

## **Építőmérnöki Kar a Kutatóegyetemért**

Budapest, 2011

Kiadja az Építőmérnöki Kar dékánja

ISBN 978-963-313-042-1

Készült az Asszisztencia gondozásában

A fedlapot készítette: Szakmány György

Terjedelem 118 oldal

Nyomta és kötötte: Pannon Print

# KARI TÁMOP KUTATÁSOK HÁTTERE – ÖSSZEFOGLALÓ

Lovas Antal  
Dékáni Hivatal  
alovas@mail.bme.hu

Dunai László  
Hidak és Szerkezetek Tanszék  
ldunai@epito.bme.hu

Barsi Árpád  
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék  
barasi@eik.bme.hu

Kiss Rita  
Hidak és Szerkezetek Tanszék  
kiss@vbt.bme.hu

## **Kivonat**

Acikkben összefoglaljuk az Építőmérnöki Kar a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt keretében végzett tevékenységét. Bemutatjuk a kutatási területeket, amelyen a kari kollégák dolgoznak, ismertetjük a kutatások anyagi és személyi hátterét, illetve a projekt keretében végrehajtott infrastrukturális fejlesztéseket.

## **Kulcsszavak**

TÁMOP, Építőmérnöki Kar, 2010-2012

## **1. Bevezetés**

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem 2010. április 16-án elnyerte a kutatóegyetemi címet. A pályázathoz kapcsolódóan a Támop 4-2-1/B-09-11 KMR támogatás keretében kutatóegyetemi programot hirdetett meg. A projekt elnökségét Péceli Gábor, rektor, Stépán Gábor, a Gépészmérnöki Kar dékánja és Vajta László, a Villamosmérnöki és Informatikai Kar dékánja alkotja. A projektet Kovács Kálmán, igazgató és Tömösközi Sándor, szakmai felelős menedzseli. A projekt adminisztrálása az Egyesült Innovációs és Tudásközpontoz tartozik, az Építőmérnöki Kart érintő adminisztrációs tevékenységet Vezsenyi Krisztina (személyi ügyek), Molnár Simon (személyi ügyek), Jenei Balázs (beszerzések), Kiss Andrea (utazások), Horváth Andrea (gazdasági ügyek) és Máté Mária (szakmai beszámolók) végzi.

A kari kutatásokat Lovas Antal dékán és Dunai László kari felelős, valamint Pusztai József ERFA felelős fogja össze. A kari feladatok koordinálásában és adminisztrálásában kari szinten Barsi Árpád, Kiss Rita, Kovács Artúr (Marianne), tanszéki szinteken a tanszéki felelősök (Bojtár Imre, Clement Adrienne, Huszák Tamás, Kiss Rita, Lovas Tamás, Rózsa Szabolcs, Szabó Kálmán Gábor, Tóth Elek, Török Ákos és Ungvárai Ádám) vesznek részt.

## 2. Kutatási területek és témák

A kutatóegyetemi programnak öt kiemelt kutatási területe, alprojektje van (KKT):

- Fenntartható energia (FE),
- Járműtechnika, közlekedés, logisztika (JKL),
- Biotechnológia, egészség és környezetvédelem (BEK),
- Intelligens környezetek és technológiák (IKT),
- Nanofizika, nanotechnológia és anyagtudomány (NNA).

Az Építőmérnöki Kar az utolsó KKT tudományos munkájához nem kapcsolódott, a többi négy KKT tudományos kutatásaiban két projekt vezetésével és 15 témával vesz részt (1. táblázat).

A kiemelt kutatási területek (vertikális projektek) mellett az intézményi együttműködés fórumai a horizontális munkacsoportok, amelyek elsődleges feladata a karok tapasztalatainak összegyűjtése, feldolgozása, fejlesztési javaslatok kidolgozása. Minden kar egy-egy munkacsoportot koordinál, az Építőmérnöki Kar az Infrastruktúra fejlesztés és megjelenítése címűt. Minden munkacsoportba tagot delegáltunk, akik annak a munkacsoportnak a tevékenységében táblázatok összeállításával, kari felmérések koordinálásával vesznek részt (2. táblázat).

<b>Fenntartható energia (Gróf Gyula)</b>		
<i>FE-P1</i>	<i>Épületenergia</i>	
FE-P1-T5	Új és régi épületek, épületszerkezetek teljes körű hő- és nedvességttechnikai meghatározása, életciklus analízis	Tóth Elek
<i>FE-P4</i>	<i>Nukleáris energia</i>	
FE-P4-T3	Bátaapáti tároló közetkörnyezeti vizsgálatai	Török Ákos
<i>FE-P5</i>	<i>Megújuló energiaforrások</i>	
FE-P5-T4	Új generációs szélenergiák tartószerkezetének tervezése	Dunai László
<i>FE-P10</i>	<i>Energiaforrások értékelése</i>	
FE-P10-T3	Folyami hőcsővák hőkamerás és digitális képfeldolgozós laboratóriumi kisminta-vizsgálata, különös tekintettel a folyami duzzasztások és folyószabályozások hatására	Szabó Kálmán Gábor
<b>Járműtechnika, közlekedés és logisztika (Varga István)</b>		
<i>JKL-P4</i>	<i>Közúti közlekedési hálózatok intelligens irányítása</i>	
JKL-P4-T5	Műholdas technológiák a közlekedésbiztonság növelésére	Lovas Tamás
<i>JKL-P6</i>	<i>Közúti közlekedési modellek és mérési módszerek fejlesztése</i>	Bocz Péter
JKL-P6-T3	Önreprodukciós úthálózati forgalmi modellek kidolgozása fejlesztések rangsorolásához	Fi István
<b>Biotechnológia, egészség- és környezetvédelem (Szarka András)</b>		
<i>BEK-P4</i>	<i>Környezetkímélő technológiák (környezetterhelés csökkentése, szennyezés megelőzése)</i>	
BEK-P4-T1	Környezetbarát anyagok és technológiák infrastruktúra műtárgyak építésénél	Farkas György
BEK-P5	Környezeti károk helyreállítása, szennyvíztisztítás	
BEK-P5-T1	Pelyhes szerkezetű lebegőanyagok leválasztási hatékonyságának növelése mágneses erőterrel mozgatott nano-részecskékkel	Buzás Kálmán
BEK-P5-T2	Csapadékvízzel közvetett antropogén anyagáramok okozta környezetterhelés és a csapadékvíz hasznosítás feltételei városi környezetben	Clement Adrienne
BEK-P5-T3	Légszennyezés hatása épített kulturális örökségünkre	Török Ákos
<i>BEK-P7</i>	<i>Mérnöki módszerek a gyógyászatban és az életvitel támogatásában</i>	
BEK-P7-T2	Emberi szervrendszerek numerikus biomechanikai szimulációi	Bojtár Imre
BEK-P7-T3	Emberi gerinc műtéti és konzervatív kezelés hatására lejátszódó mechanikai változásának numerikus vizsgálata	Kurutzné Kovács Márta
BEK-P7-T7	Ízületi protézis beültetés hatása a mozgásra	Kiss Rita
<b>Intelligens környezetek és e-technológiák (Charaf Hassan)</b>		
<i>IKT-P6</i>	<i>IKT alkalmazások</i>	Barsi Árpád, Szoboszlai Mihály
IKT-P6-T6	Építőmérnöki érzékelő hálózatok	Barsi Árpád
IKT-P6-T7	Mobil-alapú forgalmi adatgyűjtés	Barsi Árpád

1. táblázat: Az Építőmérnöki Kar által vezetett projektek és témák a KKT bontásban

<b>Munkacsoport</b>	<b>Kar delegáltja</b>
<i>Infratraktúra fejlesztés és megjelenítése</i>	Kiss Rita
<i>Intézményi kapcsolatok</i>	Bojtár Imre
<i>Idegennyelvű képzés</i>	Rózsa Szabolcs
<i>Tehetséggondozás</i>	Bojtárné Bagi Katalin
<i>K+F+I környezet és adminisztráció</i>	Török Ákos
<i>Képzők képzése</i>	Horváth Imréné Baráti Ilona
<i>Utánpótlás, doktorjelöltek, posztdoktorok alkalmazása</i>	Józsa János
<i>K+F+I minőségbiztosítási rendszere</i>	Katula Levente

**2. táblázat:** Az Építőmérnöki Kar delegáltjai a horizontális munkacsoportokban

### 3. A projekt anyagi háttere

A projekt teljes költsége a 3.034.933.887 Ft, amelyből a Kar részesedése 386.665.216 Ft. A Karra jutó összegek költségnemenként a 3. táblázatban, a Tanszékek részesedése a két legfontosabb költségnem esetén a 4. táblázatban látható.

Az utazási keretből, amely konferencia részvételt, külföldi kapcsolatok kiépítését támogatja, 32 kolléga utazása – 26 utazási tételként – került támogatásra, továbbá még 4 utazás várható.

<b>Költségnem</b>	<b>Összeg (Forintban)</b>
<i>Humán erőforrás fejlesztés-szellemi potenciál fejlesztése (2 sor)</i>	120.317.722
<i>Infrastruktúra-ERFA-eszközök beszerzése</i>	111.205.330
<i>Infrastruktúra – ERFA anyagköltségek</i>	2.801.496
<i>5 KKT-kutatás – K+F programok (4 sor)</i>	62.099.999
<i>Nemzetközi kapcsolatok fejlesztése, utazás</i>	10.109.822
<i>Kari felelősök, szakmai felelősök</i>	2.857.500
<i>Egyetemi költségvetésbe történő hozzájárulás</i>	77.273.347
<b>Összesen</b>	<b>386.665.216</b>

**3. táblázat:** Az Építőmérnöki Kar részesedése a Projekt költségvetéséből

<b>Tanszék</b>	<b>Szellemi potenciál</b>	<b>KKT kutatás</b>	<b>Összesen</b>
<i>Általános és Felsőgeodézia Tanszék (AF)</i>	11.172	0.000	11.172
<i>Építőanyagok és Mérnökgeológia (EM)</i>	11.375	4.003	15.378
<i>Fotogrammetria és Térinformatika (FT)</i>	9.332	14.010	23.342
<i>Geotechnika (GT)</i>	8.523	0.000	8.523
<i>Hidak és Szerkezetek (HS)</i>	22.879	6.004	28.883
<i>Magasépítési (ME)</i>	8.340	3.002	11.342
<i>Tartószerkezetek Mechanikája (TM)</i>	17.763	5.004	22.767
<i>Út- és Vasútépítési (UV)</i>	11.118	10.007	21.125
<i>Vízi Közmű és Környezetmérnöki (VK)</i>	10.639	15.011	25.650
<i>Vízépítési és Vizgázdalkodási (VV)</i>	9.341	5.004	14.345

**4. táblázat:** Tanszékek részesedése a szellemi potenciál és a KKT kutatások költségvetéséből

Az ERFA infrastruktúra fejlesztés eredményeként öt nagyértékű műszer került/kerül beszerzésre: univerzális 600 kN-os hidraulikus húzó-nyomógép (HS), 300-400kN-os anyagvizsgáló szakítógépet (EM), duál hidrometerológiai állomás (VV) (1. ábra), hővezető képesség mérőműszer és LAMBDA szoftver (ME) (2. ábra) és GNSS vevő- és antenna kalibráló állomás (AF).



**1. ábra:** Duál hidrometerológiai állomás szerelés közben a Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken (Philip János felvétele)



**2. ábra:** Hővezető képesség mérőműszer a Magasépítési Tanszéken (Philip János felvétele)

### **3. A kutatás személyi háttere**

A projekt teljes időtartama alatt a kar várhatóan 290-300 szerződést köt, 2010. október 1. és 2011. október 31. között a projekt központi adminisztrációs adatai szerint megkötött szerződések száma 264 db. A kutatásban 15 egyetemi tanár, 32 egyetemi docens, 25 adjunktus, 29 doktorjelölt, 21 doktorandusz és 47 hallgató vesz részt.

### **4. Tudományos indikátorok**

A projekt keretében eddig elért tudományos eredményekről e kari kiadvány nyújt összefoglalást. A kutatóegyetem projekt keretében a Kar 6 monográfia és 38 publikáció elkészítését tervezte. 2011. október 31-i állapot szerint 35 megjelent publikációnk készült el és 3 doktorjelölt adta be PhD dolgozatát. A kutatási eredményekről 241 egyéni szakmai jelentést (149 jelentés interneten is) és 95 záró szakmai jelentést készítettünk.

### **Köszönetnyilvánítás**

Legelőször köszönetet szeretnénk mondani a kutatás szervezésében dolgozó tanszéki felelősöknek; a kollégák igazi csapatként dolgoznak és biztosítják a projekt működését. Köszönet a kutatásban résztvevőknek: elsősorban a színvonalas kutatások végrehajtásáért, illetve az ehhez kapcsolódó adminisztrációs tevékenységért, a tartalmas, egyéni szakmai jelentések elkészítéséért. Köszönet illeti a tanszékek kisegítő és adminisztrációs személyzetét is, a projektből adódó többlet feladatok ellátásáért. Külön köszönetünket fejezzük ki a kari szervezési és adminisztrációs feladatokon dolgozó Pomáziné Gyulai Juditnak, Kováts Marianne-nak és Király Mártinak.

# A GNSS ÉSZLELÉSEK SZEREPE A LÉGKÖRI KIHULLHATÓ VÍZMENNYISÉG MEGHATÁROZÁSÁBAN

Rózsa Szabolcs  
Általános- és Felsőgeodézia Tanszék  
szrozs@sci.fgt.bme.hu

Tuchband Tamás  
Általános- és Felsőgeodézia Tanszék  
tamas.tuchband@gmail.com

## Kivonat

A meteorológiai előrejelzés pontosításában meghatározó szerepet tölt be a légkör víztartalmának ismerete. Ezt napjainkban rádiószondás mérésekkel tudják biztosítani. A szondák költsége a mérések számát nagyban befolyásolja, ezért hazánkban mindössze naponta egyszer, Szegeden és Budapesten végeznek ilyen észleléseket.

A GNSS jelek a légkörön haladnak keresztül, ezért a légkör jelekre gyakorolt hatásából következtetni lehet a annak állapotára, vízgőztartalmára és így a kihullható vízmennyiségre. A pontos meghatározáshoz jól kalibrált modellekre van szükség. Jelen kutatás egy már kialakított közel valósidejű automatikus rendszert vizsgál. A kapott eredményeket összevetjük az etalonnak számító rádiószondás eredményekkel. Az eredmények azt mutatják, hogy a kihullható vízmennyiség megközelítőleg 1 mm-es középhibával becsülhető a GNSS mérésekből. A hazai aktív GNSS hálózatot felhasználva ezáltal lehetőség nyílik hazánkban 35 állomáson a vízgőztartalom óránkénti, vagy akár még annál is sűrűbb meghatározására. Ezzel a numerikus időjárás előrejelzés pontosságát segíthetjük elő.

## Kulcsszavak

GNSS/GPS, troposzféra, előrejelzés, rádiószonda, légkör, vízgőz

## 1. Bevezetés

A légkör változó összetevői közül kiemelkedik a víz szerepe, amely mindhárom (légnemű, cseppfolyós és szilárd) halmazállapotban jelen van. A három halmazállapot közül egyedül a légköri vízgőz mennyisége mérhető közvetlenül.

A Föld több mint 800 pontjáról indulnak naponta többször meteorológiai rádiószondák, hogy feltérképezzék a légkör vertikális szerkezetét az alsó 30-35 km-es rétegben. Műholdas, repülőgépes, illetve földi távérzékelési eszközök is rendelkezésre állnak a vízgőztartalom mérésére. E műszerek a teljes légoszlopra vonatkozó, úgynevezett *kihullható vízmennyiséget* szolgáltatják  $\text{kg/m}^2$  vagy mm mértékegységben. Ennek a vízmennyiségnek csak egy része jut a felszínre csapadék formájában, amit a nagytérségű légköri folyamatok, a helyi hatások (konvekció) valamint a felhő- és csapadékképződés mikro- és makrofizikája alakít. A kihullható vízmennyiség földi átlaga szoros kapcsolatban van az évi csapadékkal. A vízgőz légköri tartózkodási ideje 8–10 nap. Mivel az átlagos földi csapadékmennyiség hozzávetőlegesen 1000 mm/év, így a kihullható vízmennyiség közepes értéke 25 mm.

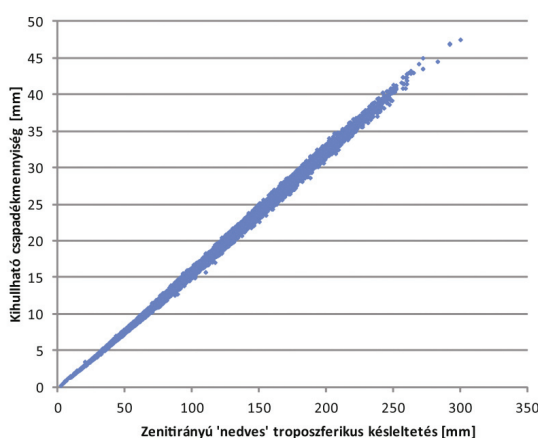
A műholdas helymeghatározó rendszerek elsődleges célja, a felhasználó térbeli helyzetének meghatározása. A feladat megoldásához az ismert pályán keringő műholdak és a GPS vevő közötti távolságot határozzuk meg, mégpedig oly módon, hogy a műholdak által sugárzott jelek futási idejét mérjük a műhold és a vevőberendezés között. Így a távolság meghatározásához ismernünk kell a jel terjedési sebességét is. A mérést számos szabályos hiba terheli (műhold óra-, és pályahibák, az ionoszféra és a troposzféra sebességmódosító hatása, vevő órahibák, stb.).

Ami a helymeghatározás szempontjából hibaként jelentkezik, más tudományágak számára értékes információkkal bír. Az ionoszféra okozta sebességmódosító hatás szorosan összefügg az ionoszférában található szabad elektronok számával, ami a Nap ionizáló sugárzásának függvénye. A troposzféra okozta sebességmódosító hatás pedig a légkör sűrűségével áll összefüggésben, ideértve a troposzférában található vízgőz sűrűségét is.

Abban az esetben, ha a GPS vevőket ismert koordinátájú pontokon helyezük el, a troposzféra okozta sebességmódosító hatás is meghatározható. Ehhez hazánkban a Földmérési és Távérzékelési Intézet által létrehozott és üzemeltetett aktív GNSS hálózatot használhatjuk fel (GNSSNet.hu).

## 2. A kihullható vízmennyiség és a troposferikus késleltetés kapcsolata

A troposzféra okozta teljes késleltetés távolságban kifejezett értéke két részre bontható: a hidrosztatikus és a „nedves” késleltetésre. Az utóbbi szoros kapcsolatban áll a troposzférában található vízgőz mennyiségével, azaz a kihullható vízmennyiséggel (1. ábra).



1. ábra: A zenitirányú „nedves” troposferikus késleltetés és a kihullható vízmennyiség összefüggése rádiószondás mérések alapján

Az ábrából jól látható, hogy a zenitirányú nedves késleltetés jól korrelál a troposzférában felgyülemlt vízpára mennyiségével. Így a GNSS mérések feldolgozásával a troposzféra okozta „nedves” késleltetés (ZWD) meghatározását követően megbecsülhető a troposzférában található vízpára mennyisége, az ún. integrált vízgőztartalom (IWV) [Tuchband és Rózsa, 2010].

$$IWV = \frac{10^6}{R_v \left( -\frac{R_d}{R_v} k_1 + R_2 + \frac{k_2}{T_m} \right)} ZWD. \quad (1)$$

ahol  $R_v$ ,  $R_d$  a vízpára és a száraz levegő egyedi gázállandója,  $T_m$  a troposzférában található vízpára átlaghőmérséklete, míg  $k_1$ ,  $k_2$  és  $k_3$  tapasztalati állandók.

A meteorológiában az integrált vízgőztartalom egy felső határ a kihullható csapadék mennyiségére, ezért ez a mennyiség a meteorológiai előrejelzések számára hasznos információt biztosít.

A hazai GNSS infrastruktúra [Borza és mtsai, 2007] kiépítésével lehetőségünk nyílik a troposzféra integrált vízgőztartalmának folyamatos monitorozására. Köszönhetően a hazánkban létesített nagyszámú permanens GNSS állomásnak (35 hazai + 17 országhatárhoz közel található külföldi állomás), az integrált vízgőztartalom mintegy 50-70 km-es térbeli és óránkénti időbeli felbontással megbecsülhető. Jelen dolgozatban arra is keressük a választ, hogy milyen pontosság érhető el a GNSS méréseken alapuló vízgőztartalom meghatározásában. E célból a GNSS adatokból számított integrált vízgőztartalom értékeket összevetettük rádiószondás adatokból származó értékekkel.

## 3. A troposzféra integrált vízgőztartalmának becslése

A troposzféra integrált vízgőztartalma GNSS mérésekből történő meghatározásával részletesen foglalkozik [Bányai, 2008; Rózsa és mtsai, 2009]. Nagyon röviden áttekintve a folyamatot, a vízgőztartalom



meghatározása a következők szerint történik. Mivel a GNSS infrastruktúra állomásainak koordinátái nagy pontossággal ismertek, így a mérésekből meghatározhatjuk a troposzféra ismeretlenek tekintett teljes zenitirányú késleltetését (zenith tropospheric delay – ZTD). Ez a mennyiség két részre osztható. Az egyik az ún. hidrosztatikus rész (zenith hydrostatic delay – ZHD), míg a másik az ún. „nedves” rész (zenith wet delay – ZWD). Az utóbbi két mennyiség közül a hidrosztatikus késleltetés viszonylag jól modellezhető [Hopfield, 1969; Saastamoinen, 1972]. A teljes késleltetés ismeretében a nedves késleltetés az alábbi egyszerű összefüggéssel számítható:

$$ZWD = ZTD - ZHD, \quad (2)$$

A GNSS feldolgozásokból a ZTD értékét általában  $\pm 1$ -2 mm-es középphibával tudjuk meghatározni. A zenitirányú nedves késleltetés jó korrelációs kapcsolatban van a levegő integrált vízgőztartalmával. E két mennyiség közötti regressziós kapcsolatot leírhatjuk globálisnak tekinthető modellekkel [Bevis és mtsai, 1992; Emdarson és Derks, 2000], illetve lokális modellekkel is [Rózsa és mtsai, 2009]. Mindegyik esetben közös, hogy a zenitirányú nedves késleltetést egy arányossági tényezővel számítják át integrált vízgőztartalomra:

$$IWW = Q \cdot ZWD, \quad (3)$$

ahol  $Q$  a felszínközeli hőmérséklettől függő arányossági tényező. Emdarson-Derks európai rádiószondás mérésekből az alábbi összefüggést vezette le a  $Q$  arányossági tényezőre:

$$Q = \frac{1}{a_0 + a_1(T_f - \bar{T}) + a_2(T_f - \bar{T})^2}, \quad (4)$$

ahol  $T_f$  a felszínközeli hőmérséklet,  $T = 283,49$  K,  $a_0 = 6,458$  m<sup>3</sup>/kg,  $a_1 = -1,78 \times 10^{-2}$  m<sup>3</sup>/kg/K, és  $a_2 = -2,2 \times 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/kg/K.

A  $Q$  arányossági tényező alapján a zenitirányú nedves késleltetés valamivel több mint hatszorosa az integrált vízgőztartalomnak. Az arányossági tényező meghatározásának bizonytalansága miatt az integrált vízgőztartalom meghatározása a fenti modellel maximum  $\pm 0,3$ mm-es középphibával határozható meg, amennyiben a nedves késleltetés hibátlan értékét ismernénk. Ehhez a hidrosztatikus késleltetést modellezni kell [Saastamoinen, 1972].

$$ZHD = 0,002277 \cdot p, \quad (5)$$

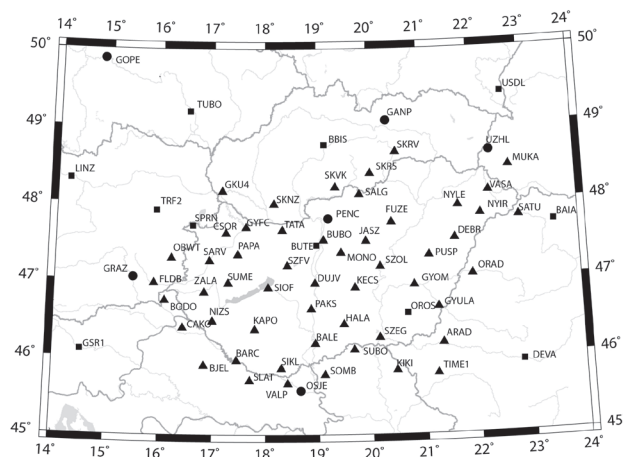
ahol  $p$  a felszínközeli légnyomás értéke.

A közel valós idejű automatikus GNSS feldolgozáshoz a GNSS adatokon kívül szükségünk van megfelelő pontosságú és valós időben is elérhető pályaadatokra, illetve órahibákra is. Ezen felül a vízgőztartalom meghatározásához ismernünk kell a felszínközeli légnyomást, illetve a felszínközeli hőmérsékletet is. Ennek megfelelően meteorológiai adatok is integrálásra kerültek a feldolgozórendszerbe.

A felhasznált adatok így az alábbiak voltak:

- **GNSS mérések:** összesen 86 állomás óránként elérhető adatai. Ebből 17 a Nemzetközi GNSS Szolgálat (IGS) hálózatának tagja, további 17 az EUREF Permanens Állomások (EPN) hálózatának tagja, míg 52 állomás a FÖMI által üzemeltetett hazai aktív GNSS hálózat (GNSSNet.hu) tagja (ebből 35 állomás helyezkedik el az országhatáron belül) (2. ábra). A Kárpát-medence környékén található állomások az 2. ábrán láthatóak.
- **GNSS pályaadatok:** a közel valós idejű adatfeldolgozáshoz szükségünk van kellő pontosságú pályaadatokra, illetve Földforgás paraméterekre. Erre a célra az IGS ultra-rapid pályamegoldásait, illetve a hozzájuk kapcsolódó Földforgás paramétereket használtuk fel.
- **Felszínközeli meteorológiai mérések** (légnyomás, hőmérséklet, harmatpont): a feldolgozáshoz jelenleg a reptéri METAR üzeneteket továbbító meteorológiai állomások adatait gyűjtjük óránként. Ez összesen 40 meteorológiai állomás észleléseinek gyűjtését, értelmezését és feldolgozását jelenti. A METAR táviratok az amerikai National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) szerverén szabadon elérhetőek.
- **Rádiószondás észlelések:** hazánkban két helyen végeznek rendszeres rádiószondás észleléseket. Budapesten 12 óránként, míg Szegeden 24 óránként történnek az észlelések. A hazai rádiószondás

méréseken túl a vizsgált területen található 31 egyéb rádiószondás állomás adatait használjuk fel a becsült vízgőztartalom ellenőrzésére. Ezeket az adatokat szintén a NOAA szervereiről érhetjük el.



**2. ábra:** A felhasznált GNSS állomások területi eloszlása Magyarországon és környezetében (háromszög: GNSSNet.hu állomás; négyzet: EPN állomás; kör: IGS állomás)

#### 4. A közel valós idejű feldolgozó rendszer

A GNSS mérések meteorológiai alkalmazásához nem csak a kellően pontos vízgőzbecslést kell biztosítanunk, hanem az eredmények gyors közzétevése is elengedhetetlen. A COST 716 projekt célkitűzései között szerepel, hogy a vízgőzbecsléseket maximálisan 105 perccel az észlelés után elérhetővé kell tenni.

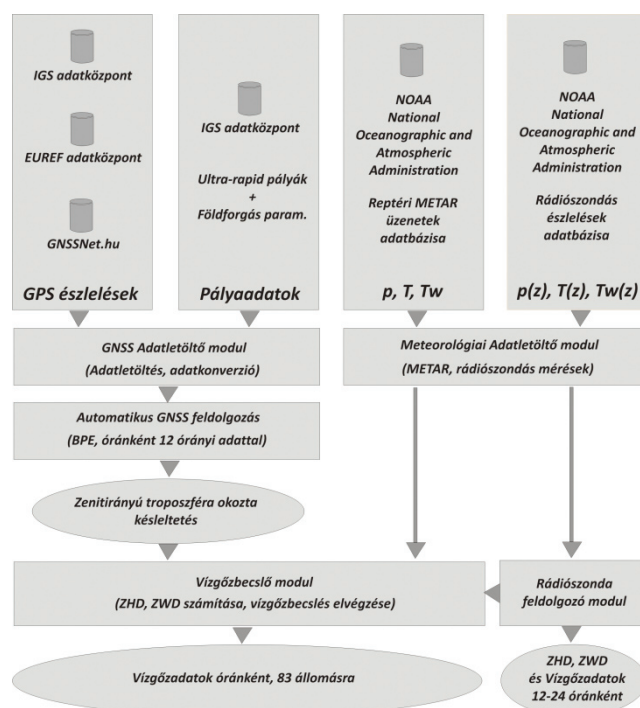
Ezt a kívánalmat úgy tudjuk teljesíteni, ha az adatgyűjtés, adatkonvertálás, elő-, és tényleges feldolgozás valamint az eredmények publikálásának a folyamatait teljes mértékben automatizáljuk. A GNSS mérések automatikus feldolgozásához a Bernese tudományos igényű feldolgozó szoftver 5.0-s verziójának automatikus feldolgozó motorját (Bernese Processing Engine – BPE) használtuk fel [Dach és mtsai, 2007]. A teljes feldolgozórendszer sematikus ábrája a 3. ábrán látható.

Az ábrán látható, hogy első lépésben letöltésre kerülnek a GNSS mérések a két – GNSSNet.hu, igs. bkg.bund.de – adatközpontból. Az utóbbi szerveren mind az EUREF EPN, mind az IGS állomások adatai megtalálhatóak. Ezt követően az IGS szerveréről letöltjük a szükséges pályák, illetve Földforgás paraméter fájlokat is. Mivel a GNSS adatokat óránként töltjük le, így az adatletöltő modulnak elő kell állítania a feldolgozáshoz szükséges fájlokat. Ennek keretében – az optimális troposzférikus késleltetés meghatározásához – állomásonként összefűzzük az elmúlt 12 óra méréseit egyetlen fájlba, majd elvégezzük a GNSS mérések feldolgozását a Bernese szoftver segítségével.

Az így kapott zenitirányú troposzférikus késleltetésből a felszínközeli légnyomás alapján számított hidrosztatikus késleltetést levonva megkapjuk a „nedves” összetevő értékét, amelyet a felszínközeli hőmérséklet alapján átskálázhatunk integrált vízgőztartalom értéké. Amennyiben az adott időpontban rádiószondás mérések is zajlottak az adott állomás környezetében, akkor a rádiószondás mérésekből szintén meghatározható a hidrosztatikus késleltetés értéke. Ezt felhasználva szintén elvégezhető az integrált vízgőztartalom meghatározása a GNSS mérésekből.

A GNSS mérések feldolgozásának nagy előnye, hogy óránként (vagy beállítástól függően akár rövidebb időbeli felbontásban is) lehetőségünk nyílik hazánkban mintegy 35 pontban az integrált vízgőztartalom meghatározására.

Az eredmények ellenőrzését elvégezhetjük rádiószondás mérésekkel is. Mivel a rádiószondás mérések a NOAA szerverein – tudományos célra – szintén hozzáférhetőek, így célszerű a rádiószondás mérések feldolgozásának integrálása is a rendszerbe. Ennek megfelelően jelenleg naponta töltjük le az előző napi rádiószondás méréseket a vizsgált területen található mintegy 33 állomásról, és a feldolgozott adatokat adatbázisban tároljuk a becsült integrált vízgőztartalom értékek ellenőrzéséhez.



3. ábra: Az automatikus feldolgozórendszer elemei

A feldolgozórendszer GNSS méréseket feldolgozó részét a FÖMI Kozmikus Geodéziai Observatóriumában állítottuk fel, ahonnan a feldolgozás eredményeképpen megszületett teljes zenitirányú késleltetések (ZTD) a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékére érkeznek minden órában. A feldolgozás további lépéseit már itt hajtjuk végre (3. ábra).

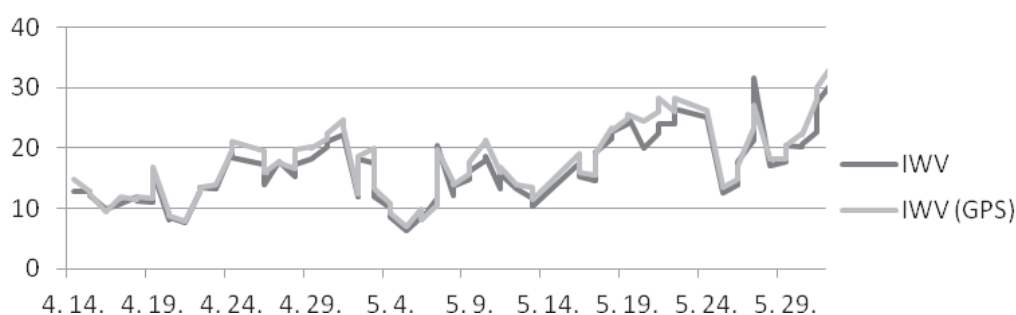
## 5. Az eredmények összevetése a rádiószondás adatokkal

Az eredmények ellenőrzéséhez a már említett rádiószondás méréseket használjuk fel. A rádiószondás méréseket a NOAA rádiószonda adatbázisszerveréről töltjük le naponta egyszer (<http://www.esrl.noaa.gov/raobs>). Az észlelések egy egyszerű szövegfájlban találhatóak meg, amelyekben a különböző légnyomásszintekhez rögzítik a magasságot, a hőmérsékletet, a harmatpontot, illetve a szélirányt és a szél erősségét. A magasság, légnyomás, hőmérséklet és a harmatpont ismeretében nem csak az integrált vízgőztartalom, hanem a zenitirányú troposzférikus késleltetés két összetevője (ZHD, ZWD) is meghatározható.

Ennek megfelelően minden – érvényes méréseket tartalmazó – nyomásszinthez tartozó észlelésből meghatározhatjuk a vízgőzsűrűséget és a levegő teljes sűrűségét is a magasság függvényében. A vízgőzsűrűség magasság szerinti integrálásával megkaphatjuk a troposzféra integrált vízgőztartalmát, míg a levegő teljes sűrűsége alapján a hidrosztatikus késleltetés határozható meg.

A budapesti adatokat felhasználva egy tesztidőszakban összehasonlítottuk a rádiószondákból kapott IWV eredményeket a GNSS mérésekből levezetett értékekkel. Ezt a vizsgált időszakban naponta két időpontban tehattük meg, hiszen ekkor még naponta kétszer hajtottak végre rádiószondás mérést az Országos Meteorológiai Szolgálat Marcell György Főobszervatóriumában Budapesten. A 48 napos tesztperiódus eredményeit a 4. ábra szemlélteti.

Az ábrán jól látható, hogy a vizsgált másfél hónap alatt meglehetősen jól egyeztek a rádiószondás mérésekből és a GNSS adatokból számított integrált vízgőztartalom értékek. Ugyanakkor meg kell említenünk, hogy a május utolsó hetében tapasztalt időjárási frontokkal terhelt időszakban nagyobb eltérések tapasztalhatóak a két értékben, annak ellenére, hogy a vízgőztartalom értékek lefutása ebben az időszakban is jól egyezik. Ha megvizsgáljuk, hogy a nyugodtabb, április 14–május 14. közötti időszakban hogyan egyeztek meg a GNSS adatokból becsült, illetve a rádiószondás adatokból számított integrált vízgőztartalom értékek, akkor a teljes időszakhoz képest jobb eredményeket kaphatunk.



4. ábra: Rádiószondás mérésekből (sötét) és GNSS adatokból számított (világos) integrált vízgőztartalom összevetése 2011. április 14 – május 31. között Budapesten [mm]

## 6. Összefoglalás

A vizsgált időszak eredményei alapján kijelenthetjük, hogy a GNSS mérésekből a kihullható vízmennyiség mértéke meghatározható. Ezeket az eredményeket a rádiószondás mérések alátámasztják. A tesztidőszakban (85 rádiószondás észlelés) megállapíthatjuk, hogy a GNSS mérésekből számított integrált vízgőztartalom értékek 1,7 mm-es szórással illeszkedtek a rádiószondás mérésekhez, ez az érték nyugodt légköri állapotnál az 1,0 mm-t is elérte.

A fentiek alapján kijelenthető, hogy további kutatások szükségesek annak vizsgálatára, hogy az időjárási frontok áthaladásakor lehet-e pontosítani a troposzféra okozta nedves késleltetés meghatározását, ezáltal az integrált vízgőztartalom becslését is. Ezen felül a meteorológiai előrejelzésben való részvétel érdekében a feldolgozó rendszert további állomásokkal kell bővíteni, illetve a feldolgozás időigényét csökkenteni szükséges.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton köszönik meg az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok támogatását a K-83909 sz. projekt keretében. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az ÚMFT TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

- Bányai, L. A műholdas helymeghatározás földtudományi alkalmazása, *Geomatikai Közlemények, Sopron*, 2008.
- Bevis, M, Businger, S, Herring, T. A, Rocken, C, Anthes, A, Ware, R. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *J. Geophys. Res.*, 97, 1992, 15787–15801.
- Borza, T, Galambos, I, Horváth, T, Kenyeres, A. Célegyesben a hazai GNSS kiegészítő rendszer építése, *Geodézia és Kartográfia*, 6, 2007, 13-22.
- Dach, R, Hugentobler, U, Fridez, P, Meindl, M. *Bernese GPS Software, Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern, 2007.
- Emardson, T. R, Derks, H. J. P. On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere, *Meteor. Appl.*, 7, 2000, 61–68.
- Hopfield, H. S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for collecting satellite data, *J. Geophys. Res.*, 74, 1969, 4487-4499.
- Rózsa, Sz, Dombai, F, Németh, P, Ablonczy, D. Integrált vízgőztartalom becslése GPS adatok alapján, *Geomatikai Közlemények*, XII(1), 2009, 187-196.
- Saastamoinen, J. Contributions to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin Géodésique*, 105, 1972, 106.
- Tuchband, T, Rózsa, Sz. Zenit irányú troposzférikus késleltetés modellezése, meteorológiai adatokon alapuló helyi regressziós modell segítségével, *Geomatikai Közlemények*, XIII(2), 2010, 65-72.

# LÉGSZENNYEZÉS HATÁSA ÉPÍTETT ÖRÖKSÉGÜNKRE

Török Ákos  
Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék  
torokakos@mail.bme.hu

## Absztrakt

A kőanyag természetes mállása, a műemlékek pusztulása az utóbbi időkben felgyorsult. Ez részben a légszennyező anyagok megjelenésével hozható összefüggésbe. A cikk bemutatja az egyik legfontosabb kőzetanyag a mészkő légszennyezés hatására bekövetkező mállási folyamatait. Elemzi a légköri alkotók hatására kialakuló új ásvány fázisokat és bemutatja a kőfelületek fizikai tulajdonságainak megváltozását budapesti műemlékek vizsgálata alapján. A laborelemzésekből megállapítható, hogy a légszennyeződés hatására kialakuló mállási kéregben új ásványfázis, a gipsz jelenik, melynek aránya meghaladhatja a 60 m%-ot is. A mállási kéreg fekete színét a korom és pernye szemcsék okozzák. A kőfelületre ülepedő városi por alkotói katalizálják a mállási folyamatot. A kéreg az alapkőzethez viszonyítva vízzáró és nagyobb felületi szilárdsággal rendelkezik. A porózus mészkővön található mállási kéreg leválása után feltáródó alapkőzet általában nagyobb vízáteresztő képességű és sok esetben a kéreg leválását követően gyors pusztulásnak indul, amelyet egy másodlagos mállási kéreg kialakulása lassíthat. A légköri kéndioxid koncentráció fokozatos csökkenése ugyan a gipszes kéreg képződésének lassulását eredményezi, de a légköri por koncentráció továbbra is jelentős szerepet tölt be a műemlékek mállásában.

## Kulcsszavak

műemlék, mészkő, légszennyezés, gipsz, mállás

## 1. Bevezetés

A kulturális örökségünk részét képező épületek, műemlékek többsége természetes kőanyagból áll. A kőanyag nem örökéletű és a természetes pusztulási folyamatait, az emberi hatások, ezen belül legfőképpen a légszennyezés tovább fokozza, amit már korán felismertek. A légszennyezés nagymértékű mállást és elváltozást okoz az épületekben, amelynek egyik legszembetűnőbb formája a homlokzatok elfeketedése. Ez a hatás oly mértékű lehet, hogy esztétikai elváltozáson túl az épület stabilitását is károsan befolyásolhatja (pl. Országház épülete). A cikk összefoglalja a légszennyezés hatására kialakuló legfőbb változásokat, elsősorban a budapesti mészkő műemlékekre koncentrálva.

## 2. Műemlékek kőanyagának és a légköri alkotóknak kölcsönhatása

A vizsgált műemlék épületek kiválasztásánál fontos szempont volt, hogy olyan anyagból álljanak, amely a légszennyezésre látható módon és érzékenyen reagál. Így esett a választás a mészkőre, amely uralkodó ásványa a kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ). A kalcit a légkörben található gázok és víz együttesével több reakció formájában is kölcsönhatásba lép. A kőzetmállás szempontjából legfontosabb gázok a  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  és  $\text{NO}_x$ . Ezek jelentős szerepet játszanak a kalcit oldódásában.

A szén-dioxid jelentősége abban áll, hogy a csapadékvízzel együtt fejt ki hatását. A természetes esővíz pH értéke 5.6 körüli, azaz kissé savas. Az ilyen esővízben a kalcit vízoldékonysága, a légköri  $\text{CO}_2$ -dal egyensúlyt feltételezve közel ötször nagyobb ( $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ mol/l}$ ), mint a semleges kémhatású „tisztá” vízben [Steiger és mtsai, 2011]. Ez a jelenség is magyarázza, hogy az uralkodóan kalcitból álló kőzetek (pl. mészkő) miért oldódnak a természetes eredetű csapadék hatására. Fontos kiemelni, hogy az emberi tevékenység hatására a légkörbe egyre fokozódó mértékben kibocsátott széndioxid a fokozott üvegházhatás mellett a karbonátos kőzetek mállási sebességét is megnöveli.

A légköri kénoxidok jelenléte nem csak a karbonátos kőzetek oldódását eredményezi, hanem más reakciókhoz vezet. Kéndioxid és víz kölcsönhatásaként keletkező kénsav és karbonátok reakciójaként gipsz keletkezik ( $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ ). A folyamat pontosabb megismerését a klímászakrényekben vagy áramlási csatornában elvégzett kísérletek tették lehetővé. Így igazolni lehetett, hogy a kén-dioxid nedvesség jelenlétében a kőzetfelületen reakcióba lépve a kőanyagból származó kalciummal gipszet alkot [Sabbioni, 2003].

A nitrogénoxidok és víz kölcsönhatásaként keletkező salétromsav is jelentős mértékben oldja a karbonátokat, de itt a keletkező reakció termékeknek nagy az oldékonysága, így a kőfelületen nem maradnak meg.

A légköri gáz halmazállapotú összetevők mellett cseppfolyós és szilárd halmazállapotú részecskék szerepe is jelentősnek mondható a kőzetmállásban. A légkörben található folyadék cseppeket és a szilárd halmazállapotú alkotókat együttesen részecskéknek angolul „Particulate Matter”-nek nevezzük (PM), míg az aeroszol kifejezésbe bele értjük azt a gáz halmazállapotú közeget is, amelyben a részecskék találhatók [Gieré és Querol, 2010]. A gáz halmazállapotú légszennyező komponensek mellett tehát a részecskéknek is komoly szerep jut a műemlékek mállásában. Kísérletekkel és műemléki kőanyagról származó mintákkal igazolták, hogy a por és korom részecskék (pl. kipufogó gázok) katalitikus szerepet játszanak a gipszképződésben és a kőfelületek mállásában [Rodríguez-Navarro és Sebastian, 1996]. A légkörben található fémek alkotók elsősorban az ülepedő por szilárd fázisában jelennek meg, a kőzetmállásban betöltött szerepüket már korábban felismerték [Sabbioni, 2003]. A fémek közül a mangán és a vas katalitikus szerepét lehet kiemelni, de utóbbi időben az átmeneti fémek kőzetmállásban betöltött szerepét is sikerült pontosítani [McAlister és mtsai, 2008].

### 3. Vizsgálati módszerek

A műemlékek helyszíni vizsgálata során első lépésként a falszakaszok kőzettani azonosítása került sor, amelyet a mállási jelenségek leírása és térképi ábrázolása követte. A műemlék jelleg miatt a mintavételezésre csak korlátozott lehetőség nyílt.

A kőfelületek hőmérsékletét infravörös termométerrel, míg vízfelszívási képességét úgynevezett pipás vízbeszívással (Karsten-cső) lehetett meghatározni. A műemléki kőanyagok szilárdsági tulajdonságait roncsolásmentes felületi szilárdsági vizsgálatokkal lehet meghatározni. A két használt műszer a Schmidt-kalapács és a Duroskop volt. Mindkét műszerrel minden egyes alkalommal minden egyes vizsgált kőzettömbön, kőelemen és mállási felületen 10 visszapattanási értéket mértünk. Meghatároztuk ezen értékek átlagát, szórását, és legkisebb és a legnagyobb mért visszapattanási értékeket is.

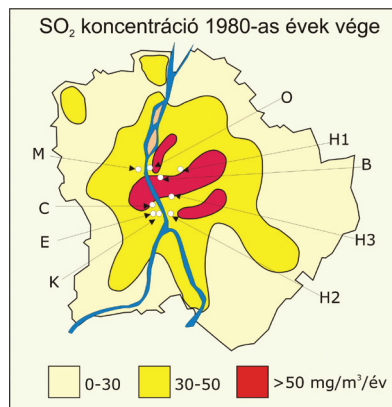
A műemlékekből származó mintákból vékonyecsiszolatok készültek, amelyeket polarizációs mikroszkóppal elemeztem. A kisméretű minták esetében a szöveti és elemanalitikai vizsgálatokra pásztázó elektronmikroszkópot alkalmaztunk (Scanning Electron Microscope – SEM), normál és visszavert sugaras üzemmódban (Back Scattered Scanning Electron Microscope – BSEM).

A minták ásványos összetételét röntgen diffrakciós módszerrel (Phillips diffraktométer, PW 3710 típus, réz anód és monokromátor, 40kV, 20mA, mérési tartomány  $5^\circ$ - $70^\circ$ ) és derivatográffal (MOM derivatográf) lehetett meghatározni. A kőzetminták fő- és nyomelem összetételét röntgen fluoreszcenciás módszerrel is meghatároztuk (PW2400).

### 4. Vizsgálat műemlékek és környezetük

A vizsgált épületek Budapesten eltérő légszennyezettségi és kitettségi (szél, csapadék, stb.) területen található kőzetanyaguk a miocén korban keletkezett erősen porózus ún. durva mészkő. Az épületek jelentős része a belvárosban és annak környékén található, de viszonylag kiemeltebb helyzetű kevésbé szennyezett területen helyezkedik el a Citadella és Mátyás-templom (1. ábra). A légszennyezettségi adatokat tekintve a kéndioxid koncentrációja Budapesten a XX. század elején még magasabb volt, mint a legtöbb európai fővárosban [ld. bővebben Török, 2002]. Ezt követően komoly csökkenés következett be az 1980-ban mért átlagos  $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$  koncentrációról  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -ra (2004) majd legutóbb  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -ra (2008), napjainkra pedig  $3\text{-}4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -re csökkent a kéndioxid koncentrációja. A por koncentráció 23%-os csökkenést mutatott 1980 és 2000 között, elérve az éves átlagos  $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -es értéket, majd tovább csökkent  $35\text{-}40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  értékre, 2008-ra. A PM<sub>2,5</sub> és PM<sub>10</sub> mért értékei a városközpontban még mindig magasak. Az éves szinten 2009-ben mért  $374 \mu\text{g}/\text{m}^3$ -es maximum érték és a  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mint 98%-os gyakorisági koncentráció, azt jelzi,

hogy a szálló por koncentráció a belvárosi területeken még mindig magas. Fontos kiemelni, hogy mindkét komponensből a belvárosban magasabb értékeket lehet mérni, mint a külterületeken. A NO<sub>x</sub> koncentráció korábbi csökkenést követően napjainkra ismét emelkedni kezdett és egyes időszakokban meghaladja a 100 µg/m<sup>3</sup>-es értéket is.



**1. ábra:** A budapesti vizsgált épületek elhelyezkedése feltüntetve a 1980-as évek jellemző átlagos SO<sub>2</sub> koncentrációkkal (SO<sub>2</sub> adatok Moingl és mtsai, 1991 nyomán) (C: Citadella, O: Országház, M: Mátyás-templom, B: Szent István Bazilika, K: BME Központi épülete, E: BME Könyvtár, H1: Andrássy út 52., H2: Bakács téri templom, H3: ELTE épülete, Múzeum krt.)

## 5. Eredmények

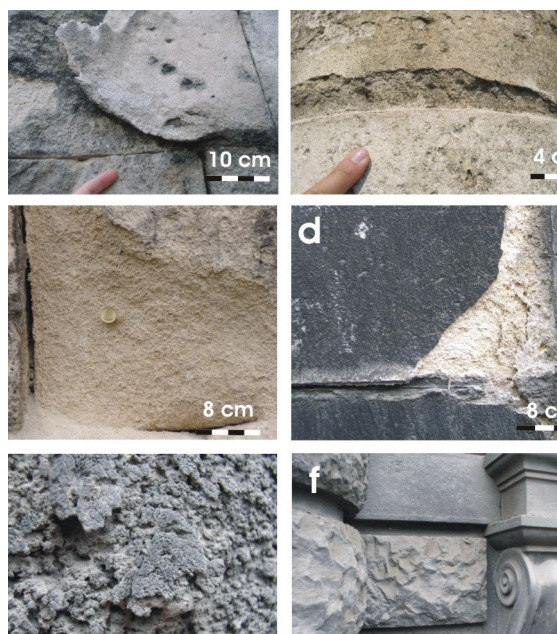
### 5.1. Helyszíni vizsgálatok

Az elemzett műemlékek durva mészkövein észlelt mállási jelenségeket több nagyobb csoportba lehet besorolni: felület elváltozás és leülepedés, mechanikai mállás, oldódás, biológiai mállás, repedések, törések és emberi beavatkozások. A csoportokon belül több mállási formát tudunk megkülönböztetni (2. ábra). Egy adott kőfelületen átfedésben több mállási jelenség is előfordul, de a vizsgált budapesti épületek többségén a mállás elsősorban a légszennyezés hatásának, emellett a hóingadozás és az éves több mint 70 fagyási-olvadási ciklusnak köszönhető.

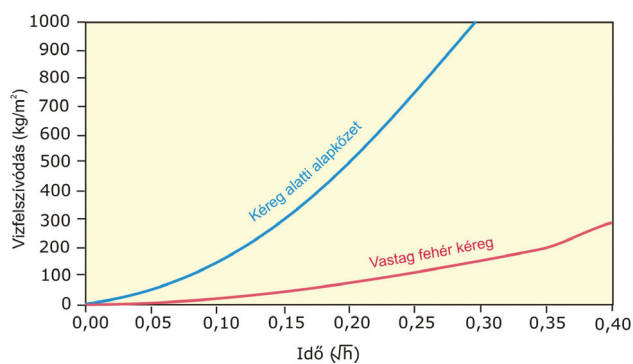
A mállási kérgék pipás vízfelszívásos vizsgálta azt tükrözi, hogy a mállási kéreg kisebb vízfelszívási képességgel rendelkezik, mint a mállási kéreg alatt található alapkőzet (3. ábra). A műemléki kőfelületeken található mállási formák eltérő Schmidt kalapácsos visszapattanási értéket mutatnak [Török, 2002]. Az alapkőzethez viszonyítva a mállási kérgék magasabb visszapattanási értékkel jellemezhetők (4. ábra). Hasonló eltérés mutatkozik a Duroskop visszapattanási értékekben is [Török, 2010]. A kőfelületek hőmérséklete napi ingadozást mutat, a fekete mállási kérgék hőmérséklete a mérések alapján akár 20 fokok napi hőmérsékletet ingadozást is mutat a nyári órákban, a legnagyobb eltérés az egyes mállott felületek hőmérsékletében a reggeli órákban mutatkozik (5. ábra).

### 5.2. Labor vizsgálatok

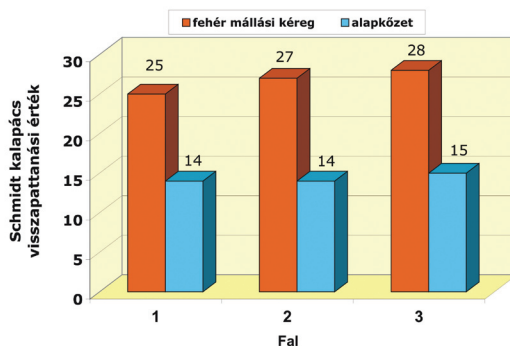
A légszennyezés hatásra kialakult mállási kérgék ásványos összetétele azt mutatja, hogy a mészkő és a kén-oxidok nedves reakciójának hatására keletkező gipsz a kérgék uralkodó ásványa. A gipsz aránya a fekete mállási kérgékben jelentős mértékben meghaladhatja a kalcit mennyiségét. A gipsz mellett egyéb ásványok is megjelennek, amelyek közül a szálló porból származó kvarc dominál, de emellett korom és pernye is megjelenik (6. ábra). A kőfelületre merőleges metszetű vékonycsiszolatok polarizációs mikroszkópos vizsgálatai azt támasztották alá, hogy a mészkő felületen a gipsz sötét zárványdús kristályokat alkot. A sötét zárványok korom és pernye eredetre utalnak (7.a ábra). A pásztázó elektronmikroszkópos elemzések a kőfelületre leülepedő por morfológiáját és a gipsz kéreg morfológiáját is jól mutatják. A gipsz idiomorf rozetta formájú kristálycsoportokat alkot, míg a pernye szemcsék a gipsz kristályok felületére tapadva is megfigyelhetők (7.b ábra).



**2. ábra:** A mészkő műemlékek légszennyezés hatására kialakuló elváltozási formái: a) vastag fehér mállási kéreg (Citadella), b) vékony fehér mállási kéreg (Szent István Bazilika), c) szemcsekipergés (Citadella), d) fekete sík mállási kéreg (Bakács téri templom), e) fekete gömbös mállási kéreg (BME K épület), f) porkéreg (Andrássy út 52)

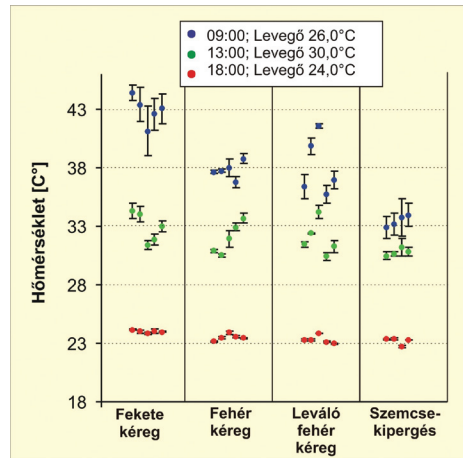


**3. ábra:** A durva mészkövön légszennyezés hatására kialakult mállási kéreg és az alatta található alapkőzet vízfelszívása

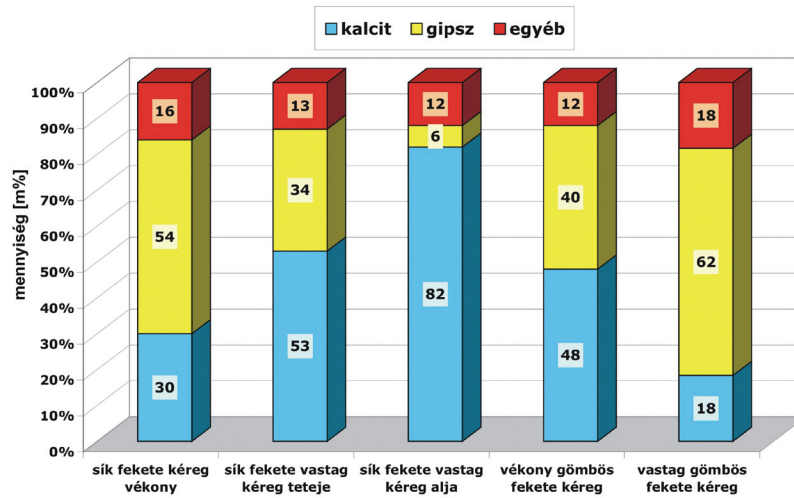


**4. ábra:** A durva mészkövön légszennyezés hatására kialakult fehér mállási kéreg és az alatta található kőzet 3 falszakaszra vonatkozó Schmidt kalapács visszapattanási átlagértékei (Citadella)

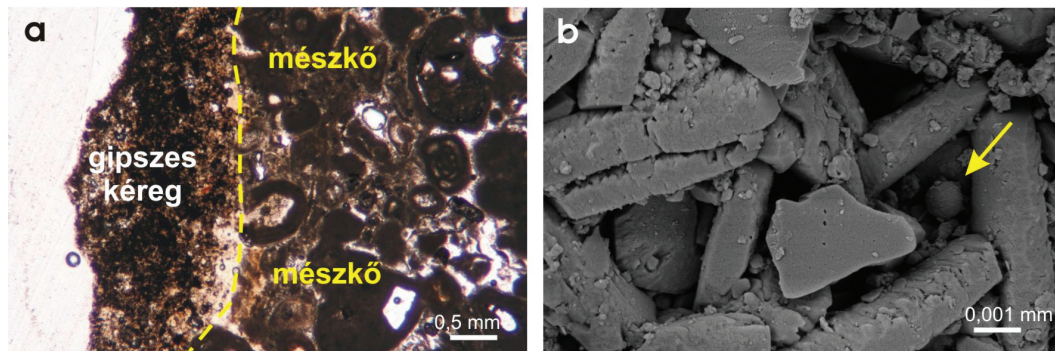




5. ábra: A durva mészkövön légszennyezés hatására kialakult mállási formák felületi hőmérsékletének változása egy nyári nap folyamán 9:00, 13:00 és 18:00 mérési adatok alapján (Citadella)



6. ábra: A légszennyezés hatására létrejövő fekete felületek ásványos összetétele röntgendiffrakciós elemzés alapján



7. ábra: A légszennyezés hatására létrejövő gipsz-dús fekete mállási kéreg mikroszkópos felvételei: a) mészkő felületen megjelenő zárványdús gipszes kéreg vékonycsiszolatban (minta: Bakács téri templom), b) táblás gipsz kristályok közötti megjelenő jól lekerekített pernye (nyíl) pásztázó elektronmikroszkópos felvétel (minta: Hotel Gellért).

## 6. Összefoglalás

A budapesti szennyezett levegőjú környezetben a mészkő műemlékek felületéről származó mintákban a légköri eredetű SO<sub>x</sub> és kalcit reakciójából keletkező gipsz mindenhol kimutatható volt. A kőfelületek feketedése a gipszben megjelenő pernye és korom zárványoknak tulajdonítható. A légszennyezés a kőzeteknek nem csak az ásványos összetételét, hanem fizikai tulajdonságait is megváltoztatja, csökken a kőzetek vízfelvevő képessége, és átmenetileg megnő a felületi szilárdságuk. A mállási kérgék sok esetben védőréteget képeznek, amely leválása után a kőfelület gyors pusztulásnak indul. A kőzetek felületén megjelenő szennyező anyagok vizsgálata nem csak a jelen, hanem a múlt egykori légszennyezettségi viszonyaira is utal, így a kőzetek jó környezetjelző „indikátorai” a légszennyezettség mértékének.

## Köszönetnyilvánítás

A mintaelemzésben sok hazai és külföldi kolléga segített, akiknek külön hálás vagyok. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

- Gieré, R, Querol, X. Solid particulate matter in the Atmosphere, *Elements*, 6(4), 2010, 215-222.
- McAlister, J. J, Smith, B. J, Török, Á. Transition metals and water-soluble ions in deposits on a building and their potential catalysis of stone decay, *Atmospheric Environment*, 42, 2008, 7657–7668.
- Rodriguez-Navarro, C, Sebastian, E. Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation, *The Science of the Total Environment*, 187, 1996, 79-91.
- Sabbioni, C. Mechanism of Air Pollution Damage to Stone. In: Brimblecombe P. (szerkesztő) *The Effects of Air Pollution on the Built Environment* London: Imperial College Press, 2003, 63-106.
- Steiger, M, Charola, A. E, Sterflinger, K. Weathering and Deterioration. In: In. Siegesmund, S, Snethlage, R. (szerkesztők) *Stone in Architecture* Berlin: Springer, 2011, 227-316.
- Török, Á. Oolitic limestone in polluted atmospheric environment in Budapest: weathering phenomena and alterations in physical properties. In: Siegesmund, S, Weiss, T, S, Vollbrecht, A. (szerkesztők) *Natural Stones, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies* Geological Society, London, Special Publications, 205, 2002, 363-379.
- Török, Á. In Situ Methods of Testing Stone Monuments and the Application of Nondestructive Physical Properties Testing. in Masonry Diagnosis. In: Bostenaru Dan M. Prikryl, R, Török, Á. (szerkesztők.) *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures* Dordrecht: Springer, 2010, 177-193.

# BÁTAAPÁTI TÁROLÓ KÖZETKÖRNYEZETÉNEK KÖZETFIZIKAI LABORVIZSGÁLATAI

Török Ákos  
Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék  
torokakos@mail.bme.hu

Görög Péter  
Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék  
gorog.peter@gmail.com

Buocz Ildikó  
Építőanyagok és Mérnökgeológiai Tanszék  
ildikobuocz@yahoo.com

## Absztrakt

Bátaapátiban épül a Paksi atomerőműben keletkező kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezését szolgáló tároló. A felszín alatti lejtaknás és tároló kamrás rendszer kőzetkönyezete gránitos-monzogranitos jellegű. A tároló biztonsága és állékonysága szempontjából döntő fontosságú a kőzetkönyezet fizikai tulajdonsága, amely alapján tervezhető a kőfelületek biztosítása. A jelen cikk a terület általános mérnökgeológiai adottságainak rövid bemutatása után a kőzetkönyezetből származó minták kőzetfizikai vizsgálatát mutatja be. A vizsgált paraméterek közül a nyomószilárdsági és a felületek menti nyírószilárdsági mérések eredményeit értékeli és elemzi.

## Kulcsszavak

radioaktív hulladék, kőzetkönyezet, biztonság, kőzetfizikai vizsgálatok

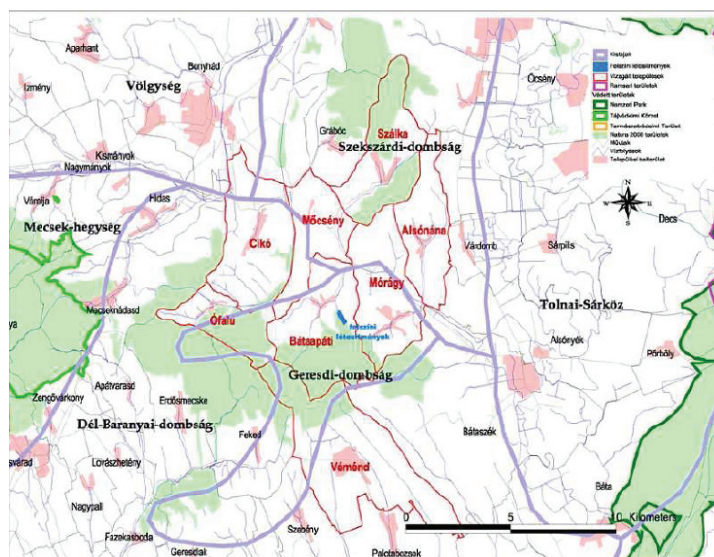
## 1. Bevezetés

Dél-Magyarországon, a Tolna megyei Bátaapáti község térségében épül az ország első olyan radioaktív hulladékártolója, amely szilárd kőzetkönyezetbe létesül. A tárolótér a Paksi atomerőműben keletkező kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezését szolgálja. Jelen építési fázisban a hulladék befogadására szolgáló kamrák kialakítása folyik, a kamrákhoz vezető vágatrendszer már elkészült. A bányászati módszerekkel készülő lerakó tervezésénél és kivitelezésénél a vágat és a kamrák állékonysága döntő fontosságú. Egyrészt az építési környezeti biztonsága, másrészt a hosszú távú környezeti kockázatok (potenciális radionuklid szennyezés) minimalizálása miatt. Ehhez nyújt segítséget a gránitos (monzogranitos) kőzetkönyezet fizikai tulajdonságainak pontosabb megismerése, illetve a folyamatos vágatdokumentáció [Deák és mtsai, 2006]. A cikk bemutatja a terület mérnökgeológiai adottságait, és ezen felül összegzi a területről származó kőzetanyag kőzetfizikai vizsgálatának főbb eredményeit. Terjedelmi okok miatt csak két főbb elemzessorra koncentrálok, a nyomószilárdsági mérésekre és a tagoló felületek menti nyírószilárdsági vizsgálatokra.

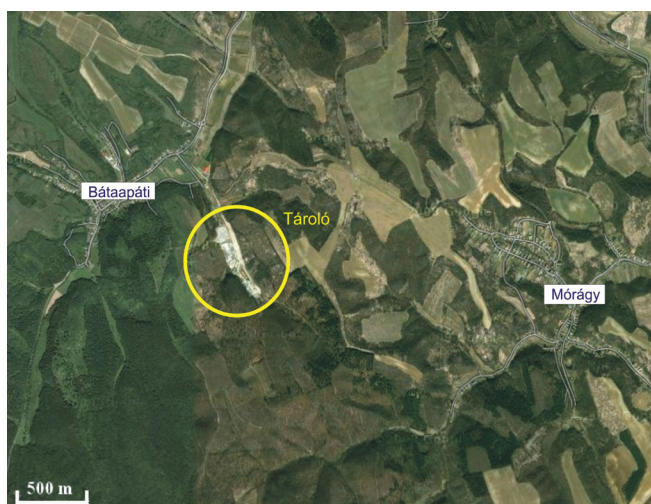
## 2. Tároló és földrajzi környezete

A radioaktív hulladékok kezelésének kérdését Magyarország kiemelt feladatának tekintette és tekinti, így a kis- és a közepes aktivitású radioaktív hulladékok végleges elhelyezésére alkalmas telephely kutatása már 1990-es évektől intenzíven megindult. Az ország teljes területére kiterjedő vizsgálatok alapján végül a kedvező földtani felépítés és vízföldtani jellegek alapján a Tolna megyei Üveghuta térségét jelölték

ki, mint legalkalmasabb területet [Balla és mtsai, 2008]. A terület kijelölésénél a természetes határokat is figyelembe vették. A lerakó a Geresdi-dombság részét képezi, földtani szempontból pedig a Mórágyi-rög, ÉK-i részének tekinthető (1. ábra). A tárolótér kialakítására legalkalmasabbnak a Bátaapáti községtől közvetlenül DK-i irányba húzódó völgy és kőzetkörnyezete bizonyult (2. ábra). A tárolótér kialakításakor négy rendszert lehet megkülönböztetni, a lejtősaknákat és az azokat összekötő szállítási és légvezetési vágatokat, a lejtősaknák folytatásaként kialakított vágatokat és a közbezárt kiszolgáló létesítményeket (ún. Kishurok), a Kishurkot a kamrákkal összekötő szállítívágatot (ún. Nagyhurok) és a hulladéktárolás céljára kialakított kamrákat.



1. ábra: Bátaapáti földrajzi elhelyezkedése

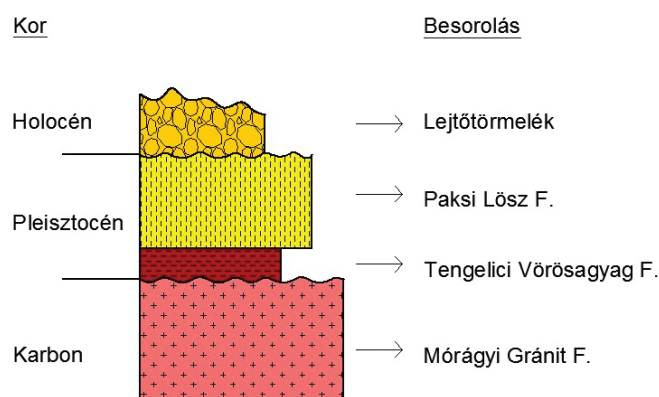


2. ábra: A tároló helyzete Bátaapáti és Mórág között

### 3. Mérnökgeológiai adottságok

A tárolókamrák térségét uralkodóan a Mórágyi rögöt alkotó ún. Mórágyi Gránit Formáció jellemzi. A köztett határai bizonytalanok, de ÉNy-i határa tektonikus eredetű. A gránit jelenleg közel 130 km<sup>2</sup> felszín közeli területet foglal el, de a felszín alatt nagyobb mélységben, ÉK-DNy-i csapással mintegy 250 km hosszan követhető [Balla és mtsai, 2008]. A gránitos összletre települ egy a felszínen is jól azonosítható vörös agyag (Tengelici Vörösayag Formáció) amelyet sok esetben szintén fiatal pleisztocén lösz borít (Paksi Lösz Formáció). A legfiatalabb képződmény a jelen korban is képződő lejtőtörmelék (3. ábra). A rétegsorból kitűnik, hogy az igen idős karbon korban képződött gránit felett nagy időhézaggal települő

első kőzet a vörösayag, amely szürkésbarna és tarkaagyagot is tartalmaz és egy jellegzetes paleotalaj képződmény. A grániton található vörösayagra települő lösz vastagsága 40-50 m, vízszintes településű, rendszerint jól tagolt és mély völgyoldalakkal metszett. A negyedidőszaki lejtőképződmények sok esetben csuszamlásos üledékeket tartalmaznak.



**3. ábra:** Bataapáti és térségének egyszerűsített földtani rétegsora és az egyes kőzetek kora

A gránitos kőzetösszetétel nem homogén, a Mórággyi Gránit Formációban belül több kőzetváltozat is megjelenik. A legfontosabbakat ezen belül négy fő csoportra lehet osztani [Szebényi és mtsai, 2009], így megkülönböztethetünk:

- 1) monzogranitos kőzetcsoportot (kőzetváltozatai: porfíros monzogranit, ritkaporfíros monzogranit és leukokrata monzogranit),
- 2) monzonitos kőzetcsoportot (kőzetváltozatai: finomszemcsés-apróporfíros monzonit, aprószemcsés-afíros monzonit, közepeszemcsés-afíros monzonit),
- 3) hibrid kőzetcsoportot (kőzetváltozatai: kontaminált monzogranit, leukokrata slírekkel kontaminált monzonit, káliföldpátosodott monzonit),
- 4) aplitos kőzetcsoportot (kőzetváltozatai: leukokrata monzogranit, apilit, mikrogranit, pegmatoid, granitporfir, földpátos és monzogranitos erek).

A tároló teret befogadó kőzetestet fő tömegét monzogranitos kőzetek alkotják (1. típus), de kisebb-nagyobb zónákban monzonitos kőzetek is megtalálhatók. A két kőzetváltozat találkozási felületeinél jelentős szélességű hibrid kőzetcsoportba tartozó gránit változatok megjelenése is jellemző [Balla és mtsai, 2008]. A gránitos kőzetkörnyezetet plasztikus és töréses deformációk érték. A plasztikus deformációk közül a palásságot kell kiemelni, mely irányultsága uralkodóan ÉK-DNy-i. A rideg töréses deformációk során egyedi töréseket és vastagabb töréses öveket lehet megkülönböztetni. Egyes töréses és deformált zónákban kloritos, zöldagyagos kitöltés jelentkezik. Ennek következtében egyes töréses zónák vízzáró funkciót is betölthetnek. A töréses zónák közül a területre legjellemzőbbek csapásiránya ÉNY-DK-i, és ezek többsége meredek 60-80°-os uralkodóan ÉK-i dőlést mutat. A telephelyet tagoló nagyobb töréses övek meredek, inkább eltolódásos jellegűek [Szebényi és mtsai, 2009]. A telephelyen és környékén a rétegvíz a felszín alatt mintegy 20 m – 70 m mélységben található, ingadozása éves szinten 1 - 2 m körüli [Balla és mtsai, 2008].

#### 4. Vizsgálati módszerek

Az alagút kőzetkörnyezetében található kőzetestből kőzettömböket és fúrásokból származó magmintákat elemeztünk. A mintákat a Mecsekérc Zrt. és Kőmérő Kft. bocsátotta rendelkezésünkre. A felület menti nyírásvizsgálatokhoz használt tömbminták közül két gránitos és három agyagos jellegű volt. A gránitos változatok a vörös, kissé breccsás granitoid típusok közé sorolhatók, míg az agyagos tömbök jellegzetesen zöldes színű kloritos változatok voltak. A nyírásvizsgálatokat tagoló felületek mentén az ISRM ajánlásai alapján végeztük el Controls 45-D548/1 típusú berendezés segítségével. A függőleges és vízszintes eltolódást HBM 1-WA/10MM-T típusú útdők mértük. A nyíróerőket „S” alakú 9861 típusú erőmérő cellával mértük. A nyírás kísérlet mérési adatait HBM Catman 4.5 számítógépes program és egy HBM Spider 8 adatrögzítő egység rögzítette. A mérés előtt és azt követően is fényképek készültek a mintákról. A mérési adatokat az ISRM ajánlásai szerint értelmeztük. A nyomószilárdsági vizsgálatok során az MSZ EN 1926:2000 szabvány előírásait követtük. Meghatároztuk a próbatestek rugalmassági

modulusát is. A testsűrűséget az MSZ EN 1936: 2000 számú szabványban rögzített elvek szerint mértük, valamint a hengeres próbatestek ultrahang terjedési sebességét is detektáltuk. A kapott eredményeket átlagoltuk, kiszámoltuk a szórást és az adatsorok minimum és maximum értékeit is. Összesen mintegy 260 szilárdságmérést végeztünk el.

## 5. Eredmények és értékelésük

Az elemzett monzogranitos jellegű próbatestek főbb mérési adataiból az tűnik ki, hogy a mért minták testsűrűsége csak kis mértékben változik, átlagosan 2730 kg/m<sup>3</sup> körüli. Ezzel szemben az ultrahang terjedési sebesség már szélsőségesen változik (5,23 és 3,65 km/s között) és a mérési eredmények nagy szórást mutatnak (1. táblázat). Ez azt jelezheti, hogy a próbatestek közül több próbatesten belül is mikrorepedések jelennek meg. A nyomószilárdsági vizsgálatok eredményei is ezt támasztják alá, hiszen a 117 MPa-os átlagos nyomószilárdsági érték mellett a 9 MPa-os minimális és a 242 MPa-os maximális érték is mutatja, hogy a mérések során kapott értékeknek nagy a szórása. Ez összefügg a mikrorepedések és tagoló felületek megjelenésével. Erre utal egyes próbatestek törésképe is (4. ábra).

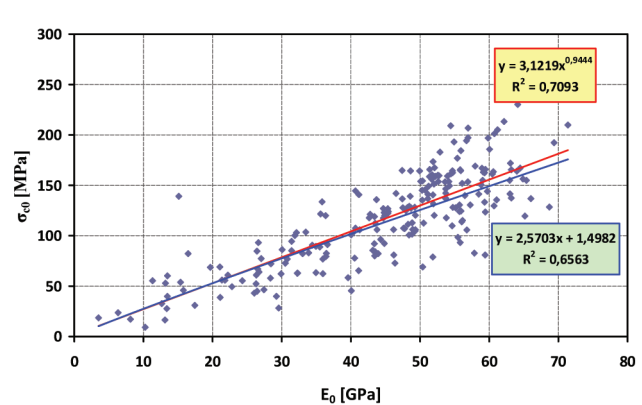
Paraméterek	Testsűrűség [kg/m <sup>3</sup> ]	Ultrahang terjedési sebesség (km/s)	Nyomószilárdság [MPa]	Rugalmassági modulus [GPa]
átlag	2729	5,23	117	45
minimum	2602	3,65	9	4
maximum	2866	6,37	242	71
szórás	57	0,59	46	15

1. táblázat: A monzogranitos minták főbb közetfizikai paraméterei



4. ábra: Egyirányú nyomószilárdság vizsgálat során tönkrement próbatest szabálytalan törésképe

A közetfizikai paraméterek közül a nyomószilárdság és a rugalmassági modulus között lehetett a legjobb korrelációt találni (5. ábra), a többi mért paraméter kevésbé korrelál, amely annak is tulajdonítható, hogy a hengeres próbatesteken belül is nagy közetfizikai változatosság volt megfigyelhető, amely magával hozza a közetfizikai tulajdonságok nagyobb szórását is.



5. ábra: Egyirányú nyomószilárdság és a rugalmassági modulus közötti összefüggés

A tagolófelület menti nyírószilárdsági vizsgálatok során nagyon érdes, kissé érdes és kalcittal bevont gránitos felületeket elemeztünk, míg az agyagos minták uralkodóan durva, mikrobreccsás és sima felületű csoportokra voltak oszthatók a felületi érdesség és a közettani jellegek alapján (6. ábra).

A tagoltság menti nyírószilárdsági vizsgálatok alapján megállapítható hogy az eltérő felületű gránitos minták belső súrlódási szöge és kohéziója igen nagy eltérést mutat. A gránitok maximális belső súrlódási szöge 19,4° és 32,4° közötti értékeket adott (Buocz és mtsai, 2011). Az egyes felület változatok közötti eltérést a 2. táblázat szemlélteti.

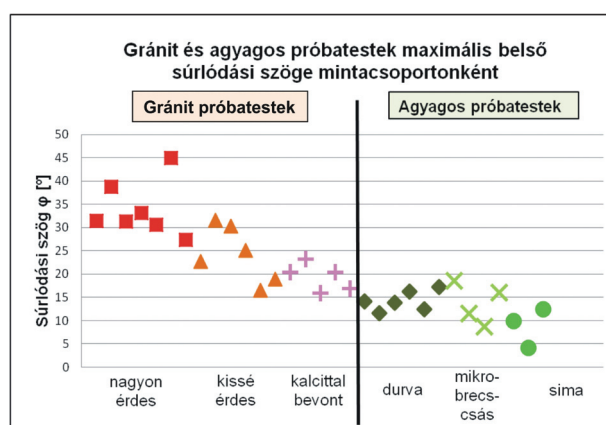


6. ábra: Érdes felületű gránit (baloldali kép) és sima felületű agyagos minta (jobboldal) nyírásvizsgálat előtt

Minta típus (felület)	$\phi_b$ [°]	c [MPa]	$\phi_{res}$ [°]
érdes	32,4	5,23	25,3
kissé érdes	27,4	3,65	23,9
kalcittal kitöltött	20	6,37	20,2
vágott	-	0,59	22,8

2. táblázat: Gránitos minták különböző típusú tagoltság menti nyírószilárdsági paraméterei (átlagértékek)

A gránit próbatesteknél külön csoportba soroltuk az olyan mintákat, amelyeknél a tagolófelületet kalcitkristályok töltötték ki. Az agyagos próbatesteknél szintén külön csoportot képzett a mikrobreccsás változat, melyben az agyag anyagában fákó fehér közettörmelék volt látható. A tagoltságot kitöltő anyag, ez esetben gránitoknál a kalcit, az agyagoknál a mikrobreccsa, alapjaiban megváltoztatta a két anyag nyírószilárdsági értékeit. Jaeger és Cook [1969] szerint a kalcit belső súrlódási szöge 8°, amely jóval alacsonyabb a gránit belső súrlódási szögénél. Így a kalcittal bevont felületű gránit próbatesteknek az alacsonyabb nyírószilárdsági értékeiből következett az alacsonyabb belső súrlódási szög is a felületi érdesség nagyságától függetlenül. Az agyagos próbatesteknél más trend látszott. Ezeknél a mikrobreccsás felület megnövelte a próbatestek nyírószilárdsági értékét, így a belső súrlódási szög nagyságát is (7. ábra).



7. ábra: Gránit és agyagos minták tagolófelület menti nyírószilárdsági vizsgálatából kapott maximális belső súrlódási szögek felület típusonként csoportosítva (nagyon érdes – sima)

## 6. Összefoglalás

A radioaktív hulladék fő befogadó kőzetként ismert monzogranitos, és a monzogranitban megjelenő agyagos repedéskitöltések egyes kőzetfizikai paramétereit meghatároztuk. A gránitos minták szilárdságvizsgálata és anyagjellemzőinek laboratóriumi meghatározása alapján a radioaktív hulladékok befogadására szolgáló kőzetkörnyezet fizikai paramétereit és azon belül nyomószilárdsága nagy szórást mutat. A testűrűség és szilárdság korrelációja nem egyértelmű, amely a gránitban előforduló mikrorepedésekre utalhat. A tagoltság menti nyírószilárdsági vizsgálataink alapján a gránitos mintákban mért belső súrlódási szög  $20^\circ$  és  $32^\circ$  között változott. Ugyanez a gránitban található töréses zónákban megjelenő kloritos agyagokra már jóval kisebb  $4^\circ$  és  $19^\circ$  közötti értéket mutatott. A vizsgálati eredményekből az is kitűnik, hogy a felületi érdesség befolyásolja a leginkább a tagoló felület menti nyírószilárdsági eredményeket. Méréseink alapul szolgálnak a tárolótér kőzetfizikai paramétereinek jobb megismeréséhez és elősegítik a kőzetváltozatokhoz köthető állékonysági problémák modellezését és a biztosítások tervezését.

## Köszönetnyilvánítás

A labormérések során segítségünkre volt Emszt Gyula, Árpás Endre László, Pálincás Bálint és Arató Péter. A mintákért és a konzultációkért köszönettel tartozunk a Mecsekérc Zrt. és Kőmérő Kft. munkatársainak. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

Balla, Z, Császár, G, Földvári, M, Gulácsi, Z, Gyalog, L, Horváth, I, Kaiser, M, Király, E, Koloszar, L, Koroknai, B, Magyar, Á, Maros, Gy, Marsi, I, Musitz, B, Rálsch, E, Rotárné, Sz. Á, Szócs, T, Tóth, Gy, Berta J, Csapó Á, Csurgó, G, Gorjánác, Z, Hámos, G, Hgyor, Z, Jakab, A, Molnis, I, Ország, J, Simoncsics, G, Szamos, I, Szébenyi, G, Szűcs, I, Turger, Z, Várhegyi, A, Benedek, K, Molnár, P, Szegő, I, Tungli, Gy, Madarasi, A, Mártonné, Sz. E, Prónay, Zs, Tildy, P, Szongoth, G, Gacsályi, M, Moskó, K, Kovács, L, Mónus, P, Vásárhelyi, B. *A felszín alatti földtani kutatás zárójelentése* 1. kötet, Magyar Állami Földtani Intézet, RHK Kft, 2008.

Buocz, I, Rozgonyi-Boissinot, N, Görög, P, Török, Á. Laboratory determination of direct shear strength of granitoid rocks; examples from host rock of the nuclear waste storage facility of Bataapáti (Hungary). *Central European Geology*, 53(4), 2011, 429-441.

Deák, F, Molnos, I, Kovács, L, Vásárhelyi B. Bataapáti radioaktív hulladéktároló építése – Geotechnikai vágatdokumentálás, *Mélyépítés*, 4(17), 2006, 7-131.

Szébenyi, G, Hámos, G, András, E, Török, P, Majoros, Gy, Szamos, I, Molnár, P, Kovács, L. *Összefoglaló értékelő jelentés a felszín alatti létesítés tervezése és a biztonsági jelentés számára*, Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft, 2009



# ÉRZÉKELŐK HÁLÓZATBAN, AVAGY HOGYAN HASZNÁLJON EGY ÉPÍTŐMÉRNÖK SOK SZENZORT?

Barsi Árpád  
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék  
barsi@eik.bme.hu

Lovas Tamás  
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék  
tlovas@mail.bme.hu

## Kivonat

Cikkünkben bemutatjuk az építőmérnöki szakterület számára ma még kevésbé ismert érzékelő hálózat kialakításának fontosabb szempontjait, elveit, majd ismertetünk egy lehetséges rendszert, amelyet szabadon lehet alakítani az igényeknek megfelelően, majd felvázoljuk a felhasználási lehetőségek gazdagságát. A kialakítási szempont felsorolásánál a szakirodalmi ismeretekre támaszkodunk, átvesszük az ott követett vezérelveket. A konkrét kutatási témában beszerzett eszköz alapján ismertetjük a vezérlő kártya lehetőségeit, néhány kapcsolt érzékelővel végzett mérésre hivatkozunk, végül értékeljük az eredményeket. Jelen írásunkkal szeretnénk felvillantani, hogy az informatikai eszközök fejlődésének köszönhetően a bekövetkezett forradalmi változások (paradigma-váltás) hogyan teszi lehetővé, sőt szükségessé ennek a mérnöki alkalmazási területnek az újragondolását.

## Kulcsszavak

érzékelő hálózat, vezeték nélküli technológia, automatikus adatgyűjtés

## 1. Bevezetés – egy kis filozófiával

Napjainkban nagyon sok szó esik arról, hogy az informatika a hétköznapiok részévé vált. Nem sokan gondoltak még bele, de ez a kijelentés igaz egyes szakmákra is, köztük az építőmérnöki szakmára is. Szakterületünkön – legyen az többek között magasépítés, híd és más műtárgyak építése, infrastruktúra-építés vagy akár földmérés és térinformatika –, mindig szükség van pontos terepi mérésekre. Egy-egy objektum, például híd megépítése alatt, sőt már azelőtt is sok mérés elvégzése szükséges. Az előkészítő felmérések a terepről adnak pontos képet, majd az építés alatt, a kivitelezés során a tervezett szerkezet „előállítás” érdekében mérünk, s az eredmények ismeretében szabályozunk a gépeken, állítunk a zsalukon stb. Majd az elkészült szerkezet ellenőrzésekor azt vizsgáljuk, hogy meghatározott teher hatására is tartja-e a kívánt alakot; végső soron azt kontrolláljuk, hogy tartós lesz-e a szerkezet.

Az eddigi gyakorlat szerint főként hagyományos, inkább geodéziai mérések történtek/történnek egy szerkezet megépítése során. A geodéziai mérések alatt például a szintezéseket, a trigonometrikus magasságmeghatározást, vagy a metszéseket (főként térbeli előmetszést) kell érteni. Természetesen a szerkezet mechanikai viselkedésének megértéséhez, ellenőrzéséhez mechanikai mérések is szükségesek. Ezek például nyúlásméréssel vagy feszültségméréssel valósíthatók meg. Adott esetben az említett szakmai mérések mellett hőmérséklet és más környezeti jellemző meghatározását is el kell végezni. A leírt megoldások közös tulajdonsága, hogy egy konkrét időpontban elvégzett, alapvetően diszkrét mérés megvalósításáról van szó. A folyamatos megfigyelés, monitoring többnyire gyakrabban ismételt, de még mindig diszkrét és adott időpontú mérések sorozata.

Az informatika, a hardverek, közöttük főként a szenzorok rendkívüli fejlődése azt eredményezte, hogy gyökeresen más mérési megközelítésre, értelmezésre, működésre/működtetésre van szükség. A technika ma már lehetővé teszi, hogy sok azonos képességű, kis energiaigényű és akár automatikus mérőeszköz, érzékelő kerülhessen a terepre, a vizsgált objektumra. Ezen érzékelők így tehát egy hálózatot is alkothatnak

(érzékelő hálózat), amelyben a kommunikáció akár vezeték nélkül is megoldható. Létrejött a vezeték nélküli érzékelő hálózat, a Wireless Sensor Network (WSN) [Römer, 2011].

## 2. Az eszközök és működésük

A vezeték nélküli érzékelő hálózatok alapelemei a csomópontok (node), amelyek ad-hoc módon szerveződnek hálózatba. A csomópontok érzékelnek, feldolgoznak és továbbítanak (kommunikálnak). Minderre egyetlen kisméretű és elérhető áru egységben kerül sor. Nemritkán a csomópontokból összeálló hálózatot éppen a rendkívül kicsiny méretű komponensei után „okos por”-nak (smart dust) nevezik.

A WSN témájában jelenleg futó érdekesebb kutatási projektek a következők [Römer, 2011]:

- UC Berkeley & Intel Research Labs: hardverkomponensek, mote-ok, operációs rendszer csomópontokra (TinyOS)
- UCLA Centre for Embedded Networked Sensing: hardver, algoritmusok, alkalmazások
- TU Berlin, TU Delft, Alcatel: EYES projekt, benne energia hatékony hálózati elemek, infrastruktúra, hálózati kommunikáció
- ETHZ, EPFL: mobil információs és kommunikációs rendszer WSN számára.

A tipikus alkalmazási kör valami(k)nek vagy valaki(k)nek a megfigyelése. Lehet ez állatok viselkedésének monitorozása, környezeti (szeizmikus, környezetszennyezési, hó- vagy talajminőségi, tűzfigyelési) megfigyelőrendszer, de akár forgalmi monitoring, behatolás- és mozgásfigyelés, vagy az ellenséges katonai tevékenységek nyomon követése. Ezekben az alkalmazásokban emiatt a gyakoribb tevékenységek a következők: eseménydetektálás, céltárgy felismerése, osztályozása és követése.

Az érzékelő hálózat műveletei három nagyobb csoportba sorolhatók:

1. Telepítés: az érzékelő csomópontok terepi kihelyezése, ami gyakran véletlen helyekre történő telepítést jelent, sokszor nem egyetlen időpontban. A művelet következtében előáll a hálózat, adott geometriai elrendezésben.
2. Érzékelés (mérés): a csomópontok végzik a megfigyeléseket, rögzítik az adatokat, esetlegesen előfeldolgozást (pl. alapszintű szűrést, konverziót stb.) követően továbbítják az adatokat.
3. Eredmények értékelése: a beérkező adatokból megtörténik az idősor elemzése, az informatív események (jelek) kiemelése után szükség szerint megtörténik az események egyesítése, fúziója.

A csomópontok jellemzői, hogy kicsik, olcsók, de sajnos nem mindig megbízhatók. Ezen fogyatékoságot a hálózatnak kell a későbbiekben kompenzálnia. A csomópontok számára többnyire korlátozottak az erőforrások, ami az energiaellátást, a számítási teljesítményt, a memóriát, a kommunikáció hatótávolságát és a sávszélességet jelenti. A hálózatban a csomópontok ad-hoc jelleggel dinamikusan szerveződnek, aminek oka többek között a lemerült elemre, áttelepítésre vagy szenzormozgásra, időleges akadályozásra vezethető vissza. A csomópontok nagy száma, sűrűsége mindenképpen különleges a hálózat szempontjából. A rendszer működése szerint nagyon lényeges, hogy a csomópontok elérhetetlen, veszélyes, mérgező körülmények között is működhetnek, a távműködés minden esetben megvalósul.

A kialakításkor meglehetősen összetett követelményrendszernek kell megfelelni:

- energia-hatékony, tartósság: csomópont szinten minimális energiafelhasználás, hálózati szempontból kiegyensúlyozottság
- önszerveződés: kiemelkedő szempontok az automatikus konfigurálás, hibatűrés, robusztusság
- skálázhatóság: nagy és változó számú csomópont alkotja a hálózatot
- biztonság: főként az étellel szembeni kritikus elvárások (life-critical), de támadások és hamis információk elleni biztonság is
- valós idejűség: a mérések tulajdonképpen azonnaliak
- személyes információk megfelelő védelme.

A konkrét rendszer tervezésekor elvként követik azt, hogy

- az algoritmusok lokalizáltak: csak a szomszédokkal történik kölcsönhatás, interakció
- az eljárások adaptívak: a kimenet szempontjából dinamikusan a terhelés, erőforrás-használat stb. szerint
- a tárolás és kommunikáció adat-centrikus: fő cél a megfigyelések előállítás, de lényeges a csomópontok helyettesíthetősége is
- „a tudás a csomópontokban”: a feldolgozás a hálózatban történik sok esetben.

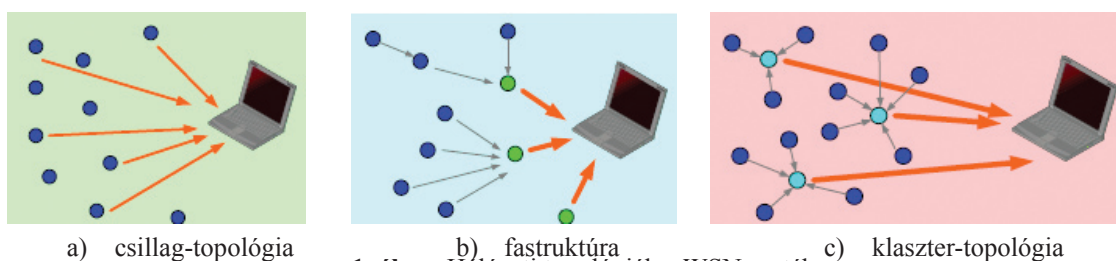
A fenti elvek mellett a hardverszemponatok (szenzorok, analóg-digitális átalakítás), a hálózati kommunikációs szempontok (pl. protokollok), az adatfeldolgozás szempontjai (pl. kalibráció, tömörítés), az operációs

rendszer szempontjai (pl. multitasking lehetősége) vagy a szolgáltatások szempontjai (pl. hely, idő, internet-elérhetőség) számítanak kulcsfontosságúnak.

A hálózatban a csomópontok elrendeződés többféle topológiát követhet:

- csillag-topológia: a területen elszórt érzékelők a közép pontban elhelyezett „gyűjtő”-számítógép felé kommunikálnak (1.a ábra)
- fastruktúrájú hálózat: az érzékelők egy-egy gyűjtőpont felé küldik a megfigyeléseket, amelyek további gyűjtőpontokra továbbítják azokat, míg végül eljut a végső gyűjtőhelyig (1.b ábra)
- klaszter-topológia: a területen elhelyezett érzékelők egy-egy csomósodási helyen oszlanak el, annak van egy gyűjtőhelye, amely a főgyűjtő felé továbbítja a megfigyeléseket (1.c ábra).

Az imént leírt háromféle topológia bemutatása látható az 1. ábrán:



1. ábra: Hálózati topológiák a WSN esetében

A topológián is látható, hogy kétféle hálózati elem működik együtt: az érzékelő elem (sensor) és a továbbító (gateway) elem. A gateway-ek rendeződése és száma alapján is lehetséges a topológia kategorizálása.

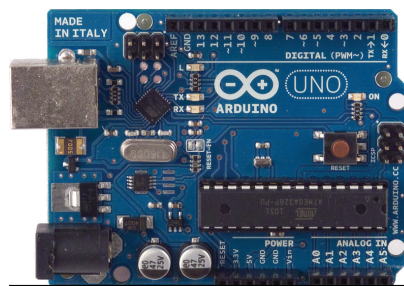
A csomópontok hardvere kialakításában többen azt a struktúrát követik, hogy egy mikrokontroller vezérli a rendszert, az végzi az esetleges számításokat (tulajdonképpen apró számítógépnek fogható fel), amelyhez csatlakoznak perifériaként a szenzorok és a kommunikációs modul. Lényeges még a tápellátó egység jelenléte is [Zhou, 2011].

### 3. Konkrét megvalósítás és az építőmérnöki alkalmazások lehetőségei

Az előző fejezetben leírtak szerint a csomópontok lényeges elemei az érzékelők, a szenzorok. A kutatási témában azt szerettük volna elérni, hogy a hagyományos építőmérnöki gyakorlattól eltérően nagyon nagy mennyiségű mérést lehessen elvégezni minél olcsóbban és természetesen minél pontosabban.

A mikrokontrollerekkel történt megismerkedésünk után nyilvánvalóvá vált, hogy ezeknek a hardverkomponenseknek az utóbbi időben végbement fejlődése lehetővé teszi célunk elérését. Az egyik ismert, szabadon hozzáférhető, „nyílt forráskódú” megoldás mellett döntöttünk.

Az Arduino nevű kontroller 2005-ös kezdés óta több generációval és mára mintegy 120 ezer eladott kártyával büszkélkedik. Egyik legutolsó fejlesztésük az Uno nevű panel, amely hasonlóan a sorozat többi tagjához Atmel AVR alapú vezérlőkártya (2. ábra).

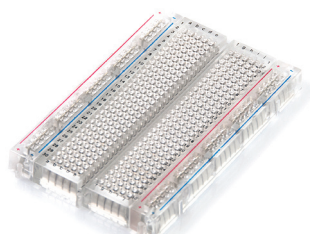


2. ábra: Az Arduino Uno mikrokontroller kártya

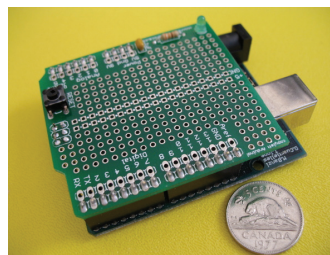
Az Uno 16 MHz-es kristályoscillátorral rendelkezik, ez határozza meg az órajelét, vagyis a sebességét. A kártyán 32 KB flash-memória található, amely az adatok és a programkódok tárolására szolgál. 6 analóg és 14 digitális bemenetet és kimenetet kezel, amelyek között kell a szenzorokat és a rádiós modulokat

számba venni. Fizikai mérete 68.6 mm × 53.3 mm. A kártya USB vezetéken vagy külső tápellátó vezetéken kaphatja meg a szükséges energiát.

A kontroller mellett a hardver fontos része a vezetékelés. Ennek megoldására, valamint a kísérleti kialakításhoz kitűnően használhatók a breadboard és prototype shield nevű „lyukacsos lapok”, amelyeken logikus elrendezésben rejtett módon kerültek kialakításra az összeköttetések. A board hordozza a panelon kívüli összes hardver komponenst, beleértve a szenzor-chipeket, vagy a rádiós modulokat.



a) bread board



b) prototype shield

**3. ábra:** Fejlesztői lapok

Az Arduino fejlesztéséhez, kezeléséhez szükséges rendszerszoftver saját integrált fejlesztői környezetben (IDE) valósul meg. A fejlesztő nyelv a C/C++ nyelvekhez hasonló, azokra is támaszkodó Wired nevű nyelv. Ebben kell az ún. sketch-eket megírni, tesztelni, majd a panelra feltölteni, ami után a mikrokontroller kártya önálló működésre képes.

A hardver további komponensei a szenzorok. Az analóg és digitális jeleket előállító, különféle fizikai elveken működő érzékelők szolgálnak a mérések elvégzésére. Mivel a későbbiekben a számítógépes feldolgozást hasznosítjuk, ezért a digitális jeleknek növekedett meg a szerepe. Az analóg mérőeszközök, vagyis az analóg szenzorok jeleit először digitálissá kell alakítani egy megfelelő átalakítóval. Szerencsére az Arduino kártyákon található egy 10 bites analóg-digitális átalakító, amely megfelelő felbontású a legtöbb gyakorlati esetben. Ennél nagyobb felbontású méréseknél a közvetlenül digitális jelet produkáló szenzorokat célszerű használni.

A szenzorok a következő fő kategóriákból választhatók:

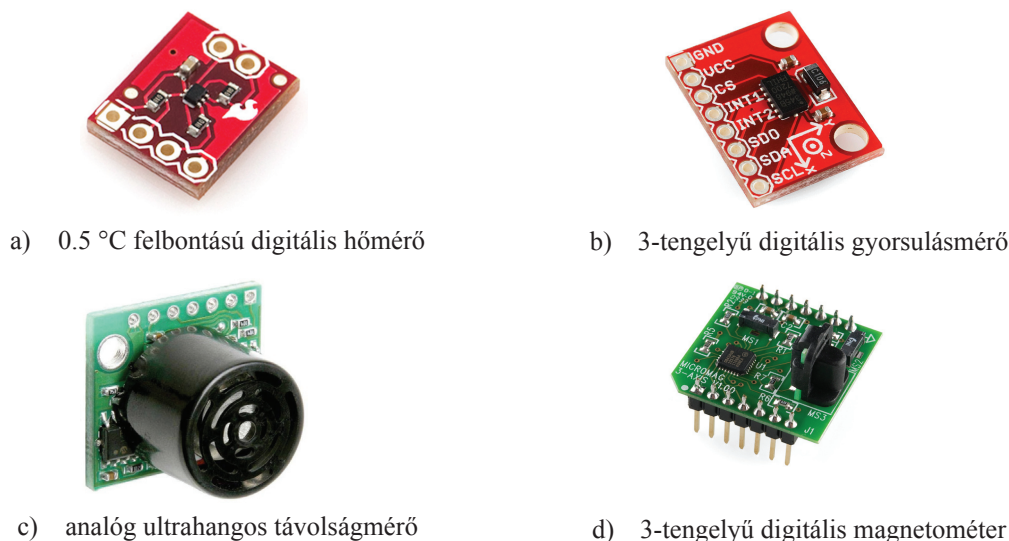
- gyorsulásmérők: 1-2-3 tengelyű berendezések
- giroszkópok: 1-2-3 tengelyű berendezések szögváltozás mérésére
- inerciális mérőegységek: a gyorsulásmérők és giroszkópok összeépítéséből létrejött komplex szenzorok
- GNSS-vevők: GPS, Glonass stb. műholdjel-vevők
- erő-, nyomás- és hajlításmérők
- hő-, légnyomás- és páratartalom mérők
- sugárzásmérők
- gázérezékelők
- távolságmérők: pontszerű és 1-2 tengely mentén pásztázó ultrahangos, infravörös hullámhossztartományban működő szenzorok
- fényerősségmérők és kamerák: látható, infravörös és ultraibolya tartományban
- magnetométerek: mágneses térerősség mérésére szolgáló eszközök
- hangérezékelők (mikrofonok)
- áramerősség-, feszültség-, ellenállás- és kapacitásmérők
- azonosítók: pl. RFID technológián alapuló olvasók, vonalkódolvasók stb.

A szenzorok esetében a már említett analóg/digitális jelleg mellett lényeges a mérési felbontás, az érzékenység, a karakterisztika, a mérési frekvencia, de fontosak a környezeti paraméterek (működési hőmérséklet, páratartalom, rázkódás stb.). Előfordul, hogy az érzékelőknek saját tápellátást kell biztosítani, ez is lényeggel bíró körülmény a használat során. A terepi kihelyezéskor számít a szenzor mérete, vastagsága, esetlegesen, hogy mekkora „védőtávolság” betartására van szükség (pl. egy magnetométer minimális távolsága nagyfeszültségű vezetéktől).

A nagyobb mennyiségű szenzor beszerzésénél lényeges, hogy az érzékelők milyen élettartamra számíthatnak a normál működés során, illetve mekkora azok bekerülési költsége (ára).

A 4. ábra néhány érdekes analóg és digitális érzékelőt mutat be.

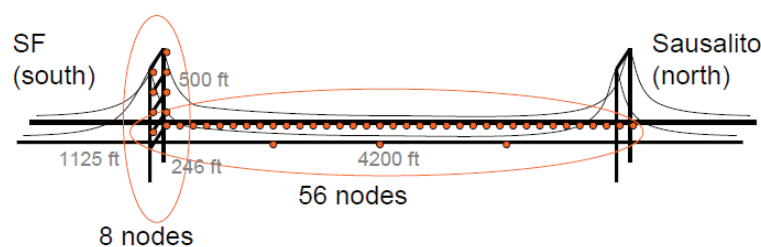
Az építőmérnöki megvalósítás számára természetesen nem minden szenzortípus alkalmas. A gyorsulásmérők azonban már korábban is szerepeltek például a hidak vizsgálatában, így azok érzékelő hálózati alkalmazása nem meglepő. Gyorsulásméréssel válik kimutathatóvá a szerkezet finom rezgése, de a lengése is. A hidak viselkedésének tanulmányozása a nagyobb számú megfigyelésen keresztül pontosabbá, könnyebbé válik. A kellően nagyszámú érzékelővel így a teljes mérnöki szerkezet egészen részletes megfigyelése történhet meg.



4. ábra: Analóg és digitális érzékelők (Sparkfun)

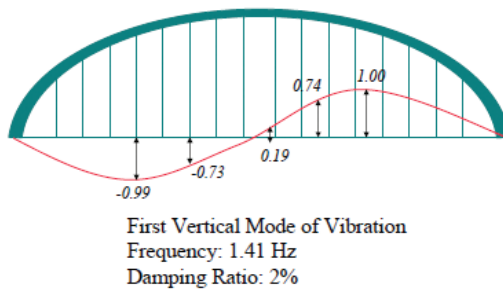
Az építőmérnöki megvalósítás számára természetesen nem minden szenzortípus alkalmas. A gyorsulásmérők azonban már korábban is szerepeltek például a hidak vizsgálatában, így azok érzékelő hálózati alkalmazása nem meglepő. Gyorsulásméréssel válik kimutathatóvá a szerkezet finom rezgése, de a lengése is. A hidak viselkedésének tanulmányozása a nagyobb számú megfigyelésen keresztül pontosabbá, könnyebbé válik. A kellően nagyszámú érzékelővel így a teljes mérnöki szerkezet egészen részletes megfigyelése történhet meg.

Kim S. és munkatársai tanulmányozták a kaliforniai Golden Gate hidat [Kim, 2006], a hálózat vázlatát mutatja be az 5. ábra. A projektben 64 csomópontból álló hálózatot alakítottak ki, amellyel 1kHz-es frekvenciával gyűjtötték a rezgési adatokat kisebb mint 10 $\mu$ s késleltetéssel és 30  $\mu$ G-s pontossággal. A rendszer kommunikációjához 441 B/s-os sáv szélességre volt szükség. A kéttengelyű gyorsulásmérők mellett hőmérőt kezeltek Crossbow MicaZ vezérlővel.



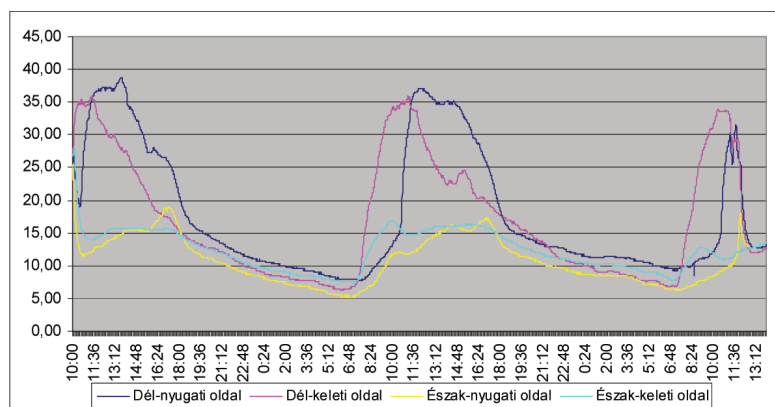
5. ábra: A Golden Gate híd érzékelő hálózata

Ugyanez a munkacsoport a Berkeley-ben található gyalogos hidat is vizsgált hasonló rendszerrel [Kim, 2007]. A 6. ábrán látható a híd alakváltozását bemutató eredmény.



6. ábra: Gyalogos híd alakváltozásának kimutatása WSN-mérések alapján

Szintén izgalmas megfigyelni, hogy a szerkezetek hőmérsékleti eloszlása milyen képet mutat, azaz a hőmérsékleti szenzorok szintén kitűnően használhatók. Munkacsoportunk a BME Z-épületének négy oldalán végzett kísérleti jelleggel hőmérséklet-megfigyelést. A hőmérsékleti idősor a 7. ábrán látható.



7. ábra: Hőmérsékleti eloszlás a BME Z-épületén

## 4. Összefoglalás

Az érzékelő hálózatok a modern informatikai eszközfejlesztés rendkívül gyorsan fejlődő területe. Az épületek, építmények tervezését követően azok kivitelezésekor, majd üzemeltetésekor nagyon sok ellenőrző megfigyelésre van szükség. Ezeknek a méréseknek az elvégzésében nyújtanak nagy segítséget az érzékelő hálózatok. Cikkünkben bemutattuk, hogy milyen szempontokra kell tekintettel lenni a kialakításkor, majd néhány gyakorlati példán keresztül megvilágítottuk az alkalmazási lehetőségeket.

## Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

- Römer, K. *Wireless Sensor Networks* <http://www.vs.inf.ethz.ch/edu/SS2003/DS/> 2011  
 Zhou, H. *Energieeffiziente, drahtlose Sensornetze* <http://www.vs.inf.ethz.ch/edu/SS2003/DS/> 2011  
 Kim, S, Pakzad, S, Culler, D, Demmel, J, Fenves, G, Glaser, S, Turon, M. Wireless sensor networks for structural health monitoring, *SenSys '06*, Boulder, Colorado, USA, 2006.  
 Kim, S, Pakzad, S, Culler, D, Demmel, J, Fenves, G, Glaser, S, Turon, M. Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks, *IPSN '07*, Cambridge, Massachusetts, USA, 2007.

# FORGALOM SEBESSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA GSM HÁLÓZAT SEGÍTSÉGÉVEL

Lovas Tamás  
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék  
tlovas@mail.bme.hu

Berényi Attila  
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék  
aberenyi@mail.bme.hu

Koppányi Zoltán  
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék  
zoltan.koppanyi@gmail.com

Barsi Árpád  
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék  
barasi@eik.bme.hu

## Kivonat

A cikk a forgalom sebességének meghatározására ismertet módszert GSM hálózat segítségével. Ehhez a GSM hálózat által szolgáltatott ún. *handover* eseményeket (cellaváltásokat) figyeljük meg és terepi mérések alapján georeferáljuk. A kapott pozíciók alapján a mobil eszköz és így közvetve a közlekedő személy vagy jármű sebessége számítható. A módszer nagy előnye, hogy nincs szükség a felhasználó által telepítendő speciális szoftverre a mobil készüléken, ugyanis az adatokat a hálózat szolgáltatja.

Cikkünk első részében bemutatásra kerül a GSM hálózat, illetve a *handover* zónákkal történő helymeghatározás. Ezután ismertetjük a *handover* mérések hibaforrásait, bevezetjük a *handover* zónák fogalmát, és ajánlásokat teszünk arra nézve, hogy milyen mérési módszert érdemes használni az adott alkalmazásokhoz.

## Kulcsszavak

GSM helymeghatározás, celluláris helymeghatározás, handover esemény, emberi mozgások vizsgálata

## 1. Bevezetés

A legtöbb helymeghatározási módszer esetén a megfigyelő álláspontjának (pozíciójának, orientációjának) meghatározása a cél valamilyen mérőeszköz segítségével. A helymeghatározási módszerek számtalan szempont szerint csoportosíthatók, egyik ilyen lehetőség a megfigyelő aktív vagy passzív szerepe alapján történő kategorizálás. Aktív mód esetén a helymeghatározás alanya rendelkezik megfelelő eszközzel, hogy pozícióját megismerje és tudatában van annak, hogy helyzete meghatározásra kerül. Felmerülhetnek azonban olyan alkalmazások, melyek használata során az alany passzív szerepet tölt be, ilyen például egy rendőrségi híváskor a hívó személy helyének beazonosítása, vagy forgalomban résztvevő járművek nyomon követése. Általánosan fogalmazva, a passzív rendszerek akkor előnyösek, ha egyének, csoportok mozgását szeretnénk megfigyelni valamilyen célból, mivel ilyen esetben a megfigyelés alanyának nem kell speciális eszközzel rendelkeznie, hogy a helyzete meghatározhatóvá váljon [Barabási, 2010].

A cikk első részében röviden bemutatjuk a GSM hálózat felépítését, majd néhány megoldást a hálózat segítségével történő passzív helymeghatározásra. Ezután ismertetjük e területen eddig elért eredményeinket.

## 2. A GSM hálózat felépítése

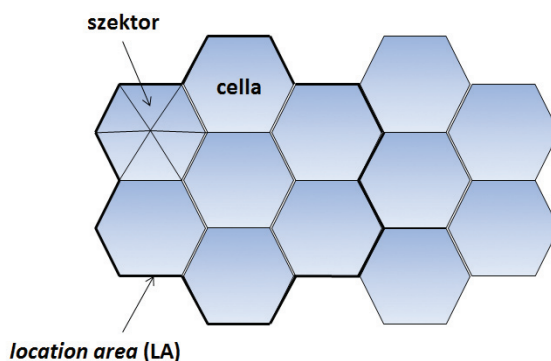
Passzív módú helymeghatározásra a GSM (*Global System for Mobile Communications*) (második generációs – 2G) mobil kommunikációs hálózat jól használható [Barabási, 2010]. A BITKOM European Information Technology Observatory (EITO) 2009-es adatai alapján, a világon mintegy 4 milliárd mobil felhasználó van, és ez a szám folyamatosan nő [http://www.hwsz.hu]. Figyelembe véve azt a tényt, hogy ezen eszközök nagy százaléka főleg a fejlett országokban élő felhasználók tulajdonában van, elmondható, átlagosan minden embernél van legalább egy mobiltelefon, és akkor az egyéb mobil eszközöket még nem is vettük számításba. Ezen mobil eszközök többsége a GSM hálózatot is képes használni.

Annak érdekében, hogy a GSM hálózat ki tudja szolgálni a felhasználókat (telefonokat), megközelítőleg ismerni kell a helyüket. Fizikai oldalról nézve a GSM hálózat legkisebb egysége a bázisállomás (BTS, *Base Transceiver System*). A bázisállomásokat egy nagyobb egység az úgynevezett BSC (*Base Station Controller*) fogja össze. A BSC-k egy még nagyobb hierarchia alá rendeződnek, melyet MSC-nek (*Mobile Switching Center*) neveznek (1. ábra). Megjegyezzük, hogy a hálózat felépítése további elemeket is tartalmaz, ám ezen cikk számára ezek említése nem lényeges [Tanenbaum, 2003].



1. ábra: A GSM hálózat vázlatos felépítése

A GSM egy celluláris hálózat (2. ábra), azaz a hálózat által lefedett terület cellákra oszlik. A cellák méretét és helyzetét a bázisállomások helyzete és technikai paraméterei határozzák meg. A bázisállomásokra legtöbbször több antennát helyeznek, így a lefedett terület szektorokra bontható. Minden szektor egyedi cella azonosítóval rendelkezik. Az egyes cellákat nagyobb logikai egységbe, ún. *location area*-ba (LA) foglalják.



2. ábra: GSM, mint celluláris hálózat

A hálózat minden eszközről nyilvántartja a pozíciójához tartozó aktuális LA azonosítóját. Amikor egy adott mobil eszköz egy másik LA-ba érkezik, a hálózati oldalon létrejövő esemény rögzítésre kerül (pl. időpont, fogadó LA azonosítója, stb.) és az adott eszközhöz tartozó LA azonosító frissül, ez az ún. *location area update*. Amikor hívást indítunk, a hálózatnak tudnia kell, hogy a hívás kérését melyik bázisállomáshoz továbbítsa. Ekkor az adott LA-ban található állomásoknak kiad egy utasítást, amellyel meghatározza az adott eszköz aktuális cella azonosítóját. Ha hívás közben az eszköz mozog, akkor a jelerősség és egyéb



más tulajdonságok (pl. felhasználók száma a cellában) figyelembevételével a hálózat dönt arról, hogy a mobiltelefon kiszolgálását egy másik szektorra, vagy bázisállomásra bízza, azaz egy másik cella területéhez fog tartozni. Ekkor a mobiltelefonhoz rendelt cella azonosító meg fog változni, ezt nevezik *handover* (HO) eseménynek, vagy röviden *handover*nek.

A GSM hálózat különböző frekvencia sávokon sugároz. Eredetileg a 890-900 MHz-es sáv tartozott a technológiához, ám később, különböző országokban, bevezetésre kerültek más sávok is (pl. 1800 MHz). A rendelkezésre álló sávokat a technológia tovább bontja 200 kHz-es csatornákra, ugyanis ennél kisebb tartományok esetén már fellép a vivőhullámok interferenciája [Küpper, 2005]. Megjegyezzük még, hogy az egyes csatornákat az időosztás elvének megfelelően, ún. *slotokra* bontják.

### 3. A GSM hálózat felhasználása helymeghatározásra

A GSM hálózat felépítésének áttekintése után felvázolunk egy megoldást arra, hogy a hálózat segítségével milyen módon lehet a forgalomban haladó eszközök (pl. autóban lévő mobiltelefonok) sebességét meghatározni.

A hálózat folyamatosan nyilvántartja a mobiltelefonok LA azonosítóját, ezért amennyiben ismerjük a LA -k térbeli helyzetét, egy adott mobil eszköz helyzete hozzávetőlegesen megadható. Ezek a területek azonban túl nagyok (több budapesti kerületnyi méretűek lehetnek) ahhoz, hogy érdemben használhatóak legyenek. Másik lehetőség, ha a telefonok aktuális cella azonosítóit vizsgáljuk. Ehhez, az előző esethez hasonlóan, ismernünk kell az egyes cellák térbeli elhelyezkedését, koordinátáit. A módszer használatának további feltétele, hogy az adott eszköz a vizsgálat idején hívást folytasson, mivel csak ekkor kerülnek tárolásra a cella azonosítók a hálózat oldaláról. Egy adott útszakaszon a forgalom sebességének vagy nagyságának meghatározásához azonban a cellák is túlságosan nagyméretűek.

Harmadik lehetőségként kínálkozik, hogy a cellaváltás eseményének helyét, vagyis a *handover* esemény helyét határozzuk meg. Ez elméletileg egy vonalszakasz, mely kijelöli a cella területét, de egy úton haladva egy pont, mely segítségével az adott eszköz helye pontosan meghatározható. Ez az elv használható *location area update* események esetén is. Természetesen ennek a módszernek is előfeltétele, hogy a mobil készüléknek hívásban kell lennie.

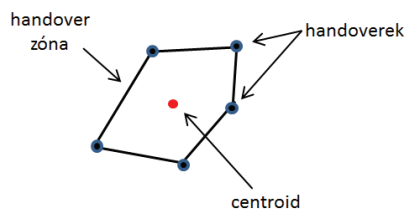
Mind a helymeghatározásra, mind a pozíciókból levezetett sebességadatokra vonatkozóan a legpontosabb eredményt a *handover* eseményekkel történő helymeghatározás kínálja, így a továbbiakban ennek lehetőségeit részletezzük.

### 4. Helymeghatározás *handover* eseményekkel

Amikor egy hívásban lévő mobiltelefon egy másik cellába kerül, bekövetkezik egy *handover* esemény, amely a GSM hálózatban rögzítésre kerül. Hálózati oldalról szemlélve egy mobiltelefon (és így közvetve a felhasználó) mozgását az egymás után következő cellaváltások írják le. Ahhoz, hogy egy cellaváltáshoz koordinátát tudjunk rendelni, az adott cellaváltás helyét előzetesen, terepi mérésekkel kell meghatározni. Ehhez egy speciális szoftvereket futtató mobil telefonra, valamint a referencia pozíciók méréséhez pl. egy GPS vevőre van szükség. A mobiltelefon cellaváltásainak időpontjait, valamint a GPS által szolgáltatott koordinátákat rögzítve meghatározhatóvá válik a *handover* esemény pontos helye.

A *handover* események segítségével létrehozható egy rendszer, mely adott útszakaszokon alkalmas a forgalom sebességének meghatározására. A rendszerben a mobil szolgáltatóktól (operátoroktól) érkező *handover* események egy szerverhez kerülnek továbbításra, mely egy adatbázisból kikeresi a korábbi mérésekből származó cellaváltás mintákat, és azt ráilleszti a hálózati oldalról érkező mintára. Amennyiben már két cellát tudunk azonosítani, a kettő közötti távolság és a rögzítési idő különbség alapján a sebesség számítható.

Az első terepi mérésekből azonban egyértelműen kiderült, hogy a *handover* események nem determinisztikusan következtek be, azaz egy útszakaszt kétszer végigmérve, a *handover* nem ugyanott következett be. Ezért a *handover* eseményekből ún. *handover* zónákat (HO zónákat) alakítottunk ki (3. ábra), mely az összes mérésre illesztett burkológörbével jellemezhető (amennyiben a *handover* események száma nagyobb, mint 2). Ekkor egy adott cellaváltáshoz a *handover* zóna centroidjának koordinátáit rendeljük.

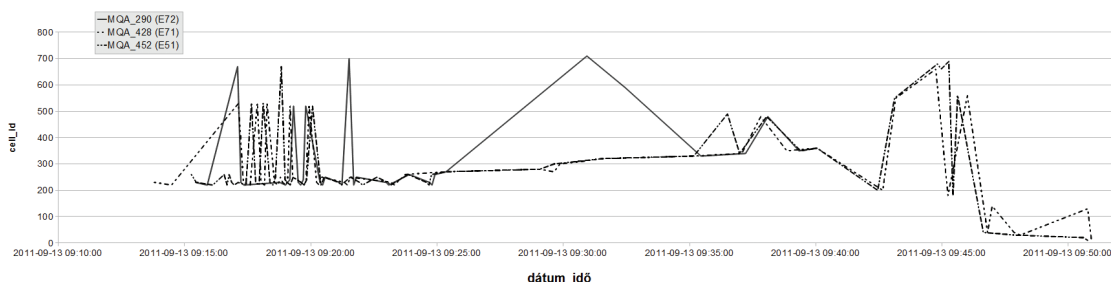


3. ábra: Egy handover zóna

## 5. Handover zónákkal kapcsolatos hibahatások

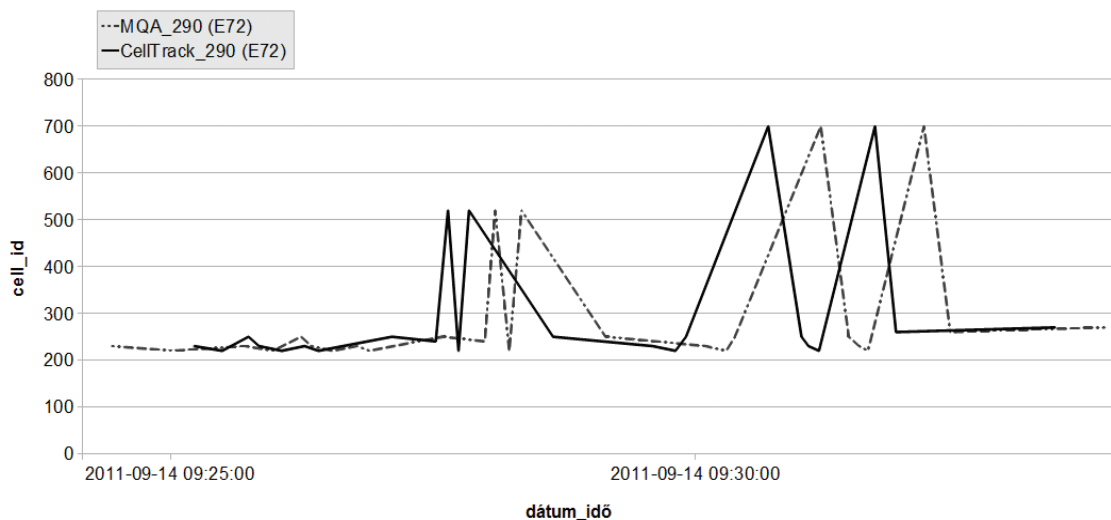
Ahogy korábban említettük, a kezdeti mérésekből kiderült, hogy az egyes cellaváltások nem determinisztikusan következtek be egy adott helyen. Ezzel kapcsolatban a következő vizsgálatokat végeztük:

- Mobil telefon típusának vizsgálata: a mérésekből kiderült, hogy a különböző típusú mobiltelefonok más-más cellákat érzékelnek. Ezzel kapcsolatban három különböző mobil típust elemeztünk: egy Nokia E52-t, mely egy régebbi eszköz, egy Nokia E72-t, ami egy újabb generációt képvisel, és egy Android operációs rendszerrel rendelkező, új HTC Wildfire mobiltelefont. Egy mérés eredményeit mutatja a 4. ábra, ahol három különböző színnel jelöltük a három mobil eszköz érzékeléseit. Ideális esetben a három vonallancnak tökéletes fedésben kellene lennie, azonban azt tapasztaltuk, hogy bár a trend hasonló, az eltérések relevánsak. Azaz nem jelenthetjük ki azt, hogy mindhárom mobiltelefon ugyanazokat a cellákat érzékelt, mint ahogy azt sem, hogy a cellaváltások egy időben következtek be.

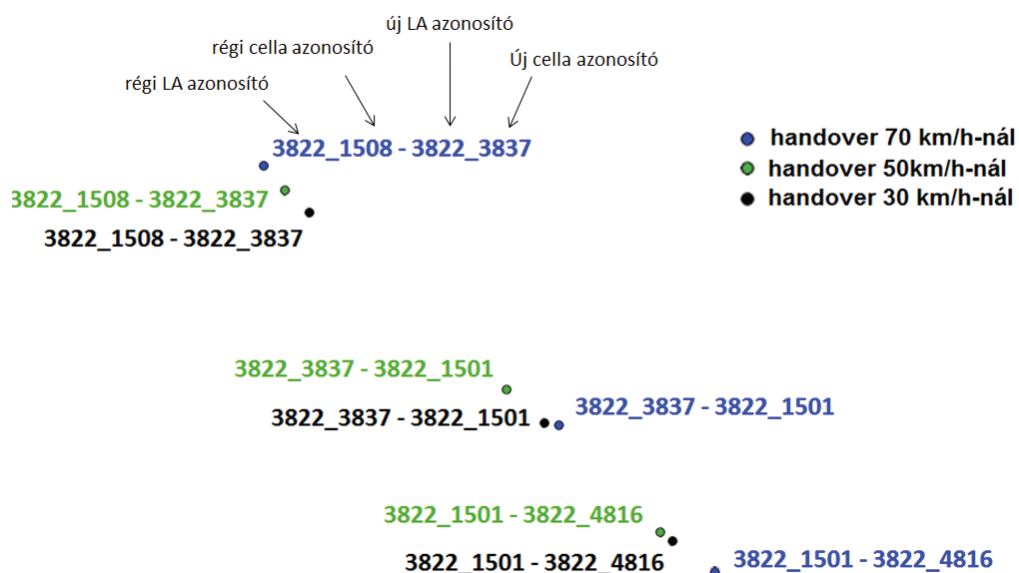


4. ábra: Mobil telefon típusok összehasonlítása

- Rögzítő szoftver vizsgálata: mivel a cellaváltásokat a vizsgálat során nem tudtuk hálózati oldalról megfigyelni, ezért a mobil telefonokra telepített, a cellaváltásokat rögzítő programokat kellett alkalmaznunk, ezen belül két szoftvert vizsgáltunk. Az egyik a Nokia Siemens Networks MQA (Mobile Quality Analyzer) rendszerének kliens programja. Ezt a szoftvert eredetileg azzal a céllal készítették, hogy a mobil telefonokról különböző információkat gyűjtsön és azokat egy dedikált szervernek elküldje. Mivel a mobil telefon a cellaváltásait is rögzíti, számunkra jól használható a *handover* zónák méréséhez. A vizsgálatban résztvevő másik program a CellTrack nevű szoftver volt, mely egy ingyenes, nyílt forráskódú alkalmazás. Az összehasonlítást a 5. ábra mutatja: jól látható, hogy a két program közel azonos cellákat rögzített, de az időbeli eltérésük jelentős (2 és 30 másodperc közötti). Amennyiben autóval közlekedünk, egy ilyen nagyságrendű késés jelentős hibát okozhat a helymeghatározásban.
- A sebesség hatása a cellaváltásokra: amennyiben méréseinket autóval végezzük, feltételezhető, hogy a cellaváltások helyei különbözőek lesznek a sebesség függvényében. Ha gyorsabban megyünk, akkor a cellaváltás később kerül tárolásra a mobilkészülékben, mint ha lassabban haladnánk. Ennek bizonyítására három különböző sebességgel mértünk a Hungária körúton. A mobil telefon típusa, és a rögzítő program mindegyik esetben azonos. A mérések eredményét a 6. ábra mutatja, amely alapján kijelenthető, hogy az ábra alapján a fenti hipotézis nem helytálló. Jól kivehető olyan eset, amikor a 70 km/h-es cellaváltás korábban történt, mint a 30 km/h-es esetben, illetve fordítva. Ha létezik is ilyen hatás, az valószínűleg a többi hibahatás miatt nem érzékelhető, illetve nem elkülöníthető.



5. ábra: Rögzítő szoftverek összehasonlítása



6. ábra: Sebesség hatása a cellaváltásokra

## 6. Mérés módszere

A fentiek alapján meghatároztuk, hogy egy vizsgálandó útvonalat többször és különböző irányokból is meg kell mérni, mert a két irány cellaváltásai nem feltétlenül egyeznek meg. Ezen kívül szükséges különböző típusú mobil telefonok használata is, mivel az előzetes mérésekből kiderült, hogy adott helyzetekben más-más cellákat érzékelnek. Szükséges továbbá többfajta rögzítő program használata is, melyeket főleg az eredmények összehasonlításra érdemes használni. Ezen kívül a *handover* események bekövetkeztének a helyét külső GPS vevő segítségével tanácsos meghatározni, ugyanis az pontosabb helymeghatározást tesz lehetővé, mint a telefonokba épített GPS. Ahhoz, hogy a GPS vevő, és a rögzített adatok illesztését el tudjuk végezni, az eszközök óráit szinkronizálni szükséges, ugyanis az időbélyegek alapján történik a cellaváltások és a koordináták párosítása.

A fentieknek megfelelően több mérést is végeztünk a Hungária körúton különböző napszakokban, különböző sebességek mellett. További igényként jelentkezett, hogy egy *handover* zónát sokszor,

különböző napszakokban megmérjük, hogy a forgalom hatására (azaz az adott cellákban bejelentkezett mobil eszközök számára) is következtetni tudjunk. Ennek során a Kálvin tér közelében egy rövid utca szakaszon végeztünk nagyszámú mérést.

## 7. Mérések feldolgozása

A mérések feldolgozásához a különböző rögzítő szoftverekből származó adatok adatbázisba töltésére egy Java programot készítettünk. Az adatok kezeléséhez az ingyenes PostgreSQL adatbázis kezelő rendszert, illetve az adatok térinformatikai elemzését támogató PostGIS szoftvercsomagot használtuk. A megjelenítéshez az ugyancsak ingyenes QGIS térinformatikai program állt rendelkezésre. A mérési eredményeket feldolgozó függvények és eljárások az adatbázisban PL/SQL nyelven készültek el. A próba rendszerben a *handoverek* adatbázisa ezen technológiák segítségével került kialakításra.

## 8. Összefoglalás

A GSM hálózatban a cellaváltások helyeinek, az ún. *handover* események a mérése és az azokból alkotott zónák térképezése segítségével a mobil eszközök (pl. mobiltelefonok, hordozható számítógépek) helye meghatározható. Vizsgálataink során feltérképeztük a helymeghatározást befolyásoló hatásokat és meghatároztuk azok pontosságát befolyásoló tényezőit és azok mértékét.

Az egyik magyarországi szolgáltató hálózatában méréseket végeztünk a különböző típusú hardver és szoftver eszközök, az utazási sebesség, a többszörös mérések, valamint a cellák leterheltségének hatásai elemzése céljából. Az eredményeket térinformatikai adatbázisok és szoftverek segítségével vezettük le és értékeltük.

A vizsgálatok eredményeként a forgalom sebességének meghatározásán túl olyan alkalmazások válnak megvalósíthatóvá, mint a komplex forgalmi mozgásminták levezetése, tömegközlekedési eszközön utazók követése, vagy éppen forgalmi gócpontok felderítése. Az eddigi és a még folyamatban lévő kutatások várható eredményei kiemelkedő példái a mobil kommunikációs, a közlekedésmérnöki és az építőmérnöki szakterület hatékony együttműködésének.

## Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

Barabási, A. L. *Villanások – a jövő kiszámítható* Nyitott Könyvműhely, 2010, 300 p.

Küpper, A. *Location-Based Services: Fundamentals and Operations* John Wiley and Sons, Ltd, 2005, 365p.

Tanenbaum, A. S. *Számítógépes-hálózatok* Panem, 2003, 939p.

<http://www.hwsz.hu/hirek/42646/mobiltelefon-penetracio-felhasznalok-szama-novekedes-bitkom-eito-kina-india-3g.html>, 2011

# HULLADÉKLERAKÓK GEOTECHNIKAI KÉRDÉSEI

Farkas József  
Geotechnikai Tanszék  
jofarkas@mail.bme.hu

Pusztai József  
Geotechnikai Tanszék  
pusztai@mail.bme.hu

## Kivonat

A hulladéklerakók megfelelő hely kiválasztása, üzemeltetése, műszaki kialakítása illetve hasznosítása aktuális kérdés hazánkban, az Európai Unióban és világviszonylatban is. A háztartási hulladékok legnagyobb részét (közelítőleg 54 %-át) Magyarországon - a világ legtöbb országához hasonlóan - hulladéklerakókban helyezik el. A városiasodás, a gazdaság fejlődése és az életszínvonal jelentős javulása a hulladékok mennyiségének ugrásszerű emelkedését vonta maga után. A hulladék mennyiségének növekedése a telekárak emelkedésével párosulva arra készítette a szakembereket, hogy a meglévő lehetőségeiket jobban kihasználva nagyobb, mélyebb és meredekebb rézsűjű lerakókat alakítsanak ki. A lerakók méreteinek változása nagyobb nyírófeszültségeket okoz a hulladéktestben, aminek következtében nagyobb nyírószilárdságnak kell mobilizálnia. A lerakók hosszú távú viselkedésének modellezése során azok alakváltozásait kiemelt fontossággal vizsgáljuk, hiszen a beépítésre kerülő gázutak, csurgalékvíz elvezető és monitorozó rendszerek, illetve lefedések telepítési költsége jelentős, azok folyamatos megfigyelése és karbantartása szükséges. Szükséges tehát a hazai viszonyokra érvényes tervezési alapelvek megfogalmazása, a hazai hulladékok állapotának felmérése és a nyírószilárdsági paraméterek meghatározása.

## Kulcsszavak:

nyírószilárdság, hulladék, degradáció, összetétel, állékonyság

## 1. Bevezetés

Környezetünk védelme, állapotának megóvása kiemelkedő fontosságú kérdés napjainkban. A mérnöki tervezés is mindinkább környezettudatos, hiszen az egyes létesítmények tervezése során mi mérnökök is felelősséggel tartozunk az „egészséges” feltételek biztosítását illetően. Mindez különösen igaz hulladéklerakók tervezése, létesítése során, amikor sok esetben a környezetre potenciálisan – kisebb-nagyobb mértékben - ártalmas anyagok elhelyezésére kell megfelelő műszaki megoldást találnunk úgy, hogy a környezetszennyezés veszélyét a minimálisra csökkentsük. A szemét heterogén szerkezete teszi igen nehezzé a vizsgált anyagok mérnöki modellezését. Az egyes minták kora, térfogatsúlya, szortírozottsága, tömörítettsége jelentősen befolyásolják a vizsgált hulladék mechanikai tulajdonságait [Lamborn, 2009]. Mindazonáltal a hulladékok jellemzőinek alapos ismerete szükséges annak érdekében, hogy azok mechanikai tulajdonságait időben becsülni tudjuk [Szabó, Zimler, 2003]. Korábban számos külföldi kísérlet történt ezen jellemzők meghatározása, hazánkban azonban a helyi hulladékra vonatkozóan csak becslések léteztek. A nemzetközi gyakorlat által alkalmazott módszerek a laboratóriumi kísérletek, helyszíni vizsgálatok és a back- analízis. A laboratóriumi kísérletek közül közvetlen nyírással, illetve triaxiális kísérlettel határozták meg a nyírószilárdsági paramétereiket. A helyszíni vizsgálatok során lehetőség nyílik zavartalan mintavételre, a hulladék lerakott állapotban való megvizsgálására és nagy modell kísérletek elvégzésére is. A kísérletek azonban csak bonyolult és igen költséges berendezésekkel végezhetőek el, így azokat csak ritkán alkalmazzák [Dixon és mtsai, 1999]. A back analízis során korábban bekövetkezett csúszásokat, tönkremeneteleket modellezünk és visszaszámítjuk az események ismeretében a hulladéktest talajfizikai

paramétereit [Blight, 2006]. A valóságban lejátszódott események vizsgálatakor a csúszólap helyének az ismeretében következtetni tudunk a tönkremenetel jellegére, a gyenge síkok helyzetére is. Kutatásunk célja a hulladéklerakók megfelelő műszaki kialakításához szükséges geotechnikai paraméterek meghatározása.

## 2. Hulladékok laboratóriumi vizsgálatai

### 2.1 Víz- és szervesanyag tartalom meghatározása

A laboratóriumi feldolgozás során első lépésben a hulladékot 16 mm-nél kisebb és annál nagyobb „szemcseátmérőjű” frakciókra bontottuk szét szitálással. A 16 mm-nél kisebb szemcseátmérőjű anyagokat a nemzetközi gyakorlat „talaj jellegű” alkotórészként nevezi el [Zekkos, Bray, Reimer, 2006]. A hulladék e csoportját a szokásos talajmechanikai módszerekkel tudjuk vizsgálni, azaz meghatározzuk a víztartalmát, szervesanyag tartalmát és szemeloszlási görbét. A vizsgált minták szervesanyag tartalmát és víztartalmát az 1. táblázat mutatja. A minták víztartalma a hulladék degradációja során folyamatosan növekszik, ezáltal egy mért víztartalomról jól közelítő becslést adhatunk a minta bomlási állapotára is. A hulladék lerakását követően annak víztartalma azonnal nőni kezd, mivel egyes alkotórészek –mint a papír vagy a textil – adszorpciós úton vizet kötnek meg. A hulladék víztartalmát annak kora, az időjárás alakulása, hirtelen csapadékosabb időszakok és az évszakok változása is jelentősen befolyásolja. Mindazonáltal megállapítható, hogy a hulladék víztartalma a felszín közelében a legkisebb, majd a mélységgel folyamatosan növekszik. A bomlási folyamat során a víztartalom szintén jelentősen növekszik. Vizsgálati eredményeink jó egyezőséget mutatnak korábbi szakirodalmi adatokkal is.

Minta neve (degradációs foka)	Víztartalom (%)	Szervesanyag tartalom(%)
A (1)	32,3	63,8
B (1)	35,7	56,4
C (1)	29,5	50,1
D (2)	45,6	42,5
E (2)	54,6	40,9
F (2)	57,8	37,5
G (3)	88,5	32,6
H (3)	84,2	35,9
I (3)	79,6	35,7
J (4)	106,7	29,4
K (4)	95,7	25,6
L (4)	103,8	27,2
M (5)	121,4	18,9
N (5)	115,6	23,6
O (5)	118,9	15,3

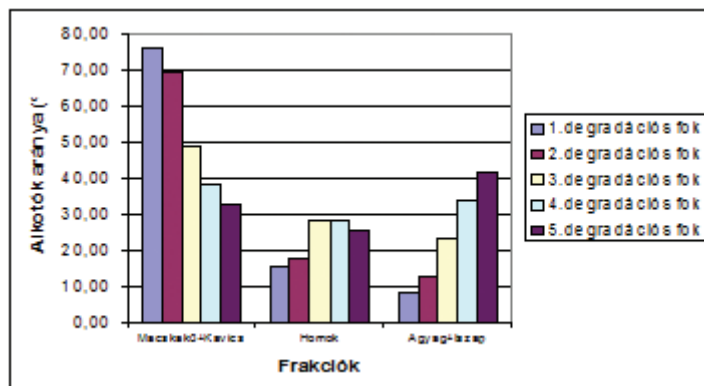
1. táblázat: A vizsgált hulladékminták víztartalmának és szervesanyag tartalmának alakulása az egyes degradációs fázisok esetén

A hulladék szervesanyag tartalmának változása jelentősen befolyásolja annak mechanikai tulajdonságait. A hulladék szervesanyag tartalma a degradáció folyamán csökken, azaz mélyebben kisebb szervesanyag tartalmat tapasztalunk, mint a felszín közeli, frissen lerakott hulladék rétegekben, amelyek még az első bomlási szakaszban vannak. A degradáció folyamán leghamarabb a szerves alkotók bomlanak le, a hulladék vázszerkezete megváltozik, tömörsége megnő. Jelen kutatásban is a szervesanyag tartalom csökkenését tapasztaltuk a bomlás előrehaladtával.

### 2.2 Szemeloszlás meghatározása

A vizsgált hulladékminták szemeloszlását a hagyományos talajmechanikai módszerekkel határoztuk meg. Látható, hogy az egyes bomlási szakaszokban a szemeloszlási görbe egyre feljebb tolódik, az egyes szitákon egyre több „szemcse” fér át, ami az alkotók elaprózódásával magyarázható. A degradáció alatt egyes

alkotók apróbb darabokra törnek szét, mások lebomlanak vagy gázzá, és folyadékká alakulnak, a hulladék tömörebb lesz. A bomlás tehát a szemeloszlási görbe jelentős eltolódását eredményezi. Az eredmények könnyebb kiértékelése érdekében a macskakő+kavics frakciót (durva szemcsék) és az agyag+iszap frakciót (finom szemcsék) összevonva ábrázoltuk az eredményeket, melyet az 1. ábra mutat be.



1. ábra: Az összevont frakciók arányának alakulása a bomlási folyamat során

Ez a felosztás szemléletesen mutatja a hulladék szemcseméretének változását a degradáció alatt. A durva szemcsék aránya 76%-ról 33%-ra csökkent, míg a finom szemcsék aránya 8%-ról 42%-ra emelkedett. A homok jellegű alkotók aránya 16-26% között változott, itt jellemző tendencia nem volt megfigyelhető. A fentiek alapján megállapítható, hogy egy adott hulladékminta szemeloszlási vizsgálatával az adott minta bomlási foka jól becsülhető. Természetesen a szemeloszlást elsősorban a minta összetétele, a lerakott hulladék jellege, az előválogatottság foka és a lakosság fogyasztási szokásai alapvetően befolyásolják, de a hazai viszonyokra a jelenleg alkalmazott lerakási technológiák mellett ez az eljárás megfelelő közelítést ad.

### 2.3 Hatékony térfogatsúly meghatározása

A vizsgált hulladékok térfogatsúlyát szintén az EUROCODE alapján határoztuk meg. Az eredményeket a 2. táblázat foglalja össze.

Minta neve (degradációs foka)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
A (1)	7,98
B (1)	8,42
C (1)	8,13
D (2)	8,76
E (2)	8,50
F (2)	9,11
G (3)	9,44
H (3)	9,23
I (3)	9,85
J (4)	10,31
K (4)	10,11
L (4)	10,28
M (5)	11,20
N (5)	11,02
O (5)	10,70

2. táblázat: Hulladékminták térfogatsúlya

A hulladék térfogatsúlya a bomlási folyamat során fokozatosan növekedett, ami az apróbb alkotók töredezésével, a tömörödéssel, a szerves anyagok átalakulásával magyarázható. Ez a folyamat tehát a vázszerkezet tömörödését idézte el. A laboratóriumban kis mintákon mért értékek jó egyezőséget mutatnak a hulladéklerakó egészére vonatkozó adatsorral.

## 2.4 Hulladék összetételének meghatározása

A 16 mm-nél nagyobb szemcseátmérőjű alkotórészeket kézzel válogattuk szét anyaguk szerint. Ez alapján papír, műanyag, fa, kavics fém, textil, és egyéb kategóriákat különböztettünk meg. A vizsgált lerakó korától, helyétől, a behordó terület gazdasági fejlettségétől és a lakosság vásárlási szokásaitól függően a hulladék összetétele széles skálán változik. A vizsgálatok eredményei alapján a 16 mm-nél kisebb szemcseátmérőjű hulladék csoport tömege jellemzően a minta tömegének 40-70 %-át jelentette. A 3. táblázat öt eltérő degradációs állapotú minta összetételének alakulását mutatja.

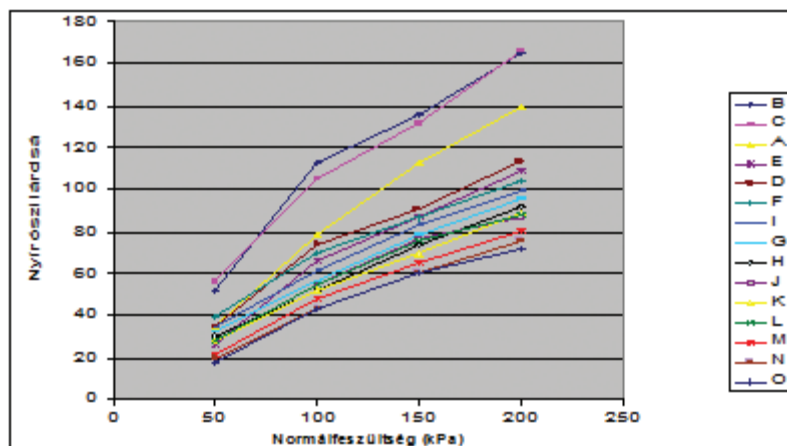
	A (1)	D(2)	G(3)	L(4)	N(5)
16 mm-nél kisebb alkotók	42	49	59	62	66
Papír	20	18	11	8	5
Műanyag	15	16	18	19	21
Fa	2	2	1	1	1
Kavics	5	4	3	3	2
Fém	2	2	2	2	2
Textil	7	6	3	3	1
Egyéb	7	3	3	2	2

3. táblázat: Különböző hulladék típusok tömegszázalékos aránya a vizsgált mintákban

A diagramon jól látható, hogy a bomlás előrehaladtával a papír jellegű alkotók tömegszázaléka jelentősen csökkent, míg a 16 mm-nél kisebb szemcseátmérőjű részek aránya növekedett. A megvizsgált minták esetében a papír, a műanyag és a 16 mm-nél kisebb alkotórészek alkották a minta nagy részét. A fa alkotórész aránya minimális volt, ami az előválogatásnak és a komposztálásnak a következménye. A kavics és fém alkotók alacsony aránya szintén a részleges előválogatásnak az eredménye.

## 2.5 Hulladékok nyírószilárdsági paramétereinek meghatározása

Jelen kutatási folyamatban 15db nagy nyírókísérletet végeztünk 500 x 500 x 400 mm-es nyíróládában a feltárt hulladék fi-c-jének meghatározására. A vizsgált minták beépítése az amerikai javaslatok alapján történt. Első ütemben a helyszíni viszonyoknak megfelelő hulladék összetétel elérése érdekében a 16 mm-nél kisebb és nagyobb alkotórészeket a fűrés során meghatározott tömegszázalékban kevertük össze, figyelembe véve az egyes anyag típusok arányát is. A minta beépítését a feltárás során meghatározott víztartalom mellett végeztük el. A nemzetközi gyakorlatnak megfelelően a maximális alkotórész mérete nem haladhatta meg a mérőeszköz méretének 1/6-od részét, azaz a 8,3 cm-t. Vizsgálataink során 50-100-150-200 kPa normálfeszültség mellett végeztük el a kísérleteket. Az egyes mérések alkalmával –a korlátozott alakváltozási lehetőségek miatt- a minták nem érték el a törési állapotot, ami a hulladék jellegéből fakad és a szakirodalmi adatok is hasonló tapasztalatokról számolnak be. Az eredményként kapott nyírószilárdság értékeket a normálfeszültségek függvényében a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: A nyírószilárdság alakulása a normálfeszültségek függvényében



Mint látható, a bomlási folyamat előrehaladtával az adott normálfeszültségekhez tartozó nyírószilárdság értéke jelentősen, akár harmadára csökken, azaz a hulladéktest „teherbírása” a degradáció folyamán romlik. Minden vizsgált esetben meghatároztuk a minták belső súrlódási szögét ( $\varphi$ ) és kohézióját ( $c$ ), amelyet a 4. táblázatban foglaltunk össze.

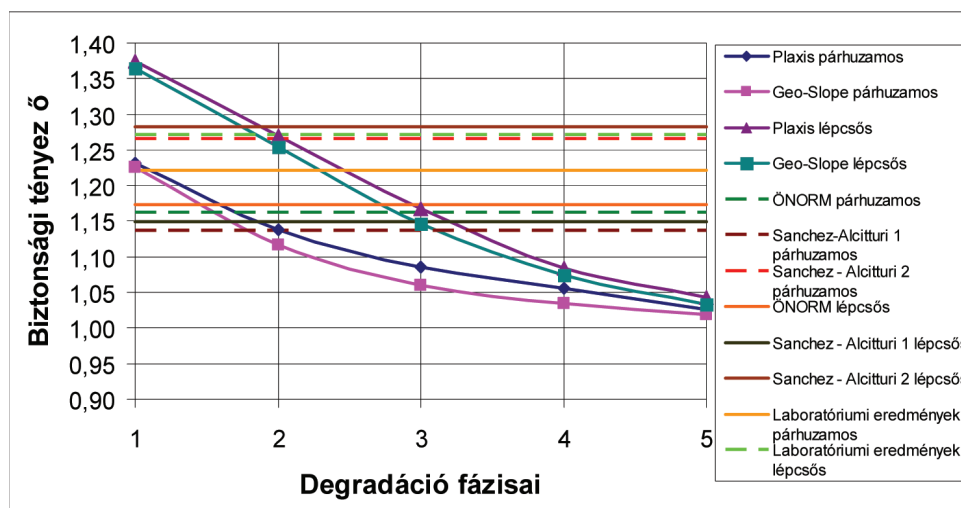
1. állapot	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
$\varphi(^{\circ})$	34,86	35,99	35,42
$c(kPa)$	4,31	25,74	26,15
2. állapot	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
$\varphi(^{\circ})$	26,78	28,4	22,92
$c(kPa)$	15,17	4,4	22,13
3. állapot	<b>G</b>	<b>H</b>	<b>I</b>
$\varphi(^{\circ})$	23,08	22,35	23,46
$c(kPa)$	12,68	10,59	15,67
4. állapot	<b>J</b>	<b>K</b>	<b>L</b>
$\varphi(^{\circ})$	21,49	21,74	21,92
$c(kPa)$	12,28	9,87	11,29
5. állapot	<b>M</b>	<b>N</b>	<b>O</b>
$\varphi(^{\circ})$	21,09	20,32	19,77
$c(kPa)$	5,47	3,69	3,44

4. táblázat: A belső súrlódási szög és a kohézió alakulása az egyes bomlási állapotokban

Az eredmények alapján látható, hogy a hulladék súrlódási szöge és kohéziója is csökkent a degradáció folyamán.

### 3. Hulladéklerakók állékonyság vizsgálata a degradációs fok figyelembe vételével

Végeselemes vizsgálataink során a bomlás egyes szakaszainak figyelembe vételével végeztük el egy lerakó állékonyságvizsgálatát [Czap és Varga, 2010]. A hulladéktestet az öt bomlási fázisnak megfelelően öt rétegre osztottuk, melyek talajfizikai jellemzőit a bomlási folyamat előrehaladtával folyamatosan módosítottuk.



3. ábra: A biztonsági tényező alakulása a degradáció során

Az eredmények ismeretében megállapítható, hogy a szakirodalmi ajánlások alapján meghatározott biztonsági tényező értékek a 2-es, 3-as degradációs fázishoz tartozó értékekhez közelebbiek. A lebomlás előrehaladtával a szakirodalmi adatoknál kisebb biztonság alakulhat ki, ami a hulladéktest állékonyságát veszélyezteti (3. ábra).

Az eredmények alapján javasolható, hogy a lerakók ellenőrzései során azok állékonyságát a degradációs állapotok figyelembe vételével határozzák meg, hiszen a friss hulladéktestre vonatkozó talajfizikai paraméterek használata hibásan nagy biztonsági tényező értéket ad, ami akár nem várt tönkremeneteleket is előidézhet. A szakirodalmi ajánlásokat minden lerakóra egyedileg értelmezve, józan mérnöki megfontolások mellett alkalmazzuk.

#### 4. Összefoglalás

Jelen kutatás lehetőséget nyújtott arra, hogy a hulladéklerakók tervezéséhez, az állékonyságvizsgálatok elvégzéséhez, a hazai hulladékokra jellemző talajfizikai paramétereket használhassunk, amely gazdaságosabb depóniatest kialakításokat tesz lehetővé. Kutatásunkhoz csak egy hulladéklerakóból tudtunk mintát venni, amelynek összetétele természetesen nem feltétlenül egyezik meg minden hazai lerakó esetén. Mindezek miatt javasolt a vizsgálatokat több hazai lerakóból vett mintákon elvégezni. Az eredmények segítségével, meredekebb rézsűszöggel kialakított depóniatestek tervezhetőek, amelyek nagyobb lerakott hulladékmennyiséget eredményeznek adott alapterületen és jelentős gazdasági hasznot is jelentenek. Az újabb geometriai kialakítások újabb zárószigetelő rendszerek kialakítását igényli, amely a későbbiekben egy újabb kutatás tárgyát képezhetné.

#### Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

#### Irodalom

- Blight, G. E. A survey of lethal failures in municipal solid waste dumps and landfills, *Proceedings of 5th International Congress on Environmental Geotechnics*, Thomas Telford, London, 2006, 13-42.
- Dixon, N, Jones, D. R. V, Whittle, R. W. Mechanical properties of household waste: In-situ assessment using pressuremeter, *Proceedings of 7th International Waste Management and Landfill Symposium*, Sardinia, 1999, 453-460.
- Lamborn, J. Characterisation of municipal solid waste composition into model inputs. *Proceeding of 3rd Hydro-Phisico-Mechanics of Wastes*, 3rd International Workshop, Germany. 2009
- Szabó, I, Zimler, T. *Hulladékgazdálkodás* Budapest: TERTIA Kiadó Bt, 2003:
- Varga, G, Czap, Z. Hulladéklerakók vége-seleemes vizsgálatai. *GTM (Gazdasági Tükörkép Magazin)*, X(3), 2010, 52-53.
- Zekkos, D. P, Bray, J. D, Reimer, M. F. Shear modulus reduction and material damping relations for municipal solid waste. *Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, CA, USA. 2006, Paper No.1324.

# ACÉLSZERKEZETI KORRÓZIÓ HATÁSÁNAK MODELLEZÉSE

Oszvald Katalin  
Hidak és Szerkezetek Tanszék  
oszvaldkata@gmail.com

Dunai László  
Hidak és Szerkezetek Tanszék  
ldunai@epito.bme.hu

## Kivonat

Szögacélból készült szerkezeti elemeket elterjedten alkalmaznak légköri korrózióknak kitett magas- és hídépítési rácsos szerkezetekben. A cikkben ismertetett kutatás tárgya korrózió miatt károsodott szögacélok stabilitási viselkedése és teherbírása. Kísérleti és numerikus vizsgálatokat végeztünk, annak érdekében, hogy megismerjük a különböző megjelenési formájú korróziók hatását. Vizsgálatainkban a korrózió változatos megjelenése miatt több paraméter hatását is elemeztük, mint például a korrózió nagysága (vastagsága), a korrózió kiterjedése és a korrózió elhelyezkedése. A laboratóriumi kísérleteink során a korróziót mesterséges vastagságsökkenéssel modelleztük. A vizsgált próbatestek eltérő megjelenésű és nagyságú korróziót modelleztünk. A kísérleti eredményeket a korrodálatlan elemhez viszonyítva értékeltük, valamint összevetettük a különböző módon korrodált elemekre kapott eredményeket. A kísérleti eredmények alapján numerikus modellt fejlesztettünk. A verifikált modellel végrehajtott analízissel a kísérleteinket kiterjesztettük további korrózió által károsodott szögacélok vizsgálatára. A nagyszámú numerikus vizsgálat alapján gyakorlatban használható méretezési eljárás dolgozható ki, mely alkalmas szögacélok tervezési ellenállásának meghatározására.

## Kulcsszavak

korrózió, szögacél, nyomott rúd, stabilitás

## 1. Bevezetés

### 1.1. Probléma felvetés és célkitűzés

A korrózió világszerte jelentős problémát okoz az építőiparban. A nem megfelelő, esetenként teljesen hiányzó, fenntartásnak jelentős szerepe van szerkezetek korrodálódásában. A halmozódó korróziós károsodás az idő múlásával olyan jelentős mértékű keresztmetszet csökkenést okozhat, ami tönkremenetelhez vezethet. Hazánkban a hidak, a szabadon álló és a földbe helyezett műtárgyak vannak leginkább kitéve a korrózióknak. Az utóbbi időben számos híd került felújításra hazánkban, ahol jelentős korróziós károsodásokat lehetett tapasztalni. Egyik példaként lehet megemlíteni az 1. ábra baloldali képén látható korrodált elemet, ami a Margit híd egyik szélrács elemét mutatja. Az 1. ábra jobboldalán egy felújítás előtt álló szerkezetre láthatunk példát, amely a Petőfi híd egyik korrodált keresztartójáról készült. A Szabadság-híd egy korábbi (1985) felújítása során egy korrózió miatt beroppanó oszlopot kellett részlegesen cserélni. Ebben az esetben a korrózió okozta nagy keresztmetszet csökkenés volt a lokális tönkremenetel kiváltó oka. Az említett példák is mutatják, hogy a felújításra szoruló szerkezetek esetében igen fontos, hogy el tudjuk dönteni, a korrodált elem cseréje vagy megerősítése szükséges. A nemzetközi szabványok (CAN/CSA, AISC, ASCE) és a hazánkban alkalmazott Eurocode nem tartalmaznak arra vonatkozóan előírást, hogyan vizsgáljuk a korrodált szerkezeti elemeket. Csak ajánlást fogalmaznak meg, melyben az korróziót a szelvények átlagos vastagságsökkenésével kell figyelembe venni. A vizsgálatok alapján ezzel a közelítéssel esetenként túlságosan alul, más esetben túlbecsülhetjük a szerkezeti elem teherbírását. A nemzetközi szakirodalomban számos kutatás található különböző kialakítású (I-szelvény, lemez, szögacél) korrodált elemek vizsgálatára vonatkozóan.

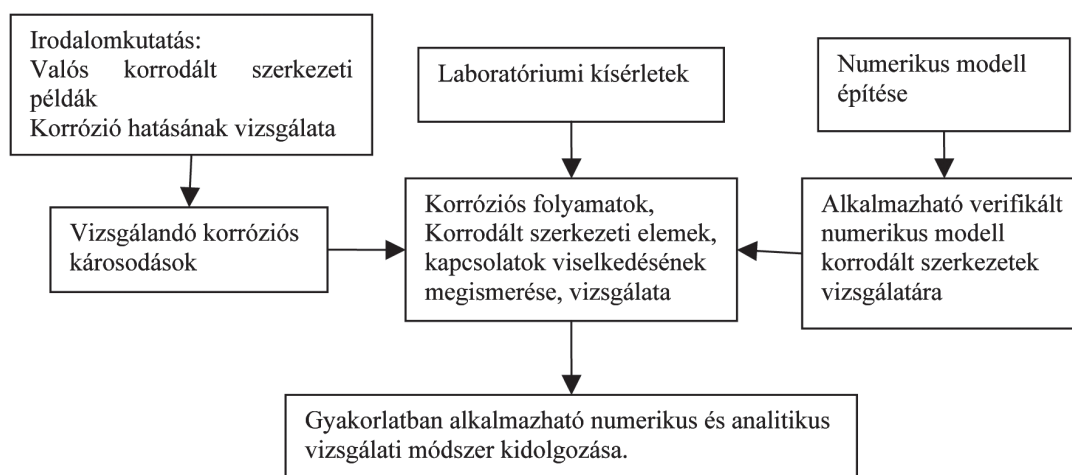


1. ábra: (bal) Margit híd, (jobb) Petőfi híd

A kutatások a korrodált elemek viselkedésének és teherbírásának változására terjedtek ki. A fő vizsgálati paraméterek a következők voltak: (i) karcsúság, (ii) szélesség–vastagság arány és a (iii) korrózió mértéke. Különösen nyomott szögacélokat vizsgáltak [Beaulieu és mtsai, 2010] rácsos szerkezeti egységbe építve. A kutatás során meghatározták a próbatestek tönkremeneteli módját és a teherbírását, amit analitikus módszerek eredményeivel hasonlítottak össze. Sztochasztikus kutatásokat végeztek nyomott lemezeken [Sadovsky és Drdacky, 2001], aminek keretében a teherbírás statisztikai változását határozták meg a korróziós paraméterek függvényében. Pontkorrózió hatását vizsgálták nyírt lemezek esetén [Paik és mtsai, 2004]; a vizsgálatok során egy felületi korrodáltságra utaló mérőszám segítségével határozták meg a teherbírás változását. Hajlított I-szelvények esetén a tönkremeneteli módok meghatározása mellett tendenciákat határoztak meg a teherbírás változására [Rahgozar, 2009]. Az általunk vizsgálni kívánt szögacélokra vonatkozóan széleskörű vizsgálatokat még nem végeztek. Az áttekintett korrodált szerkezetek között a szögacélok korrodáltsága igen jellemző volt. A szögacélok széles körben alkalmazott elemek hidakban és távvezeték tartó oszlopokban, mind önálló mind összetett elemként. A kutatásunk célja az ilyen típusú szerkezetekben alkalmazott, különböző nagyságú, eloszlású és kiterjedésű korrózióval károsodott nyomott szögacélok stabilitási viselkedésének és teherbírásának meghatározása. Egy olyan modell kidolgozása a cél, amely alkalmas a korróziós károsodás geometriai követésére (vastagsági és felületi kiterjedés), és a geometriai és anyagi nemlineáris stabilitási jelenség szimulálására.

## 1.2. Kutatási program

A kutatási program sematikus folyamatábrája a 2. ábrán látható. A program három fő részre különíthető el. Az előző pontban említett irodalomkutatás képezi az egyik ágát a kutatásnak, amely során meghatároztuk a vizsgálandó korróziós károsodások fajtáit valamint a vizsgálandó elemtípust.



2. ábra: Kutatási stratégia

A kutatás másik két ágát képezik a kísérleti vizsgálatok, valamint a numerikus modell fejlesztés és verifikáció. A laboratóriumi kísérletek képezik a kutatás alapját, ennek eredményei és a kísérleti megfigyelések alapján lehetséges a numerikus modell pontosságát ellenőrizni, illetve igazolni. A vázolt stratégia alapján lehetőség nyílik nagyszámú virtuális kísérlet végrehajtására korrodált szerkezeti elemeken. A virtuális kísérletek során a jelenséget befolyásoló paraméterek hatása vizsgálható, amely analitikus eljárás kidolgozásához szolgáltat alapot. Az analitikus eljárás célja egy olyan méretezési eljárás kidolgozása, amely segítségével a korrodált szögacélok tervezési kihajlási ellenállása meghatározható, a korróziós paraméterek ismeretében.

## 2. Kísérleti vizsgálatok

### 2.1 Kísérleti program

A kísérletek célja különböző módon csökkentett keresztmetszetű – mesterségesen korrodált – szögacél stabilitási viselkedésének és teherbírásának meghatározása. A kísérlet során 24 darab egyenlőszárú szögacél keresztmetszetű próbatestet vizsgáltunk. Az elemekben vastagságcsökkenést marással állítottuk elő. A vizsgált próbatestek között két gyengítetlen, azaz korróziómentes található. A próbatestek méretei: hossz: 790 mm, keresztmetszet: 40×40×4 mm. A rudak különböző korróziós megjelenést modelleznek, ezáltal három fő csoportba oszthatóak: (i) egyenletes korrózió (teljes elem hosszon), (ii) pontkorrózió és (iii) lokális korrózió. A próbatesteken a korrózió mértéke, kiterjedése és elhelyezkedése változó volt a modellezett korrózió típus függvényében. A próbatestek tényleges geometriáját a kísérletek előtt megmértük, valamint a korrózióra jellemző paramétereket számítással meghatároztuk. A teljes hosszra vetített keresztmetszet csökkenést jelöli az  $A_{corr}$ , az elemen előforduló legnagyobb keresztmetszet csökkenést pedig az  $M_{corr}$  paraméter jelöli. Az alkalmazott gyengítések fajtáiról az 1. táblázat tartalmaz részleteket. Az egyenletes korróziót tartalmazó csoportban a keresztmetszeten belül különböző elhelyezkedésű korrózió hatását vizsgáltuk. A pontkorrózió csoportba tartozó elemek azonos nagyságú korrodált felülettel rendelkeztek, de két különböző pont átmérővel készítettük el a próbatesteket, két különböző pontkiosztás mellett. A lokális csoportba tartozó elemek kis kiterjedésű, de nagymértékű keresztmetszet csökkenést modelleztek. Az ún. lokális próbatestekkel vizsgáltuk az károsodás elhelyezkedésének a hatását, valamint az azonos  $A_{corr}$ , de különböző  $M_{corr}$  paraméterrel rendelkező elemek közötti különbséget.

Keresztmetszet gyengítések	
Hosszmenti gyengítések	

1. táblázat: Kísérleti próbatestek

A próbatesteket központos nyomásnak vetettük alá a kísérletekben. A központosítást egy befogófej, véglemez és egy csapágygolyó biztosította. Az erő a véglemezen keresztül, az eredeti szelvény súlypontjában hatott, ami így csak egy kismértékű – véletlenszerű – külpontosságot eredményezett a nem korrodált szerkezeti elem részen. A csuklós kapcsolati kialakítást figyelembe véve, a hálózati hossz 840 mm-re adódott. A kísérletben a terhelő erő nagyságát, a terhelő fej függőleges irányú elmozdulását és a próbatest oldalirányú eltolódását mértük.

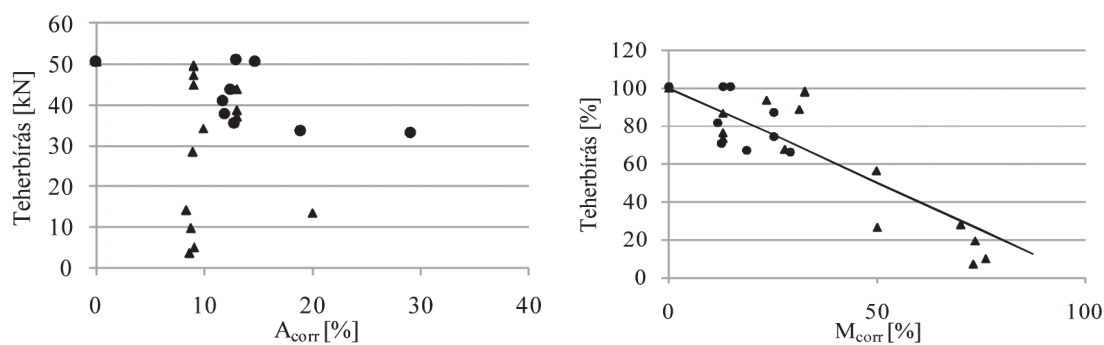
## 2.2 Kísérleti eredmények

A kísérletek során megállapítottuk a próbatestek viselkedését, tönkremeneteli módjait és teherbírását. Az eredményeket próbatest csoportonként értékeltük, az összehasonlítás alapját a korrodálatlan elemek adták. A korrodálatlan az egyenletes, illetve pontkorrózió csoportba tartozó próbatest esetében a globális tönkremenetelt, gyenge tengely körüli kihajlást tapasztaltunk. A végső tönkremenetelt a képlékeny mechanizmus megjelenése okozta, a rúd mértékadó helyén. A teherbírasi értékek, közel azonos keresztmetszet gyengítés esetén, nagy szórást mutattak. A lokális korrózió csoportba tartozó próbatesteknél a jellemző kezdeti globális viselkedés után a tönkremenetel lokális horpadás volt, a gyengített zónában. A 3. ábrán a különböző tönkremeneteli módok láthatóak. A kísérletek alapján a következő megállapítások tehetőek arra vonatkozóan, mely korrózió típusok és korróziós elhelyezkedések kedvezőtlenebbek. Általános tapasztalat, hogy a szögacél szárának belső élén megjelenő korrózió nagyobb teherbírás csökkenést okoz, azaz azonos mértékű korróziós károsodás a szögacél belső éléhez közelebb kedvezőtlenebb hatású, mint a szárak külső széléhez közelebb fekvő. Szintén megállapítható, hogy kedvezőtlenebb az elem közepén lévő korrózió, mint ugyanaz a kiterjedésű korrózió az elem két végére elosztva. A pontkorrózió hatása a stabilitási ellenállásra vonatkozóan kisebb mértékű, mint az egyenletes korrózió. Nagymértékű lokális korrózió esetén a korrózió elhelyezkedése szempontjából a megtámasztáshoz közeli pozíció nagyobb teherbírás csökkenést okoz. Azonos átlagos korrózió esetén, a stabilitási viselkedést és teherbírást alapvetően a maximális keresztmetszet csökkenés mértéke határozza meg.



3. ábra: Tönkremeneteli alakok

A kísérletek során kapott teherbírás értékeket az átlagos vastagság csökkenés függvényében ábrázoltuk a 4. ábra bal oldali grafikonján. A jobb oldali grafikonon az eredményeket a maximális keresztmetszet csökkenés függvényében tüntettük fel, a korrodálatlan elem teherbírásának függvényében.



4. ábra: Kísérleti eredmények

A grafikonok jól tükrözik, hogy adott keresztmetszet gyengítés mellett nagy eltérések tapasztalhatóak a teherbírásban. Megállapítható, hogy a maximális keresztmetszet csökkenés realisabb közelítést adhat a korrózió figyelembevételére, mivel kisebb szórást mutat azonos keresztmetszet gyengítés esetén. A jobb oldali ábrán a folytonos vonal azt a feltételezést mutatja, hogy a teherbírás azonos mértékben csökken a keresztmetszet csökkenéssel. Mint látható, ez a közelítés esetenként alul, illetve felül becüli a teherbírás csökkenését.

### 3. Numerikus vizsgálatok

#### 3.1 Numerikus modell

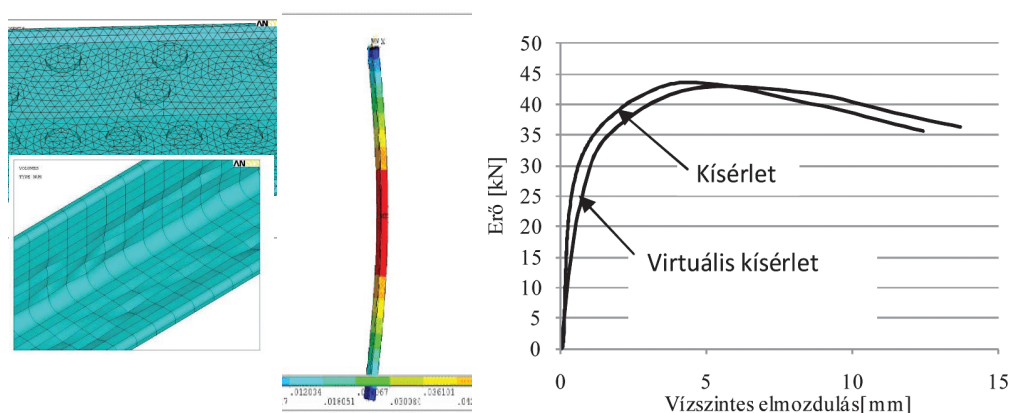
A kísérleti vizsgálatokkal párhuzamosan numerikus modellt építettünk az Ansys végeleemes program alkalmazásával. A modellalkotás során az elsődleges szempont a korrózió geometriai modellezése volt. Definiáltuk a korróziós károsodás fő paramétereit, és ezekkel leírtuk a különböző korrózió típusok geometriai megjelenését. A végeleemes modellbe az alábbi korrózió típusokat építettük be:

- egyenletes (azonos vastagságcsökkenés),
- adott eloszlás szerinti változás (eloszlásfüggvény szerinti csökkenés a csomópontokban),
- tényleges (mért adatok alapján),
- pontkorrózió.

A korróziós károsodás elhelyezkedését és kiterjedését, valamint a korrózió nagyságát bemenő adatként definiálni. Ha a korrózió adott eloszlás szerint változik, akkor az eloszlás fajtáját és a hozzá tartozó jellemző paramétereket az előkészítő program input-jaként lehet megadni. Ha mért adatok állnak rendelkezésre, akkor ezek megadásával jellemezhető a korrózió. Pontkorrózió esetén az egyenletes és eloszlás szerinti elveknek megfelelően kell megadni a korróziós területet. Meg kell adni továbbá a korrodált felület nagyságát a teljes felület százalékában, a lehetséges minimális és maximális pontkorrózió átmérő nagyságát, valamint a pontok mélységét is. A pontok egyenletes, illetve véletlenszerű kiosztása opcionálisan választható. A lemezes kialakítású acélszerkezetek stabilitási jelenségei általában jól modellezhetőek héj végeleemekkel. A korróziós károsodás fentiekben ismertetett jellege azonban megkövetelte a pontosabb geometriai modellt, azaz test végeleemek alkalmazását. A vastagság változás pontosabb követésére csak a testelem alkalmazása nyújt megfelelő pontosságot. A 5. ábra baloldalán két végeleemes modell részlet látható: az alsó ábrán egy adott eloszlás szerint változó korrózió látható, a felső ábrán pedig egy pontkorrózió.

#### 3.2 A modell kalibrálása

A kidolgozott numerikus modellen a tényleges kísérleti vizsgálatot szimuláltuk, geometriai és anyagi nemlineáris analízis végrehajtásával. A kísérletben használt próbatesteket a numerikus modell segítségével megvizsgáltuk, így a valós és a virtuális kísérletek eredményei alapján a modellt ellenőriztük [Oszvald és Dunai, 2010].



5. ábra: Numerikus modell, kísérleti és számítási eredmények

Azt tapasztaltuk, hogy globális tönkremenetel esetén a virtuális kísérletek nagy pontossággal közelítik a valós kísérletekben tapasztalt viselkedési formákat és teherbírési értékeket. A 5. ábra középső képe egy próbatest szimulációval meghatározott tönkremeneteli alakját, illetve az ábra jobb oldala a kísérleti és a numerikus erő – vízszintes elmozdulás diagramját mutatja. Nagymértékű lokális korrózió esetén ( $M_{\text{corr}} > 50\%$ ) azonban a numerikus modellben alkalmazott geometriai imperfekció kalibrálása szükséges teherbírás érték megfelelő pontosságú közelítésére. A jelentős vastagságcsökkenés átalakítja a stabilitásvesztési módot; a különböző kihajlási és horpadási alakok kölcsönhatása determinálja a tönkremenetelt.

### 3.3. Numerikus vizsgálat sorozat

A numerikus modell alkalmazásával nagyszámú virtuális kísérleti programot hajtottunk végre korrodált nyomott szögacélokon. A vizsgálatokban a három fő jellemző korróziós paraméter együttes hatását vizsgáltuk, két jellemző korróziós elhelyezkedést feltételezve. Megállapítottuk a korrózió hatásának az elem hossza mentén való elhelyezkedésének, a korrózió kiterjedésének és a keresztmetszet csökkenésének hatását a kihajlási ellenállás változására. Az numerikus kísérletek eredménye alapján meghatároztunk egy csökkentő tényezőt [Oszvald és Dunai, 2011], mely alkalmazható az Eurocode 3 szabvány alapú kihajlási ellenállás meghatározására, a korróziós paraméterek függvényében.

## 4. Összefoglalás

A kutatás során kísérleti és numerikus vizsgálatok alapján korrodált szögacélok stabilitási viselkedését elemeztük. A kísérletekben központos nyomóerővel terheltük a különböző módon gyengített szögacél próbatesteket. Meghatároztuk a stabilitási viselkedésüket, tönkremeneteli módjukat és teherbírásukat. A kísérleti eredményeket alapján numerikus modellt dolgoztunk ki, amely alkalmas különböző mértékű és típusú korrózió modellezésére a jellemző paraméterek változtatásával. A verifikált modell segítségével a korrózió hatásának széleskörű vizsgálata lehetséges virtuális kísérletekkel. A vizsgálatok kiterjesztése további geometriai tartományra és igénybevételi módokra (külpontos nyomás és húzás) valamint a korrodált csavarozott kapcsolatokra a folyamatban lévő kutatás tárgya.

## Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

- Beaulieu, L.V, Legeron, F, Langlois, S. Compression strength of corroded steel angle members, *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 2010, 1366-1373.
- Oszvald, K, Dunai, L. Effect of corrosion on the buckling of steel angle elements, *Proceeding of 8<sup>th</sup> International PhD Symposium in Civil Engineering*, Lyngby Denmark, 2010, 549-554.
- Oszvald, K, Dunai, L. Design buckling resistance of corroded members, determining the reduction factor for angle section elements, *Proceedings of the 6th European Conference on Steel and Composite Structures*, Budapest, Hungary, 2011, Volume A, 627-632.
- Paik, J. K, Lee, J. M, Ju Ko, M. Ultimate shear strength of plate elements with pit corrosion wastage, *Thin-Walled Structures*, 42, 2004, 1161-1176.
- Rahgozar, R. Remaining capacity assessment of corrosion damaged beams using minimum curves, *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 2009, 299-307.
- Sadovsky, Z., Drdacky, M. Buckling of plate strip subjected to localised corrosion – a stochastic model, *Thin-Walled Structures*, 39, 2001, 247-259.



# KÖRNYEZETBARÁT ANYAGOK ÉS TECHNOLÓGIÁK A TARTÓSZERKEZETEK ÉPÍTÉSÉNÉL

Farkas György  
Hidak és Szerkezetek Tanszék  
farkas@vbt.bme.hu

Friedman Noémi  
Hidak és Szerkezetek Tanszék  
noemi@vbt.bme.hu

Németh Orsolya  
Hidak és Szerkezetek Tanszék  
nemethorsolyailona@gmail.com

## **Kivonat**

A XXI. század elejére mind az építőanyagok terén, mind az épületszerkezetek létesítésénél egyre nagyobb hangsúlyt kap az újrahasznosítás lehetőségének megteremtése. Ennek tükrében egy új fajta, összecsomagolható és gyorsan felállítható provizórikus szerkezeti rendszert és a PET hulladék újrahasznosítási lehetőségével kecsgetető polimerbetont helyeztük kutatásunk célpontjába.

A polimerbetonokat egyre gyakrabban használják az építőiparban. Tanulmányunk első részében a polimerbeton mechanikai tulajdonságait vizsgáltuk. Kísérleteket végeztünk a polimerbeton hajlító-húzó, tiszta húzó- és nyomószilárdságának meghatározására. Vizsgáltuk az eredeti és a PET adalékanyaggal módosított keverékből készült polimerbeton szilárdsági tulajdonságait is. Korróziós közegben tartott vasalt normál beton és polimerbeton próbatesteken vizsgáltuk az olvasztósózás káros hatását.

A tanulmány második része a Hegedűs István által javasolt kipattanó, antiprizmatikus, cillindrikus szerkezet mechanikai tulajdonságainak és alkalmazási lehetőségeinek feltárása volt. A poligonális alakzatban elhelyezkedő rudak megnyúlásával, és így a belső energia felhalmozásával síkba összecsumagolt szerkezet könnyen szállítható, kis erővel összecsumagolt állapotban tartható és gyorsan felállítható. A kipattintható szerkezet alkalmazási lehetőségeként felmerült az antiprizmatikus hídszerkezet, állvány és kilátótorony ötlete.

## **Kulcsszavak**

polimerbeton, újrahasznosítás, átpattanó szerkezetek, nyitható-csumagolt szerkezetek

## **1. Bevezetés**

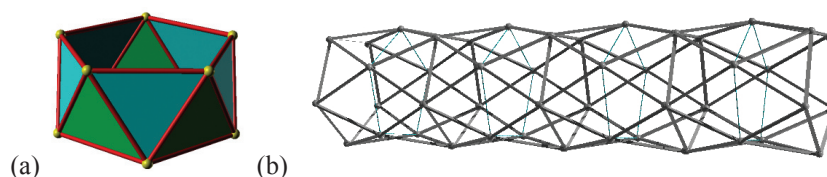
A XXI. század küszöbén az építészetben és a szerkezetépítésben az eddig itől teljesen eltérő szempontrendszerek diktálják az építőanyagok és épületszerkezetek fejlődési irányát [Friedman és mtsai, 2011a; Friedman és mtsai, 2011b]. Világunk számos globális problémája – a szűkülő természeti erőforrások, a klíma hirtelen megváltozása és az ugrásszerűen növekvő népesség valamint a városi ember rideggé váló lakókörnyezete – mind háttérét és mozgatórugóját képezi az új koncepciórendszernek, amely legfontosabb szempontjai a teljes életciklusra vonatkozó energiafelhasználás korlátozása, az anyagfelhasználás optimalizálása, az újrahasznosíthatóság, a természetes környezettel való közeli kapcsolat valamint az építészeti környezeti károk korlátozása.

Ennek fényében született két kiemelt kutatási projektünk; az összecsumagolható és gyorsan felállítható provizórikus antiprizmatikus szerkezeti rendszer és a PET hulladék újrahasznosítási lehetőségével kecsgetető polimerbeton vizsgálata.

Polimerbetonnak a használati körülmények között kőszerűen szilárd, polimer kötőanyagú, szilárd adalékanyagot, esetleg módosító, illetve segédanyagot tartalmazó, friss állapotban formázható anyagrendszert nevezünk. A polimerbetonok építőipari felhasználása közel 50 éves múltra tekint vissza. Eleinte hagyományos betonok felületének javítására használták, a különféle polimerek rohamos fejlődése azonban szélesebb körű alkalmazást tett lehetővé a szerkezetépítés különböző területein [ACI 548.6R-96, 1996]. Tartószerkezeti alkalmazása szempontjából fontosnak tartjuk tulajdonságainak pontosabb megismerését, ezért adott összetételű polimerbeton felhasználásával vizsgálatokat végeztünk a legfontosabb paraméterek meghatározásához.

A tanulmányi második részének tárgyát képező nyitható-csukható szerkezet alapegysége egy antiprizmatikus rúdszerkezet (1. ábra). A cilindrikus szerkezet az 1.b ábrán vékony vonallal jelölt poligonok élére helyezett rugalmas rudak megnyúlásával csukódik össze. A kipattanó árboc két antiprizmából álló alapegysége összecsomagolása során, erővezérlés esetén, összecsuklik, vagyis az összecsomagoláshoz tartozó erő-elmozdulás diagram emelkedő szakasza után, a kritikus erő elérését követően egy lezálló szakasz következik, a szerkezet elveszíti a stabilitását. A teljesen csukott állapothoz — amely a szerkezeti elemek kiterjedése miatt csak elméletben lehetséges — zérus külső erő tartozik, vagyis gyakorlatban az összecsomagolt szerkezet kisebb reteszekkel csukott állapotban tartható, így könnyen szállítható. A reteszek kiengedésével az árboc magától kipattan.

Bár a szerkezeti rendszer már több min 20 éve merült fel [Hegedűs, 1986], annak mechanikai jellemzőit és alkalmazási lehetőségeit részletesen még senki sem vizsgálta. Tanulmányok elsődleges célja az összecsomagolás mechanikai vizsgálata és az építőmérnöki alkalmazási lehetőségek feltárása volt.



7. ábra: Antiprizmatikus rúdszerkezet (a) és az antiprizmatikus síkba hajtható szerkezet (b)

A tanulmány 2-4 fejezetei a polimerbeton paramétervizsgálatával foglalkoznak. Az 5-7 fejezetekben foglaltuk össze a kipattintható szerkezet alapegységének, majd a többemeletes szerkezet összecsomagolásának mechanikai vizsgálatát, valamint az alkalmazási lehetőségként felmerült megoldásokat.

## 2. Polimerbeton anyagösszetétele és a szilárdsági vizsgálatok

A polimerbetonok tulajdonságait és a felhasználási lehetőségeket alapvetően az anyag receptúrája határozza meg. A polimerbeton kötőanyaga a beépítést követően térhálós polimer, jelen esetben telítetlen poliészter (POLIMAL 144-01). Ez a keverék mintegy 16 tömegszázaléka. Az alapanyag 76%-t adó adalékanyag fajtája általánosan nem meghatározott, széles skálán változtatható, esetünkben fele-fele arányban 2-4 mm-es szemmagyságú, szárított, ömlesztett osztályozott kvarc kavics és 0-2 mm-es szemmagyságú kvarc homok. További összetevő a katalizátor (Trigonox 44 B katalizátor), mely gyorsítja a kötési folyamatot, önmagában azonban nem elég a kémiai reakció beindításához. Ehhez előgyorsító, iniciátorra van szükség (esetünkben Co-1 Cobalt gyorsító). A belső súrlódási tényező csökkentésére, azaz könnyebb keverhetőség és a zsaluzat, sablon könnyebb kitölthetőségének érdekében a keverék 5% calcium-carbonátot, azaz kréport tartalmaz. A fenti receptúrával készült építőanyag jelen tanulmányban a továbbiakban „UP polimerbeton”, azaz telítetlen poliészter kötőanyagú polimerbeton megnevezéssel szerepel.

Minden egyes eltérő receptúrával rendelkező polimerbeton önálló anyagnak tekinthető, mechanikai tulajdonságai eltérőek lehetnek [ACI 548.6R-96, 1996]. Ezek pontosabb megismerése érdekében végeztük el a fent megadott UP polimerbeton esetén a következő vizsgálatokat.

A vizsgálat sorozat első lépése a hajlító-húzó szilárdság, a központos húzószilárdságának és a nyomószilárdság értékeinek meghatározása. Ezek az alapvető mechanikai tulajdonságok nagy mértékben befolyásolják az UP polimerbeton felhasználási lehetőségeinek körét. A vizsgálatok legjelentősebb eredménye a húzó és nyomószilárdság értékei közötti kedvező arány feltárása. A szilárdságértékeket az 1. táblázat tartalmazza.

	Szilárdság átlagértéke (N/ mm <sup>2</sup> )	Szórás (N/ mm <sup>2</sup> )	Szórás (%)
Központos húzószilárdság	17,67	0,31	1,75
Hajlító-húzó szilárdság	24,89	2,94	11,81
Nyomószilárdság	98,70	3,12	3,16

1. táblázat: Polimerbeton szilárdságértékei

Az UP polimerbetonba ágyazott betétek szükséges legorgonyzási hosszának meghatározását kihúzó vizsgálattal végeztük. A mért és számított értékek alapján az UP polimerbeton esetében a lehorgonyzási hossz ajánlott értéke minimum  $10\Phi$ , mely lényegesen kevesebb és gazdaságosabb a hagyományos betonok esetén általános értékeknél [Németh és Farkas, 2011].

### 3. Az UP polimerbeton korrózióállóságának vizsgálata

A következő vizsgálat célja az agresszív környezetnek kitett, vasalt cementbeton és UP polimerbeton próbatestek viselkedésének összehasonítása volt. A kísérlethez 9-9 db próbatest készült a két eltérő anyagból, két különböző geometriai kialakítással. Minden próbatest geometriai középpontjában a hosszabbik éllel párhuzamos 10 mm-es átmérőjű betonvasat helyeztünk el. A 9-9 db próbatestből 3-3 db etalonként szerepelt, a többi 5:1 tömegarányú víz-só oldatba helyeztük. Hat hónap után az UP polimerbeton próbatesteken csekély mértékű látható korrózió jelent meg az acélbetétek végeinél. A cementbeton próbatesteken ennél jóval előrehaladottabb volt a károsodás. Mindkét anyagra jellemző, hogy az etalonokhoz képest mérsékelt elszíneződést tapasztaltunk.

A tényleges korrózió feltárásához a próbatesteket hasító igénybevételnek vetettük alá. A láthatóvá tett betonacélokon is következetes a roncsolódás mértéke. Az UP polimerbeton próbatestekben lévő betonvasak megtartották eredeti állapotukat (fémesen csillogóak maradtak), csak az acéldarabok végein látható némi korrózió (feketedés). Ezzel szemben a cementbeton próbatestek acélbetéteinek teljes felületén a kezdeti korrózió jelei tapasztalhatók, a felület mattá vált, helyenként a rozsdásodás is megindult (2. ábra).



2. ábra: A polimerbeton (a) és cementbeton (b) próbatestekben elhelyezett betonacélok a korróziós kísérlet elvégzése után

### 4. PET adalékanyaggal módosított keverék szilárdságértékei

A polimerbetonok különböző műanyag-, szén- illetve üveg szálakkal, esetleg valamely más adalékanyaggal történő módosítása, megerősítése egyre inkább ismert és elfogadott eljárás. Vizsgálatunkban PET palackok hasogatásával, illetve darálásával előállított adalékanyagot használtunk. A széles szálát, illetve darálással előállított pelyhet adagoltunk az alapanyaghoz. A vizsgálat célja a módosított (PET szál, PET pelyh) és az eredeti (kontroll) keverék hajlító-húzó szilárdságának és nyomószilárdságának összehasonlítása volt (2. táblázat) (3. és 4. ábra). A keverék módosítása mindkét esetben 1 m%-nyi adalékanyag hozzáadásával történt.

A vizsgálati eredmények alapján elmondható, hogy a PET szálak megerősítés szívósabbá, hajlító-húzó szilárdság szempontjából kedvezőbbé tette az UP polimerbetont.

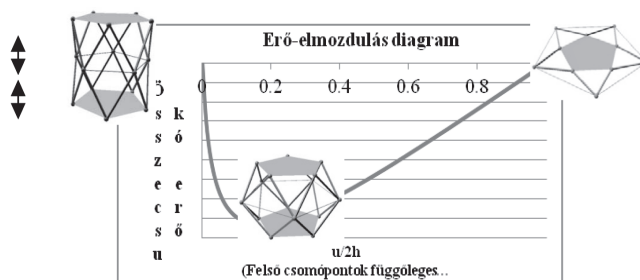


		Szilárdság átlagértéke (N/mm <sup>2</sup> )	Szórás (N/mm <sup>2</sup> )	Szórás (%)
Hajlító-húzó szilárdság	<i>kontroll</i>	24,89	2,94	11,81
	<i>PET szál</i>	26,44	2,92	11,04
	<i>PET pehely</i>	24,65	2,22	9,00
Nyomószilárdság	<i>kontroll</i>	98,70	3,12	3,16
	<i>PET szál</i>	98,28	5,79	5,89
	<i>PET pehely</i>	81,20	9,41	11,59

2. táblázat: Szilárdságértékek összehasonlító táblázata

## 5. Antiprizmatikus szerkezet alapegységének mechanikai vizsgálata

A nyitható-csukható antiprizmatikus szerkezet alapegységének erő-elmozdulás diagramját analitikus módszerrel határoztuk meg, amelyet később a numerikus vizsgálatok is megerősítettek [Friedman és mtsai, 2012]. A diagram függvényét lineáris és nem-lineáris anyagmodell feltételezésével is definiáltuk. A tervezési fázis megkönnyítéséhez a diagram jellemző pontjaira — így a kritikus erőre, a kritikus szegmensmagasságra és teljes összecukáshoz szükséges megnyúlásra — egyszerűen számítható közelítő képleteket adtunk. Az erő-elmozdulás diagram jellegét az 5. ábrán vázoltuk.

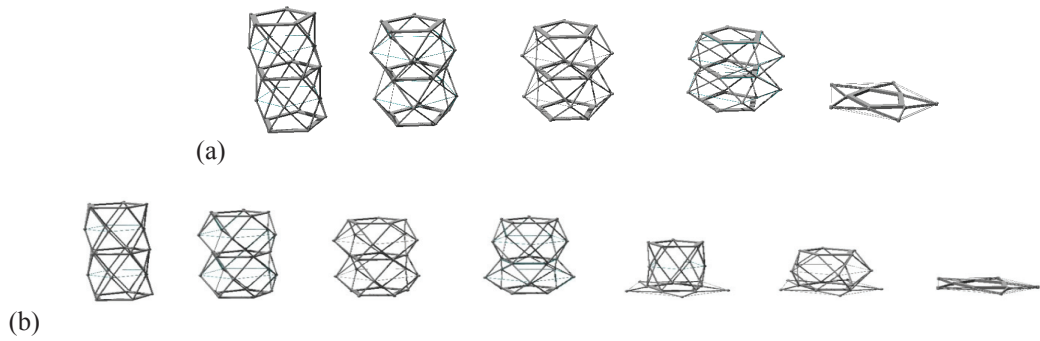


5. ábra: Alapszegmens erő-elmozdulási diagramjának jellege

5. ábra: Alapszegmens erő-elmozdulási diagramjának jellege

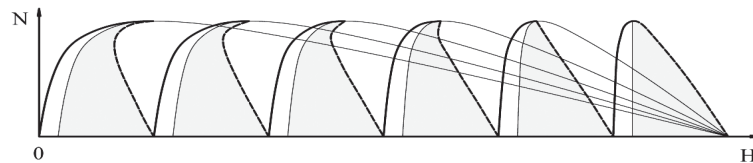
A diagrammon jól látható, hogy a hirtelen összecukódás és így a tehetetlenségi erők hatásának elkerülése csak a elmozdulásvezeréleve lehetséges.

## 6. Komplex antiprizmatikus szerkezet mechanikai vizsgálata



6. ábra: Komplex szerkezet uniform összecukása (a) és egy tipikus összecukódási szekvencia (b)

A síkba hajtható cilindrikus szerkezet az 5. fejezetben látott alapegységek soros kapcsolásával konstruálható. Ha csak a felső csomópontok elmozdulását vezéreljük, teoretikusan lehetséges a szerkezet egységes összecukása (6.a ábra). Ebben az esetben az erő-elmozdulás diagram jellege teljesen megegyezik az egy egységre vonatkozó diagram jellegével. A valóságban azonban, a szegmensek geometriai és mechanikai jellemzői a véletlenszerű pontatlanságok miatt eltér, és így tipikusan a szerkezet a szegmensek véletlenszerű sorrendű egymás utáni összecukásával hajtható csak össze. A csukás kezdeti fázisában a szerkezet egyenletesen csukódik, majd az első posztkritikus állapotba kerülő szegmens összecukódásával az szerkezet többi része eredeti állapotára nyílik. Két szegmens esetén egy lehetséges tipikus összecukódást az 6.b ábra mutat. A komplex szerkezet mechanikai viselkedésének érdekessége, hogy bizonyos szegmensszám felett az erő-elmozdulás diagram visszafelé fordul (7. ábra). Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy amennyiben csak a legfelső poligon csomópontjainak elmozdulását vezéreljük, a felső pont fokozatos elmozdításának ellenére is létrejönnek hirtelen belső elmozdulások. Ezt az eredményt mind analitikusan mind numerikusan igazoltuk.



7. ábra: Hat szegmensből álló cilindrikus torony erő-elmozdulás diagramja

## 7. Antiprizmatikus síkba hajtható szerkezet alkalmazási lehetőségei



8. ábra: Antiprizmatikus kipattintható híd vázlata [Friedman, 2011]

Az antiprizmatikus rúdszerkezet gyakorlati alkalmazása addicionális merevítő elemek nélkül nem ajánlott. Tarnai Tibor bemutatta [Tarnai, 2001], hogy páros oldalszámú poligonok esetén ez a geometria labilis szerkezetet eredményez. Bár a páratlan oldalszámú antiprizmatikus rúdszerkezet merev konfiguráció, kis támaszelmozdulások az alsó megtámasztásnál onnantól eltávolódva exponenciálisan növekvő elmozdulásokat eredményeznek [Hegedűs, 1993]. Ennek ellenére, a kipattintható szerkezet utólagos merevítéssel vonzó kialakítás lehet például egy kisebb méretű, kiállításoknál gyorsan felállítható

gyalogos híd esetében (8.ábra). Az összecukott állapotban rugalmasan megnyújtott poligonrudakra laza merev rudakat lehet fűzni, így a szerkezet kinyitása után a merev rudak csomóponti csatlakozásával az itt lévő rudak nyomóerőt is fel tudnak venni [Friedman és mtsai, 2012]. A szerkezet merevségét az elmozdulásvezérlésre beiktatott hosszanti kábelekkel és a nyitott állapotban is feszülő poligonális rudakkal lehet például biztosítani. Különböző vezérlés és az eredetitől valamelyest eltérő rendszer esetén felmerült még egy ideiglenes kilátótorony és egy állvány rendszer antiprizmatikus szerkezettel történő konstruálása.

## 8. Összefoglalás

A kísérletek során igazolódott, hogy az UP polimerbeton szilárdsági tulajdonságai kiválóak. A PET szállal módosított keverék az UP polimerbeton szilárdsági jellemzőit előnyösen befolyásolja, a kompozit szívósságát növeli. A korrózióállóságot vizsgáló kísérlet alátámasztja azt a feltevést, hogy az UP polimerbeton a káros anyagok átszivárgását gátolja, kiválóan alkalmas környezetvédelmi feladatok ellátására.

A tanulmány második részét képező kipattanó szerkezet típus összecukásának mechanikai vizsgálatát numerikusan és analitikusan elvégeztük. Az antiprizmatikus árboc erő-elmozdulás diagramjának jellemző értékeihez — a tervezés kezdeti fázisát megkönnyítve — közelítő képleteket definiáltunk. A komplex szerkezet összecukásának numerikus és analitikus vizsgálata után alkalmazási lehetőségeket is vázoltunk, amelyek gazdasági vizsgálatát a jövőben tervezzük elvégezni.

## Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

- ACI Committee 548. *Polymer Concrete – Structural Applications State-of-the-Art Report*, American Concrete Institute 548.6R-96, 1996, 2-4.
- Farkas, Gy, Németh, O. Polimerbeton mechanikai tulajdonságainak kísérleti vizsgálata, *XV. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia*, Csíksomlyó, Románia, 2011, 117-123.
- Friedman, N. *Investigation of highly flexible, deployable structures: review, identification, control, application*, Ph.D. thesis, 2011, 128p.
- Friedman, N, Farkas, Gy. Roof structures in motion - on retractable and deployable roof structures enabling quick construction or adaption to external excitations, *Concrete Structures*, 12, 2011a, 41-50.
- Friedman, N, Farkas, Gy, Ibrahimbegovic, A. Deployable/retractable structures towards sustainable development, *Pollack Periodica*, 6(2), 2011b, 85-97.
- Friedman, N, Gidófalvy, K, Hegedűs, I, Farkas, Gy, Ibrahimbegovic, A. Deployment analysis of an antiprismatic snap-through type cylindrical space truss and proposal for a pop-up bridge construction, *Proceeding of the IASS-IACM 2012: Computational Mechanics for Spatial Structures* (befogadva, publikálás alatt)
- Hegedűs, I. Analysis of Lattice Single Layer Cylindrical Structures, *International Journal of Space Structures*, 2, 1986, 87-91.
- Hegedűs, I. Branching of Equilibrium Paths in a Deployable Column, *International Journal of Space Structures*, 8, 1993, 119-125.
- Németh, O. I, Farkas, Gy. Experimental studies of steel reinforced polymer concrete, *Proceedings of the fib Congress*, Balatonfüred, Hungary, 2011, 69-72.
- Tarnai, T. Infinitesimal and Finite Mechanisms In: Pellegrino, S. (szerkesztő) *Deployable Structures* Wien New York: Springer, 2001, 13-143.

# ÚJ MÉRÉSI MÓDSZER A DINAMIKUS EGYENSÚLYOZÓ KÉPESSÉG VIZSGÁLATÁRA

Kiss Rita M.  
Hidak és Szerkezetek Tanszék  
kissrit@t-online.hu

## Kivonat

Az egyensúlyozó képesség vizsgálata a neurológia és az ortopédia vizsgálatok fontos eleme. A statikus egyensúlyozás – az állásstabilitás – vizsgálatára igen sok módszer használatos, de a dinamikus egyensúlyozás vizsgálatára kevés módszert találunk a hazai és a nemzetközi irodalomban. A hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozás vizsgálatára csak egy módszer, a hirtelen irányváltatási teszt ismert. A vizsgálat során a kerethez rugókkal rögzített merev lap kimozdítható, mozgásba hozható, és a lengőlapon a vizsgált személynek egyensúlyoznia kell. A vizsgált személlyel együtt a lengőlap csillapított lengőmozgást végez, amely a Lehr-féle csillapítási aránnyal (a valódi és kritikus csillapítás aránya) jól jellemezhető. A csillapítást a vizsgált személy egyensúlyozó képessége befolyásolja, ezért a dinamikában ismert csillapítási arány az egyensúlyozási képesség jellemzésére is használható. 143 egészséges személyen elvégzett vizsgálat azt mutatta, hogy a csillapítási arányt lényegesen befolyásolja az életkor, a vizsgált személy neme. Az életkor hatásának különösen fontos szerepe van az idős (65 év feletti) populáció esetén.

## Kulcsszavak

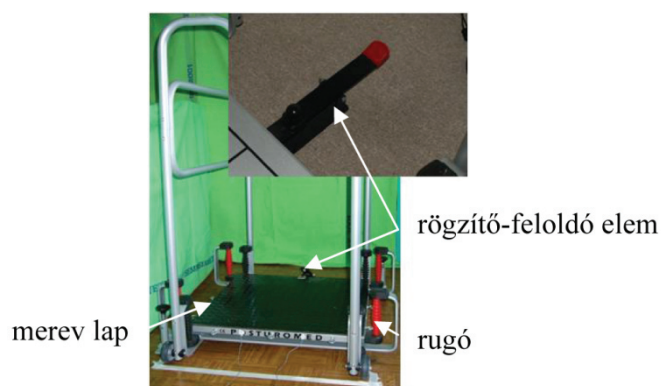
biomechanika, mozgásvizsgálat, egyensúlyozó képesség, hirtelen irányváltatás, életkor hatása, vizsgált személy nemének hatása

## 1. Bevezetés

Az egyensúlyozó képességnek két típusa ismert: a statikus és a dinamikus. A statikus egyensúlyozó képesség alapja a reflex (statikus reflex), ami a nyugalmi állapotban lévő test egyensúlyát biztosítja. A dinamikus egyensúlyozáshoz szükséges kinetikus reflex a mozgó test egyensúlyát biztosítja. A dinamikus egyensúlyozó képességhez sorolható a kineztezis (izomérzés, mélyérzés), amely az izmokban (inakban, izombőnyékben, ízületi tokokban, szalagokban) található proprioceptorokból kiinduló érzékelés. Minden mozgás, így a járás végrehajtásában is döntő szerepe van a proprioceptív alapú érzékelésnek, ami folyamatos tájékoztatást ad a testrészek helyzetéről, mozgásáról, az izmok, inak, ízületek pillanatnyi állapotáról, feszüléséről [Szirmai, 2007]. A nyugalmi állapotban lévő test egyensúlyának biztosításához (testtartáskontroll – állasegyensúly, állásstabilitás) szükséges központi és a perifériás idegrendszer közötti kapcsolat talpnyomáseloszlás-mérő lapon (pedográf) vagy erőmérő lapon végzett stabilometriás vizsgálatokkal elemezhető, melyeket állásstabilitási vizsgálatoknak neveznek. A statikus stabilometriás vizsgálatokkal állás közben meghatározható a testsúlyterhelés megoszlása, a nyomásközéppont (COP: Centre of Pressure) különböző irányú mozgása az idő függvényében. A kapott eredményekből különböző jellemzők számíthatók [Horváth, 2007]. Az állásstabilitás elemzésének másik módszere a Romberg-próba, amely videóalapú vagy ultrahangalapú mozgásvizsgáló rendszerrel rögzíti a fej és a vállöv mozgását az idő függvényében [Horváth, 2007]. A dinamikus egyensúlyozó képesség neurológiai vizsgálatok elterjedt módszere az Unterberger- (Fukuda-) próba, ami csukott szemmel történő helyben járás közben videóalapú vagy ultrahangalapú mozgásvizsgáló rendszerrel rögzíti a fej és a vállöv mozgását az idő függvényében [Unterberger, 1940; Winter, 1995].

A legösszetettebb koordinációt a statikus (állás vagy ülés) helyzetben vagy mozgás (járás, futás) közben történő hirtelen erőhatás vagy irányváltatás utáni egyensúly visszanyerése kívánja meg [Winter, 1995]. A mindennapi életben hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozás szükséges, ha járás vagy futás közben meglöknek, vagy hirtelen egy akadályt kell kikerülni.

A hirtelen irányváltoztatás utáni egyensúlyozó képesség modellezésére a kereskedelmi forgalomban kapható PosturoMed® (Haider-Bioswing GmbH, Weiden, Németország) terápiás eszközzel modellezhető [Müller és mtsai, 2004; Boer és mtsai, 2010, Kiss, 2011]. Az eszköz lényege, hogy a merev lap (60 cm x 60 cm, 12 kg) nyolc 15 cm hosszú, azonos erősségű rugóval a merev keretre van felfüggesztve. A rugók segítségével a merev lap a vízszintes síkban szabadon tud mozogni. A felfüggesztett merev lap mozgása a rugók számával (4, 6, 8 rugóval) szabályozható. A rugókkal felfüggesztett merev lap a kerethez képest vízszintes irányban kimozdítható és ott az eszközhöz tartozó rögzítő-feloldó elemmel fixálható (1. ábra).



**1. ábra:** PosturoMed eszköz: a merev lap nyolc azonos erősségű rugóval a merev kerethez rögzítve, a rögzítő feloldó elemmel a merev lap kimozdítható állapotban rögzíthető, majd feloldásával mozgásba hozható

A kimozdítás nagysága széles körű, a 20 mm mértékű kimozdítás a gyakori. A rögzítő-feloldó elem oldásával a rugókkal felfüggesztett merev lap mozgásba hozható, mivel a feloldás után a merev lap nyugalmi helyzetébe próbál visszatérni, amely a hirtelen irányváltoztatást, lökést modellezi. A vizsgált személynek a mozgó lapon kell egyensúlyoznia, egyensúlyát visszanyernie. A vizsgálati módszert hirtelen irányváltoztatási tesztnek (provocation test) nevezzük. Korábbi kutatások [Müller és mtsai, 2004; Boer és mtsai, 2010] a merev lap mozgását a vízszintes sík mindkét irányába mechanikus elmozdulás mérővel (Digimax, Mechatronic, Hamm, Germany) rögzítették. A mérés ideje 6 másodperc, és a merev lap lengése során megtett útja számítható, amellyel a dinamikus egyensúlyozó képesség modellezhető. Minél kisebb ez az érték, az egyensúlyozó képesség annál jobb [Müller és mtsai, 2004; Boer és mtsai, 2010]. Ennek a modellezésnek a legnagyobb hátránya, hogy az eredmény lényegesen függ a mérési időtől, azaz az eredmények csak abban az esetben hasonlíthatók össze, ha a mérési idő pontosan megegyezik. A rugókkal felfüggesztett merev lap kimozdítás irányával párhuzamos mozgása a vizsgált személlyel együtt csillapított lengőmozgás. A csillapítás a vizsgált személy egyensúlyozó képessége. A merev lap mozgását a rugók erőssége és a csillapítás nagysága befolyásolja. A csillapítás jellemezhető a csillapítási számmal (Lehr-féle csillapítási arány), amely az aktuális és a kritikus csillapítás hányadosa [Csizmadia és Nándori, 1997]. A csillapítási szám közvetlenül számítható a merev lap időbeni változásából [Kiss, 2011a]. Feltételezhető, hogy a Lehr-féle csillapítási arány jól jellemzi a hirtelen irányváltoztatás utáni egyensúlyozó képességet. A több éves kutatás célja, hogy a dinamikus egyensúlyozó képesség vizsgálatára a hirtelen irányváltoztatási tesztet bevezessük. Első lépésként meg kell határozni, milyen tényezők befolyásolják a Lehr-féle csillapítási arányt. A statikus és dinamikus egyensúlyozó képességet szignifikánsan befolyásolja az életkor [Boer és mtsai, 2010; Prieto és mtsai, 1996; Vandervoort, 2002; Verreck és mtsai, 2008]. Első lépésként ennek hatását vizsgáltuk, az adatokat nemek szerint dolgoztuk fel, így a nemek közötti különbség is vizsgálható. Feltételezhető, hogy a hirtelen irányváltoztatás utáni egyensúlyozó képességet jellemző Lehr-féle csillapítási arányt mind a vizsgált személy neme mind az életkora befolyásolja.

## 2. Vizsgált személyek, vizsgálati módszer

A vizsgálatba összesen 474 egészséges személyt vontunk be, akiket különböző szempontok szerint (életkor, testtömeg, testmagasság, nem) csoportokba osztottunk. A különböző befolyásoló tényezők hatását több cikkben foglaltam össze [Kiss, 2011a; Kiss, 2011b; Kiss, 2011c]. Jelen cikkben az életkor és a nem hatását mutatom be 143 egészséges, 25-30 kg/m<sup>2</sup> közötti, normál testtömeg-indexű (BMI) személy esetén. Mind



a nőket, mind a férfiakat a betöltött életkor alapján hét korcsoportba osztottuk (1. táblázat). A fiatalok korcsoportjait tízéves, míg az idősök korcsoportját öt éves tartományban határoztuk meg. A beválasztás kritériuma: 18 év feletti és 80 év alatti életkor; segédeszköz nélküli mozgásképesség. A kizárás kritériuma: bármilyen korábbi vagy aktuális ortopédiai elváltozás; alsó végtagot érintő műtét; neurológiai (Parkinson, dementia, stroke stb.), egyensúlyozó képességet érintő, vestibuláris elváltozások; nem karbantartott kardiovaszkuláris probléma;  $\pm 5$  dioptriánál erősebb látáskorrekció. Az idős személyek esetén az ízületi kopás (osteoarthritis, OA) egyértelműen kizáró tényező volt, a vizsgált személyt az egészséges csoportból kivettük, ha a vizsgálat után egy évvel megjelent az ízületi kopás.

A hirtelen irányváltoztatás utáni egyensúlyozó képességet a hirtelen irányváltoztatási teszttel (provocation test) modelleztük [Kiss, 2011a]. A PosturoMed<sup>®</sup> terápiás eszköz felfüggesztett merev lapjának mozgását 4 rugó szabályozta, amely a könnyű vizsgálatot jelenti. A 20 mm-es kimozdítás után a rögzítő-feloldó elemmel rögzítettük (1. ábra). A vizsgált személy ezután a vizsgálati pozícióban (két lábon, jobb lábon majd bal lábon – 2. ábra) állt a lapra. A rögzítő-feloldó elem oldásával a rugókkal felfüggesztett merev lap mozgásba hoztuk, amely a hirtelen irányváltoztatást, lökést modellezte. A vizsgált személynek a mozgó lapon kellett egyensúlyoznia, egyensúlyát visszanyernie az adott pozícióban. A vizsgált személyeket kértük, hogy mozgásukat ne nézzék és egyensúlyozáshoz a felső végtag használható, de a keretet nem foghatják meg, egy lábon történő állás közben mért vizsgálatkor a másik lábat sem tehetik le. Ellenkező esetben a vizsgálat eredménye nem érvényes. Minden vizsgálat során a vizsgált személy 2 másodpercet állt az adott pozícióban, majd a lapot oldottuk és 3 másodpercig rögzítettük a lap mozgását, amit a rendszer numerikusan tárolt. A vizsgálat mindhárom részét (két lábon, bal lábon és jobb lábon állás) 60 másodpernyi pihenéssel egymás után háromszor végeztettük (összesen 9 mérés). A mérés részletei Kiss [2011a] cikkben találhatóak meg.



2. ábra: A vizsgálat részei: a) két lábon; b) jobb lábon; c) bal lábon állás közben végzett vizsgálat

A vizsgálat során a rugókkal felfüggesztett merev lap mozgása ultrahangalapú, egyedi érzékelőt használó mérőrendszerrel mértük, rögzítettük, ahol az egyedi érzékelőket a vizsgált lap oldalára helyeztük, a mérés frekvenciája 100 Hz volt. A merev lap mozgása az elmozdítás irányába csillapított lengőmozgás (3. ábra), melyből a Lehr-féle csillapítási arány számolható [Kiss, 2011a].

ahol  $\Lambda$  a logaritmikus dekrementum: 
$$D = \frac{\Lambda}{\sqrt{\Lambda^2 + 4\pi^2}}$$

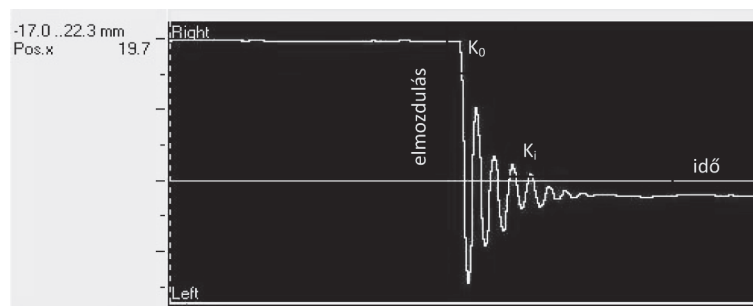
$$\Lambda_i = \frac{1}{i} \ln \frac{K_0}{K_i}$$

ahol  $K_0$   $t = t_0$  időpontban az amplitúdó,  $K_i$   $t = t_i$  időpontban az amplitúdó.

Az eredmények statisztikai elemzéséhez a férfiak és nők eredményeinek, valamint az egymás után következő korcsoportok eredményeinek összehasonlításához a kétmintás t-próbát használtam. Az életkor hatásának elemzéséhez a lineáris regresszió alapuló trend vizsgálatot és a Pearson-féle korrelációs számítást alkalmaztam. A komplex vizsgálat a két-változós ANCOVA módszer történt, ahol a kovariáns az életkor, az egyik változó a vizsgált személy neve, míg a másik a vizsgálat típusa (két lábon, domináns és nem-domináns lábon történő állás).

### 3. Eredmények és azokból levonható következtetések

A hirtelen irányváltoztatási teszt eredményeiből számított Lehr-féle csillapítási arány ( $D$ ) értékei a könnyebb áttekinthetőség érdekében a 1. táblázatban láthatók.



3. ábra: Hirtelen irányváltotatási teszt során a merev lapra szerelt érzékelőnek a kimozdítás irányával párhuzamos mozgása az idő függvényében

korcsoport	Férfiak			Nők		
	két lábon állásakor	domináns lábon állásakor	nem-domináns lábon állásakor	két lábon állásakor	domináns lábon állásakor	nem-domináns lábon állásakor
25-34 év N=22	0,538±0,021	0,529±0,024	0,409±0,013	0,545±0,018	0,539±0,020	0,428±0,014
35-44 év N=20	0,531±0,023	0,523±0,021	0,399±0,018	0,531±0,020	0,524±0,024	0,425±0,019
45-54 év N=21	0,524±0,024	0,518±0,027	0,379±0,024	0,527±0,024	0,518±0,025	0,414±0,027
55-64 év N=20	0,491±0,025	0,482±0,028	0,321±0,038	0,524±0,026	0,512±0,028	0,374±0,028
65-69 év N=20	0,463±0,030	0,447±0,029	0,289±0,039	0,497±0,029	0,480±0,030	0,340±0,038
70-74 év N=20	0,439±0,031	0,430±0,035	0,271±0,029	0,481±0,034	0,458±0,033	0,321±0,035
75-80 év N=20	0,421±0,033	0,414±0,034	0,248±0,041	0,459±0,030	0,448±0,033	0,297±0,036

1. táblázat: Lehr-féle csillapítási arány ( $D$ ) értéke (átlag±szórás) különböző korcsoportokban férfi és nő egészséges személyek esetén

Minden vizsgált személy minden vizsgálata esetén a Lehr-féle csillapítási szám egynél kisebb, nullánál nagyobb ( $0 < D < 1$ ) volt, azaz a rugókkal felfüggesztett merev lap mozgása csillapított lengőmozgás volt.

A nők és férfiak, valamint az összes korcsoport esetén a nem-domináns lábon állás közben végzett vizsgálat adataiból számított Lehr-féle csillapítási szám szignifikánsan kisebb volt, mint a két lábon és a domináns lábon állás közben végzett vizsgálat adataiból számított jellemző (1. táblázat). Nem volt szignifikáns különbség a két lábon és a domináns lábon állás közben végzett vizsgálat adataiból számított Lehr-féle csillapítási szám között (1. táblázat).

Nézzük először a vizsgált személy nemének a hatását a hirtelen irányváltotatás utáni egyensúlyozó képességre. Az eredmények azt mutatják, hogy mind a két lábon, mind a domináns, mind a nem-domináns lábon történő állásakor a nők hirtelen irányváltotatás utáni egyensúlyozó képességét jellemző Lehr-féle csillapítási arány szignifikánsan nagyobb (1. táblázat), mind a férfiaké. Ezzel bizonyítottuk a stabilometriás vizsgálatokkal alapján tett azon megállapítást, hogy a vizsgált személy neme szignifikánsan befolyásolja az állásstabilitást [Masui és mtsai, 2005; Schwesig és mtsai, 2006], valamint a megállapítás kiterjeszhető a hirtelen irányváltotatás utáni egyensúlyozó képességre. A különbség oka vélhetően kettős, egyrészt az egyensúly biztosításában a férfiak és nők közötti élettani különbség, másrészt az ízületi flexibilitás közötti különbség [Kiss, 2012]. A jobb, hirtelen irányváltotatás utáni egyensúlyozó képesség alapján feltételezhetjük, hogy a külső körülmények megváltozására adott válasz a nők esetében pontosabb, mint a férfiaké. Ez a megállapítás azonos a járásváltozékonyság vizsgálata alapján tett megállapítással [Kiss, 2012]

Ha az életkor hatását elemezzük a hirtelen irányváltotatás utáni egyensúlyozó képességre, akkor azt látjuk, hogy az életkor előrehaladtával mindhárom vizsgálati típus esetén a Lehr-féle csillapítási arány csökken,

azaz a hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozó képesség romlik (1. táblázat). A mértéke azonban az életkor és a nem függvénye.

A 25-54 év közötti férfiak esetén mindhárom vizsgálati móddal meghatározott Lehr-féle csillapítási arány a korcsoportok között nem mutatott szignifikáns különbséget (1. táblázat). Ebben a korcsoportban az életkor és a Lehr-féle csillapítási arány közötti lineáris trend sem mutatott szignifikáns eltérést, valamint az életkor és a Lehr-féle csillapítási arány közötti negatív korreláció is gyenge volt a két lábon ( $p = 0,27$ ;  $r = -0,14$ ), a domináns oldalon ( $p = 0,31$ ;  $r = -0,18$ ) és a nem-domináns oldalon ( $p = 0,14$ ;  $r = -0,10$ ) történő álláskor végzett vizsgálat esetén.

Az idősebb, 55-80 év közötti férfi korosztálynál a Lehr-féle csillapítási arány szignifikáns különbséget mutatott a korcsoportok között (1. táblázat). Az életkor és a Lehr-féle csillapítási arány között számított lineáris trend szignifikáns változást mutatott ( $p_{\text{két lábon}} = 0,002$ ;  $p_{\text{domináns lábon}} = 0,001$ ;  $p_{\text{nem-domináns lábon}} = 0,0007$ ). A két lábon ( $r = -0,68$ ;  $p = 0,007$ ), a domináns oldalon ( $r = -0,60$ ;  $p = 0,011$ ) és a nem-domináns oldalon ( $r = -0,71$ ;  $p = 0,007$ ) történő álláskor mért értékek és az életkor között számított korreláció erős és negatív volt.

A nők esetében az életkor hatását csak a 65-80 év közötti egészséges személyeknél tudtuk kimutatni (1. táblázat). Ebben az életkorban az életkor és a Lehr-féle csillapítási arány között számított lineáris trend szignifikáns változást mutatott ( $p_{\text{két lábon}} = 0,003$ ;  $p_{\text{domináns lábon}} = 0,003$ ;  $p_{\text{nem-domináns lábon}} = 0,0009$ ) és a korreláció is negatív és erős volt a kétlábon álláskor ( $r = -0,74$ ;  $p = 0,008$ ), a domináns oldalon ( $r = -0,67$ ;  $p = 0,018$ ) és a nem-domináns oldalon történő álláskor ( $r = -0,78$ ;  $p = 0,006$ ).

Összefoglalóan, az életkor hatását csak az idősebb, 65 év feletti korosztályban tudtuk kimutatni, amikor az életkor növekedésével a hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozó képességet jellemző Lehr-féle csillapítási arány romlik (negatív korreláció). Az 55-65 év korosztály esetén a férfiak esetén az életkor már szignifikánsan befolyásolja az egyensúlyozó képességet, míg a nők esetében ez még nem figyelhető meg. Az eredmények megerősítik azt, hogy az idősebb korban életkor előrehaladtával nemcsak az állásstabilitás [Masui és mtsai, 2006; Era és mtsai, 1997], hanem a hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozó képesség is szignifikánsan romlik.

A kétváltozós ANCOVA módszerrel végzett statisztikai elemzés azt mutatja, hogy az életkor hatása, mint kovariáns, szignifikáns volt ( $p = 0,03$ ). Ha külön vizsgáltuk a fiatal (65 év alatti) és idősebb (65 év feletti) korosztályt akkor az életkor szerepére ezzel a statisztikai módszerrel is két ellentétes értéket kaptunk ( $p_{25-64} = 0,12$ ;  $p_{65-80} = 0,008$ ). A másik két változó vizsgálata szignifikáns eltérést mutatott, azaz mind a vizsgálat típusa ( $p = 0,008$ ), mind a vizsgált személy neme ( $p = 0,007$ ) szignifikánsan befolyásolta a Lehr-féle csillapítási arányt, azaz az egyensúlyozó képességet, amely a korábbi, stabilometriás módszerrel végzett kutatások eredményeivel megegyezik [Masui és mtsai, 2005; Schwesig és mtsai, 2006].

Az egyensúlyozó képességnek az életkor előrehaladtával történő romlásának vélhető oka az, hogy az időseknek a lassabb reakció idője, a hosszabb izomválasza, valamint a vesztibularis és szomaszenzoros funkciók is romlanak [Maki és mtsai, 1990; Skinner és mtsai, 1984; Teasdale és mtsai, 1991; Shaw, 1992]. A vesztibularis és szomaszenzoros funkciók romlásának mértéke a nemek között eltér [Masui és mtsai, 2006], amely a nemek közötti eltérés magyarázata lehet.

#### 4. Összefoglalás

Összefoglalóan megállapítható, hogy hirtelen irányváltatási teszt jól alkalmazható fiatalok és idősek esetén. A Lehr-féle csillapítási arányt, melyet a mérnöki tudományokban a csillapított lengés jellemzésére használunk, és a biomechanikai gyakorlatban először alkalmaztuk, jól használható a hirtelen irányváltatás utáni egyensúlyozó képesség jellemzésére. A Lehr-féle csillapítási arányt mind a vizsgált személy neme, mind az életkora szignifikánsan befolyásolja. Az életkor hatása különösen jelentős a 65 év feletti korosztályban. A hirtelen irányváltatási tesztet használtunk a csípőízületi [Kiss, 2010], és a térdízületi kopás, a meniscus sérülés és meniscus eltávolítás, valamint a csípőízületi és térdízületi protézis beültetés hatásának elemzésére is.

#### Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom Takács Mária, Illyés Árpád, Bejek Zoltán, Pethes Ákos, Magyar O. Mátyás orvos kollégáknak a mérések kivitelezésében nyújtott segítségükért. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása

a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja és az OTKA K83650 kutatás támogatja.

## Irodalom

- Boer, J, Mueller, O, Krauss, I, Haupt, G, Axmann, D, Horstman, T. Effect of a sensory-motor exercise program for older adults with osteoarthritis or prosthesis of the hip using measurements made by Posturomed oscillatory platform, *Journal of Geriatric Physical Therapy*, 33, 2010, 10-15.
- Era, P, Avlund, K, Jokela J, Gause-Nilsson, I, Heikkinen, E, Steen, B, Schroll, M. Postural balance and self-reported functional ability in 75-years old men and women: a cross-national comparative study, *J Am Geriatr Soc*, 45, 1997, 21-29.
- Horváth, M. Stabilitás vizsgálat. In: Kocsis, L, Kiss, R. M, Illyés, Á. (szerkesztők) *Mozgásszervek biomechanikája* Budapest: Terc Kiadó, 2007, 197–203.
- Kiss, R. M. Effect of the degree of hip osteoarthritis on equilibrium ability after sudden changes in direction, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20, 2010, 1052-1057.
- Kiss, R. M. A new parameter for characterizing balancing stability on an unstable oscillatory platform, *Medical Engineering and Physics*, 33, 2011a, 1160-1166.
- Kiss, R. M. Do lateral dominance, body mass, body height and direction of perturbation influence the Lehr's damping ratio which characterizes the balancing stability on an unstable oscillatory platform? In: Brebbia, C.A, Eglite, M, Knets, I, Miftahov, R, Popov V. (szerkesztők) *Environmental Health and Biomedicine* Southampton, Boston: WIT press, 2011b, 373-382.
- Kiss, R. M. Influence factors of balancing capacity at healthy elderly subjects, *Proceedings of IASTED Biomechanics* Pittsburgh, PA, 2011c
- Kiss, R.M. Gender differences in the variability of gait in healthy subjects, *Proceedings of IASTED Biomedical Engineering* Innsbruck, Austria, 2012 (elfogadva)
- M. Csizmadia, B, Nándor, E. *Dinamika mérnököknek: Mozgástan* Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 1997, 520-535.
- Maki, B. E, Holliday, P. J, Fernie, G. R. Aging and postural control: a comparison of spontaneous and induced sway balance test, *J Am Geriatr Soc*, 3, 1990, 1-9.
- Masui, T, Hasegawa, Y, Matsuyama, Y, Sakano, S, Kawasaki, M, Suzuki, S. Gender differences in platform measures of balance in rural community-dwelling elders, *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 41, 2005, 201-209.
- Müller, O, Günther, M, Krauß, I, Horstman, T. Physical characterization of the therapeutic device Posturomed as a measuring device – Presentation of a procedure to characterize balancing ability, *Biomedizinische Technik*, 49, 2004, 56-60.
- Prieto, T. Y, Myklebust, J. B, Hoffmann, R. G, Lovett, E. G, Myklebust, B. M. Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, 43, 1996, 956–966.
- Schwesig, R, Lauenroth, A, Becker, S, Hottenrott, K. The postural system in relation to age and gender, *Manuelle Medizin*, 44, 2006, 385-390.
- Shaw, N.A. Age-dependent changes in central somatosensory conduction time, *Clin Electroencephalogr*, 23, 1992, 105-110.
- Skinner, H. B, Barrack, R. L, Cook, C. K. Age related declines in proprioception, *Clin Orthop*, 184, 1984, 208-211.
- Szirmai, I. (szerkesztő) *Neurológia* Budapest: Medicina, 2007, 720p.
- Teasdale, N, Stelmach, G. E, Breunig, A, Meeuwssen, H. J. Age differences in visual sensory integration, *Exp Brain Res*, 85, 1991, 691-696.
- Unterberger, S. Vestibularisgrenzgebiet der Otiatrie und Neurologie, *Fortschritte der Neurologie. Psychiatrie und ihre Grenzgebiet*, 12, 1940, 329–348.
- Vandervoort, A. A. Aging of the human neuromuscular system, *Muscle Nerve*, 25, 2002, 17–25.
- Verreeck, L, Wuyts, F, Truijten, S, Van de Heyning, P. Clinical assessment of balance, normative data, gender and age effects, *International Journal of Audiology*, 47, 2008, 67–75.
- Winter, D. A. *ABC of balance during standing and walking* Waterloo: Waterloo Biomechanics, 1995.

# ÚJ GENERÁCIÓS SZÉLERŐMŰ TORONY SZEGMENSEK FEJLETT ANALÍZISE ÉS OPTIMÁLIS TERVEZÉSE

Vigh László Gergely  
Hidak és Szerkezetek Tanszék  
geri@vbt.bme.hu

Pap Csongor  
Építőmérnöki Kar, MSc hallgató  
csongi19@freemail.hu

## Kivonat

Az új generációs szélerőművek kialakításakor a költséghatékonyság jegyében hangsúlyos szerepet kap a tartószerkezet optimális tervezése. Magas széltornyok esetében gazdaságos megoldást jelent a nagy átmérőjű, vékonyfalú kónikus szegmensekből felépített acél tartószerkezet alkalmazása. Cikkünkben egy 100 m magas, 3 MW kapacitású szélerőmű toronyszerkezetének optimalását mutatjuk be. A feladat célja a torony globális geometriájának, a merevítőgyűrűk kiosztásának és a falvastagságnak az optimális – minimális költséget, illetve szerkezeti súlyt eredményező – megválasztása. Bemutatjuk a tervezési változókat, jellemezzük a részben nemlineáris geometriai és tervezési változókat. A nemlineáris optimalási feladatot direkt keresés módszerrel oldjuk meg, egyszerűsített közelítő méretezési eljárás alapján az Eurocode szabványok héjhorpadásra vonatkozó előírásainak figyelembevételével. A közelítő méretezés során tett egyszerűsítő feltételezéseink ellenőrzésére felületszerkezeti numerikus modellen részletes nemlineáris analízist hajtottunk végre a globális optimumként adódó szerkezeti kialakításra.

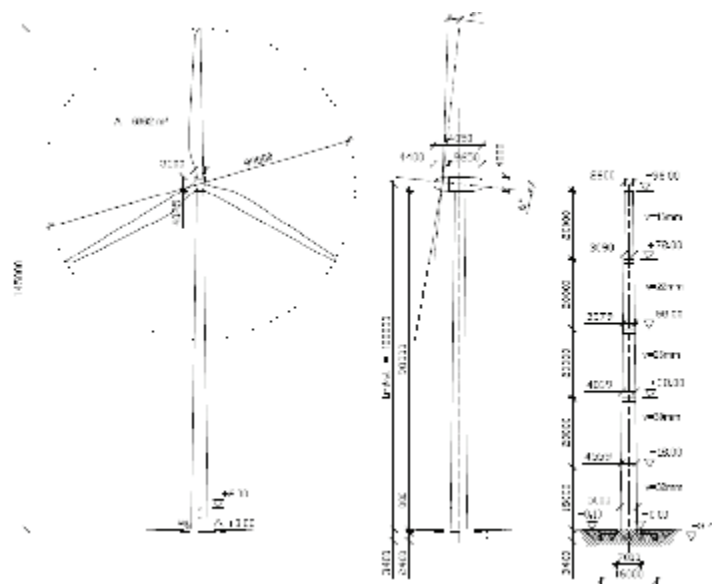
## Kulcsszavak

új generációs szélerőmű, vékonyfalú kónikus acél szegmens, héjhorpadás, szerkezetoptimalás, felületszerkezeti numerikus modell, nemlineáris analízis alapú tervezés

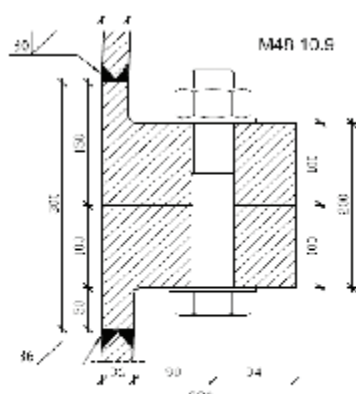
## 1. Bevezetés

A magasság növekedésével az új generációs szélerőművek kialakításakor a költséghatékonyság jegyében hangsúlyos szerepet kap a torony tartószerkezet optimális méretfelvétele, tervezése. A szállítás, szerelés és fenntartás szempontjából a nagy átmérőjű, vékonyfalú, henger vagy kónikus szegmensekből felépített acél torony gazdaságos megoldást jelent amennyiben a gyártási egységek, ún. szegmensek geometriai méretei optimálisak. A méretezést alapvetően befolyásolja a vékonyfalú szelvény héjhorpadási tönkremeneteli módja, amely meghatározza az alkalmazható falvastagságot, illetve szükségessé teszi merevítőgyűrűk alkalmazását. Az optimális kialakítást befolyásolja a szegmensek globális geometriája (szegmens hossza, kezdő és végsugár), falvastagsága, valamint az alkalmazott merevítőgyűrűk száma, alakja és helyzete.

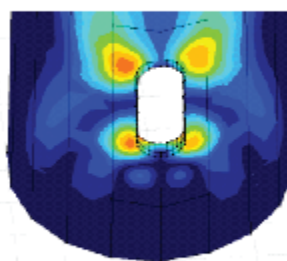
Cikkünkben a [Pap, 2010]-ben megtervezett, 100 m magas széltorony (1. ábra) optimális újratervezésének folyamatát és eredményeit mutatjuk be. Az optimalást paraméteres vizsgálat keretében hajtottuk végre. A kutatás jelen cikkben ismertetett első fázisában a kónikus szegmensek optimális kialakítását és optimális falvastagságát vizsgáltuk. A méretezést az Eurocode 3 1-6. része [EC3-1-6, 2007] alapján végeztük el. A paraméteres vizsgálatban a szegmensek ellenőrzését a szabvány által javasolt alapeljárás segítségével, egyszerűsítő feltételezésekkel hajtottuk végre. Az optimális megoldásként adódó szerkezet szegmenseire vonatkozóan a közelítő méretezés eredményeit fejlett, felületszerkezeti numerikus modellen végrehajtott, imperfekciót tartalmazó geometriai és anyagi nemlineáris analízis segítségével validáltuk. A kutatás későbbi fázisában a kritikus szerkezeti részletek (pl. merevítőgyűrű környezete) vizsgálatát fogjuk végrehajtani virtuális kísérleti módszerrel. A virtuális kísérleti módszer a megbízhatóság fenntartása mellett további gazdasági előnyöket nyújthat az új generációs széltornyok optimális tervezéséhez.



1. ábra: Eredeti szerkezet, [Pap, 2010]



a) merevítőgyűrű (csavarozott karimás kapcsolat)



b) ajtónyílás környezete numerikus modellje

Kivitelezési osztály: "B"  
Széladatok:  $v_b = 25 \text{ m/s}$ ;  
helyszínekategória: I.

Tetőponti mértékadó rotorterhek:  
 $N_z = 1100 \text{ kN}$ ;  $\gamma_z = 1.35$   
 $V_z = 456 \text{ kN}$ ;  $\gamma_z = 1.5$   
 $M_z = 119 \text{ kNm}$   $\gamma_z = 1.5$

Szegmenskiosztás:

Szegmens	1	2	3	4	5
$h$ (m)	20.0				18.0
$t$ (mm)	18	22	26	30	36
$D_1$ (m)	2.60	3.29	4.00	4.68	5.38
$D_2$ (m)	3.29	4.00	4.68	5.38	6.00

Torony tömege: ~300 t

2. ábra: Szerkezeti és numerikus modell részletek

1. táblázat: Eredeti szerkezet

## 2. Az eredeti szerkezet

A vizsgált szerkezeten (1. ábra) egy 3 MW-os szélturbina helyezkedik el, 90 m rotorátmérővel. A gondola szintmagassága 100 m, a rotor teljes tömege 110 t. A 98 m magas torony öt, egyenként azonos kúpszögű kónikus szegmensből áll; anyaga S275 acél. A szerkezet főbb adatait az 1. táblázat foglalja össze. A 2a. ábra a merevítőgyűrű feladatát is ellátó, csavarozott karimás kapcsolat tipikus kialakítását szemlélteti (a szegmensen belül nincs közbenső merevítés). Megjegyezzük, hogy a szegmensek egymáshoz, illetve az alapozáshoz vagy a gondolához történő kapcsolataiban megközelítőleg 500 darab nagyszilárdságú (10.9), 45~52 mm átmérőjű csavar alkalmazása szükséges.

A torony geometriai kialakításában, méretfelvételében (szegmensek száma, keresztmetszeti méretek, kúpszög) szélerőmű gyártók és tervezők tapasztalatait hasznosítottuk. A részletes tervezés kiterjedt minden mértékadó állapot (teherbírás, fáradás, stb.), minden fő szerkezeti elem (torony, alapozás) és a kritikus szerkezeti részletek (kapcsolatok, ajtónyílás környezete – 2b. ábra) ellenőrzésére, [Pap, 2010].

[Pap, 2010; Baniotopoulos, 2009; Lavassas és mtsai, 2003] vizsgálatai megmutatták, hogy a főtartó szerkezet elemeinek mértékadó tönkremeneteli módja az egyidejű globális normálerőből és felborító nyomatékból származó, alkotó irányú membránfeszültségek okozta héjhorpadás, míg az érintő irányú és nyírófeszültségek hatása elenyésző. A mértékadó terhek a maximális figyelembe vett szélső teherkombinációjából származnak. A tervezés további részletei megtalálhatóak [Pap, 2010]-ben.

### 3. Optimalizációs feladat

Megelőző vizsgálataink [Pap, 2010] alapján kijelenthető, hogy a szerkezet súlya és teljes költsége rendkívül érzékeny a torony globális geometriájának változására, és hogy a magasság mentén változó kúpszögű szegmensek alkalmazása előnyös lehet. Kutatásunkban a legkisebb költségű szerkezetet eredményező optimális geometriát, falvastagságot és szegmensszámot keressük. Jelen vizsgálatainkban egyszerűsítésképpen feltételezzük, hogy a költség arányos a szerkezet súlyával, azaz az optimalizációs feladat célfüggvénye a teljes szerkezeti tömeg vagy súly (részletesebb, fejlettebb optimalizációs analízisre mutat példát [Uys és mtsai, 2007]). A gyártás, szállítás, szerelés és egyes további geometriai kényszerek (pl. gondolához történő csatlakozás) behatárolják az alkalmazható falvastagságot, valamint a torony felső és alsó keresztmetszeti méreteit (geometriai kényszerek). A tervezési kényszer az, hogy a ható terhek hatására kialakuló normálfeszültség ne haladja meg a horpadási szilárdságot. Előzetes vizsgálataink alapján kijelenthető, hogy az alkotó irányú feszültségek okozta héjhorpadás domináns, az optimalizációs feladatban az egyéb hatások elhanyagolhatóak. Az egyszerűsítés jogosságát fejlett, részletes analízis keretében vizsgáljuk (5. fejezet). Feltételezzük továbbá, hogy az optimális szerkezeti kialakítás esetén a magasság mentén a szegmens keresztmetszetek kihasználtsága (a tervezési normálfeszültség és horpadási szilárdság hányadosa) az egyenleteshez közelít. Jelen optimalizációs feladatban az egyéb tervezési kényszereket (fáradás, rezonancia, stb.) közvetett módon, utólagos ellenőrzéssel vesszük figyelembe. Továbbá nem foglalkozunk a merevítőgyűrűk optimális tervezésével: azok méretfelvétele tapasztalati úton, illetve előzetes vizsgálataink eredményei alapján történik. A kutatást későbbi fázisában kiterjesztjük a merevítőgyűrű részletes vizsgálataira is.

A vizsgált szerkezetben az adott turbina esetén a felső – kezdő – keresztmetszet sugara kötötten 1,3 m. Ez és a fentiek alapján az optimalizációs feladatban a változó (optimalizálendő) paraméterek és értelmezési tartományuk a következő: a) *szegmensek száma*: 3~7; b) *szegmens falvastagság*: 10~30 mm; c) *kúpfélszög*: 0~5°. A felsorolt változók nem teljesen függetlenek egymástól: adott terhelés, szegmenshossz, kezdő sugár és falvastagság esetén az a kúpfélszög, mely mellett egyenletes, 100%-os kihasználtság adódik a szegmens magassága mentén, egyértelműen meghatározható; ezt a következő fejezetben igazoljuk.

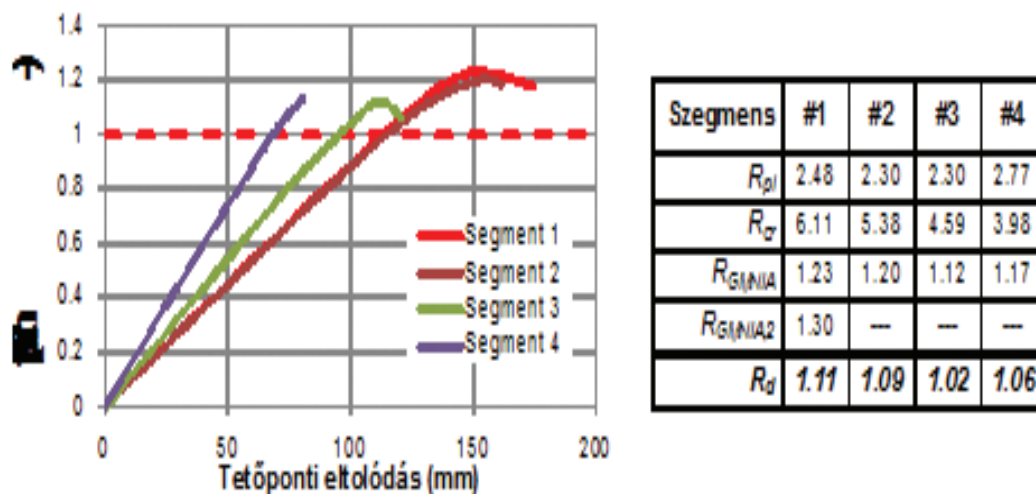
A célfüggvény és a kényszerek nemlinearitása (pl. horpadási szilárdság) miatt, valamint mert lokális optimum megoldások léteznek, az optimalizációs feladat nemlineáris és nem-konvex. A feladat hatékonyan megoldható a direkt keresés eljárással, ami gyakorlatilag diszkrét megoldásokat eredményező paraméteres vizsgálatot jelent esetünkben.

### 4. Parametrikus vizsgálat és az optimális szerkezet

A direkt keresés eljárás tipikus eredményeit a négysegmenses torony második szegmensére mutatjuk be példaként a 3. ábrán és a 2. táblázatban. Magától értetődő, hogy nagyobb falvastagság esetén – mivel ekkor a horpadási szilárdság növekszik – a szükséges keresztmetszeti terület csökken, így az alsó keresztmetszetben alkalmazandó sugár és így az adódó kúpszög is kisebb. Igazoltuk továbbá, hogy bizonyos falvastagság (példánkban 12 mm) és megfelelő kúpszög alkalmazásával elérhető a magasság menti egyenletes kihasználtság. Amint a 3. ábra is alátámasztja, egy elkülönített szegmens legkisebb súlyát tipikusan a legkisebb falvastagság és a hozzá tartozó kúpszög választásával érhetjük el. Ugyanakkor viszonylag kismértékű falvastagság csökkentés az optimális kúpszög jelentős növekedését vonja maga után. Ez a megfigyelés lényeges a teljes torony tervezését illetően, hiszen egy szegmens kúpszög értéke alapvetően befolyásolja a szomszédos (alsó) szegmensek tervezését. Ez alapján kijelenthető, hogy a teljes torony integrált kezelése szükséges, az optimalizációs feladatban egymástól nem különíthető el egy-egy szegmens méretfelvétele, valamint hogy a globális optimum nem feltétlenül a legkisebb falvastagságú szelvények választását jelenti. A példaként mutatott szegmensre az optimális megoldás a 15 mm falvastagság.

A 3. táblázat és a 4. ábra a lokális optimum megoldásokat illusztrálja különböző számú szegmensek alkalmazása esetén. Megállapítható, hogy a szegmensek számának növelése hatékonyan csökkenti a szerkezetnek a csak a keresztmetszet alapján számított – azaz merevítőgyűrűk és egyéb elemek nélküli – fajsúlyát. A teljes szerkezet tömegében – és árában – azonban jelentős részt képviselnek a merevítőgyűrűk. Ennek figyelembevételével a vizsgált szerkezetnél a globális optimumot a négy szegmensre való osztás jelenti. A globális optimumhoz tartozó részeredményeket a 4. táblázat foglalja össze.

A szerzők hangsúlyozzák, hogy a merevítőgyűrűk viselkedése és optimális kialakítása további részletes vizsgálat tárgya. A teljes szerkezet viselkedése nem elhanyagolható mértékben függhet a merevítőgyűrű konfigurációtól; a merevítők optimalizálásával további súlycsökkentés várható.



3. ábra: A parametrikus vizsgálat eredményei – A négyszegmensű torony 2. szegmense      2. táblázat: A parametrikus vizsgálat eredményei – A négyszegmensű torony 2. szegmense

Szegmensek száma (-)	3	4	5	6	7
Szegmensmagasság (m)	32.67	24.50	19.60	16.33	14.00
Sugár (m)	1.3 - 2.32 - 3.40 - 4.28	1.3 - 1.85 - 2.39 - 3.08 - 4.08	1.3 - 1.58 - 2.13 - 2.70 - 3.25 - 4.08	1.3 - 1.41 - 1.87 - 2.47 - 2.93 - 3.40 - 4.10	1.3 - 1.47 - 1.69 - 2.19 - 2.56 - 3.12 - 3.46 - 4.06
Falvastagság (mm)	12 - 14 - 16	12 - 15 - 16 - 16	12 - 14 - 15 - 16 - 16	12 - 14 - 14 - 15 - 16 - 16	10 - 14 - 14 - 15 - 15 - 16 - 16
Torony tömege merevítőgyűrű nélkül (kg)	198 022	182 833	179 016	177 313	174 998
Torony tömege merevítőgyűrűvel (kg)	<b>214 220</b>	<b>201 793</b>	<b>202 395</b>	<b>205 289</b>	<b>207 492</b>

3. táblázat: A különböző szegmensszám esetén nyert optimális megoldások

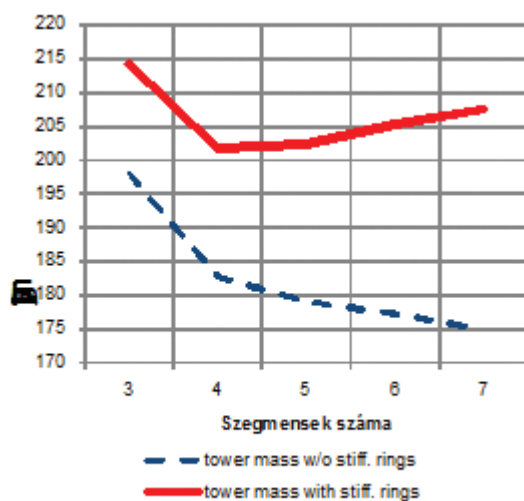
## 5. Fejlett horpadásvizsgálat és teherbírási analízis – Az eredmények validálása

A kutatás második lépésében részletes felületszerkezeti numerikus modellt dolgozunk ki és alkalmazzuk a horpadási teherbírási elemzésére. Jelen fázisban az elkülönített szegmensekre kidolgozott almodellek (5.a ábra) segítségével validáljuk az előzőekben nyert optimális szegmens kialakításokra kapott eredményeket. Az analízishez az ANSYS végeselemes szoftvercsomagot alkalmaztuk, [ANSYS]. A SHELL181 jelű (4 csp., 6 DOF/csp) általános héjelemet alkalmaztuk. A geometriai modell tartalmazza a szegmens fal és a merevítőgyűrűk modelljét. A szegmens felső keresztmetszetében a globális analízisből számított igénybevétel komponenseket működtetjük. A szegmensre közvetlenül ható, a magasság és a terület mentén változó szélterhet az Eurocode 1 1.4 rész [EC1-1-4, 2007] alapján pontosan modellezzük.

A horpadási teherbírást az imperfekt, anyagi és geometriai nemlineáris analízis alapú szabványos méretezési eljárással (GMNIA), [EC3-1-6, 2007; Baniotopoulos, 2009; Lavassas és mtsai, 2003] határozzuk meg minden szegmensre. A modellben az 5b-c. ábrákon mutatott „out-of-roundness” (ovalizáció) és „dimple” (lokális benyomódás) imperfekciókat mint ekvivalens geometriai imperfekciókat alkalmazzuk. Utóbbit lineáris stabilitási analízisből nyert mértékadó horpadási alak alapján állítottuk elő. Az elem viselkedésének jellemzésére az EC3-1-6 szabvány a GMNI analízis mellett a következő vizsgálat sorozatot követeli meg: a) lineáris stabilitásvizsgálat, LBA, a kritikus teherparaméter meghatározására; b) anyagi nemlineáris analízis a perfekt geometriai modellen, MNA, a karakterisztikus szilárdság meghatározására; c) geometriai és anyagi



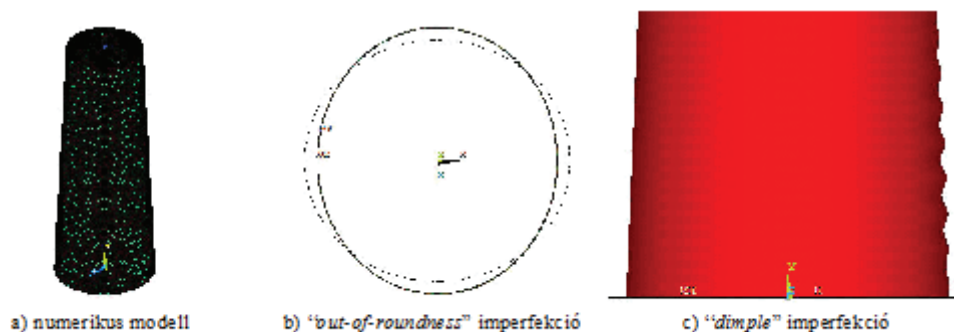
nemlineáris analízis a perfekt geometrián (GMNA) annak ellenőrzésére, hogy az alkalmazott geometriai imperfekció valóban „káros” hatású; d) GMNIA 10%-kal kisebb imperfekció amplitúdók alkalmazásával az imperfekció alakjának ellenőrzésére.



4. ábra: A különböző szegek szám esetén nyert optimális szerkezetek összehasonlítása

Szegek#	1.	2.	3.	4.
$h$ [m]	2450			
$r_1$ [m]	1.30	1.85	2.39	3.08
$t$ [mm]	12	15	16	16
$r_2$ [m]	1.85	2.39	3.08	4.08
$m$ [t]	22.75	38.29	52.73	69.06
$\rho$ [kg/m]	929	1563	2152	2819
$\beta$ [°]	1.29	1.26	1.61	2.34
$\sigma_{x,Rd,1}$ [MPa]	171	172	169	156
$\sigma_{x,Ed,1}$ [MPa]	18	127	154	155
$UF^1$ [%]	10.6	73.6	91.4	99.7
$\sigma_{x,Rd,2}$ [MPa]	159	165	156	130
$\sigma_{x,Ed,2}$ [MPa]	158	164	155	130
$UF^2$ [%]	99.4	99.9	99.7	99.8
$W_o$ stiff [t]	182.83			
$W$ stiff [t]	201.79			

4. táblázat: A globális optimum megoldás részletes eredményei



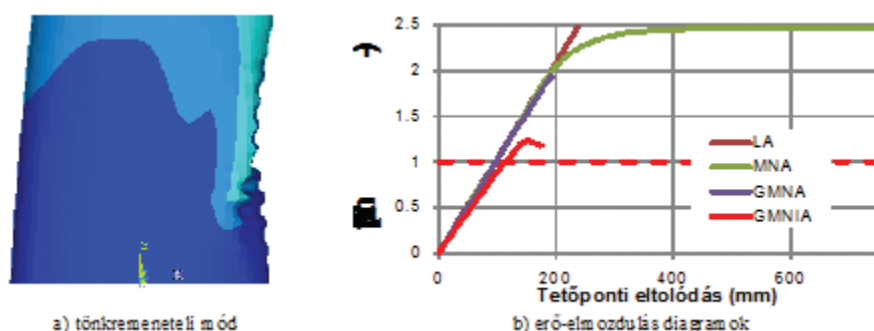
5. ábra: Egy szegek elkülönített numerikus modellje és az alkalmazott imperfekciók

Az 1. szegek tönkremeneteli módját és a különböző analízistípusok esetén nyert teherparaméter – tetőponti elmozdulás diagramjait mutatja a 6. ábra. Az egyes szegek GMNIA eredményeit a 7. ábra és az 5. táblázat foglalja össze. A tervezési ellenállás teherparaméter  $R_d$  (teherbírás és tervezési teher szintjének hányadosa) számításában  $k_{GMNIA} = 1.0$  kalibrációs tényező (az analízis megbízhatóságát fejezi ki) és  $\gamma_{MI} = 1.1$  parciális tényezőt feltételeztünk. A számított tervezési ellenállás 2~11%-kal magasabb, mint a tervezési teher értéke. Az alapeljárással összevetve a GMNI analízis alkalmazása esetén jellemzően nagyobb mértékű eltérést várhatnánk, ugyanakkor jelen vizsgálatban a kézi számítás során elhanyagoltuk a szélteher tényleges térbeli eloszlásának, valamint az érintő irányú és nyírófeszültségeknek a hatását. Az eredmények igazolják az optimális megoldás érvényességét.

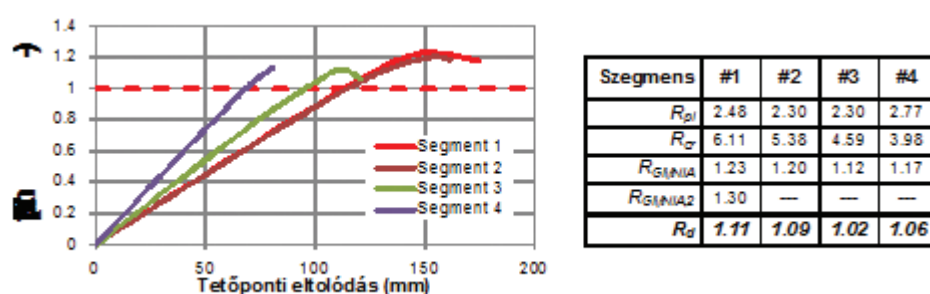
## 6. Összefoglalás

Numerikus példán keresztül szemléltettük az acél vékonyfalú széltorony szerkezet optimális tervezésének fontosságát. A kutatás jelen fázisában a torony globális geometriájának, a szegek számának és a falvastagságának az optimális felvételét megcélzó optimálási feladatot oldottunk meg adott szerkezetre. A teherbírás eredményeket és a közelítő számítás feltételezéseinek helyességét fejlett nemlineáris analízis segítségével igazoltuk. A kidolgozott numerikus modell a további kritikus részekkel történő kiegészítés után alkalmas további virtuális kísérletek végrehajtására, amely szilárd, megbízható alapot adhat a magas,

új generációs szélérőmű tornyok optimális tervezéséhez. Eredményeinket az *Eurosteel 2011* nemzetközi konferencián összegeztük [Vigh és Pap, 2011].



6. ábra: Az optimális szerkezet első szegmensének analízis eredményei



7. ábra: A GMNIA analízis eredménye az optimális szerkezeti kialakításra

5. táblázat: A horpadásvizsgálat eredményei az optimális szerkezetre

## Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához, amelyet az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 támogat.

## Irodalom

- ANSYS online documentation ANSYS, Inc, USA
- Baniotopoulos, C. C. *Effects of geometrical imperfections to the resistance of the wind turbine tower*, Udine: CISM course “Environmental wind engineering and wind energy structures”, 2009.
- EN 1991-1-4:2007 *Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions – Wind actions*, European Committee for Standardization (CEN), 2007.
- EN 1993-1-6:2007 *Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures*, European Committee for Standardization (CEN), 2007.
- Lavassas, I, Nikolaidis, G, Zervas, P, Efthimiou, E, Doudoumis, I. N, Baniotopoulos, C. C. Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower, *Engineering Structures*, 25, 2003, 1097-1106.
- Pap, Cs, *Design of 100-m height wind tower supporting 3-MW wind turbine*, BSc diploma, BME, 2010.
- Uys, P. E, Farkas, J, Jármay, K, van Tonder, F. Optimisation of a steel tower for wind turbine structure, *Engineering Structures*, 29, 2007, 1337-1342.
- Vigh, L. G, Pap, Cs. Design of new generation steel wind-turbine tower – Advanced analysis and optimal design of conical segments, *Proc. of EUROSTEEL2011*, Vol. A, 819-824, 2011.

# ÉPÜLETSZERKEZETEK IDŐVEL VÁLTOZÓ TELJESÍTMÉNYE

Tóth Elek  
Magasépítési Tanszék  
toth.elek@met.bme.hu

## Kivonat

Az épületek és épületszerkezetek idővel változó teljesítményének figyelembe vétele egyre fontosabb szerepet játszik mind az új épületek, mind a meglévő épületállomány felújításának tervezésében és üzemeltetésében. A hazai hőtechnikai, páratechnikai és energetikai szabályozások egyrészt az építőipari hagyományokból, korábbi szabványokból, másrészt a vonatkozó EU direktívák előírásából építkeznek. E két irányvonal helyenként ellentmond egymásnak. Összehangolásuk, harmonizálásuk kulcsfontosságú feladat, melyet a szakmagyakorlók mellett elsősorban az oktatás korszerűsítésével, naprakésszé tételével lehet és kell megoldani. A kutatás során élettartam szemléletű, hőtechnikai, páratechnikai, energetikai, és gazdaságossági elemzésekre, és ezeket alátámasztó, kiegészítő laboratóriumi és szimulációs vizsgálatokra kerül sor.

## Kulcsszavak

élettartam, hőtechnika, energetika, páratechnika, légcserre, penészedés

## 1. Bevezetés

Az Európai Parlament és a Tanács 2010/31/EU irányelve a következőket rögzíti: „*A becsült, ésszerű gazdaságos élettartamot az egyes tagállamok határozzák meg, és az az épület becsült fennmaradó gazdaságilag ésszerű gazdaságos élettartamát jelenti, ha az egész épületre vonatkozóan határoztak meg az energiateljesítménnyel kapcsolatos követelményeket, vagy az épületelem becsült gazdaságos élettartamára utal, ha az épületelemekre vonatkozóan határoztak meg az energiateljesítménnyel kapcsolatos követelményeket.*” A kutatás egyik célja: javaslatlással hazai gazdaságos élettartamok meghatározására.

## 2. Helyzetelemzés

Az épületek felújításának szükségessége legtöbbször a műszaki, vagy az erkölcsi avulásra vezethető vissza. Fontos kérdés, hogy mikor, és milyen szinten (részleges, vagy teljes körű; javítás, felújítás vagy teljes csere; stb...) kell, illetve érdemes hozzájárulni az épülethez, vagy valamelyik részéhez. Öt, látszólag független, mégis egymáshoz számos ponton kapcsolódó, összefüggő szempont szerinti vizsgálat jöhet számításba: élettartam szemléletű, hőtechnikai szemléletű, páratechnikai szemléletű, energetikai szemléletű, és gazdaságossági szemléletű megközelítés.

### 2.1. Élettartam szemléletű megközelítés

Élettartam szemléletű megközelítés alapján kétféle élettartamról is beszélhetünk:

A) *a meglévő épület, és szerkezeti részeinek koráról és várható élettartamáról*

Ez esetben vizsgálandó: a természetes öregedés, avulás tervezett, illetve elvárt mértéke, és ehhez képest a tényleges öregedés, avulás mértéke, mely lehet: szerkezeti avulás (javítással, felújítással orvosolható); anyagminőségi avulás (orvossága a csere, vagy a szintrehozó javítás); erkölcsi avulás (értéknövelő cserét, vagy funkcionális átalakítást kíván)

B) *A felújítandó anyag, szerkezet, vagy technológia várható élettartamáról*

Ezen belül különös figyelmet kell fordítani:

- a ciklikus (tervszerű) felújítás, karbantartás szükségességére, mely az üzemeltetés számára ad fontos feladatot, hiszen elmaradása esetén a felújított szerkezet élettartama csökken,
- az „egyenértékű” várható élettartamú anyagok, szerkezetek betervezésére/beépítésére, mert az épület, vagy épületszerkezeti egység károsodása, tönkremenetele mindig a leggyengébb láncszemnél, a legrövidebb várható élettartamú alkotó elemnél kezdődik el, így a szerkezet várható élettartama közel azonos lesz a leggyengébb láncszem várható élettartamával.

Mit is értünk pontosan egy épület „várható élettartama” alatt? Az átlagos élettartam nem más, mint az átlagos minőségű anyagokból, átlagos minőségben kivitelezett, átlagos magyarországi időjárási körülményeknek kitett, átlagos rendeltetészerű használatú igénybe vett, átlagosan karbantartott és javított épületek átlagos elhasználódási időtartama. Az újra és újra felbukkanó „átlagos” jelző óvatosságra int. Egyrészt ugyanis újabb definiálást, vagy legalábbis közmegegyezést igényel az „átlagos” fogalmának tisztázása. Az átlag ugyanis

- történelmi koronként (anyagfajta, anyagminőség, technológia, éghajlatváltozás)
- földrajzi területenként (kontinensenként, országonként, tájegységenként)
- a beruházói, kivitelezői kör igényességének és hozzáértésének függvényében
- a használói, tulajdonosi, kezelői kör hozzáértése és igényessége függvényében

bármely vizsgált időpillanatban és bármely vizsgált helyen elméletileg más és más lesz.

Jogos elvárás, hogy a ma elkészült épületre becsült várható élettartam legalább 100 évig érvényes legyen, tehát például a ma 80 éves élettartamra becsült épület várható élettartama 30 év elmúltával még mindig további 50 év legyen, és ne csökkenjen esetleg 25 évre. Mindezen elvárásoknak igen nehéz megfelelni, hiszen (elsősorban) a környezeti hatások változása nehezen becsülhető előre, pedig épületeink egyes alkotó részeinek avulásában az egyik legfontosabb szerepet ezek játsszák. (Pl.: egy horganyzott vaslemez várható élettartama 100 évvel ezelőtt még 15-20 év volt, mely a mai városi környezetben alig 5 évre csökkent!)

Az épületek várható élettartamának becslése komoly problémákat okozott már elődeinknek is a XX. században. F.W.Ross [1924] a téglafalú épületekkel kapcsolatosan általában 200-300 év várható élettartammal, városi környezetben épülő téglafalás lakóépületnél azonban 225-400 év várható élettartammal számolt. Junk-Herzka [1931] a szilárd épületeknél már csak 150 év várható élettartamot javasol figyelembe venni. Alig 10 év múlva Kotsis Endre műegyetemi tanár [Kotsis, 1942] már csupán 50-100 év várható élettartamot jósol a téglafalú épületekre. Pesszimizmusa jogosnak bizonyult, és a becsült élettartamokkal kapcsolatban tett megjegyzése sajnós még ma is aktuális: „Az utolsó évtizedek alatt gyakran látott silány kivitelezés esetei a fentieknél alacsonyabb korhatárok alapulvételét indokolják.” A napjainkban Magyarországon elfogadott várható épület-élettartamok a következők:

vert falú építmények 50 – 70 év; vályogtégla falazatú építmények 60 – 80 év; tömőrfalú téglaszerkezetű építmények 150 – 200 év; mészhomoktégla szerkezetű építmények 100 év; mésztufa szerkezetű építmények 80 – 100 év; terméskő falszerkezetű építmények 100 – 200 év; monolit betonszerkezetű építmények 200 év; beton kőszerkezetű építmények 200 év; falazóblokkos építmények 150 év; házigyári panelszerkezeti építmények 80 – 100 év; acélház szerkezetű építmények 100 – 150 év; monolit vasbetonváz szerkezetű építmények 150 év; öntött beton szerkezetű építmények 80 – 100 év; könnyűszerkezetes építmények 70 – 90 év. [BMEEOAFAG02, 2011].

A jellemző megállapítások általános összefoglalása:

- 200 éves élettartam a terméskő, illetve a tömör téglafalazatú épületeknél várható
- 150 év élettartam várható el a pórusos téglablokk falazatú, illetve monolit vb. vázas épületek esetén
- 100 éves élettartam várható a mészhomok tégla falazatú, az öntöttbeton, illetve a házigyári paneles épületeknél
- 100 év alatti élettartam várható a vályogtégla falazatú és a könnyűszerkezetes épületeknél
- első látásra meglepő, hogy a könnyűszerkezetes épületek és az „öko” jellegű vályogtégla falazatú épületek egyaránt közel azonosan 70-80 év átlagos várható élettartamot teljesítenek, ami megközelítőleg a fele a téglafalazatú épületek várható élettartamának.

További pontosítást igényel a „könnyűszerkezetes” épület definiálása. A fenti élettartamok ugyanis az európai típusú, „emberöltő távlatra” készített könnyűszerkezetes házakra érvényesek, az amerikai típusú, egy-egy emberöltőn belüli többszörös élettér- és lakóhely változtatás igényét követő könnyűszerkezetes épületek várható élettartama ennél értelemszerűen kevesebb. Az épület egyes szerkezeti, vagy szakipari részei alkotó elemeinek élettartama jelentős mértékben befolyásolja a teljes szerkezet vagy épület várható élettartamát.

Míg az épületekkel kapcsolatosan általában 100 év körüli átlagos élettartamok várhatók, az egyes szerkezeti/szakipari alrendszer, anyagok tekintetében a várható élettartam a mai ismereteink szerint ennek megközelítőleg csak a fele-harmada, vagy még annál is kevesebb:

- páraáteresztő vakolat	15-25 év (5év/cm)
- hőszigetelő vakolat	15-25 év
- szigetelések, tömítések általában	15-30 év
- színező vakolat (karbantartásként átfestve)	20-30 év
- egyenes rétegtendű lapostető	25-30 év
- műanyag tokos ablakszerkezet	≈ 40 év
- fordított rétegtendű lapostető	45-50 év
- vákuumszigetelés	≈ 50 év

Ez annyit jelent, hogy

- egyrészt az épület várható élettartama alatt a folyamatos karbantartás elvégzése mellett is legalább egyszer, de egyes elemek akár 5-6 alkalommal is teljes cserére szorulnak
- másrészt a szerkezeti alrendszerek cseréjének elmulasztása az egész épület várható élettartamának csökkenéséhez vezethet

Ez a tendencia figyelhető meg további épületalkotó szakipari, illetve gépészeti elemek várható élettartamának elemzése során is:

- bevonatos acéllemez tető vidéken	100 év
- bevonatos acéllemez tető városban	40-60 év
- betoncserép	80-100 év
- égetett agyagcserép	40-60 év
- azbesztcement palafedés	20-40 év
- palafedés felújítása bitumenes lemezzel	25-30 év
- szálerősítésű palafedés	30-50 év
- sík napkollektor	20-40 év

Az élettartam szemléletű megközelítésből származó fontos felújítás tervezési/kivitelezési ismeretek:

- az épület várható élettartama során az egyes szerkezeti/szakipari alrendszereket legalább egyszer ki kell cserélni,
- az egyes szerkezeti/szakipari alrendszerek cseréjét célszerű csoportonként egyszerre elvégezni, ezért javasolt az egyes alrendszereken belül közel azonos várható élettartamú elemek betervezése, beépítése
- az egyes alrendszerek, illetve elemek kapcsolatát úgy kell kialakítani, hogy azok cseréje szükség esetén a hosszabb várható élettartamú elemek rongálása nélkül legyen megoldható.

## 2.2. Hőtechnikai szemléletű megközelítés

A magyar városok épületeinek falvastagságát 1870-től egészen a Monarchia bukását követő évekig a Fővárosi Közmunkák Tanácsa által felállított „ökölszabály” szabályozta. A Monarchia tipizált téglájából, a nagyméretű égetett agyagtéglából készülő falak vastagsága a földem fesztávolság és a szintszám függvényében került meghatározásra. A minimális falvastagság: 6,0 m fesztávolságig: 45 cm; 6,0-8,0 m fesztávolság között: 60 cm; 8,0 – 10,0 m fesztávolság esetén: 75 cm. Az így meghatározott minimális falvastagságokat a földem csatlakozások számának és típusának megfelelően növelni kellett: faföldem felfekvése esetén 15,0cm-rel; acélgerendás földem felfekvése esetén 7,5 cm-rel.

Egy 4-5 szintes városi bérház homlokzati falvastagsága ezek alapján átlagosan 75 cm-re adódott, ami hőszigetelő képességet tekintve „ $k=0,86 \text{ W/m}^2\text{K}$ ” hőátbocsátási tényezőnek felelt meg.

A Monarchia bukását a nagyméretű téglák is csak néhány évvel élte túl. Helyébe porosz mintára a kisméretű tömör égetett agyagtégla lépett, mely 25 cm-es oldalméretével mind a mai napig a nyugat-európai (DIN szabványsorozatra építő) modulrendszer alapját képezi.

A kisméretű téglából épített falazatok teherbíró képességét már számítással határozták meg, így a szintenkénti földemcsatlakozásoknál nem kellett kötelezően vastagítani a falakat. Ökölszabályt ebben a korban éppen hőtechnikai okok miatt alkalmazták: a homlokzati falak legkisebb vastagsága 38 cm lehetett, ami hőszigetelő képességét tekintve „ $k=1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ” értékű hőátbocsátási tényezőnek felelt meg. A Monarchia bukását követően megvalósított épületeink átlagos hőátbocsátási tényezője tehát mintegy 20-25%-kkal rosszabb lett a századfordulón épített bérházakéhoz képest.

Az 1943. kiadású Építési Zsebkönyvben Möller Károly egyetemi tanár a falszerkezetek hőtechnikai méretezési alapelveit a következőképpen határozta meg: „*a hőszigetelés minimuma az a „ $k$ ” érték, amelynél a belső falfelületen még éppen nem jön létre párakicsapódás.*”

Ez a megfogalmazás egyértelműen az épített tér funkcionális használhatóságát tartja szem előtt, ebben a korban még szó sincs energetikai takarékosági megfontolásokról.

A falazó anyagok gyártmányfejlesztési iránya a II. Világháborút követően a politikai változásoknak megfelelően módosult. Kezdetben ugyan még a kevéslyukú, soklyukú, majd a magasított és az ikersejt téglákkal a kisméretű téгла méretrendjében próbálkoztak a hőszigetelő képesség kismértékű javításával, hamarosan azonban az új cél a 38-as kisméretű téglával közel azonos hőszigetelő képességű, de a KGST alapmodulnak megfelelő 30 cm vastagsággal építhető falazatok fejlesztése lett, „k”=1,2-1,5 W/m<sup>2</sup>K körüli hőátbocsátási tényezővel

Az 1970'-es évek világméretű olajválsága Európa valamennyi országában energiatakarékosági intézkedésekhez vezetett. Így 1979-ben megszületett az első hazai hőtechnikai szabvány, **MSZ-04-140/2-79.** számmal, mely a határoló felületek „k” hőátbocsátási tényezőire adott kötelezően betartandó maximális értékeket. A falazatokra megadott érték  $k_{fal} \leq 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$  volt, mely értéket az I. Világháború után készült épületek általában nem tudták kielégíteni, legfeljebb néhány századfordulós bérház átlagos falszerkezete tudott megfelelni a követelményeknek.

A homlokzati falak tekintetében a szabvány gyakorlatilag 6 éves átmeneti időszakot jelölt ki, melynek során a falazóanyag gyártóknak fel kellett készülni az 1985-ben megjelent **MSZ-04-140/2-85.** jelű szabványban (előre ismerten) hatályba lépő  $k_{fal} \leq 0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$  –es szigorításra. Hamar kiderült, hogy 30 cm-es falvastagsággal az új követelményértéket már nem lehet kielégíteni, és megindult először a 36 cm-es, majd a ma is létező 38 és 44 cm-es vastagságú porózus falazóblokkok gyártása.

Az 1979/85-ös hőtechnikai szabvány tehát két igen fontos építőanyag területen indított el fejlődést:

- egyrészt az új építéseknel az anyagában porózus homogén, illetve légüregekkel könnyített falazóelemek fejlesztése terén
- másrészt a felújítások számára használható utólagos hőszigetelések anyagának és beépítési technológiájának fejlesztése terén

1991-ben ismét módosult a hőtechnikai szabvány, de ez tartalmát tekintve valójában nem a korábbi hőtechnikai szabványok módosítása volt, hanem 1992-től egy új alapkonceptióra építő energetikai szabvány lépett hatályba. A különbség lényege az, hogy amíg a korábbi hőtechnikai szabványok az egydimenziós hőáramok elvén az épület határoló felületeire koncentráltak, és az épület hővesztésének csökkentését e határoló felületek megengedett „k” hőátbocsátási tényezőjének korlátozásával kívánták elérni, addig az 1991-es szabvány a többdimenziós hőáramok elve szerint nem csak az épületek határoló felületein, hanem a felületek csatlakozó élei mentén kialakuló vonal menti hőhidakon keresztül együttesen távozó összes hőmennyiséget (energiavesztés) kívánta egy megengedett érték alá szorítani.

**2006-ban** egy Tárca Nélküli Miniszteri (TNM) rendelet született. Ez az első hazai –nevében is egyértelműen **energetikai célzatú**, és egyúttal az első **rendelet szintű** szabályozás.

Jellegzetessége, hogy nem a korábbi magyar szabványokban rögzített hőtechnikai/energetikai szabályozások továbbfejlesztéseként, hanem egy 2002. évi Európa Tanácsi határozat határidős előírásainak teljesítéseként jött létre, említést sem tesz az MSZ-04-140/2:1991. meglévő szabályozásról, illetve az abban foglalt szakmai tartalmak további sorsáról.

A Rendelet az MSZ-04-140/2:1991. szabványban megfogalmazott nem energetikai jellegű (állagvédelmi, egészségvédelmi, alapvető **páratechnikai**) követelményekről sem tesz említést, így azokat aktuálisan hatályos szabályozás híján a mai tervezői gyakorlat az esetek többségében figyelmen kívül hagyja.

E szabványok – bár valamennyien a többdimenziós hőáramok elvét vallják alapelvüknek – a vonal menti hőhidak kérdésével csak közelítő számítások formájában foglalkoznak. Ezek részletes vizsgálata hőtechnikai és páratechnikai szempontból is elengedhetetlen. A 2008-ban hatályba lépett harmonizált EU szabványok hőhid-adatai a hazai járatos épületszerkezeti kapcsolatokra általában nem alkalmazhatók.

A meglévő épületburok hőszigetelő képessége növelésének egyik igen hatékony, és a gyakorlatban általánosan alkalmazott módszere az ablakok légzárásának növelése, a filtráció csökkentése. Mindennek egyenes következménye a beltéri páratartalom növekedése, a párafeldúsulás, ami az esetek nagy részében a penészedési problémák megjelenését idézi elő.

A nyílászárók kérdése tehát kiemelten kezelendő a meglévő épületek felújítása során. A lehetséges megoldások:

- a meglévő ablakok légzárásának növelése – *a filtráció jelentős mértékben lecsökkenthető, de a hatályos energetikai rendeletnek megfelelő óránkénti légcsereszám nem érhető el*
- a meglévő ablakok hőszigetelésének növelése (3. üvegréteget tartalmazó kiegészítő vendégszárny beépítése, 2 rétegű üvegezés cseréje hőszigetelő üvegre) - *a transzmissziós hővesztés jelentős mértékben csökkenthető, az energetikai rendeletnek megfelelő „U” követelményérték azonban általában nem érhető el*
- a meglévő ablak cseréje új, fokozott hőszigetelésű és légzárású ablakszerkezetre - *az energetika rendeletnek megfelelő ablak „U” érték és légzárás egyaránt elérhető, az ablak formai megjelenése*

azonban sok esetben nem illeszhető a műemléki, vagy műemlék jellegű környezethez, a filtráció csökkenése a belső téri páratartalom növekedéséhez, ez pedig esetlegesen a korábban kifogástalan falfelületeken nedvesség és penész megjelenéséhez vezethet

### 2.3. Páratechnikai szemléletű megközelítés

Az épületen belül a pára jellemzően kétféle módon fejt ki károsító hatását:

A határoló szerkezetet alkotó rétegek között, a **szerkezet belsejében** kialakuló nedvesedés (diffúziós párakicsapódás) következményeként; ennek veszélye akkor áll fenn, ha a határoló szerkezetre szerkesztett parciális nyomásesés diagramja valamelyik réteghatáron átmetszi a telítési párányomás diagramját ( $p_{rj} > p_{sj}$ ).

A határoló szerkezet belsejében kialakuló nedvesedés (kondenzációs párakicsapódás) következményeként; ennek veszélye akkor áll fenn, ha a felülettel érintkező levegő relatív páratartalma meghaladja a felület alkotó anyagra jellemző kezdeti kapilláris kondenzációhoz tartozó relatív páratartalmat ( $\varphi_i > \varphi_{kk}$ ).

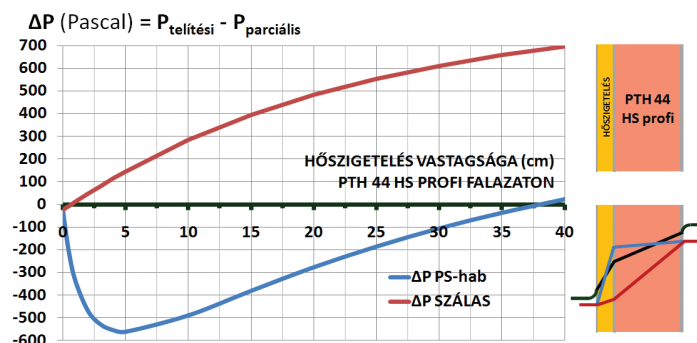
A szerkezeten belüli nedvesedés veszélyének ellenőrzéséhez az MSZ-04-140/2:1991 szabványban megadott eljárást alkalmazva, ha a parciális résznyomás vonala átmetszi a telítési nyomás görbét, akkor a szabvány M.3.6. mellékletében részletezett szabályok szerint a részpárányomások korrekciójával a módosított parciális vízgőznyomás eloszlásának diagramja meghatározható.

Annak eldöntéséhez, hogy a kicsapódó pára károsítja-e a szerkezetet, további részletes elemzésekre van szükség. Ezek mellőzésével, általánosságban megállapítható, hogy károsodásra akkor számíthatunk, ha:

- a nedvesség kicsapódás a fagzónában történik
- a réteg érzékeny a nedvességre (hőszigetelő képessége vagy szilárdsága jelentősen csökken)
- a fűtési idény során kondenzálódó nedvesség a nyári száradási időszakban nem tud eltávozni

Hatályos épületfizikai szabályozásunk az energiatakarékosságról szól, és a határoló szerkezetek hőszigetelő képességének növelését javasolja. A páratechnikai megfontolások figyelmen kívül hagyása azonban rendkívüli károkat okozhat. Ezt igazolja a következő gyakorlati példa:

Vizsgáljunk egy Porotherm 44 HS Profi falazatot, amelyik kétoldali vakolattal önmagában  $U=0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$  körüli hőátbocsátási tényezővel rendelkezik. Az épület szerkezetkész, és az építető (környezettudatos ember lévén) úgy dönt, hogy 30%-kal megnöveli a háza falszerkezetének hőszigetelő képességét a külső oldalra elhelyezett 5 cm vastag PS hab hőszigeteléssel. Energetikai szempontból kifogástalan a döntés. Páratechnikai szempontból azonban igen nagy kockázatot vállal a tervező, vagy az építető.



1. ábra: A párakicsapódás veszélye a hőszigetelés és a falazat találkozásánál

Az 1. ábra a PTH 44 HS Profi falazatra elhelyezett külső intenzív hőszigetelés páratechnikai viselkedését, egészen pontosan a hőszigetelés és a téglafal határfelületén tartós téli hidegben kialakuló  $p_{telítési}$  illetve  $p_{parciális}$  nyomás közötti  $\Delta p$  (Pascal) nyomáskülönbség mértékét mutatja (függőleges tengely) a hőszigetelés cm-ben megadott vastagságának függvényében (vízszintes tengely).

$\Delta p$  negatív értékei esetén a parciális nyomás elvben túllépi a telítési nyomás értékét, tehát ott párakicsapódás várható. PS hab alkalmazása esetén éppen 5 cm vastagság esetén legnagyobb a nedvesedés veszélye (cca. 550 Pascal túlnyomás), és csak kb. 38 cm vastag habnál csökken „0”-ra a kockázat. Az energetikai szempontból kifogástalan rétegfelépítés hosszú távon az átnedvesedő falszerkezet miatt az épület várható élettartamának felére/harmadára csökkenését eredményezheti.

Páradiffúzió szempontjából általános érvényű igazság, hogy a tervezés, kivitelezés során olyan rétegfelépítést összeállítani, ahol az egyes rétegek páradiffúziós ellenállása belülről kifelé haladva fokozatosan csökken!

### **A határoló szerkezetek belső felületén kialakuló kondenzációs nedvesedés**

Az MSZ-04-140/2:1991. szabványnak (számos hiányossága ellenére) nagy érdeme, hogy a szerkezetek páratechnikai vizsgálatáról sok értékes információt szolgáltat. A korábbi szabványokhoz képest új alapokra helyezi a felületeken kialakuló nedvességviszonyok vizsgálatát is. Gyakorlatilag ez az első és egyben utolsó hazai szabályozás ebben a témakörben.

A vizsgálatokhoz a helyiség belső léghőmérsékletének ismerete; a helyiség belső nedvességfejlődésének ismerete; a légcseres mértékének ( $m^3/h$ ) ismerete szükséges. A felületi párakicsapódás akkor kerülhető el, ha a határoló szerkezet legkedvezőtlenebb szakaszán (*tehát a legkedvezőtlenebb hőhídnál!*) a belső felületi hőmérséklethez tartozó relatív nedvességtartalom nem éri el  $\varphi_{kk}$  megengedett értékét, ahol  $\varphi_{kk}$  a kapilláris kondenzáció kezdetéhez tartozó relatív páratartalom. Pontos meghatározásához a határoló szerkezet felületét képező anyagok (vakolat, glettelés, festék, stb..) szorpciós izotermájának ismerete szükséges. A napjainkban alkalmazott anyagok nagy részének szorpciós izotermái azonban ismeretlenek. A kutatás keretében folyamatosan végezzük a hiányzó szorpciós izotermák mérését.

Komoly problémát jelent újonnan épülő, illetve felújításra kerülő épületeink esetében, hogy az energetikai számítás módját szabályozó 7/2006.(V.24.)TNM rendelet, és annak 2011/12. évi várható módosítása a primer energia megtakarítás érdekében alacsony (0,5-szörös) óránkénti légcserével számol. Ellenőrző számításaink szerint az MSZ 04-140/2:1991 szabványban megadott, és a hazai lakáshasználati viszonyainkat tükröző szabványos párafejlődés figyelembe vétele esetén a csökkentett légcserével mellett sok esetben fenn áll a határoló szerkezetek belső felületén a párakicsapódás és penészesedés veszélye. A páratechnikai követelmények miatt megnövekedő légcserével viszont fűtési többletköltséget okoz. E gondolat sor továbbvitele egyenesen vezet a végkövetkeztetéshez: az energetikai méretezés/ellenőrzés a páratechnikai kérdések elhanyagolásával az épületeink gyorsított állagromlásához, erkölcsi és szerkezeti avulásához vezethet!

### **3. Összefoglalás**

A kutatási eredmények hasznosítása több területen lehetséges. Gyakorlati eredményként, az összeállításra kerülő adatbázis katalógusok (hőhíd, páradiffúzió, szorpciós izoterma) lehetőséget teremtenek az elnagyolt, közelítő egyszerűsített számítások helyett pontosabb, és energiatudatosabb számítások alkalmazására, melyek az épületek gazdaságos és ugyanakkor fenntartható építését, felújítását biztosítják. Az általános elemzések és megállapítások meghatározzák az építészeti és a páratechnikai kérdéseket is magába foglaló hőtechnikai/energetikai tervezés és méretezés jövőbeli irányát, trendjét és alkalmasak az energetikai szabályozások elengedhetetlenül szükséges módosításaira és koncepcióváltási igényeinek megfogalmazására a közel zéró energiafogyasztású és gazdaságos élettartamú épületek létesítése érdekében.

### **Köszönetnyilvánítás**

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

### **Irodalom**

BMEEOAFAG02\_ea\_06.pdf [www.agt.bme.hu/tantargyak/bsc/bmeeoafag02/BMEEOAFAG02\\_ea\\_06.pdf](http://www.agt.bme.hu/tantargyak/bsc/bmeeoafag02/BMEEOAFAG02_ea_06.pdf)  
Junk, D.V, Herzka, L. *Das Bauratgeber. Handbuch für das gesamte Baugewerbe und Seine Grenzgebiete*  
Berlin: Verlag Julius Springer, 1931.

Kotsis, E. *Épületek becslése* Budapest: Mérnöki Továbbképző Intézet, PÁTRIA Nyomdai Rt, 1942.

Ross, F. W. *Ermittlung des Bauwertes von Gebäuden und des Verkehrswertes von Grundstücken* Hannover, 1924.



# AZ EMBERI SZEM BIOMECHANIKAI MODELLEZÉSE

Bocskai Zoltán Imre  
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék  
zbocskai@mail.bme.hu

Bojtár Imre  
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék  
ibojtár@mail.bme.hu

## Kivonat

Az emberi szem egy rugalmas térbeli ágyazatban elhelyezkedő, közelítőleg gömb alakú rugalmas test. Fő alkotórészei, a szaruhártya, az ínhártya, a sugárizom, a lencsefüggesztő rostok és maga a szemlencse. A rendszer valamennyi résztvevőjének erősen időfüggő a viselkedése, a kor előrehaladtával a rugalmasságuk jelentősen csökken, geometriájuk változhat. A numerikus biomechanikai szimuláció célja az emberi szem idő hatását is figyelembevevő komplex háromdimenziós mechanikai modelljének létrehozása. A kutatás fő céljai a lencse akkomodációs folyamatának feltérképezése, illetve az időskori látásromlás (presbyopia) okainak meghatározása, továbbá a látásjavító szemműtétek szemre gyakorolt hatásainak elemzése.

## Kulcsszavak

szem, lencse, zonula, akkomodáció, presbyopia, LASIK,

## 1. Bevezetés

Az emberi szem működésének megértése alapvetően orvosi témakörbe tartozik. Az ezzel kapcsolatos kérdések, mint például az akkomodáció folyamatának leírása vagy a különböző látásjavító műtétek hatásainak tanulmányozása azonban a mechanikai feladatok közé sorolható. Az emberi szem mechanikai hatásokra történő viselkedése tulajdonképpen tekinthető egyfajta peremérték-feladat vizsgálatának. Egy ilyen fajta feladatnak a megoldására a mechanikában különböző módszerek léteznek. A felvetődő kérdések és feladatok vizsgálatára legcélszerűbbnek a végeselem módszer alkalmazás tűnik.

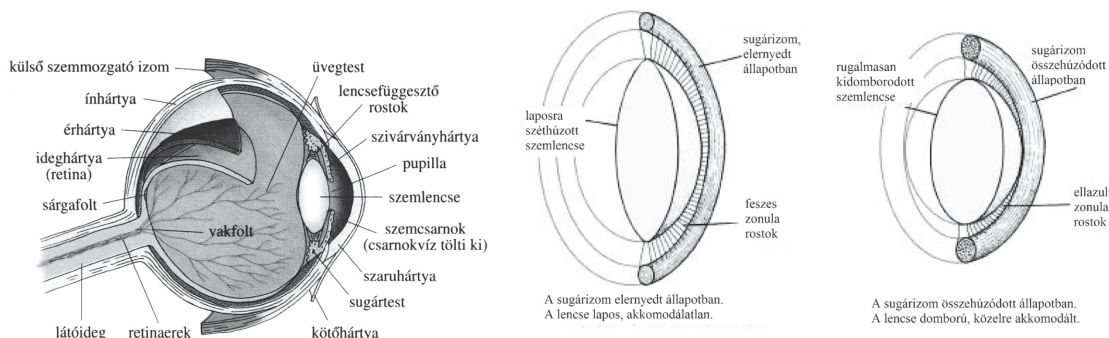
## 2. Az emberi szem felépítése, a kutatás céljai

A szem az emberi test legérdekesebb szervei közé tartozik. A szembe jutó fény hatására a retinán elhelyezkedő fotoreceptorok kognitív funkciók igénybevételével reagálnak. A fotoreceptorokat *130 millió* pálcika és *7 millió* csap alkotja. A fény különböző kémiai és elektromos reakciókat indít be, végül egy elektromos jel keletkezik, amely a szemidegen keresztül az agyba jut, ahol feldolgozásra kerül. A fotoreceptor nyúlványok legnagyobb koncentrációja a sárgafoltban – más néven a látógödörben – tehát a legélesebb látás helyén található. Az emberi szem a világot a kék színtől a vörös színig terjedő skálán érzékeli. Ez körülbelül *400-* *700 nm*-ig terjedő hullámhossz tartományt jelent.

### 2.1 Akkomodáció

A szembe jutó fény négy darab fénytörő közegen halad keresztül. Ez a négy fénytörő réteg a következő: a szaruhártya, a csarnokvíz, a szemlencse és az üvegtest (1. ábra). Ezek közül a legfontosabb szerepe a szemlencsének van, ugyanis a négy fénytörő közeg közül kizárólag ez képes megváltoztatni a fénytörő

képességét. A szaruhártya, a csarnokvíz és az üvegtest fénytörő képessége összesen körülbelül  $42$  dioptria. A lencse fénytörő képessége egy átlagos középkorú személy esetén  $20$  és  $24$  dioptria között változtatható. Fiatal korban a szemlencse dioptria változása szélesebb skálán mozoghat. A szemlencse görbületének változtatása a lencséhez kapcsolódó lencsefüggesztő rostokkal, illetve az ezekhez csatlakozó sugárizommal történik. A folyamatra azonban nem teljes mértékben elfogadott elméletek találhatók az irodalomban. Az alkalmazkodó képesség, más néven akkomodáció leírására kétféle elmélet létezik. A legelső elmélet erre vonatkozóan már 1909-ben megszületett és Helmholtz nevéhez kapcsolódik, a szemész orvosok ezt tekintik a klasszikus elméletnek. A másik elmélet 1993-ra datálódik és a teória felvetőjének nevéhez híven Schachar elméletnek nevezik.

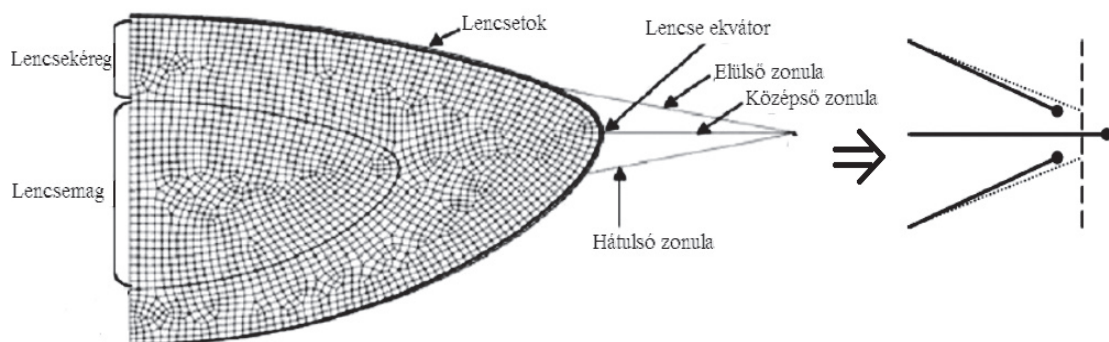


1. ábra: Az emberi szem felépítése és a Helmholtz-féle akkomodációs folyamat.

A Helmholtz-féle elméletet az 1. ábra középső és jobb oldali képe jól szemlélteti. A sugárizom elernyedt állapotát szemlélteti az 1. ábra középső része. Ebben az állapotban a szemünk „*pihen*” és a távolban elhelyezkedő tárgyakat látjuk élesen. Ilyenkor amint említettük a sugárizom elernyedt állapotban van és a lencsefüggesztő rostok (*zonulák*), amik összekapcsolják a lencsét a sugárizommal feszes állapotban vannak. Amikor közeli tárgyak képét szeretnénk élesen látni, a sugárizmot megfeszítjük, ennek hatására a *zonula rostok* elernyednek és a lencse a saját rugalmasságának köszönhetően összehúzódik, felületének görbülete megnő [Burd, 2002]. Az akkomodáció tulajdonképpen a közelre való látáshoz történő alkalmazkodás folyamata és mivel ekkor a sugárizom meg van feszítve, ez okozza, hogy huzamosabb közelre nézés esetén úgy érezzük, hogy a szemünk elfárad.

Az imént bemutatott akkomodációs elmélet a Helmholtz-féle volt, de ezzel részben ellentmond a másik, azaz a Schachar-féle teória. Csak azért mondhatjuk, hogy részben, mivel Schachar is azt állította, hogy az akkomodáció a sugárizom összehúzódásával történik, azonban ő a mechanikai modelljeiből [Abolmaali és Schachar, 2007] arra a következtetésre jutott, hogy ilyenkor nem minden zonula rost ernyed el, hanem egy bizonyos zonula csoportban húzás keletkezik. Azt állítja Schachar elmélete, hogy akkor nagyobb a távoli és közelre nézés közötti dioptria különbség a lencsében, ha a középső zonula rostokban az akkomodáció közben húzás keletkezik (2. ábra).

A numerikus modell felépítése részben ezeknek a folyamatoknak a részletes elemzéséhez készült.



2. ábra: A lencse részei és a zonula rostok elhelyezkedése.

## 2.2 Presbyopia

A *presbyopia* vagy más néven az időskori távollátás általában körülbelül  $40$  éves kor környékén jelentkezik az embereknél. Ez azt jelenti, hogy az emberek jelentős százaléka  $40$ - $50$  éves kora környékén érzékeli, hogy

a korábban megszokott szemüveg nélküli olvasáshoz olvasószemüvegre lesz szüksége. Ez a folyamat úgy jelentkezik, hogy az ember azt veszi észre, hogy az olvasott szöveget távolabb kell tartani a szemétől, mint általában. A szemészorvosok és a biomechanikával foglalkozó mérnökök még ma sem tudják egyértelműen a magyarázatát ennek a folyamatnak, ugyanis rengetek embernél más és más életkorban történik meg ez a jelenség és ezekben az életkorokban jelentős különbség is előfordul, továbbá van, akinél nem is jelentkezik. A lehetséges okok közé sorolják mind a szem geometriai, illetve anyagi paramétereiben bekövetkező változást az életkor növekedésével. Egy 6-18 éves korú ember szemlencséjének akkomodációs képessége akár 10 dioptria is lehet, de ez 25 éves kor után jelentősen csökken és 40 éves kor körül körülbelül átlagosan 4 dioptriára csökken. Ez többek között a szemlencse és a csatlakozó izmok rugalmassági modulusának növekedése miatt következik be. Azt, hogy valakinél esetleg ki sem alakul a presbyopia jelensége azzal is magyarázzák, hogy az ilyen emberek szemének az átlagostól eltérő a geometriája. A felépítendő numerikus modell jövőbeli paraméteres vizsgálatait figyelembe véve a geometriai és anyagi jellemzők változását a kor előrehaladtával, alkalmas lehet ennek a folyamatnak a tanulmányozására is.

### 2.3 Lézeres látásjavító szemműtékek

A látásjavító lézeres szemműtékek gyakorlati alkalmazása már 15 éves múltat tekint vissza. A világszerte eddig elvégzett több mint 10 millió beavatkozás tapasztalata alapján kijelenthető, hogy az alkalmazott lézeres látásjavító szemműtékek majdnem 100 %-osan biztonságosak. Az ember szaruhártyáján, vagyis a szem elülső felszínén áthaladó fénysugaraknak pontosan a látógödörre (sárgafolt) kell vetülniük ahhoz, hogy a tárgyról éles kép keletkezzen. Ha a kép életlen, szemüveggel vagy kontaktlencsével irányíthatjuk a fénysugarakat a megfelelő helyre, de megtehetjük ezt oly módon is, hogy a szaruhártya fénytörését változtatjuk meg lézer segítségével, ami alkalmas arra, hogy nagyon precízen módosítsa a szaruhártya fénytörését a megfelelő irányba, megszüntetve ezzel akár a rövidlátást (*myopia*), a távollátást (*hypermetropia*) vagy az *astigmat* (a szem fénytörési hibáját) is. A *lézeres szemműtét* szemsebészeti eljárás, amelynek az a lényege, hogy az úgynevezett *excimer lézerrel* kijavítsuk a szem (szaruhártya) fénytörési hibáját. Ez háromféle módon történhet:

Rövidlátóknál a szaruhártya fénytörési mutatóját kell *csökkenteni*, amit a *szaruhártya közepének ellaposításával* lehet elérni. A műtét során a szaruhártya elülső felszínén, közepén, 5–9 mm átmérőjű körön belül, a számítógép vezérelte lézergusár elpárologtatja a vizsgálat során előzetesen megállapított dioptria értéknek megfelelő mikrométeres vastagságú szövetmennyiséget. Ügyelnek arra, hogy a kezelés után megfelelő mennyiségű szaruhártya vastagság maradjon vissza, és a szem stabilitása ne kerüljön veszélybe a belső nyomás következtében. Erre a veszélyre a későbbiekben utalni fogunk.

Távollátók esetén az éleslátáshoz – épp ellenkezőleg, mint az előző esetben – növelni kell a fénytörési mutatót. Ezt a *központi rész körül körbefutó bemélyedéssel* lehet megoldani, ami kiemeli, *kidomborítja* a központi részt. Ebben az esetben általában a szem stabilitása nem kerül veszélybe, ugyanis a szaruhártya külső perem része ( $\approx 0.66$  mm) vastagabb, mint a központi rész ( $\approx 0.52$  mm), ahogy ez a 4. ábrán is látszik. Belső szemetengelyferdülés esetén, a szaruhártyán különböző görbületű ívek alakulnak ki, – egy domború és egy kevésbé domború – ezért a beérkező fénysugarak nem egy pontban találkoznak. A műtét során mindkét görbületet kezelik, hogy egyetlen fókuszpont alakuljon ki, ami biztosítja az éles kép kialakulását. Lézeres szemműtéttel az ún. „*korrigált vízus*” több mint 125%-os is lehet, tehát a jól látó – vagy szemüveggel, kontaktlencsével segített – szemhez képest is jobb látásélességet lehet elérni. Ennek nagy jelentősége lehet például vadászpilótáknál, így nem csoda, hogy – ott, ahol ezt az alkalmassági vizsgálatok nem tiltják – sok repülőgép-pilóta (illetve pilótajelölt) választja a látásjavító szemműtétet.

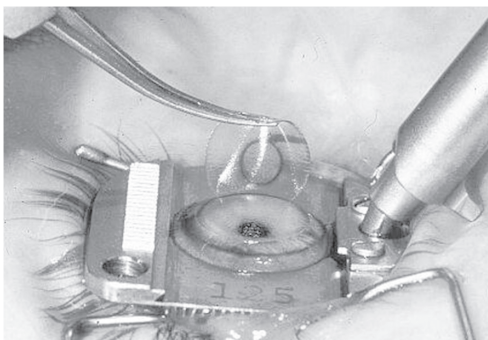
A lézeres szemműtékek is különbözőek lehetnek a szaruhártya eltávolításának helye és módja alapján. Világszerte ezen műtéti eljárások közül a következő három a legelterjedtebb:

A PRK (*Photo Refractive Keratectomy*) során ledörzsölik a szaruhártya védőrétegét, a hámsejteket (*epithelium*), és a szaruhártya felszínén végzik a lézeres kezelést. A műtét után a kezelt területet védő kontaktlencsével fedik le. A hámsejtek 2–3 nap alatt nőnek vissza, mely idő alatt fényérzékenység, idegentest érzés tapasztalható. A szájon át szedhető fájdalomcsillapítók jól csökkentik a panaszokat. A PRK kezelés előnye, hogy teljesen biztonságos és kitűnő eredményei vannak. Körülbelül 10 nap múlva lehet munkába állni. A műtét után a szemet legalább 6 hónapig 100%-os UV-szűrős napszemüveggel kell védeni (ezt felhős időben is viselni kell, a szórt fény miatt), mert az ibolyántúli sugarak hatására a szaruhártya ismét megvastagodhat, és visszaáll a műtét előtti állapot (a szaruhártya regenerálódhat).

A LASIK angol műszó, a *Laser-Assisted In Situ Keratomileusis* rövidítése. A sebész ennél az eljárásnál egy speciális, mechanikus eszköz (*mikrokeratóm*) segítségével védőlebenyt képez a szaruhártya felső rétegeiből (3. ábra). Ezt felhajtja, majd a lebeny alatti rétegben elvégzi a lézerkezelést. Végül visszahajtja

a lebenyt, amely visszafekszik a műtött területre, de soha sem tapad teljesen vissza az elpárologtatott réteg hiánya miatt. A LASIK-nek kétségtelen előnye, hogy a PRK-val járó kellemetlenségtől mentes, viszont több szempontból is veszélyes, szövődményes eljárás. Mégis a panaszmentesség ígéretével a páciensek jelentős része – főleg Amerikában – ezt az eljárást választotta, mivel ezzel az eljárással a védőkontaktlencse illetve a napszemüveg viselésére nincs szükség, szinte azonnal munkába lehet állni.

Az INTRALASIK eljárás lényegében megegyezik a LASIK eljárással. A különbség a védőlebeny képzésénél jelentkezik. A LASIK eljárásnál egy számítógép által vezérelt mechanikus eszközzel készítik a lebenyt, ahogy azt említettük, míg az INTRALASIK eljárásnál ezt a műveletet is lézer végzi. A szaruhártya korrekciója a lebenyképzés után már azonos módon, mindkét esetben egy másik lézerrel történik. A visszahajtott lebeny itt sem nő vissza soha, csak valamennyire visszatapad. A lézer által képzett perem miatt biztonságosabb, de a lebeny elmozdulásának veszélye a páciens élete végéig itt is fennállhat, akár a LASIK-nél. Ahogy a LASIK-nél, itt is elvágják a szaruhártyában lévő szemszárazságot jelző receptorokat, így legalább egy évre van szükség a megfelelő könnytermelés helyreállításához.



**3. ábra:** A szaruhártyán képzett lebeny.

A LASIK és az INTRALASIK eljárásoknál a szaruhártya kezelése ugyanúgy *excimer* lézerrel történik. A különbség a lebeny képzésének módjában van. LASIK során a szaruhártya hagymahéj szerűen elhelyezkedő lemezeit egy mechanikus eszközzel keresztülvágva képzik a lebenyt. Ennek következtében a szövődmények aránya 0,5%-os, ami azt jelenti, hogy 200 páciens közül 1 esetben az egyik szemén várható szövődmény fellépte. A másik problémát az jelenti, hogy a LASIK-kel vágott lebeny lapszerűen fekszik fel a vágási felszínre, így mechanikus hatásra (légzsák, teniszlabda stb.) elmozdulhat, leszakadhat, gyakorlatilag látásvesztést okozva, amire azonban egy-két regisztrált esettől eltekintve nem nagyon volt eddig példa. Az INTRALASIK-nél nem mechanikus kés, hanem *femtólézer* végzi a lebenyképzést. A szaruhártya lemezeivel párhuzamosan haladva íves lebenyt alakít ki, amelynek a felszíne nem lapszerű, hanem peremmel rendelkezik. Ez a perem óvja meg a lebenyt a későbbiekben az elmozdulástól. Összefoglalva tehát elmondható, hogy – bár a lebenykészítés módja a gyógyulási folyamatot kis mértékben befolyásolhatja – az azonos lézerkezelés miatt a műtét eredményessége nem függ attól, hogy *lézer* vagy *mikrokeratóm* készíti a lebenyt [Bocskai, 2011].

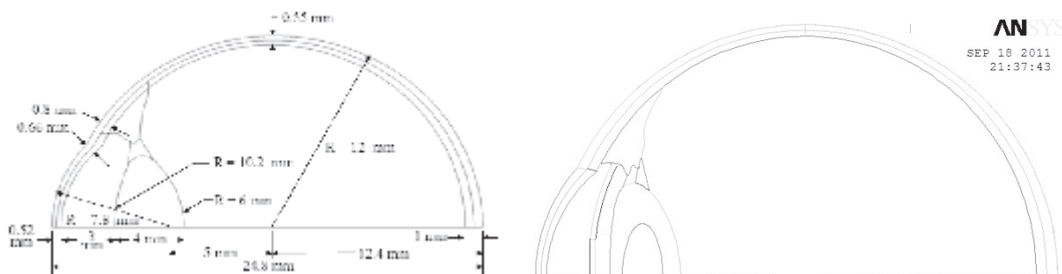
Mint ahogy utaltunk rá a szaruhártya elvékonyítása hatására a belső szemnyomás deformálhatja a szaruhártyát, és ezáltal megváltozhat a görbülete, továbbá extrém esetben a belső szemnyomás a szaruhártyát ki is szakíthatja, illetve nagyon nagy mértékben deformálhatja, ha a szaruhártyát túlságosan elvékonyítják (a bekezdés elején említett ok miatt ez inkább a rövidlátó szem kezelése során következhet be). A végelesemes numerikus modell ezeknek a folyamatoknak a vizsgálatára is alkalmas lehet.

### 3. A végelesemes numerikus modell

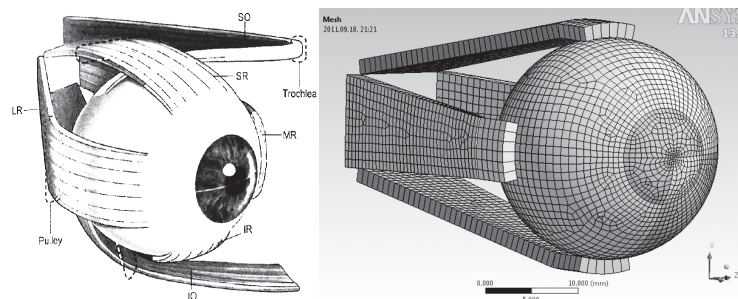
Az előzőekben ismertetett feladatok és kutatási célok jövőbeli megvizsgálására háromdimenziós kontinuum modell felépítése szükséges. A modellt Ansys Classic és Ansys Workbench programrendszerek felhasználásával építjük fel. A szemgolyó átlagos geometriai méretei a 4. ábrán láthatóak. A felépített modell kontúr vonalainak geometriája szintén a 4. ábrán látható. A modellbe a második fejezetben feltüntetett feladatok megvizsgálására a *szaruhártyát*, az *inhártyát*, a *csarnokvizet*, az *íriszt*, a *szemlencsét*, a *sugárizmot*, a *zonula rostokat*, az *üvegtestet*, a *megtámasztó izmokat* (5. ábra) és az *ágyazó zsírréteget* (6. ábra) építettük be.

Maga a szemlencse tulajdonképpen három jól elkülöníthető részből áll: a *lencse tokjából*, a *lencse kérgéből*, illetve a *lencse magjából*. A lencse ezen részeit a 2. ábrán tüntettük fel.

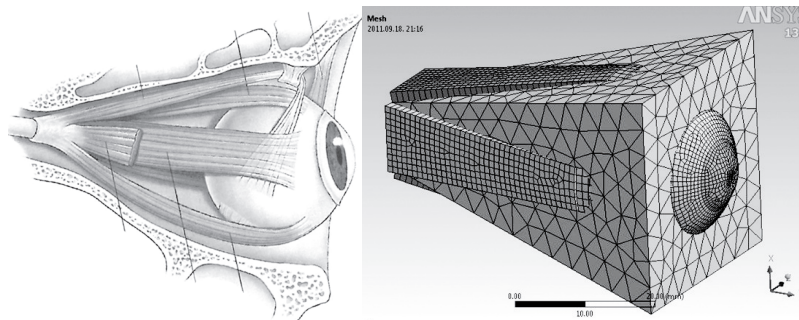
A lencse egyes részei nincsenek egymáshoz növe, ezért a modellben a lencse magja és kerge között súrlódásos kapcsolatot iktattunk be kontaktelemekek segítségével. Továbbá a szegolyó és az ágyazó zsírréteg között sem folytonos a kapcsolat ezért ezen két rész között is kontaktelemekeket alkalmaztunk. Az első futtatásokban az egyes részek anyagi tulajdonságait főként [Uchio és mtsai, 1999; Liu és mtsai, 2006; Power, 2001] munkái alapján vettük figyelembe.



4. ábra: A szegolyó átlagos geometriai méretei és az ANSYS-ban definiált geometria metszete.

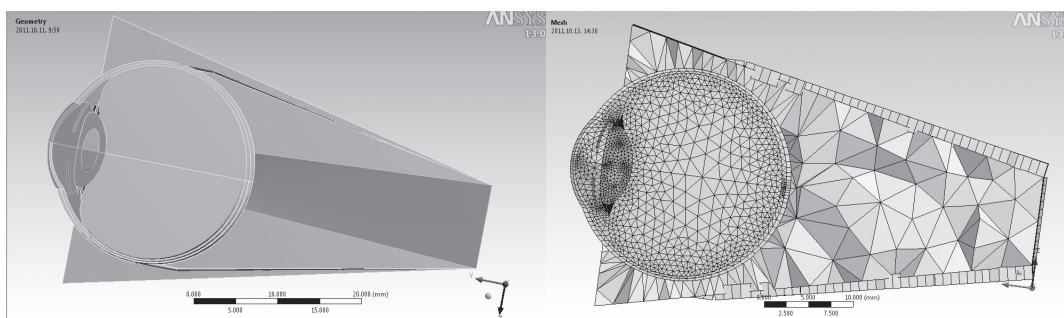


5. ábra: A megtámasztó izmok és a végeleemes modellezésük.



6. ábra: A megtámasztó zsír és végeleemes modellezése.

A modellben a legtöbb említett részt háromdimenziós testelemekkel modelleztük, kivéve a környező izmokat, a lencse tokját és a zonula rostokat. Ezek a részek héjelemekkel lettek felépítve. A legelső futtatásoknál a komplex modellre az önsúlyterheket vettük figyelembe. A 7. ábrán látható a komplex felépített háromdimenziós modell geometriája és végeleemes hálózási felosztása metszetben.

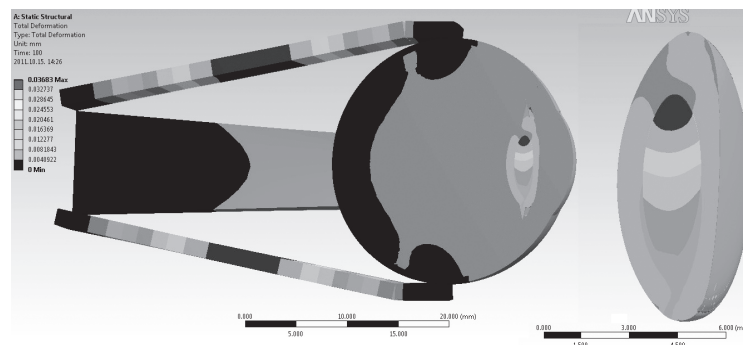


7. ábra: A modell geometriája és hálózása metszetben.

Az önsúlyterhekből származó eredő elmozdulások ábráját a 8. ábra szemlélteti. Látható, hogy a megtámasztó izmokban és a szemlencse magjának legfelső pontjában történik a legnagyobb eredő elmozdulás az önsúly teher esetén.

A további vizsgálatok és futtatások célja az előző fejezetben felvázolt problémáknak és kérdéseknek az analizálása lesz. A legelső lépés tervezete az akkomodációs folyamatok megvizsgálása, aminél a modellben kiépített zonulákra és sugárizomra vitt terhelések és elmozdulások alkalmazásával vizsgálható a lencse vastagságának és görbületének, azaz a dioptriájának a változása az akkomodáció során.

A geometriai és anyagi tulajdonságok változtatásával az említett korról változó tulajdonságok is leköveszthetők lesznek, továbbá a szaruhártya vékonyításával és a belső szemnyomás figyelembe vételével a lézeres szemműtétek hatásainak elemzése is megoldhatóvá válhat ezen komplex modell alkalmazásával.



**8. ábra:** Az eredő elmozdulások ábrái az önsúly teherre a szemgolyón és a környező izmokban, jobb oldalon a lencse kinagyított eredő elmozdulás ábrája látható metszetben.

#### 4. Összefoglalás

Összefoglalásként elmondható, hogy a felvetett kérdések jövőbeli megválaszolása a felépített háromdimenziós kontinuum modell segítségével lehetővé válik, és ennek segítségével választ kaphatunk az akkomodáció leírásának kérdésére, továbbá az öregkori távollátás problémájára és a látásjavító szemműtétek hatásaira is. Ha ezekre a kérdésekre értékelhető választ nyerünk, akkor például a presbyopia megelőzésére és kezelésére megoldást találhatunk, illetve pontosabb feltérképezését adhatjuk meg a látásjavító szemműtétek hatásainak, a műtét utáni közeli és távoli jövőt tekintve egyaránt.

#### Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

#### Irodalom

- Abolmaali, A, Schachar, R. A, Le T. Sensitivity study of the human crystallin lens accommodation, *Computer Methods and Program sin Biomedicine*, 85, 2007, 77-90.
- Bocskai, Z. A különböző lézeres szemműtétek és hatásaik, *TÁMOP kutatási jelentés*, 2011, 1-3.
- Burd, H. J, Judge, S. J, Flavel, M. J. Numerical modelling of the accomodating lens, *Vision Research*, 42, 2002, 2235-2251.
- Liu, Z, Wang, B, Xu, X, Wang, C. A study for accommodating the human crystalline lens by finite element simulation, *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 30, 2006, 371-376.
- Power, E. D. A nonlinear finite element model of the human eye to investigate ocular injuries from night vision goggles, *Master of Science in Mechanical Engineering*, 2001, 28-29.
- Uchio, E, Ohno, S, Kudoh, J, Aoki, K, Kisielwicz, L. T. Simulation model of an eyeball based on finite element analysis on a supercomputer, *Br J Ophthalmol*, 83, 1999, 1106-1111.

# AGYI ANEURIZMÁK NUMERIKUS VIZSGÁLATA

Bojtár Imre  
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék  
ibojtar@mail.bme.hu

Tóth Brigitta  
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék  
brigitta.toth@index.hu

Nasztanovics Ferenc  
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék  
naszta@naszta.hu

Nagy Róbert  
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék  
nagy.robi.86@gmail.com

## Kivonat

Az érrendszer megbetegedéseinek igen veszélyes csoportját alkotják a kóros értágulatok, az ún. aneurysmák. Kialakulásuk valószínűsíthető oka legtöbbször az ér falának veleszületett degeneratív megbetegedése és ennek következtében a fal anyagminőségének megváltozása. Kutatásunk – az adott szakterületen dolgozó orvosokkal együttműködve – az agyi aneurysmák falának szilárdságtani viselkedését elemzi, arra a kérdésre keresve a választ, hogy milyen mechanikai körülmények valószínűsíthetik kialakulásukat és ruptúrájuk bekövetkezését.

## Kulcsszavak

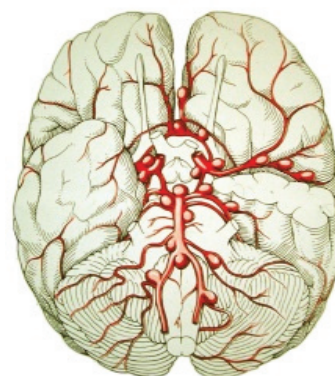
aneurysma, anyagmodell, numerikus szimuláció,

## 1. Bevezetés

Az agyalapi ereken fiatalabb korban (leggyakrabban az 5. évtized első felében) kialakuló aneurysmák általában a legnagyobb áramlási nyírási hatásnak kitett pontokon, érelágazásokban illetve éles kanyarulatokban jönnek létre. Túlnyomó többségük nem körkörös, hanem az érfal fokális meggyengülése következtében létrejövő ballonszerű tágulat. Kialakulásukban az atherosclerosis szerepe nem egyértelmű, leggyakrabban nem sclerotikus ereken jönnek létre, sokszor teljesen tünetmentesen is előfordulnak. Gyógyításuk során hagyományos koponyaműtét esetén a normális érlumen és az aneurysma közötti összeköttetést („nyak”) egy kívülről felhelyezett fém kapocs (klipp) segítségével zárják. Ennek alternatívája az endovaszkuláris műtét, mely vérzett agyi aneurysmák esetén ma az első választandó eljárás. Endovaszkuláris műtét esetén az aneurysmazsákba vezetett finom („mikro”) katéteren át az aneurysmazsákot flexibilis fém spirálokkal, ritkán a helyszínen megszilárduló polimerrel töltik fel, hogy ilyen módon a „nyakat” belülről zárják el.

Az aneurysmák egyik legveszélyesebb jellegzetessége a repedésekre (ruptúrára) való hajlamuk. Ez a szivárgásos vérzéstől (ez a gyakoribb) a hirtelen, robbanásszerű (nagyon erős belső vérzést okozó) érfal szakadásig terjedő változatokban fordulhat elő (1. ábra). Már a legenyhébb változatok is komoly veszélyt jelentenek a belső szervekre, illetve magára a teljes keringési rendszer stabilitására, éppen ezért az érfal határteherbírásának kimerülését feltétlenül célszerű elkerülni. Ez a kórkép az esetek 35-40%-ban okoz halált, vagy tartós, súlyos idegrendszeri károsodást. A ruptúrát közvetlenül kiváltó pontos ok nem ismert, és nehezen vizsgálható a tágulat falának nagyon erősen változó szilárdsági jellemzői miatt

A ruptura létrejöttének okára több hipotézist is ismer a szakirodalom, de egyértelműen megbízható válasz ma még nincs erre a kérdésre. Az eddigi numerikus szimulációk mindenesetre azt sejtetik, hogy a egyezést mutat a valós megfigyelésekkel. Vizsgálataink erre a kérdéskörre, az aneuryszmásák mechanikai viselkedésének leírására koncentrálnak. Fontos megjegyeznünk, hogy munkánk része egy olyan hazai kutatóprogramnak, amely orvosok (*dr. Nyáry István, SE Idegsebészeti Tanszék, dr. Szikora István, Országos Idegtudományi Központ, dr. Monos Emil, SE Élettani Intézet*) illetve hidrodinamikával foglalkozó mérnökök (*dr. Paál György és Ugron Ádám, BME Hidrodinamikai Tanszék*) közreműködésével folyik. A gépészmérnök kollégák elsősorban az áramlási viszonyok vizsgálatával, mi pedig az *érfal* elemzésével foglalkozunk.

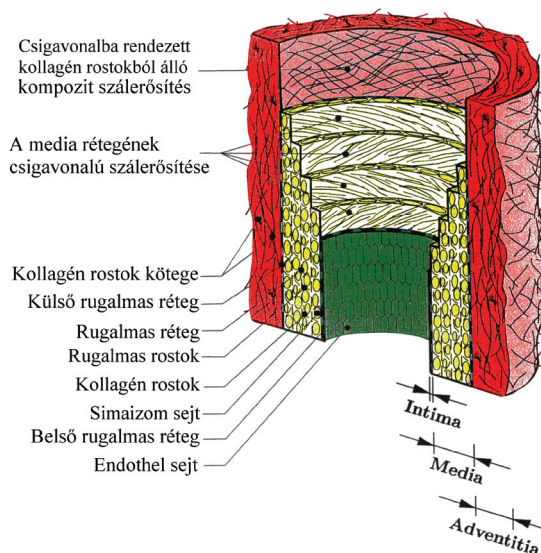


**1. ábra:** Agyi aneuryszmák repedések mechanikai alapokon számított legvalószínűbb helye

## 2. Az egészséges és a beteg érfal anyagának vizsgálata

Minden szilárdságtani vizsgálat elengedhetetlen feltétele a vizsgált „szerkezet” anyagi jellemzőinek meghatározása. Az erek falának szövettani szerkezete (2. ábra) élettanilag betöltött szerepükhöz igazodik, az artériás rendszer mentén a nagy artériáktól az arteriolákon (a kapillárisokat megelőző, kis méretű artériák) át egészen a legkisebb kapillárisokig folytonosan változik.

**2. ábra:** Az artéria falának felépítése  
Az egészséges artéria három fő rétege: intima, media, adventitia. Az intimát – a legbelső réteget – endothel sejtek alkotják, melyek egy vékony alap-membránon nyugszanak. Az intima vastagsága függ az artéria helyétől, korától és egyes betegségektől. A mediát simaizomsejtek és rugalmas – elasztin és kollagén – rostok térbeli hálózata alkotja, mely hálózat a mediát több – szálerősítésű – rétegre bontja. Az adventitia legfontosabb összetevői a körkörösén futó, vastag kötegeket alkotó kollagén rostok, kívül pedig laza kötőszövet veszi körül.

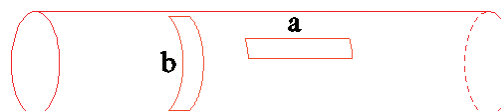


Az anyagi jellemzők meghatározására a *Semmelweis Egyetem Klinikai Kísérleti Kutató- és Humán Élettani Intézetében* laboratóriumi méréseket végeztünk. Az érfalmintákat operált betegekből, illetve kadáverből (már elhalálozott betegből) kiperarált agyi erekből vettük, majd egy- illetve kétdimenziós húzási tesztekkel mértük az érfal anyagának feszültség-alakváltozási függvényeit [Tóth és Bojtár, 2010].

Az agyi artériákból – *arteria carotis internakból* – az uniaxiális méréshez 3 mm széles *hosszanti és körkörös irányú csíkokat* (3. ábra), a biaxiális méréshez pedig az említett két iránnyal *párhuzamos oldalú kb. 8\*8 mm-es négyzet alakú mintadarabot* vágunk ki. A mintákat nyúlásmérő bélyeges műszerrel (az uniaxiális mérésnél a két végükön rögzítve, a biaxiálisnál pedig négy ponton befogva) folyamatosan húztuk, s közben az erőt számítógép segítségével regisztráltuk.

### 3. ábra:

A csíkok kimetszésének iránya az érfalból az uniaxiális mérések esetén: a hosszanti csík, b körkörös csík

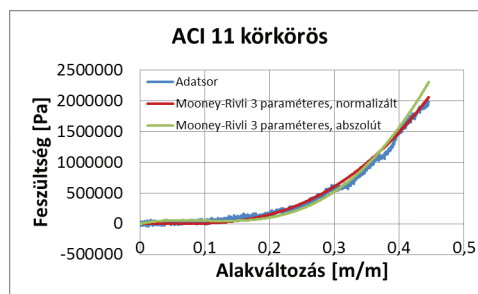
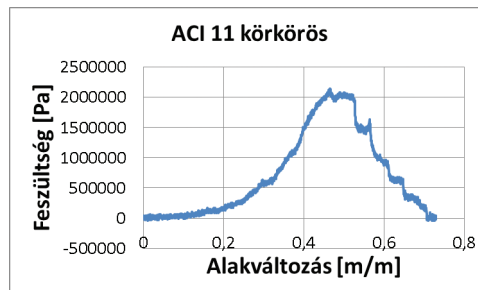




Példaként mutatjuk be egy körkörös mintán végzett uniaxiális mérés eredményét. Mivel  $\varepsilon = 0,464$ -nél károsodott a minta, a mérési eredmények ezen érték feletti tartományát elhanyagoltuk, onnantól ugyanis a minták tönkremenetelének jellege igen különböző. A 4. ábrán magára mérési eredményre, illetve a belőlük számítható anyagmodell görbékre láthatunk példát.

#### 4. ábra:

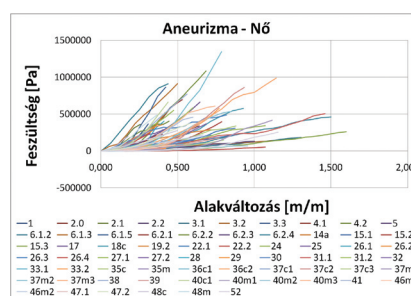
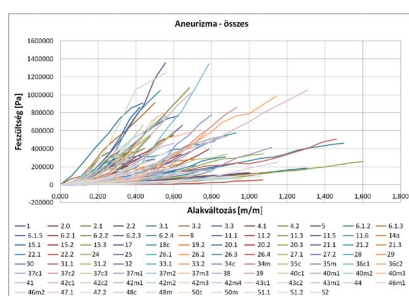
Körkörös minta  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagramja és görbéjének illesztése 2- illetve 3-paraméteres Mooney–Rivlin-moddellel. Az ábra a) részletén a 2-paraméteres modellhez tartozó illesztések láthatók a b) részletén pedig a 3-paraméteres modellhez tartozó illesztés. Mindkét ábrarészleten a vörös szín jelöli a normalizált hibákkal, a zöld pedig az abszolút hibák elvén történt illesztést.



A mérések másik csoportja a beteg érszakok anyagállandóinak vizsgálatára vonatkozott. Műtétek során eltávolított aneurizmazsákokból valamint elhalálozott emberekből kimetszett mintákon történtek a mérések egytengelyű, azaz uniaxiális mérésekkel, ezekhez a zsák képzeletbeli tengelyének irányában (M=meridionális), valamint arra merőlegesen körkörös irányban (C=cirkumferenciális) emeltünk ki csíkokat.

Itt is csak illusztrálásul mutatunk be egy összegző jellegű táblázatot az aneurizmák uniaxiális mérési eredményeinek csoportosítási lehetőségeire. Eltéréseket vizsgáltunk nem és irányultság szerint, összesen 9 különböző típusú csoportot megalkotva ezek alapján (külön a nők és külön a férfiak, külön a circumferenciális (a zsák „főtengelyére” merőleges körkörös irányú) és külön a meridionalis (a zsák „főtengelyével” közel egyező), stb.). Megjegyezzük, hogy az aneurizmák csoportosított görbéinél is elvégeztük a Mooney–Rivlin-moddellekkel való közelítést.

Megjegyezzük, hogy a mérési eredmények részleteinek leírása, a mérésekkel kapott valamennyi eredmény és azok statisztikai feldolgozása megtalálható Tóth Brigitta 2011 őszén beadott PhD dolgozatában (5. ábra).



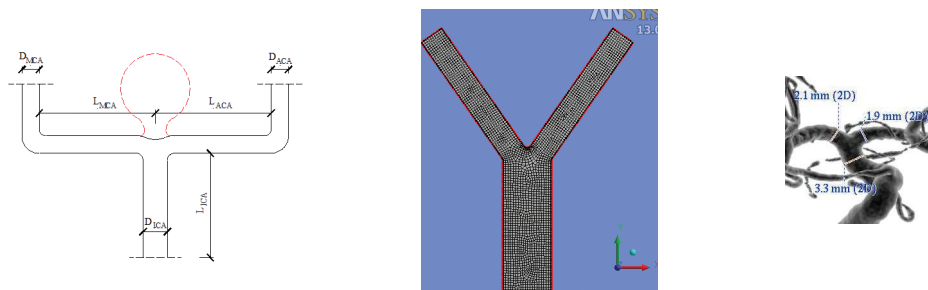
5. ábra: Az aneurizmák összesített mérési diagramjai és az elkülönített női minták

### 3. A numerikus modell

Az előzőekben ismertetett feladatok és kutatási célok megvizsgálására kétféle modellt készítettünk [Tóth és Bojtár, 2008; Tóth és Bojtár, 2011]. Az egyik egy idealizált 2D- és 3D változat, ahol elsősorban a bifurkációk környékének nyírófeszültségi és torlónyomás viszonyait vizsgáltuk a különböző elágazási geometriák illetve kilépő artéria-átmérők függvényében, emellett pedig elkészítettünk egy valós viszonyok elemzésre

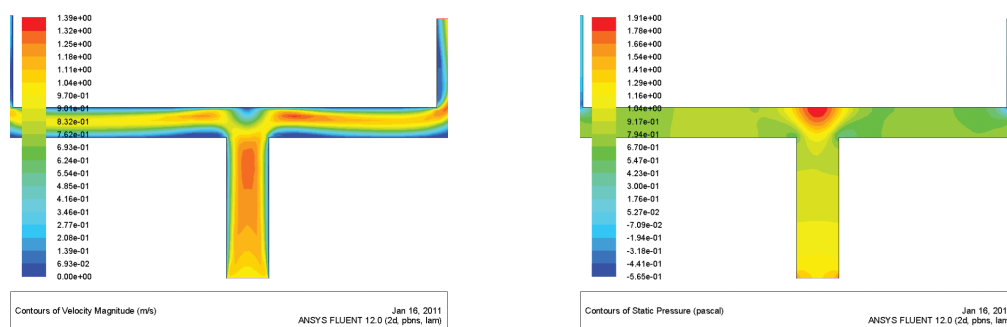
alkalmas háromdimenziós kontinuum modellel. Először az idealizált modellel végzett 2D vizsgálatokról mutatunk be néhány eredményt. Megjegyezzük, hogy ez a vizsgálati rész Nagy Róbert MSc hallgató tervezett PhD munkájának része.

A 6. ábra egy paraméteresen vizsgálható bifurkáció 2D modelljét ábrázolja, mellette egy „valódi” érelágazás angiográfós felvétele látható:



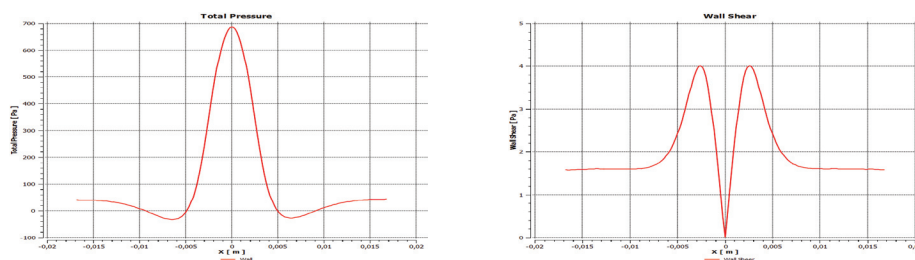
6. ábra: 2D modell paraméteres vizsgálatra és egy in vivo felvétel

Egy adott esetre az eredményekből is közlünk illusztrációt. Vízszintes elágazás esetére az áramlási sebességeloszlás és a torlónyomás változását mutatja be a 7. ábra két képe.



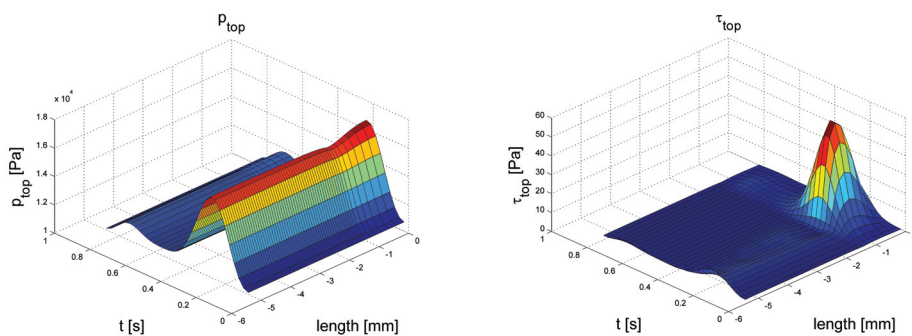
7. ábra: Sebességeloszlás és torlónyomás

A következő képek a bifurkációs falrészénél a nyomó- és nyírófeszültségek eloszlását ábrázolják stacionárius áramlás esetére (8. ábra) [Paál és mtsai, 2007]:



8. ábra: Torlónyomás és nyírófeszültség változása a szimmetriapont körül

A paraméteres vizsgálatok segítségével elemezhető volt a geometria változtatásának hatása. Illusztrálásul a 45 fokos elágazás és azonos kimenő átmérőjű erek esetére közlünk egy nyomó- illetve nyírófeszültségi vizsgálati eredményt, ahol az idő és a falon mért távolság függvényében ábrázoltuk a feszültségek változását (9. ábra). Figyelemreméltó a bifurkációs torlópont környezetében a gradiens értékének változása.



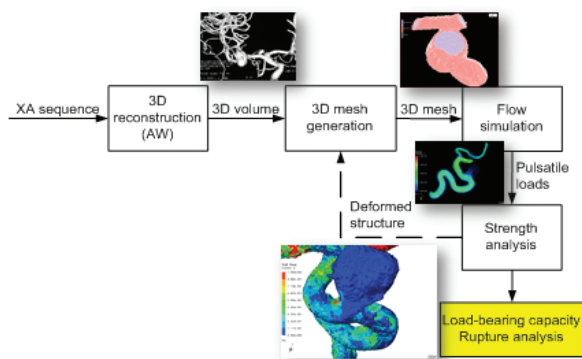
9. ábra: A torlónyomás és a nyírófeszültség változása egy szívdobbanási ciklus alatt

A valódi érvizsgálatok végrehajtására külön szofverrendszert kellett létrehozunk, amely belső modulként használja az ANSYS szilárdtestvizsgáló és CFX áramlástanai modulokat. Az algoritmus lényege a következő:

- Az érszakasz (pontosabban a véráram) háromdimenziós képét előállítja egy orvosi berendezés, a mi esetünkben az Országos Idegtudományi Intézet GE angiográfja, majd ezt követően
- a háromdimenziós képből egy általunk írt program elkészíti az áramló vér háromdimenziós diszkrét modelljét. E modell külső felszínét jó közelítéssel az adott érszakasz belső felszínének tekinthetjük. Magáról az érfalról a vizsgálat nem ad információt, annak felületi egyenetlenségeit azonban (negatív lenyomatként) ábrázolja, az érfal diszkretizált, végeselemes számításokra alkalmas modelljét szintén nekünk kell létrehozunk. A véráram és az érfal vizsgálatára a
- a geometriai modellek létrehozása után a pulzáló vér időben változó nyomásának figyelembevételével elkészül a véráram hemodinamikai analízise (sebességeloszlás, érfalra ható nyomó- és nyírófeszültség számítása), majd
- az áramlástanai vizsgálat után (mindig iterációs alapon) a fal szilárdságtani elemzése következik, a falban keletkező alakváltozások, feszültségeloszlások illetve feszültségkoncentrációk számításával.
- A modell kapcsolt mechanikai (*FSI: Fluid-Structure Interaction*) viselkedésű, azaz figyelembe veszi a rugalmas fal és a véráramlás kölcsönhatását.

Megjegyezzük, hogy a kutatás ezen része *Nasztanovics Ferenc* most beadásra készülő PhD munkájához tartozik. A program folyamatábrája látható a 10. ábrán [Nasztanovics és Bojtár, 2008].

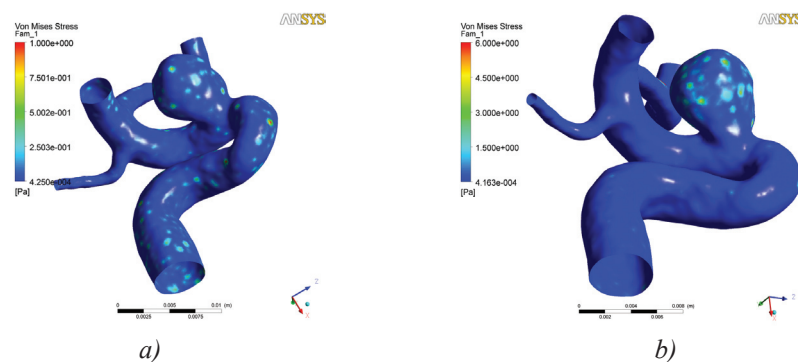
### A kapcsolt modell felépítése



10. ábra: 3D valós feladatok vizsgálatára alkalmas modell felépítése

A háromdimenziós modellel már lehetővé válik az in vivo körülmények közötti vizsgálata az aneuryszmásákoknak. Néhány jellegzetes elemzést mutatnak a következő képek. A laboratóriumi mérésekből származó hiperelasztikus anyagjellemzőket használtuk a numerikus szimulációk során. Két eset összehasonlítását látjuk, először a teljes érszakaszhoz (az aneuryszmásákot is beleértve) azokat a Mooney–Rivlin-modellel nyert anyagi paramétereket használtuk, melyeket az egészséges arteria carotis

interna modellje szolgáltatott (11. ábra). A második esetben viszont csupán a szülő-artéria kanyarulatára használtuk az átlagos egészséges artériára vonatkozó állandókat, az aneurizmazsákhoz az ott nyert paramétereket alkalmaztuk. Szignifikánsan eltérő feszültségi értékeket kaptunk a kétféle anyagállandó alapján végzett vizsgálatokból, a von Mises-feszültségek maximális értékei az aneurizmában egy *nagyságrenddel* nőttek ahhoz képest, mint amikor a zsák is ugyanabból az anyagból volt, mint az egészséges érfal. Az ábrákon látható „foltosság” elsősorban a geometria következménye, rendre azonos helyen keletkeznek a maximális feszültségek.



**11. ábra:** Von Mises feszültségek

a) a teljes érfal arteria carotis internából b) a szülő arteria carotis internából, a zsák aneurizmából

#### 4. Összefoglalás

Az eddigi – illetve most is folyamatosan végzett – érfal kutatások hasznos segítői az orvosok gyógyító munkájának, lehetőséget adnak ennek a veszélyes betegségnek a pontosabb élettani megértésében és hosszabb távon pedig hozzájárulnak a gyógyítási eljárások kidolgozásához is.

#### Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

#### Irodalom

- Nasztanovics, F, Bojtár I. Numerical analysis of human brain aneurysms, *Proc. of third Hungarian Conference on Biomechanics*, 2008, 245 – 251.
- Paál, Gy, Ugron, Á, Szikora, I, Bojtár, I. Flow in simplified and real models of intracranial aneurysms, *Int. Journal of Heat and Flow*, 28, 2007, 653-664.
- Tóth, B. K, Bojtár, I. Discrete particle simulations of fluid-solid flow – the motion of red blood cell in blood flow, *Proc. of third Hungarian Conference on Biomechanics*, 2008, 371 – 378.
- Tóth, B. K, Bojtár, I. Numerical simulation of red body cells in the blood, *In Proc. of 11th. Hung. Conference of Mechanics, Miskolc, , ISBN 978 963 661 975 6, 2011. paper 80, 11p.*
- Tóth, B.K, Bojtár, I. Analysis of the mechanical behaviour of discrete elements in fluids, *Biomechanica Hungarica*, 3(1), 2010, 256-264.

# AZ EMBERI ÁLLCSONT SZIVACCSOS ÁLLOMÁNYA ANYAGJELLEMZŐINEK MEGHATÁROZÁSA KÍSÉRLETI ÚTON

Lakatos Éva  
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék  
lakatoseva@mail.bme.hu

Magyar Lóránt  
Semmelweis Egyetem Igazságügyi és Biztosítás-orvostani Intézet

Bojtár Imre  
Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék  
ibojtár@mail.bme.hu

## **Kivonat**

Az állcsont anyagtulajdonságainak ismerete elengedhetetlen a sikeres fogászati implantátumok tervezéséhez. Kutatásaink két anyagjellemző, a Young-modulus és a szerkezeti anizotrópia mérésére irányultak. A szivacsos csont Young-modulusának megállapítására laboratóriumi méréseket végeztünk a fogászati implantáció szempontjából legérzékenyebb csoport – középkorú férfiak fogatlan állcsontja – esetén mi a legjellemzőbb értéktartománya. A minták eltérő geometriai tulajdonságai miatt a nyomókísérletek során nyert erő–elmozdulás értékpárok összevethetősége érdekében elkészítettük az egyes minták számítógépes modelljét és végeselemes szimuláció segítségével számítottuk az adott mintára jellemző Young modulus értéket. A szivacsos csont terheléséhez igazodó gerendázatos szerkezete és a változó terhelési viszonyokhoz történő alkalmazkodása a nagyobb csöves csontok (pl. combcsont, lábszárcsont) végdarabjaiban szabad szemmel is megfigyelhető, míg egyes csontok (pl. állcsontok) esetén az összetett terhelési viszonyok miatt az irányítottság kevésbé szembetűnő. A szerkezeti anizotrópia mérésének legelterjedtebb eszközei a mikro-CT felvételek. A szakirodalomban megtalálható, binarizált képek feldolgozásán alapuló irányultság mérési eljárások szükséges kiindulási lépése a csontszövet és a velőüreg határoló felületének meghatározása. E szoftver- és számításgényes lépés kiküszöbölésére olyan eljárást fejlesztettünk ki, mely beillesztett ellipszoidok – a csontállomány belső pontjai környezetében a legnagyobb olyan ellipszoid, ami úgy írható a pont köré, hogy belsejében csak csontanyagot tartalmaz, és felülete érinti a velőüreget – segítségével alkalmas a szerkezeti anizotrópia leírására.

## **Kulcsszavak**

szivacsos csont, Young-modulus, mikro-CT, szerkezeti anizotrópia

## **1. Bevezetés**

Aszivacsos csontanyagjellemzőinek hagyományos mechanikai tesztekkel történő mérése számos nehézségbe ütközik. Elsődleges nehézség, hogy különösen a kisméretű csontok esetén, nehéz tisztán szivacsos csontot tartalmazó, 5 mm-nél nagyobb méretű, kocka alakú mintához jutni, ami a szakirodalomban általánosan legkisebb, nyomókísérlettel vizsgálhatónak tekintett szivacsos csont mérete. További nehézséget okoz az emberi testet felépítő anyagok különösen nehéz hozzáférhetősége, ami gyakran kényszeríti arra a kutatókat, hogy kis darabszámú mérésekből vonjanak le következtetéseket. A csontminták legelterjedtebb laboratóriumi vizsgálati módszere a nyomókísérlet, ez azonban ideális alakú minták esetén is pontatlanságokat tartalmaz. A minta kivágása során, a szélső részeken átvágott trabeculák egyedi tönkremenetele kezdeti felkeményedéshez vezet, és a megtámasztás tökéletlensége miatt ezek a mérések a valósnál alacsonyabb rugalmassági modulust eredményeznek. A szakirodalomban található, a szivacsos csont rugalmassági

modulusának mérésére irányuló kísérletek eredményei széles tartományban mozognak (legtöbbször az 1,1 MPa és a 9800 MPa közötti tartományba eső értékeket mértek).

A kinyert minták megfelelő sterilizálása, tartósítása és tárolása napjainkig vitatott. A kialakuló jégkristályok szövetekre gyakorolt roncsoló hatása ellenére a legelterjedtebb tartósítási eljárás a fagyasztás, alkalmaznak ezen kívül különféle vegyszerekkel történő balzsamozást és szárítást is. A tartósítás és sterilizálás alkalmazása nélkül, friss minta törésével mért rugalmassági modulus adatok ritkák, csak a gerinccsigolya és a térdkalács szivacsos állományára elérhetőek.

Az állcsont rugalmassági modulusának meghatározására, Misch és mtsai [1999] hengeres csontmintákon végzett nyomókísérleteket. A hengereket függőleges irányban fűrták ki a csontból, és fagyasztva tárolták. A tömör csont réteggel borított minták esetén 24,9-240 MPa közötti Young-modulust mértek 96,2 MPa középértékkel és 40,6 MPa szórással, míg a tisztán szivacsos csontot tartalmazó próbatestek esetén ez 3,5-125,6 MPa volt, 56,0 MPa középértékkel és 29,6 MPa szórással. O'Mahony és mtsai [2000] egyetlen halott állcsontjából származó 7 fagyasztva tárolt szivacsos csontkocka nyomókísérletét végezte el, három, anatómiai jellegzetes irányban: infero-superior (függőleges), bucco-lingualis (vízszintes a mandibula ívére merőleges irányban) valamint mesio-distalis (vízszintes a mandibula ívének irányában). A három irányban, sorrendben 114, 511 és 907 MPa értéket mért. Az említett munkát az implantációs fogpótlás szempontjából érdekes területre, az alsó állcsont íves, fogakat hordozó (corpus mandibulae) részére koncentrált. Ezzel szemben Eijden és mtsai [2004] a szivacsos csontot nagyobb mennyiségben tartalmazó, viszont implantációs fogpótlásban nem érintett területről, az állcsont hátsó ízületi nyúlányból (processus condylaris) származó, balzsamozással tartósított mintákat vizsgálta, vízszintes és függőleges irányban végzett nyomókísérletekkel. Vízszintes irányban 438 MPa, míg függőleges irányban 157 MPa rugalmassági modulus értéket közölt.

A következőkben ismertetett kísérletsorozat megtervezésekor, kivitelezésekor és kiértékelésekor célunk volt, hogy a tartósítási eljárások roncsoló hatásából és a szivacsos csontminta körbevágásából származó hibákat kiküszöbölve az eddigieknél pontosabb ajánlást adjunk az alsó állcsont szivacsos állományának Young-modulusára.

A csont szerkezeti anizotrópiájának mérésére legelterjedtebb eszköz a mikro-CT felvételek alkalmazása. A nagyfelbontású CT felvételek térbeli rekonstrukciói a csontszerkezetet a hagyományos CT-hez hasonlóan egy voxel alapú adatállományra képezik le, melyben minden egyes képponthoz egy számértéket rendelnek. Ez a szám arányos a vizsgált szerkezet megfelelő pontjának sugárgyengítési tényezőjével. A kapott adatállomány átalakítható az emberi szem számára értékelhető; szürkeárnyalatos, vagy – a csontszerkezet vizsgálata esetén gyakran alkalmazott – binarizált képpé. A következőkben csak a binarizált CT felvételek vizsgálatával foglalkozunk, de a teljesség kedvéért megemlítyük, hogy a szakirodalomban számos munka foglalkozik a szürkeárnyalatos képek alapján a porózus anyagok vázszerkezetének leírásával. Az alkalmazott módszerek közül a legismertebbek a következők: a sugárgyengítési tényező adott pontban vett gradiensén alapuló ún. GST módszer [Rao és Schunck, 1991], a Fourier transzformáción alapuló ún. FFT módszer [Brunet-Imbault és mtsai, 2005], valamint a vizsgált tartományban mozgó gömböket alkalmazó ún. SSOD eljárás [Varga és Zysset, 2009]. A szivacsos csont anizotrópiája az ortotropnak tekinthető geometriai tulajdonságai miatt jellemezhető a három kitüntetett iránnyal és az egyes irányokhoz rendelt, az adott irány dominanciáját jellemző számértékekkel. A csontmechanikában gyakran alkalmazott, ún. váztenzorok az ortotrop architektúra anizotrópiájának  $3 \times 3$ -as mátrixok segítségével történő leírására alkalmasak, ahol a tenzor sajátvektorai adják a kitüntetett irányokat és a hozzájuk tartozó megfelelő sajátértékek az adott irány dominanciáját. A váztenzorok jelentősége a szivacsos csont anizotrópiájának vizsgálata szempontjából abban rejlik, hogy a vázszerkezet és a mechanikai tulajdonságok összefüggnek [Odgaard és mtsai, 1997]. Először Cowin [1985] majd Zysset és Curnier [1995] tették javaslatot a váztenzor sajátértékei és az ortotrop anyagi tulajdonságokat leíró merevségi tenzor elemei közötti kapcsolat matematikai leírására.

A porózus anyagok szerkezeti anizotrópiájának mérésére Whitehouse [1974] javasolta elsőként a MIL (mean intercept length) eljárást, mely számos későbbi vizsgálat alapjául szolgált, és amit a szakirodalom napjainkig használ. A módszer alap gondolata, hogy egy adott irányban egymással párhuzamos egyeneseket fektetnek a szerkezetre és az egyeneseknek a csont és a velő közötti határfelületével való metszéspontjait számolják (1. ábra). Az adott irányba felvett egyenesek összes hosszát a metszéspontok számával elosztva az adott irány dominanciáját jellemző átlagos hosszúság értéket nyerjük (minél nagyobb az érték, annál erőteljesebb a szerkezet adott irányú irányítottága). A fenti átlagos hossz felhasználásával Cowin [1986] definiált egy váztenzort, melynek a sajátértékei a MIL értékek a kitüntetett irányokban. A MIL módszere a csont és a velőüreg közötti határfelület vizsgálatán alapul, ennél pontosabb és általánosabban alkalmazható

módszert jelentenek a csont anizotrópiájának vizsgálatára a térfogat alapú mérések, melyek közül az első az ún. VO (volume orientation) módszer [Odgaard és mtsai, 1990] volt. Az eljárás alap gondolata véletlenszerűen, vagy adott raszterben felvett pontokban megkeresni a leghosszabb olyan szakaszt, amely a csontanyagban belül fut (1.b ábra). Ezen szakaszok iránya alapján meghatározható egy ún. V orientációs mátrix [Odgaard, 1997], mely felfogható a térfogati irányultságot jellemző váztenzorként is. Szintén térfogat alapú mérési eljárás az SVD (star volume distribution) módszer [Cruz-Orive és mtsai, 1992], melynek alap gondolata a VO módszeréhez közel áll, azonban az egyes vizsgálati pontokban a csontanyagban belül haladó leghosszabb szakasz iránya helyett különböző irányokban meghatározott szakaszok segítségével definiálnak egy iránytól függő, térfogat jellegű mennyiséget (1.c ábra).



**1. ábra:** A porózus anyagok szerkezeti anizotrópiájának mérési módszerei: (a) egy adott irányban felvett egyeneseknek a csont és a velő közötti határfelületével való metszéspontjait számolva (MIL módszer), (b) adott pontokban megkeresve a leghosszabb olyan szakaszt, amely a csontanyagban belül fut (VO módszer), (c) különböző irányokban meghatározott szakaszok segítségével, (d) beillesztett ellipszoidok segítségével

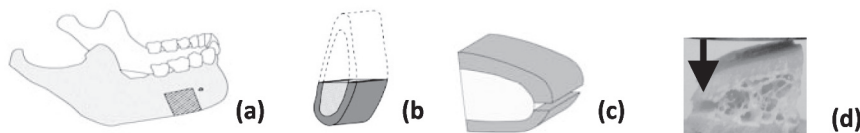
Az itt ismertetett, bináris képek feldolgozására alkalmas módszerek felületek vagy térfogatok vizsgálatán alapulnak, ami kezdeti lépésként szükségessé teszi a mikro-CT segítségével nyert voxel alapú adatállományra ezek definiálását. A következőkben ismertetett módszer kidolgozásakor elsődleges célunk az volt, hogy olyan eljárást találjunk, mely e számításgényes lépés közbeiktatása nélkül, közvetlenül a voxel alapú adatállomány vizsgálatával alkalmas a szivacsos csont anizotrópiájának jellemzésére.

## 2. Módszerek

### 2.1 A szivacsos állcsont Young-modulusának mérése nyomókísérlettel

Az emberi állcsont belső, szivacsos állománya anyagtulajdonságainak megismerésére a BME Biomechanikai Kutató Központjának laborjában halottakból származó állcsont részleteken végeztünk nyomóvizsgálatokat. A szükséges csontmintákat a Semmelweis Egyetem Igazságügyi és Biztosítás-orvostani Intézetéből kaptuk. A mintavételt és a törővizsgálatokat a Tudományos és Kutatásetikai Bizottság (4/2011 TUKÉB engedély számmal) jóváhagyta.

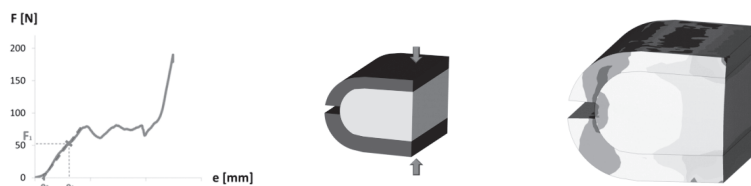
A csontminták minden esetben a mandibula molaris (a nagyőrlő fogakat tartalmazó) régiójából, az állcsont alsó éléhez közeli csontterületről származtak (2.a-b ábra), az állcsont alsó élének patkó alakú kortikálissal körülvett szivacsos állományának vizsgálatához a tömör csontot a 2.c-d ábrákon látható módon bevágták. Az előkészített csontmintákat méreteik lemérése után nyomókísérletnek vetették alá egy 5 kN méréshatárú erőmérő cellával felszerelt Zwick Z005 típusú, számítógép vezérlésű terhelő berendezés segítségével. A mérés során 0,5 mm/perc terhelési sebesség mellett erő elmozdulás (F-e) értékpárokat regisztráltunk. A sikeresnek tekinthető kísérletek eredményeképp kapott F-e diagramok az 3.a ábrán bemutatott jelleget követik. A görbén a geometriai pontatlanságokból eredő kezdeti beállítás után megfigyelhető a porózus anyagokra jellemző, három jellegzetes szakasz: az egyes csontgerendácskák rugalmas viselkedéséből eredő kezdeti, közel lineárisnak tekinthető; a csontgerendácskák egymást követő tönkremenetelét jelző sáv és a záródás miatt kialakuló, meredeken keményedő harmadik szakasz.



**2. ábra:** A csontminták elhelyezkedésének illusztrálása az állcsontban: (a) és az állcsont keresztmetszetében (b), a tömör csont bevágásának illusztrálása rajzon (c) és macerált csontminta fényképén (d)

A csontminták egymástól erősen különböző, és egyenként is komplex geometriai tulajdonságai miatt az erő elmozdulás görbék nem adtak egymással közvetlenül összehasonlítható eredményt és a számunkra fontos mechanikai jellemzőre, a rugalmassági modulusra sem lehetett belőlük közvetlenül következtetni. A fenti problémák kiküszöbölésére elvégeztük a kísérletek számítógépes szimulációját. A szimulációkhoz

létrehoztunk egy végeeselemes modellt, amely a kísérletek során lemerített geometriai méreteket (a csontminta befoglaló méreteit, a tömör csont vastagságát minden irányban, a bevágás mélységét és vastagságát) az adott mintához megadható paraméterként tartalmazza. Mind a tömör, mind a szivacsos csont anyagát lineárisan rugalmas kontinuumként kezeltük, ahol a corticalis anyagtulajdonságaira a szakirodalomban megtalálható, a szivacsos csontra várható értéknél nagyságrendekkel magasabb (15 GPa) Young-modulus értéket feltételeztünk [Cowin, 2001]. A szivacsos csont rugalmassági modulusát a nyomókísérletek szimulációjával határoztuk meg: a 3.b ábrán látható csontszelvény modelljét az alsó oldalán eltolódások ellen megtámasztva és a felső felületén függőleges nyomóerővel terhelve. A 3.c ábra a nyomókísérletben is alkalmazott teher hatására a csontban kialakuló normál feszültségek függőleges komponensének eloszlását mutatja, ahol a legnagyobb nyomófeszültséget jobboldalon, a húzófeszültséget baloldalon jelzi sötét szín.



**3. ábra:** A kísérletek során nyert erő–elmozdulás diagramok: (a), a szivacsos csont rugalmassági modulusának meghatározására használt végeeselemes modell (b) és a normál feszültségek függőleges komponensének eloszlása függőleges nyomóterhelés hatására (c)

A 3.a ábrán látható erő–elmozdulás diagram kezdeti, lineárisan rugalmasnak tekinthető szakaszáról tetszőlegesen kiválasztott ( $F_1$ ) erőt működtettünk a szerkezetre, és a szivacsos csont rugalmassági modulusát (egy tetszőleges értékről indulva iterációs algoritmus segítségével) úgy választottuk meg, hogy ugyanakkora ( $e_1 - e_0$ ) elmozdulást eredményezzen, mint a nyomóvizsgálat ( $e_0$  a geometriai pontatlanságokból eredő kezdeti beálláshoz tartozó elmozdulást jelenti) (3.a ábra). A megfelelő helyettesítő Young-modulus értéket a következő iterációs algoritmussal kerestük:

$$E_{i+1} = \frac{E_i}{(e_1 - e_0) / U_{z1}}, \quad \text{amíg} \quad |\Delta e| > \varepsilon$$

ahol  $E_i$  a szivacsos csont Young-modulusa az  $i$ -edik iterációs lépésben, ( $e_1 - e_0$ ) a valós csont fent ismertetett kísérletek során mért elmozdulása,  $U_{z1}$  a szerkezet legfelső pontjának elmozdulása az  $i$ -edik iterációs lépésben,  $|\Delta e| = (e_1 - e_0) - U_{z1}$  elmozdulási hiba és  $\varepsilon$  egy előre megadott pontosság.

A kapott, alsó állcsont szivacsos állományának anyagára jellemző Young-modulus értékek a 6,9 és 199,5 MPa közötti értéktartományba estek, ami jó egyezéssel megfelel a Misch és mtsai [1999] által mért értékeknek. Az alacsony mintaszámra való tekintettel a fenti mérések statisztikai elemzésre nem voltak alkalmasak. A mérési eredményekből számított rugalmassági-modulus értékek szakirodalomban közölt, akár nagyságrendekkel eltérő kísérleti eredmények széles skáláján a megfelelő értéktartomány és a relevánsnak tekinthető szakirodalmi forrás kiválasztásában voltak elengedhetetlenek.

## 2.2 A szivacsos állcsont anizotrópiájának mérése

Az új, szerkezeti anizotrópia mérési eljárás alapelve, hogy a tartomány egyes – a VO és SVD módszerekhez hasonlóan a csontállomány belső pontjait vizsgáljuk – pontjaiban keressük azt a legnagyobb ellipszoidot, ami úgy írható a pont köré, hogy belsejében csak csontanyagot tartalmaz, és felülete érinti a velőüreget (1.d ábra). Az ellipszoidot egy kiindulási gömb fokozatos növelésével kapjuk. A velőüreg elérésekor az érintési pont irányában rögzítjük az ellipszoid legrövidebb tengelyét, és először forgási ellipszoidként, majd a második csonton kívüli pont elérése után általános ellipszoidként növeljük tovább.

A vizsgálatokban a mikro-CT segítségével kapott adatállományt térbeli pontfelhőként kezeljük, melyben szabályos térbeli raszter szerint elhelyezkedő pontok mindegyikéhez a sugárgyengítési tényezővel arányos számot rendeltünk. Az adatállományt binarizáljuk, és csak azt az információt vesszük figyelembe, hogy az egyes pontokhoz a csontra jellemző legalacsonyabb sugárgyengítési értéknél magasabb vagy alacsonyabb érték tartozik (előbbieket belső, utóbbiakat külső pontnak nevezem a továbbiakban). Az eljárás kiinduló lépéseként szabályos pontrasztert fektetünk a vizsgált tartományra, és a következőkben ismertetett lépésekből álló algoritmust végrehajtjuk az egyes pontokra. Lépések:

1. Ellenőrizzük, hogy a raszterpont belső pont e.

- Ha nem: nem vizsgáljuk tovább, továbblépünk a következő raszterpontra. Ha igen: továbblépünk a 2. pontra.



2. Ellenőrizzük, hogy a raszterpont minden szomszédja (az oldalirányban és átlósan szomszédos pontok figyelembevételével összesen 26 pont) belső pont e.

- Ha nem: akkor a csonttartomány szélén van, ezért nem vizsgáljuk tovább, továbblépünk a következőre. Ha igen: továbblépünk a 3. pontra.

3. A raszterpont körül felvesszünk egy kétegyeség sugarú gömböt (a voxelméretet tekintjük egységnek).

4. Ellenőrizzük, hogy van e külső pont a gömbön belül.

- Ha nincs: növeljük a gömb sugarát. Ismételjük a 4. pontot.

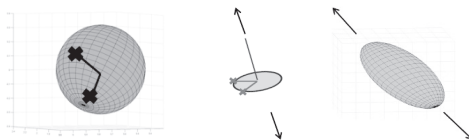
- Ha van: megkeressük a raszterponthoz legközelebbit. A pontok szabályos raszterben történő elhelyezkedése miatt könnyen előfordulhat, hogy a legkisebb távolságban elhelyezkedő külső pontból is több van. Ezek száma legyen:  $n$ .

4.1.  $n \geq 3$ : A keresett ellipszoid egy  $r$  sugarú gömb. Továbblépünk a következő raszterpontra.

4.2.  $n = 2$  (4. ábra):

- Ha a két pont és a vizsgált raszterpont egy egyenesbe esik, akkor a kettő közül tetszőlegesen kiválasztott pontot tekintve az egyetlen megtalált külső pontnak a 4.3. ponttal folytatjuk.

- Ha a két pont nem esik egy egyenesbe a vizsgált raszterponttal, akkor a keresett ellipszoid két megtalált pontba mutató vektorú féltengelye azonos hosszúságú, így eredményként forgási ellipszoidot keresünk, melynek forgástengelye a két pont és a raszterpont síkjára merőleges. A harmadik vektor hosszának növelésével haladunk tovább az 5. ponttal.



**4. ábra:** 4.2. lépés  $n=2$  eset: a növekvő gömb felületén talált 2 külső pont ( $a, b$ ), az ellipszoid két legkisebb féltengelyének rögzítése a pontok síkjában ( $a, b$ ) és a harmadik féltengely növelése a pontok síkjára merőlegesen ( $b, c$ )

4.3.  $n = 1$ : Rögzítsük az ellipszoid legrövidebb féltengelyét a megtalált külső pontba mutató vektorban, és növeljük az erre merőleges síkban az így kialakuló forgási ellipszoid másik két féltengelyének hosszát (5. ábra).

4.3.1. Ellenőrizzük, hogy van e külső pont az ellipszoidon belül.

- Ha nincs: növeljük a tengely hosszát.

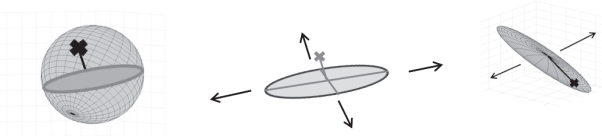
Ismételjük a 4.3.1. pontot.

- Ha a raszterponttól legkisebb távolságra 2 vagy több van: A keresett ellipszoid forgási ellipszoid.

Továbblépünk a következő raszterpontra.

- Ha a raszterponttól legkisebb távolságra 1 van: rögzítsük az ellipszoid második második tengelyét az első féltengely és a talált pont síkjának és a forgási ellipszoid középsíkjának metszévonalába.

5. A két rögzített tengelyre merőlegesen növeljük az immár általános ellipszoid harmadik féltengelyét, amíg egy külső pontot nem találunk. Ekkor rögzítjük a keresett általános ellipszoid tengelyeit.



**5. ábra:** 4.3. lépés  $n=1$  eset: a növekvő gömb felületén talált 1 külső pont ( $a, b$ ), az ellipszoid tengelyének rögzítése ( $a, b$ ), az ellipszoid másik két tengelyének növelése forgási ellipszoidként ( $b$ ), újabb külső pont találása ( $c$ ) és a harmadik féltengely növelése ( $c$ )

A raszterpontokhoz rendelt ellipszoidok felhasználásával előállítható az egyes pontok, és a teljes szerkezet váztenzora. A váztenzort úgy vesszük fel, hogy a féltengelyek vektorai irányába mutató egységvektorok legyenek a sajátvektorai és a megfelelő féltengelyek hosszai a sajátértékei. Mindezek alapján a váztenzor a spektrálfelbontásából számítható vissza.

### 3. Összefoglalás

A kutatás a szivacsos csont anyagtulajdonságainak, ezen belül a Young-modulusának és szerkezeti anizotrópiájának mérésére irányult. A Young-modulus meghatározásához halottakból származó friss

állcsontmintákon végeztünk nyomókísérletet és a regisztrált erő–elmozdulás diagramokból a kísérlet végeselemes szimulációja segítségével számítottuk a rugalmassági-modulus értékeket. Az alacsony mintaszámra való tekintettel a mérések statisztikai elemzésre nem voltak alkalmasak. A mérési eredményekből számított értékek szakirodalomban közölt, akár nagyságrendekkel eltérő kísérleti eredmények széles skáláján a megfelelő értéktartomány és a relevánsnak tekinthető szakirodalmi forrás kiválasztásában voltak hasznosak. A szerkezeti anizotrópia mérésére kidolgozott módszerünk a csontrezészet mikro-CT felvételének feldolgozásán alapul. A csont kitüntetett irányait beillesztett ellipszoidok – egy adott pont körüli legnagyobb olyan ellipszoid, ami úgy írható a pont köré, hogy belsejében csak csontanyagot tartalmaz, és felülete érinti a velőüreget – segítségével határozza meg.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönjük a BME Biomechanikai Kutatóközpontnak, a méréseinkhez biztosított laboratóriumi háttérrel. A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

- Brunet-Imbault, B, Lemineur, G, Chappard, C, Harba, R, Benhamou, C.L. A new anisotropy index on trabecular bone radiographic images using the fast Fourier transform, *BMC Med. Imaging*, 5(4), 2005.
- Cowin, S.C. The relationship between the elasticity tensor and the fabric tensor, *Mech. Mater*, 4, 1985, 137-147.
- Cowin, S.C. Wolff's law of trabecular architecture at remodelling equilibrium, *J. Biomech. Eng*, 108(1), 1986, 83-88.
- Cowin, S.C. *Bone Mechanics Handbook* CRC Press, USA, 2001.
- Cruz-Orive, L.M, Karlsson, L.M, Larsen, S.E, Wainschein F. Characterizing anisotropy: A new concept, *Micron Microscopica Acta*, 23, 1992, 75–76.
- van Eijden, T. M. G. J, van Ruijven, L. J, Giesen, E. B. W. Bone Tissue Stiffness in the Mandibular Condyle is Dependent on the Direction and Density of the Cancellous Structure, *Calcif Tissue Int*, 75, 2004, 502–508.
- O'Mahony, A. M, Williams, J. L, Katz, J. O, Spencer, P. Anisotropic elastic properties of cancellous bone from a human edentulous mandible, *Clinical Oral Implants Research*, 11(5), 2000, 415-421.
- Misch, C.E, Qu, Z, Bidez, M.W. Mechanical properties of trabecular bone in the human mandible: implications for dental implant treatment planning and surgical placement, *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 57(6), 1999, 700-706.
- Odgaard, A, Jensen, E. B, Gundersen, H. J. G. Estimation of structural anisotropy based on volume orientation. A new concept, *J. Microsc*, 157, 1990, 149–162.
- Odgaard, A, Kabel, J, van Rietbergen, B, Dalstra M, Huiskes R. Fabric and elastic principal directions of cancellous bone are closely related, *Journal of Biomechanics*, 30, 1997, 487-495.
- Rao, A. R, Schunck, B. G. Computing oriented texture fields, *CVGIP, Graphical Model and Image Processing*, 53(2), 1991, 157-185.
- Varga, P, Zysset, P. K. Sampling sphere orientation distribution: An efficient method to quantify trabecular bone fabric on grayscale images, *Medical Image Analysis*, 13(3), 2009, 530-541.
- Whitehouse, W. J. The quantitative morphology of anisotropic trabecular bone, *J. Microsc*, 101, 1974, 153–168.
- Zysset, R. K, Curnier, A. An alternative model for anisotropic elasticity based on fabric tensors, *Mechanics of Materials*, 21, 1995, 243-250.

# ÖNREPRODUKCIÓS ÚTHÁLÓZATI FORGALMI MODELLEK KIDOLGOZÁSA

Fi István  
Út és Vasútépítési Tanszék  
fi@uvt.bme.hu

Makula László  
Kvantitás Kft.  
drmakula@kvantitas.hu

Bocz Péter  
Út és Vasútépítési Tanszék  
bocz@uvt.bme.hu

Schuchmann Gábor  
Út és Vasútépítési Tanszék  
schuchmann@uvt.bme.hu

Siki Zoltán  
Általános és Felsőgeodézia Tanszék  
siki@agt.bme.hu

Kollár Attila  
Út és Vasútépítési Tanszék  
kollar@uvt.bme.hu

Vasvári Gergely  
Út és Vasútépítési Tanszék  
vasvari@uvt.bme.hu

## **Kivonat**

Jelen kutatás célja, egy olyan automatizmus létrehozása, ami – felhasználva a különböző forgalomszámláló berendezések által szolgáltatott adatokat – számszerű eredményeket szolgáltat a teljes hálózatra vonatkoztatva a közúti forgalom intenzitásáról. A forgalombecslés végrehajtásához egy kiinduló (de közel jó) célforgalmi mátrixra van szükség, amely az úthálózat egyes csomópontjai – mint kiinduló és végpont – közötti mozgásokat tartalmaz. A célforgalmi mátrix adatait szoftver segítségével ráterheljük egy felparaméterezett hálózatra, majd a hálózat éleire kapott forgalomnagyság és az adott számú tényleges (mért) keresztmetszeti forgalom eltérése alapján a kiindulási mátrixot pontosítjuk. A folyamat iterációs eljárást igényel, amelynek végeredménye egy, a valóságot a lehető legpontosabban leképező célforgalmi mátrix.

## **Kulcsszavak**

közúthálózat, forgalomszámlálás, célforgalmi mátrix, ráterhelés, keresztmetszeti forgalom

## **1. Bevezetés**

A közúti közlekedési keresletet – nagyrészt egyéni jellegéből fakadóan – egyértelműen meghatározni, előrevetíteni nehéz feladat. A használók egyénileg döntenek a gépjárműhasználatukról, sűrűségéről, útvonaláról. A döntéseket számos tényező befolyásolja.

A közúti kereslet leírása tehát nem végezhető el egyértelműen, csupán statisztikai adatok állhatnak rendelkezésre, úgymint a hálózat egyes elemein végzett keresztmetszeti forgalomszámlálás. Ezen adatok nem feltétlenül teljes körűek, így különböző tapasztalati értékekkel történő felszorzással válhatnak valós statisztikai adattá, azaz ÉÁNF (=éves átlagos napi forgalom) értéké.

E forgalomszámlálás elvégzése egyrészt költséges, másrészt alkalmazási lehetőségei a lokális tervezési feladatokra korlátozódnak. Ennek ellenére a hazai közúti adminisztráció e forgalomszámlálást minden évben számos keresztmetszetben elvégzi és a feldolgozott adatokat díjmentesen a nyilvánosság elé tárja. Ezen adatok a tervezők számára segítséget jelenthetnek a forgalmi méretezés, az utazási időkölségek, valamint a zaj és légszennyezés meghatározásához.

A közúti fejlesztések szempontjából a keresztmetszeti forgalomszámlálás azonban nem sokat mond; sem a gépjárművezetők útvonalválasztását, sem a hálózat tetszőleges pontjai között generálódó utazási igényt nem képes megmutatni. Ilyen, a „honnan-hová” utazási igényekről – minden különböző viszonylaton – csak még költségesebb (kikérdezéses) módszerekkel juthatunk adatokhoz. Ezen adatokat az ún. célforgalmi mátrix tartalmazza, amely tehát a közlekedési hálózatok átfogó tervezésének, a fejlesztési változatok értékelésének alapinformációja. E mátrix azonban csak akkor tudja a szerepét betölteni, ha naprakész [Fi és Galuska, 2010]. A célforgalmi mátrixok aktualizálását állami megbízás keretében az '50-es évek óta átlagosan 10 évente végzik el. Legutóbb a Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Zrt. 2008. évben készítette el az „Országos Célforgalmi Adatfelvétel lebonyolítása, a célforgalmi mátrix létrehozása” c. kutatási munkát [KTI, 2009], amelynek fő eredménye a 2008. évre vonatkozó célforgalmi (honnan-hová) mátrix (továbbiakban OCF).

Tekintettel e munka volumenére, költségeire továbbra sem várható a célforgalmi mátrix kikérdezéses jellegű aktualizálásának gyakoritása, így célszerű lehet a rendelkezésre álló (keresztmetszeti) adatokból a célforgalmi mátrix aktualizálásának elvégzése, megfelelő módszer segítségével.

## 2. Hálózati modellezés

A célforgalmi mátrix és a keresztmetszeti forgalmak közötti átjárhatóságot a hálózati modellezés módszere jelenti. A modellezésnek két lényeges eleme van: a felparaméterezett úthálózat és a honnan-hová célforgalmi mátrix.

Az úthálózat elemeit (csomópontok és a közöttük található útszakaszokat) irányított gráfként modellezzük le. Az úthálózati elemek azonban a gráfban elfoglalt helyzetükön túl számos egyéb tulajdonságokkal ruházhatók fel, minél pontosabban leképezve a valós viszonyokat (pl. sávok száma, megengedett sebesség, megengedett járműkategóriák, stb.). A célforgalmi mátrix egyes elemei a hálózat bizonyos (de nem feltétlenül az összes) csomópontjai közötti utazási igényeket reprezentálják.

A hálózati modellezés módszeréből kifolyólag azt nagyobb hálózat esetén kézi módszerekkel szinte lehetetlen elvégezni, így számos szoftveres megoldás látott napvilágot. Jelen kutatásban a kanadai INRO Inc. által kifejlesztett EMMÉ szoftvert alkalmazzuk modellezési célra. A szoftver képes a célforgalmi mátrix minden egyes elemének értékét (mint utazási igényeket) ráterhelni a hálózatra, vagyis a legkisebb „költségű” út megkeresésével a lehető legpontosabban szimulálni a járművezetők valós viselkedését. Az úthálózat és a forgalom nagyság közötti kapcsolat az ún. VDF függvény (Volume Delay Function = forgalmi késleltetési függvény), amely egy adott szakasz forgalom nagysága és az utazási ideje közötti összefüggést állítja fel. A ráterhelés tehát nem gépiesen a legrövidebb vagy leggyorsabb út megkeresésével, hanem egy-egy útszakasz kapacitáshatárt megközelítő terhelése esetén alternatív útvonalak kijelölésével folyik, egészen addig, amíg a hálózaton bonyolódó forgalom összes utazási „költsége” a legkisebb nem lesz.

A fentiek értelmében a VDF függvény alakja önmagában is befolyásolja a ráterhelési folyamatot. Más és más VDF függvény alkalmazásával két, teljesen azonos hálózat és célforgalmi mátrix is más-más eredményeket szolgáltathat.

## 3. A VDF függvényekkel kapcsolatos kutatások

A fentiekben említésre került, hogy a VDF függvények alakja, típusa nagyban befolyásolja a hálózati ráterhelés folyamatát, főként abban az esetben, ha bizonyos útszakaszok a kapacitásuk határához közelednek. Lényeges tehát, hogy a VDF függvény milyen zavartatási körülményeket vesz figyelembe.

Az alapesetben alkalmazott, az irodalom által ismert konikus alakú VDF függvények egy-egy hálózati elemre csomópont nélküli folyópálya-szakaszként tekintenek, és leginkább a folyópálya kapacitáskorlátját veszik figyelembe.

A modellezéssel együtt járó absztrakcióval, elvonatkoztatással a hálózat bizonyos csomópontjai eltűnnek, elegendő csak egy település átkelési szakaszára gondolni, ahol is annak belső úthálózata (ezáltal csomópontjai) a modellben csupán egyetlen gráf-élként jelennek meg. Az a feltételezés, hogy a modellben nem szereplő csomópontok száma és típusa nem befolyásolja akár a szóban forgó szakasz kapacitását, valamint a VDF függvény alakját, bizonyos elhanyagolásokhoz vezet, amely csökkenti a modellezés pontosságát.

### 3.1. Mikroszimulációs modell felépítése

A hiba kiküszöbölése érdekében különböző, az ÚT 2-1.214:2004 „Szintbeni csomópontok méretezése és tervezése” és az ÚT 2-1.206:2010 „Körforgalmak tervezése” című Útügyi Műszaki Előírásokban szereplő csomópont típusokat vizsgáltunk mikroszimulációs módszerrel, VISSIM szoftver segítségével. A mikroszimuláció lényege, hogy a modell az egyes járműveket, mint individuumokat kezeli, azok minden valós menetdinamikai tulajdonságával és különböző vezetési stílusokkal (gyorsulás, sebesség, reakcióidő, stb.).

A szimulációs időszak összesen 80 perc hosszúságú volt, azonban ebből csak az utolsó 60 perc kiértékelése történt meg. A vizsgálat során a következő feltételezéseket vettük figyelembe:

- 10%, 20% és 30% tehergépkocsi arány;
- az útvonalválasztás relatív megoszlása főirányban becsatlakozásnál 80% egyenes és 20% kanyarodó mozgás, keresztezésnél 60% egyenes és 20%-20% jobbra és balra kanyarodó mozgás, mellékirányból becsatlakozásnál 50%-50% balra és jobbra, keresztezésnél az egyenesen, balra és jobbra irányuló mozgások aránya rendre 40%-30%-30%;
- a csomópontok jellemzően belterületi előfordulásúak, ezért a belterületen megengedett sebességértékeket használtuk;
- az előzési mozgásokat a csomópont környezetében figyelmen kívül hagytuk;
- gyalogos forgalommal nem számoltunk;
- a belső forgalmi sávokat csak személygépkocsik használhatják;

A szimulációs modellek felépítése és különböző gépjármű-sűrűséggel történő „lefuttatása” alapadatot szolgáltat a csomóponti késleltetések, összességében a VDF függvény alakjának meghatározásához a különböző csomópont-típusok esetében.

### 3.2. A VDF függvények megállapítása

A vizsgálat során a hálózati modellben helyettesítésre kerülő útvonalat az egyes csomópontok tekintetében főlérendelt iránynak tételeztük fel, az összevonás során eltűnő becsatlakozó utakat pedig szabályozástechnikailag alárendelt irányoknak. Az idővesztéseket kizárólag a főlérendelt irány egyenesen továbbhaladó áramlatán vizsgáltuk, hiszen a főlérendelt irány kanyarodó mozgásai és az alárendelt irányokból érkező forgalmi áramlatok az országos modellben elhagyásra kerülnek.

A 3.1. pontban ismertetett mikroszimulációs modelleket felhasználva minden modellezett csomópont típusra 200 J/h kezdeti bemenő, majd 200 J/h mértékű lépcsőkben növelt főirányú keresztmetszeti forgalmat vettünk figyelembe, egészen a kapacitáshatár kimerüléséig. A kimerülés közeli állapotban a pontosság a lépcsők 20 J/h-s finomítását kívánta meg, a függvénygörbe megfelelő meghatározásához.

Azonos típusú csomópontra összesen 5 párhuzamos, eltérő véletlenszerűségi mutatóval rendelkező vizsgálatot végeztünk el a véletlenszerű hatások kiszűrésére, a vizsgálat pontosítására.

A VDF függvények meghatározása során a mellékirány forgalma a vizsgálat célját tekintve nem kerül figyelembe vételre, azonban magas alárendelt forgalom esetén annak a főirányra kifejtett hatását nem hanyagolhatjuk el. Az előzőekben ismertetett sorozatot egyre növekvő mellékirány forgalmakkal is megvizsgáltuk. A mellékirány forgalmának növekedését csak 200 J/h-val növeltük. Minden egyes növelés után a fent ismertetett többszörös szimuláció sorozat került lejátszásra, a főlérendelt irány csökkenő jármű áthaladásának határáig. Az alárendelt irány forgalmát addig növeltük, míg a főlérendelt irányban legalább három forgalom-növelési lépcsőfokot értékelhetőnek tudtunk tekinteni. A főirány minimális forgalma minden esetben a (magnövelt) mellékirány forgalmával megegyezett. A keresztezés és körforgalom típusú csomópontoknál a mellékirányokban azonos forgalomnagysággal számoltunk.

A 3.1. pontban említettek szerint kezdetben 10%-os tehergépjármű arányt vettünk figyelembe, azonban minden szimuláció-sorozatot végrehajtottuk 20% és 30% tehergépkocsi aránnyal is, hogy a későbbiek során ebből a nézőpontból is vizsgálható legyen az egyes csomóponttípusok viselkedése.

A csomóponti szimulációkból származó áthaladó forgalom–időveszteség értékpárokat összegyűjtöttük. A kiértékelés első fázisaként minden csomópontra a 10% tehergépjármű arányhoz és állandó, 200 J/h alárendelt forgalomhoz tartozó, a fölérendelt irányban mért forgalom–időveszteség párok által alkotott halmazt vizsgáltuk. Ezen ponthalmaz alapján állítottunk elő a csomóponttípusra jellemző ellenállás függvényt.

Az ellenállás függvény alakját az irodalomból ismert alacsony számítási idő igényű kónikus függvénynek megfelelően kerestük (1. ábra).

$$f^C(x) = p_1 \cdot (p_2 + \sqrt{\alpha^2 \cdot (p_3 - x)^2 + \beta^2} - \alpha \cdot (p_3 - x) - \beta)$$

$F$  forgalomnagyság

$C$  csomópontra jellemző kapacitás

$$x = \frac{F}{C} \text{ kapacitáskihasználtság}$$

$$\beta = \frac{2 \cdot \alpha - 1}{2 \cdot \alpha - 2}$$

**1. ábra:** A kónikus függvény paraméterezése

A csomópont adathalmazára legjobban illeszkedő kónikus görbét grafikus analízissel határoztuk meg. Ennek során az egyes paramétereknek kezdeti értékeket adtunk, amelyeket addig változtattunk, míg el nem érték a kívánt görbe alakot. A  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ , valamint az  $\alpha$  értékei változtathatók. A függvények számának csökkentése céljából néhány, hasonló alakú és paraméterezésű függvényt összevontunk, a azokat paramétereinek számtani közepénél vettük figyelembe.

## 4. A kutatás végrehajtása

### 4.1. Alapadatok

A kutatás végrehajtásának bemenő adataiként nyilvánosan hozzáférhető adattárak szolgálnak, úgymint az Országos Közúti Adatbank (a hazai úthálózat geografikus adatai és műszaki paraméterei, valamint az országos keresztmetszeti forgalomszámlálás 2008 és 2009. évekre [Magyar Közút Nzrt, 2009; Magyar Közút Nzrt, 2010] és Országos Célforgalmi Mátrix (OCF).

A beszerzett hálózati adatokat egy GIS alapú térinformatikai rendszerbe konvertáltuk. Az országos úthálózatként a modellben a teljes, Magyar Közút NZrt. által kezelt úthálózatot, valamint az autópályákat vettük figyelembe. Budapesten a teljes főúthálózat bekerült a hálózati modellbe. A hálózat csomópontjait az OKA azonosítójuk alapján azonosítjuk, a hálózat éleit pedig a két összekötő csomópont alapján. A hálózat minden eleméhez a következő adatokat rendeltük hozzá:

- Forgalmi sávok száma
- Közút kategóriája
- Függőleges vonalvezetés
- ÁNF adatok
- Alkalmazott VDF függvény

Forrás-nyelő pontokként az OCF 1019 db csomópontját jelöltük ki. Ezek azok a csomópontok, amelyek között a célforgalmi mátrix tartalmazza az utazási igényeket.

A GIS alapú térinformatikai rendszer hálózati adatait többlépcsős konverzióval az EMME által megérthető formátumúvá konvertáltuk át. A forrás-nyelő pontok hálózatba történő bekötése szintén megtörtént.

A célforgalmi mátrixokat az OCF-ből nyertük. Ez tekinthető a mátrix kiindulási állapotának.

A hálózati keresztmetszeti forgalmak a modell és a módszer lényeges bemenő adatai, ezekkel végezzük el a mátrixok kalibrálását, validálását, aktualizálását. A Budapesten kívüli országos adatok nyilvánosan

hozzáférhető, azonban ilyen jellegű, nyilvánosan hozzáférhető keresztmetszeti számlálás Budapesten nem állt rendelkezésre. Az adathiányok kiküszöbölésére a budapesti hálózaton a keresztmetszeti forgalmi adatok felvétele videokamerákkal történt [Fi és Galuska, 2010; KTI, 2009]. A forgalomfelvétel során a reggeli csúcsgalomban (kb. 6.30 órától 8.30 óráig) és a délutáni csúcsgalomban (16.30-18.30 óráig) idején készítettünk felvételeket a modell szempontjából releváns kb. 100 budapesti csomópontban. A felvételek helyszíneit úgy határoztuk meg, hogy azok alapján a város teljes forgalmának áramlása nyomon követhető legyen. Ennek következtében az egyes mérőhelyek között eltűnő és keletkező forgalmak kizárólag a közrezárt területek forgalomkeltésének köszönhetőek. A videofelvételek kiértékelése során a csomópontok összes forgalmi irányát rögzítettük, majd egyidejűséget feltételezve a szükséges forgalmakat elkülönítettük.

A Fővárosi Közterület Fenntartó Zrt. forgalomfigyelés céljából telepített hurokdetektoraiból származó adatok is rendelkezésre álltak, ezen adatok feldolgozását és korrigálását a videokamerás forgalomfelvétel adatai alapján végeztük el. Az adatokat a nyilvános meteorológiai adatbázishoz igazítva a köztudottan nagyobb forgalmú, esős tavaszi és őszi napokra kértük (és kaptuk is meg).

A feldolgozás során az automatikusan generált, jelzőlámpa-periódusonként megadott óraforgalmakat (pl. a 90 másodperc alatt elhaladt járművek számának negyvenszeresét) visszaállítottuk járműdarabra. Az így kapott forgalmi adatokat járműosztályokra bontani csak a videokamerás felvételek adatai alapján volt lehetőségünk.

Az egyes hurokdetektorok adatait egyenként, a videofelvételek segítségével ellenőriztük, így kiszűrhetők voltak a triviális hibák. Az ilyen módon tisztított és ellenőrzött adatokból mérőhelyenként és irányonként mértékadó óraforgalmat állítottunk elő minden egyes forgalmi sávra. Az így kapott adatokat használtuk fel a hiányzó budapesti keresztmetszeti forgalmak feltöltésére.

## 4.2. Módszertan

Jelen kutatási feladat elvégzéséhez kulcsfontosságú az EMME modellező szoftver által végzett tevékenység. Az előzőekben említett GIS alapú úthálózat (felparaméterezve), a célforgalmi mátrixok, valamint a keresztmetszeti forgalmi adatok mind felkerülnek az EMME szoftverbe.

Az EMME szoftver a célforgalmi mátrixok úthálózatra történő ráterhelését végzi el, a megadott VDF függvények segítségével. A ráterhelés eredménye tulajdonképpen a hálózat egyes elemeire számított (modellezett) keresztmetszeti forgalom nagyság. E forgalom nagyság természetesen nem minden esetben egyenlő a valós, mért keresztmetszeti forgalom nagysággal. A mátrix validálása, vagyis a mátrix egyes elemeinek kismértékű változtatása éppen a modellezett és a mért keresztmetszeti forgalmak eltérése alapján történhet. A változtatott mátrix ráterhelése ismét megtörténik, majd ismét összehasonlításra kerülnek a mért és a modellezett forgalmak. Ez az iterációs eljárás addig folyhat, amíg a modellezett és a mért keresztmetszeti forgalmak elhanyagolható eltérésen belül találhatók. Annak ellenére, hogy nem bizonyítható, hogy a módszer konvergens, a megengedett eltérések alacsony szinten tartása a valóságban használható, megfelelő pontosságú mátrixot állít elő.

A hálózat összes keresztmetszete (gráf-éle) célszerűen nem használható a validálásra, tehát a leírt módszer kulcskérdése a megfelelően kiválasztott referencia keresztmetszetek. A referencia keresztmetszeteket úgy választottuk ki, hogy a lehető legmegbízhatóbb keresztmetszeti forgalmi adatokat szolgáltatassák. Ezért előírtuk, hogy legalább 50 napon keresztül legyen az adott keresztmetszetben forgalom számlálás. A referencia keresztmetszeteket a hálózaton egyenletesen osztottuk el, azonban figyelemmel kellett lenni az úthálózat forgalmi terhelésére. Összesen 700 keresztmetszet lett e célra kiválasztva, amelyeket az autópályák, elsődrendű főutak, másodrendű főutak, valamint a mellékúthálózat kategóriákba osztottunk, ügyelve arra, hogy a keresztmetszetek számának aránya és a forgalmi terhelés aránya közel egyező legyen. Az autópályák esetében szinte minden helyszínen folyamatos (gépi) forgalom számlálást végeznek, itt a forgalom tapasztalati lefolyásának alapján választottuk ki a keresztmetszeteket. A főúthálózat esetében igyekeztünk hosszú külterületi szakaszokat választani, ahol lehetőség szerint minél több napon át történt számlálás. A mellékúthálózat esetén szintén igyekeztünk hosszabb külterületi szakaszokat választani, azonban itt a területiség elvét is követtük.

## 4.3. Eredmények

A modell-rendszerekben felhasználható adatok alapvetően két csoportra bonthatók. Az adott modellezési feladat szempontjából statikusnak tekinthető adatok (pl. a hálózat geometriája, meglévő – összesített – forgalmi adatok) a hálózat leterhelése előtt kerülnek a modell adatbázisába. Jelen esetben a referencia keresztmetszeteken bármely időszakban mért és előre feldolgozott (tehát statikus) keresztmetszeti forgalmak

alkalmasak arra, hogy a kiindulási célforgalmi mátrix validálásával egy új mátrixot állítsunk elő, amely – a mért keresztmetszeti forgalmak alapján – aktuálisabb, mint a kiindulási célforgalmi mátrix. E módszer tehát anélkül aktualizálja a rendelkezésre álló célforgalmi mátrixot, hogy a kikérdezés, honnan-hová számlálást el kellene végezni. Az ilyen jellegű adatnyerés országos szinten főként a hálózati fejlesztések, változatok összehasonlítása esetén nyújt segítséget.

A felhasználható adatok másik csoportjába a dinamikusan változó adatok tartoznak. A referencia keresztmetszetek forgalmi adatai valamilyen valós idejű, és megbízható adatokat szolgálhat, további hosszas feldolgozást nem igénylő adatforrásból is beszerezhetők (pl. hurokdetektorok, videokamerák, radarok, és az azok által mért adatok valós idejű kiértékelése). Amennyiben ilyen infrastruktúra rendelkezésre áll, a modell adatbázisába beleépítve, majd az iterációt elvégezve a modell validálása dinamizálható, és (közel) valós időben folyamatosan rendelkezésre áll egy, a valóságot lehető legpontosabban leképező célforgalmi mátrix. Az aktuális mátrix hálózatra történő ráterhelésével a teljes hálózat összes keresztmetszetének forgalma megismerhető.

Lényeges azonban, hogy a modell dinamizálására csak egy kisebb méretű hálózat esetén van szükség és lehetőség. Egy országos hálózat pillanatnyi állapotának előállítása már csak az utazási idők szempontjából sem tűnik használhatónak (nem teljesül az egyidejűség), valamint a számítási erőforrások, a beszerzendő adatok mennyisége is határt szab a dinamikus modellek ilyen irányú fejlesztésének. Azonban kisebb hálózaton, ahol a célforgalmi mátrix viszonylatainak utazási ideje nem haladja meg az 1-1,5 órát (pl. Budapest vagy egy-egy vidéki nagyváros), alkalmas lehet egy ilyen rendszer kiépítése és működése, különös tekintettel az útvonalajánlás lehetőségének megteremtésére.

## 5. Összefoglalás

A kutatás eredménye, felhasználási lehetősége kettős. Egy részről az országos célforgalmi számlálás éves aktualizálását elvégző módszer, amely a közlekedési hálózatok fejlesztéséhez, alternatívák értékeléséhez, költség–haszon elemzéshez nyújt segítséget. A modell jó működésének előfeltétele a megbízható keresztmetszeti forgalomszámlálás.

Az eredmény másik része egy időben folyamatosan változó és a közel aktuális állapotot mutató forgalmi modell, amely forgalomfigyelésre, útvonalajánlásra alkalmazható. A működés alapvető feltétele a dinamikus adatszolgáltatás (on-line keresztmetszeti forgalmak). A modell működésének korlátja a kis hálózat, amely ellátható megfelelő mennyiségű keresztmetszeti forgalmi adattal, valamint a számítási kapacitás korlátait sem meríti ki.

## Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

Fi, I, Galuska, J. Recommendations for new capacity values on freeways, *Periodica Polytechnica Ser. Civil Engineering*, 54(2), 2010, 127-136.

Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Zrt. (KTI). *Országos Célforgalmi Adatfelvétel lebonyolítása, a célforgalmi mátrix létrehozása*, Budapest, 2009.

Magyar Közút NZrt. *Az Országos Közutak 2008. évre vonatkozó keresztmetszeti forgalma*, 2009.

Magyar Közút NZrt. *Az Országos Közutak 2009. évre vonatkozó keresztmetszeti forgalma*, 2010.



# CSAPADÉKVÍZZEL KÖZVETÍTETT ANTROPOGÉN ANYAGÁRAMOK OKOZTA KÖRNYEZETTERHELÉS ÉS A CSAPADÉKVÍZ HASZNOSÍTÁS FELTÉTELEI VÁROSI KÖRNYEZETBEN

Budai Péter  
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék  
budai@vkkt.bme.hu

Horváth Adrienn  
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék  
horvath.adrienn@vkkt.bme.hu

Clement Adrienne  
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék  
clement@vkkt.bme.hu

Buzás Kálmán  
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék  
buzas@vkkt.bme.hu

## **Kivonat**

A kutatás a csapadékvizek szennyeződési folyamatának megismerésére, és ennek alapján a csapadékvíz hasznosítási lehetőségek feltárására irányul, a szennyezőanyagok széles spektrumából elsősorban a nehézfémekre fókuszálva. Módszereink különféle mintavételi eljárások és laboratóriumi mérések, melyek során az útpályákról és tetőfelületekről lefolyó vizek minőségét vizsgáltuk. Eredményeink rámutattak az okozott környezet terhelés jelentőségére.

A közúti közlekedés és a tetőfelületek esetében is igazolható, hogy a szennyező források ismerete nemcsak a terhelés nagysága, hanem a szennyezők terjedésének befolyásolása miatt is fontos. A közlekedési kibocsátásokat elsősorban a forgalom nagysága és dinamikája befolyásolja. A vizsgált fémek esetében, szinte kizárólag fékbetét kopásból származik a réz, antimon, illetve az ólom. A kibocsátott anyagmennyiség arányos a fékezések gyakoriságával, száraz időszakban is mobilizálódik, jellemzően az útpadka mentén gyűlik össze. Az elsődlegesen gumiköpeny gördülési kopásból származó cink és kadmium ezzel ellentétben kevésbé függ a fékezések gyakoriságától és száraz időszakban csak kismértékben mobilizálódik. Méréseink alátámasztották, hogy a tetővizekben előforduló cink koncentráció a horganyzott lemez felületéből történő kioldódásnak tulajdonítható, nagysága arányos a kontaktidővel. A tetővíz réz koncentrációjában a légköri kiülepedés játszik döntő szerepet, függ a megelőző száraz időszak hosszától, a terhelés pedig a lefolyt vízmennyiséggel arányos. A feltárt összefüggések – azok bizonytalanságait szem előtt tartva – a burkolt területekről lefolyó csapadékvizek szennyezőanyag emisszióinak becslésére alkalmas módszer kidolgozásához vezetnek.

## **Kulcsszavak**

diffúz szennyezés, városi lefolyás, közlekedés, tetővíz, nehézfém, mintavétel

## **1. Bevezetés**

Hazánkban az elmúlt 50 év alatt a városiakok aránya 40%-ról 65 %-ra emelkedett. A városi vízi közmű infrastruktúra a nagyobb településeken kiépült, a csapadékvíz elvezetés azonban még mindig nagyon sok helyen megoldatlan. Az urbanizáció velejárója a természetes környezet átforgalmazása, melynek

legszembevetőbb megnyilvánulása a burkolt területek növekedése, ami lokális jelleggel jelentősen módosítja a hő- és vízháztartási viszonyokat. A növekvő felszíni lefolyási hányad esetenként jelentős környezetterhelést jelent a befogadó talaj- illetve felszíni vizek (elsősorban a kisvízfolyások) számára. A belterületekről, közutakról lefolyó csapadékvizekben jellemző szennyezőanyagok (szerves- és tápanyagok, nehézfémek, TPH, PAH) forrásai között meghatározóak a gépjárművek emissziói és az épített környezetben használt építőanyagok (pl. tetőanyagok). Ugyanakkor, környezeti és közgazdasági okokból is egyre növekszik az igény a csapadékvíz hasznosítására. Ennek lehetővé tételéhez szükségszerű a környezeti-közegészségügyi kockázatok megismerése (bakteriológiai szennyezettség, közvetlen toxikus hatások, bioakkumuláció).

A kutatás elsődlegesen a csapadékvizek szennyeződés folyamatának megismerésére, és ennek alapján a csapadékvíz hasznosítási lehetőségek feltárására irányul, a szennyezőanyagok széles spektrumából elsősorban a nehézfémekre fókuszálva. A városi területekről származó nem pontszerű szennyezés mérésekre, a folyamatok modellezésére és a kezelési lehetőségekre irányuló kutatása több évtizedre nyúlik vissza. Ennek ellenére, Magyarországon a diffúz forrásokból származó nehézfém kibocsátások átfogó, részletes elemzésével sem országos, sem pedig helyi szinten a közelmúltig nem foglalkoztak [Budai és Clement, 2011a]. A nemzetközi eredmények hazai adaptációját azonban jelentősen korlátozza, hogy a probléma jellegéből adódóan mind a forrásokat, mind pedig a szennyezés terjedését meghatározó mechanizmusokat jelentős mértékben befolyásolják a helyi klimatikus viszonyok, a hidrológiai jellemzők, a gépjárműpark és a beépítettség. A szabályozáshoz szükséges a kibocsátások ismerete, a diffúz szennyezések viszont általában nem mérhetők a keletkezés helyén, a felszíni vizekben pedig összegzett hatásuk mutatható ki, melyből a forrásokra csak következtetni tudunk. A folyamatok megértése, a forrásterületek azonosítása és a szabályozási alternatívák várható hatásainak elemzése egyaránt szükségszerűvé teszi a hazai méréseket.

## 2. Vizsgálati módszerek

### 2.1 Útpályákról lefolyó vizek szennyeződésének vizsgálata

A szilárd burkolatú utakról lefolyó csapadékvizek vízminőségének jellemzésére, illetve az általa közvetített terhelések meghatározására irányuló vizsgálati módszereket alapvetően két, egymást kiegészítő csoportba sorolhatjuk attól függően, hogy a mintavétel csapadékos vagy száraz időszakban történik (1. ábra). A transzportfolyamatok összetettsége miatt az utakról lefolyó csapadékvizek szennyeződésének mértéke számos tényezőtől függ, melyek ismeretlen volta a minták reprezentativitását csökkenti. Teljesebb képet ezért csak több, egymástól elérő stratégiával végrehajtott mérésorozat kombinációja révén kaphatunk, amelyek más és más célra szolgáltatnak információt.



1. ábra: Útpályákról lefolyó vizek szennyeződésének vizsgálatára irányuló mintavételi módszerek és az általuk nyújtott információ (vastagon szedve a leggyakrabban alkalmazott, szaggatottan keretezve pedig a kutatás során alkalmazott újszerű módszerek)

A nemzetközi példákból [Crabtree és mtsai, 2006; Desta és mtsai, 2007] jól ismert gyakorlat alkalmazása, a vízvezető rendszerből történő lefolyásmintázás mellett új módszerrel, mozgó járműre szerelt mintavevővel vizsgáltuk a nedves útfelületek csapadékvizét. A hagyományos módszer alternatívájaként alkalmazott

új eljárás előnye [Budai és Clement, 2011b], hogy bármilyen helyszínről transzport veszteségek nélkül gyűjthetünk közúti csapadékvíz mintákat azáltal, hogy közvetlenül a kerekek által felcsapott vízből veszünk mintát. Továbbá, egy-egy csapadékesemény alatt egy járművel több helyszínen vizsgálata is megoldható. Vizsgálati helyeink autópályák és gyorsforgalmi utak (M0, M1/M7, M5), valamint fővárosi helyszínek voltak. Fix mintavevővel az M0 autópályán mintáztunk lefolyást, ahol egyidejű csapadék és forgalom adatok is rendelkezésre álltak [Buzás és mtsai, 2008].

A csapadékvíz mintázás mellett az útfelszínen száraz időszakban felgyűlt szennyeződés meghatározása céljából szintén végeztünk méréseket. Nagynyomású mosóval gyűjtöttünk pormintákat (2.a ábra) oly módon, hogy az eltávolított anyag mennyisége veszteség nélkül meghatározható legyen [Budai és Clement, 2011c]. A mintavétel hatásmechanizmusa közel áll a mozgó járművek kerekei által csapadékos időben kifejtett szennyeződés-mobilizáló jelenséghez, így – ellentétben a hagyományos, szakirodalomból ismert porszívós, illetve locsolós technikák alkalmazásával – ezzel a módszerrel tanulmányozható a potenciálisan lemosódó nehézfém szennyeződés mértéke és annak térbeli eloszlása is.

## 2.2 Tetővizek szennyeződésének mérése

Lakott területen belül a burkolt, vízzáró felületek jelentős hányadát teszik ki a tetőfelületek. Ezekről a felületekről többek között a tetőfelület anyagának, irányítottságának és korának, valamint a száraz időszak hosszának függvényében eltérő mennyiségű és összetételű szennyezőanyag kibocsátás figyelhető meg. Kutatásunk során különböző tetőfedő anyagokból (elsősorban fém- és bitumen alapú tetőanyagokból) származó szennyezőanyag kibocsátást vizsgáltunk természetes körülmények között, valamint laboratóriumban, szabályozott környezeti változók mellett (sugárzás, páratartalom, pH, csapadék intenzitás).

A kutatás során természetes körülmények között két eltérő anyagú (horganyzott lemez és elasztomerbitumenes zsindeley) modellt tetőfelületről lefolyó csapadékvíz vizsgálatát végeztük. A modell tetőket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem területén található U épület tetején helyeztük el egymás mellett, déli irányítással (2.b ábra). A lefolyó csapadékvizet sorozatmintázással gyűjtöttük a lefolyás során a szennyezőanyag koncentrációban történő változások megfigyelésére. Ezzel a módszerrel elkülöníthetővé vált a könnyen oldható, illetve kis adhéziós képességgel rendelkező korróziós anyagok úgynevezett első szennyezőanyag-hulláma („first flush”) a lefolyás későbbi szakaszától, amelyben ezen szennyezőanyagok koncentrációja jellemzően alacsonyabb, és közel állandó [Schriewer és mtsai, 2008].



2. ábra: (a) Lemosásos mintavétel a Budafoki úton; (b) csapadékvíz mintavevők az U épület tetején

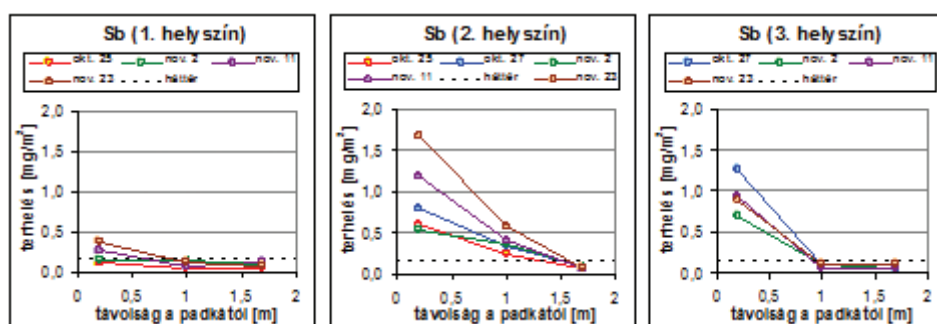
## 3. Eredmények

### 3.1 Közúti közlekedés hatása a lefolyással közvetített fémterhelésre

Száraz időszakos lemosás vizsgálataink kimutatták, hogy az útburkolatra lerakódó forgalmi eredetű nehézfémek felületi terhelésének térbeli eloszlása két jellemző csoportba sorolható, ami elsősorban a kibocsátó források különbözőségéből fakad. Szinte kizárólag fékbetét kopásból származik a réz, antimon, illetve ólom terhelés, amely arányos a fékezések gyakoriságával, száraz időszakban is mobilizálódik és jellemzően az útpadka mentén gyűlik össze. Az út keresztmetszetében kialakuló gradiens a légmozgások általi transzport erőssége és térbeli egyenletessége függvényében változik (3. ábra). Az elsődlegesen gumiköpeny gördülési kopásból származó cink és kadmium terhelés ezzel ellentétben kevésbé függ a fékezések gyakoriságától,

az útburkolat felületéhez kötődik, egyenletesebben oszlik el az út keresztmetszetében és száraz időszakban csak kismértékben mobilizálódik.

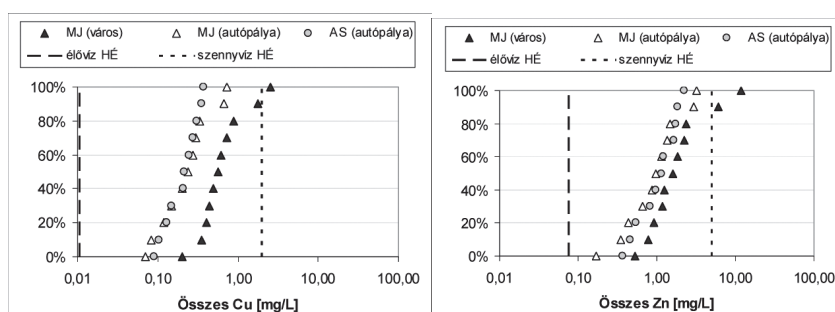
Méréseink alapján az útburkolatról lemosott iszap állagú hordalék fékbetét kopásból származó réz és antimon tartalmának a felszáradást követően csak  $27(\pm 9)\%$ -a, illetve  $28(\pm 16)\%$ -a marad meg az útpadka melletti porban. A hiányzó hányadot olyan, levegőből kimosott aeroszol részecskék teszik ki, melyek a burkolaton visszamaradó nedves por kiszáradását követően, természetes és járművek által előidézett légmozgások általi felkeveredés révén visszakerülnek a légkörbe. A megfigyelt jelenségeknek a környezet terhelésére vonatkozó fontos következménye, hogy (i) közvetlenül csapadékesemények után végzett, kis szemcseméret tartományban is hatékony úttisztítással jelentős nehézfém terheléstől mentesíthető a városok levegője; ii) a csapadékvizel lefolyó réz, antimon és fékbetét kopásból származó egyéb nehézfém terhelések döntő hányada finom szemcsemérete miatt nehezen ülepedő szuszpenziót képez, ami a vízzel együtt mozogva deszorpciós és oldódás nélkül is messzire eljuthat.



**3. ábra:** Jellemzően fékbetét kopásból származó nehézfémek felületi terhelésének tipikus keresztmetszeti eloszlásai a Budafoki út eltérő forgalomdinamikájú szakaszain (1. helyszín: egyenletes haladás; 2. és 3. helyszín: gyakori erős fékezések). A járművek által használt térrészt gépkocsi szemlélteti az ábrákon.

Az utacról lemosódó nehézfémek egyesített rendszerű csatornahálózattal rendelkező belterületekről szennyvíztisztító telepekre, elválasztott rendszerű csapadékelvezetés esetén pedig közvetlenül a környező élővizekbe (időszakos vagy állandó vízfolyásokba, állóvizekbe) és talajba kerülnek. A közúti csapadékvizek megengedhető szennyezettségét illetően jelenleg nincs érvényes jogi szabályozás. A mért koncentrációkat a pontforrás jellegű szennyvíz kibocsátásokra vonatkozó, felszíni vizek terhelhetőségét szabályozó 28/2004. KvVM rendelet határértékeihez, valamint az élővizek minőségére vonatkozó küszöbértékekhez (a 60/2000 EK Víz Keretirányelv felszíni vizek jó állapotára vonatkozó követelményeihez) viszonyíthatjuk (4. ábra). Az autópályák és városi utak felületéről lefolyó csapadékvíz fix helyű és mozgó járműves mintáinak elemzésével igazoltuk, hogy a városi gépjárműforgalom nehézfém kibocsátása magasabb (4. ábra). A kétféle forgalmi csoportban mért nehézfém koncentrációk arányát az eloszlások központi 60%-át lefedő tartományban kiszámítva megállapítható, hogy a városi és folyamatos forgalomból mért koncentrációk átlagos aránya stabil és fémtípusonként eltérő: cink, réz és ólom esetében rendre  $1,6\pm 0,2$ ;  $2,5\pm 0,4$  és  $2,7\pm 0,4$ . Említésre méltó a hasonlóság [Luhana és mtsai, 2004] Zn kopás tekintetében megállapított eredményével, mely szerint a városi és külterületi használat közben bekövetkező gumiabroncs kopás aránya 1,5-nek adódott. Az eltéréseket a forgalom dinamikájának és az egyes fémek forrásainak különbözősége okozza. Városi jellegű forgalomban intenzívebb a fékbetétek kopása, így a réz és ólom emisszió is, mint az autópálya forgalomban. A gumiabroncsok kopása viszont egyenletes haladás során is fellép, a városi és autópálya forgalom cink kibocsátásai közötti különbség ezért kisebb, mint a fékbetétéhez köthető fémek esetében. A közúti csapadékvizek réz és cink tartalmának aránya tehát a forgalom dinamikájának jó indikátora. Az utacról lefolyó csapadékvizek nehézfém-terhelésének kibocsátó forrásai a járművek mozgásához köthetők, erős kapcsolat feltételezhető a forgalom mértéke és a koncentrációk között. Ennek közvetlen vizsgálatát a surrantós mintavételi program mérési adatainak (csapadékjellemzők, forgalom és nehézfém koncentrációk) többváltozós lineáris regressziós elemzésével végeztük el. Összefüggéseket nyertünk a folyamatos forgalommal terhelt autópályák és a pulzáló forgalommal terhelt városi utak felületéről lefolyó csapadékvizek cink, réz és ólom esemény-átlagkoncentrációi, valamint a kibocsátásokat befolyásoló két legfontosabb tényező: a csapadékesemény alatti aktuális forgalom és a csapadékeseményt megelőző száraz időszak összegzett forgalma között. Az összefüggéseket érvényességi intervallumon belül használva

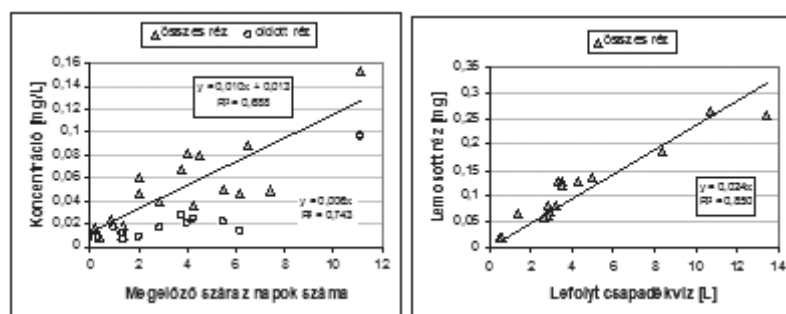
csapadék lefolyás és forgalmi adatok ismeretében a közúti csapadékvizek cink, réz és ólom terhelése egy-egy konkrét helyszínen megbecsülhető.



4. ábra: Autópálya surrantóból (AS), illetve mozgó járművel (MJ) városi és gyorsforgalmi utakról gyűjtött csapadékvíz minták Zn és Cu koncentrációinak eloszlása, valamint ezek összehasonlítása élővízre és szennyvízre vonatkozó határértékekkel.

### 3.2 Tetőfelületekről lefolyó vizek szennyezésének forrásai

A tetőfelületről lefolyt csapadékvíz vizsgálatával kimutattuk, hogy a tetővíz cink és réz koncentrációja eltérő forrásból származik, valamint függ a tetőfelület típusától is. A vizsgált két tetőfelület esetében kijelenthető, hogy a réz kizárólag a légköri száraz és nedves kiülepedésből származik. A csapadékesemény során a bitumentetőről származó első minták réz koncentrációi jó korrelációt mutattak a csapadékeseményt megelőző száraz napok számával (5.a ábra), míg ilyen összefüggést a horganyzott lemezzel származó tetővizek esetében nem találtunk. Ez a modell tetők eltérő felületi érdességével magyarázható, ugyanis a bitumenzsindelyes tetőn a szél eltávolító hatása kevésbé tud érvényesülni, így a száraz légköri kiülepedés révén a réz fel tud halmozódni. A szinte teljesen sima felületű horganyzott lemez esetében a tetővíz réz koncentrációjában a nedves légköri kiülepedés játszik döntő szerepet (5.b ábra), így a lefolyt csapadékvíz mennyisége és az összes réz tömege között figyelhető meg lineáris összefüggés.



5. ábra: (a) Bitumentetőről lefolyó csapadékvíz réz koncentrációi a csapadékeseményt megelőző száraz napok számának függvényében; (b) horganyzott lemez tetőről lefolyó csapadékvíz mennyisége és az összes réz tömege

A tetővíz minták cink koncentrációja a rézzel ellentétben nem a száraz és nedves légköri kiülepedés mértékétől, és nem a lefolyt csapadékvíz mennyiségétől függ, hanem a horganyzott lemezből való kioldódástól. Jelen kutatás során a horganyzott lemez tető esetében az összes cink koncentráció 0,72 és 7,74 mg/l között változott, az átlag koncentráció 2,6 mg/l, a szórás pedig 1,72 mg/l volt. A szakirodalmi adatokhoz képest [Quek és Förster, 1993; Gadd és Kennedy, 2001; Chang és mtsai, 2004; Gnecco és mtsai, 2005] jóval kisebb értékek a kisebb tetőfelülettel, ezáltal a rövidebb lefolyási úttal és kontaktidővel magyarázhatóak, ugyanis a cink tetők esetében a tetővízben mérhető cink koncentráció a kontaktidő függvénye [Horváth, 2011].

A nehézfém vizsgálatokat szüretlen és szűrt mintából is elvégeztük annak megfigyelésére, hogy az adott fém oldott vagy inkább szilárd részecskék felületéhez kötötten fordul elő inkább a tetővizekben. Cink esetében a horganyzott lemezzel származó mintákban az oldott/összes arány 87%-ra adódott (14%-os szórással),

a réznél pedig 46%-ra (34%-os szórással). Ezek az adatok is alátámasztják, hogy a tetővízben mért cink koncentráció a horganyzott lemez felületéből történő kioldódásnak tulajdonítható, a réz koncentrációja pedig inkább légköri kiülepedésből származik.

#### 4. Összefoglalás

Az EU csatlakozással együtt járó, szigorodó szabályozás mára azt eredményezte, hogy a mérésekkel ellenőrzött, ismert kibocsátások esetében vízminőségi kockázatot okozó szennyező hatással egyre kevésbé kell számolni. Ezzel egyidejűleg, a vizek terhelésében a diffúz jellegű, többnyire ismeretlen eredetű szennyező források szerepe felértékelődik. Kutatási eredményeink rámutattak a csapadékvíz városi környezetben jellemző szennyeződési folyamatára, az okozott környezet terhelés jelentőségére. A közúti közlekedés és a tetőfelületek esetében is igazolható, hogy a szennyező források ismerete nemcsak a terhelés nagysága, hanem a szennyezők terjedésének befolyásolása miatt is fontos. A feltárt összefüggések – azok bizonytalanságait szem előtt tartva – a burkolt területekről lefolyó csapadékvizek szennyezőanyag-emisszióinak becslésére alkalmas módszer kidolgozásához vezetnek.

#### Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

#### Irodalom

- Budai, P, Clement, A. Refinement of national-scale heavy metal load estimations in road runoff based on field measurements, *Transportation Research Part D*, 16(3), 2011a, 244–250.
- Budai P, Clement A. A novel approach for road runoff sampling, *Periodica Polytechnica Ser. Civil Eng.* Közlésre elfogadva, 2011b.
- Budai, P, Clement, A. Burkolt útfelületek nehézfém szennyezettsége, *MaSzeSz Hírcsatorna*, 2011c. március-április, 15-21.
- Buzás, K, Budai, P, Clement, A. Contamination and treatment of highway runoff, *Pollack Periodica*, 3(3), 2008, 79–89.
- Chang, M, McBroom, M. W, Scott, B. R. Roofing as a source of nonpoint water pollution, *Journal of Environmental Management*, 73(4), 2004, 307–315.
- Crabtree, B, Moy, F, Whitehead, M, Roe, A. Monitoring Pollutants in highway runoff, *Water and Environment Journal*, 20(4), 2006, 287-294.
- Desta, M.B, Bruen, M, Higgins, N, Johnston, P. Highway runoff quality in Ireland, *Journal of Environmental Monitoring*, 9(4), 2007, 366-371.
- Gadd, J, Kennedy, P. House roof runoff: Is it as clean as we think? *Proc of 2<sup>nd</sup> South Pacific Stormwater Conference*, Auckland, New Zealand, 2001.
- Gnecco, I, Berretta, C, Lanza, L.G, La Barbera, P. Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy, *Atmospheric Research*, 77(1–4), 2005, 60–73.
- Horváth, A. Roof runoff quality and reduction possibility of the pollutants, *Pollack Periodica*, 6(1), 2011, 107–116.
- Luhana, L, Sokhi, R, Warner, L, Mao, H, Boulter, P, McCrae, I, Wright, J, Osborn, D. Measurement of non-exhaust particulate matter. Characterisation of Exhaust Particulate Emissions from Road Vehicles (PARTICULATES). *Deliverable 8 of the European Commission DG TrEn 5th Framework PARTICULATES project*, 2004.
- Quek, U, Förster, J. Trace metals in roof runoff, *Water, Air, and Soil Pollution*, 68(3–4), 1993, 373-389.
- Schriewer, A, Horn, H, Helmreich B. Time focused measurements of roof runoff quality, *Corrosion Science*, 50(2), 2008, 384–391.

# PELYHES SZERKEZETŰ LEBEGŐANYAGOK LEVÁLASZTÁSA MÁGNESES ERŐTÉRREL MOZGATOTT NANO- RÉSZECSKÉKKEL

Karches Tamás  
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék  
karches@vkkt.bme.hu

Buzás Kálmán  
Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék  
buzas@vkkt.bme.hu

## Kivonat

Pelyhes szerkezetű lebegőanyagok leválasztási biztonságának és hatékonyságának növeléséhez mágneses szeparációt alkalmaztunk. Ennek érdekében nano méretű vas részecskéket adagoltunk utóülepítőből kikerülő eleveniszaphoz, az ún. fölősiszaphoz. Az iszapperyhekhez tapadó vas részecskék a létrehozott mágneses erőterben magnetizált állapotba kerülnek és az erőter által meghatározott pályán mozognak. Segítségükkel az egyébként nehezen ülepedő pelyhek mozgása is befolyásolhatóvá válik.

Laborkísérletekkel kimutattuk, hogy az ülepedési sebesség és az üledékben elérhető szárazanyag tartalom többszöröse a hagyományos, csupán gravitációs erőteret alkalmazó megoldásokkal elérhetőnek. Numerikus modellrendszert fejlesztettünk, annak érdekében, hogy a mágneses térben való ülepedés és sűrítés a laborkísérletek alapján rekonstruálható legyen és az ilyen elven működő berendezések tervezési folyamata egyszerűsödjön.

## Kulcsszavak

iszappelyhely, nanovas, ülepités, magnetohidrodinamika, mágneses szeparáció, keverék modell

## 1. Bevezetés

A szennyvíztelepi technológiák jelentős költségtetele a keletkező iszap víztartalmának csökkentése, a sűrítés és a víztelenítés. A fölősiszap további felhasználhatósága érdekében a nagy térfogatok csökkentéséhez a szokásos technológia a gravitációs sűrítők mellett gépi víztelenítő berendezéseket, (centrifugák, szalag és kamrás szűrőprések) alkalmaz. Ezeknek a berendezéseknek jelentős az energia- és vegyszer felhasználása. Ezek csökkentésére a pelyhek mágneses leválasztása energia-hatékony módszernek tűnik. Az eljárással a leválasztási folyamat nemcsak gyorsítható, és kisebb műtárgy térfogatok beépítése válik lehetségessé, de nagyobb szárazanyag tartalom is elérhető. A szárazanyagtartalom növelése a kezelendő iszap térfogatának jelentős csökkenését eredményezi, aminek következtében az iszapkezelés és –szállítás költségei is nagymértékben csökkennek.

A mágneses szeparáció lényege abban rejlik, hogy a nanoméretű részecskéket a leválasztandó pehelyhez kapcsoljuk és ezzel a körülötte kialakított mágneses térben mozgásra kényszerítjük. A pelyhek sűrűsége közel azonos a vízével ezért a gravitációs kiülepedés lassú és korlátozott. Egyes, rosszul működő biológiai tisztítási folyamatok esetében a keletkező iszapperyhek az ülepedés helyett a felúszásra is hajlamosak. A mágneses térerő felhasználhatósága a leválasztásban ezért a végső szennyvíztisztítási fázis megfelelő működésének biztonságát is javítja.

A mozgási pálya a kialakított mágneses tér függvénye, tehát a részecskék célzottan irányíthatóak a szilárd és folyékony fázis szétválasztásának javára. Az alapelgondolás nem új keletű, de pelyhes részecskék leválasztása sem praktikus, sem kutatási modellezési szempontból nem feltárt terület. Vízisztításban

arzénmentesítésre használták a nano méretű szemcséket a jó adszorpciós képességük miatt [Mayo és mtsai, 2007]. Szennyvíztisztításban a '90-es évek elején magnetit használatával jó tápanyag eltávolítást értek el a mágneses szeparáció elvének használatával, de a folyamat teljes körű matematikai modellje nem született meg. [Sakai és mtsai, 1994]

Célkitűzésünk között szerepel, hogy laborkísérletek által bizonyítsuk: az iszap pelyhek mozgási pályái a nano méretű vasrészecskék adagolásával és állandó mágnesek használatával célszerűen befolyásolhatók. Ehhez meg kell határozni a vas optimális, gyakorlati szempontból még elegendően hatékony legkisebb mennyiséget jelentő adagolását és a leválasztás hatékonyságának (gyorsaság, szárazanyag tartalom) mérését. A numerikus modellezés szerepe a szükséges laboratóriumi fizikai modellezési kísérletek számának és ezzel a félüzemi kísérleti fázis elérési költségének csökkentése.

A felépítendő numerikus modellhez a laboratóriumi kísérletek szolgáltatják a bemeneti adatot az iszapfázis korrekt leírása érdekében. A modell felépítésének kezdeti kulcsproblémája a magnetosztatikai és hidrodinamikai modell között kapcsolat megtalálása és matematikai leírása.

## 2. Laboratóriumi kísérletek

A laborkísérletekhez szennyvíztisztítótelepi recirkuláltatott eleveniszapot használtunk. Referenciaként a homogenizált mintának meghatároztuk az ülepedési görbét, a recirkuláltatott és az ülepített iszap szárazanyag tartalmát majd ezt hasonlítottuk össze a későbbi mérések eredményeivel.

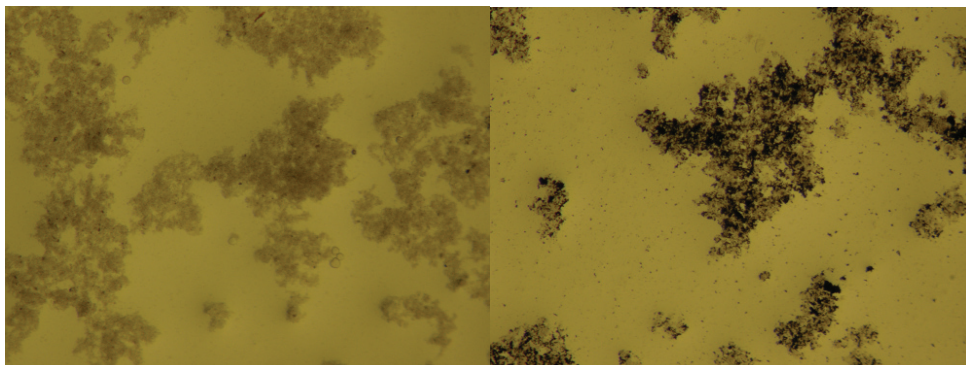
A mérési sorozatok változatai a következők voltak:

- i) eredeti minta mágneses tér és nanovas adagolás nélkül,
- ii) eredeti minta mágneses térbe helyezve, a nanovas 0,01, 0,05, 0,1, V/V%, koncentrációjú adagolásával,
- iii) nano vas hozzáadásával (0,01%) mágneses tér jelenléte nélkül.

A második mérés arra szolgált, hogy kimutassuk az iszap pelyhekhez kötődő, mágneses tulajdonságokkal rendelkező részecskék koncentrációtól függő leválasztási hatékonyságát. Az utolsó mérés pedig a nano vas esetleges koaguláló hatásának kimutatását és e hatásnak a mágneses térben mérhető eredményekről való leválaszthatóságát szolgálta.

Az alkalmazott nanovasat a cseh NANOIRON vállalat által forgalmazott NANOFER 25S. [Müller és Novák, 2010], vizes diszperzióban kapható terméke tartalmazta. A diszperzió 20 %-os szilárdanyag tartalmú, amely szilárd anyag 85 %-a a töltéssel nem rendelkező nanovas. A szilárd fázis további komponensei a magnetit, vas-oxid és szén. Tartalmaz továbbá szervesanyagú stabilizátort a nano Fe(0) részecskék gyors oxidációjának megakadályozására. A nanométer mérettartomány nagy érintkezési felületet és ezáltal nagy reaktivitást szolgáltat. Ez utóbbi tulajdonságot azonban a kísérletekben nem vizsgáltuk, csak a vasrészecskék mágneseshető tulajdonságát hasznosítottuk.

A diszpergált nanovas az iszapmintához adagolva olyan erővel tapad a pelyhekhez, hogy onnan –legalábbis a kísérletekben alkalmazott mágneses erőterben-, nem válik le. A kapcsolódást mikroszkópos felvételen az 1. ábra mutatja. Az ábrán a később már fölöslegesnek bizonyult mértékű koncentráció arányban adagolt vasrészecskék láthatók.



**1. ábra:** Iszaprészecskék nanovas nélkül (balra) és 0,4 %-os koncentrációban adagolt nanovassal (jobbra)

Az 1. ábrából az is kitűnik, hogy kellő intenzitású bekeverés esetén az adagolt vasrészecskék önállóan nem maradnak, azok mindegyike valamelyik pelyhez tapad.

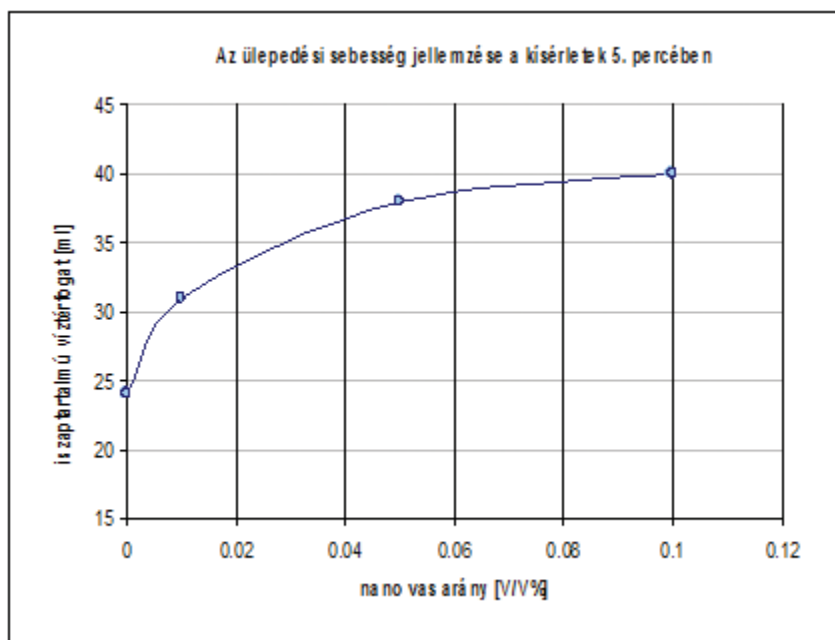


Neodímium anyagú, állandó mágneseket alkalmaztunk, amelyek kis méretben is nagyobb térerővel rendelkeznek a más anyagú állandó mágneshez képest. Megemlítendő, hogy a hatástávolság még így is korlátozott volt, amennyiben az nem haladta meg a 10 centimétert egy 6 cm átmérőjű és 1,5 cm magas korong alakú mágnesnél. Méréseinkhez kezdetben különböző, korong és gyűrű alakú mágneseket használtunk. Később az utóbbit elvetettük, az általuk szolgáltatott gyengébb térerő miatt. A mágneseket minden esetben a mérőhenger alatt helyeztük el.

A három méréssorozat tanúsága szerint az iszapindex 82-102 ml/g, a kezdeti szárazanyag koncentráció pedig 4,0-6,6 g/l közötti intervallumban mozgott az egyes mintáknál. Csupán a gravitációs erőter következtében a kezdeti szárazanyagtartalom az ülepedés és sűrűsödés során 1,6-2,2-szeresére növekedett. Várározásunknak megfelelően, nanovasadagolás nélkül ez az arány nem változott a gravitációs-mágneses erőterben sem, ami arra utal, hogy az iszapban nincs olyan kimutatható hatású magnetizálható anyag, ami a vasadagolás eredményeinek hibás értékelését okozhatná. Nem tapasztalunk különbséget az ülepedésben az eredeti mintához képest akkor sem, ha vasrészeket adagoltunk, de a mintát nem helyeztük mágneses térbe. Az a feltételezés tehát hogy az Fe(0) koaguláló hatása következtében a pelyhek összeállhatnak és az ülepedési átmérő növekedésével a folyamat sebessége gyorsul, nem igazolódott be. A különböző koncentrációkban adagolt vasnál mért eredmények a mérési hibahatáron belül változtak, így a koagulációs hatást is kizárhattuk.

A pelyhek átlagos ülepedési sebességét a vízterben kialakuló iszapfelhő felszínének süllyedési sebességével jellemezhetjük, ami kifejezhető az iszaptartalmú víz térfogatának a változásával is. A 2. ábra mutatja, hogy az iszaphoz adagolt nanovas koncentrációjának függvényében, a kísérletek 5. percében mekkora volt az iszaptartalmú víz térfogata. Az ellenőrzési időpont megválasztását a vízternek a bekeverést követő nyugalomba kerülése jelölte ki. Látható, hogy a vaskoncentráció növekedésével az ülepedési sebesség egy bizonyos koncentrációig egyre csökkenő mértékben növekszik. Ennek elérését követően azonban a további adagolásnak már nincs kimutatható hatása.

Megállapítható, hogy a NANOFER 25S diszperzió használata esetén az optimális adagolás a 0.05 – 0.1 0,1 V/V% tartományban helyezkedik el, és a gyakorlati alkalmazásnál a 0,1 V/V%-ot meghaladó koncentráció nem gazdaságos.



**2. ábra:** Az iszap pelyhek átlagos ülepedési sebessége az adagolt nano vas koncentrációjának függvényében

Minden mérés esetében meghatároztuk az ülepedés sebességét leíró görbét. Gravitációs erőterbeli ülepedésnél ez a görbe három jellemző szakaszra bontható: lineáris, átmeneti és tömörödési szakaszra. A lineáris szakaszban a pelyhek nem akadályozzák egymás mozgását. A pelyhek ülepedése jól közelíthető a Stokes-féle ülepedési törvénnyel, amely az ülepedési sebesség és az átlagos szemcseátmérő közötti kapcsolatot adja meg. A valóságban természetesen az iszap pelyhek átmérője változó. Modellézésnél azt az

elméleti átmérőt alkalmazzuk, amellyel a szabad ülepedés jól közelíthető. Mágneses térben az ülepedésben nem lesz lineáris szakasz, hiszen a mágneses térerő inhomogenitása ezt nem teszi lehetővé.

### 3. Numerikus modell

A numerikus modellezés célja, hogy az egyes modell paraméterek (mágneses tér nagysága, alakja, adagolt vas mennyisége, iszap típusa) megválasztásának célszerű tartományai lehatárolhatók legyenek és az ülepedési folyamatra gyakorolt hatásukat előzetesen értékelhessük. A tömörödési folyamatok matematikai leírása jelenleg nem ismert, a numerikus modellt az ülepedési folyamat számítására állítottuk össze.

A modellezés egyik kezdeti feladata a mágnesek által keltett külső mágneses tér leírása, amit a Maxwell egyenletek megoldásával lehetséges. Ezen almodell eredménye képezi a magnetohidrodinamikai almodell (MHD) bemenetét. A hidrodinamikai számításokhoz szükség van az áramlási alapegyenletek megoldására, melyeket két fázisra, víz és iszap fázisra írunk fel. Az alkalmazott keverék modell egy átlagos keverék sebességet, viszkozitást, sűrűséget számol, majd a két fázis kölcsönhatásaként figyelembe vesz egy ún. csúszó sebességet.

Ez a közelítés mindaddig alkalmazható, amíg a másodlagos fázis, esetünkben az iszappelyhek és a hozzájuk tapadt nanovas részecskék térfogataránya kicsi. Ez a feltétel az ülepedési folyamat lineáris szakaszában, a bemutatott vasadagolási arány mellett minden esetben teljesül. Ezen kívül szükség van a térfogatarányra, mint skalármennyiségre felírt transzport egyenletre is. A külső mágneses tér mellett az indukált mágneses teret is figyelembe kell venni, melyet a részecskék keltenek. Az eredő mágneses tér a külső és indukált tér összegeként határozható meg. [Fluent, 2006]

A mágneses tér nagyságából számolható a részecskékre ható mágneses erő, melyet az impulzusegyenletbe írhatunk be, és ezzel kapcsolhatjuk össze a magnetosztatikát a hidrodinamikával. A kapcsolat egyirányú, ezért a külső mágneses teret elég egyszer, szeparáltan modellezni. A modell elemeit és közöttük a kapcsolatot a 3. ábra mutatja.

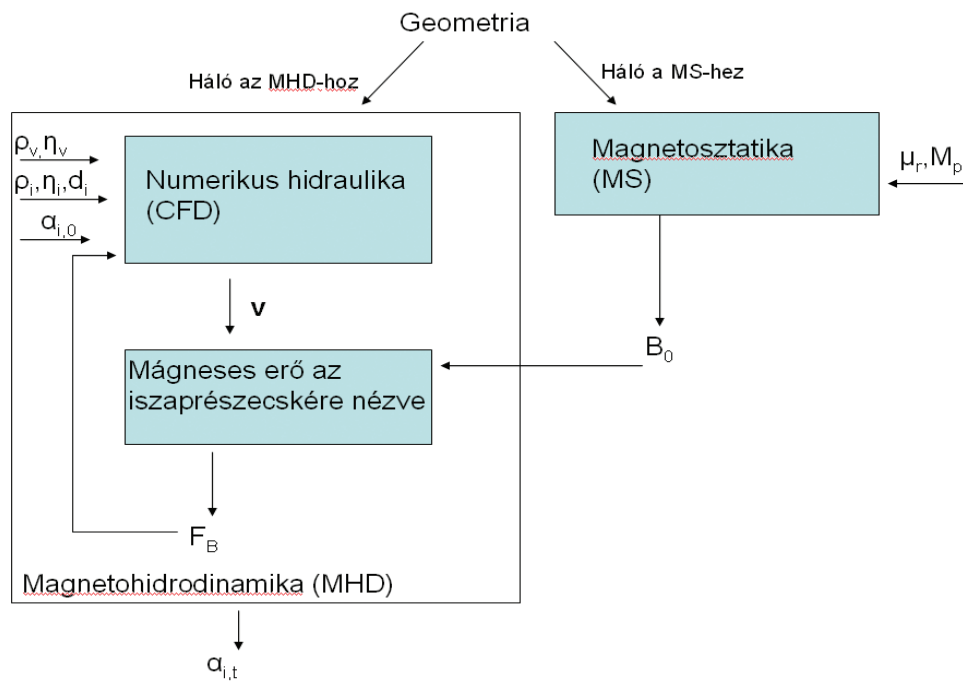
A 3. ábrán alkalmazott jelölések értelmezése:

- $\rho$  : sűrűség [ $\text{kg/m}^3$ ],
  - $\eta$  : dinamikai viszkozitás [Pas],
  - $\mu_r$  relatív permeabilitás [-],
  - $M_p$  : mágnesezettség [A/m],
  - $v$ : sebességtér,
  - $F_B$  : mágneses erő térfogatra vetítve [ $\text{N/m}^3$ ],
  - $d$ : részecske átmérője [m],
  - $\alpha$ : két fázis aránya [-],
  - $B_0$ : mágnesek által keltett tér [T],
- Az  $i$  index az iszapra, a  $v$  index a vízre vonatkozik

A leíró egyenletek megoldásához a véges térfogatok módszerét használtuk; a modellezendő teret kisebb térfogatokra osztottuk (diszkretizálás) és között a kapcsolatot különböző interpolációs sémákkal teremtettük meg. A felbontás függetlenségét úgy vizsgáltuk, hogy először az MHD modell számára közel 3000 elemet (tetraédert), majd utána több mint 20 000 elemet használtunk és ezekre lefuttatva a számításokat ugyanazt az eredményt kaptuk. A modellben alkalmazott fizikai paramétereket az 1. táblázat foglalja össze.

	Elsődleges fázis	Másodlagos fázis
<i>fluidum</i>	víz	iszap
<i>sűrűség [<math>\text{kg/m}^3</math>]</i>	1000	1500
<i>viszkozitás [Pas]</i>	0,001	0,026
<i>szemcseátmérő[mm]</i>	-	0,23

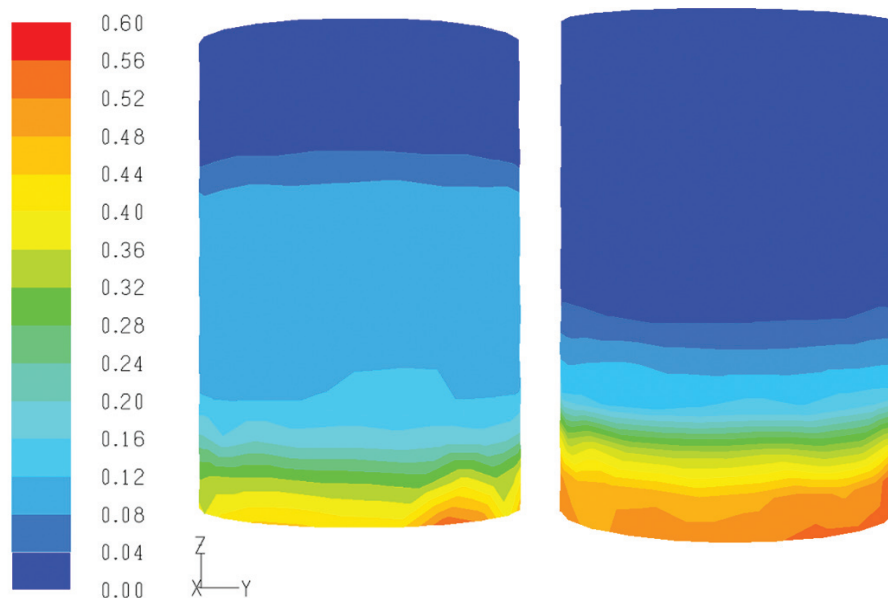
1. táblázat: A modellben alkalmazott fizikai paraméterek



3. ábra: A kapcsolt magnetosztatikai és hidrodinamikai rendszermodell

A számítási tartományt a MHD modell számára a laborban használt ülepítő henger méretei határozták meg, melynek sugara 3 cm és 15 cm magasságig van töltve folyadékkal. A henger oldalára és aljára fali peremet, míg a vízszíntre szabad felszíni peremet írtunk elő. Először az ülepedést gravitációs térben, majd mágneses térben vizsgáltuk.

Az eredményeket a 4. ábra szemlélteti. Itt az iszap fázisaránya jelenik meg. Minél nagyobb a fázisarány, annál nagyobb az iszapkoncentráció. A 4. ábrán jól látszik, hogy az ülepedés nem teljesen egyenletes az egyébként hengersizmetrikus térben, ami a falhatásnak tudható be. Mágneses teret alkalmazva az ötödik perc után fázisszétválasztás hatékonyabbá vált, hiszen a két fázis határa lejjebb és egyúttal a mágneshez közelebb kerül. A nagyobb mágneses erőter pedig növeli az iszappelyhek süllyedésének sebességét.



4. ábra: Az iszapfázis térfogataránya az ülepedés ötödik percében csak gravitációs (balra) és gravitációs-mágneses erőter jelenlétében (jobbra)

## 4. Összefoglalás

Eleveniszaphoz nano vasat adagolva és állandó mágneses erőteret alkalmazva az iszapüledési és tömörödési tulajdonságai jelentősen javíthatóak voltak. Kimutattuk: a nanovas mennyiségével a leválaszthatóság mértéke nem lineárisan változik, az elérhető hatékonyságnak maximuma van. A adagolás optimuma, egyben a hatékonyság növekedésének határa a nanovas diszperzió 0,1 V/V %-os értékénél jelentkezett. Más vaskoncentrációjú diszperzióknál az optimális adagolás meghatározását meg kell ismételni. További kísérletek szükségesek az optimális vas koncentráció és a mágneses erőter nagysága, illetve alakja közötti kapcsolat meghatározásához. Numerikus modellezéssel a hidrodinamikai számításokat mágneses tér jelenlétében is sikerült elvégezni, amivel a laboratóriumi kísérleti eredmények rekonstruálhatóak voltak. A modell kísérlettervezéshez alkalmazható. Az kutatás eredményei megtalálhatók részletesen a [Karches és Buzas, 2011] tanulmányban.

## Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

*Fluent 6.3 Users Guide* Ansys Inc, USA

Karches, T, Buzás, K. Methodology to determine residence time distribution and small scale phenomena in settling tanks, *WIT Transactions on Engineering Sciences* 70, 2011, 117-126.

Mayo, J.T, Yavuz, C, Yean S, Cong, L, Shipley, H, Yu, W, Falkner J, Kan, A, Tomson, M, Colvin, V. L. The effect of nanocrystalline magnetite size on arsenic removal, *Science and Technology of Advanced Materials*, 8, 2007, 71-75.

Müller N.C, Nowak B. *Nano zero valent iron – the solution for water and soil remediation*, EMPA, 2010.

Sakai, Y, Terakado, T, Takahashi, F. A Sewage Treatment Process Using Highly Condensed Activated Sludge with an Apparatus for Magnetic Separation, *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 78(1), 1994, 120-121.

# FOLYAMI HŐCSÓVÁK VIZSGÁLATA

Szabó K. Gábor  
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék  
szabo@vit.bme.hu

Krámer Tamás  
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék  
kramer@vit.bme.hu

Józsa János  
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék  
jozsa@vit.bme.hu

## Kivonat

A szigorodó környezetvédelmi és vízminőségi határértékek miatt a természetes vizekbe történő ipari vízbevezetés előzetes tervezése és a meglévők értékelése egyre komolyabb kihívást jelent a hidraulikai modellezés szempontjából. Rámutatunk, hogy a hagyományos felszíni helyett felszín alatti vízbevezetési technológiát alkalmazva a hígítás nagyságrenddel növelhető. Megfelelő tervezéssel sok esetben elérhető, hogy már a hőcsóva közeltéri szakaszán a környezeti határértékek alá kerülünk. Bemutatunk egy egydimenziós numerikus szabadsugárintergrál-modellt, amellyel gyors és megbízható kvantitatív becslést adhatunk a keveredés mértékére még a tervezés során. Rámutatunk, arra hogy az oldalcsatornás ipari hűtővíz-bevezetés és a természetes folyótorkolatoknál kialakuló keveredési jelenségek hidraulikailag azonos jellegű megközelítést igényelnek. A felszíni bevezetés esetén a hőcsóva közeltéri szakaszának részletes modellezése általában háromdimenziós numerikus modellezést tesz szükségessé. A hőcsóva távoldali jelenségeinek modellezésére kismintás laboratóriumi kísérletekkel és kétdimenziós numerikus modellezéssel lehetséges, röviden kitérünk ezeknek legújabb technológiai fejlődésére is.

## Kulcsszavak

folyami hőterhelés, hulladék hő, környezetvédelmi hatásvizsgálat, hőcsóva, szabadsugár, élőhelyvédelem

## 1. Bevezetés

A hazai folyóvizeink mentén mintegy kéttucatnyi kisebb-nagyobb olyan erőmű települt, amely hulladék-hőjét a felszíni vízfolyásba vezeti el. Környezetvédelmi szempontokból nem engedhető meg, hogy a hőcsóvát befogadó természetes vizek az élővilágra káros mértékben felmelegedjenek. Az Európai Unió szabályozása a hőterhelési határértékek szigorú betartását követeli meg. Ezért új erőművek létesítésénél, de a meglévők üzemvitelének módosítása esetén is, a környezetvédelmi hatásvizsgálatnak erre a kérdésre is ki kell terjednie. Az előírások mind az abszolút vízhőmérsékletnek, mind a bevezetés miatti hőmérséklet-emelkedésnek korlátot szabnak — részben a folyószakasz élőhelyeinek megóvása, részben a fokozott algásodás megakadályozása érdekében. A környezeti határértékek a csóvához köthető felmelegedés mértékét és —ebből következően— kedvezőtlen körülmények között akár magát az ipari hőtermelést is korlátozzák.

A szabadfelszíni hőcsóvák környezeti terhelésének vizsgálata komplex probléma. Egyrészt a lezajló jelenségek erősen függenek az örökösen változó víz- és meteorológiai állapotoktól (hőmérséklet, szél, besugárzás, csapadék) és az adott helyszín speciális mederviszonyaitól. Másrészt a termikus elkeveredés önmaga is többlépcsős: számos idő- és távolságskálán lezajló folyamatok sorozata ez, amelyeknek tudományos szintű megismerése még nem teljes. Összességében ez azt eredményezi, hogy a hőcsóvák környezeti terhelésének elemzésére kiforrott metodológia nem áll rendelkezésre, minden ilyen feladat egyedi, tudományos szintű modellezést igényel.

## 2. A folyami hőcsóvák természetéről

A hőcsóva fizikai jellegének leglényegesebb eleme, hogy a beeresztett hűtővíz — magasabb hőmérséklete miatt — kisebb sűrűségű a befogadó víztömegnél, ezért rá a sűrűségkülönbséggel arányos felhajtóerő hat, és a szabad felszín felé törekszik. (Különleges jelenségek lépnek fel, ha a befogadó víz hőmérséklete  $4\text{ °C}$  alatt van.) A folyami hőcsóvák természetét számos folyamat szabja meg, amelyek kiterjedt idő- és távolság-skálán zajlanak. A meghatározó folyamatok megragadásához és leírásához ezért részmodellek sorozatát használjuk.

Egy hőcsóva tipikus esetben nem stacionárius szerkezetű, inherensen turbulens jellege miatt kiterjedése és fizikai állapota térben és időben változó. A kibocsátó üzem üzemállapot-változásai és a vízjárás változásai (legyenek ezek akár természetes eredetűek vagy szabályozottak) minden esetben tranziens állapotváltozásokat okoznak. Ezt az instacionárius jellegét tovább erősítik a meteorológiai hatások (szél, hullámzás). Tavi hőcsóva esetén az instacionaritás még számottevőbb, hiszen itt az áramlásokat is a szél generálja [Homoródi és mtsai, 2007; Pattantyús-Ábrahám és mtsai, 2008]. Többé-kevésbé stacionárius feltételek mellett, különösen a folyami hőcsóváknál, azonban lehetséges időátlagolt áramlási képpel dolgozni, a modellezés sok esetben csak erre szorítkozik.

A hőcsóvákat térbeli elhelyezkedésük szerint szokásosan két fő szakaszra bontjuk, *közeltéri* és *távoltéri* szakaszra. A közeltéri szakasz a beeresztési ponttól addig tart, amíg a csóva összefüggő réteget nem képez a szabad felszínen. A távoltéri szakaszán a hőcsóva felszíni réteget alkot, amely részben a vízszintes szétterjedés és az ehhez kapcsolódó ellapulás, részben pedig a függőleges irányban a folyó víztömegével való átkeveredés útján enyészik végeredményben el. Az alábbiakban e két szakasz modellezésének néhány aspektusára hívjuk fel a figyelmet.

## 3. Felszín alatti hőcsóvák modellezése

A hűtővízbevezetés közeltéri jellegét leginkább a *bevezetés módja* szabja meg. Hagyományosan a *felszíni*, többnyire oldalcsatornás, bevezetést szokták alkalmazni. A környezetvédelmi előírások függvényében e bevezetési módnak a nagy hátránya, hogy nagyságrendileg tízszeres, esetenként — a terepi adottságoktól függően — annál lényegesen rosszabb hígítás érhető csak el vele. [Jones és mtsai, 2007] A hatáselemzés szempontjából lényeges, hogy ennél a bevezetési módnál az áramkép rendkívül érzékenyen függ a bevezetés a geometriai (mederviszonnyok) és áramlási (vízjárás) részleteitől, ezért a jelenségek modellezése rendkívül idő- és költségigényes, és a kapott eredmények komoly bizonytalansággal terheltek. [Jones és mtsai, 2007]

A felszíni bevezetés alternatívájaként a *felszín alatti* — tipikusan a folyó fősodrában a mederfenék közelében elhelyezett fűvókából vagy fűvókasorból történő — bevezetés jön szóba. Ezzel a technológiával százszoros, vagy annál nagyobb nagyságrendű hígulás léphet fel már igen rövid távolságon belül is. [Jones és mtsai, 2007] A modellezés szempontjából előnyös, hogy egyszerű és megbízható (konzervatív) kvantitatív becslést adhatunk a keveredés mértékére. Könnyen előfordulhat, hogy már ezen a szakaszon a környezeti határértékek alá kerülünk, és így a távoltéri szakasz időigényes hatásvizsgálatára már nincs is szükség. A felszín alatti vízbevezetés áramlási viszonyait az 1. és 2. ábrával illusztráljuk.

Az 1. ábrán azt az egyszerűsített esetet tekintjük, amelyben *függőlegesen fölfelé* történik a melegebb és hígabb víz bevezetése egy hidegebb és sűrűbb *állóvízbe*. Ezt az egyszerűsített konfigurációt kísérletileg alaposan tanulmányozták és megbízható empirikus korrelációkra alapuló modellezési módszertana alakult ki. [Fischer és mtsai, 1979] Az ekkor kialakuló *függőleges hőcsóva* a fűvóka kilépő síkja és a szétterülési szint között az alábbi jellegzetes részekre osztható:

A kilépés közvetlen környezetében, a  $z = 0$  kilépő síktól  $z \approx 7L_0$  magasságig tart a *kifejlődő áramlás zónája* (zone of flow establishment, ZFE).

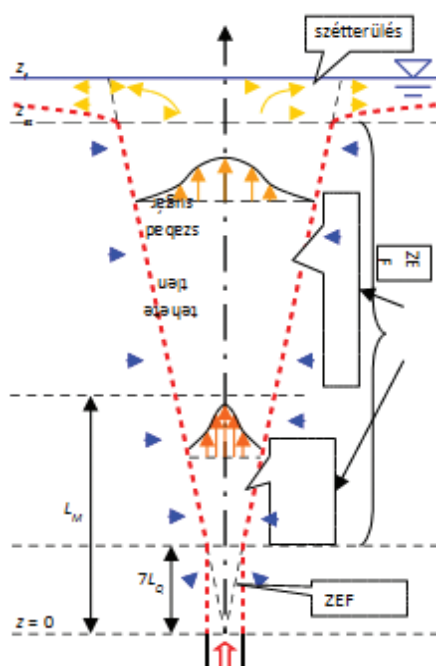
E fölött helyezkedik el a *kifejlett áramlás zónája* (zone of established flow, ZEF). Itt az áramlás jelentősen turbulens, az időátlagolt sebesség és az időátlagolt hőmérséklet profiljai egyaránt Gauss-görbék. A hőcsóva jellegzetes szélességi méretét a  $b(z) \approx 0.1z$  képlettel definiálják, ez az a függőleges tengelytől mért távolság, ahol az átlagsebesség a középvonalon felvett értékéről  $e^{-1}$ -szeresére csökken. Konvenció szerint a hőcsóva *palástját* annál az  $r \approx 0.14z$  radiális távolságnál veszik, ahol az átlagsebesség a középvonalon felvett érték  $e^{-2}$ -szeresére csökken. Így a hőcsóva a ZEF-ben kúp alakú, amelynek félnyílásszöge megközelítőleg  $9^\circ$ . A hidegebb és sűrűbb befogadó folyadék a palástfelületen át áramlik be, majd a hőcsóva belsejében az

erős turbulencia hatására összekeveredik a már ott tartózkodó folyadékkal, ezt a mechanizmust *turbulens befogásnak* nevezik. Mivel a fáklya egyre több folyadékot fog be a környezetéből, ezért a térfogatárama a megtett távolsággal növekszik; eközben az eredetileg bevezetett közeg lényegesen felhígul, és így a keverék és a környezete közti hőmérséklet- és sűrűségkülönbség fokozatosan lecsökken. A turbulens konvekció túl más hőtranszport-mechanizmus nem lévén, a hőmérséklet- és sűrűségkülönbség *az átlagos hígulással arányosan csökken*.

A ZFE-ben és ZEF alsó szakaszában, amely a  $z \approx 7L_Q$  és a  $z \approx L_M$  szintek között helyezkedik el, a fűvókán bevezetett víztömeg felhajtóereje elhanyagolható hatást kelt, csak annak impulzusa határozza meg az áramlást, amely így nem különbözik a szokásos szabadsugár-áramlástól. A  $z \approx L_M$  szint magasságában a befogás miatti impulzusáram-veszteséget a melegebb közeg felhajtóereje ellensúlyozni tudja, e fölött viszont a felhajtóerő válik a mozgás domináns hajtóerejévé. Ezért a ZEF-et a  $z \approx L_M$  szintnél két szakaszra vágthatjuk: az alsó, *tehetlenségi és* a felső, *felúszó jellegű szabadsugár-áramlásra*. A kettő között fontos különbség, hogy a befogási ráta az utóbbiban nagyobb, azaz a *felúszó jellegű szabadsugár hatékonyabban kever*, a tervezésnél tehát célszerű ennek a maximalizálására törekedni. Ez nem okoz nehézséget, mert  $L_M$  értékét a fűvókán bebocsátott hűtővíz hozamjellemezői dimenziótlan bemenő paraméterek formájában egyértelműen meghatározzák.

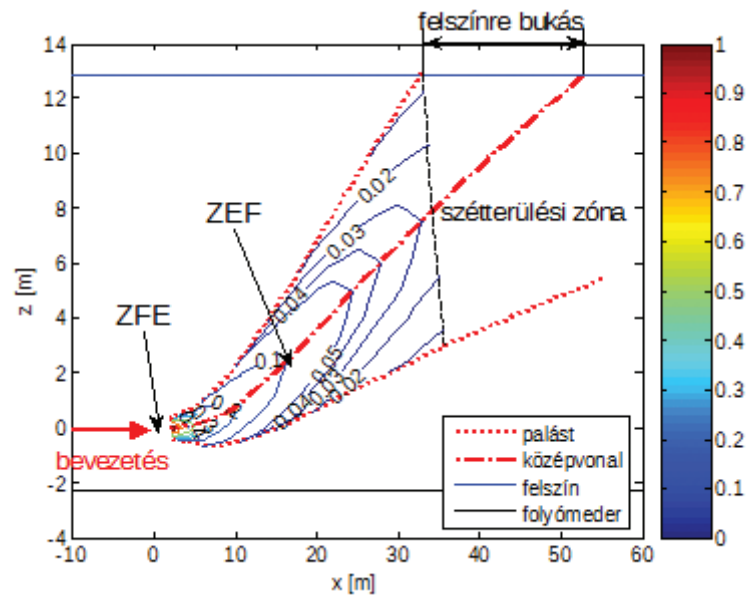
A szabad felszín közelében a meleg keverék áramlási irányának döntően függőlegesből vízszintesbe kell fordulnia, ezért a hőcsóva szétterül a  $z \approx z_{sz}$  szinten. Ha a szétterülés során az energiaveszteséget elhanyagoljuk, akkor a Bernoulli-egyenletből és a kontinuitási egyenletből a vízszintesen szétterülő réteg vastagságára ( $z_f - z_{sz}$ ) a hőcsóva átmérőjének a negyede adódik. Ez adja meg a távolféri terjedés kezdeti feltételeit.

A modellszámítások során először egy dimenziótlan empirikus korreláció [Fischer és mtsai, 1979] segítségével az adott magassághoz tartozó átlagos hígulást, majd ebből arányosan az átlagos hőmérséklet-növekményt határozzuk meg a rendszer dimenziótlan bemenő paramétereinek ismeretében.



**1. ábra:** Függőleges hőcsóva szerkezete (az áramlási viszonyokat a nyilak iránya, a hőmérsékleteti viszonyokat a nyilak színhőmérséklete illusztrálja)

Folyóvízbe történő tetszőleges irányú melegvíz-bevezetés esetén a hőcsóva szerkezete nem egyenes, kúpszerű, mint a „tavi beeresztés” fenti modelljében, hanem a középvonala egy görbe nyomvonalat ír le a folyadék belsejében. A jelenség leírására egy szabadsugárintegrál-modellt [Jirka, 2004] követtünk. A modellben a hőcsóva teljes keresztmetszetére integrált tömeg-, impulzus- és felhajtóerő-áramot követjük a csóva hosszirányú pozíciója mentén. Ezekre a mennyiségekre fizikai mérlegegyenletek érvényesek, melyeket a befogási és az elkeveredési folyamatokra talált empirikus paraméterekkel kombinálunk. Az ezekből adódó félempirikus modell lényegében egy közösleges differenciálegyenlet-rendszer, amely a hőcsóva fejlődését írja le a ZEF-ben. (Megjegyezzük, hogy ez az egydimenziós modell nem írja le a ZFE-t, és nem érvényes a folyadéktartomány határolófelületeinek közelében sem, így nem alkalmas a hőcsóva szétterülésének és az ezt követő vízszintes felszínközeli áramlás leírására sem.)



**2. ábra:** A hőcsóva szerkezete a vízszintes bevezetés esetén (a szintvonalak és a színskála a hígulási arány, ami megegyezik a keverék relatív többlethőmérsékletével)

A beeresztéssel azonos irányú, vízszintes, homogén áramlást feltételezve, a probléma kétdimenziósra egyszerűsödik, mivel a sugár vízszintesen indul a forrásából, és fokozatosan hajlik fölfelé a fősodrás által meghatározott függőleges síkban. A számításaink során ezt a közönséges differenciálegyenlet-rendszert oldjuk meg a ZEF-en belül, amelyből megkapjuk a középvonal nyomvonalát, a hőcsóva szélességét és átlagos hígulását a nyomvonal mentén, valamint a hőmérséklet-eloszlást a nyomvonal mentén és arra merőlegesen.

Az eljárást a 2. ábra illusztrálja. A belépő közeg vízszintes bevezetésének helyét az ábrán piros nyíl jelöli az origóban. Az ezt követő mozgást a vízszintes ZFE-n belül nem modellezzük, a számítás a ZFE végétől, az ottani ismert kezdeti feltételektől indul. Ettől a ponttól követjük nyomon a hőcsóva középvonalát, illetve a hőcsóva szélességének, teljes térfogatáramának, sebesség- és hőmérsékletprofiljának alakulását a ZEF-en belül. A bemutatott esetben a megemelt beeresztési pontnak köszönhetően a hőcsóva alja sehol sem éri el a folyómedret, így a szabadsugárintegrál-modell feltételei érvényesek maradnak. A színes szintvonalak a keverék többlethőmérsékletét mutatják a hűtővíz elkeveredés előtti többlethőmérséklet arányában. Szembeötlő, hogy milyen gyorsan csökken ez néhány százaléknál értékre mind a középvonal mentén, mind harántirányban. A ZEF végét azzal a keresztmetszettel definiáljuk, ahol a hőcsóva palástja legfelül először éri el a folyó felszínét, szigorúan véve a szabadsugárintegrál-módszer eddig érvényes. (Ezt a keresztmetszényt a 2. ábrán szaggatott vonallal jelöltük. Az ábra függőlegesen torzított, ez a sík valójában merőleges a csóva a pontozott vonallal jelölt középvonalára.) Valójában a módszer fokozatosan veszti el kvantitatív jellegét, ahogy a fáklya széttérül a folyó felszínén. A középvonalnak a modellegyenletek szerinti számítását addig a pontig terjesztettük ki, ahol ez is eléri a folyó felszínét. Így tudjuk a felszínre törés pozícióját behatárolni és — az átlagos hígulásból — az átlagos hőmérsékleteket meghatározni ezen a helyen. A függőleges bevezetés „tavi” modelljéhez hasonlóan ezek határozzák meg a távlati terjedés kezdeti feltételeit.

A 2. ábrán bemutatott, a hazai viszonyoknak megfelelő esettanulmány esetében az átlagos hígulás mértékére a felszínre bukáskor mintegy 100-szoros adódott a fent említett szakirodalmi tapasztalatoknak [Jones és mtsai, 2007] megfelelően.

Meg kell említeni, hogy a bevezetés áramlási részletei — mint a Reynolds-szám, a fűvóka kilépő síkjában lévő turbulenciaintenzitás, sebességprofil stb. — csak a ZFE belsejében okoznak változást (beleértve ebbe a ZFE hosszát is), de ezek hatása gyorsan elenyészik, ahogy az áramlás kifejlődik, és a keverék belép a ZEF-be. Ez a tény a hőcsóvák viszonylagosan egyszerű, de megbízható, tervezés során is használható modellezését teszi lehetővé. A szabadsugárintegrál-modell további, nem elhanyagolható előnye, hogy a számítás egyszimulációs volta miatt a numerikus eljárás nagyon gyors.



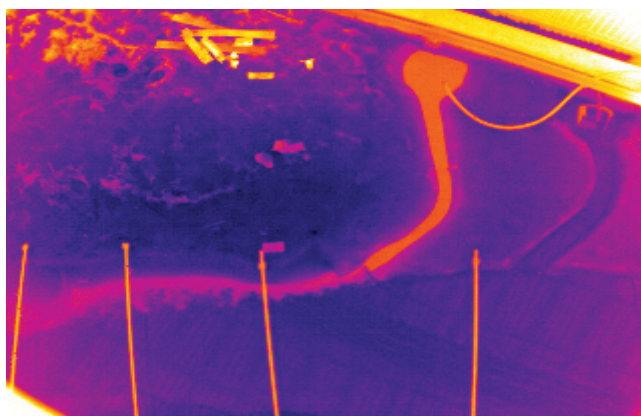
#### 4. Hőcsóvák távolféri modellezése

Láttuk, hogy a melegvíz-bevezetés szűk környezetében a befogadónál melegebb vízszög elkeveredésében fontos szerep jut a felhajtóerőnek és a felemelkedő sugár keltette turbulenciának. Ez a jellegében háromdimenziós folyamat merőben különbözik attól, ami a beömléstől távolabbi vízterekre jellemző. A távolféri szakasz modellezése tipikus folyóhidraulikai feladat, melynek során a hőcsóva vízszintes kiterjedését, a rétegvastagságot, a hőmérséklet- (ill. sűrűség-) különbséget kell meghatározni. A mélység menti egyenlőtlen sebességeloszlás és a turbulens diffúzió hossz- és keresztirányú diszperzióhoz vezet, ami fokozatosan csökkenti a hőcsóva maximális hőmérsékletét. Ehhez járul még a folyóvíz és a légtér (ill. a folyóvíz és a talajvíz) közötti hőcsere.

A két réteg *függőleges elkeveredését* az áramlás turbulenciájának keverő és a felhajtóerő szétválasztó hatása határozza meg. A függőleges hő- és anyagátadás tehát döntően konvektív jellegű, melynek dinamikáját az említett két hatás arányának viszonyszáma, az ún. Richardson-szám jellemzi. Felülről a felszíni besugárzás, párolgás és a csapadék hosszabb távon módosítja a hőcsóva hőmérsékletének alakulását, amelyet a szél- és hullámmozgás esetlegességei is befolyásolnak.

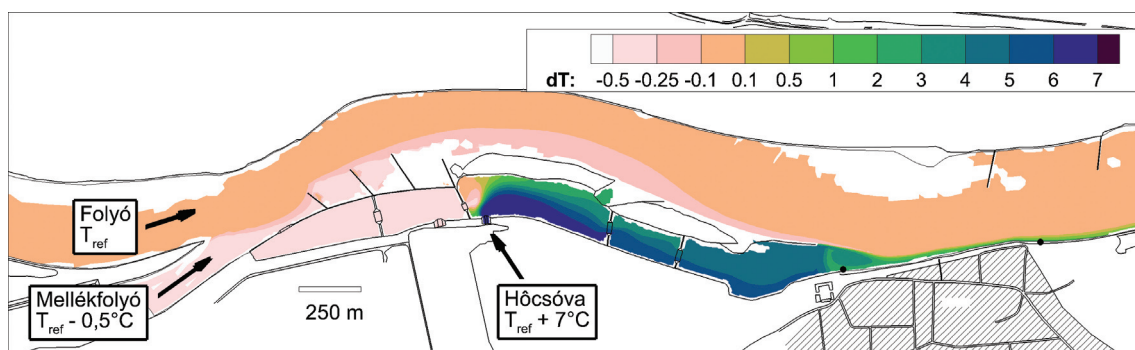
A hőcsóva *vízszintes diszperzióját* a folyókon — mind hosszanti, mind keresztirányban — az áramlási viszonyok határozzák meg. Itt döntő szerepe van a folyó vonalvezetésének, zátonyoknak, szigeteknek, folyamszabályozási műtárgyaknak.

Az áramlás komplex jellege miatt a modellezés egyik fő módszere laboratóriumi kismintás kísérletek végzése. Korszerű hőkamerás berendezéssel a szabad felszín hőmérséklet-eloszlását közvetlenül mérhetjük a modellen (3. ábra). Az így kapott nagy mennyiségű nyersadatból digitális képfeldolgozás útján értékes információt nyerhetünk nemcsak az időátlagolt áramlásról, hanem — finomabb tér- és időbeli skálákon — a turbulens struktúrák dinamikájáról is. Ha a folyami turbulencia már rövid távon képes a mélység mentén átkeverni a hőcsóvát, akkor a környezeti hatások folyószakasz-léptékű vizsgálatához akár a mélységintegrált kétdimenziós numerikus modell is kielégítő lehet.



**3. ábra:** Laboratóriumi kisminta-kísérletben hőkamerával megfigyelt hőcsóva oldalcsatornás felszíni bevezetés esetén

Mellékágak torkolata alatt különösen komplex feladattal állunk szemben, hiszen a fő- és a mellékfolyó vízminősége is más-más lehet hőmérséklet, zavarosság és tápanyagtartalom szempontjából. Az ezekből adódó sűrűségkülönbség miatt az összefolyásnál adott esetben önmagában is természetes parti bevezetésű rendszer alakul ki. A hűtővíz bevezetésével tehát már három eltérő minőségű vízáram keveredését kell modelleznünk. Ilyen esetekben a referencia-hőmérséklet megállapítása sem mindig egyértelmű, ezt egy olyan esettel illusztráljuk, ahol két folyó összefolyása alatti mellékágba vezetnek be ipari hűtővizet. A 4. ábrán bemutatott hőmérsékleti viszonyokat numerikus modelltől számítottuk. A két folyó általában nem egyforma hőmérséklettel érkezik a mellékághoz, és mivel a mellékághoz a két folyó vízének keveréke jut, a hőcsóva okozta vízmelegedést is a keverék térben változó hőmérsékletéhez kell viszonyítani. Csakhogy ez a referenciahőmérséklet a természetben ott nem mérhető ki, ahol nem függetleníthető a hőcsóva hatásától, így például a mellékág betorkollása alatt.



4. ábra: Modellezett hőmérsékletemelkedés mellékági hőcsóva-bevezetés esetén, egy olyan mértékadó, kisvízes állapotra, ahol a jobb parti mellékfolyó hidegebb vízzel folyik be

## 5. Összefoglalás

Eltérő sűrűségű ipari vagy mellékágakból érkező természetes vizek keveredése folyók főágában számos alkalmazás esetében igényel hidraulikai modellezést. Az ilyen feladatok között kiemelt fontosságú az erőművi hűtővíz-beeresztések tervezése és környezetvédelmi hatásvizsgálata. Az elképzelhető műszaki megoldások között — keverési hatásossága, tervezhetősége és megbízható modellezhetősége miatt — a felszín alatti pontszerű bevezetés igen előnyös alternatívának bizonyult. A hőcsóvák távoldéri szakaszán, illetve felszíni bevezetés esetén a közeltéri szakaszon, lezajló összetett áramlási jelenségek komplex, költség- és időigényesebb vizsgálatokat igényelnek. A tervezést két- és háromdimenziós numerikus szimulációkkal, illetve laboratóriumi kismintakísérletekkel lehet támogatni. Az utóbbiak esetén a felszíni hőmérséklet hőkamerás megfigyelése célravezető mérés technológiának ígérkezik.

## Köszönetnyilvánítás

A munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen” c. projekt szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projekt megvalósítását az Új Széchenyi Terv TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 programja támogatja.

## Irodalom

- Fischer, H. B, List, E. J, Koh, R. C. Y, Imberger, J, Brooks, N. H. *Mixing in Inland and Coastal Waters* New York: Academic Press, 1979.
- Homoródi, K, Krámer, T, Józsa, J. Szél keltette hullámmérés és becslése a Fertő-tó példáján, *Hidrológiai Közöny*, 87(5), 2007, 1–9.
- Jirka, G. H, Doneker, R. L, Hinton, S. W. *User's manual for CORMIX: a hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters* Washington, DC 20460: Office of Science and Technology, U.S. Environmental Protection Agency, 1996.
- Jirka, G. H. Integral Model for Turbulent Buoyant Jets in Unbounded Stratified Flows. Part I: Single Round Jet, *Environmental Fluid Mechanics*, 4, 2004, 1–56.
- Jones, G. R, Nash, J. D, Doneker, R. L, Jirka, G. H. Buoyant Surface Discharges into Water Bodies. I: Flow Classification and Prediction Methodology, *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(9), 2007, 1010–1020.
- Pattantyús-Ábrahám, M, Tél, T, Krámer, T, Józsa, J. Mixing properties of a shallow basin due to wind-induced chaotic flow, *Advances in Water Resources*, 31, 2008, 525–534.

## UTÓSZÓ GYANÁNT – ÍGY TÁMOPOZUNK MI

Durva számítás szerint 40.000 oldal nyomtattunk ki, 350 dossziét használtunk fel. Dunai László kari felelős és Lovas Antal dékán, körülbelül 1600 aláírást adtak. A Kart érintő dokumentáció az alábbi ábrán látható.



A tudományos kutatást összefoglaló kiadványunk végén szeretnénk bemutatni két kollégánk „színes” adatait, a projekt szervezési/adminisztrációs megvalósítása kapcsán.

*Barsi Árpád színesei:* 2011. október 22-ig bezárólag 73 sávossal haladási ütemtervet, részletező táblázatot készítettem, amely darabonként 14 táblát tartalmaz. A projekt indulása óta körülbelül 600 emailt küldtem, számítógépen 60 almappában, 1001 file-t, mintegy 150.337.766 byte adatot őrzök Szerencsére a Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék kb. 20 méterre van a Dékáni Hivataltól, így nem sok kilométer gyalogoltam a projekt érdekében. Módom volt megtanulni, hogyan kezeli az Excel a nettó-bruttó-szuperbruttó kérdéseket. Akkor sem vesztettem kedvem, amikor az éppen hosszú munkával elkészült költségtáblázatban szereplő kollégákat teljesen új besorolás szerint kellett figyelembe vennem. Megértettem, hogy a rovatok KKT-szerinti felosztása olyan optimalizálási kérdéseket vet fel, hogy általánosított matematikai megoldásuk kidolgozása egészen közel állhat a közgazdasági Nobel-díjhoz.

*Kiss Rita színesei:* 2011. március 1. óta 345 db kör-emailt küldtem, 78 Marianne-nak, 247 csak egyes tanszékek felelőseinek szólt. Az Egyesült Innovációs és Tudásközpontnak (EIT) 97 emailt írtam és 49 táblázatot töltöttem ki. Az adatok csak 21 almappában vannak, a file-ok száma 974 db, ami mintegy 89.257.612 byte. Három kari beszámoló készítéséhez kb. 250 egyéni szakmai jelentést olvastam. Talán sejtem, mi a GNSS rendszer, a folyami hőcsóva, az önreprodukciós úthálózat, hogyan modellezhető a véráram és a fog körüli szivacsos csont, vagy miről szól a Rio de Janeiro-i megállapodás, mire használhatók a pelyhes részecskék a mágneses erőterrel, hogy a csapadékvizet a tető és az autóm is szennyezi, de azért használható. Kapizsgálom, hogy a műholdas rendszer a közlekedés biztonságát segíti, és különböző érzékelő hálózatokat használhatok, mint építőmérnök. De azt nem ígérem, hogy megkülönböztetem a bátaapáti kőzetet, a vastag gömbös fekete mállási kéreggel rendelkező édesvízi mészkőtől. Dunai Lászlóval együtt 26 kari felelősi értekezleten (hétfőn délután vagy kedd késő délután) vettünk részt, volt 2 tanszéki felelősi értekezlet. Becsülni sem merem Dékán Úrral folytatott a reggeli megbeszélések, és Dunai László kari felelőssel folytatott délutáni megbeszélések számát. A Hidak és Szerkezetek Tanszék távol van a Dékáni Hivataltól és a V1 épület 5. emeletén lévő EIT-től, így a projekt érdekében kb. 210 km-t gyalogoltam. Nem írtam még a telefonhívások számáról, a 120 liter elfogyasztott kapucsínóról, teáról, és a 3 kg csokoládéről...



## TARTALOMJEGYZÉK

	<b>Oldalszám</b>
KARI TÁMOP KUTATÁSOK HÁTTERE – ÖSSZEFOGLALÓ <i>Lovas Antal, Dunai László, Barsi Árpád, Kiss Rita</i>	3.
A GNSS ÉSZLELÉSEK SZEREPE A LÉGKÖRI KIHULLHATÓ VÍZMENNYISÉG MEGHATÁROZÁSÁBAN <i>Rózsa Szabolcs, Tuchband Tamás</i>	7.
LÉGSZENNYEZÉS HATÁSA ÉPÍTETT ÖRÖKSÉGÜNKRE <i>Török Ákos</i>	13.
BÁTAAPÁTI TÁROLÓ KÖZETKÖRNYEZETÉNEK KÖZETFIZIKAI LABORVIZSGÁLATAI <i>Török Ákos, Görög Péter, Boucz Ildikó</i>	19.
ÉRZÉKELŐK HÁLÓZATBAN, AVAGY HOGYAN HASZNÁLJON EGY ÉPÍTŐMÉRNÖK SOK SZENZORT? <i>Barsi Árpád, Lovas Tamás</i>	25.
FORGALOM SEBESSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA GSM HÁLÓZAT SEGÍTSÉGÉVEL <i>Lovas Tamás, Berényi Attila, Koppányi Zoltán, Barsi Árpád</i>	31.
HULLADÉKLERAKÓK GEOTECHNIKAI KÉRDÉSEI <i>Farkas József, Pusztai József</i>	37.
ACÉLSZERKEZETI KORROZÍÓ HATÁSÁNAK MODELLEZÉSE <i>Oszvald Katalin, Dunai László</i>	43.
KÖRNYEZETBARÁT ANYAGOK ÉS TECHNOLÓGIÁK A TARTÓSZERKEZETEK ÉPÍTÉSÉNÉL <i>Farkas György, Friedman Noémi, Németh Orsolya</i>	49.
ÚJ MÉRÉSI MÓDSZER A DINAMIKUS EGYENSÚLYOZÓ KÉPESSÉG VIZSGÁLATÁRA <i>Kiss Rita M.</i>	55.
ÚJ GENERÁCIÓS SZÉLERŐMŰ TORONY SZEGMENSEK FEJLETT ANALÍZISE ÉS OPTIMÁLIS TERVEZÉSE <i>Vigh László Gergely, Pap Csongor</i>	61.
ÉPÜLETSZERKEZETEK IDŐVEL VÁLTOZÓ TELJESÍTMÉNYE <i>Tóth Elek</i>	67.
AZ EMBERI SZEM BIOMECHANIKAI MODELLEZÉSE <i>Bocskai Zoltán Imre, Bojtár Imre</i>	73.
AGYI ANEURIZMÁK NUMERIKUS VIZSGÁLATA <i>Bojtár Imre, Tóth Brigitta, Nasztanovics Ferenc, Nagy Róbert</i>	79.
AZ EMBERI ÁLLCSONT SZIVACSOS ÁLLOMÁNYA ANYAGJELLEMZŐINEK MEGHATÁROZÁSA KÍSÉRLETI ÚTON <i>Lakatos Éva, Magyar Lóránt, Bojtár Imre</i>	85.
ÖNREPRODUKCIÓS ÚTHÁLÓZATI FORGALMI MODELLEK KIDOLGOZÁSA <i>Fi István, Makula László, Bocz Péter, Schuchmann Gábor, Siki Zoltán, Kollár Attila, Vasvári Gergely</i>	91.
CSAPADÉKVÍZZEL KÖZVETÍTETT ANTROPOGÉN ANYAGÁRAMOK OKOZTA KÖRNYEZETTERHELÉS ÉS A CSAPADÉKVÍZ HASZNOSÍTÁS FELTÉTELEI VÁROSI KÖRNYEZETBEN <i>Budai Péter, Horváth Adrienn, Clement Adrienne, Buzás Kálmán</i>	97.

	<b>Oldalszám</b>
PELYHES SZERKEZETŰ LEBEGŐANYAGOK LEVÁLASZTÁSA MÁGNESES ERŐTÉRREL MOZGATOTT NANO-RÉSZECSKÉKKEL <i>Karches Tamás, Buzás Kálmán</i>	103.
FOLYAMI HŐCSÓVÁK VIZSGÁLATA <i>Szabó Kálmán Gábor, Krámer Tamás, Józsa János</i>	109.
UTÓSZÓ GYANÁNT – ÍGY TÁMOPOZUNK MI TARTALOMJEGYZÉK	115. 117.