út- és Vasútépítési Tanszék vasúti vágányméréseket végzett igénybevételek meghatározásához. Ezek eredményeként – az Eisenmann-féle elmélettel szemben – a kisebb sebesség-tartományban ( $V = 5 \dots 60$  km/h) az igénybevételek középtértéke a sebesség növekedése során kismértékben csökkennek [1], [3]. Ezt a hatást dr. Kazinczy László „Ágyazatnélküli közúti vasúti pályaszerkezetek újszerű méretezése, különös tekintettel a felépítmény stabilitására” című PhD-értekezésében egy szabadságfokú lengőrendszerrel modellezte. Eredményei alapján a  $V = 40 \dots 60$  km/h sebesség tartományban az igénybevételek középtértékei 10..30%-kal kisebbek, mint a statikus teherből származó igénybevétel [6]. Nagyobb sebesség tartományban az igénybevételek középtértéke a sebesség növekedésével valamelyest növekednek [1], [3]. A következő fejezetekben vasúti vágánymérések eredményeivel támasztom alá ezeket a hatásokat.

Az 1. táblázat mértékadó dinamikus tényezői a mérési és számítási tapasztalatok alapján túlzott bizton-

ságot tartalmaznak. További kutatások eredményeként csökkenthető a nagyobb –  $V > 120$  km/h – sebességi tartományokban a mértékadó dinamikus tényező értéke.

### 3. A Pályamérések eredményei a MÁV Rt. Budapest–Szob fővonalán

#### A vágánymérés végrehajtása [3]

A BME Út- és Vasútépítési Tanszék irányításával 2000. június és 2002. szeptember közötti időszakban üzemi vágányméréseket hajtottunk végre a MÁV Rt. Budapest–Szob fővonalán Dunakeszi állomás bejárata előtt, a nyílt vonalon. A mérés megkezdését megelőző évben a MÁV Rt. a Rákospalota–Újpest–Dunakeszi állomásköz jobb és bal vágányába két új, különböző rendszerű sínleerősítéssel kialakított felépítményrendszert fektetett. A három éven át tartó pályamérések célja az volt, hogy nyomon kövessük a két felépítményrendszerben az igénybevételek időbeli változását.

Több, különböző mérés-sorozattal, meghatároztuk a keresztalj függőleges abszolút elmozdulását a felsővezeték-tartóoszlophoz képest, és a sántalp külső és belső oldalának függőleges relatív elmozdulását a keresztaljhoz viszonyítva V43 sorozatú mozdony áthaladása hatására. A mozdony minden mérési keresztmetszeten 5, 40, 100 és 120 km/h sebességgel haladt át. Most csak a bal vágányban mért sín és keresztalj függőleges elmozdulásokat tárgyalom. A vágány felépítményrendszere: UIC 60 r. sín, LW jelű keresztaljak (2500 mm hossz), 60 cm aljtávolság. A felépítmény kialakítása az 1. ábrán látható.

A 2002 szeptemberében mért, a járműterhelés hatására a sínfej vízszintes irányú és a sántalp függőleges irányú aljhoz viszonyított elmozdulását, valamint az alj elmozdulását a felsővezeték-tartóoszlophoz viszonyítva az idő függvényében  $V = 40$  km/h esetén az 2. ábra szemlélteti.

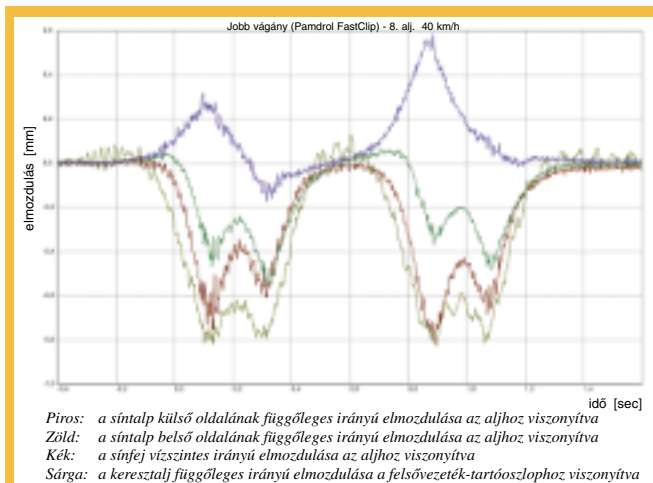
#### A vágánymérés eredményei

A mérési adatok feldolgozása során a dinamikus elmozdulás-mérések eredményeként kapott időfüggvények – amelyekre példa a 2. ábra – középvonalának a maxi-



1. ábra: Rákospalota–Újpest és Dunakeszi állomás között a bal vágány felépítménye





2. ábra: A sínfej vízszintes irányú, a sínalj külső és belső oldalának függőleges irányú elmozdulása az aljhoz viszonyítva, valamint a keresztalj függőleges elmozdulása a felsővezeték-tartóoszlophoz viszonyítva az idő függvényében

mumait olvastuk le. Mindkét vágány esetén számítottuk az egyes felépítményi elemek elmozdulásainak átlagát  $V = 5, 40, 100$  és  $120$  km/h sebességnél [3].

A sínalj relatív függőleges elmozdulását az aljhoz viszonyítva  $V = 5, 100$  és  $120$  km/h sebesség esetén az egyes mérési időszakokban a 3. ábra tünteti fel. A keresztaljak abszolút függőleges elmozdulását  $V = 5, 100$  és  $120$  km/h sebesség esetén az egyes mérési időszakokban a 4. ábra mutatja. A mérési eredményeiből – 3. és 4. ábra – megállapítható, hogy az alj és a sín elmozdulásai – és más igénybevételek is –  $100$  és  $120$  km/h sebességek esetén jelentősen nagyobbak, mint  $5$  km/h sebesség esetén [3].

#### Talajvízszint-változás hatása az ágyazási tényezőre és a vágány rugalmasságra [4]

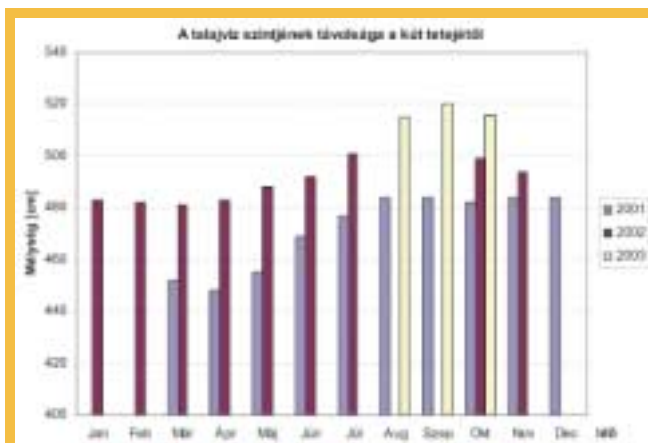
A 4. ábrán jelentős különbség tapasztalható a keresztaljak besüllyedésében ősszel és tavasszal kapott mérési eredmények között. Ezt a talaj nedvességtartalmának és a talajvízszint éves periódusokban való változása okozza. A mérési hely környezetében a talajvízszint magasságának a változása a mérési helyhez



3. ábra: A sín talpának a keresztaljhoz viszonyított relatív függőleges elmozdulásainak az átlaga az egyes mérési időszakokban  $V = 5, 100$  és  $120$  km/h sebességnél



4. ábra: A keresztalj abszolút függőleges elmozdulásainak az átlaga az egyes mérési időszakokban  $V = 5, 100$  és  $120$  km/h sebességnél



5. ábra: A talajvíz szintjének mélysége a gödi kútban, a kút tetejétől mérve

legközelebb, Gödön lévő kútban követhető nyomon, ahol a Vízügyi Tudományos Kutató Intézet végez talajvízszint méréseket. A talajvízszintnek a talaj felszínétől mért távolságát 2001-től 2003-ig havi bontásban az 5. ábra szemlélteti. A talajvízszint évenkénti, felszíntől legmélyebben és a felszínhez legközelebb lévő magassági adatait és a mérés idejét a 2. táblázat tartalmazza. A mérések alapján a legmagasabb a talajvízszint februártól áprilisig, és a legalacsonyabb a július vége és október eleje közötti időszakban. [5]

A Dunakeszi állomás térségében végrehajtott vágánymérések, és a VTKI talajvízszint vizsgálatai alapján megállapítható, hogy a talajvízszint jelentősen befolyásolja a vágány ágyazási tényezőjét. A kisebb ágyazási tényező nagyobb igénybevételeket, így nagyobb dinamikus hatásokat kelt a vágányban.

2. táblázat

A talajvíz szintjének legmélyebb és legmagasabb állásai a gödi kútban 2001-től 2003-ig

Év	A legalacsonyabb talajvízszint		A legmagasabb talajvízszint	
	Érték [cm]	Idő	Érték [cm]	Idő
2001	488	2001. 09. 01.	446	2001. 04. 13.
2002	505	2002. 07. 29.	480	2002. 02. 27.
2003	522	2003. 10. 02.	478	2003. 03. 19.

#### 4. APályamérések eredményei a MÁV Rt. Szabadbattyán–Tapolca vonalán

##### A vágánymérések [1]

A MÁV Rt. fejlesztési terveiben szerepel a fővonalai hálózatán található kissugarú, rövidsínű vágányok átépítése hézag nélkülivé, ami – több más műszaki megoldás mellett – az Y-aljakkal lehetséges. A MÁV Rt. kísérleti vágányszakaszt létesített a Szabadbattyán–Tapolca vasútvonalban Badacsony megállóhely térségében, hogy megvizsgálják az ezzel az alrendszerrel épített zúzottkőágyazatú, hézag nélküli vágányok magyarországi körülmények közötti viselkedését. Az Y-aljakkal épített felépítmény kialakítása a 6. ábrán látható. (A körív sugara 300 m, a túlemelés 93 mm.)

A MÁV Rt. megbízásából a BME Út- és Vasútépítési Tanszék irányításával összehasonlító vizsgálatokat végeztünk azzal a céllal, hogy nyomon kövessük a Szabadbattyán–Tapolca vasútvonalban Badacsony megállóhelynél,  $R = 300$  m sugarú ívben, Y-aljakkal épített hézag nélküli vágány geometriai és szerkezeti változásait üzemi körülmények között. Az összehasonlító vizsgálathoz a Révfülöp–Badacsonytomaj állomás között, Balatonrendes megállóhelynél lévő, LI-jelű beton-aljakkal épített, hevederes illesztésű, rövidsínű vágányt is bevontuk a helyszíni mérésekbe, ahol a körív sugara  $R = 300$  m.

A helyszíni pályamérések során M41 sorozatú dízel mozdonyok terhelése alatt (a többi között) a következő elmozdulásokat határoztuk meg:

- az aljak abszolút süllyedését a külső sínszál külső oldalánál és a belső sínszál belső oldalánál egy fixponthoz viszonyítva, az Y-aljak esetében az alj mindhárom ágán mérve,
- az aljak vízszintes irányú abszolút elmozdulását egy beton fixponthoz viszonyítva,
- a külső sínszálon a sántalp külső és belső oldalának a süllyedését a keresztaljhoz viszonyítva,
- a külső sínszálon a sínfej vízszintes irányú elmozdulását a keresztaljhoz viszonyítva.

A mérések alkalmával a mozdony 5 és 60 km/h sebességgel haladt át a vizsgált aljak felett, minden sebesség esetében és minden alj felett legalább hat alkalommal.



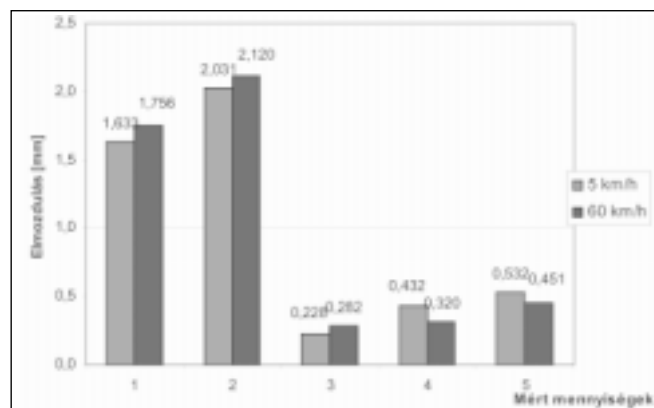
6. ábra: Az Y-aljas vágány kialakítása és környezete az 1041+40 szelvényben

#### A vágánymérések eredményei

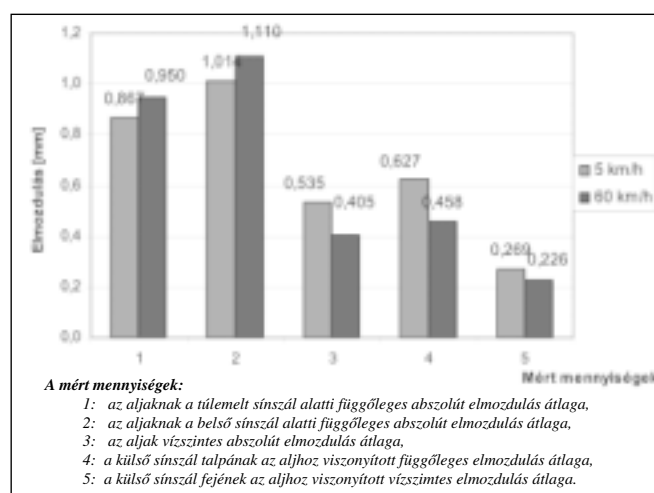
A dinamikus elmozdulások eredményeinek az átlagát az Y-aljas vágányra vonatkozóan a 7., a beton-aljas vágányra vonatkozóan a 8. ábra tünteti fel. A méréseket 2003 novemberében hajtottuk végre [1].

Az Y- és a beton-aljas vágányon 5, és 60 km/h sebességgel kapott mérési eredmények összehasonlítása azt adja, hogy

- a keresztalj abszolút függőleges elmozdulása 60 km/h sebességnél valamivel nagyobb, mint 5 km/h sebességnél,
- az Y-aljas vágányon az alj vízszintes oldalirányú elmozdulása 60 km/h sebességnél nagyobb, mint 5 km/h sebességnél, az LI jelű aljak elmozdulása 60 km/h sebesség esetén kisebb, mint 5 km/h sebességnél,
- a sántalp relatív függőleges és a sínfej relatív aljhoz viszonyított vízszintes irányú elmozdulása 60 km/h sebességnél kisebb, mint 5 km/h sebességnél.



7. ábra: Az Y-aljakkal épített vágányon mért elmozdulások átlagértékei  $V = 5$  és 60 km/h sebesség esetében



8. ábra: Az LI-jelű aljakkal épített vágányon mért elmozdulások átlagértékei  $V = 5$  és 60 km/h sebesség esetében

#### 5. A HH rendszerű acélkeresztaljak igénybevételi vizsgálata

##### Laboratóriumi fárasztóvizsgálat [5]

A University of Illinois at Urbana-Champaign egyetemen a HH 10 rendszerű acélkeresztaljak fárasztóvizs-

gálatát végezték az angliai „Railtrack Line Specification, Steel Sleepers, RT/CE/S/021” számú vállalati szabvány alapján. A University of Illinois at Urbana-Champaign egyetemen folyó fárasztóvizsgálatban külföldi ösztöndíj keretében vettem részt.

A fárasztóvizsgálat során a terhelőerő időbeli változása szinuszos. Az erő legkisebb és legnagyobb értékének a hányadosa 0,1. Több fárasztóvizsgálatot végeztek, az egyes vizsgálatok alkalmával az erő legnagyobb értéke 200, 220, 235, 250, 280, 300 kN volt. A frekvencia 3 és 7 Hz.

A fárasztóvizsgálat során a teherisméltési szám  $5 \cdot 10^6$ . A fárasztóvizsgálat eredménye „megfelel”, vagy „nem felel meg” lehet. Az alj megfelel a fárasztásnak, ha a BS 6072:1981 szabvány szerint végrehajtott mágneses részecske vizsgálattal észlelt repedések hossza nem haladja meg a 3 mm-t. Ha 3 mm-nél hosszabb repedés észlelhető ezzel az eljárással, vagy szemmel, az alj nem felel meg.

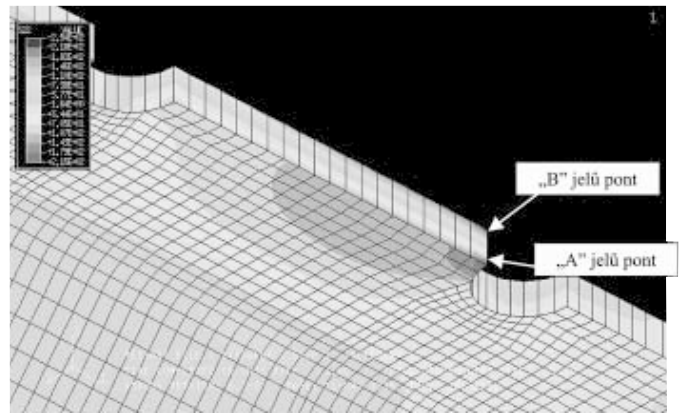
A fárasztóvizsgálatok eredményei alapján, a HH 10 rendszerű aljak 5 millió teherisméltést 220 kN terhelés esetén károsodás nélkül elviseltek, 250 – 280 kN terhelés esetén az aljak egy része elrepedt. A repedés az alsó felületen alakult ki, és áttért a felső felületre. A 9. ábrán látható, 280 kN legnagyobb erővel fárasztott HH 10 rendszerű keresztalj alsó felületén kialakuló repedések áttértek a felső felületre. A repedések hosszirányúak, és kikerülték a sínleerősítés céljára kialakított lyukakat.



9. ábra: Repedés kialakulása a fárasztóvizsgálat végén ( $F_{\max} = 280 \text{ kN}$ ,  $F_{\min} = 28 \text{ kN}$ ,  $f_1 = 3 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 7 \text{ Hz}$ ,  $n = 5 \cdot 10^6$ )

### A feszültségeloszlás meghatározása az acélkeresztaljakban

Az egyetemen feladatomban volt a HH rendszerű acélkeresztaljakban a laboratóriumi vizsgálat során, statikus terhek hatására keletkező feszültség nagyságának és eloszlásának a meghatározása. A számításokat az



10. ábra: A keresztirányú normálfeszültség eloszlása a HH 14 rendszerű keresztalj alsó felületén

„ABAQUS” nevű végelemek-módszer szoftver lineáris-rugalmasság moduljával végeztem.

A végelemek-módszerével elvégzett számítás eredményeként, az aljhoz rögzített térbeli koordináta rendszerben értelmezett feszültség komponensek – hossz-, kereszt- és függőleges irányú normálfeszültség, valamint a három nyírófeszültség komponens – közül a keresztirányú normálfeszültség éri el a legnagyobb értéket. A feszültségcsúcs a külső sínleerősítés belső oldalán, a szimmetriasíkon, az alj felületén ébred. Az alj felső síkján nyomás, az alsó síkon húzás keletkezik. A keresztirányú normálfeszültség nyomásra a legnagyobb értéket a felső felületen a 10. ábrán a „B” jelű pontban, húzásra az alsó felületen az „A” jelű pontban veszi fel. A HH 10 rendszerű alj alsó felületén a keresztirányú normálfeszültség eloszlását a 10. ábra mutatja.

Az igénybevételi számításokat elvégeztem a HH 10, a HH 12 és a HH 14 rendszerű aljakra, melyek anyagvastagsága 10, 12, illetve 14 mm. Az aljrendszerek vizsgálata alapján megállapítható, hogy a feszültségek eloszlása megegyezik a három különböző anyagvastagságú alj esetében. A HH rendszerű aljak – 10. ábra szerint értelmezett – alsó felületének „A” jelű pontjában keletkező kereszt-, hossz- és függőleges irányú normálfeszültségek értékeit a 3. táblázat foglalja össze. Mindhárom alj esetében, a hosszirányú normálfeszültség legnagyobb értéke kevesebb mint fele a keresztirányú normálfeszültség legnagyobb értékének. A hosszirányú komponens maximuma a külső sínleerősítési lyuk oldalánál keletkezik, ahol a keresztirányú normál feszültség értéke megközelítőleg zérus.

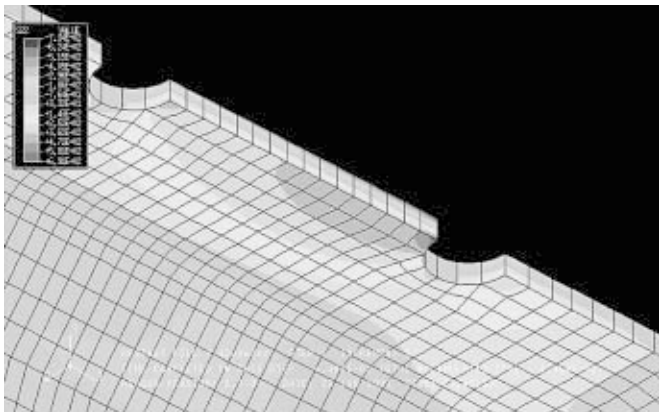
Az ABAQUS végelem szoftverrel elvégeztem a HH 10, a HH 12 és a HH 14 rendszerű acélkeresztaljakban a dinamikus terhek hatására ébredő igénybevételek vizsgálatát. A HH 10 rendszerű acélkeresztalj

3. táblázat

A HH rendszerű acélkeresztaljak – 10. ábra szerinti – „A” jelű pontjaiban keletkező normál feszültségek értéke kereszt-, hossz- és függőleges irányban

Alj rendszere	A normálfeszültség értéke az „A” jelű pontban (alsó felület) [MPa]			A nyírófeszültség komponensek értékei		
	Keresztirány	Hosszirány	Függőleges	$\sigma_{12}$	$\sigma_{13}$	$\sigma_{23}$
HH 10	380,6	4,02	3,46	2.561	-9.1266E-02	0.6181
HH 12	276,4	2,94	3,21	1.884	-4.9930E-02	0.4476
HH 14	214,8	2,30	3,12	1.480	-2.5462E-02	0.3520





11. ábra: A keresztirányú normálfeszültség eloszlása a HH 10 rendszerű keresztalj alsó felületén  $f = 7$  Hz terhelési frekvencia esetén

alsó felületén a keresztirányú normálfeszültség eloszlását  $f = 7$  Hz teherisméltési frekvencia hatására a 11. ábra tünteti fel. A kutatási sorozat a publikáció készítésekor még folyamatban van. A dinamikus terhek hatására keletkező igénybevételek eloszlása elfogadható, azonban a numerikus értékek nem tekinthetők végleges eredménynek.

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az anyagban a statikus és a dinamikus terhelés hatására ébredő feszültségek eloszlása hasonló. A dinamikus terhelés hatására ébredő igénybevétel értéke a statikus teherből keletkező igénybevétel és egy konstans szorzataként kapható meg.

#### 4. Összefoglalás

Az elméleti számítások és a vágánymérések eredményeként az alábbi összefoglaló megállapítások tehetők:

- Az elméleti számítások, valamint a vágánymérések igazolják a (7.) – (10.) képleteknek azt a részét, hogy a dinamikus teherből keletkező igénybevételek mértékadó értéke a statikus igénybevétel és egy tényező szorzataként számítható.
- A Budapest–Vác vasútvonalon végrehajtott mérések eredményeiből – 4. és 5. ábra – megállapítható, hogy az alj és a sín elmozdulásai – és más igénybevételek is – 100 és 120 km/h sebesség esetén nagyobbak, mint 5 km/h sebesség esetén.
- Az Y- és a beton-aljas vágányon 5 és 60 km/h sebességnél kapott mérési eredmények összehasonlítása azt adja, hogy
  - a keresztalj abszolút függőleges elmozdulása 60 km/h sebességnél valamivel nagyobb, mint 5 km/h sebességnél,
  - az Y-aljas vágányon az alj vízszintes oldalirányú elmozdulása 60 km/h sebességnél nagyobb, mint 5 km/h sebességnél, az LI jelű aljak elmozdulása 60 km/h sebesség esetén ki-

sebb, mint 5 km/h sebességnél,

- a síntalp relatív függőleges és a sínfej relatív, aljhoz viszonyított vízszintes irányú elmozdulása 60 km/h sebességnél kisebb, mint 5 km/h sebességnél.
- A vágánymérések eredményeiből levonható a Zimmermann–Eisenmann-elmélet (7. –10. összefüggések) és a vágánymérési eredmények közötti különbség, hogy a dinamikus teherből ébredő igénybevételek átlagértékei a kis sebességek tartományában csökken a statikus értékhez viszonyítva, a nagy sebességek tartományában pedig növekszik.
- A végeselem-módszeren alapuló statikus és dinamikus vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a felépítmény szerkezeti elemek anyagában a statikus és a dinamikus terhelés hatására ébredő feszültségek eloszlása hasonló. A dinamikus terhelés hatására ébredő igénybevétel értéke a statikus teherből keletkező igénybevétel és egy konstans szorzataként kapható meg.

További pályamérések és elméleti kutatások alapján pontosabb felépítmény méretezési elméletek dolgozhatók ki az eddigi megállapításokra alapozva.

#### Irodalom

- [1] Liegner N., Kazinczy L.: Kutatási jelentés az Y-aljakkal épített hézagnélküli és az LI-jelű beton-aljakkal létesített rövidsínés, hevederes illesztésű, zúzottkőágyazatú vágányok összehasonlító üzemi vizsgálatáról, Budapest, 2003.
- [2] Megyeri J.: Vasútépítéstan, Közdok, Budapest, 1991.
- [3] Kazinczy L., Kerkápoly E., Liegner N., Bocz P., Székely J.: Kutatási zárójelentés a Pandrol Fastclip és a Vossloh W1 típusú sínleerősítésekkel épített vágányok összehasonlító vizsgálatáról, Budapest, 2002.
- [4] Liegner. N.: Influence of the annual variation of the humidity content of the subgrade on the ballast coefficient of the railway tracks, Intersections, Article no.5, Intersections/Intersecpii, Vol.1, 2004, No.2, „Railways”.
- [5] Liegner, N.: Effects of increasing the material thickness on reducing the stress in the, HH' types of railway sleepers, 4<sup>th</sup> International PhD. Symposium in Civil Engineering, München, 19<sup>th</sup> – 21<sup>st</sup> September, 2002.
- [6] Kazinczy L.: Ágyazatnélküli közúti vasúti pályaszerkezetek újszerű méretezése, különös tekintettel a felépítmény stabilitására, PhD-értekezés, BME Építőmérnöki Kar, Budapest, 1998.

# A dinamikus tömörség- és teherbírásmérés újabb paramétereit és a modulusok átszámíthatósági kérdései

Subert István<sup>1</sup>

A B&C dinamikus tömörség és teherbírásmérésére vonatkozó ÚT 2-2.124 Útügyi Műszaki Előírás újabban kibővült az alternatív mérési módszerrel és az egyszerűsített tömörségmérés lehetőségével. A dinamikus teherbírásmérésre vonatkozó előírás kiegészült a végmodulus fogalmával. Ismét értékeltük a dinamikus és a statikus teherbírásmérés lehetséges átszámítását, kapcsolatát, azt, hogy a statikus modulusokat lehet-e számítani az új mérőberendezéssel mért dinamikus mérési eredményekből vagy fordítva.

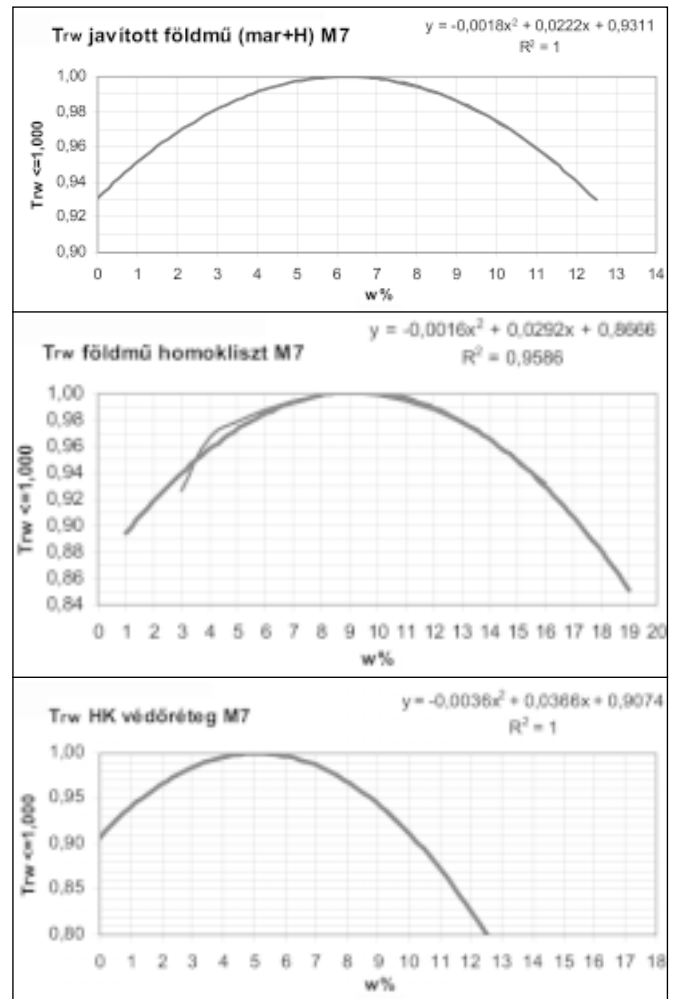
## A B&C dinamikus tömörség- és teherbírásmérő eszköz

Mind a mélyépítési, mind az alapozási munkáknál a tömörségnek, a teherbírásmérésnek igen nagy a jelentősége, ezért meghatározása, ellenőrzése elengedhetetlen. Mind az építetőknek, mind a kivitelezőknek alapvető fontosságú ezek gyors, megbízható ellenőrzése. E feladatra fejlesztettük ki a dinamikus tömörség- és teherbírásmérő könnyűejtősúlyos vizsgálati módszert és berendezést. Ezzel a műszerrel a kivitelezők kiváló lehetőséget kaptak az egyszerű és megbízható önkontrollra, a belső minőség-ellenőrzés javítására.

## A dinamikus tömörségmérés újabb fejlesztései

A tömörségi fokot új módszerrel, a süllyedési amplitúdóból képzett alakváltozási görbéből határozzuk meg a B&C könnyű-ejtősúlyos mérőberendezéssel. A mérés a relatív tömörségi fok meghatározására a fajlagos alakváltozáson alapuló tömörség elméletét használja, melyet az ÚT2-2.124 Útügyi Műszaki Előírásban szabályoztak 2003-ban. Ez az elmélet igazolható és levezethető volt a Proctor-vizsgálatokból azzal, hogy a megszokott  $V_r = \text{const}$  modelltől egy  $G_{sz} = \text{const}$  modellre át kell számítsuk a Proctor-pontokkal jellemzett minták térfogatváltozását.

A száraz sűrűségek arányából meghatározott hagyományos  $T_{rp}\%$  tömörségi fok azonos a  $T_{rd}\%$  dinamikus tömörségi fokkal, és a  $T_{re}\%$  helyszíni relatív tömörség és a  $T_{rw}$  nedvességkorrekciós tényező szorzata. A  $T_{re}\%$  nem más, mint az adott víztartalom mellett elért tömörségi fok, a mérés során végzett teljes tömörítéshez viszonyítva, a  $T_{rw}$  pedig a Proctor-görbe normalizált ( $\rho_{dmax}$ -szal osztott) alakja. Minden anyag nedvességkorrekciós görbéje (1. ábra) a  $w_{opt}\%$ -nál = 1,000, és csak a görbülete változó. A  $T_{rw}$  görbe egyenletének a meghatározásakor ugyanabból az anyagból több vizsgálatosorozatot (2-3\*5 pont) kell vé-



1. ábra:  $T_{rw}$  nedvességkorrekciós görbék

gezzünk, és ezeket egyben dolgozzuk fel, regressziós analízis mellett, hogy meglegyen a kellő megbízhatóság.

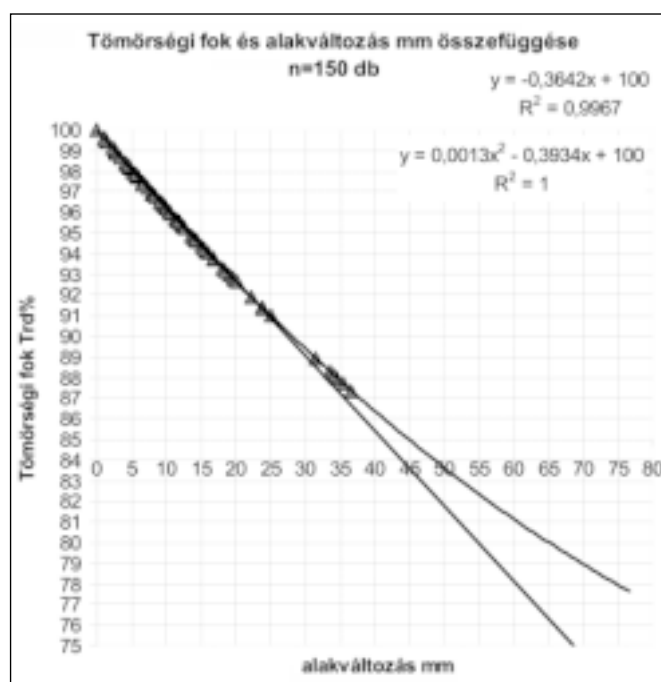
A dinamikus tömörségmérés elmélete közvetlenül a tömörödést méri és nem közvetett értékkel (mint például az izotópos mérés a sűrűséggel) jellemzi. Ezért olyan gyakorlati előnye van, mely a kivitelezést jelentősen megkönnyíti, és méréskor rutinszerű döntéseket tesz lehetővé. A kijelzett paraméterek alapján egyértelműen eldönthető, hogy kell-e még további tömörítés, vagy éppen meg sem szabad kezdeni a tömörítést, mert az anyag nagy, vagy túl kicsi víztartalma miatt 100% relatív tömörségnél sem érhető el az előírt tömörségi fok.

A kidolgozott mérési módszer lényeges eleme, hogy a Proctor-vizsgálattal azonos munkával a tömörítést a helyszínen, az adott anyagon, újra és újra elvégezzük minden mérésnél. Ez a mérési módszer pontosságát jelentősen javítja, a napi gyakorlati munkát pedig rendkívül biztonságossá és megbízhatóvá teszi. A berendezés kis mérete, könnyű kezelhetősége nagyban segíti széles körű alkalmazhatóságát az építőipar teljes

<sup>1</sup> Okl. ép. mérnök, okl. gazd. mérnök, ügyvezető, Andreas Kft., Budapest

területén. Környezetvédelmi előnyei miatt a 2003-as genfi találmányi világkiállításon aranyérmert nyert magyar mérőberendezés újdonsága, hogy nem használ az egészségre és környezetre káros izotópforrást.

A legújabb elmélettel a relatív tömörségi fok a felső  $T_{rd} > 90\%$  tömörségi tartományában a dinamikus tömörségmérés még megbízhatóbb, pontosabb lett. A Proctor-féle vizsgálatból egzakt módon levezethető az alkalmazott összefüggés, mely a tömörségi fok és a térfogatváltozás regressziós analízisének, a közelítő görbe együtthatójának figyelembevételén alapul (2. ábra). A süllyedési amplitúdók különbségéből, az egy helyre mért ejtések számával súlyozott átlagából és az anyag Proctor-vizsgálatából számított  $T_{rd}\%$ - $\Delta l$  összefüggés felhasználásával képezzük a relatív tömörségi fokot. Ezt az ÚT 2-2.124 módosításában „alternatív” módszernek nevezett változatot több szempontból is kedvezőbbnek tartjuk, bár az esetek többségében csak néhány tizedes eltérést ad a korábbi módszerhez képest. Mivel az első ejtés süllyedési értékének nincs akkora jelentősége, mint a fajlagos alakváltozás számításán alapuló módszer esetében, a tárcsa-elhelyezési, illeszkedési és felfekvési problémákból származó hiba lehetősége jóval kisebb.



2. ábra: Tömörségi fok és térfogatváltozás egyesített összefüggése öt különböző anyagban

A V1.40 verziószámú fejlesztés másik nagy újdonsága, hogy bevezette az egyszerűsített tömörségmérés fogalmát. Mivel a korábbi verzióknál a 18 ejtés szükségessége nem aratott osztatlan sikert, ezért a valós tömörítettségtől tettük függővé az ejtések számát. A még szükséges ejtésszámot a kényelmesebb mérés érdekében a tömörödési görbe meredekségétől tettük függővé. Az egyszerűsített tömörségmérési üzemmódban az első kilenc ejtés után kezdi figyelni a program a feltétel fennállását, teljesülésekor pedig az utolsó két pontból kapott meredekséggel képzi a hiányzó adatsort. A helyettesítés miatt az így számított tömörségi fok kissé rosszabb, mint a teljes sorozattal

számított, de ez az elhanyagolás a biztonság javára történik (határesetnél a mérést a teljes sorozattal újra kell mérni, az pár tizeddel magasabb lesz).

## Nedvességkorrekciós tényező az izotópos méréseknél

Az ÚT 2-3.103 szerinti radiometriás tömörségmérés a száraz sűrűség és a Proctor-vizsgálattal meghatározott  $\rho_{dmax}$  arányából határozza meg a  $T_{rp}\%$  tömörségi fokot (mely azonos a  $T_{rd}\%$  dinamikus tömörségi fokkal. Mivel a  $T_{rd}\%$  tömörségi fok a  $T_{RE}\%$  helyszíni relatív tömörség és a  $T_{rw}$  nedvességkorrekciós tényező szorzata, ezért az izotópos mérési eredményből is számítható a relatív tömörség a  $T_{REiz}\% = T_{rp}\% / T_{rw}$  kifejezéssel. A  $T_{RE}\%$  helyszíni relatív tömörség nem más, mint az *adott víztartalom mellett elért tömörségi fok*, azaz az addig végzett hengerlési munka hatékonyságának a mutatója. Ha ez alacsony, csak rá kell küldeni a hengert még néhány további járatra.

De a számított  $T_{rw}$  nedvességkorrekciós tényező nagysága is fontos. Ebből azt látni, hogy az adott nedvességtartalom mellett (mely más vagy azonos a  $w_{opt}\%$ -kal) 100%-os a relatív tömörség, azaz tökéletes hengerlés esetén is maximum mekkora tömörségi fokot tudunk elérni. Ha a  $T_{rw}$  értéke mondjuk a helyszínen mért  $w_t\%$  víztartalomnál 0,952, akkor a  $T_{rp}\% = T_{REiz}\% * T_{rw}$  miatt (100% relatív tömörségi fok esetén is) legföljebb  $100 * 0,952 = 95,2\%$  tömörségi fokot lehet elérni.

Nyilvánvaló az is, hogy ha az izotópos mérések eredményeiből 100%-nál nagyobb relatív tömörséget kapunk, az hibás mérés, ezért a módszer az amúgy gyenge megbízhatóságú mérési mód ellenőrzésére is alkalmas.

Érdekes következtetésre vezetett egy másik szempont vizsgálata is az izotópos mérési módszer körül. Mint ismeretes, az izotópos berendezések egyik izotópja a nedves sűrűséget méri (ez hitelesített), a másik pedig a víztartalmat határozza meg, ez csak kalibrált. Hogy a mért víztartalomnak mekkora a jelentősége, azt egy példán mutatjuk be.

Legyen a  $\rho_{dmax} = 2,21 \text{ g/cm}^3$  és a nedves sűrűség  $\rho_n = 2,18 \text{ g/cm}^3$  mint a hitelesített izotópos egység mérési eredménye. A száraz sűrűség ebből  $\rho_{di} = \rho_n * (1 / (1 + w))$ , amit különböző víztartalmaknál az 1. táblázatban számítottuk.

1. táblázat

A víztartalom hibájának hatása a tömörségi fokra

$w_t\%$	$1/(1+w)$	$\rho_{di}$	$T_{rp}\%$ számított	$\Delta T_{rp}\%$ hiba
2	0,980	2,137	96,7%	+ 4,1%
4	0,962	2,096	94,8%	+ 2,2%
6	0,943	2,055	93,0%	+ 0,4%
7	0,935	2,037	92,2%	- 0,4%

Megállapítható, hogy a kis víztartalom előnyös a jó eredményhez, mert akkor nagyobb a tömörségi fok. Mivel a víztartalom mérése nem hitelesített, igazán nem is tudjuk mekkora eltérése lehet. Néhány mintát



szárító szekrényben ellenőrizve gyakori a 2-3%-os eltérés, de akár 6-10%-os eltérést is tapasztaltunk a hitelesített mérőeszközöknél. Ha ebben a példában a valós víztartalmat  $w_t\%=6,5\%$ -nak (és  $T_{rp}\%=92,6\%$ -nak) feltételezzük, akkor a szemünknek oly megszokott alacsony víztartalmak miatti eltérés a tömörségi fokban elérheti a 4-5%-ot! A nedvesség pontos mérése tehát fontos, ezért egyre több laboratórium tér át más módszerrel a víztartalom helyi mérésére. A dielektromos állandó elvén a víztartalom meghatározás például az USA T-90 Trident dielektromos nedvességmérővel akár 1% pontosságú is lehet. A példa jó annak bemutatására is, mekkora a jelentősége egy jó nedvességtartalom-mérőnek a műszaki ellenőr kezében.

Megjegyezzük, hogy példánkban csak egy paraméter, a víztartalom-mérés hatását mutattuk be az eredményre, mely a többivel (a Proctor-sűrűség eltérés, az izotópos sűrűségmérés hiba stb.) együtt érhetően lehet akár  $\Delta T_{rp}\%$  hiba =  $\pm 5-6T_{rp}\%$  is, azaz **97%-os határérték esetén az izotópos mérőberendezéssel gyakorlatilag mérhetetlen a tömörség, mert a mérés pontatlansága ezt jelentősen meghaladja.**

### Megépíthető-e az autópályák földmű-felső rétegén a 97%-os tömörségi fok?

A 3/2004 ÉME az új típusú autópálya-szerkezetek alatti egy méteres vastagságban a földműre előírja a  $T_{rp}\% \geq 97\% - 0\%$  alkalmazását. Az izotópos tömörségmérés a bemutatottak miatt a tömörség meghatározására teljesen alkalmatlan. Az ÚT 2-2.124 ÚME szerinti dinamikus tömörségvizsgálat pontosabb mérésre alkalmas és más módszert alkalmaz (3. ábra). Ebben az esetben is fel kell tegyük magunknak a kérdést, megépíthető-e az autópályák felső rétegeire előírt 97% tömörségi fok?

Az előzőekben tárgyaltuk a relatív tömörségi fok és a nedvességkorrekciós tényező érzékenységét és jelentőségét. Nézzük meg, most ilyen vonatkozásában mit tud. A  $T_{rd}\%$  dinamikus tömörségi fok akkor lehet 97% felett (reális körülmények között), ha a  $T_{rE}\%$  helyszíni relatív tömörség 97–100% közötti és a  $T_{rw} = (T_{rd}\% / T_{rE}\%) = 1,000 - 0,970$  közötti. Ez is csak úgy, ha a relatív tömörség 100% felé tart, akkor a  $T_{rw}$  tarthat 0,970 felé, vagy ami gyakoribb eset, ha a relatív tömörség eléri a 98% értéket, akkor a  $T_{rw} = 0,990$  kell legalább legyen. Ez a homokos kavicsok esetében általában a  $w_{opt}\% \pm 1,5\%$  tartomány, mely *gyakorlatilag – tartósan – NEM állítható elő.*

A másik eset a tökéletes és maximális tömörítésre való törekvés, amikor a relatív tömörség 99–100% közötti, ekkor a  $T_{rw} \geq 0,980$  kell legalább legyen. Ez a homokos kavicsok esetében általában a  $w_{opt}\% \pm 2,5\%$  beépítési víztartalom tartomány, mely tartósan gyakorlatilag éppen hogy csak, de előállítható.

Mindezeket megvizsgálva a földmű felső 1,0 m és alsó 0,5 m-en – mivel itt nem is előírás a különlegesen jól tömöríthető homokoskavics anyag – teljesen reménytelen teljesíteni a  $T_{rp}\% \geq 97\% - 0\%$  tömörségi követelményt bármilyen intenzív tömörítéssel, bármilyen pontos méréssel.



3. ábra: A genfi találmányi vilákiállítás aranyérmét nyert mérőberendezés

**Összefoglalva:** az autópályákra előírt tömörségi követelmény a szabad ég alatti kivitelezési körülményeket figyelembe véve, maximális tömörítési technikával és megfelelő anyagokkal, a földmű felső 1,0 méterének felső 50 cm-es rétegében, homokoskavics anyagokkal  $T_{rd}\% \geq 97\% - 2\%$  (max az esetek 20%-ában megengedve) a mérés technikai megfontolásokat tekintve, betartható.

A földmű felső 1,0 m-ének alsó 0,5 m részében – mivel itt homokoskavics anyag alkalmazása nem előírás – teljesen reménytelen tartósan teljesíteni a  $T_{rd}\% > 97\%$  tömörségi fok követelményt. Maximális tömörítési technikával és megfelelő, jól tömöríthető szemcsés talajokból legfőljebb  $T_{rd}\% > 95\% - 0\%$  előírás tartható be biztonsággal, egyszerű mérés technikai megfontolások alapján.

### A dinamikus modulus számításának jelenlegi eltérései

Az ÚT 2-2.124 ÚME szerinti B&C dinamikus tömörség- és teherbírás-mérő készülék két készülék egyben, mert egy méréssel mind a  $T_{rd}\%$  tömörségi fok, mind az **Ed dinamikus modulus** (MPa) meghatározható. A dinamikus modulus azonban ezzel a módszerrel  $D=163$  mm-es tárcsával és a  $p_{din}=0,35$  MPa tárcsa alatti terheléssel határozzuk meg. Más könnyűejtősúlyos berendezések (pl. a német Zorn gyártmányra vonatkozó magyar ÚT2-2.119 ÚME) 300 mm átmérőjű tárcsát és  $p_{din}=0,1$  MPa tárcsa alatti terhelést használnak. A kis tárcsa alatti terhelés jelentősen eltér a megszokott statikus  $E_2$  modulus meghatározásakor alkalmazott  $p=0,3$  MPa terheléstől. Hibának vehető, hogy az ÚT2-2.119 ÚME szerinti módszer  $c=2$  Boussinesq-szorzót vesz figyelembe, és nem választható meg a mért anyag harántkontrakciós együttthatója.

Az ÚT 2-2.124 ÚME szerinti B&C mérőeszköz alkalmazásakor már figyelembe vehető mindez, beállítható a valós  $\mu=0,3-0,4-0,5$  Poisson-tényező, illetve megválasztható az alkalmazni kívánt Boussinesq-féle merev ( $c=\pi/2$ ) vagy hajlékony tárcsa szorzó ( $c=2$ ) is.

A B&C dinamikus berendezéssel való mérést szabályozó ÚME 2004 évi módosításában újdonság, hogy bevezettük a dinamikus végmodulus ( $E_{d,vég}$ ), és a mértékadó dinamikus végmodulus fogalmát, mely a dinamikus tömörség meghatározásához szükséges 18 ejtés utolsó három ejtésének átlagát veszi figyelembe, mint a *betömörödött állapotra jellemző dinamikus modulus*. Ezzel összehasonlítva a 4., 5., 6. ejtésből képzett hagyományos  $E_d$  dinamikus modulus, következethetünk a teherbírás valós értékére, illetve az  $E_2$  statikus modulussal való összehasonlíthatóság feltételeinek a fennállására. Az eddigi mérések során ugyanis ismeretlen volt előttünk, hogy a második ejtési sorozatból meghatározott süllyedési amplitúdó a tömörödési görbe elején, közepén vagy végén helyezkedik-e el, és csak *feltételeztük*, hogy az előterheléssel a kelő tömörödés létrejött. Megjegyezzük, hogy az MSZ 2509-3 szerinti  $E_2$  statikus teherbírás mérésünk is azért alkalmaz két felterhelést, hogy biztosítsa a tömörödést az első terheléssel. Hiányoljuk az MSZ 2509-3 szabványból a párhuzamos mérésekre és az ismételhetőségre vonatkozó előírásokat, és annak ellenőrzését, hogy a tömörödés valóban létrejött-e, netán azonos mértékű lenne valamennyi mérésnél és anyagnál.

Mivel az  $E_d$ ,  $E_{vd}$  és  $E_2$  értékek átszámítása, összehasonlítása egyesek szerint még lehetséges, ezért a statikus mérés módszerét, lehetséges hibáit is elemeztük.

### A statikus teherbírás-mérésünk nem hangoztatott furcsaságai

Megvizsgáltuk a fölműre alkalmazott  $p=0,3$  MPa és a pályaszerkezeti rétegekre előírt  $p=0,5$  MPa terhelési szint során alkalmazott  $E_2$  előírásokat „egyenértékűségük” tekintetében. Mint ismeretes, a statikus modulus nagysága attól is függ, hogy a végterhelés mekkora volt, azaz 0,3 vagy 0,5 MPa-ig történt-e.

Első ránézésre úgy tűnik, hogy a pályaszerkezeti rétegekre, útalapokra előírt teherbírás határértékek nagyobbak, de ezt közelebről megvizsgálva már más a helyzet. Ha egy konkrét  $E_2$  mérésből csak 0,3-0,4-0,5 MPa végterhelésig külön-külön, egyenként számoljuk ki a  $\Delta s$  alakváltozást és az ebből következő alakváltozási modulus értékét, a *végterheléssel egyező irányú, egyre növekvő  $E_2$  értékeket kapunk(!)*.

Ez persze lehetetlen, mert az  $E_2$  értékét az anyagrétegre jellemző konstans modulusnak kell tekintsük (ezért is teherbírás határérték). **Az ellentmondásból következik, hogy rossz az a felfogásunk, hogy az  $E_2$  határértéknél a szükséges (előírt) terhelési szint különbözőségét nem, vagy nem kellően vesszük figyelembe.**

### Statikus egyenértékű alakváltozási modulus

A probléma az  $E_{2e}$  egyenértékű alakváltozási modulus fogalmának a bevezetésével oldható meg, de egyben

azonnal felveti a jelenlegi statikus előírás amúgy is használatlan felülvizsgálatának a szükségességét.

Az  $E_{2e}$  egyenértékű alakváltozási modulus hasonlítsuk össze példaként a földműtükör, a javító-védőréteg és az M50 stabilizáció esetén. A  $p_1^2/p_2^2$  arány ekkor  $0,5^2/0,3^2=1,56$ . Ennek figyelembevételével az  $E_{2e0,5}$  egyenértékű alakváltozási modulus  $p=0,5$  MPa terhelési szinten:

$E_{2e0,5}$  egyenértékű alakváltozási modulus a földműtükörre:  $E_{2e0,5}=40 \cdot 1,56=62$  MPa,  $E_{2e0,5}$  egyenértékű alakváltozási modulus a HK javítórétegre:  $E_{2e0,5}=65 \cdot 1,56=101$  MPa,  $E_{2e0,5}$  egyenértékű alakváltozási modulus az útalap stabilizációra:  $E_2=E_{2e0,5}=85$  MPa.

Azaz ha  $p=0,5$  MPa-t választjuk az egyenértékű alakváltozási modulus terhelési szintjéül, akkor az **útalapra vonatkozó határérték előírás 22%-kal gyengébb, mint az ágyazatra vonatkozó!**

### A statikus és a dinamikus teherbírás modulusok átszámíthatósági kérdései

A statikus és a dinamikus alakváltozási modulusok összehasonlíthatóságában, átszámíthatóságában egyre kevésbé hiszünk, a következők miatt:

- a terhelési idő jelentősen eltérő a két modellnél ( $18 \text{ ms} < > 160\text{--}300 \text{ s}$ )
- eltérő modellhatás (dinamikus modulus  $< >$  statikus modulus, más anyagoknál sem azonos)
- terhelési idő alatti konszolidáció (dinamikusnál nincs)
- a szemeloszlási és a granulometriai jellemzők hatása más
- a dinamikus modulusok reprezentativitása más (ÚT2-2.119 és ÚT2-2.124)
- a statikus modulus reprezentativitásának elemzése hiányzik, nincs
- a mért réteg nagy telítettségénél a két modellhatás jelentősen eltérően viselkedik
- nincs két összehasonlítható adathalmaz (a Poisson-tényező, a Boussinesq-szorzó és a terhelési szint a két mérésnél más, és utólag azonosíthatatlan)

### Eltérő modellhatás

A dinamikus teherbírás vizsgálat jellegzetessége, hogy 70–75cm magasságból leejtett kb. 10 kg tömegű súly  $18+/-2$  milisecundum ideig létrejövő terhelésére bekövetkező alakváltozásból számított modulus ad. Az ejtések során a szemcsék berezegnek és elmozdulhatnak, melyek befolyásolják a dinamikus modulus nagyságát, másrészt az anyagrétegen tömörödés jön létre. A jelenlegi szabályozás feltételezi, hogy a 3., 4., 5. ejtés előtt a réteg kellő tömörödése létrejött.

A statikus teherbírás vizsgálat jellegzetessége, hogy ellensúlynak támasztott emelőszerkezettel acél tárcsára leadott lépcsős felterheléssel a réteg rugalmas viselkedésének meghatározására törekvő méréssel határozzuk meg a Boussinesq-féle képlettel az alakváltozási modulus. A statikus vizsgálat során a konszolidáció egy része is lezajlik, a  $\delta-\epsilon$  (P-s) terhelési görbe linearitásában kijelzi ennek jelenlétét. A mérés

jelenlegi módszere előterhelés utáni első felterhelést ( $E_1$ ), majd második felterhelést ír elő. Az első felterhelés utáni maradó alakváltozást ismerjük (mérjük), a második felterhelés utáni maradó alakváltozást nem. A mérés ismételtetősége gyenge, szabványában szabályozatlan. A statikus terhelés jellemzője, hogy a szemcsék „kitámasztódhatnak”, átboltozódhatnak. Ez a mérés a folyamatosságban az alakváltozás-mérőn ugrásként jelenik meg. A mérés leolvasása egyébként a konszolidáció miatt (álló terhelés mellett is) a folyamatos alakváltozás közben végezhető. A szokásos finom kopogtatás a tengely súrlódása miatt a pillanatnyi mérési értéket csak átmenetileg állítja le. A vonatkozó szabvány e jelenséget elismeri, ezért megengedi a  $<0,02$  mm/s alakváltozási sebesség mellett leolvasást.

### Különböző terhelési időtartam

A dinamikus modulus meghatározása a 4., 5., 6-dik ejtésből,  $18 \text{ ms} \pm 2 \text{ s}$  idő alatti (előírt érték) terhelési idő mellett mért süllyedési amplitúdó alapulvételével történik. Az ütészzerű, dinamikus erőhatásra a mért anyagrétegeknél létrejövő alakváltozás és alakváltási modulus a gyors, dinamikus terhelésre jellemző anyagviselkedést modellezi. A vízzel telített rétegen alakváltozás nulla vagy rendkívül kicsi. Célszerű lenne ezért a helyszíni víztartalom meghatározása a dinamikus modulus mérésénél is, mely jelenleg nem előírása a szabványnak sem az ÚT 2-2.119-ben, sem az ÚT 2-2.124-ben (ha dinamikus tömörségmérést is végeznek, akkor a  $w_t$  mérése már előírás). A terhelési időtartam  $60 \text{ km/óra}$  sebességű, mozgó terhelés haladását modellezi  $\rho_{\text{din}}=0,3 \text{ MPa}$  tárcsa alatti terheléssel, ami gyakorlatilag egyezőnek tekinthető a valós gépjárműterheléssel.

Statikus teherbírás-méréssel  $0,05 \text{ MPa}$  lépcsőkkel  $0,3 \text{ MPa}$  végterhelésig első felterhelésnél 6 lépcsővel  $100\text{--}150 \text{ s}$  alatt terhelünk fel, ami közben jelentős (és mérhető) konszolidáció zajlik le. A visszaterhelés két lépcsőben (de nem meghatározott helyen) kell történnjen. A második felterhelés  $0,1 \text{ MPa}$  lépcsőkkel történik, de az elsőhöz hasonló sebességre ügyelni kell. A teljes mérés időtartama legalább  $160\text{--}300 \text{ s}$ -nak becsülhető.

### A szemszerkezeti jellemzők hatása

A dinamikus modulus az anyagrétegre jellemző érték. Az anyagréteg szemeloszlása és szemalakja döntő hatású a dinamikus és a statikus terhelés során tanúsított viselkedésében. A folyamatos térfogati szemeloszlású (Fuller-közeli) szemcsés anyagoknál a szemcsékből álló szerkezet stabilitása nagy, a dinamikus és statikus modulus közötti különbség kicsi. A szemcsék gömbölyödött vagy zúzott, sarkos éleinek hatása belső súrlódásuk miatt jelentős a nem folyamatos szemeloszlású esetekben. A dinamikus mérés során az ejtések berezegtetik a szemcséket, ezért azok „helyezkednek”. A statikus mérés befeszíti a szemcséket, kitámasztódnak, ezért csak lecsúszásuk vagy letörésük esetén mozdulnak el.

### A dinamikus és a statikus mérési módszerek reprezentativitása

A mérésekre vonatkozó szabványok más-más módon szabályozzák a mérési megbízhatóságot, illetve statikus mérésünk ezt nem is szabályozza. Csak az ÚT2-2.124 „Dinamikus tömörség- és teherbírás-mérés könnyű-ejtősúlyos berendezéssel” c. ÚME tartalmaz előírást a mértékadó dinamikus modulusra, illetve két (három) mérésből, átlaggal képi azt. Emiatt nem egyenlő súlyú az anyagrétegre jellemző modulusok figyelembe vehető értéke.

**Összefoglalva:** a részletes elemzéséből levonható általános következtetésünk, hogy a dinamikus modulus és a statikus modulus átszámítására való törekvést el kell vetni. A dinamikus és a statikus jellemzők alapvetően eltérők és alapvetően más műszaki követelményt támasztanak. Mind a statikus, mind a dinamikus teherbírás értékeit sürgősen szabályozni kell, mert a statikus modulus a tartós terhek hatásainak, a dinamikus modulus pedig a mozgó terhelés tartós hatásainak az elviselésére kell megfelelő határértéket adjon.

### Irodalom

- [1] Kézdi Á.: Talajmechanika I. TK. Budapest, 1972.
- [2] Tömörség- és teherbírás mérés könnyű-ejtősúlyos berendezéssel. K+F Jelentés Budapest, ÁKMI Kht. 3810.5.1/2002 Témafelelős: Subert István
- [3] ÚT 2-2. 124:2003 Útügyi Műszaki Előírás „Dinamikus tömörség- és teherbírás mérés könnyű-ejtősúlyos berendezéssel”
- [4] Subert I.: Dinamikus tömörség- és teherbírás mérés könnyű-ejtősúlyos berendezéssel. Közúti és Mélyépítési Szemle, 53. évf. 2003 5. szám. p.: 184–191
- [5] Subert I.: A dinamikus tömörség mérés tapasztalatai. 31. Útügyi napok, Győr 2003, 3. szekció. p.: 10.
- [6] Subert I.: Dinamikus tömörség- és teherbírás mérés könnyű-ejtősúlyos berendezéssel. Közúti és Mélyépítési Szemle, 2003/2.
- [7] Subert I.: Dinamikus tömörség mérés alkalmazásának újabb tapasztalatai. Geotechnika, 2003. Konferencia, Ráckeve
- [8] Subert I.: Dinamikus tömörség mérés – környezetbarát, új mérés a mélyépítésben. Mélyépítés, 2003 p.:36–37.
- [9] Subert I.: Dinamikus tömörség mérés alkalmazásának tapasztalatai és előnyei. 31. Útügyi napok, Győr
- [10] Subert I.: B&C dinamikus tömörség mérés – megbízható minőség a mélyépítésben. Mélyépítő-tűkörkép, 2004
- [11] Fay P.: B&C teherbírás- és tömörség mérő készülék. Magyar Elektronika, 2004/6. szám p.: 46–47
- [12] Subert I.: Új, környezetkímélő, gazdaságos mérőeszközök a közlekedéscsőépítésben. Geotechnika, 2004. Konferencia, Ráckeve
- [13] Subert I.: B&C dinamikus tömörség mérés. Mélyépítés, 2004. október–december p.: 38–39.
- [14] Subert I.: B&C – egy hasznos társ. Magyar Építő Fórum, 2004/25. szám p.: 36.



# Körforgalmú csomópontok geometriai vizsgálata a biztonság szempontjából<sup>1</sup>

Szabó Eszter<sup>2</sup>

## 1. Bevezetés

A nemzetközi tapasztalatok szerint forgalombiztonsági szempontból legkedvezőbb megoldás a körforgalmú csomópont. Nyugat-Európában az új típusú körforgalmú csomópontok építésére egyre nagyobb számban kerül sor. Az ok a közép sziget kis átmérője és a belépéskor az elsőbbségadási kötelezettség miatti alacsony sebességek, a nagy kapacitás, és ami a legfontosabb: a jó forgalombiztonság. A geometriai kényszer miatt ugyanis az alacsonyabb sebességgel bekövetkező balesetknél a kisebb ütközési energiából adódóan kisebb baleseti kockázat származik [3].

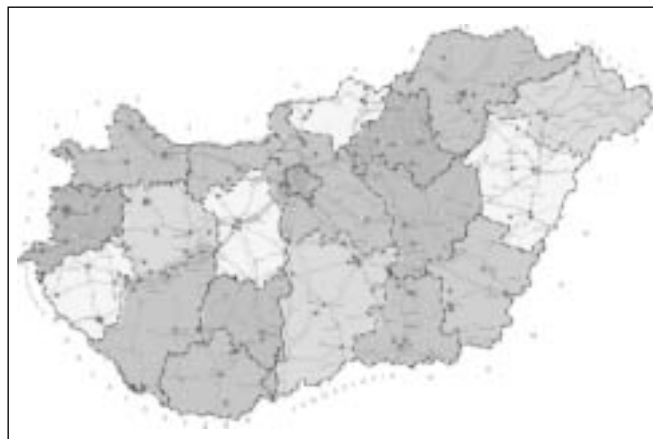
A körforgalmú csomópont a legkedvezőbb közlekedésbiztonsági szintbeli csomópont. A körforgalmú csomópont további előnye, hogy mind az építés, mind a fenntartás szempontjából gazdaságos, kapacitása nagy, alkalmazási területe széles körű, jól illeszthető a környezetbe, és a forgalom okozta káros környezeti hatás a folyamatos áramlásból adódóan elviselhető mértékű, a keresztezési manőver minden más szabályozásnál egyszerűbb. A körforgalmú csomópontban közlekedők biztonságát szubjektív, nem számszerűsíthető tényezők is növelik. Ilyen például az is, hogy a körforgalmú csomópont mind a lakosságnál, mind a gépjárművezetőknél nagyon népszerű, esztétikusan illeszthető a környezetbe (1. ábra). A szabályszerűen parkosított és gondozott közép sziget és a csomópont környezete vonzó látvány lehet.



1. ábra: Szombathely, a Horváth Boldizsár körút – 11-es huszár út csomópontja (fotó: Papp Gábor)

Lakott területen jól alkalmazható térformáló szerepe miatt. A körforgalom alkalmazása kifejezetten ajánlott különböző települési övezetek határában, átmeneti zónában a forgalomcsillapítás eszközeként [2].

A 2003-ban végzett országos felmérés alapján elmondhatjuk, hogy Magyarországon is egyre jobban elterjednek a körforgalmak. A területi elhelyezkedés még ma sem egyenletes, de ma már lefedi a teljes országot, a közlekedésben résztvevők nap mint nap használják, közlekednek a körforgalomban. A 2002. december 31-ig az országos közúthálózaton megépült körforgalmú csomópontokat a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: A 2002. december 31-ig Magyarországon átadott, az országos közúthálózaton megépült körforgalmú csomópontok

Magyarországon az országos közúthálózaton 2003-ig 202 körforgalmat építettek, és továbbiak terve, illetve tanulmánya készült el [4].

## 2. A Vas megyében 1998-ig megépült körforgalmú csomópontok baleset-elemző vizsgálata az átépítés előtt és után

### 2.1. A megépült körforgalmú csomópontok helyzete

Vas megyében úgszintén, mint az ország más megyéiben, a körforgalmú csomópontok bevezetésének elsődleges indoka a halálos és súlyos sérüléssel járó balesetek számának jelentős csökkentése volt. A szerencsétlenségek nagy számban a csomópontokban fordultak, illetve fordulnak elő még napjainkban is. A balesetek elleni legjobb védekezés az, hogy közúti csomópontjainkat a lehető legbiztonságosabbá építjük át. A körforgalmú csomópont a biztonság követelményeinek messzemenően megfelel. Az összes belépő járműre vonatkoztatott személyi sérüléssel, illetve halálos balesetek száma a körforgalmú csomópont esetén lényegesen kisebb, mint a hagyományos csomópontoknál.

A fejlett közlekedési kultúrájú európai országokban igen sok esetben alkalmazzák a körforgalmat, mint kedvező forgalomtechnikai megoldást. A gépjárművezetői szokásokat illetően igen jelentős szerepe van a KRESZ szabályoknak, a szabályok ismeretének és természetesen a szabályok érvényesítésének.

<sup>1</sup> A Közúti Szakemberekért Alapítvány fiatal szakemberek számára kiírt pályázatán 2004-ben I. díjat nyert tanulmány alapján

<sup>2</sup> Építőmérnök, útépítő-fenntartó-üzemeltető szakmérnök, Vas Megyei Állami Közútkezelő Kht.

Mindezek figyelembevételével adatgyűjtést végeztem a Vas megyében megépült körforgalmú csomópontokról. A körforgalmak fekvését, geometriáját és baleseti adatait egyaránt megvizsgáltam.

A megépült Vas megyei körforgalmak 60%-a nagy körforgalom, 15%-a közepes (szűkített) körforgalom, míg 10%-a mini körforgalom-típusba sorolható. A megépült csomópontok közül három ovális geometriai kialakítású.

A megyénkben található körforgalmú csomópontok közül 8 lakott területen belül, 8 az átmeneti zónában, és csak 4 fekszik lakott területen kívül. A külterület és a belterület közötti átmeneti zónában fekvő csomópontok a nagyobb sebességek és a vegyes összetételű forgalom miatt a külterületi utakra jellemző geometriai kialakítással épültek.

A lakott területen kívüli csomópontok mind közvilágítással épültek, annak ellenére, hogy sem a nyugati, sem a hazai irányelvek nem teszik ezt kötelezővé. Nagyon fontosnak tartom a külterületi körforgalmú csomópontok éjszakai megvilágítását a jó észlelhetőség javítása érdekében, annak ellenére, hogy erősen megnöveli a beruházás költségeit.

A forgalom növekedése egyre inkább kikényszeríti a jóval nagyobb kapacitású kétsávos körforgalmú csomópontok magyarországi alkalmazását. Az új szabályzat már lehetőséget ad kétsávos körforgalmú csomópont tervezésére, ami alapján megyénkben jelenleg két ilyen csomópont van Szombathely bevezető szakaszán.

A körforgalmú csomópontok geometriai jellemzése során fontos adat még, hogy a körforgalmú csomópontnak hány csomóponti ága van. Megyénkben a hagyományosnak mondható, négy csomóponti ágú körforgalmú csomópontok épültek túlnyomó többségben. A két háromágú körforgalmú csomópontunk lakott területen belül közepes körforgalmú csomópont típusnak megfelelő paraméterekkel épült ki.

Az öt ággal üzemelő körforgalmú csomópontjaink közül egy darab külterületen, három pedig átmeneti zónában épült. Az egyetlen ötágú külterületi csomópontunk 2003 novemberéig négyágú csomópontként üzemelt.

A 7 csomóponti ággal Szombathely határában megépült körforgalmú csomópont jelenleg csak 6 ággal üzemel. A hetedik ág távlatban bevásárlóközpontoz fog vezetni.

## 2.2. A Vas megyei körforgalmú csomópontok baleset-elemző vizsgálatának összesítése

A hazai körforgalmú csomópontok elemzése után a Vas megyében megépült körforgalmú csomópontok baleseti helyzetét is minősítettem. A Vas megyei körforgalmú csomópontok balesetének vizsgálata a csomópont átépítés előtti és utáni időszakára terjedt ki. A kiválasztásnál szempont volt, hogy a csomópont és környezete ne változzon meg jelentősen, azaz összehasonlítható legyen az átépítés előtti és utáni állapot. A kiválasztásnál fontos volt, hogy az átépítés utáni időszak legalább három év legyen. E feltételeket figyelembe véve öt megyei körforgalmú csomópontot vizsgáltam.

A baleseti adatok a rendőrség feljegyzéseire, valamint a statisztikában szereplő adatokra támaszkodnak. A baleseti adatokat a KSH adatok alapján feltöltött WIN-BAL programmal kaptam meg.

A hagyományos csomópontok átépítése körforgalommal – a vizsgált időszakban – a személyi sérüléssel balesetek 70%-os, a halálos balesetek 100%-os csökkenését eredményezte.

A biztonság abban rejlik, hogy a geometria miatt a járművezető kénytelen a sebességét csökkenteni, ami ütközés esetén szintén baleseti kockázatot csökkentő tényező, hisz az ütközési energia a sebességgel négyzetes összefüggésben van. [8.]

Ezek alapján elmondhatjuk és a hazai, illetve megyei tapasztalatok is ezt bizonyítják, hogy a körforgalmú csomópontokban a halálos kimenetelű balesetek bekövetkezése szinte kizárt, a súlyos kimenetelű balesetek száma is lényegesen kevesebb, mint egyéb csomópont esetében.

## 3. A Vas megyei körforgalmú csomópontokban történt balesetek osztályozása baleset-típusonként

Vas megyében lakott területen kívül és az átmeneti zónában összesen 9 körforgalmú csomópont épült 2003-ig. A következőkben az itt bekövetkezett baleseteket vizsgálom. Megpróbálok rámutatni a legjellemzőbb baleseti konfliktusokkal az érintett körforgalmú csomópont konfliktushelyeire, illetve arra, hogy a baleseti konfliktusok bekövetkezése mire vezethető vissza.

A megvizsgált 9 körforgalmú csomópontban összesen 47 db baleset történt. A vizsgálat során 9 féle, jellemzően a körforgalomban előforduló baleset típust állapítottam meg, amelyeknek az eloszlása a következő:

• Körpálya elhagyás	8
• Körpályán való felborulás szabálytalanul megrakott teherautó estében	1
• Elválasztó szigetre ráfutás a belépéskor	2
• Körszigetbe behaladás	1
• Körpályán oldalirányú ütközés	3
• Utóléréses baleset	6
• Belépéskor a körpályán haladó jármű elsőbbségének a meg nem adása	12
• Kilépéskor oldalirányú ütközés	11
• Kerékpáros elütés a kihajtásnál	3

A következőkben megpróbálok meghatározni az egyes baleset-típusok bekövetkezését előidéző geometriai paraméterek határértékeit, a megvizsgált körforgalmú csomópontok és a bennük bekövetkezett balesetek ismeretében. [9.]

### 3.1. Körpálya elhagyás

A statisztikai értékelés során megállapítható, hogy a körpálya elhagyás miatt bekövetkezett 8 baleset közül 5 a jánosházi körforgalomban volt.

A körforgalomnak nagy hátránya, hogy a körpálya oldalesése, a pálya vízelvezetése érdekében kifelé lejt. Nedves időben vagy télen ez kimondottan előidézi a balesetet. Hozzájárulhat továbbá a túlságosan nagy belépési sugár.

A Jánosházán megépült körforgalomban bekövetkezett pályaelhagyások oka talán a szabálytalan (piskóta) geometria, illetve a nagy belépési ívsugár. A geometriából adódóan két helyen hosszabb egyenes szakasz is adódik, ahol nagyobb sebességek alakulnak ki.

Szombathelyen az átmeneti zónában a pályaelhagyások azért következtek be, mert a körforgalom érintett ága lakott területen kívüli, nagy ellenívben csatlakozik a csomópontba. Így az erről az ágról nagy sebességgel érkező gépjárművezetők nem észlelik kellő időben a körforgalmú csomópontot.

Tervezés szempontjából fontos, hogy kerüljük a nagy belépő sugarat, az ovális, nagy méretű körforgalom kialakítását külterületen. Átmeneti zónában minden esetben ajánlom a közvilágítás kiépítését. A közvilágítás nemcsak az éjszakai láthatóságot, hanem a nappali láthatóságot és a vonalvezetést is segíti. Külterületen és átmeneti zónában a körforgalmú csomópont külső sugarának a 25 méternél nagyobb értéket javaslok ( $R_k > 25$  m).

Üzemeltetés szempontjából a legfontosabb, hogy a körpályát tisztán kell tartani.

### 3.2. Körpályán való felborulás szabálytalanul megrakott teherautó estében

A tapasztalatok szerint a nagy belépési sugár, illetve a körpálya oldalesésének értéke a rosszul megrakott tehergépkocsi felborulását okozza.

A körpálya eredő esése oldalirányba véleményem szerint 2%-nál ne legyen nagyobb. Ennél magasabb érték fokozottabb balesetveszélyt jelent, ami borulást okoz külterületen, és különösen az átmeneti zónában. Nagyobb sugár esetén (35 m) az oldalesés javasolt értéke 1,5% legyen. Ez a határérték még nem okoz vízvezetési problémát.

### 3.3. Elválasztó szigetre való ráfutás a belépéskor

Ezt a balesetet többnyire az úttest szennyezettsége vagy a relatív gyorsajtás okozza. A gépjármű megcsúszik, a gépjárművezető elveszti uralmát a gépkocsi felett, és az elválasztó szigetnek ütközik.

### 3.4. Körszigetbe behaladás

Általában ott fordult elő, ahol a körforgalomba vezető ág vonalvezetése arra utal, hogy egyenesen folytatódik tovább. Ez „felbátorítja” a gépjárművezetőt a körforgalom nagy sebességgel való megközelítésére, aminek relatív gyorsajtás az eredménye. Ilyen esetekben a vezető vagy túl későn veszi észre a hirtelen irányváltást, vagy pedig hirtelen kormánymozdulattal korigálna, aminek kicsúszás a vége.

A középszigetet domborúan kell kialakítani úgy, hogy az átláthatóságot ne akadályozza. A baleset megelőzése érdekében javítani kell az éjszakai és a nappali felismerhetőséget közvilágítással, burkolati jelekkel, prizmákkal. A körforgalmú csomópont középső szigeten a betorkolással szemben nem szabad semmilyen tárgyat elhelyezni. Javaslok, hogy a középszigeten csak cserjéket, virágokat, törékeny anyagból készült tárgyakat lehessen elhelyezni. Ezzel is csökkenthető a bekövetkezett baleset súlyossága.

### 3.5. Körpályán oldalirányú ütközés

A kétsávos körforgalmak esetén fordul elő az oldalirányú ütközés a körpályán. A baleset elkerülése érdekében a kétsávos körforgalmú csomópontokat szabályos kör geometriával és szimmetrikusan csatlakozó ágakkal javasolt kialakítani. A csatlakozó ágak közti megfelelő távolság kialakításával tehető biztonságos a fonódás a sávváltási manőverekhez.

Javaslok, hogy a kétsávos körforgalmú csomópontoknál a kihajtó ágak közötti távolság min. 20 m legyen.

### 3.6. Utolérése baleset

A vizsgált Vas megyei körforgalmakban az utolérése balesetek forrása véleményem szerint az volt, hogy a külterületi ágakról nagy sebességgel érkező gépjárművek vezetői nem észlelték kellő időben a körforgalmú csomópontot. A gépjármű-vezetők figyelmét egy esetben a sok reklámtábla is elvonhatja.

Javaslatom az, hogy a reklámtáblák és a telephelyre utaló táblák elhelyezését külterületen, illetve átmeneti zónában a körforgalmú csomóponttól 200 méteren belül jogszabályokkal tiltsák meg, esetleg a kihelyezések számát limitálják.

Nagyobb forgalom esetén szintén bekövetkezik ez a baleset-típus. Ezért a körforgalmat kapacitás szempontjából úgy kell méretezni, hogy ne alakuljon ki túlságosan hosszú járműoszlop. Nem szabad a járművezetőket hirtelen fékezésre kényszeríteni, ezt a megfelelő felismerhetőséggel kell elérni.

### 3.7. Belépéskor a körpályán haladó jármű elsőbbségének a meg nem adása

Vizsgálataim alapján elmondható, hogy a körforgalmú csomópontokban ez a baleset volt a leggyakoribb. A balesetek nagy tanulsága, hogy kerülni kell a nagysugarú betorkollást és az érintőleges csatlakozást. Az utóbbi esetben túlságosan hegyesszögben kell a gépjárműből balra kitekinteni, ilyenkor nagy a be nem látható holttér is. Nagy körforgalmaknál biztosítani kell a megfelelő láthatóságot.

Külterületi és átmeneti zónában lévő körforgalmaknál az útvonal képének megfelelő megszakításával a csomópont felismerhetőségét nagymértékben hangsúlyozni kell. A nagy sebességgel közlekedő járművek miatt bekövetkezett baleseteket nagyban befolyásolja a közlekedési morál, a járművezetők türelmetlensége.

### 3.8. Kilépéskor oldalirányú ütközés

A kétsávos körforgalmak egyik jellemző balesete, mint azt a vizsgálatom is mutatja.

A megvizsgált kétsávos, ovális körpálya kialakítású körforgalomban a becsatlakozó ágak a két szabályos körívben helyezkednek el, így a csomóponti ágak közel kerültek egymáshoz. E kialakítás miatt a ki- és becsatlakozási, sávváltási manőverekhez kisebb a hely, ami miatt bekövetkeznek a balesetek. Tipikus konfliktushelyzet, hogy a belső sávból a kihaladni szándékozó jármű nem vesz tudomást a külső sávon továbbhaladni szándékozó másik járműről, vagy későn észleli azt és hirtelen sávváltással elé hajt.

A tanulság az, hogy a körpályán két csatlakozás között hagyjunk megfelelő hosszúságú szakaszt a fonódás biztonságos végrehajtásához. Javasolom a kétsávos körforgalmú csomópontoknál a kihajtó ágak közötti min. 20 m távolság kialakítását. Ez természetesen a csomópont kiterjedésének a növekedését okozza.

Kis külső sugár esetén kétsávos körforgalmú csomópont nem alakítható ki. Javaslatom szerint min.  $R_k = 40$  (35) m külső sugár esetén lenne létesíthető csak kétsávos körforgalom. Ennél kisebb  $R_k$  esetén nem tud kialakulni a kétsávos közlekedés, továbbra is egy sávként működik a csomópont, így nem jelent a kialakítás kapacitás-többletet. A kis  $R_k$  a forgalombiztonságra nézve egyes sávváltáshoz, különösen kilépéskor előnytelen, nem biztonságos (főként a tehérgépkocsi közlekedés esetében).

Nagyobb méretű jármű fordulási sugarát a kis külső sugarú kétsávos körforgalom nem teszi lehetővé, ezért balesetveszélyes.

A geometriai kialakítás mellett nagyon fontos a jogszabályi háttér is a kétsávos körpályán való közlekedésre vonatkozóan. A KRESZ-ben kell megfogalmaznunk a személygépkocsinál nagyobb gépjármű közlekedését a körpályán, ahol megtiltánánk e járműveknek a körpályán való előzést.

### 3.9. Kerékpáros elütés a kihajtásnál

Viszonylag ritka baleset. Előfordulását a hibás tervezés is okozhatja. A vizsgált Vas megyei körforgalmú csomópontban a kerékpáros elütések a kihajtó ágon történtek. A balesetek oka az, hogy a kihajtó ágon a kicsatlakozás és a kerékpárút átvezetése között kevés a felállási hely, és nehezen észrevehető a csatlakozó kerékpárút.

Külterületen és az átmeneti zónában épített körforgalmú csomópontban a kerékpáros átvezetés a kör külső szélétől 5 méterre helyezhető el. Az elválasztó szigeten a kerékpáros és a gyalogos átvezetés min. 2 m szélességgel biztonságos.

## 4. A megállapított határértékek összehasonlítása az érvényes tervezési szabályzat előírásaival

A körforgalmú csomópontok vizsgálata során célom volt, hogy az egyes baleseti típusok bekövetkezését előidéző geometriai paraméterek határértékeit meghatározzam. A paramétereket a következőkben a jelenleg érvényben lévő ÚT 2-1.206 „Körforgalmú csomópontok tervezése” című Útügyi Műszaki Előírásban lévő értékekkel hasonlítom össze. Itt szeretnék rámutatni a jelenlegi tervezési előírástól való esetleges eltérő javaslataimra.

### 4.1. A külső sugár nagysága

Nagyon fontos eltérés volt a régi útmutatókhoz képest, hogy a jelenlegi tervezési előírásban lényegesen csökkentek a méretek. Jelenleg a külterületen tervezendő nagy körforgalom ajánlott külső sugár értéke  $R_k > 15$  m.

Az elhelyezkedés szerinti felosztást nézve a következő értékeket kell figyelembe vennünk:

- > főutak csomópontjaiban:  $R_k \geq 20$  m

- > mellékutak csomópontjaiban:  $15 < R_k \leq 20$  m
- > négyenél több becsatlakozó ág esetén:  $R_k > 25$  m

A baleset elemző vizsgálatok után javasolom külterületen és átmeneti zónában a körforgalmú csomópontok külső sugarának a 25 méternél nagyobb értéket bevezetni ( $R_k > 25$  m).

### 4.2. A csomóponti ágak elrendezése

A jelenlegi szabályozás szerint a csomóponti ágakat a körpálya mentén lehetőség szerint egyenletesen kell elosztani úgy, hogy az ágak közötti távolság közel azonos legyen.

Véleményem szerint kétsávos körpályán a két csatlakozás között hagyjunk megfelelő hosszúságú szakaszt a biztonságos fonódáshoz. Ezért javasolom, hogy a tervezési előírásba kerüljön be, hogy a kétsávos körforgalmú csomópontnál a kihajtó ágak közötti távolság min. 20 m legyen.

### 4.3. Középsziget

A tervezési előírás kategorikusan kijelenti, hogy a középsziget alakja lakott területen kívüli körforgalmú csomópontban minden esetben kör legyen. Ezzel teljes mértékben egyetértek.

Pályaelhagyások miatt kerülendő külterületen és átmeneti zónában a szabálytalan geometria. Kerüljük az ovális körforgalmak alkalmazását külterületen és az átmeneti zónában. A kétsávos körforgalmú csomópontokat szabályos kör geometriával és szimmetrikus elrendezéssel javasolom kialakítani.

### 4.4. Körpálya

A jelenlegi szabályozás szerint két forgalmi sávos körpálya csak 8 m feletti szélesség és  $R_k > 30$  m külső sugárérték esetén létesíthető.

A vizsgálatom során megállapítható, hogy kis külső sugár ( $R_k$ ) esetén két sávos körforgalmú csomópont nem alakítható ki. Ezért javaslatom szerint min.  $R_k = 40$  (35) m külső sugár esetén lehetne csak kétsávos körforgalmat létesíteni.

### 4.5. A körpálya oldalesése

A műszaki előírás szerint a körpálya oldalesése 1-2%, kivételes esetben 3% lehet a körpálya külső széle felé.

Ezt a megfogalmazást – véleményem szerint – úgy kellene módosítani, hogy a körpálya eredő esése oldalirányba 2%-nál ne legyen nagyobb külterületen és különösen az átmeneti zónában. Nagyobb külső sugár esetén ( $R_k > 35$  m) az oldalesés javasolt értéke 1,5% legyen. Ez a határérték még nem okoz vízvezetési problémát.

### 4.6. Felismerhetőség, láthatóság

A nagy sebességgel érkező gépjárművek vezetői nem észlelik kellő időben a körforgalmú csomópontot. A baleset megelőzése érdekében javítani kell az éjszakai és a nappali felismerhetőséget, így teljes mértékben egyetértek a jelenleg érvényben lévő előírással, miszerint a körforgalmú csomópont felismerhetőségét

– a megfelelő geometriai kialakításon túl – növénytelepítéssel célszerű növelni. A közép-szigetet úgy kell kialakítani, hogy takarja el a körpálya felé érkező járművezető elől az út távolabbi képét.

Lakott területen kívül a jármű feletti uralom elvesztése következtében a pályaelhagyás miatt a közép-szigeten semmilyen szilárd akadály elhelyezését jogosan nem támogatja a tervezési előírás. Ez a tiltás nem vonatkozik veszélytelen elemek telepítésére (cserjék, virágok, törékeny anyagból készült és kis tömegű szobrok stb.).

#### 4.7. Kerékpárosok

A jelenlegi tervezési útmutatóban rögzítettek szerint lakott területen belül a kerékpáros átvezetésnél a kerékpárút körpálya felőli széle és a körpálya külső széle között 4-5 méteres távolságot kell hagyni. Az átvezetés helyén az elválasztó sziget legkisebb szélessége legalább 2 m legyen.

A balesetek vizsgálata alapján azt javaslom, hogy külterületen és átmeneti zónában épülő körforgalmú csomópontban a kerékpáros átvezetést a kör külső szélétől min. 5 méterre helyezzük.

#### 4.8. Megvilágítás

Lakott területen kívüli körforgalmú csomópontot általában nem kell megvilágítani, csak abban az esetben, ha:

- a csomóponti ágak közül bármelyik megvilágított,
- a körforgalmú csomópont közelében (200 méteren belül) megvilágított terület található,
- a körforgalomban kijelölt gyalogos-átkelőhely és/vagy kerékpáros átvezetés van.

Ezt annyival javaslom kiegészíteni, hogy átmeneti zónában minden esetben ajánlott legyen a közvilágítás kiépítése.

#### 5. Következtetések, ajánlások

Számos külföldi és hazai tapasztalat, műszaki tervezési előírás változtatás és fejlesztés ellenére még mindig vannak hiányosságok, hibák a körforgalmú csomópontok kialakításában. Hiányosságaink mind műszaki, mind jogi téren megmutatkoznak.

Meglátásom szerint, a műszaki tervezési előírás újabb felülvizsgálata és változtatása lenne szükséges. Nagy figyelmet kellene fordítanunk a kétsávos körforgalmú csomópontok kialakítására, ugyanis a nagy méretű járművek kimondottan a kétsávos körforgalomban okoznak gondot. A körforgalomban haladó nagy méretű járművek úgy alakítják járóvonalukat, hogy az

a szomszédos sáv rovására megy. Itt kell megjegyeznünk, hogy konfliktustechnikai vizsgálatokat kellene végeznünk, amely vizsgálatokban a nagy méretű gépjárművek (tehergépkocsi, kamion, autóbusz) is részt vennének. A vizsgálatokból tanulságokat lehetne levonni a két forgalmi sávú körforgalommal kapcsolatban.

Fontos lenne a jogszabályi háttér megteremtése is a kétsávos körpályán való közlekedésre. A KRESZ-ben kellene megfogalmaznunk a személygépkocsinál nagyobb gépjárművek közlekedését a körpályán, ahol megtiltanánk a járműveknek a körpályán való előzést.

A KRESZ-ben kellene szabályoznunk továbbá a körforgalmú csomópontban az irányjelzés használatát (mind belépésnél, mind kilépésnél szabályozni az indexelés kérdését), főként a kétsávos körforgalmú csomópontok esetében.

Szükségesnek látom jogszabályokkal megtiltani, esetleg limitálni a reklámtáblák és a telephelyre utaló táblák elhelyezését külterületen és átmeneti zónában a körforgalmú csomóponttól 200 méteren belül.

A meglévő csomópontokról, különleges kialakításokról és a kétsávos körforgalmakról tanulmányokat, vizsgálatokat kellene készítenünk.

#### Irodalom

- [1] Dr. Bényei A., Golarits P.: Első eredmények a hazai körforgalmú és hagyományos kialakítású csomópontok összehasonlítására végzett vizsgálatokból. Közlekedésképzési és Mélyépítés-tudományi Szemle, 1994.
- [2] Dr. Bényei A.: A körforgalmú csomópont mint a baleseti gócpontok felszámolásának hatékony eszköze. Budapest, 2001.
- [3] Dr. Fi István: Forgalmi tervezés technika menedzsment. Műegyetem Kiadó, Budapest, 2000.
- [4] Kovács Jenő: Történelmi áttekintés a magyarországi körforgalmú csomópontok kialakulásáról. Bükfürdő, 2003.
- [5] Tóthné Temesi Kinga: Körforgalmi rend a 8–84. számú főutak csomópontjában. Közút, 1995.
- [6] Tóthné Temesi Kinga: Körforgalmú csomópontok. Siófok, 2001.
- [7] Tóthné Temesi Kinga: Körforgalom? Biztonság?! Bükfürdő, 2002.
- [8] Tóthné Temesi Kinga: Körforgalmú csomópontok alkalmazása, különös tekintettel a kiválasztás szempontjaira. Bükfürdő, 2003.
- [9] ÚT 2-1.206 Körforgalmú csomópontok tervezése. Budapest, 2001.

## Summary

### Analysis of roundabout geometry from the safety view

Based on the analysis of typical accidents at 20 roundabouts the paper gives recommendations to improve the geometric design guidelines.



# Az útdíjas autópályák és a jó minőségű, ingyenes alternatív útvonalak kapcsolata

## A portugál eset

Prof. Jose Manuel Viegas<sup>1</sup>

### 1. Bevezetés

A 20. század második felében számos európai országban kezdtek útdíjat szedni az autópályák használatáért. A díjszedés mellett alapvetően két meggyőző érv szól: egyrészt az autópálya magasabb színvonalú kategóriába tartozó létesítmény, mint az úthálózat többi eleme, ezért használatáért természetes, hogy fizetni kell, másrészt az állam ezt a magasabb színvonalú szolgáltatást már azelőtt megteremtette, minthogy azt a közpénzek terhére egyébként megtehetette volna [1].

Az első autópályák főként sugárirányban, a külvárosok felé haladva épültek, majd később a nagyobb városok közötti kapcsolatként jelentek meg. Már korábban, az autópályák megjelenése előtt léteztek jó minőségű, szabad hozzáférésű országutak, ezeken azonban idővel kapacitáshiány jelentkezett, és már nem tették lehetővé a megnövekedett forgalom gyors lefolyását. Az állam tehát az autópályák megépítésével, nemcsak jobb minőséget, hanem nagyobb kapacitást is teremtett. Mint hogy a régi országos közutak kapacitása csökkent, az autósok eldönthették, hogy az autópályát választják-e díjért, vagy megfelelő minőségű alternatív útvonalat, ingyen. Később, a gyorsabb eljutás érdekében az autópályák már akkor is épültek, ha a helyettesített közútnak nem voltak kapacitásbeli problémái. Amikor az alternatív útvonalak minősége elfogadhatatlanná vált, ismét napirendre került „a megfelelő minőségű alternatív útvonalakhoz való szabad hozzáférés” kérdése [1].

A vita célja az volt, hogy törvényi keretek között elfogadtassák az autópályák használatáért való díjszedés bevezetésének létjogosultságát. Bár végül nem iktatták törvénybe, a díjszedés szabályozó ereje felismerhető, és a politikusok nem is vonják kétségbe hatását. Amennyiben az alternatív útvonal minősége nem bizonyul megfelelőnek, az állam vagy megfelelő minőségűre fejleszti az adott útvonalat vagy bizonyos szakaszon – legalább a helyi forgalomnak – díjmentessé teszi az autópálya használatát [1].

### 2. A módszer

A továbbiakban ennek a kérdésnek egy Portugáliában kidolgozott megoldását mutatjuk be. Portugáliában a kormányváltást követően változás állt be a politikában. A kormány arra törekedett, hogy mintegy 1000 km kiterjedésben az árnyékdíjas útdíj rendszer helyett a direkt útdíj szedést vezessék be. Ezeknek az autópályáknak némelyike ritkán lakott területek mentén épült,

ahol az egyéb utak minősége kifogásolható volt. Ezen a területen tehát a jó minőségű, szabad hozzáférésű alternatív útvonal léte nyilvánvalóan lényeges, megoldásra váró gondná nőtte ki magát [1].

A kérdés önmagában azonban nem az alternatív útvonal minősége az autópálya minden egyes szakaszához viszonyítva, hanem annak a legjobb, ingyenes útvonalnak a színvonala, amelyet az egyes gépjármű-vezetők úti céljuk eléréséhez igénybe vesznek. Ezenkívül az „elfogadható minőség” definíciója régióként is eltérő kell hogy legyen, mivel a minőséget erőteljesen befolyásolja a táj változékonysága, tagoltsága (hegyek, tavak, folyók stb.). Mindent egybevéve, ha ki kellene választani egy tulajdonságot az útvonal minőségének a jellemzésére, akkor a legcélszerűbb választásnak az átlagos utazási sebesség tűnik, mivel ebben a paraméterben más változók (burkolat, vízelvezetés, kapacitás, a keresztmetszet tulajdonságai stb.) hatásai is megjelennek [2].

Az alternatív útvonal fogalmának és minőségének meghatározása nem egyértelmű, mivel figyelembe kell venni az autópályák felhajtó és lehajtó csomópontjait, továbbá azt a tényt, hogy nem minden autópálya mellett húzódik vele párhuzamosan közút. Ezért legelőször azt kellene rögzíteni, hogy milyen összehasonlítás képezze a minőség meghatározás, illetve a későbbiekben az útdíj szabályozás alapját [2].

Légvonalban 15-40 km távolságban fekvő önkormányzatok közti utazásokat választottak, így elkerülve a helyi utazásokat (amelyeknél az autópálya használata fel sem merül) és a hosszú távú utazásokat (amelyek esetében az alternatív útvonal használatának gondolata nem merül fel). Kulcsfontosságú döntés volt, hogy az összehasonlítást nem lehet az „útvonal autópályán” és „útvonal autópálya nélkül”-i esetekre elvégezni, sokkal inkább az ugyanabban a régióban az egyenrangú célforgalmi útvonalak összehasonlítására kell törekedni. Csábítónak tűnhet az az egyszerű megoldás, hogy A és B városok között összehasonlítsuk az „autópályán” és a „nem autópályán” lezajló utazásokat, de ha sajnálatos módon A és C városok között nincsen autópálya, nekik nincs lehetőségük választásra, tehát a két eset nem hasonlítható össze. Így az összehasonlítás az egyes régiókban a következő módon történik. A és B, valamint a régió további városai között csak a „nem autópályán” történő utazásokat vizsgáljuk. Ezt két igény támasztja alá: egyrészt ugyanannak a mintának az alapján kell az összehasonlítást elvégezni, hogy tisztán érzékelhető legyen: az adott (alternatív) útvonal – autópálya nélkül – valóban rosszabb minőségű, mint a régió más kapcsolatai. Másodszor pedig el kell kerülni, hogy ha egy autópályát megépítenek, akkor a vele „párhuza-

<sup>1</sup> Egyetemi tanár, okl. építőmérnök, CESUR-Instituto Superior Técnico, Portugália

Fordította: Devecseri Gabriella okl. építőmérnök, BME Területfejlesztési Kutatási Központ

mos”, ingyenes, útvonal színvonalát is javítani kelljen, csak azért, hogy ez csökkentse a jelentős eltérést az autópálya és az alternatív útvonal minősége között [2].

### 3. A kapcsolatok minősége

Mivel a kapcsolatok minőségét az utazási sebességgel szerettük volna kifejezni, ezért bevezettük az egyenértékű légvonal sebesség fogalmát (**Equivalent Straight-line Speed**, a továbbiakban **ESS**), melyet a következőképp definiáltunk [2]:

$$ESS(i, j) = \frac{SD(i, j)}{t(i, j)}$$

ahol **SD**(*i, j*) a légvonalban mért távolság (**S**traight-**l**ine **D**istance) a régió két városa, *i* és *j* között, km-ben kifejezve; *t*(*i, j*) pedig a két város között egy átlagos személygépkocsival megtett legrövidebb utazási idő [2].

Mivel a cél az, hogy különbséget tegyünk az autópálya használatával és az anélküli utazások között, ezért kétfajta úthálózatot vettünk figyelembe: egyenként meghatároztuk az **ESST**(*i, j*) és az **ESSF**(*i, j*) értékeket, ahol *T* a fizető-autópályát is magába foglaló úthálózatra vonatkozik (**T**olled motorways), *F* pedig a fizető-autópályák nélküli úthálózatra (**F**ree access roads). Természetesen **SD**(*i, j*) értékei mindkét esetben megegyeznek [2].

Mint ahogy azt már korábban említettük, a számításokat minden kiválasztott *i* város és a tőle légvonalban 15-40 km-re levő *j* partnerei között végeztük el. Minden ilyen kettős kapcsolat **ESSF**(*i, j*) értékét összehasonlítottuk a regionális átlag egyenértékkel [2].

A regionális átlag egyenérték légvonal sebességet úgy határozzuk meg, hogy minden egyes *i* város  $\Omega$  környezetében – amely jelen esetben 15-40 km sugárú környezetet jelent – előállítják az **ESSF** értékek (népesség – **P**opulation – szerinti) súlyozott átlagát [2].

$$ESSF_{ref}(i) = \frac{\sum_{j=\Omega(i)} P(j) \cdot ESSF(i, j)}{\sum_{j=\Omega(i)} P(j)}$$

Habár *j*, *i* környezetéhez tartozik [ $\Omega(i)$ ] és *i*, *j* környezetéhez tartozik [ $\Omega(j)$ ], a két  $\Omega$  környezet nem azonos, mivel mindegyiknek más a centruma. Mivel a két „regionális” átlag egymással nem azonos, a régióra jellemző referencia értéknek [**ESSF\_ref**(*i, j*)] egyszerűen az előbb meghatározott két regionális átlag érték átlagát tekintjük. Ez az eljárás egyfajta szimmetriát eredményez a referencia értékekben, amely a modell szempontjából lényeges tulajdonság, ugyanis értelmetlen lenne az *i* és a *j* közötti kapcsolatot úgy osztályozni, hogy az az egyik irányban megfelel az autópálya alternatívájának, az ellenkező irányban viszont nem, csak azért, mert *i* és *j* környezete nem ugyanaz [2].

A második feladat a minőségkülönbség határértékének a meghatározása, azaz hogy két város között mennyi az az elfogadható **ESSF** érték (az **ESSF\_ref**-hez viszonyítva), amelynél az alternatív útvonal minősége még megfelelőnek mondható. A határérték megválasztása fontos kérdés, mert a választásnak jelentős gazdasági hatása lehet a be nem szedett útdíjak

mennyisége miatt. Ezért a határértéket érzékenység vizsgálat után lehet meghatározni. Az értékelést a következő kifejezés alapján végeztük [2]:

$$\alpha = 1 - \frac{ESSF(i, j)}{ESSF_{ref}(i, j)}$$

ahol  $\alpha$ -t a következő határértékekkel hasonlítottuk össze: 20%, 30%, 40%, 50%. Nyilvánvaló, minél kisebb a határérték, annál több az elfogadhatatlan minőség. Így például az első esetben, ha  $\alpha$ -ra 20% fölérték jönne ki (pl. 23%) az (*i, j*) kapcsolatra, akkor igazolva lenne, hogy a kapcsolat elfogadhatatlan minőségű, tehát indokoltá válhat bizonyos mértékű útdíj kedvezmény a két város között közlekedőknek [2].

### 4. Az útdíj szabályozás módja

Igazságtalan lenne, ha azt a következtetést vonnánk le, hogy a gépjárművezetőt megilleti az autópálya díjmentes használata, amennyiben nem megfelelő minőségű az ingyenes közúti kapcsolat. Ugyanis a régióra jellemző sebességnél jóval nagyobb sebesség lenne elérhető ingyen [2].

Tehát a „kedvezményre jogosultság” vizsgálata után újabb tanulmányt kell készíteni a „kedvezmény mértékére” vonatkozóan. Ez a következő kifejezés alapján történhet [2]:

$$\beta = \frac{ESST(i, j)}{ESSF_{ref}(i, j)} - 1$$

Amennyiben  $\beta$   $\alpha$ -nál nagyobb értéket vett fel, akkor az autópálya díjának 50%-os csökkentése, ha kisebb, 100%-os csökkentése vált indokoltá [2].

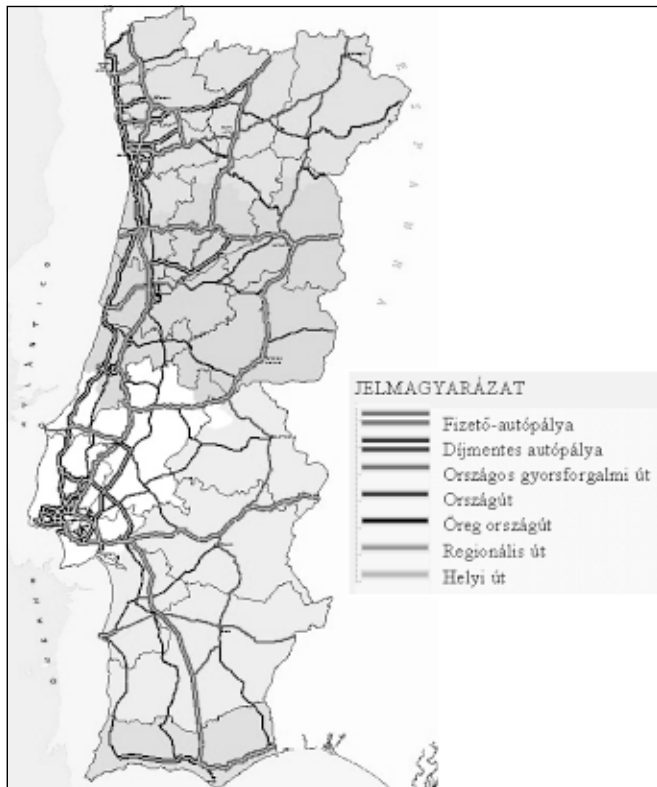
A harmadik felvetődő kérdés a különféle kedvezmények ésszerű alkalmazása. Az ugyanis lehetetlen, hogy a kedvezményeket az egyes utazások elejétől a végéig alkalmazzák, mivel az útdíj beszedésénél nem lehet tudni, hogy melyik gépjárművezető hol kezdte meg az utazását, de legfőképp, hogy hol fogja befejezni. Ehelyett ugyanazt a kedvezményt kellene alkalmazni mindenkire, aki az autópálya ugyanazon szakaszát veszi igénybe [2].

Azonban ez a szabály félreérthető, mivel lehetnek olyan (*i, j*) párok, amelyek az autópályának ugyanazt a szakaszát veszik igénybe, de az őket megillető kedvezmény mértéke eltérő. Ezekben az esetekben ahhoz az (*i, j*) párhoz tartozó kedvezményt kell érvényesíteni, amelynél a legrövidebb a távolságok összege a városok és az autópálya (bejárata, illetve kijárata) között [2].

### 5. Eredmények

Az előzőekben bemutatott vizsgálatot a teljes portugál úthálózatra (2560 km autópályára) elvégezték [2]. Az 1. ábrán látható a teljes portugál úthálózat térképe [3].

Mivel a probléma az árnyékdíjas rendszer megszüntetéséért vetődött fel, a számításokat a hagyományos fizető-autópályákra és az árnyékdíjas szakaszokra külön-külön végezték el, majd külön-külön összegezték az eredményeket (1. táblázat) [2].



1. ábra: Portugália úthálózata

Ezeknek az eredményeknek a tükrében nyilvánvalóvá vált, hogy a 20%-os, sőt még a 30%-os határérték is túlságosan szigorú, különösképp figyelembe véve azt a tényt, hogy voltak több mint 20 évre szóló koncessziós szerződések, melyekben biztosították a koncesszió pénzügyi mérlegét [2].

Habár matematikailag megfelelő az 50%-os határérték, hatása valószínűleg túlságosan korlátozó erejű lenne, hiszen ha megfigyeljük a táblázatot, jelenleg a hagyományos autópálya hálózat egyetlen km-re sem igényelne korlátozást, és az árnyékdíjas autópályán is csak 20 km-en lenne rá szükség [2].

A legigazságosabb és legjobb választásnak a 40%-os határérték tűnik [2].

Fontos, hogy a kedvezmények alkalmazása ne váljon rendszerré, inkább kivételes esetek legyenek, azaz az autópálya teljes hosszához képest a kedvezményes szakaszok hossza határozottan rövidebb legyen [2].

## 6. Következtetések

Látható, hogy ez a téma egyértelműen kezelhető. Olyan eredményekhez juthatunk, amelyek pontosan nyomon követhetők. Az eredmények térképeken megjeleníthe-

tők. Külön ábrázolhatók az autópályáknak azok a szakaszai, amelyeken mérsékelni kell az útdíjat, továbbá táblázatos formában ábrázolható például a díjmentes (vagy részlegesen fizető) autópálya becsült évi bevételcsökkenése. Mivel a kedvezmények a rossz minőségű utak miatt vehetők igénybe, egyszerű megmondani az ebből levonható politikai következményeket, azaz nem vonható kétségbe, hogy költeni kell az utak fejlesztésére a regionális fejlődés érdekében [1].

A nemzeti és az önkormányzati képviselők közti párharcnak köszönhetően a téma jelenleg nem aktuális, de a módszer hatékonysága bebizonyosodott. Az eredmények a kormány számára készített jelentésekben várnak [2].

A 2. táblázat Portugália fizető autópályáinak hosszát tünteti fel. Érdemes szem előtt tartani azt a tényt, hogy Portugália 1985-ben vált az európai közösség tagjává.

2. táblázat

A portugál fizető autópályák hossza

Év	Útdíjas autópályák, az utak hossza [km]
~1989	184 <sup>1</sup>
1993	425,2 <sup>1</sup>
1997	602,7 <sup>1</sup>
2000	n.a.
2004	2560

<sup>1</sup> Az adat Bachmann Dóra – Orosz Csaba: A regionális fejlődés és az úthasználati díjak néhány összefüggése nemzetközi összehasonlításban című munkájából származik

## Irodalom

- [1] Jose Manuel Viegas: Tolloed Motorways and the Guarantee of a Free Access Road of Good Quality: Policy Review and Empirical Examination (Útdíjas autópályák és a jó minőségű ingyenes közutak garanciája: szabályozás, áttekintés és empirikus vizsgálat) 10 th World Conference on Transport Research, Istanbul, July 2004, Abstract Book II p. 1100–1101.
- [2] Jose Manuel Viegas: Tolloed Motorways and the Guarantee of a Free Access Road of Good Quality: Policy Review and Empirical Examination (Útdíjas autópályák és a jó minőségű ingyenes közutak garanciája: szabályozás, áttekintés és empirikus vizsgálat) 10 th World Conference on Transport Research, Istanbul, July 2004, Fullpaper Nr.1625 p. 1–6.
- [3] <http://www.iestradas.pt/prn2000/interPRN/index.html>

1. táblázat

A számítások összefoglalása

	Hossz km	A kedvezményes szakaszok hossza km-ben				A kedvezményes szakaszok aránya a teljes hálózathoz képest %-ban			
		$\alpha=20\%$	$\alpha=30\%$	$\alpha=40\%$	$\alpha=50\%$	$\alpha=20\%$	$\alpha=30\%$	$\alpha=40\%$	$\alpha=50\%$
Hagyományos autópályák esetén	1490	590	120	50	0	40%	8%	3%	0%
Árnyékdíjas autópályák esetén	1070	630	360	150	20	59%	34%	14%	2%
Összesen	2560	1220	480	200	20	48%	19%	8%	0,8%