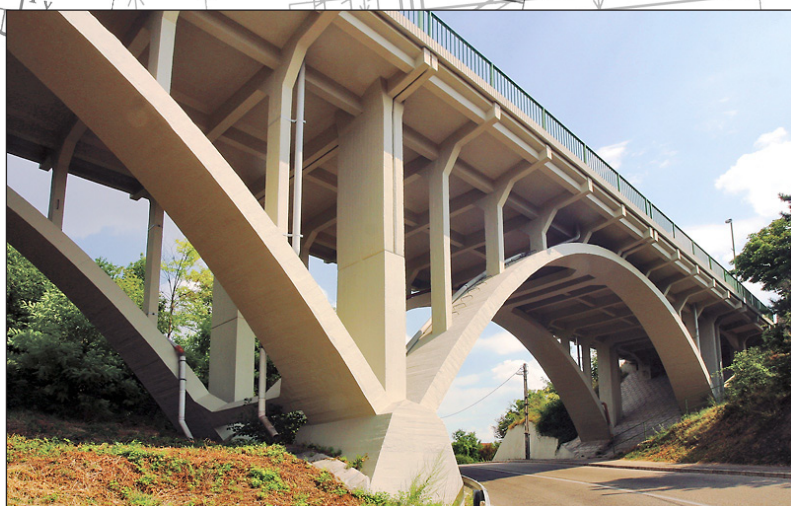
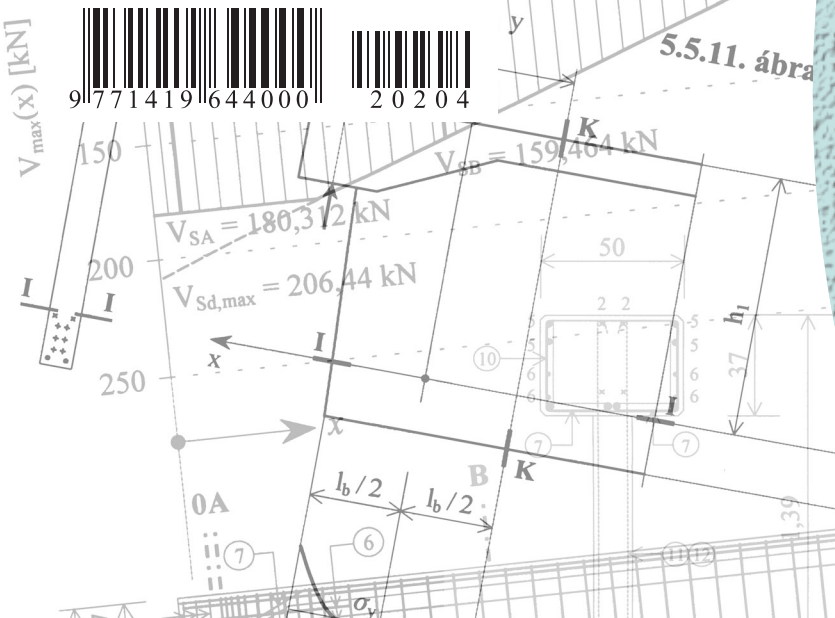


# VASBETONÉPÍTÉS

CONCRETE STRUCTURES

JOURNAL OF THE HUNGARIAN GROUP OF *fib*

DR. TÓTH ERNŐ

**HAZAI VASBETON HÍDJAINK 100 ÉVÉNEK (1990-IG) ESZTÉTIKAI ÁTTEKINTÉSE**

94

KANIZSÁR SZILÁRD

**CPRF-SZERKEZET ÁGYAZÁSI- ÉS RUGÓ-MEREVSÉGEINEK MEGHATÁROZÁSA KLASZTERANALÍZIS SEGÍTSÉGÉVEL**

99

DR. BALÁZS L. GYÖRGY -  
DR. NEHME SALEM - DR. LUBLÓY ÉVA -  
DR. KOPECSKÓ KATALIN - BALOGH TAMÁS -  
KASIK TAMÁS - DR. SÓLYOM SÁNDOR

**3D BETONNYOMTATÁS -  
KORSZERŰ BETONELEMEK  
ANYAGTUDOMÁNYI FEJLESZTÉSE  
A BME-N**

113

**NVKP 16-1-2016-0019 ZÁRÓ  
SAJTÓKÖZLEMÉNY**

119

SZEMÉLYI HÍREK

DR. MADARAS GÁBOR KÖSZÖNTÉSE  
70. SZÜLETÉSNAPOJA ALKALMÁBÓL  
SZALAI GYÖRGY KÖSZÖNTÉSE  
65. SZÜLETÉSNAPOJA ALKALMÁBÓL  
MIHALEK TAMÁS KÖSZÖNTÉSE  
70. SZÜLETÉSNAPOJÁN  
TÁPAI ANTAL KÖSZÖNTÉSE  
80. SZÜLETÉSNAPOJA ALKALMÁBÓL  
TASSI GÉZA KÖSZÖNTÉSE  
95. SZÜLETÉSNAPOJÁN

120

# 2020/4

XXII. évfolyam, 4. szám

# VASBETONÉPÍTÉS

műszaki folyóirat  
a **fib** Magyar Tagozat lapja

CONCRETE STRUCTURES  
Journal of the Hungarian Group of **fib**

## Főszerkesztő:

Dr. Balázs L. György

## Szerkesztő:

Dr. Träger Herbert

## Szerkesztőbizottság:

Barta János  
Dr. Csíki Béla  
Dr. Czoboly Olivér  
Dr. Erdélyi Attila  
Dr. Farkas György  
Kolozi Gyula  
Dr. Koris Kálmán  
Dr. Kopecskó Katalin  
Dr. Kovács Károly  
Dr. Kovács Imre  
Dr. Kovács Tamás  
Lakatos Ervin  
Dr. Lublói Éva  
Mátyássy László  
Dr. Móczár Balázs  
Dr. Nehme G. Salem  
Dr. Orbán Zoltán  
Pisch Zsuzsanna  
Polgár László  
Dr. Sajtó István  
Telekiné Királyföldi Antónia  
Dr. Tóth László<sup>2</sup>  
Várdai Attila  
Dr. Völgyi István  
Vörös József

## Lektorai testület:

Dr. Dulácska Endre  
Királyföldi Lajosné  
Dr. Loykó Miklós<sup>2</sup>  
Madaras Botond  
Dr. Madaras Gábor  
Dr. Orosz Árpád  
Dr. Ratay Robert  
Dr. Szalai Kálmán  
Dr. Tassi Géza  
Dr. Tóth Ernő  
(Kéziratok lektorálására más  
kollégák is felkérést kaphatnak.)

Alapító: a **fib** Magyar Tagozata  
Kiadó: a **fib** Magyar Tagozata  
(**fib** = Nemzetközi Betonszövetség)  
Szerkesztőség: BME Építőanyagok és  
Magasépítés Tanszék  
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.  
Tel: 463 4068 Fax: 463 3450  
E-mail: fib@eik.bme.hu  
WEB <http://www.fib.bme.hu>  
Az internet verzió  
technikai szerkesztője:  
Bíró András, doktorandusz

Tervezőszerkesztő: Halmai Csaba  
Nyomdai kivitelezés: Navigar Kft.

Egy példány ára: 1275 Ft  
Előfizetési díj egy évre: 5100 Ft  
Megjelenik negyedévenként  
1000 példányban.

© a **fib** Magyar Tagozata  
ISSN 1419-6441 online ISSN: 1586-0361

Hirdetések:  
Külső borító: 220 000 Ft+áfa  
belső borító: 180 000 Ft+áfa  
A hirdetések felvétele:  
Tel.: 463-4068, Fax: 463-3450

Címlapfotó: Veszprémi völgyhíd  
Fotó: Gyukics Péter

# TARTALOMJEGYZÉK

- 94 DR. TÓTH ERNŐ**  
**HAZAI VASBETON HÍDJAINK 100 ÉVÉNEK (1990-IG) ESZTÉTIKAI ÁTTEKINTÉSE**
- 99 KANIZSÁR SZILÁRD**  
**CPRF-SZERKEZET ÁGYAZÁSI- ÉS RUGÓ-MEREVSÉGEINEK MEGHATÁROZÁSA KLASZTER-ANALÍZIS SEGÍTSÉGÉVEL**
- 113 DR. BALÁZS L. GYÖRGY - DR. NEHME SALEM - DR. LUBLÓY ÉVA - DR. KOPECSKÓ KATALIN - BALOGH TAMÁS - KASIK TAMÁS - DR. SÓLYOM SÁNDOR**  
**3D BETONNYOMTATÁS - KORSZERŰ BETON-ELEMEK ANYAGTUDOMÁNYI FEJLESZTÉSE A BME-N**
- 119 NVKP\_16-1-2016-0019**  
**ZÁRÓ SAJTÓKÖZLEMÉNY**
- 120 SZEMÉLYI HÍREK**  
DR. MADARAS GÁBOR KÖSZÖNTÉSE  
70. SZÜLETÉSNAJPA ALKALMÁBÓL  
SZALAI GYÖRGY KÖSZÖNTÉSE  
65. SZÜLETÉSNAJPA ALAKALMÁBÓL  
MIHALEK TAMÁS KÖSZÖNTÉSE  
70. SZÜLETÉSNAJPNÁN  
TÁPAI ANTAL KÖSZÖNTÉSE  
80. SZÜLETÉSNAJPA ALKALMÁBÓL  
DR. TASSI GÉZA KÖSZÖNTÉSE  
95. SZÜLETÉSNAJPNÁN
- A folyóirat támogatói:  
Vasúti Hidak Alapítvány, Duna-Dráva Cement Kft., ÉMI Nonprofit Kft.,  
A-Híd Zrt., MÁV Zrt., MSC Mérnöki Tervező és Tanácsadó Kft.,  
Lábatlani Vasbetonipari Zrt., Pont-Terv Zrt., Swietelsky Építő Kft., Uvaterv Zrt.,  
Mélyépterv Komplex Mérnöki Zrt., Hídtechnika Kft.,  
Betonmix Mérnökiroda Kft., CAEC Kft., SW Umwelttechnik Magyarország Kft.,  
Union Plan Kft., DCB Mérnöki Iroda Kft.,  
BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék,  
BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

# HAZAI VASBETON HÍDJAINK 100 ÉVÉNEK (1990-IG) ESZTÉTIKAI ÁTTEKINTÉSE



Dr. Tóth Ernő

<https://doi.org/10.32969/VB.2020.4.1>

*A magyar közúti hidak között számos olyan vasbeton szerkezet van, amely esztétikai szempontból érdekes, bemutatásra méltó. A cikkben bemutatunk ezek közül néhányat és esztétikai szempontból összefoglalót adunk. Ez a cikk a 2018. novemberében tartott 3. hidasztétikai ankéton elhangzott előadás szerkesztett változata.*

**Kulcsszavak:** vasbeton hidak, esztétika.

## 1. A HIDAK BEMUTATÁSA

### A solti vasbeton boltozatú csatorna híd (1889)

A Monier-rendszerben épült hidat Zoltán Győző mérnök (ÁÉH) tervei szerint 5+5 méteres nyílásokkal építették.

A híd boltozat alakra emlékeztet, az áttört mellvéd korlát célját szolgálja, 1942-ben megszélesítették. Ma gyalogosok is átmehetnek az egyik nyílás alatt, így a híd oldalról is jól látható. A hidat 2002-ben részben átépítették és teljes egészében felújították. Jó formájú, igényes kialakítású ez az eredeti alakjában álló első vasbeton közúti hidunk (1. ábra).



1. ábra: A solti vasbeton boltozatú csatorna híd

### A városligeti gyalogoshíd (1896)

Wünsch-rendszerű hidak elsősorban a millennium idején épültek szerte az országban. Hazánk mai területén a Városligetben álló műemléki védettségű, ma funkció nélküli gyalogoshíd a legismertebb és a legjelesebb (2. ábra).



2. ábra: A városligeti gyalogoshíd

### A balatonföldvári Zielinski-féle gyalogoshíd (1905)

Hennebique-rendszerrel, Zielinski Szilárd – a hazai vasbetonhid-építés megteremtője – irodájának tervei szerint, 15-18 méteres nyílásokkal, 100 m összhosszal épült.

Vasbeton hidjaink zöme gerendaszerkezet, e híd érdekessége, hogy egyfőtartós kialakítású. Igényes korláttal, eredeti formájában, javítások nélkül áll ez a becses műemlékünk (3. ábra).



3. ábra: A balatonföldvári Zielinski-féle gyalogoshíd

### Rábakecöl Répce-árapasztócsatorna hídja (1908)

Kovács Sebestyén Aladár tervei szerint épült ez a karcsú, többnyílású kerethíd, mely annak idején vízépítési típusszerkezet volt. A karcsú vasbeton szerkezet mindössze 150 m<sup>3</sup> vasbetonból, 1,8 t betonacéllal épült, 8+10+8 méteres



4. ábra: Rábakecöl Répce-árapasztócsatorna hídja

nyílásokkal. Hazánk területén több ehhez hasonló hídszerkezet épült jelezve, hogy milyen fontos volt vízfolyásaink rendezése és elődeink milyen igényes, gazdaságos hídszerkezeteket terveztek és építettek (4. ábra).

#### **Körösszakál, Sebes-Körös-híd (1928)**

A négynyílású híd (20+25+25+20 m) Tóth Zsigmond tervei szerint épült. Vízfolyásainkon több főtartós, folytatólagos gerenda hidak általában páratlan számú nyílással épültek úgy, hogy a középső nyílás volt a legnagyobb. Ez a híd így az általános kialakítástól eltér, bemutatása azért indokolt, mert a II. világháborúban általában elpusztultak a hozzá hasonló szerkezetek, ez azonban lényegében eredeti formájában áll. Jellegzetes ezen a hídon is a rövid, egyenes kiékelés és a típus kialakítású korlát (5. ábra).



**5. ábra:** Körösszakál, Sebes-Körös-híd

#### **A veszprémi Szent István völgyhíd (1937)**

Folly Róbert tervei alapján két híd épült. Az egyik 45 méteres főnyílású, a másik 26+26 méteres ívekből áll. Összhosszuk 185 m (6. és 7. ábra).

A műemléki védettségű híd főnyílását a II. világháborúban név szerint is ismert, bátor helyiek védték meg, így az épségben maradt.

A völgyhíd az új 8. sz. főút építésekor tudatos aprólékos tervezéssel nyerte el városképi értékét. A tervező harmadfokú parabolával alakította ki ezt a kecses, szép formájú hidat.

A 8. sz. főút építése során 20 jelentős híd épült neves tervezőink alkotásaként, így pl. Városlódnél egy kétnyílású ívhíd is. Kár, hogy különböző okok miatt ez már nem látható.



**6. ábra:** A veszprémi Szent István völgyhíd

#### **A győri Sétatéri Rába-híd (1950)**

Az 52 m nyílású, igen karcsú, Gerber-csuklós híd Kemény Ádám (Uvaterv) tervei szerint épült 1,35 méteres szerkezeti magassággal (7. ábra). Később ennél nagyobb nyílású híd is épült, Budapesten, a Hajógyári-szigetnél 56 méteres nyílással.

Ez a hídtípus 1908-tól – először Temesváron – épült, közülük a Mihailich Győző tervezte híd építésekor világcsúcs méretű volt. Az akkor Temesváron épült több hasonló híd tervezésében kiváló építésmérnökök is közreműködtek, említésre méltó, hogy a Mihailich Győző tervezte híd ma is eredeti formájában áll.

Hazánk mai területén a győri Iparcsatormán és a Sión is épültek hasonló Gerber-csuklós hidak. Ez utóbbiak a mai napig szolgálják a forgalmat.



**7. ábra:** A győri Sétatéri Rába-híd

#### **A Varasdi völgyhíd (1953)**

A Bölscei Elemér (Mélyépterv) tervezte híd 98 méteres nyílással, 170 m hosszban vezet át az új 6. sz. főutat a völgy fölött, 32. m magasságban. E híd a hídtervezés fejlődésének megfelelően a veszprémitől részleteiben eltérő kialakítású, tervezésekor neves szakértőkből álló bizottság segített abban, hogy a technika fejlődésének lehetőségével élve épüljön e híd. Jellemző, hogy pl. kábeldarúval épült a híd, 25 zömben történt betonozással, az állvány 37 ütemben történt leeresztésével (8. ábra).

A rendkívül látványos híd sajnos az azóta eltelt időben felnőtt növényzet miatt csak a régi útról vagy légi felvételen csodálható meg.



**8. ábra:** A Varasdi völgyhíd

#### **A Bolondúti völgyhíd (1954)**

Ez a híd is a 6. sz. főúton, Bölscei Elemér alkotása. Az előregyártás korai, túl merésznek is mondható építménye, a 25+3x30+25 m nyílású híd a 27 m mély völgy felett épült, így indokolt volt hatalmas állványozás helyett előregyártott gerendákat alkalmazni (9. ábra).

A 40x185 cm keresztmetszetű vasbeton gerendák emelése több körülmény szerencsétlen összegeződése miatt az első emelésnél balesettel végződött. A keresztmetszet és a beemelés

részbeni átalakítása után a gerendákat sikerrel emelték be.

Az 1950-ben kezdődött, feltétlenül indokolt előregyártás a továbbiakban kisebb nyílásokkal folytatódott és csak évtizedekkel később érte el a 40 m-t.



9. ábra: A Bolondúti völgyhíd

### A tiszalöki Keleti-főcsatorna-híd (1954)

A Reiner Endre (Uvaterv) tervezte híd (10. ábra) azért említésre méltó, mert a Keleti-főcsatornán 20 ilyen híd épült. Hazánkban alsópályás ívhidak már 1935-37-ben épültek. Ma 34 hasonló, bár többféle rendszerű híd áll.

E hidakon keresztmetszeti kialakításban, vonóvas, vonókábel és más részek tekintetében sokféle, folyamatosan fejlődő megoldások találhatóak. A Reiner Endre tervezte híd 58 m nyílású.

E híd típus síkvidéken rendkívül gazdaságos, tekintve, hogy szerkezeti magassága minden más szerkezeténél kisebb, ezért tervezőink igyekeztek megtalálni ennek a szerkezetnek a legjobb megoldását. Az alsópályás ívhidak egyik „gyenge pontja” az elég nagyszámú felső keresztkötés, amelyek zavarhatják a járművezetőket elsősorban nem optikailag, hanem mivel fizikai akadályt jelentenek. Ezért jelentős az a gyakorlat, hogy több ilyen hídnál sikerült a legalacsonyabban lévő keresztkötéseket eltávolítani, illetve egy kisebb nyílású hídnál, Kecskédnél – Lipták László tervei szerint – felsőkeresztkötés nélküli szerkezet is épült.



10. ábra: A tiszalöki Keleti-főcsatorna-híd

### A tihanyi hajóállomási híd (1961)

Lipták László koncepciója és tervei szerint épült: felfelé szélesedő, sinus görbe mentén elhelyezett, kör keresztmetszetű pilléreken álló a híd szélei felé csökkenő vastagságú 80 m hosszú (10x8 méteres) tartószerkezet (11. ábra).

A híd a rendkívüli környezetben – apátsági templom, kikötőhíd, emlékmű – igen tetszetős, egyedülálló, kétségtelenül munkai igényes zsaluzású és talán ezért követésre nem talált példa, pedig a hagyományos vasbeton szerkezetektől kedvező

irányban eltérő, a környezetbe kiválóan illeszkedő, jól fenntartható, igen kedvező szerkezet.



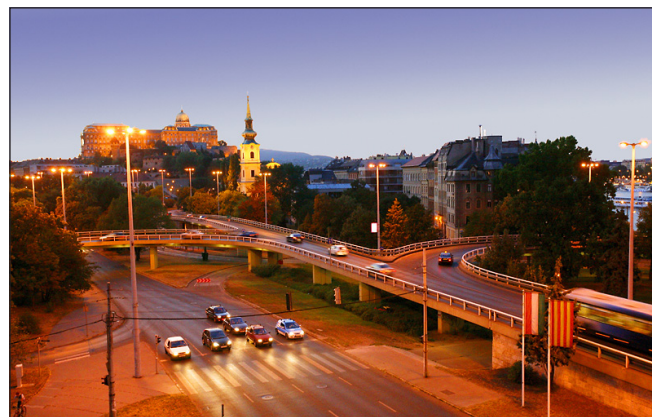
11. ábra: A tihanyi hajóállomási híd

### Az Erzsébet híd budai lehajtó csomópontja (1964)

Loykó Miklós (Uvaterv) tervei alapján épült hazánk első nagyvonalú, többágú, íves vasbeton csomóponti hídja (12. ábra).

A 330 m összhosszúságú híd ívei a belső szegélyen csak 25 méter sugarúak, az egész hídon pedig csak 25 m hosszú egyenes található.

A tervező a szűk hely miatt három, egymással két ponton összefüggő, töbttámaszú, szekrénytartós szerkezetet alakított ki. Fontos szempont volt, hogy a híd minél kisebb tömegű legyen, minél kevesebbet foglaljon el a környezetéből. A terv jól sikerült, méltó az Erzsébet hídroz



12. ábra: Az Erzsébet híd budai lehajtó csomópontja

### A kápolnásnyéki pihenőhelyhez vezető gyalogos híd (1966)

Az M7 autópálya felett Királyföldi Lajosné (Uvaterv) tervei szerint épült ez a rendkívül karcsú, nagy esésű, merész gyalogos híd (13. ábra).

Bölcskei Elemér javaslatára 1952-ben épült először V-lábú és ferdelábú kerethíd.)

Az M7-es fölött épült 80 m hosszú híd ferdelábúnak



13. ábra: A kápolnásnyéki pihenőhelyhez vezető gyalogos híd

látszik, valójában ez V-lábú kerethíd, mivel a statikában ez előnyösebbnek mutatkozott és a rézsűk takarják a V-lábnak egyik részét. Az M7-es 14-es kilométerében egy valóban ferdelábú híd is épült, s egyáltalán a V-lábú és ferdelábú hidak is kedveltek mind a mai napig a tervezésben.

#### **A Flórián téri, Árpád hídra vezető hidak (1984)**

A Horváth Adrián (Főmterv) tervei szerint két, egyenként 11 nyílású híd épült. Ezek hossza 320, illetve 360 méter (14. ábra).

Műemléki védettségű helyen – római építészeti emlékek felett (5000 m<sup>2</sup> fedett és 2300 m<sup>2</sup> nyitott felület) - áll ez a monumentális hídszerkezet. Mindkét híd ívben fekszik, a legkisebb alaprajzi sugár 150 m.

Nehéz adottság volt, hogy az építési idő kiorlátozott vltá miatt előregyártott (egyedileg átalakított EHGT) tartókkal kellett a hidakat megépíteni és a fejtérrendákat mindenhol csak egy oszlop támasztja alá. A római romok megőrzése mellett épült gyalogos aluljáró egyedülálló élményt nyújt, ismereteim szerint Európa-szerte. Az aprólékos, gondos tervezés monumentális, remek alkotást hozott létre.



**14. ábra:** A Flórián téri, Árpád hídra vezető hidak

#### **Az M0 autópályás hídja a Soroksári-Duna felett (1990)**

Varga József (Uvaterv) tervei szerint 36+75+36 méteres nyílású szabadbetonozásos technológiával épült a híd, melyhez összesen 18 nyílású előregyártott gerendás hídszerkezet csatlakozik, így a híd teljes hossza mintegy 500 méter (15. ábra).

A vasbeton folyami hidak építésére 1975-ben kialakított szabadszereléses technológia után 1979-ben a szabadbetonozás előtérbe helyezésével folytatódott a technológia fejlesztése, amit 1990-től a szakaszos előregyártás technológiája tett teljessé.

Napjainkban a szabadszereléses technológia már csak ritkán alkalmazott, bár pl. a Körös-hegyi völgyhídnál különböző okok miatt a szabadbetonozás mellett szabadszerelést is alkalmaztak.

Ezek az új módszerek előnyösek, mert állványozást



**15. ábra:** Az M0 autópályás hídja a Soroksári-Duna felett

lényegében nem igényelnek és az előbbieket alakja az erőjátékot követve gazdaságos.

*A cikk képeit a 10. ábra kivételével Gyukics Péter fotóművész készítette.*

*A továbbiakban néhány hídsztétikai elvet vázolok fel és irodalomjegyzéket adok annak érdekében, hogy az érdeklődő tájékozódjon ebben a szép, nehéz, folyamatosan változó hídsztétikai kérdésben.*

## **2. HÍDESZTÉTIKAI GONDOLATOK A SZAKIRODALOM ÉS SZEMÉ- LYES VÉLEMÉNYEM ALAPJÁN**

A hídsztétika az építőanyagok, építéstechnika, a számítások fejlődése, valamint a kor ízlésének megfelelően állandóan változik, tehát indokolt tanulmányozni.

A híd funkcióját (közúti, vasúti, gyalogos stb.) maradéktalanul ki kell elégíteni, esetleg később felmerülő újabb funkcióra is gondolni kell.

A híd felszerkezete az áthidalt nyílástól, az alkalmazott építőanyagtól függően (gerenda, ív, függesztett stb.) egy hídon belül lehetőleg homogén legyen.

A híd tartószerkezetét az erőjátéknak megfelelően, a kilátást lehetőleg nem zavaró tartóalakokkal kell tervezni, az alak biztonságot sugárzó legyen.

A híd nyílásszáma, a nyílások mérete, az áthidalt akadályok alakja harmonikus legyen.

A híd felszerkezete, alépítménye és a hídfeljárók egymással kellő összhangban legyenek.

A híd egésze illeszkedjen a környezetéhez: sík vagy dombvidék, illetve beépített környezet.

Az autópályák feletti, külön szintű csomópontok hídjainál a gépkocsiból látható hidak alakjával, felületképzésével figyelemmel kell lenni a közlekedők hídélményére.

Városi hidaknál a gyalogosok szempontjaira figyelemmel kell lenni. Színezés, világítás lehetséges.

A hidak korlátjai fontos optikai elemek, ezek esztétikus kialakítására, biztonságos voltára külön gondot kell fordítani.

A hidak környékének növényekkel való kiemelésére gondolni kell úgy, hogy a természet ne foglalja el később a hidat, az állatok (pl. denevérek) megtelepedését meg kell akadályozni.

A hidat az út vonalvezetésébe harmonikusan kell behelyezni. Alsópályás hidaknál előny, hogy a járművezetők is látják a szerkezetet. A hossz-szelvényben a vízvezetés fontossága miatt homorú vagy vízszintes híd nem szabad tervezni.

Vasbeton, feszített vasbeton hidakat a téli sózásra figyelemmel kell tervezni.

Műemlék, műszaki emlék hidakat lehetőleg meg kell őrizni a jövő nemzedékeknek. Üzemeltetésük, felújításuk során az eredeti formák megtartása érdekében anyagi áldozatokat is kell hozni.

A hidak tervezésére vonatkozó szabályokban tömör, generális elveket kell rögzíteni. Különleges igények estén egyedi szabályozás lehet szükséges.

## **3. ÖSSZEGEZÉS**

Hazánkban az országos közutakon mintegy 2,4 millió m<sup>2</sup> hídszerkezet áll, ennek mintegy 90%-a vasbeton anyagú, hídjaink alépítménye pedig kevés kivételtől eltekintve

mindenhol vasbeton szerkezet. Ezért a vasbeton hidak esztétikája rendkívül fontos, hisz zömében ezzel találkozik az utazó. A bemutatott példák 2004-ig mutatják be hazai hídállományunk ide vonatkozó részét, amely természetesen ennél sokkal változatosabb, mégis remélhetőleg egy átfogó képet adunk hazai hídjainkról.

A tervezés mellett hídjaink esztétikai megjelenése egy sor más tényezőtől is függ. A kivitelezés gondossága, a híd élettartama alatti rongálódások, átázások, javítások mind káros mértékben rontják hídjaink megjelenését, ezért is kell arra törekedni, hogy tartós, jól fenntartható hídszerkezetek épüljenek és mindent tegyünk meg hídjaink károkozása ellen. Így igen fontos a közutak szózásának minimális mértéken tartása, hisz ez az egyik károkozó, másrészt a járműközés elleni védelem szintén kulskérdés.

## 4. IRODALOMJEGYZÉK

- Bölcskei E. (1951): „V lábú szerkezetek”, *MSz 1951/6*  
Bölcskei E., Láng-Miticzky Cs. (1959): Vasbeton hidak, *Műszaki Könyvkiadó*  
Harkányi J. (1939): „Hídpítések a Budapest-Gráci államvasúton”, *TECHNIKA*  
Huszár Gy. (1976): „Közúti hidak esztétikája”, *MSz 1976/1*  
Juhász B. – Loykó M. (1978): „Vasbeton híd- és szerkezetek építése”, *Tankönyvkiadó*  
Kara K. – Tóth E. (2007): „Hídjaink, A római örökségtől a mai óriásokig”, *Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ*  
Kászonyi G. (1979): „Mérnöki létesítmények esztétikai kérdései”, *Doktori értekezés*

- Lipták L. (1962): „A tihanyi felüljáró”, *MSz 1962/11*  
Kollár L. – Vámosy F. (1996): „Mérnöki alkotások esztétikája”, *Akadémiai Kiadó*  
Jankó L. (1998): „Vasbeton hídszerkezetek, I-II.”, *Egyetemi jegyzet*  
Medved G. (2001): „Történetek a világ hídjairól”, *TERC*  
Menyhárd I. (1942): „A mérnöki építészet esztétikája”, *Magyar Mérnök és Építészegylet Közlönye Negyedévi szemle, Építészet 1942/2*  
Széchy K. (1942): „A hidak esztétikája”, *Magyar Mérnök és Építészegylet Közlönye Negyedévi szemle, Építészet, 1942/2*  
Palotás L. (1957): „Mérnöki kézikönyv”, *Műszaki Könyvkiadó*  
Palotás L. (1963): „Mérnöki szerkezetek kialakítása különös tekintettel azok esztétikájára”, *MSz 1963/11*  
Palotás L., Medved G., Nemeskéri-Kiss G., Träger H. (1987): „Hidak”, *Műszaki Könyvkiadó*  
Petúr A. (1973): „Hídszerkezetek esztétikája”, *MSz 1973/1*

**Dr. Tóth Ernő** (1937) okl. mérnök, útépitési szakmérnök. 1961-69 között hídügyi előadó. 1969-79 között osztályvezető a székesfehérvári Közúti Igazgatóságon, majd 1979-88-ig Budapesten fejlesztési osztályvezető az UKIG elődjét képező, többször változó nevű szervezetben. 1988-89-ben a Közlekedési Minisztérium hídosztályának vezetője. Ezt követően az Országos Közúti Főigazgatóság, majd az UKIG hídosztályán foglalkozott az országos közutak hídjaival. Szakmai pályafutása során így tevékenysége hidakra és utakra terjed ki beleértve azok fenntartását és korszerűsítését is. A **fib** magyar Tagozat tagja.

### AESTHETICAL REVIEW OF HUNGARIAN REINFORCED CONCRETE BRIDGES OF THE LAST CENTURY UNTIL 1990

**Ernő Tóth**

Among the Hungarian highway bridges there are many concrete structures, which are esthetically interesting. In the article we show some of them and gives an aesthetical summarization.

## BETONTECHNOLÓGUS SZAKIRÁNYÚ TOVÁBBKÉPZÉS A BME ÉPÍTŐMÉRNOKI KARÁN 2021-2022

### A BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék szervezésében induló négy féléves kurzusra várjuk az érdeklődő kollégák szíves jelentkezését

A betonnal szembeni fokozott elvárások (pl. nagy szilárdság, tartósság, veszélyes hulladékok tárolása stb.), a speciális igényeket kielégítő betonok kifejlődésének és az európai szabványok megjelenésének hatására a betontechnológia jelentősége egyre nagyobb hangsúlyt kap és érdeklődésre tart számot napjainkban.

A BME ÉMK *Építőanyagok és Magasépítés Tanszék* a diplomával záruló **Betontechnológus Szakirányú Továbbképzése** a betontechnológia körébe tartozó legújabb ismeretek átadásával kívánja segíteni a praktizáló kollégákat. Saját, jól felfogott érdekében minden cégnek rendelkeznie kell jó betontechnológussal.

A továbbképzés célja, hogy a résztvevők megszerezzék a legfrissebb betontechnológiai ismereteket. Ennek érdekében a hallgatók a betontechnológiai módszerek mellett elmélyedhetnek a speciális tulajdonságú betonok témakörében, a betonalkotók anyagtanai kérdéseiben, az építőanyagok újrahasonosításában, a környezetvédelmi kérdésekben, a betonstruktúra elemzésében és annak hatásában a tartósságra, a diagnosztika nyújtotta lehetőségekben – aminek eredményei megfelelő javítási vagy megerősítési mód kiválasztását teszik lehetővé, a mély és magasépítési szerkezetek betontechnológiai szempontból jelentős tervezési és kivitelezési kérdéseiben –, a betongyártás és előregyártásban, a minőségirányítás és minőségbiztosítás módszereiben, valamint áttekintést kapnak a vasbetonépítésben megjelent legújabb anyagokról is a tanfolyamon.

Mindezen ismereteknek még fokozottabb jelentősége van az MSZ EN 206:2014 európai betoni szabvány és az MSZ 4798:2016 *“Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei Magyarországon”* szabvány megjelenése óta.

A tananyag egymásra épülő rendszerben áttekinti a betontechnológiához szükséges összes ismeretanyagot, valamint a hozzájuk kapcsolódó jogi, gazdasági és vezetélméleti kérdéseket.

A négy féléves képzés (legalább szakirányú BSc diplomával) levelező rendszerben történik – félévenként 3-3 konferenciahét általában hétfő 10.00-tól csütörtök 16.00-ig – amely az utolsó félévben szakdolgozat készítéssel zárul.

*A következő tanfolyam kezdete:* 2021. március 22.

*Jelentkezési határidő:* 2021. március 22.

*A jelentkezéshez kérjük csatolnia:*

- a végzettséget igazoló oklevél másolatát,
- szakmai önéletrajzot.

További információ, ill. kérdés esetén forduljon Sánta Ildikóhoz (tel: (1) 463-4068, e-mail: [titkars@eik.bme.hu](mailto:titkars@eik.bme.hu)).

A tanfolyam részletes leírása és a jelentkezési lap a

<http://www.em.bme.hu/em/betontechnologus> internetes oldalon található.

*Dr. Balázs L. György tanfolyamvezető tanár*  
[balazs.gyorgy@epito.bme.hu](mailto:balazs.gyorgy@epito.bme.hu)

# CPRF-SZERKEZET ÁGYAZÁSI- ÉS RUGÓ-MEREVSÉGEINEK MEGHATÁROZÁSA KLASZTERANALÍZIS SEGÍTSÉGÉVEL



<https://doi.org/10.32969/VB.2020.4.2>

Kanizsár Szilárd

*A cölöpökkel kombinált alaplemezek számítása speciális geotechnikai végeelem-szoftverrel, térbeli modellezéssel és fejlett talaj-anyagmodellek használatával végezhető, ugyanakkor az alapozás a felszerkezet tervezésekor rendszerint megjelenik a szerkezettervező szoftver modelljében is. A szerkezettervezéshez kifejlesztett végeelem-szoftverek legkevésbé fejlett része a talajok modellezésére szolgáló eszköztár. Szükség van olyan módszerre, amellyel meghatározhatók a szerkezettervező szoftver talajmodellezéshez használt input-paraméterei annak érdekében, hogy a geotechnikai szoftverrel számított, a valóságos talajviselkedést leginkább megközelítő eredményeket a szerkezettervező szoftver is produkálni tudja. A talpfeszültség-eloszlás csak elegendően nagyszámú ágyazási merevség megadásával vezethet helyes eredményre a feszültségek lemezperemeken és lokális terhelések alatt jelentkező csúcserkéi miatt. A cikkben ismertetett módszer a klaszteranalízis alkalmazásával lehetőséget nyújt arra, hogy szerkezettervező szoftverben gyakran felületesen kezelt altalaj-modellezést lényegesen és innovatív módon javítsuk, az adatbeviteli munka mennyiségét pedig számottevően csökkentsük.*

**Kulcsszavak:** CPRF, ágyazási merevség, cölöprugó-merevség, klaszteranalízis, végeelemes-modellezés

## 1. PROBLÉMAFELVETÉS

Budapesten jelenleg kivitelezés alatt áll a jövőben várható toronyházépítések úttörő projektjének számító, 143 m magasúra tervezett MOL-Campus irodaház (Hudacsek, Kanizsár, Koch, Szepesházi, Szilvágyi, Wolf, 2020). A tervezett program indokot adott a toronyházak alapozására irányuló kutatásoknak. Az alkalmazható alapozási rendszerek feltárása alapján rámutattam, hogy a toronyház-szerkezetek alapozását cölöpökkel kombinált lemezalappal célszerű kialakítani (Kanizsár, 2017).

A nemzetközi szakirodalomban CPRF-ként (*combined pile raft foundation*) emlegetett alapozási rendszer kedvező, ámde komplex, erőjátéka a konvencionális mérnöki számításokkal nehezen követhető. Méretezésükre vonatkozó szabványok nem állnak rendelkezésre, legfeljebb általános útmutatásokkal szolgáló tervezési irányelvek léteznek (pl. Katzenbach és Choudhury, 2013). Számításuk ezen útmutatóban rögzített elvek szerint végrehajtott végeelemes-modellezéssel lehetséges, amihez szorosan igazodó talajvizsgálati program is tartozik. A teherbírás-igazolás részét képezi az egyes terhelési szinteken kialakuló deformációk meghatározása is, amihez nélkülözhetetlenek a fejlett anyagmodellekkel dolgozó speciális geotechnikai FEM-szoftverek.

A szerkezettervezési gyakorlat érthető módon a felszerkezeti modell részeként tekint a CPRF-szerkezetre. Alapvető problémát jelent azonban, hogy a szerkezettervező szoftverek altalaj-modellezése a geotechnikai szoftverekéhez képest eltérő elvi alapokon nyugszik. A lemezágyazási- és cölöprugó-merevségekkel modellezett kombinált alapozási szerkezet elmozdulásai és igénybevételei csak akkor tudják kis eltéréssel megközelíteni a realisztikus talajmodellekkel dolgozó geotechnikai szoftverek eredményeit, ha ezen input-paraméterek megválasztásával szimulálni tudjuk a geotechnikai modell talpfeszültség-eloszlását (Bak, Koch, Palotás, Szepesházi, 2010). Mivel ez nem konstans, hanem pontról-pontra – hol kisebb, hol nagyobb mértékben – változik, a szerkezettervező szoftver ágyazási- és rugómerevségeit is ezekhez igazodóan, eltérő értékekkel kellene megadni. Ez jelentős mennyiségű adatbevitelt jelent már egy közepes méretű alaplemez esetében, ami a gyakorlat számára megterhelő. Az ágyazási- és rugómerevség értékek különféle közelítő számításokkal és egyszerűsített feltételezésekkel történő becslése, valamint azoknak a talpfeszültség-eloszlás változékonyságához képest túlzottan csekély száma miatt a szerkezettervező szoftverrel kapott számítási eredmények sok esetben jelentősen eltérnek a geotechnikai szoftverrel számított eredményektől (Kanizsár, 2020).



A cikkben ezen eljárásokhoz képest korszerűbb eszközökkel elérhető, pontosabb módszert mutatok be. Nemzetközi szinten zajlanak hasonló célú szoftverfejlesztések, de ezek tudományos igényességgel nincsenek publikálva. Az alapfogalmak hasonlóságán túl azonban az itt bemutatott módszer további újszerűsége a matematikai statisztikából ismert, de az építőmérnöki gyakorlatban kevésbé alkalmazott klaszteranalízis alkalmazása, mely lehetőséget nyújt az ágyazási merevségek adatszámának erőteljes csökkentésére.

## 2. A KLASZTERANALÍZIS ISMERTETÉSE

### 2.1 A klaszteranalízis alapelve

Az adatredukciós statisztikai módszerek lényege az, hogy egy adatmárixon olyan méretcsökkentést hajtunk végre, ami után a redukált adatmennyiségből levont statisztikai következtetések érvényesek maradnak az eredeti statisztikai sokaságra is. Számos ilyen eljárás mellett (pl. faktoranalízis, diszkriminancia-analízis) a klaszteranalízis is ebbe a csoportba tartozik.

A klaszteranalízis azoknak a dimenziócsökkentő eljárásoknak a gyűjtőneve, amelyek segítségével adathalmazok elemeit tudjuk bizonyos tulajdonságok alapján csoportokba, klaszterekbe rendezni. A klaszteranalízis, röviden klaszterezés alapvető jellemzői a kohézió, illetve a szeparáció. A kohézió az egyes klasztereken belüli adathomogenitást fejezi ki: minél kisebb a klaszterelemek eltérése egymástól, illetve a klaszterátlagtól, a kohézió annál erősebb. Analóg módon, minél nagyobb az egyes klaszterek közötti eltérés, vagyis minél jobban elkülönülnek a klaszterezési szempontok alapján kialakított csoportok egymástól, a szeparáció annál nagyobb. A két elv együttes érvényesülése stabil klaszterstruktúrát eredményez, ezáltal a sokkal kevesebb adat bizonyos matematikai és statisztikai jellemzői megegyeznek az eredetileg nagy méretű adathalmazra vonatkozó azonos jellemzőkkel. A klaszterezés előnye éppen abban rejlik, hogy úgy tudunk sokkal kevesebb adattal dolgozni (ezáltal időt, munkát és számítási kapacitást megtakarítani), hogy a kisebb adathalmaz statisztikai jellemzői reprezentálják az eredetileg nagyméretű adatállományt.

### 2.2 A klaszteranalízis módszerei

Számos klaszterezési eljárás létezik, melyeket két fő csoportba lehet sorolni: hierarchikus és nem hierarchikus algoritmusok. A hierarchikus klaszterezésben az új klasztereket az előzőleg kialakított klaszterek összevonásával (agglomeratív) vagy felosztásával (divizív) kapjuk. A másik algoritmus egyetlen lépésben alakítja ki az összes klasztert. Mivel az utóbbi klaszterezési eljárás előnyösebben alkalmazható a kiugró értékekre való kisebb érzékenysége, valamint a nagyobb sebessége miatt, ezért ezt választottam. A nem hierarchikus klaszterezési módszerek közül pedig a leginkább elterjedt centroid alapú, úgynevezett K-közép (*K-means*) eljárás alkalmazását tartottam célszerűnek, amit a jól kihasználható előnyei (pl. nagyméretű adatmárixhoz megfelelő, egyszerű, gyors) és a jelen feladat szempontjából kevésbé hangsúlyos hátrányai (pl. beépített metrika, előre megadott klaszterszám) indokoltak. A K-közép klaszteranalízis ismertetése előtt szükséges rögzíteni, hogy a klasztereken belüli, illetve klaszterek közötti távolság mérésére az általános Minkowski-metrika használatos:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ és } Y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in R^n$$

$$D(X, Y) = \left( \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

ahol  $p \geq 1$  : a Minkowski-konstans ( $p = 2$  esetén kapjuk az Euklideszi-távolságot).

### 2.3 A klaszterszerkezet kialakítása K-közép módszerrel

A K-közép klaszterezési eljárás matematikai megfogalmazása a következő:

Adott egy  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  adathalmaz, amelyben minden egyes változó egy  $d$ -elemű vektor. A K-közép klaszterezés célja az  $n$  db adattömböt  $k$  ( $k \leq n$ ) db klaszterből álló  $C = (C_1, C_2, \dots, C_k)$  adatscsoportba besorolni úgy, hogy a klasztereken belüli elemek átlagtól való eltéréseinek négyzetösszege minimális legyen. A minimalizálandó célfüggvény:

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2 = \sum_{i=1}^k |C_i| \text{Var } C_i$$

ahol  $\mu_i$  a  $C_i$  elemeinek átlagértéke.

Az egyszerű algoritmus a kezdőlépés utáni további két lépés alternáló ismétlődéséből áll, a folyamat pedig addig tart, amíg az elemek már nem váltanak klasztert:

- Felveszünk  $k$  db kezdő klaszter középpontot:  $m_1^{(t)}, \dots, m_k^{(t)}$ .
- Minden elemet a hozzá Euklideszi-távolság alapján legközelebb lévő klaszter-középpontnak megfelelő klaszterbe sorolunk:

$$C_i^{(t)} = \{x_p : \|x_p - m_i^{(t)}\|^2 \leq \|x_p - m_j^{(t)}\|^2 \forall j, 1 \leq j \leq k\},$$

Minden  $x_p$  egyetlen klaszterbe kerül besorolásra, még akkor is, ha két vagy több másikba is kerülhetne.  $(t)$  az algoritmus aktuális lépésszáma.

- Újra számoljuk a klaszter középpontokat:

$$m_i^{(t+1)} = \frac{1}{|C_i^{(t)}|} \sum_{x_j \in C_i^{(t)}} x_j$$

### 2.4 Klaszterszerkezet validitásának mérése és a célszerű klaszterszám meghatározása

A klaszterek célszerű számát előzetesen végzett hierarchikus klaszterezéssel is meg lehet állapítani, én azonban egy klasztervaliditási indexet választottam erre a célra, az úgynevezett sziluet-együtthatót (sziluet-index néven is emlegetik). Számos ehhez hasonló mérőszám létezik, amelyekkel a klaszterezés „jószágát”, azaz a klaszterstruktúra erősségét, ezáltal az alkalmazott klaszterszám helyességét meg lehet ítélni (*Szűle, 2019*). A sziluet-együttható használata mellett érvként az szolgál, hogy ez – szemben más klasztervaliditási indexekkel – nem hierarchikus klaszterezési eljárás esetében is használható, a kohéziót és a szeparációt egyszerű módon méri, és algebrai kifejezés eredményeként, nem pedig grafikus úton (mint pl. a klaszterkönyök-mutatószám) határozható meg. Az alábbiak szerint számítható:

Jelölje  $a(i)$  az  $x_i$  elem saját,  $C_i$  klaszteren belüli átlagos távolságát más elemektől:

$$a(i) = \frac{\sum_{j: x_j \in C_i, j \neq i} d(x_i - x_j)}{|C_i| - 1}$$

$\bar{C}$  jelentse a  $C_i$  klaszteren kívüli klaszterek halmazát, melynek elemeit  $K$ -val jelöljük.

$\forall K \in \bar{C}$  klaszterre

$$d(x_i, K) = \frac{\sum_{j: x_j \in K} d(x_i - x_j)}{|K|}$$

, vagyis meg kell határozni az adott  $x_i$  elem más klaszterek összes  $x_j \in K \in \bar{C}$  elemétől vett átlagos távolságát, majd ezek közül a minimumot, melyet jelölje  $b(i)$ :

$$b(i) = \min_{K \in \bar{C}} d(x_i, K)$$

Az  $s(i)$  sziluett-értékek ezekkel a következő módon definiálhatók (Rousseeuw, 1987):

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}$$

Azt a  $K^* \in \bar{C}$  klasztert, amelyre a  $d(x_i, K^*)$  távolságnál már csak a minimumot jelentő  $b(i)$  kisebb,  $x_i$  szomszédjának, vagyis a második legjobb klaszternek nevezzük, amelybe  $x_i$  kerülhetett volna.

A klaszterezés után a klaszterek elemeire  $s(i)$  értékei számíthatók. Az értékek  $[-1, 1]$  intervallumban mozognak, és az alábbi következtetések vonhatók le:

- ha  $s(i) < 0$ , akkor  $x_i$  vélhetően rossz klaszterbe került, közelebb esik  $K^*$ -hoz, mint  $C_i$ -hez;
- ha  $s(i) \approx 0$ , de  $s(i) > 0$ , akkor  $x_i$  a  $K^*$  és  $C_i$  klaszterek között helyezkedik el;
- ha  $s(i) \approx 1$ , akkor  $x_i$  a megfelelő klaszterbe került.

A klaszterezést minősítő  $SC$  (silhouette coefficient) sziluett-együttható a sziluett-értékek átlaga:

$$SC = \frac{\sum_{i: x_i \in C} s(i)}{|C|}$$

, ahol  $|C| = |C_i \cup \bar{C}| = k$ . Ennek alapján

- ha  $SC \in [0.71, 1]$ , akkor a klaszterszerkezet erős,
- ha  $SC \in [0.51, 0.7]$ , akkor a klaszterszerkezet megfelelő,
- ha  $SC \in [0.26, 0.5]$ , akkor a klaszterszerkezet gyenge,
- ha  $SC \leq 0.25$ , akkor nem beszélhetünk valódi klaszterszerkezetről.

## 3. AZ ÚJ SZÁMÍTÁSI MÓDSZER ÁTTEKINTÉSE

### 3.1 A módszer alapelve

A CPRF-szerkezetre vonatkozó eredményeket a Plaxis 3D-ben számolt teljes épületmodellből nyerem, ezeket referencia-értékeknek tekintem. Egy másik FEM-szimulációban ugyanazon építmény szerkezet-tervező szoftverrel létrehozott modelljének ágyazási- és rugómerevségeit egy több lépésből álló javítási (approximációs) folyamat során úgy kalibrálom, hogy a CPRF-szerkezetre kapott süllyedések a referencia-értékekkel megegyezzenek, illetve azokat egy előzetesen elfogadott és rögzített hibaértéken belül közelítsék. A szerkezet-tervező szoftverrel elsődleges cél a Plaxis 3D-ben kapott süllyedéskép előírt pontosságú előállítás. (Süllyedéskép alatt általánosságban az alaplemez és talaj közös síkjának az

összetartozó, egymással egy alakváltozási rendszert alkotó eltolódások és elfordulások által meghatározott deformációs alakját értem. A fogalmat az 5. fejezetben még tovább pontosítom.)

Ez a Plaxis 3D süllyedésértékeiből – mint a szerkezet-tervező modellre közvetett módon előírt kinematikai teherből – számítható ágyazási- és rugómerevségek alkalmazásával érhető el. Ezek a Plaxis 3D modellből közvetlenül, csomópontként számolható mennyiségek, mint input-paraméterek jellemzően nagy adathalmazt alkotnak, melynek mérete azonban javítási lépésként klaszteranalízis alkalmazásával jelentősen csökkenthető. Következésképpen a két modell azonos globális és lokális szerkezeti merevsége, valamint egyező külső terhei esetén ugyanazon elmozdulások egyforma igénybevételeket eredményeznek. Mindezek alapján a módszer lényege tömören úgy foglалható össze, hogy a keresett CPRF-input paraméterek a szerkezet-tervező modell Plaxis 3D referencia-modellhez való kinematikai hangolása útján meghatározhatók, és ez a klaszteranalízis által redukált input-adathalmaz a gyakorlati számítások során kezelhető méretű.

## 3.2 Az alkalmazásra vonatkozó alapfeltevések és követelmények

### 3.2.1 Geometria

A geotechnikai, illetve a szerkezet-tervező szoftverekkel létrehozott FEM-modellek talajon álló, felszerkezeti részei geometriai értelemben azonosak. Az azonosság az alkalmazott rúd- és felületelemekből álló teljes felszerkezeti modellre értendő. Ha a felszerkezet bizonyos részeit rúd- és felületelemek helyett térfogatelemekkel modellezik, akkor a megkövetelt geometriai azonosság a rúdtengelyekre és középsíkokra vonatkozik. A végelem hálózatok teljes geometriai egyezősége nem feltétel.

### 3.2.2 Végelemek

A két modell által használt elemek típusainak egyezősége nem, de csomópontjaik szabadságfokainak azonossága feltétel. A lemezszerkezetek elemeire vonatkozóan a Mindlin-féle nyírási deformációkat is figyelembe vevő elméletet tekintem érvényesnek. Plaxis 3D-ben alkalmazhatók térfogatelemek is, a feltételeknek megfelelő látszólagos, ún. „dummy” lemez és/vagy rúdelemek együttes használatával.

### 3.2.3 Terhek és hatások

A CPRF-szerkezeteket függőleges irányú terhelésekre vizsgálom. Nem foglalkozom a vízszintes irányú hatások és ágyazások kérdésével, illetve a lemez síkjára merőleges irányú nyomatékvektorral azok alárendelt jelentősége miatt. Ágyazási merevségen ezért innentől kezdve a függőleges ágyazási merevséget értem, a cölöprugók elfordulási merevsége pedig csak a lemez síkjába eső (vízszintes) tengelyek körüli elfordulásokhoz tartozó merevséget jelenti.

A teheresetekből képzett, SLS-, illetve ULS-határállapotok vizsgálatához tartozó teherkombinációk mindegyike elméletileg egy-egy külön analízist igényel, hiszen teherkombinációnként eltérő talpfeszültség-eloszlások és süllyedések keletkeznek. A tervezési gyakorlatban szerkezet-tervezési oldalról és geotechnikai szempontból is mérlegelendő, melyek a külön vizsgálatot igénylő, jellemző, illetve kritikus

teherkombinációk. A süllyedésszámítás az SLS határállapot-vizsgálatok részét képezi, amit kvázi-állandó teherkombináció alapján kell végezni. Ez ad leginkább jellemző értékeket egy szerkezet valóságban mérhető elmozdulásait illetően, így vizsgálati alapkombinációnak ezt tekintem. A módszer természetesen más teherkombinációkra változatlan formában alkalmazható.

### 3.2.4 Mechanikai és szilárdságtani alapfeltevések

A felszerkezeti modellek anyagmodelljei azonosak. Ez akár betonra, akár acélra nézve lineárisan rugalmas anyagmodellt jelent. Feltételezzük, hogy a két modellből nyert azonos süllyedések esetén a felszerkezeti modellek tényleges erő- és elmozdulásrendszerei azonosak, hiszen a kinematikailag lehetséges, egymással azonos elmozdulásrendszereket az egyező anyagegyenletek csak egymással azonos, statikailag lehetséges erőrendszerekkel kapcsolhatják össze (Kaliszky, 1990).

### 3.2.5 Alapozási szerkezet

A geotechnikai szoftverben a CPRF-szerkezet cölöpjei a talajba ágyazott, térfogatelemekkel vagy a cölöpmodellezésre kifejlesztett speciális rúdelemekkel modellezett szerkezetek (*embedded beam*), melyekben normálerők és hajlítónyomatékok működhetnek. A cölöpök a lemezhez nyomatékbíró módon csatlakoznak. A CPRF-szerkezet erőjátéka a szerkezettervező szoftverben lineáris, függőlegesen összenyomódó, illetve egymásra merőleges tengelyek körül elforduló spirálrugókkal modellezhető. Ezekkel a rugókkal a cölöpfejek csomópontjaiban keletkező és lemezre ható normálerőket és nyomatékokat szimulálom. Függőleges cölöpéreként a cölöpökben működő, változó nagyságú normálerő cölöpfejnél érvényes értékét tekintem, mivel közvetlenül ez az erő okoz igénybevételt a lemezen.

### 3.2.6 Talaj

A geotechnikai szoftver anyagmodelljeinek feltevésén túl egyéb kiegészítéseket nem szükséges tenni. A modellezett talajrétegződést tetszőleges számú, fajtájú és térbeli kiterjedésű talajréteg alkothatja. Az SSI (*soil structure interaction*), vagyis a talaj és szerkezet közötti kölcsönhatás szempontjából releváns sík a két különböző szoftver által modellezett talajzóna közös része. Ez a szerkezettervező szoftver alaplemez modellező felületelemei által definiált sík, mely felület-szerkezet modellezése esetén egyrészt annak középsíkját, másrészt a lemez és a talaj érintkezési felületét jelenti. Bár a cölöpök a valóságban a lemez alatti talajközegbe ágyazott szerkezetek, a szerkezettervező szoftverben a cölöpöket modellező rugók az említett síkban helyezkednek el, ahol az erőátadás a modellezés során megvalósul.

## 3.3 A módszer fő lépései

A módszer lépéssorozata a következő (egyres fogalmakat a következő fejezetben adom meg):

- referencia modell létrehozása Plaxis 3D-ben, közös, úgynevezett illesztési hálóval kialakítva,
- ekvivalens modell létrehozása a szerkezettervező szoftverben, illesztési hálóval kialakítva,
- referencia értékek meghatározása Plaxis 3D-ben,

- ágyazási- és rugómerevségek kiindulási értékeinek felvétele,
- ágyazási- és rugómerevségek klaszterezése,
- optimális klaszterszám meghatározása szilutt-együtthetők módszerével,
- szerkezettervező szoftver modelljének futtatása az optimális klaszterszámú ágyazási- és rugómerevség megadása után,
- szerkezettervező szoftver eredményeinek értékelése a referencia-süllyedések alapján,
- hibaelemzés alapján döntés a befejezésről vagy a folytatásról,
- folytatás esetén az ágyazási- és rugómerevségek javítása a relatív hibák alapján,
- javítási lépés indexének növelése 1-gyel, ismétlés a kiindulási értékek felvételétől.

## 4. A MÓDSZER ALAPELEMEINEK ISMERTETÉSE

### 4.1 A Plaxis 3D referencia-modellje

#### 4.1.1 Modellalkotási elvek

A geotechnikai feladatok térbeli végeselem-analízisére alkalmas Plaxis 3D szoftverben létre kell hozni a vizsgált szerkezet teljesértékű modelljét. A teljesértékűség esetünkben azt jelenti, hogy a talajkörnyezet és a felszerkezet modellezését a valós geometriával, terhelésekkel és realisztikus anyagmodellek alkalmazásával végezzük. Az épületet nem bontjuk részekre sem geometriai, sem erőtanai értelemben (pl. alaplemez felső síkjában történő átvágás), hanem a teljes szerkezet komplex modelljéből nyerjük ki a vizsgálni kívánt szerkezeti elem eredményeit. Az elkülönített modellezéssel szemben ennek az eljárásnak az az előnye, hogy a részekre bontás mellőzésével kiküszöbölhetjük a teherátvitel során keletkező hibákat (pl. akció- és reakcióerők kezelése kényeszerű átlagolással, kiugró értékek redukálásával, igénybevételek simításával, stb.), a talaj és az épület valós merevségével számolhatunk az analízis minden lépésében, valamint egyező felszerkezeti modellekkel jutunk el a keresett eredményekig. Így az eljárás igazodik ahhoz az alapvetéshez, melyet számosan (Lee és Brown, 1972; Brown és Yu, 1986; Zhang és Small, 1994; Poulos, 2016) megfogalmaztak: a felszerkezetből származó merevítő hatás és a relatív süllyedések közötti összefüggés alapvető jelentőségű. A gyakorlatban ez csak úgy valósítható meg, hogy a geotechnikai szoftver – hasonlóan a Plaxis 3D-hez – alkalmas a felszerkezet megfelelő modellezésére.

#### 4.1.2 A szerkezeti elemek modellezése

A Plaxis 3D szoftverben a CPRF-szerkezet modellezése lemezelemek és speciálisan cölöpmodellezésre fejlesztett, talajba ágyazott rúdelemek (*embedded beam*) kombinálásával végezhető. Emellett lehetőség van a szerkezet valódi térfogatelemekkel történő modellezésére is akár a cölöp, akár a lemez esetében. Ez bizonyos megkötések mellett a fűrt cölöpök realisztikusabb modellezését teszi lehetővé, vagy akár a szerkezeti kapcsolatok térbeli feszültségállapotának analízisére is szolgálhat. Modellezési korlátot például az építési technológia teherbírást befolyásoló hatása, vagy éppen a szerkezeti elemek nagy száma jelenthet. Az igénybevételek kinyeréséhez azonban térfogatelemek használatakor is szükséges a felületszerkezet középsíkjában definiált látszólagos, ún.

„dummy plate” lemezelemek, illetve a cölöptengelyben létrehozott „dummy beam” rúdelemek alkalmazása. A lemez és a talaj közötti interakció, illetve a relatív elmozdulás lehetősége interfész elemek alkalmazásával biztosítható.

#### 4.1.3 Szerkezeti kapcsolatok

A cölöp és alaplemez közötti szerkezeti kapcsolatot nyomatékbíróként feltételezem. Ez természetesen a vasalástól és a szerkezeti kialakítástól függ, de az általános feladatmegfogalmazás céljából a cölöpökre ható normálerők mellett a lemezről átadódó hajlítónyomatékok vizsgálatával is foglalkozom. Értelemszerűen az elfordulási cölöpmerevségek zérus értéke esetén a CPRF egy speciális esetéhez, a csak normálerőkkel terhelt cölöpök esetéhez jutunk. További speciális esetnek tekinthető a cölöpök nélküli alaplemez (*RF – raft foundation*) ágyazási merevségeinek meghatározása. A módszer azokra a kombinált alapozási szerkezetekre is használható, melyeknél a lemez és a mélyalapozási szerkezetek között nincs szerkezeti kapcsolat (*NCPRF = non-connected pile raft foundation*), sőt az alkalmazhatóság kiterjed a lemez és a cölöpök között teherközvetítő réteggel kialakított *rigid inclusion* rendszerű alapozásokra is (Kanizsár, 2019).

#### 4.1.4 Az illesztési háló fogalma – feszültségpontok és csomóponti süllyedések

A Plaxis 3D modell, valamint a szerkezettervező szoftver CPRF-modelljeinek csomóponti geometriáját össze kell hangolni annak érdekében, hogy az egyes csomópontok eredményei közvetlenül összehasonlíthatók legyenek, valamint a Plaxis 3D outputja közvetlen inputként legyen felhasználható a szerkezettervező szoftverben. Természetesen az azonos alaprajzokon belül nincs szükség tökéletesen azonos alaprajzi osztású végeselem hálókra, de előre definiált koordinátákkal létre kell hozni egy-egy olyan „háló a hálóban” ponthálózatot, melyek pontjainak koordinátái egymással megegyeznek, és részei egyik, illetve másik szoftver végeselem hálózatának is. Ennek részletezése előtt szükséges bevezetni a felülettartomány fogalmát, amely a szerkezettervező szoftverben több azonos tulajdonságú felületelem egyesítésével hozható létre, és speciálisan az egy elemből álló felülettartomány is értelmezhető.

Plaxis 3D-ben kétdimenziós lemezelemekkel definiált alaplemez  $m$  db csomópontból álló hálójának geometriáját  $\underline{P}$  vektorral definiáljuk, amely  $m$  db blokkra osztva blokkonként tartalmazza a csomóponti koordinátákat. Jelöljük  $A$ -val azt a halmazt, amely tartalmazza  $\underline{P}$  összes elemét. Hasonlóan a szerkezettervező szoftverben  $Q$  az  $n$  csomópont által alkotott háló vektora,  $B$  pedig az a halmaz, amely tartalmazza  $Q$  elemeit.

$$\underline{P} = \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix} \text{ és } A = \{p_i \mid i = 1 \dots m, m \in \mathbf{N}\},$$

$$\text{valamint } Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \text{ és } B = \{q_j \mid j = 1 \dots n, n \in \mathbf{N}\}$$

$\underline{P}$  és  $Q$  egyező koordinátájú csomópontjait tartalmazó  $\underline{H}$  vektor  $k$  db blokkját a  $C$  jelű halmaz elemeiből képezzük, melyet  $A$  és  $B$  közös részeként definiálunk:

$$C = A \cap B = \{\underline{h}_l \mid l = 1 \dots k, k \in \mathbf{N}\} \Rightarrow$$

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_k \end{bmatrix}, m > k < n.$$

A  $\underline{H}$  vektor elemei által kifeszített, másodlagos finitizálás útján kialakított hálót a továbbiakban illesztési hálónak nevezem, megkülönböztetve az egyik, illetve másik szoftver tényleges végeselem hálójától. Az illesztési háló csomóponti koordinátáinak meghatározásakor figyelemmel kell lenni arra, hogy a szerkezettervező szoftverben egy felülettartomány átlagos ágyazási merevségének értékét annak alaprajzi súlypontjában lehet megadni. A csomóponti feszültség és süllyedés értékeiből számítható ágyazási merevséget a Plaxis 3D azonos koordinátájú pontjának eredményeiből lehet csak kinyerni. Ezért minden olyan pontban, ahol a szerkezettervező szoftverben felülettartományra vonatkozó ágyazási merevséget kívánunk megadni, rendelkezünk kell Plaxis 3D csomóponttal is. Az illesztési háló csomópontjainak egymástól való távolsága, azaz a hálósűrűség megválasztása szubjektív döntés eredménye, de a végeselem háló geometriájának általános kialakítási elveihez hasonlóan természetesen bizonyos szempontokat figyelembe kell venni. Így például a CPRF-szerkezet alaprajzi kiterjedését, a lemezvastagságot, az egyedi cölöpök távolságát, a cölöp csoportokon belüli cölöptengely távolságokat, a pillérek és falak pozícióit. Általános megállapítás, hogy az illesztési háló sűrűségének növelése pontosabb illesztést tesz lehetővé a két szoftver alakváltozási és igénybevételi eredményei között, különösen az erőteljesebben változó függvényértékek környezetében.

## 4.2 A szerkezettervező szoftver modellje

### 4.2.1 A ponthálózat geometriai illesztése, felületi tartományok

A lemez modellezése felületelemekkel történik, melyek Winkler-típusú rugalmas ágyazású talajoldali megtámasztást kapnak. A finitizált tartományt azonos tulajdonságú végeselemek összevonásával képzett felülettartományokra célszerű felosztani. A felületi tartományok geometriájának meghatározásakor szem előtt kell tartani azt, hogy az összevont felületelemeknek azonosak az ágyazási merevségei. Ezt az átlagos értéket a felülettartomány súlyponti csomópontjában lehet megadni, mely érvényes a tartomány minden egyes felületi elemére.

A szerkezettervező szoftver által is használt illesztési háló természetesen kell, hogy tartalmazza azokat a csomópontokat is, amelyek koordinátái azonosak a Plaxis 3D szoftverben definiált cölöpök alaplemezzel közös csatlakozási pontjaival.  $\underline{H}$  vektor két külön blokkra bontható. Az egyik blokkot jelölje  $\underline{H}_L$ , ez a  $k_L$  db felülettartományi súlyponttal azonos számú csomópontot tartalmaz. A felülettartományokra vonatkozó átlagos ágyazási merevségek megadása a  $\underline{H}_L$  vektor által tartalmazott csomópontokban lehetséges. A másik blokk  $\underline{H}_C$ , ez a rugókkal modellezett cölöpök  $k_C$  db csomópontjának koordinátáit foglalja magában:

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} \underline{H}_L \\ \underline{H}_C \end{bmatrix} \text{ és } k = k_L + k_C, \text{ ahol}$$

- $k$  a  $\underline{H}$  vektor blokkjainak, vagyis az illesztési háló csomópontjainak száma;

- $k_L$  az alaplemez felülettartományainak száma;
- $k_C$  a cölöpök száma.

Szükséges definiálni  $\underline{X}$  és  $\underline{Y}$  koordináta-vektorokat, melyek a  $\underline{H}$  vektor csomópontjainak  $x$ , illetve  $y$  koordinátáit tartalmazzák. Minkettő felbontható két blokkra a lemez-, illetve a cölöpcsomópontok alapján:

$$\underline{X} = \begin{bmatrix} \underline{X}_L \\ \underline{X}_C \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_L \\ \underline{Y}_C \end{bmatrix}$$

Természetesen nem elvárható, hogy – különösen nagy alaprajzi kiterjedésű lemezek esetén – több száz, vagy akár több ezer pontban egyenként definiáljuk az ágyazási merevségeket a Plaxis 3D eredményei alapján. Az ágyazási merevségek megfelelő módon lecsökkentett darabszámának megállapítása ezért a módszer egyik kulcsfontosságú lépése. Az ismertetés későbbi szakaszában részletesen írok arról, hogy miként lehet matematikai eszközökkel megválasztani a különböző értékű ágyazási merevségek  $k_{opt} \ll k$  optimális darabszámát annak szem előtt tartásával, hogy a szerkezettervező szoftverrel kapott süllyedéskép lényegileg egyezzen a Plaxis 3D süllyedéskép fogalmát ezek után annyival kell kiegészíteni, hogy azt az illesztési háló pontjainak halmazán értelmezzük.

#### 4.2.2 CPRF-modellezése függőleges terhelésre

Ágyazási merevségekkel modellező szoftverekben a függőlegesen terhelt CPRF-szerkezetek támaszviszonyai általános esetben négyféle input paraméterrel jellemezhetők: a lemez-alap  $K_z$  ágyazási merevségével, a cölöpök  $R_z$  eltolódási rugómerevségével és a cölöpfejek  $R_{xx}$ , illetve  $R_{yy}$  elfordulási rugómerevségeivel. Utóbbi két elfordulási merevséget a tervezési gyakorlat sok esetben figyelmen kívül hagyja, egyszerűsítve ezzel a feladatot, pedig ez elvi hibát jelent. A Mindlin-féle lemezelmélet szerinti  $\underline{u}$  elmozdulások ugyanis a függőleges eltolódásfüggvény mellett a belőle közvetlenül le nem származtatható elfordulásfüggvényekkel együtt írhatók le (Bojtár és Gáspár, 1992).

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} w(x, y) \\ \varphi_x(x, y) \\ \varphi_y(x, y) \end{bmatrix}$$

A cölöp-lemez csatlakozási pontokban a lemezelfordulások a cölöpfejek elfordulásaival összetartozóan értelmezendők, melyek a cölöpök hajlítási merevségeitől, hosszaitól, illetve a talajtól, mint ágyazó közegetől függenek. Utóbbiak határozzák meg az elfordulási merevséget, ami például egy nagy átmérőjű cölöpből álló cölöpcsoport esetén jelentős hatással bír akár egy vastag alaplemez elfordulásaira is.

#### 4.2.3 Ágyazási- és rugómerevségek

A végeelem módszer a szilárdságtanból ismert elmozdulás módszert használva közvetlen eredményként csomóponti elmozdulásokat szolgáltat. Az  $\underline{s}$  vektor tartalmazza a  $\underline{H}$  vektor csomópontjainak süllyedéseit. A későbbi mennyiségek definiálhatósága érdekében  $\underline{s}$ -et  $\underline{H}$ -hoz hasonlóan két blokkra bontjuk a felülettartományok, valamint a cölöprugók csomópontjainak megkülönböztetése érdekében:

$$\underline{s} = \begin{bmatrix} \underline{s}_L \\ \underline{s}_C \end{bmatrix}$$

Az ágyazási- és rugómerevség definíciói szerint azok erő jellegű mennyiségek egységnyi elmozdulás jellegű mennyiségekre jutó hányadosai:

$$\underline{K}_{z,i} = \frac{\underline{\sigma}_{z,i}}{\underline{s}_{L,i}}; \underline{R}_{z,j} = \frac{\underline{F}_{z,j}}{\underline{s}_{C,j}}; \underline{R}_{xx,j} = \frac{\underline{M}_{x,j}}{\underline{\varphi}_{xx,j}}; \underline{R}_{yy,j} = \frac{\underline{M}_{y,j}}{\underline{\varphi}_{yy,j}}$$

, ahol

- $\underline{K}_{z,i}$  az ágyazási merevségek vektorjának  $i$ -edik eleme;
- $\underline{\sigma}_{z,i}$  a függőleges hatékony talajfeszültség vektor  $i$ -edik eleme;
- $\underline{s}_{L,i}$  a lemez süllyedés vektorblokk  $i$ -edik eleme;
- $\underline{R}_{z,j}$  a függőleges rugómerevség vektorjának  $j$ -edik eleme;
- $\underline{F}_{z,j}$  a függőleges cölöperő vektor  $j$ -edik eleme;
- $\underline{s}_{C,j}$  a cölöpsüllyedés vektorblokk  $j$ -edik eleme;
- $\underline{R}_{xx,j}$  és  $\underline{R}_{yy,j}$  a cölöpfej elfordulás rugómerevség vektorjainak  $j$ -edik elemei;
- $\underline{M}_{x,j}$  és  $\underline{M}_{y,j}$  a cölöpfej elfordulást okozó nyomaték vektorok  $j$ -edik elemei;
- $\underline{\varphi}_{xx,i}$  és  $\underline{\varphi}_{yy,i}$  a cölöpfej elfordulás vektorok  $j$ -edik elemei;
- $i = 1 \dots k_L$  és  $j = 1 \dots k_C$ .

A módszer lépéseinek részletes leírását tartalmazó 5. pontban megtalálható, hogy az egyes vektorok elemeit javítási lépésként mely modelleredményekből kell képezni.

### 4.3 A referencia-értékek definiálása

A Plaxis 3D-ben a referencia-modellen elvégzett számítással az illesztési háló pontjaira kapott eredményeit referencia-értékeknek tekintem. Ezek közül elsődleges referencia-értékek azok, amelyek alapján a szerkezettervező szoftver modelljének süllyedésképét a referencia-modelléhez hangolom, illetve amelyek alapján az ágyazási- és rugómerevségeket javítási lépésként korrigálom. Másodlagos referencia-értékeként azokat értelmeztem, melyekre nincs közvetlenül szükség a korrekciós folyamat minden egyes lépésében, jellemzően hiba indikátorként, illetve rögzített küszöbértékként használhatók.

Elsődleges referencia-értékek:

- $\underline{s}_{ref}$  a süllyedések
- $\underline{M}_{x,ref}$  és  $\underline{M}_{y,ref}$  a cölöpfej elfordulását okozó nyomatékok

Másodlagos referencia-értékek:

- $\underline{\sigma}_{z,ref}$  a függőleges hatékony talajfeszültségek
- $\underline{F}_{z,ref}$  a függőleges cölöperő
- $\underline{m}_{x,ref}$  és  $\underline{m}_{y,ref}$  lemeznyomatékok
- $\underline{N}_{pillér,ref}$  az alaplemeztől induló pillérek normálerői
- $\underline{M}_{x,pillér,ref}$  és  $\underline{M}_{y,pillér,ref}$  az alaplemeztől induló pillérek nyomatékai

### 4.4 A klaszteranalízis gyakorlati megvalósítása

#### 4.4.1 Az alkalmazás célja

Nagy alaprajzi kiterjedésű CPRF-szerkezetek illesztési hálójára túl sok csomópontot tartalmaz ahhoz, hogy azokat külön, egyesével kezelve végezzük a szerkezettervező szoftver modelljének hangolását. Példaként: egy 100x50 m alaprajzi méretű CPRF lemezének illesztési hálójára 2x2 méteres

osztásközzel 1300-nál is több pontot tartalmaz, amihez 8x8 méteres pillérosztás esetén a pillérek alatti cölöpök/cölöp csoportok száma hozzávetőlegesen 1400 darabra bővíti az adathalmazt. Belátható, hogy ennyi pontban külön ágyazási- és rugómerevség-értéket meghatározni nagyon munka- és időigényes, ezt ráadásul többször kell elvégezni. A módszer modellhangolási (javítási) folyamatában az említett munkamennyiség jelentős csökkentésére a 2. pontban általánosságban ismertetett klaszteranalízis szolgál. Cél ennek alkalmazásával egy olyan  $k_{opt} \ll k$  klaszterszámú, erős ( $SC \approx 0,7$ ) klaszterszerkezetű ágyazási eloszlás kialakítása, ami jelentős adatszőkítés ellenére is meg tudja közelíteni előírt pontossággal a Plaxis 3D-ben kapott süllyedési görpát. Az ilyen klaszterszerkezet kialakítására alkalmas legkisebb klaszterszámot optimális klaszterszámnak nevezem, mely alkalmazása esetén a javítási lépések hibakonvergenciája elfogadható sebességű, jellemzően néhány lépés után a közelítés hibája aszimptotikusan tart kifejezetten a nullához és nem egy attól eltérő hibaküszöbhez. A klaszterezés alkalmazható a cölöpök rugómerevségeire is, de azok felületelemekhez képest általában jóval kisebb száma miatt a módszer haszna elsősorban az ágyazási merevségeknél érzékelhető:

$$k_{opt,L} \ll k_L; \quad k_{opt,C} \leq k_C; \quad k_{opt} \ll k$$

$$\text{és } |\underline{s}_{ref,i} - \underline{s}_i| \rightarrow 0, \quad i = 1 \dots k, \quad \text{ahol}$$

- $k_{opt,L}$  az ágyazási klaszterek optimális száma;
- $k_{opt,C}$  a cölöpugó klaszterek optimális száma;
- $k_{opt} = k_{opt,L} + k_{opt,C}$  az ágyazási klaszterek és cölöpugó klaszterek együttes optimális száma.

#### 4.4.2 A klaszterezés végrehajtásának bemutatása

A kezdeti adatbázis mérete az illesztési háló  $H_L$  blokkjának csomópontszámával ( $k_L$ ) egyezik meg, hiszen ennyi egyedi ágyazási merevség számítható a felületi tartományokra a csomópontok feszültség és süllyedés értékeiből. Az analízist három változó mentén hajtjuk végre: minden pontban a kezdeti ágyazási értéken kívül egy az illesztési háléhoz rendelt lokális koordináta-rendszerben értelmezett  $x$  és  $y$  koordináta is változóként szerepel. A klaszterstruktúra kialakításakor nem kizárólag az ágyazási merevségek értéke lényeges, de a pontok alaprajzi helyzete is fontos, hiszen egy-egy pont ágyazási merevsége a közvetlen környezetével összhangban nyer értelmet. Példaként a lemezsarkoknál lévő feszültségcsúcsot leíró klaszterekbe nem szerencsés, ha bekerülnek hasonló értékű, de a jelenségtől alaprajzilag távol eső, tehát független pontok ágyazási értékei, amelyek torzíthatják az amúgy ezen a helyen igen érzékeny, hirtelen változó feszültségfüggvény közelítését.

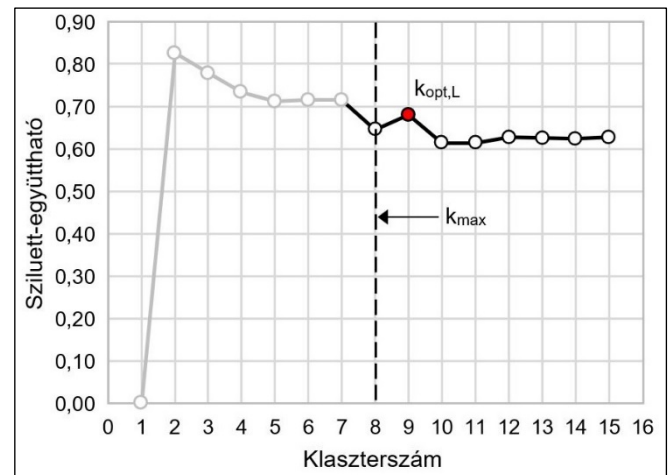
$\underline{K}_L$  vektor tartalmazza az illesztési háló csomópontjaiban, a Plaxis 3D-vel számolt függőleges talajfeszültségek és süllyedések hányadosait, míg  $\underline{X}_L$  a csomópontok  $x$ -,  $\underline{Y}_L$  pedig a csomópontok  $y$ -koordinátáinak vektorjai. Bár a három változó dimenziója nem egyezik, és ilyenkor klaszterezés előtt standardizálásra van szükség, esetünkben ettől eltekinthetünk. Mivel a háromból két változó alaprajzi értelemben egy koordinátpárt alkot, a harmadik változó, azaz az ágyazási merevség az adott pont harmadik,  $z$ -koordinátájaként értelmezhető, így minden pontban egy-egy térbeli vektorral rendelkezünk. Az egyes pontok közötti térbeli Euklideszi-távolságok számolhatók.

A klaszterezést az említett három változó ( $K_{z,i}, x_i, y_i$ ) szerint, különböző klaszterszámok esetére el kell végezni, melyek közül a sziluett-együtthatók segítségével kiválasztjuk a  $k_{opt,L}$  optimális klaszterszámot. Ökölszabályként alkalmazható a

$$k_{max} = \sqrt{n/2}$$

képlet, amely egy  $n$ -elemű adathalmaz esetén megadja a várható maximális klaszterszámot (Kovács, 2014). Az általam elvégzett klaszterezések tapasztalatai alapján a képlet jelentését úgy módosítom, hogy ez adja meg azt a számot, amelynek környékén várhatóan megtalálható a  $k_{opt,L}$  optimális klaszterszám. A képletből számítható értéknél valamelyest nagyobb, de akár néhány klaszterrel kevesebb is lehet optimális. Célszerű tehát a képletből számítható értéktől egy választott  $\Delta k$ -val lefelé és felfelé is a klaszterezéseket elvégezni.  $\Delta k$  értékére (jellemzően 1-2) nincs egzakt formula, minthogy maga a  $\sqrt{n/2}$  kifejezés sem az. Ha a sziluett-együtthatók értékelésekor egyértelműen látszik, hogy  $\Delta k$  értékét kicsire választottuk, akkor a vizsgálati tartomány szélessége növelhető.

Miután  $\sqrt{n/2} \pm \Delta k$  klaszterszámokra elvégeztük a klaszterezést, minden klaszterszámra meg kell határozni a sziluett-együtthatókat, melyek a klaszterszámok függvényében ábrázolhatók. Miután a sziluett-együttható értéke a klaszterszerkezet erősségét jellemzi, a görbén  $k_{max}$  értékhez közeli lokális maximum környezetét kell vizsgálni. Az 1. sz. ábra egy ilyen görbét ábrázol. Látható, hogy a sziluett-együttható értéke  $k = 2$ -nél éri el a maximumát, de ezt az értéket csak a magyarázat és a teljesség kedvéért tüntettem fel, gyakorlati szempontból érdektelen. Egy alaplemezervezési feladatban (és ez általában a nagy elemszámú statisztikai feladatokra hasonlóan érvényes) ugyanis 2 klaszter bizonyosan nem elegendő az ágyazási értékek eloszlásának leírására még akkor sem, ha a sziluett-együttható értéke egyébként abszolút értelemben magas.

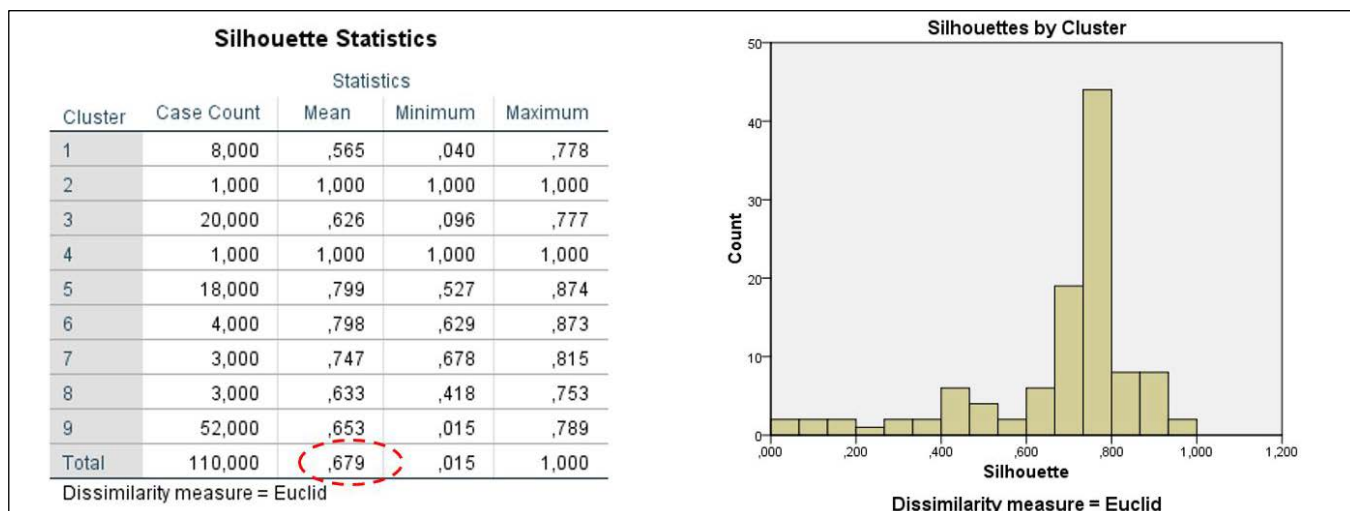


1. ábra Sziluett-együtthatók a klaszterszámok függvényében

A görbét a kezdeti,  $k = 2$ -nél felvett abszolút maximuma utáni lecsengő szakaszát követően az  $\sqrt{n/2}$  klaszterszám környékén célszerű vizsgálni,  $k_{opt,L}$  értéke a görbe ezen szakaszán várható. A példaként bemutatott, sziluett-együtthatókat ábrázoló 1. sz. ábrán a 9 klaszterszámhoz jelölt pont esetén látható, hogy  $SC$  értéke közelítőleg 0.7, ami erős klaszterszerkezetre utal. Ez olvasható le a 2. sz. ábráról is, mely a klaszterezéshez használt SPSS statisztikai szoftvercsomag eredményei közül származik.

Az ágyazási merevségek javulásának, ebből fakadóan a süllyedésértékek referencia-értékekhez történő közeledésének üteme az optimális klaszterszám esetében a legnagyobb. Ha tehát  $k_{opt,L}$  klaszterszámtól bármely irányban kis mértékkel eltérünk, akkor ez azt eredményezi, hogy a javítási lépésenként számítható hibák konvergenciasebbsége kisebb, az egyező süllyedések eléréséhez több lépésre van szükség, mint

tart. Ez azt jelenti, hogy már néhány száz pontban meghatározott ágyazási merevség esetén is az adatmegadások során legalább 90%-os munka- és időmegtakarítás realizálható. Természetesen ezt a klaszterezésre fordított idő- munkamennyiség valamelyest csökkenti, de a mérleg (különösen nagy adatbázisnál) abszolút pozitív.



2. ábra Sziluett-értékek táblázata és gyakoriság histogramja SPSS szoftverből

$k_{opt,L}$  esetében. Nagyobb eltérés esetén a javítási lépésenkénti referencia-értékekből számítható átlagos relatív hibákat nem lehet egy bizonyos szint alá csökkenteni, ami az optimálistól eltérő klaszterszerkezet alkalmazása következtében áll elő. Modellfeladatok kapcsán alábbi megfigyeléseket tettem:

- a sziluett-együttható statisztikailag optimális értéke a lemezágyazási probléma esetén nem feltétlenül esik egybe optimális klaszterszámmal, ami abból ered, hogy a lemez lokális feszültségcsúcsait egy bizonyos klaszterszámnál kevesebbel nem lehet megfelelően követni;
- azonos SC-érték mellett a nagyobb klaszterszámot érdemes választani;
- a  $\sqrt{n/2}$  értéknél kisebb klaszterszám általában kevésnek bizonyul;
- az  $SC \approx 0,7$  érték már megfelelő klaszterstruktúrát eredményez;
- egy előző javítási lépéshez képest történő klaszterszám csökkentést követően a javítási lépés átlagos hibája az előzőhöz képest általában nő, a konvergencia lassul;
- ha az SC értéke kisebb klaszterszám esetén jóval meghaladja a 0,7-et (pl. 0,8 - 0,9 körüli), de nagyobb klaszterszámok esetén is (akár alulról) közelíti azt, akkor érdemesebb a kisebb SC értékhez tartozó nagyobb klaszterszámot választani;

A  $k_{opt,L}$  meghatározása után, a klaszterezés során megtörténik a  $k_{opt,L}$  db klaszter-középpont, vagyis az ágyazási paraméterek értékeinek meghatározása és azok hozzárendelése az adathalmaz elemeihez, azaz a felülettartományokhoz. Ezt nevezzük ágyazási klaszterekbe való besorolásnak, aminek végére rendelkezésre áll minden felülettartomány középpontjára az ágyazási merevség.

Az adathalmaz méretétől függő csökkenés érhető el az ágyazási merevség típusainak számát illetően. Az  $\sqrt{n/2}$  ökölszabály miatt a klaszterezendő adathalmaz elemszámának növekedése exponenciálisan növekvő munkamegtakarítást jelent. Néhány száz elemből álló adathalmaz 3-10%-nyi klaszterrel közelíthető, ami ezres nagyságrendben az 1%-hoz

A lemezágyazásokra ismertett klaszterezési eljárás az egyes rugómerevségekre külön-külön szintén alkalmazható, ha a cölöpök darabszáma ezt indokoltá teszi. Kevés cölöp esetén a klaszterezési munka meghaladhatja a cölöpnéket eltérő értékű rugómerevségek egyesével történő megadására fordított munkát. Ez utóbbi esetben a cölöp rugómerevségeket nem érdemes klaszterezni, ez előzetes mérlegelés kérdése. A klaszterezéshez a nagy számítási igény miatt javasolt statisztikai célszoftvert használni (pl. SPSS, XLSTAT stb.), melyekkel a feladat meglehetősen egyszerűen és gyorsan végezhető.

Fontos hangsúlyozni, hogy a célszerű klaszterszám megválasztásához használt sziluett-együttható számítás nem kizárólagos, hanem alternatív eleme a módszernek. Az optimális klaszterstruktúra megválasztásához alkalmazható egyéb hasonló eljárás is, mivel igen sokféle validitásmérésre szolgáló egyéb index is létezik.

## 4.5 Paraméter-korrekció

A korrekciós folyamat javítási lépéseiben az ágyazási- és cölöpmerevségek kiindulási értékeit ezen input-paraméterekkel végzett futtatások eredményei alapján módosítjuk. Az ágyazási- és függőleges cölöprugó-merevségek javításának mértékét a kapott süllyedéseredmények referencia-süllyedésekhez viszonyított eltérései határozzák meg. Az elfordulási merevségek javítására a cölöpfej-nyomatékokat és azok referencia-értékeit használjuk, melynek itt nem részletezett modellezéstechnikai oka van. A korábban definiált vektorjelölésekkel pontosított leírás a következő:

Javítási lépésenként a szerkezettervező szoftver  $K_z$  input-paraméterével végzett számítás  $s_L$  output- értéket szolgáltat. Utóbbi  $s_{ref}$ -hez viszonyított eltéréssével  $K_z$  értékét módosítjuk. A következő lépésben a módosított  $K_z$  inputtal újabb  $s_L$  számolható, melyet  $s_{ref}$ -hez viszonyítva az eltérés újra meghatározható. Az ismétlődő folyamat eredményeként eljuthatunk  $K_z$  azon értékéig, amellyel végzett futtatásból származó

$\underline{s}_L$  eltérése  $\underline{s}_{ref}$ -től egy rögzített tolerancia-értéken belül van.

Ez az elv alkalmazható  $\underline{R}_z, \underline{R}_{xx}, \underline{R}_{yy}$  merevségek javításaira is figyelemmel arra, hogy utóbbi két mennyiség korrekcióit a cölöprugókban keletkező  $\underline{M}_{x,rugó}$  és  $\underline{M}_{y,rugó}$  nyomatékok  $\underline{M}_{x,ref}$  és  $\underline{M}_{y,ref}$  referencia-értékekhez viszonyított eltérései alapján számítjuk. A négy különböző merevségi input-paraméter javításait egyszerre, ugyanazokban a javítási lépésekben végezzük a korrekciós folyamat során.

## 5. A SZÁMÍTÁSI LÉPÉSEK RÉSZLETES BEMUTATÁSA

### 5.1 Ágyazási- és rugómerevségek kiindulási értékei

A keresett merevségek meghatározása egy rendszerint több lépésből álló korrekciós folyamat. Kezdő lépéseként előállítjuk  $\underline{K}_z^{(N)}, \underline{R}_z^{(N)}, \underline{R}_{xx}^{(N)}, \underline{R}_{yy}^{(N)}$  ágyazási- és rugómerevségi vektorokat, valamint az  $\underline{X}_L$  és  $\underline{Y}_L$  koordináta-vektorokat. Abban az esetben, ha a rugómerevségeket is klaszterezni kívánjuk, a hozzájuk tartozó  $\underline{X}_C$  és  $\underline{Y}_C$  koordináta-vektorok is szükségesek. Az első javítási lépésben a kezdeti értékek a Plaxis 3D számítás referencia-értékeiből (feszültségekből és süllyedésekből) számíthatók, a további lépésekben pedig a megelőző lépés javított merevségértékeivel azonosak:

- $N = 1$  esetén  $\underline{K}_{z,i}^{(N)} = \underline{\sigma}_{z,i} / \underline{s}_{L,i}$ ,  $\underline{R}_{z,j}^{(N)} = \underline{F}_{z,j} / \underline{s}_{C,j}$  a Plaxis 3D-modell referencia-értékeiből számolva,  $\underline{R}_{xx}^{(N)}$  és  $\underline{R}_{yy}^{(N)}$  pedig tetszőleges kezdőértékkel felvett mennyiségek;
- $N > 1$  esetén pedig a  $\underline{K}_z^{(N)} = \underline{K}_{z,jav}^{(N-1)}$ ;  $\underline{R}_z^{(N)} = \underline{R}_{z,jav}^{(N-1)}$ ;  $\underline{R}_{xx}^{(N)} = \underline{R}_{xx,jav}^{(N-1)}$ ;  $\underline{R}_{yy}^{(N)} = \underline{R}_{yy,jav}^{(N-1)}$ , ahol a zárójelben lévő  $N \geq 1$  érték a javítási lépés aktuális számát jelöli, a „jav” indexű javított merevségek pedig az 5.6. pont szerint számolandók.

Az elfordulási merevségek kezdeti értékeit tartalmazó  $\underline{R}_{xx}^{(1)}, \underline{R}_{yy}^{(1)}$  vektorokat számítással nem tudjuk előállítani, mivel cölöpfej-elfordulásra vonatkozó referencia-értékek nem állnak rendelkezésre. A merevségek azonban tetszőleges kezdőértékkel felvehetők, hiszen a javítási lépések során azokat a referencia-modell cölöpnomatékaival való egyezőségéig fogjuk korrigálni. A végeselemes szoftverek által is használt Newton-Raphson numerikus módszerhez analóg módon, ha a kezdőérték túl messze esik a célértéktől, akkor a konvergenciasebesség alacsony (szélső esetben nincs konvergencia), ezért érdemes reális tartományból indulni, pl. közelítő formulán alapuló becsléssel (Gazetas, 1984).

### 5.2 $\underline{K}_z^{(N)}, \underline{R}_z^{(N)}, \underline{R}_{xx}^{(N)}, \underline{R}_{yy}^{(N)}$

merevségi vektorok méretcsökkentése klaszteranalízissel

$\underline{K}_z^{(N)}, \underline{R}_z^{(N)}, \underline{R}_{xx}^{(N)}, \underline{R}_{yy}^{(N)}$  vektorok elemeire elvégezzük az előzőekben ismertetett klaszterezési eljárást. A több klaszterszerkezetre meghatározott sziluett-együtthatók alapján kiválasztjuk az optimális klaszterszámot. Az ehhez tartozó

klaszterközpontok lesznek a klaszterezett merevségeket tartalmazó vektorok elemei, melyekkel a szerkezettervező szoftver modelljének futtatását végezzük:

$$\underline{K}_z^{(N)} \rightarrow \underline{K}_{z,cl}^{(N)}, \quad \underline{R}_z^{(N)} \rightarrow \underline{R}_{z,cl}^{(N)}, \quad \underline{R}_{xx}^{(N)} \rightarrow \underline{R}_{xx,cl}^{(N)}, \\ \underline{R}_{yy}^{(N)} \rightarrow \underline{R}_{yy,cl}^{(N)}.$$

Ha kevés a cölöp, ezért a rugómerevségekre nem végzünk klaszterezést, akkor a kiindulási értékekkel számolunk tovább:

$$\underline{R}_{z,cl}^{(N)} = \underline{R}_z^{(N)}, \quad \underline{R}_{xx,cl}^{(N)} = \underline{R}_{xx}^{(N)}, \quad \underline{R}_{yy,cl}^{(N)} = \underline{R}_{yy}^{(N)}.$$

### 5.3 Modelfuttatás a klaszterezett merevségekkel

$\underline{K}_{z,cl}^{(N)}, \underline{R}_{z,cl}^{(N)}, \underline{R}_{xx,cl}^{(N)}, \underline{R}_{yy,cl}^{(N)}$  eltolódási-, illetve elfordulási merevségekkel a szerkezettervező modellben elvégezzük a számítást, melynek eredményeként az illesztési háló csomópontjainak süllyedéseit az  $\underline{s}^{(N)}$  vektor tartalmazza. A következő lépéshez, a hibaelemzéshez a süllyedéseken kívül szükséges további eredmények a cölöprugókban keletkező nyomatékok:  $\underline{M}_{x,rugó}^{(N)}$  és  $\underline{M}_{y,rugó}^{(N)}$ .

### 5.4 Futtatási eredmények hibaelemzése

A szerkezettervező szoftver eredményeiből relatív hibákat számolhatunk, ha a kapott süllyedések és cölöprugókban keletkező nyomatékok értékeit viszonyítjuk az elsődleges referencia-értékekhez.

$\underline{s}^{(N)}, \underline{M}_{x,rugó}^{(N)}$  és  $\underline{M}_{y,rugó}^{(N)}$  ismeretében meghatározzuk az illesztési háló csomópontjaira az elsőrendű referencia-értékekre vonatkozó relatív hibákat %-ban kifejezve:

- a lemez ( $\underline{H}_L$ ) illetve cölöpök ( $\underline{H}_C$ ) pontjainak süllyedéseire:

$$\underline{\delta s}_{L,i}^{(N)} = \frac{\underline{s}_{L,i}^{(N)} - \underline{s}_{ref,L,i}}{\underline{s}_{ref,L,i}} \cdot 100,$$

$$\underline{\delta s}_{C,j}^{(N)} = \frac{\underline{s}_{C,j}^{(N)} - \underline{s}_{ref,C,j}}{\underline{s}_{ref,C,j}} \cdot 100$$

- a cölöpökben, illetve rugókban keletkező nyomatékokra:

$$\underline{\delta M}_{x,j}^{(N)} = \frac{\underline{M}_{x,rugó,j}^{(N)} - \underline{M}_{x,ref,j}^{(N)}}{\underline{M}_{x,ref,j}^{(N)}} \cdot 100,$$

$$\underline{\delta M}_{y,j}^{(N)} = \frac{\underline{M}_{y,rugó,j}^{(N)} - \underline{M}_{y,ref,j}^{(N)}}{\underline{M}_{y,ref,j}^{(N)}} \cdot 100$$

A referencia-értékekhez való közeledés mérésére javítási lépésenként meghatározható a Laplace-féle átlagos hiba, aminek általános formulája:

$$\vartheta R = \frac{\sum_{\kappa=1}^{n_R} |\delta R_{\kappa}|}{n_R}$$

, ahol

- $R$  a tetszőleges eredmény-mennyiség, pl. lemezszüllyedés ( $s_L$ ), cölöpnomaték ( $M_x$ ), stb.;
- $\delta R_{\kappa}$  az  $R$  eredmény-mennyiség relatív hibaértéke a  $\kappa$ -adik pontban;



- $n_R$  az eredmény-mennyiség relatív hibaértékeinek darab-száma ( $k_L$  vagy  $k_C$ );
- $\kappa = 1 \dots n_R$ .

Példaként a  $k_L$  darab lemezágyazási-pont süllyedéseire ez így írható fel:

$$\vartheta_{S_L} = \frac{\sum_{\kappa=1}^{k_L} |\delta_{S_{L,\kappa}}|}{k_L}$$

Az  $N$ -edik javítási lépés átlagos relatív hibáit megkapjuk, ha képezzük a hibavektorok összegzövektorokkal való skaláris szorzatait, és azokat megszorozzuk az  $1/k_L$ , illetve  $1/k_C$  skalárokkal:

$$\vartheta_{S_L}^{(N)} = \underline{\delta}_{S_L}^{(N)} \cdot \underline{1} \cdot \frac{1}{k_L}, \quad \vartheta_{S_C}^{(N)} = \underline{\delta}_{S_C}^{(N)} \cdot \underline{1} \cdot \frac{1}{k_C}$$

$$\vartheta M_x^{(N)} = \underline{\delta M}_x^{(N)} \cdot \underline{1} \cdot \frac{1}{k_C}, \quad \vartheta M_y^{(N)} = \underline{\delta M}_y^{(N)} \cdot \underline{1} \cdot \frac{1}{k_C}$$

Az elsődleges referencia-értékek alapján történő javítási lépésekben célszerű meghatározni legalább az egyik irányú lemeznyomatékok, mint másodlagos referencia-értékek hibacsökkenéseit is a 7. pontban ismertetett kritériumokkal való összevetetőség érdekében. Fentiekhez hasonlóan:

$$\underline{\delta m}_{x,i}^{(N)} = \frac{m_{x,i}^{(N)} - m_{x,ref,i}^{(N)}}{m_{x,ref,i}^{(N)}} \cdot 100,$$

$$\underline{\delta m}_{y,i}^{(N)} = \frac{m_{y,i}^{(N)} - m_{y,ref,i}^{(N)}}{m_{y,ref,i}^{(N)}} \cdot 100$$

$$\vartheta m_x^{(N)} = \underline{\delta m}_x^{(N)} \cdot \underline{1} \cdot \frac{1}{k_L},$$

$$\vartheta m_y^{(N)} = \underline{\delta m}_y^{(N)} \cdot \underline{1} \cdot \frac{1}{k_L}$$

## 5.5 Döntéshozatal hibaelemzés alapján

Az átlagos relatív hibák javítási lépésenkénti változását koordináta-rendszerben ábrázoljuk. Ha minden lépésben az optimális klaszterstruktúrát használtuk, a görbe aszimptotikusan tart a relatív hibák zérusértékéhez. Arról, hogy folytassuk-e az eljárást az ágyazási merevségek javításával, vagy a befejezést válasszuk, szubjektív döntést kell hoznunk. A görbe alakját figyelve a folyamatot akkor célszerű befejezni, ha további lépésektől érdemi javulás (hibacsökkenés) már nem várható. A befejezést az alábbiak indokolhatják:

- a hibacsökkenés mértéke az utolsó lépésekben töredéke a megelőző lépésekben elért javulásokhoz képest (a konvergencia drasztikus mértékben lelassul);
- a hibacsökkenés mértéke az utolsó két egymást követő lépésben is negatív értelmű (az utoljára alkalmazott klaszterszerkezettel már nem tudunk hibacsökkenést elérni);
- elértünk egy előre meghatározott abszolút hibaértéket, ami lehet egy jellemző, vagy kitüntetett süllyedési érték (átlagos, maximális, minimális, stb.) %-ban meghatározott része (pl. a 20 mm-es átlagos süllyedés 1% -ának megfelelő mértékű hiba:  $\vartheta_{S_L}^{(N)} < 0,2$  mm).

Szubjektivitást kizáró, abszolút érvényű döntéstámogatási kritérium rögzítése nem lehetséges, a módszer approximációs jellege nem tudja kizárni a mérlegelés szükségességét. Amennyiben a döntéshozatal eredménye a befejezés, úgy az ágyazási- és rugómerevségek az utolsó lépés klaszterezett

értékei. Folytatás esetén ezeket az értékeket tovább javítjuk a következő pont szerint.

## 5.6 Ágyazási- és rugómerevségek javítása

Az ágyazási- és rugómerevségek az  $N$ -edik javítási lépésben az abban a lépésben számolt relatív hibák ismeretében korrigálhatók. A javított értékek a következők:

$$\underline{K}_{z,jav,i}^{(N)} = \underline{K}_{z,i}^{(N)} \cdot \left( 1 + \frac{\delta_{S_{L,i}}^{(N)}}{100} \right)$$

$$\underline{R}_{z,jav,j}^{(N)} = \underline{R}_{z,j}^{(N)} \cdot \left( 1 + \frac{\delta_{S_{C,j}}^{(N)}}{100} \right)$$

$$\underline{R}_{xx,jav,j}^{(N)} = \underline{R}_{xx,j}^{(N)} \cdot \left( 1 - \frac{\delta M_{x,j}^{(N)}}{100} \right)$$

$$\underline{R}_{yy,jav,j}^{(N)} = \underline{R}_{yy,j}^{(N)} \cdot \left( 1 - \frac{\delta M_{y,j}^{(N)}}{100} \right)$$

Az  $(N+1)$ -edik lépésben a kiindulási értékek az  $N$ -edik lépés javított értékei.

$$\underline{K}_z^{(N+1)} = \underline{K}_{z,jav}^{(N)}; \quad \underline{R}_z^{(N+1)} = \underline{R}_{z,jav}^{(N)};$$

$$\underline{R}_{xx}^{(N+1)} = \underline{R}_{xx,jav}^{(N)}; \quad \underline{R}_{yy}^{(N+1)} = \underline{R}_{yy,jav}^{(N)}$$

## 5.7 Rekurzíó

A hibaelemzés alapján korrigált ágyazási- és rugómerevségekkel új javítási lépésben ( $N:=N+1$ ) az előző lépéssorozat megismételve, tovább csökkentjük az elsőrendű referencia-értékekkel való összevetésből meghatározott relatív hibákat. A keresett eredményeket a rekurzív folyamat döntéshozatal általi leállítását szolgálja az utolsó lépésben.

## 6. DÖNTÉSI KRITÉRIUMOK

A szerkezettervező modell hangolása az illesztési háló pontjaiban történik, ezért azoknál a mennyiségeknél, amelyek elősorban e háló adott csomópontjának elmozdulásától függenek, azonos javítási lépésszám esetén kisebb relatív hiba számítható. Ilyen mennyiség a süllyedés, a pillérek normálereje és a cölöperő. Azok a mennyiségek, amelyek nem ponthoz, hanem felülethez köthetők, azonos javítási lépésszám esetén nagyobb relatív hibákat mutatnak. Ennek oka az, hogy egy általános illesztési csomópont környezetében lévő egyéb felületelem-pontokban a modellek süllyedéseinek egyezőségét nem várjuk el. Ilyen mennyiségek a lemeznyomatékok, valamint a velük szorosan összefüggő cölöp-, illetve pillérsnyomatékok. A hibacsökkenések konvergencia-sebessége az egyes mennyiségekre vonatkozóan eltér, és amint az 5.5. pontban kifejtettem, abszolút kritérium a végeredménynek tekinthető megoldáshoz nem rendelhető. A tesztfuttatásokból az derült ki, hogy az elmozdulás-jellegű mennyiségek kevés lépésszámmal a mérnöki pontosság által igényelt szinten kvázi-hibamentessé tehető (tized mm-re pontos süllyedések). Mielőtt a javítási folyamatot befejezzük, a mérlegelést célszerű a nagyobb hibával illeszthető nyomatékok oldaláról is elvégezni.

Ismeretes, hogy a végeselemes szoftverek az iterációs lépések során a tehervektorhoz viszonyított kiegyensúlyozatlan

terhek vektorából képezik a relatív hibát, s azt egy küszöbértékhez viszonyítják. Hasonló elv e módszerben is alkalmazható. A lemeznymomatékokra előírható a szerkezettervezési szempontokra és igényekre figyelemmel felvett  $\varepsilon$  küszöbérték, amely lehet a nyomaték Laplace-féle hibájának egy választott értéke, pl.  $\varepsilon \rightarrow \vartheta m_x = 5\%$ . Lehetőség van valamilyen abszolút értékű  $E$  hibakorlát alkalmazására is:

- egy kitüntetett nyomatékhoz viszonyított érték: pl. a maximális, minimális, átlagos, stb. nyomaték bizonyos százaléka, pl.  $E \rightarrow 0,05 \cdot m_{max}$ ;
- a nyomatéki vasalás alapján választott érték: pl. a lemez minimális húzott vasalásához tartozó határnyomatéknak, vagy az alkalmazni kívánt vasalási alapháló határnyomaték értékének bizonyos hányada, pl.  $E \rightarrow 0,01 \cdot m_H$

Előfordul, hogy adott sűrűségű illesztési hálóval történő javítási lépések során nem tudunk a kívánt hibaérték alá menni, hiába növeljük a javítási lépések számát. Ebben az esetben az illesztési háló globális, vagy a kritikus helyek szerinti lokális sűrítése vezethet eredményre.

## 7. ALKALMAZÁSI KORLÁTOK, ÉRVÉNYESSÉG

A módszer alkalmazására vonatkozó alapfeltevéseket a 3.1. pontban ismertettem. Alkalmazási korlátot a modellezhetőségre vonatkozó uniformitási követelmény teljesülésének hiánya jelent, ami elsősorban a felszerkezet Plaxis 3D-ben való modellezhetőségére értendő. Ha ugyanis a két felszerkezeti modell merevségek tekintetében eltér egymástól, a módszer alapelve érvényét veszti. A helyszíni zsaluzatban monolit vasbetonszerkezetként kialakított épületek Plaxis 3D-ben általában megfelelő módon modellezhetők. A kérdés akkor vetődhet fel igazán, amikor a speciális szerkezeti elemek és kapcsolatok modellezését lehetővé tévő szerkezettervező szoftverek képességeire is szüksége lenne a Plaxis 3D-ben létrehozandó modellhez. Ilyen lehet például egy külpontos szerkezeti kapcsolatokkal kialakított, kompozit, ortotrop födém-szerkezet. Sok esetben azért Plaxis 3D-ben ekvivalens merevségű, helyettesítő födém alkalmazásával az ilyen jellegű nehézségek is áthidalhatók úgy, hogy a módszer alapelvei és feltevései ne sérüljenek. Ezeket a modellezéstechnikai mérlegeléseket azonban mindig az adott feladat esetében egyedileg lehet csak megtenni.

A szerkezettervező szoftver oldaláról alkalmazási korlátot a CPRF modellezését lehetővé tévő input- paraméterek megadási lehetősége jelent. Amennyiben a szoftver a 4.2.2. pontban ismertett paraméterek megadását lehetővé teszi, a CPRF modellezése nem ütközik elvi akadályba. Ez a hazai gyakorlatban jellemzően alkalmazott Axis VM szoftver esetében teljesül, de a módszer alkalmas bármely hasonló módon működő, egyéb szerkezettervező szoftver használata esetén is. Talajtípusokra, talajrétegződésekre vonatkozó korlátok nincsenek, hiszen a módszer szempontjából közömbös, hogy a Plaxis 3D modellezéssel meghatározott süllyedések milyen talajkörnyezetben alakultak ki. A matematikai, illetve statisztikai eszközökkel lényegileg csak a modellezett eredményeket ültetjük át a szerkezettervező szoftver modellkörnyezetébe.

## 8. ALKALMAZÁSI PÉLDA

### 8.1 Numerikus modellkísérlet előkészítése

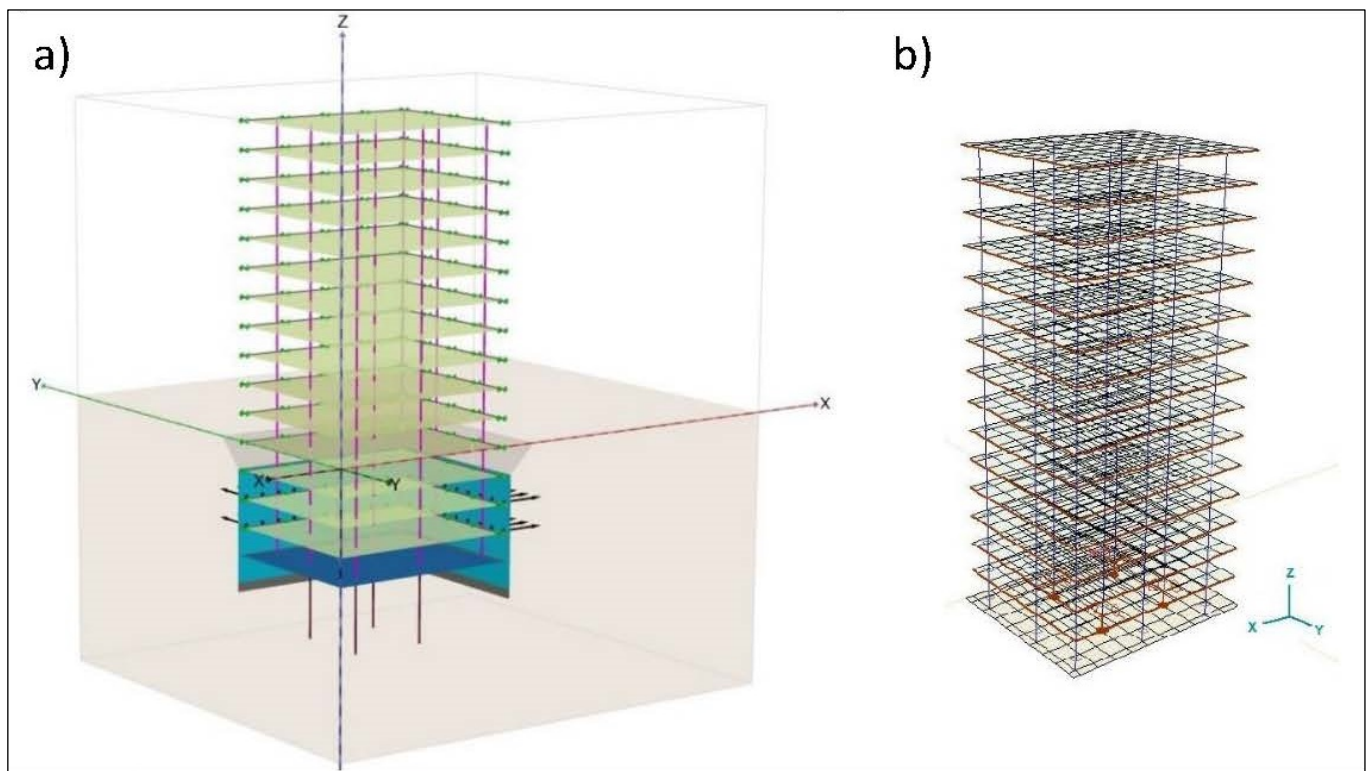
A módszer gyakorlati alkalmazásának és az elérhető eredmények bemutatásához tesztmodellt alkottam. A mindkét alaprajzi irányban tengelyesen szimmetrikus,  $\sim 35 \times 40$  m alaprajzi méretű szerkezetből a szoftverekben csak a szerkezet negyedét szerepeltettem. A modellezett szerkezet rész egy 15 szintes, vasbeton pillérvázás épületé, melynek alsó 4 pinceszintje egy részfalal körülhatárolt munkatérben helyezkedik el. Az alapozásként szolgáló CPRF lemezzavastagsága 0,90 m, a (4 x) 4 db belső pillér alatt pedig 10,0 m hosszú,  $\varnothing 0,80$  m átmérőjű fűrt vasbeton cölöpök vannak. Az épület pillérekkel közvetlenül alátámasztott, síklemez födémekkel készül. Bár a modellépület építészeti és szerkezeti méreteit, pillérosztását tekintve megfelel egy valós építménynek, a feladat kutatási jellege miatt a pinceszinti vasbeton falak helyett vasbeton pilléreket alkalmaztam az erőjáték jobb áttekinthetősége érdekében. Ennek a modelleredmények összehasonlításában van jelentősége, ugyanakkor a módszer elvi és gyakorlati alkalmazhatóságára nincs befolyással. Az általaj leírására szolgáló paramétereket úgy választottam, hogy a cölöpök lemezszüllyedéseket csökkentő hatása érzékelhető módon érvényesüljön. Plaxis 3D-ben HSS anyagmodellt használva előállítottam az elsődleges és másodlagos referencia-értékeket. A modellek közötti illesztési kapcsolatot biztosító illesztési háló  $k_L = 110$  db lemezagyazási pontot tartalmaz, további  $k_C = 4$  pont pedig a szerkezeti negyedenként 4 db belső pillér alatti cölöpök csatlakozási pontjai.

### 8.2 Végeelem-szoftverekkel végzett futtatások

Plaxis 3D-ben a teljesértékű tesztmodell végeelem-analízisét elvégeztem, ennek eredményeként jöttek létre az elsődleges és másodlagos referencia-értékek. Ezt követően 6 javítási lépésben végeztem az ágyazási- és rugómerevségek javítását, ami 6 futtatást jelentett a szerkezettervező szoftverrel. A hatodik javítási lépést a hibakonvergencia-grafikonok alapján befejező lépésnek fogadtam el, az ehhez tartozó eredményeket és a javított merevségek utolsó értékeit végeredményeknek tekintettem.

### 8.3 A tesztmodell Plaxis 3D-ben és a szerkezettervező szoftverben

A 3. ábrán egy teljesértékű, Plaxis 3D-ben megalkotott szerkezeti modell látható, mellette pedig a szerkezettervező szoftverben létrehozott párja. A bemutatandó teszteredmények az alábbi tesztmodell futtatásaiból származnak.



3. ábra Végelem-tesztmodell Plaxis 3D-ben (a) és a szerkezettervező szoftverben (b)

## 8.4 Eredmények értékelése, elemzése

### 8.4.1 A báziseredmények

Az eredmények értékelésében a módszer hasznosságának és hatékonyságának megítéléséhez úgynevezett báziseredményeket értelmeztem. Ezek nem részei a módszernek, pusztán a módszerrel elérhető pontosság bemutatása céljából szükségesek.

Báziseredményeknek azokat a szerkezettervező szoftverrel számolt értékeket nevezem, melyek a klaszterezés nélküli,  $K_z^{(1)}$ ,  $R_z^{(1)}$ ,  $R_{xx}^{(1)}$ ,  $R_{yy}^{(1)}$  ágyazási- és rugómerevségekkel végzett futtatásból származnak. Ezeket a merevségeket a Plaxis 3D süllyedés- és feszültségeredményeiből, felületi tartományközpontként egyedi értéként számítottam. (Ezek voltak a felső indexben jelölt, első javítási lépés kiindulási merevségei.) Például  $s^{(B)}$  bázissüllyedéseknek az előbb említett futtatásból származó süllyedésértékeket nevezem, melyek vektorát a megkülönböztetés miatt  $(B)$  felső indexszel jelöltem. A báziseredményeket a javítási lépések eredményeihez hasonlóan viszonyíthatjuk a referencia-értékekhez. Így a báziseredmények relatív hibái a korábban leírtakhoz hasonlóan ugyancsak számíthatók. Példaként a bázissüllyedések relatív hibái a lemez ( $H_L$ ) illetve a cölöpök ( $H_C$ ) pontjaiban:

$$\delta s_{L,i}^{(B)} = \frac{s_{L,i}^{(B)} - s_{ref,L,i}}{s_{ref,L,i}} \cdot 100,$$

$$\delta s_{C,j}^{(B)} = \frac{s_{C,j}^{(B)} - s_{ref,C,j}}{s_{ref,C,j}} \cdot 100$$

A Laplace-féle átlagos relatív hiba szintén kifejezhető:

$$\vartheta s_L^{(B)} = \delta s_L^{(B)} \cdot 1 \cdot \frac{1}{k_L}, \quad \vartheta s_C^{(B)} = \delta s_C^{(B)} \cdot 1 \cdot \frac{1}{k_C}$$

A báziseredmények a nem az általam ajánlott módon felvett ágyazási merevségekkel végzett számítások közül a legpontosabb eredményeknek tekinthetők. Móczár, Mahler, Polgár (2014) ezeket a „Plaxis eredményekből közvetlenül számított” süllyedéseknek nevezi.

A tesztmodellre vonatkozóan 110 felülettartomány-középpontra és 4 cölöp-csomópontra egyedileg számolt ágyazási- és rugómerevség megadásával (de értelemszerűen klaszterezés nélkül) állítottam elő a báziseredményeket. Ahogy az az eredmények számszerű ismertetéséből a 8.4.2.-8.4.6. pontokban látható, az általam kidolgozott módszerrel elérhető pontosság akár egy nagyságrenddel is meghaladhatja a báziseredmények pontossági szintjét, miközben egy nagyságrenddel kevesebb ágyazási merevség érték elegendő a CPRF-szerkezet támaszviszonyának szimulálásához. Az utóbbi különbség nagyobb ágyazási adatbázis esetén két-három nagyságrend is lehet.

### 8.4.2 Klaszterezési eredmények

A szerkezettervező szoftverrel végrehajtott 6 javítási lépés mindegyikében az ágyazási merevségeket klasztereztem, a rugómerevségeket azonban a cölöpök kis száma miatt nem. Lépésenként a sziluett-együtthatók grafikonjaiból az optimális klaszterszámokra az 1. táblázatban szereplő értékek adódtak.

lépés	1	2	3	4	5	6
$k_{opt,L}$	10	9	9	8	8	8

1. táblázat: Optimális klaszterszámok javítási lépésenként

### 8.4.3 Független elmozdulások, cölöpfej elfordulások

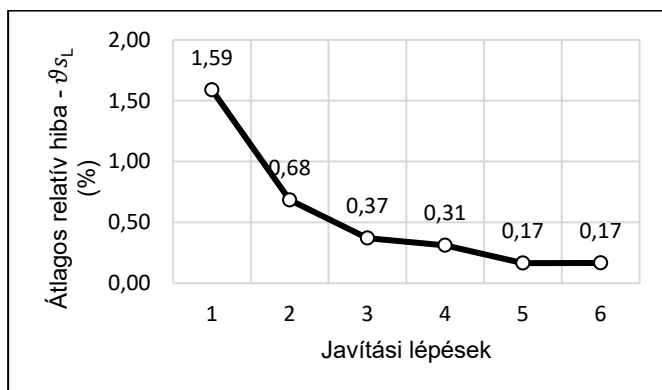
A 110 különböző ágyazási merevség helyett a hatodik javítási lépésben 8 klasztert alkalmazva a 34 és 61 mm közé eső referencia-süllyedésekhez viszonyított hibák átlagértékére a

lemezgyazási pontoknál  $\vartheta s_L^{(6)} = 0,17\%$ -ot, a cölöprugók pontjainál pedig ugyancsak  $\vartheta s_C^{(6)} = 0,17\%$ -ot értem el (4. és 5. ábra). A süllyedések abszolút eltérései 0,0 és 0,3 mm között alakultak. A szerkezettervező szoftver báziseredményeire az előbbiekhöz képest kb. egy nagyságrenddel nagyobb átlagos relatív hiba számítható:  $\vartheta s_L^{(B)} = 1,49\%$ , valamint  $\vartheta s_C^{(B)} = 1,47\%$ .

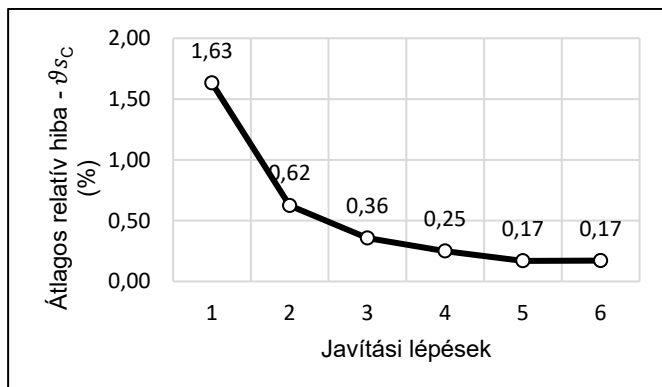
Az elfordulási rugómerevségek esetében a referencia-nyomatékokhoz lehet viszonyítani. A hatodik javítási lépésben elért relatív hibák átlagértékei:  $\vartheta M_x^{(6)} = 0,46\%$ , illetve  $\vartheta M_y^{(6)} = 0,44\%$  (6. és 7. ábra). Mivel az 1. javítási lépés kezdeti elfordulási rugómerevségei nem a Plaxis 3D-ből számított, hanem tetszőlegesen felvett értékek, ezért a báziseredmények átlagos relatív hibái  $\vartheta M_x^{(B)}$  és  $\vartheta M_y^{(B)}$ -re nem értelmezhetők.

#### 8.4.4 Pillérerők és nyomatékok

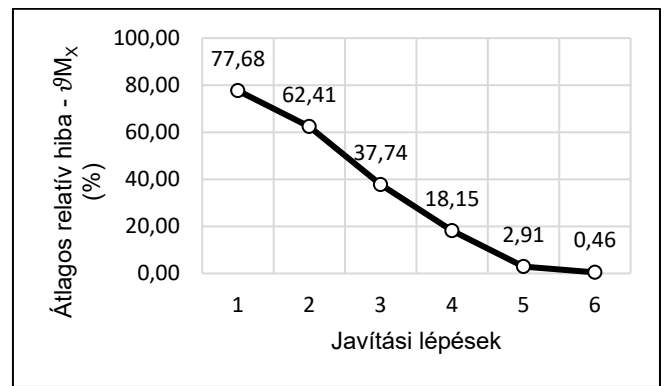
Az alaplemezről induló pillérek normálerőinek és nyomatékainak vizsgálta az előzőhöz hasonló tendenciákat tárt fel, a különbségek számszerű értékei a következőképpen alakultak. A ~2.000-10.000 kN nagyságú normálerőkre nézve az utolsó javítási lépésben referencia-értékekből számított átlagos relatív hiba kisebbre adódott, mint a báziseredmények alapján számított:  $\vartheta P_N^{(6)} = 1,66\% < \vartheta P_N^{(B)} = 1,77\%$ . Befogási pillérnyomatékok esetében az egyik irány báziseredményeit 1,5% eltéréssel sikerült megközelíteni:  $\vartheta P_{MZ}^{(6)} = 4,12\% > \vartheta P_{MZ}^{(B)} = 2,64\%$ , míg a másik irányú nyomatéknál a báziseredményekhez képest javulást sikerült elérni:  $\vartheta P_{MY}^{(6)} = 5,97\% < \vartheta P_{MY}^{(B)} = 8,93\%$ .



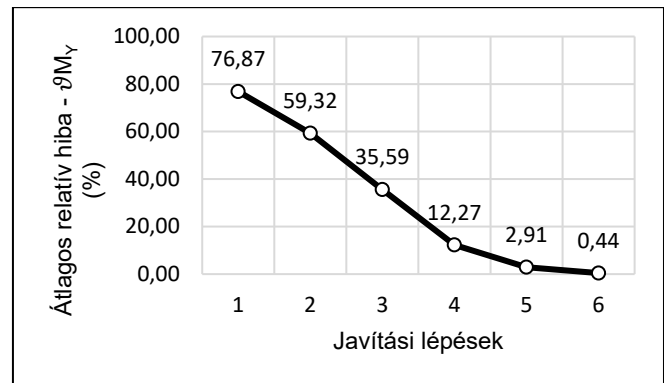
4. ábra: Lemezsüllyedések abszolútértékű átlagos relatív hibái



5. ábra: Cölöpsüllyedések abszolútértékű átlagos relatív hibái



6. ábra: Cölöpfej-nyomatékok abszolútértékű átlagos relatív hibái - X-irány



7. ábra: Cölöpfej-nyomatékok abszolútértékű átlagos relatív hibái - Y-irány

#### 8.4.5 Lemeznyomatékok

A pillérek alatti legnagyobb negatív nyomatékok ~2300-2500 kNm/m nagyságú értékeit vizsgálva megállapítható, hogy a báziseredmények mindkét irányt illetően 7-8%-os eltérést mutatnak. A javítási lépések befejezése után pillérenként pontról-pontra a báziseredményekkel azonos értékeket értem el. Az  $m_x$  nyomaték báziseredményeit 1,1% eltéréssel közelítettem meg:  $\vartheta m_x^{(6)} = 8,9\% > \vartheta m_x^{(B)} = 7,8\%$ , az  $m_y$  nyomaték báziseredményeinél viszont pontosabb eredményt értem el:  $\vartheta m_y^{(6)} = 7,6\% < \vartheta m_y^{(B)} = 8,1\%$ . A báziseredményektől való jelentősebb eltérés nyomatéki irányonként egy-egy vizsgált pontban tapasztalható, ezek mértéke 25%-ra, illetve 22%-ra adódott. Figyelembe kell venni azonban azt a tényt, hogy ezekben a pontokban a legkisebbek a nyomatékok, számszerűen 51 kNm/m, illetve 69 kNm/m. Ezen alacsony értékekhez mért viszonylag magas, 22-25% relatív hiba meglehetősen kis nyomatékeltéréseket jelent, abszolút számokban kifejezve: 13-15 kNm/m. A maximális nyomatékok értékeihez viszonyítva ezek két nagyságrenddel kisebb értékek.

#### 8.4.6 Cölöperők és nyomatékok

Ezekre a mennyiségekre külön hibaértékeket nem szükséges meghatározni, hiszen a rugómerevségek és elmozdulások közötti lineáris kapcsolat miatt ugyanazok az értékek számíthatók, mint a cölöpök függőleges eltolódásai és cölöpfejek elfordulásai esetében.

## 9. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A bemutatott módszer az alapfeltevések teljesülése esetén és az alkalmazási korlátokon belül alkalmas arra, hogy a CPRF-alapozású szerkezeteknek a szerkezettervező végelesemes szoftverrel való modellezéséhez az ágyazási- és rugómervségeket eddigieknél sokkal pontosabban adjuk meg. A térbeli modellezést lehetővé tevő, fejlett talaj-anyagmodellekkel rendelkező Plaxis 3D geotechnikai szoftver talajmechanikai feladatok mellett alkalmas tartószerkezetek, pl. monolit vasbeton vázas épületek modellezésére is, a felszerkezet anyagára és kialakítására vonatkozóan pedig általában nem szükséges megkötéseket tenni. Ennek köszönhetően a szoftverbe teljes modellként bevitt épület CPRF-szerkezetére vonatkozó eredményeket referencia-értékűnek lehet tekinteni az ekvivalens modell szerkezettervező szoftverrel végzett végelesemes analízisének vonatkozásában.

A klaszteranalízis segítségével a különböző értékű ágyazási- és szükség esetén rugómervségek száma radikális mértékben lecsökkenthető, ami már közepes méretű alaplemezek esetén is rendkívül nagy idő- és munkamegtakarítást eredményezhet. A klasztervaliditási indexértékek alapján javítási lépésként megválasztott ágyazási klaszterszerkezetekkel végzett korrekciós eljárás ugyanakkor eléri, illetve a süllyedések és pillérerők esetében meg is haladja az egyéb számítási módszerek közül legjobbnak ítélt eljárás pontosságát. A süllyedések tekintetében ez akár egy nagyságrenddel pontosabb eredményeket is jelenthet.

A módszerrel meghatározhatók a cölöprugók elfordulási merevségei annak ellenére is, hogy kezdőértékeiket tetszőlegesen választjuk meg. Ez azért különösen hasznos, mert ez a modellezési paraméter jóval nehezebben becsülhető, mint a cölöpök függőleges rugómervsége. Lehetőség nyílik a Plaxis 3D referenciamodellben szereplő cölöpök modellezését cölöp-próbaterhelés visszamodellezéséből nyert eredmények alapján szegrehtani, így a realisztikus modellezés a legmagasabb szinten valósulhat meg a hétköznapi tervezési gyakorlatban is.

A Plaxis 3D süllyedésképének lépésről lépésre történő közelítéséből egyértelműen látszik, hogy az illesztési paramétereikként szolgáló lemezágyazási merevség, a cölöpök függőleges rugómervsége, valamint a két irányú nyomatékokat modellező elfordulási merevségei egymástól nem függetleníthető mennyiségek, külön-külön történő meghatározásuk elvi hibát jelent. Ahogy a lemez elmozdulásait a  $w(x, y)$  eltolódás függvényen kívül a  $\varphi_x(x, y)$  és  $\varphi_y(x, y)$  elfordulás függvények együttesen határozzák meg, úgy lehet a kívánt süllyedésképet is ezen merevségek egy modellben történő, együttes hangolásával elérni.

A módszer kiküszöböli az idejétmúlt közelítő képletekkel becsült ágyazási- és rugómervségek alkalmazásából származó bizonytalanságokat és eltéréseket mind a süllyedések, mind az igénybevételek illetően.

## 10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk megírásához nyújtott segítségéért köszönetet mondok Dr. Szepesházi Róbertnek.

## HIVATKOZÁSOK

- Bak E., Koch E., Palotás B., Szepesházi R. Kombinált (cölöp és lemez) alapozás modellezése, *Közlekedésépítési Szemle*, 60. évfolyam, 3. szám, pp. 21-30., 2010.
- Bojtár I., Gáspár Zs., *Tartók statikája IV.*, Műegyetemi Kiadó, 1992.
- Brown, P.T., Yu, K.R., Load sequence and structure-foundation-interaction. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 112: pp. 481-488., 1986
- Gazetas, G., Seismic response of end-bearing single piles, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 3., No. 2., pp. 82-93., 1984.
- Kaliszky S., Kurutzné Kovács M., Szilágyi Gy., *Mechanika II. Szilárdságtan*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.
- Kanizsár Sz.: A Budapestre tervezett toronyházak alapozási lehetőségei, *Geotechnika 2017 konferenciakötet*, Konferencia Iroda Bt., pp. 92-112., 2017.
- Kanizsár Sz.: Toronyházak alapozás- és szerkezettervezése – 2. rész, *Vasbetonépítés*, 21. évfolyam, 1. szám, pp. 19-24., 2019.
- Kanizsár Sz.: CPRF-szerkezetek végelesemes modellezésének fejlesztése, *Geotechnika 2020 konferenciakötet*, Konferencia Iroda Bt., 2020.
- Katzenbach, R., Choudhury, D., Combined Pile-Raft Foundation, *ISSMGE Guideline*, Darmstadt, 2013.
- Kovács E., *Többváltozós adatelemzés*, Budapesti Corvinus Egyetem, Typotex Kiadó, 2014.
- Lee, I.K., Brown, P.T.: Structure-foundation interaction analysis. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 98(11), pp. 2413-243., 1972.
- Móczár B., Mahler A., Polgár Zs., Talaj és szerkezet kölcsönhatásának összehasonlító vizsgálatai vasbeton lemezalappal készülő vázas épületek esetén, *Vasbetonépítés*, XVI. évfolyam, 2. szám, pp. 41-46., 2014.,
- Poulos, H. G.: Tall building foundations: design methods and applications. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2016, 1(1), pp. 1-51.
- Rousseeuw, P.J., Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 20. november. pp. 53-65., 1987.
- Szüle B.: Klaszterszám meghatározási módszerek összehasonlítása, *Statisztikai szemle*, 97. évfolyam, 5. szám, pp. 421-438., 2019.
- Zhang, B.Q., Small J.C., Finite layer analysis of soil-raft-structure interaction. *Proceedings of 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, 1994.

**Kanizsár Szilárd** (1973) okl. építőmérnök (BME, 1997), okl. szerkezetépítő szakmérnök (BME, 2004), okl. mérnök-közgazdász (BKE, 2002), tartószerkezeti és geotechnikai tervező és szakértő. PhD kutatási területe a budapesti toronyházak alapozásának témaköre (Széchenyi István Egyetem, Győr)

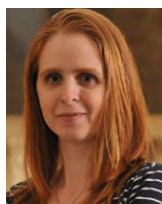
### COMPUTATIONAL METHOD WITH CLUSTER ANALYSIS FOR CPRF-DESIGN

**Szilárd Kanizsár**

CPRF-analysis needs special geotechnical FEM-sofwares, 3D-modeling and advanced soil material models. However the foundation structure is a part of the superstructure's model, as well. A toolkit for soil modeling is a moderately developed function in the structural sofwares. There is a need for a method that can numerically define the soil modeling input parameters of a structural software, in order to have the results closest to the realistic soil behaviour computed by a geotechnical software. The reaction stress distribution can lead to the right outcome only by inputting a large number of the bedding coefficients because of the peak stresses at the slab's edges and under the local forces. The method with using cluster analysis introduced in this paper allows to achieve an improvement of the poor soil modeling in the structural software in an innovative manner and significantly reduce the input works.

# 3D BETONNYOMTATÁS – KORSZERŰ BETON-ELEMEK ANYAGTUDOMÁNYI FEJLESZTÉSE A BME-N

<https://doi.org/10.32969/VB.2020.4.3>



Dr. Balázs L. György - Dr. Nehme Salem - Dr. Lublós Éva - Dr. Kopecskó Katalin - Balogh Tamás - Kasik Tamás - Dr. Sólyom Sándor

*A 3D nyomtatás a megjelenésétől fogva az érdeklődés középpontjában van. A technológia fejlődésén és sikeres alkalmazásain keresztül életünk részévé vált a legkülönbözőbb területeken.*

*A folyamatok összetettsége révén a betonnyomtatás van talán a többi területhez képest (műanyagnyomtatás és fémnyomtatás) leginkább lemaradva. Szándékunk ezért részletes beszámolók nyújtása egy cikksorozat formájában a 3D betonnyomtatás kihívásainak és eredményeinek bemutatásáról.*

*A BME Építőmérnöki Kar, Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén megkezdődtek az ország felsőoktatásában első 3D betonnyomtató beszerzésére vonatkozó előkészületek. A beszerzésre VKE 2018-1-3-1\_0003 “Korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztése” című kutatás fejlesztési pályázaton keresztül kapott kutatási támogatás révén nyílik lehetőség.*

*3D betonnyomtató pályázaton keresztül történő beszerzésén túlmenően annak beüzemelése és lehetőségeinek megismerése a feladatunk.*

*A jelen cikk elsődleges célja a figyelemfelkeltés és az iránymutatás a 3D betonnyomtatás, mint iparosított építési technológia lehetőségeinek felkutatására.*

**Kulcsszavak:** 3D betonnyomtatás, réteg állékonysága, felületképzés, építésiparosítás, digitalizálás, automatizálás, reológia, topológia, nyomtatható épület, nyomtatható híd

## 1. BEVEZETÉS

A 3D nyomtatás kezdeti évtizedei alatt egyre növekvő figyelmet vonzott. A technológia fejlődésén és sikeres alkalmazásain keresztül életünk részévé vált a legkülönbözőbb területeken.

A VKE 2018-1-3-1\_0003 “Korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztése” című kutatás fejlesztési pályázaton keresztül szeretnénk – a technológiai lehetőségek megvalósításán túl – a célirányos kutatások alapjait lerakni.

A cikksorozattal célunk, hogy az ipari nyomtatás – beleértve a betonnyomtatást is – történeti áttekintésén alapulva részletesen tárgyaljuk a technológiában rejlő pillanatnyi lehetőségeket, és tárgyaljuk az aktuális kérdésekre a lehetséges válaszok megfogalmazását.

A 3D nyomtató típusától és technológiájától függetlenül rétegről rétegre építi fel a gyártandó elemeket egy előre elkészített, számítógépes, 3D modell alapján (Krupa, 2016). A 3D nyomtatás segítségével bonyolult geometriájú, ill. egyedi felépítésű végtermékek is gyárthatók.

A 3D betonnyomtatási technológia, a folyamatok automatizálásával és digitális eszközök alkalmazásával, nagymértékben hozzájárulhat a produktivitás növeléséhez és az élőmunka igényének csökkentéséhez. A technológia nem csak gyorsabbá, de gazdaságosabbá is teheti az építési feladatokat (De Schutter et al., 2018; Mechtcherine et al., 2020). A technológia sajátos-

ságának köszönhetően – a beton rétegeként van elhelyezve – a költséges és időigényes zsaluzási munkálatok is kiválthatók, részben vagy teljesen (Napolitano et al., 2019; Menna et al., 2020).

A betonnyomtatás terén kiemelt jelentőségű többek között a beton anyagának összetétele, az egymás fölé helyezett rétegek együttdolgozása, a keletkezett anyag szilárdsági tulajdonságai és porozitása, reológiai tulajdonságok, topológiai kérdések, vasalási és egyéb szerkezeti kérdések (Gebhard et al., 2020).

A kutatások eredményeként és a technológia sikeres el-sajátításán keresztül szeretnénk eljutni az anyagszerkezeti viselkedés teljes megértéséhez és lehetséges alkalmazások kifejlesztéséhez.

Az *Anyagtudomány építőmérnököknek c. MSc tantárgy* keretében 2016-ban a tananyagba is beillesztettük, a hallgatóknak lehetőségük volt a 3D betonnyomtatással kapcsolatos ismereteiket házi feladataik formájában is elmélyíteni.

Az *Új anyagok és technológiák c. MSc tantárgy* keretében 2021. óta a technológia sajátosságait ismertetjük.

Fontos megemlítenünk, hogy Tanszékünk társkonkuzulensként, dr. Nehme Salem laborvezető személyében TDK dolgozat került benyújtásra a BME Gépészmérnöki Kar Gyártástechnológia szekciójában, aminek eredményeként a munka az OTDK-n is szerepelt (Krepler és Takács, 2020).



1. ábra: A világ első 3D betonnyomtatással készült irodaépülete Dubaiban (UAE), megnyílt: 2016. május 23-án

## 2. EGY SIKERES PÉLDA – A VILÁG ELSŐ 3D BETONNYOMTATÁSSAL KÉSZÜLT IRODA ÉPÜLETE

Vegyük most előre egy jól ismert példát a betonnyomtatás sikeres alkalmazásáról, amibe szerencsénk volt részletes betekintést nyerni.

A világ első 3D betonnyomtatással készült iroda épülete Dubaiban (Egyesült Arab Emírségek) 2016. május 23-án nyitotta meg kapuját (1. ábra). Az épület a 3D nyomtatás építőipari stratégiai terv részét képezte, amelynek célja volt annak megteremtése, hogy 3D nyomtatással készüljenek az Egyesült Arab Emírségekben az épületek 25%-ában 2030-ig.

A betonnyomtatással készült iroda egy nyugodt munkavégzést biztosító belső teremből és kiszolgáló részekből áll. A felirat tanulsága szerint „a bent tartózkodók korlátozás nélkül használhatják az ottani étkezési és egyéb lehetőségeket is”, pl. az elkészített modelleket kinyomtathatják 3D (polimer) nyomtatóval (1. ábra).

A 2. ábra mutatja az ülésteremet és a kiszolgáló egységet a dubai irodaépületben. Látható, hogy kellő méretű hely biztosítható a kis csoportos megbeszélésekhez. A hagyományos nyomtató mellett egy 3D (polimer) nyomtató (jobb oldalon) is a kísérletező kedvű kollégák rendelkezésére áll.

A világ első, 3D betonnyomtatással készült irodaépületét Dubai központjában, egy toronyházak közötti parkban helyezték

el, ezzel is felhívva a figyelmet a műszaki megoldás fontosságára (3. ábra).

A külső szemlélő elől igyekeztek elrejtetni a 3D betonnyomtatás jellegzetességeit: mind a külső, mind pedig a belső felület kiegyenlítő réteget kapott (2. ábra). A jellegzetesen réteges kialakítás viszont a bejárat közelében megfigyelhető volt (4. ábra).

## 3. EGY SIKERES PÉLDA – A VILÁG JELENLEG LEGHOSSZABB, 3D BETONNYOMTATÁSSAL KÉSZÜLT HÍDJA

A Tsinghua Egyetem kutatói vezetésével elkészítettek a 3D betonnyomtatási technológia alkalmazásával egy 26,3 m hosszú ívhídat (5 és 6. ábrák), ami – adatközlésük alapján – a kategóriájában elkészültekor (2019) a leghosszabb volt a világon.

A hidat gyalogos forgalomra tervezték, szélessége 3,6 m, Sanghaj (Kína) Baoshan kerületében található. A híd 176 betonelemből épül fel, amelyeket két robotkaros 3D betonnyomtatóval készítettek el kevesebb, mint 450 óra alatt. A közreműködők közlése szerint megközelítőleg 33%-os költségcsökkenést értek el, a hagyományom módszerrel készült változathoz képest.

A híd szerkezete 44 üreges elemből épül fel, további 68 elemet használtak fel a járófelület kialakítására, míg 64 elem

2. ábra: Tanácsterem és 3D (polimer) nyomtató a világ első 3D betonnyomtatással készült irodaépületében Dubaiban (UAE)





**3. ábra:** A világ első 3D betonnyomtatással készült irodaépületét Dubai központjában toronyházak közötti parkban helyezték el



- a betonnyomtatás technológiai eszközei,
- az extrúder méretének és típusának hatása,
- a rétegek vastagsági és magassági korlátai,
- a rétegek állékonysága,
- a réteges porozitás,
- a nyomtatott beton nyomószilárdsága,
- a nyomtatott beton húzószilárdsága,
- a nyomtatott elem nyírási ellenállása,
- a húzó- és a nyomószilárdság rétegekre merőlegesen,
- nyomtatható betonok, kiindulási követelmények,
- a betonösszetétel: lehetséges adalékanyag, cement, kiegészítő anyagok, adalékszerek, levegőtartalom,
- az adagoló méretének és geometriájának hatása,
- a friss beton bedolgozhatósága,



**4. ábra:** Falképzés a világ első 3D betonnyomtatással készült irodaépületén, Dubaiban

- a friss beton vizsgálati,
- a friss beton korai deformációi és a reológiai tulajdonságok,
- a nyomtatható beton összetételének hatása a reológiai tulajdonságokra,
- a reológiai tulajdonságok befolyásolhatósága,
- a reológiai tulajdonságok szálak esetén,
- a nyomtatott beton tervezhetősége,
- a tervezési és használati határállapotok teljesülése,
- a lokális hatásokra való ellenállóképesség,
- a szintmagasság, emeletek száma,
- a vasalási lehetőségek és korlátok,
- a topológia optimalizálás nyomtatott betonszerkezetek esetén,
- a diagnosztika-vizsgálhatóság,
- a tűzállóság,
- az esztétikai tulajdonságok teljesülése,
- a nyomtathatóság teljesítménye,
- a nyomtatás gazdaságossági kérdései,
- a bontás, újrahasznosítás.

a korlátok megépítését szolgálta. Az elemek műanyag szálerősítésű beton felhasználásával készültek (Ravenscroft, 2019).

## 4. ÉPÍTÉSIPAROSÍTÁS, DIGITALIZÁLÁS, AUTOMATIZÁLÁS

A műszaki-technológiai fejlődés folyamatos igényeket támasztott az építőipar és azon belül a betonipar számára is. A digitalizálás és az automatizálás módszereinek fejlődésével váltak, ill. válnak napjainkban lehetővé az épületiparosítás legújabb megoldásai a betonnyomtatáson keresztül.

A 7. ábrán foglaljuk össze a betonnyomtatással készült szerkezetek számának alakulását. Megfigyelhető az exponenciális növekedés, jól illusztrálva a technológiában rejlő potenciált.

## 5. KUTATÁSI FELADATOK

Ebben a fejezetben ízelítőt szeretnénk adni csupán a makroszkópikus viselkedés és a mikroszerkezet közötti kapcsolat tanulmányozása széles skálájáról a betonnyomtatás terén:

## 6. 3D BETONNYOMTATÓ LEHETŐSÉGES VÁLTOZATAI A BME-N

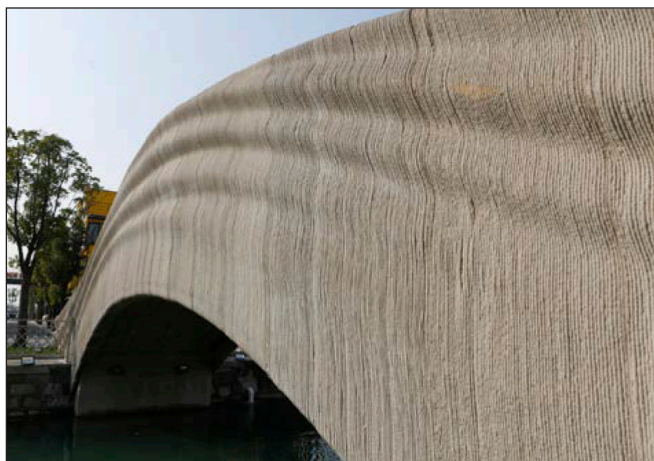
Több különböző technológiát alkalmaznak a 3D betonnyomtatásban (Buswell et al., 2020; Grasser et al., 2020; Hack and Kloft, 2020), amelyből a két legelterjedtebb: a keretrendszerű és a robotkaros kialakítás (Khan, Sanchez és Zhou, 2020). Mindkét technológia esetében extrúderes megoldással készülnek a betonrétegek. A keretrendszerű technológia főbb előnye skálázhatóság és a nyomtatási tér pontjainak teljes megközelíthetősége (Bos et al., 2016), míg a robotkarosé a komplex nyomtatási feladatok elvégezhetősége, köszönhetően a nyomtatófej hat szabadságfokú mozgásának (Bin Ishak, Fisher és Larochelle, 2016; Gosselin et al., 2016).

A keretrendszerű technológia legnagyobb korlátja az, hogy a beton csak függőleges extrudálás lévén juthat el célzott helyre, így nem tekinthető teljes értékű 3D nyomtatásnak, inkább csak 2,5D-nek. Ez a hátrány kiküszöbölhető, ha nyomtatófej





5. ábra: 3D nyomtatott betonhíd, Sanghaj, Kína (Dixon, 2019)



6. ábra: Felületképzés (Ravenscroft, 2019)

és a keret közé egy robotkart is beépítenek. Az ipari robotok alkalmazása a megfelelő célszoftverekkel lehetővé teszi a robotkar trajektóriák tervezését és kontrollálását, ami komplex formák nyomtathatóságát eredményezi (Khan, Sanchez és Zhou, 2020). Példaként megemlítjük a holland kutatók által nyomtatott, összetett geometriával rendelkező oszlopokat (8. ábra, Bekkering et al., 2020).

A keretrendszerű technológiák közül kiemeljük a dán COBOD és a szlovén Betabram nyomtatókat (9. ábra). A robotkaros nyomtatók közül két holland gyártó termékeit említjük meg: Cybe és Vertico (10. ábra). Laboratóriumi alkalmazásokra a robotkaros kialakítás szolgál több előnyös tulajdonsággal, ezért ilyen nyomtatót tervezünk beszerezni a kutatási célkitűzések megvalósításához.

## 7. TERVEZETT KONFERENCIA

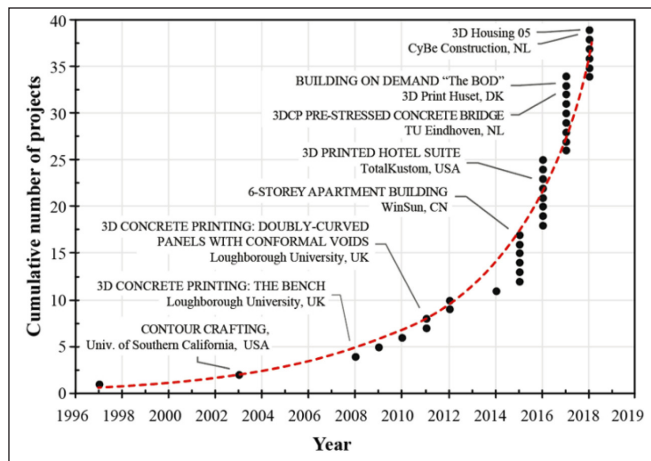
Tisztelettel tájékoztatjuk a lap olvasóközönségét, hogy már szervezés alatt van az első magyarországi konferencia, amelynek előadásai elsődlegesen a 3D betonnyomtatás köré csoportosulnak, néhány általános bevezető példán kívül.

A konferencia 2021. nov. 18-án a BME-n kerül megszervezésre a VKE 2018-1-3-1\_0003 "Korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztése" című kutatási pályázat keretein belül.

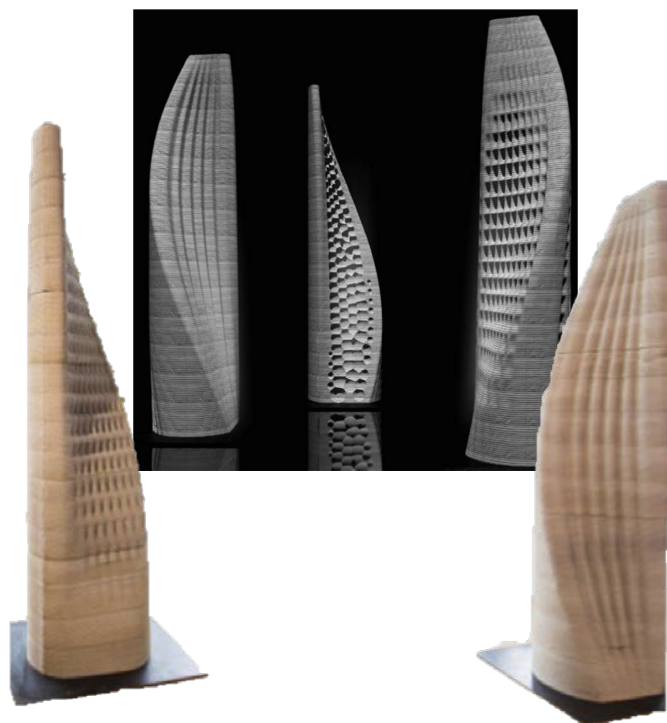
Várunk minden szíves érdeklődőt.

## 8. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A 3D nyomtatás egyre növekvő figyelmet vonz. A technológia fejlődésén és sikeres alkalmazásain keresztül életünk részévé vált. A nyomtatási alapanyag összetettsége révén a betonnyomtatás a többi területhez képest némileg lemaradt. Egy cikksorozat formájában tervezzük ezért a technológia részle-



7. ábra: Betonnyomtatással készült szerkezetek számának alakulása a kezdetektől (Buswell et al., 2018; Silva, 2018)



8. ábra: Parametrikus tervezés eredményeként elkészült, nyomtatott betonoszlopok (Bekkering et al., 2020)

tes bemutatását különböző aspektusokból, kitérve a kutatási irányokra, aktuális kihívásokra és az elkészült szerkezetek bemutatására is.

A 3D betonnyomtatás segítségével lehetőség nyílik az építőipar technológiai továbbfejlesztésére, a folyamatok



9. ábra: COBOD (bal) és Betabram (jobb) betonnyomtatók (COBOD, 2020; Betabram, 2020)



10. ábra: Cybe (bal) és Vertico (jobb) betonnyomtatók (Cybe, 2020; Vertico, 2020)

automatizálásával és digitális eszközök alkalmazásával, nagymértékben hozzájárulva a produktivitás növeléséhez és az élőmunka igényének csökkentéséhez. A technológia nem csak gyorsabbá, de gazdaságosabbá képes tenni egyes építési feladatokat.

A bevető 2. és 3. fejezetekben megvalósult példákkal szemléltettük a lehetőségeket magasépítés és hídépítés területén.

A 4. fejezetben bemutattuk, hogy a technológia alkalmazásával készült szerkezetek száma exponenciális növekedést mutat az utóbbi két évtizedben. Számos megoldandó kérdés van azonban, amint arra az 5. fejezetben rámutattunk. Központi szerepet kap a megfelelő betontechnológia kialakítása, hiszen a nyomtatás sebessége és sikeressége nagymértékben függ a nyomtatandó alapanyag tulajdonságaitól, szilárdulási ütemétől. Feladatunk, hogy részletesen kiismerjük a betonnyomatás technológiai lehetőségeit és korlátait.

A 6. fejezetben a beszerzés alatt álló 3D betonnyomtatóról adunk hírt.

A 7. fejezetben a 2021 nov. 18-ra tervezett konferenciánkra hívjuk föl a figyelmet.

## 9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzői köszönetet mondanak a VKE 2018-1-3-1\_0003 "Korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztése" című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért, amelyen belül az egyik fő feladatunk a 3D betonnyomatás megvalósítása.

## 10. HIVATKOZÁSOK

- Bekkering, J. et al. (2020) 'Architectonic Explorations of the Possibilities of 3D Concrete Printing: The Historic Building Fragment as Inspiration for New Applications with 3D Concrete Printing in Architecture', in *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, pp. 1078–1090. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7\\_103](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_103).
- Betabram (2020). Available at: <https://3dprint.com/4392/3d-house-printer-betabram/>.
- Bos, F. et al. (2016) 'Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing', *Virtual and Physical Prototyping*. Taylor & Francis, 11(3), pp. 209–225. doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>.
- Buswell, R. A. et al. (2018) '3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research', *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 112(June), pp. 37–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>.
- Buswell, R. A. et al. (2020) 'A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete', *Cement and Concrete Research*, 134(February). doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106068>.
- COBOD (2020). Available at: <https://cobod.com/bod2/>.
- Cybe (2020). Available at: <https://cybe.eu/technology/3d-printers/>.
- Dixon, E. (2019) *Shanghai opens world's longest 3D-printed concrete bridge*. Available at: <https://edition.cnn.com/style/article/shanghai-3d-printed-bridge-scli-intl/index.html>.
- Gebhard, L. et al. (2020) 'Experimental investigation of reinforcement strategies for concrete extrusion 3D printed beams', in Torrenti, J. M. and Gatuingt, F. (eds) *Proceedings of the of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, pp. 40–47.
- Gosselin, C. et al. (2016) 'Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders', *Materials and Design*. Elsevier Ltd, 100, pp. 102–109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>.
- Grasser, G. et al. (2020) 'Complex Architecture in Printed Concrete: The Case of the Innsbruck University 350th Anniversary Pavilion COHESION',

- in *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, pp. 1116–1127. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7\\_106](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_106).
- Hack, N. and Kloft, H. (2020) ‘Shotcrete 3D Printing Technology for the Fabrication of Slender Fully Reinforced Freeform Concrete Elements with High Surface Quality: A Real-Scale Demonstrator’, *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, pp. 1128–1137. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7\\_107](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_107).
- Bin Ishak, I., Fisher, J. and Larochelle, P. (2016) ‘Robot arm platform for additive manufacturing using multi-plane toolpaths’, in *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, pp. 1–7. doi: <https://doi.org/10.1115/DETC2016-59438>.
- Khan, M. S., Sanchez, F. and Zhou, H. (2020) ‘3-D printing of concrete: Beyond horizons’, *Cement and Concrete Research*, 133(March). doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106070>.
- Krepler, B. and Takács, P. (2020) ‘Kísérleti 3D betonnyomatató tervezése és vizsgálata’, *BETON*, XXVIII(II).
- Krupa, G. (2016) ‘A 3D nyomtatás otthoni lehetőségei, avagy mire is használható a technológia a mindennapokban?’, *J. of Applied Multimedia 3/ XI/2016*, pp. 35–43.
- Mechtcherine, V. et al. (2020) ‘Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review’, *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 132(March). doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106037>.
- Menna, C. et al. (2020) ‘Opportunities and challenges for structural engineering of digitally fabricated concrete’, *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 133(January), p. 106079. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106079>.
- Napolitano, R. et al. (2019) ‘Mechanical Characterization of Layer-by-Layer Interface in Concrete Elements Obtained by Additive Manufacturing’, in Corres, H., Todisco, L., and Five, C. (eds) *International fib Symposium on Conceptual Design of Structures*. Madrid, Spain, pp. 477–483. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_48).
- Ravenscroft, T. (2019) *World's longest 3D-printed concrete bridge opens in Shanghai*. Available at: <https://www.dezeen.com/2019/02/05/worlds-longest-3d-printed-concrete-bridge-shanghai/>.
- De Schutter, G. et al. (2018) ‘Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials’, *Cement and Concrete Research*. Elsevier, 112 (November 2017), pp. 25–36. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>.
- Silva, W. R. L. da (2018) *What about 3D Concrete Printing?* Available at: <https://medium.com/@wilsonecv/what-about-3d-concrete-printing-d769cc112b6d>.
- Vertico* (2020). Available at: <https://www.linkedin.com/company/vertico3d/?originalSubdomain=il>.

**Dr. Balázs L. György** (1958) okl. építőmérnök, mérnöki matematikai szakmérnök PhD, Dr. habil., egyetemi tanár, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék vezetője. MTA műszaki tud. kandidátusa. Fő kutatási területei: beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése), roncsolásmentes vizsgálatok. Speciális betonok és betétek: szálerősítésű betonok (FRC), nem acélanyagú (FRP) betétek, megerősítések anyagai és módjai, HPC, UHPC, LWC. Tűzállóságra való tervezés, tűzállóság fokozása. Fagyállóság fokozása. Kémiai ellenállóképesség fokozása. Tartósság. Használati élettartam. Fenntartható építés. Erőátadás betonban, vasbeton tartók repedezettségi állapota. Fáradás. Lökésszerű terhelés. Nukleáris létesítmények. A *fib* (Nemzetközi Betonszövetség) Magyar Tagozat elnöke. Az Int. PhD Symp. in Civil Engineering megalkotója. A *fib* Com 9 „Dissemination of knowledge” elnöke. A *fib* elnöke (2011–2012), jelenleg tiszteletbeli elnöke.

**Dr. Nehme Salem** (1963) okl. építőmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: a beton porozitása, a betonok és öntömörödő betonok tartósságának összefüggése

a porozitással, az öntömörödő betonok és acélzásalás öntömörödő betonok alkalmazása a beton és vasbeton megerősítésében, az öntömörödő betonok tömegbetonként történő alkalmazási problémáinak megszüntetése. A Magyar Mérnöki Kamara (T1-01-9159), a *fib* Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja és a Beton Szakosztályának elnöke.

**Dr. Lublőy Éva** (1976) okl. építőmérnök (BME Építőmérnöki Kar 2001), okl. betontechnológus szakmérnök (2011), okl. tűzvédelmi szakmérnök (2011), egyetemi docens a BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszékén (2008). Fő érdeklődési területei: vasbetonszerkezetek viselkedése tűz hatására, tűzkárok mérnöki tanulságai. A *fib* Magyar Tagozat tagja.

**Dr. Kopeckó Katalin** (1961) okl. vegyész mérnök (BME, Vegyész mérnöki Kar, 1990), okl. betontechnológus szakmérnök (2004), PhD (2006), az Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék oktatója 1999 és 2014 között, egyetemi docens a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékén. Fő érdeklődési területei: építőanyagok tartóssága, cementek és cement kiegészítő anyagok hidratációja, anyagvizsgálat röntgendiffrakcióval és termoanalitikával. A *fib* Magyar Tagozat, az SZTE, valamint az MSZT/MB 102 „Cement és mész” Nemzeti szabványosító műszaki bizottság tagja.

**Balogh Tamás** (1984) okl. építőmérnök, MSc (2007), betontechnológus szakmérnök (2021). Tanszéki mérnök, majd tanársegéd 2007-től 2015-ig a PTE-MIK Anyagtan, Geotechnika és Közlekedésepítés és az Infrastruktúra és Mérnöki Geoinformatika tanszéken. 2016-tól munkahelyei az IVANKA Factory Zrt, majd a KAV Hungária Kft. Jelenleg saját vállalkozásban tartószerkezeti tervező, valamint tartószerkezeti szakértő. Fő érdeklődési területei a projekt- és időmenedzsment, a 3D modellezés és tervezés, diagnosztikai vizsgálatok, 3D nyomtatás és a VR technológiák. 2011-től a Magyar Mérnöki Kamara tagja.

**Kasik Tamás** BSc (2013) és MSc (2017) diplomákat szerzett a Szent István Egyetem Ybl Miklós Építéstudományi Karán. Munkahelyei: EB Hungary Invest Kft., Ivanka Zrt. 2019 év végétől a Market Zrt. új leányvállalatánál a Prebeton Zrt-nél dolgozik, mint projektkoordinátor és betontechnológus. A betontechnológusi szakmérnöki diplomáját 2021. januárjában szerezte a BME-n. Emellett nagy érdeklődést mutat a 3D nyomtatási és CNC megmunkálási folyamatok, valamint a betontechnológia új irányainak lehetőségei iránt.

**Dr. Sólyom Sándor** okleveles építőmérnök, betontechnológus szakmérnök, PhD, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék. Fő érdeklődési területei: szálerősítésű polimer betétek alkalmazása, tapadása és lehorgonyzása betonban; szálak alkalmazása betonban. Tagja a *fib* Magyar Tagozatának és a *fib* TG5.1 munkacsoportnak. Vezetője a *fib* Magyar Tagozat YMG (fiatal mérnökök) csoportjának.

### 3D CONCRETE PRINTING – DEVELOPMENT OF ADVANCED CONCRETE ELEMENTS BASED ON NEW TECHNOLOGIES AT BME

**György L. Balázs – Salem Nehme – Éva Lublőy – Katalin Kopeckó – Tamás Balogh – Tamás Kasik – Sándor Sólyom**

3D printing technology has attracted attention already in the early phases of development. Due to the continuous progress and successful application, 3D printing technology has gained popularity in various industries. Due to the rheological and setting properties of concrete, the 3D printing technology entered into the concrete industry later – compared to others. This paper aims to introduce a series of papers that are focusing in particular, on 3D concrete printing. This paper provides an introduction to the technology, lists two successful applications and highlights the challenges of the technology. Furthermore, the two most common 3D concrete printer type is shown. Authors acknowledge the support by the Hungarian Research Grant VKE 2018-1-3-1\_0003 “Development of advanced concrete elements based on new results of materials’ science”.

## NVKP\_16-1-2016-0019 ZÁRÓ SAJTÓKÖZLEMÉNY

Az NVKP\_16-1-2016-0019 „Fokozott ellenálló képességű (kémiai korrózióknak ellenálló, tűzálló és fagyálló) beton termékek anyagtudományi, kísérleti fejlesztése”

A feladatok végrehajtása az 5 konzorciumi tag kiváló együttműködésén alapult: **Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) – konzorciumvezető, SW Umwelttechnik Magyarország Kft., ÉMI Nonprofit Kft., MC-Bauchemie Kft. és CRH Magyarország Kft.**

### **Eredményeink hasznossága Magyarországnak számára:**

A választott kutatási témáink a biztonság (tűzbiztonság), tartósság (fagyállóság), és a fenntartható fejlődés (használati élettartam, élettartam növelés) fokozására irányultak. Eredményeink ezekkel kapcsolatos műszaki fejlődést igazoltak: a magasépítés és a mélyépítés területén egyaránt, tehát kiterjedtek közlekedési műtárgyakra, lakóépületekre és ivóvíz, ill. szennyvíz műtárgyakra.

### **A eredményeink hasznossága az ipari partnereink számára:**

Együttműködésünk során kikristályosodott, hogy a tudatos anyagválasztás, és a célszerű gyártástechnológia hogyan szolgálhatják vasbetonszerkezeteink jó minőségét, élettartamát és biztonságát.

A vállalatoknak megfelelően 1 új termék (TT-panel) és 3 prototípus termék (egyreteggű falszerkezet, többretegű (szendvics) falszerkezet, pillér (falszerkezethez) szolgáltatva az előrelépést a műszaki alkalmazások terén. Eredményeink további fejlesztési irányokat jelöltek ki vasbetonszerkezetek **tűzállósága, fagyállósága és kémiai ellenállóképessége vonatkozásában.**

A Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatalánál **2 új szabadalom** (Tűzgátló falpanel és tartópillér valamint CT eljárás fagyállóságvizsgálatára) és **4 know-how** (CT mérési protokoll; Tűzkárosult elemek vizsgálata CT alapú módszerrel; Vasbeton elemek kémiai ellenállóképességének vizsgálata forgógépes módszerrel, ill. fűvókás savkorróziós berendezéssel) került benyújtásra, ill. regisztrálásra.

Az ÉMI Nonprofit Kft. Tűzvédelmi Vizsgáló Laboratórium kapacitásával és tudásával valamint az SW Umwelttechnik Magyarország Kft., a MC-Bauchemie Kft. és a CRH Magyarország Kft. gyártási kapacitásával és tudásával járultak hozzá a pályázat sikeréhez.

Vizsgálataink kiterjesztését az anyagok mikro szerkezetének megismerésére a SZIKKTI és a CT vizsgálatok terén a Tomogeo és a Geosoft Kft. segítette.

### **A eredményeink hasznossága a BME, mint konzorciumvezető számára:**

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem biztosította a kutatói háttérrel a kiválasztott mindhárom kutatási irányhoz: **tűz, fagy és kémiai ellenállóképesség.** Mindezen témák alapos felkészülést igénylő anyagtani vizsgálatokat és fejlesztéseket igényeltek. A pályázatból beszerzett eszközökkel és a pályázat során kifejlesztett vizsgálati módszerekkel a BME áll továbbra is a konzorciumi tagok és más alkalmazók rendelkezésére.

**Két új laborrészlegünk alakult** (a) Páztázó Elektron Mikroszkóp (SEM), Mikro kaloriméter és Zeta potenciálmérő laborrészleg valamint (b) a kémia ellenállóképességvizsgáló laborrészleg. Az első laborrészleg vonatkozásában nano méréstartományok vizsgálatára is lehetőség nyílik. A pályázat keretein belül ezen kívül tűzállóság, ill. fagyállóság vizsgáló eszköz állományunk is bővíthetett. A kutatómunkánk során lehetőségünk volt számos hallgató bevonására. 3 PhD értekezés, továbbá 11 BSc, 7 MSc és 5 szakmérnöki diplomamunka, ill. szakdolgozat született. 3 TDK dolgozat közül 2 dolgozatot OTDK-ra javasoltak. Tudományos eredményeinket **37 cikk mutatja** be, közülük 11 cikk jelent meg Impakt Faktoros **28.673 összesített Impakt Faktoralal.** A publikációk 17 Open Access elérhetőségűek. A SCImago rendszerben **7 cikk Q1 és 4 cikk Q2 besorolású.**



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI  
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

AZ NKFI ALAPBÓL  
MEGVALÓSULÓ  
PROJEKT

## DR. MADARAS GÁBOR KÖSZÖNTÉSE 70. SZÜLETÉSNAJJA ALKALMÁBÓL



1950. december 11-én született Budapesten. 1975-ben a Budapesti Műszaki Egyetemen építőmérnöki szerezett diplomát. Szakmérnöki oklevelét 1980-ban kapta vasbetonszerkezeti szakon. Ugyanabban az évben védte meg egyetemi doktori értekezését is vasbeton gerendák nyíráselméletéből. 1975-78 között a Mélyépterv tervező mérnökeként dolgozott, főleg közművek és kisműtárgyak terezési munkáin. 1978-79-ben a Beton- és Vasbetonipari Művek gyártmányfejlesztője, majd mélyépítési csoportvezetője volt. 1980-86-ban az Építéstudományi Intézet tudományos munkatársa, szakosztályvezetője volt a vasbetonszerkezeti tagozaton. Fő feladata a friss kutatási eredmények gyakorlati tervezési-alkalmazástechnikai feltételeinek kidolgozása volt, emellett részt vett az Intézet hagyományos kutatásfejlesztési munkáiban, fő érdeklődési köre ekkor a vasbeton lemezek átszűrődési elmélete volt.

Az Intézet munkatársaként bekapcsolódott be a CEB (Comité Euro-international du Béton) munkájába, mint a magyar nemzeti tagozat tagja, és részt vett több szabvány és műszaki normatív dokumentum kidolgozásában. 1987. január 1-től az Építésügyi Minőségellenőrző Intézet tudományos munkatársa lett a Tartószerkezeti mai koordinátora. Mint a TÜV delegáltja mintegy tíz éven keresztül vett részt az ISO TC 178 munkájában, ahol felvonó biztonságtechnikai szabályozási feladatokon dolgozott. Ösztöndíjként 1985-ben Dániában, 1991-ben Dél-Koreában dolgozott, illetve vett részt tanulmányúton. 1998-2016 között az ÉMI-TÜV SÜD Kft. ügyvezető igazgatója volt.

A CEB Magyar Nemzeti Tagozatának delegátusa és a CEB IV/1 (Quality Assurance Systems) munkabizottságának tagja

volt. Részt vett a CIB és a FIP tevékenységében. A CEB+FIP = **fib** megalakulása óta a Magyar Nemzeti Tagozat alelnöke és delegáltja. A **fib** szervezetén belül munkabizottsági és bizottsági tagként 15 éven keresztül foglalkozott minőségbiztosítási és tartóssági kérdésekkel. A COM 5, majd TG5.8 munkájában Steen Rostam meghívására 1998. és 2013. között, mint aktív bizottsági tag, 2013 óta mint corresponding member. A **fib** Magyar Tagozatának 1998. óta alelnöke és a Palotás László-díj kuratórium tagja. A pécsi Janus Pannonius Tudományegyetemen 2001. június 30-ig szóló kinevezése volt az Anyagvizsgáló és Minőségbiztosítási Tanszék vezetésére, mint má. főiskolai docens.

Megalakulása óta a Nemzeti Akkreditáló Testület elnökhelyettese, 2000-2004 között elnöke volt. Oktatói tevékenységet 1991-94 között a BME idegen nyelvű képzésében és szakmérnöki képzésében vállalt, ezen kívül számos esetben tartott hazai és külföldi hallgatóság részére előadást aktuális szakmai kérdésekről.

2001. óta a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén Betontechnológiai szakmérnöki oktatásban minőségbiztosítási előadásokat tart. Szűkebb szakterülete a tartószerkezetek vizsgálata, fejlesztése, ezen belül a vasbetonszerkezetek, a feszített vasbetonszerkezetek és a könnyűbeton szerkezetek témája.

A Mérnöki Kamara alapító tagjaként a kezdetektől részt vett a Kamara szervezésében, több vezető tervezői és szakértői jogosultsággal rendelkezik. 1998. óta a Magyar Mérnökakadémia rendes tagja. Nős, négy fia és hét unokája van. Munkája mellett fő érdeklődési területei az irodalom, a filozófia és az utazás, kedvenc sportbeli elfoglaltsága a golf.

A **fib** Magyar Tagozat nevében kívánunk jó egészséget és további sok sikert.

*Dr. Balázs L. György*

## SZALAI GYÖRGY KÖSZÖNTÉSE 65. SZÜLETÉSNAJJA ALKALMÁBÓL



Szalai György tagtársunk 1955 november 15-én született Egerben. 1982-ben a Budapesti Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Szerkezetépítőmérnöki Szakán szerezte meg mérnöki diplomáját.

Beruházói, műszaki ellenőri gyakorlat-tal 1994-ben a Heves Megyei Közlekedési Felügyeleten helyezkedett el, ahol hid és vasúti ügyintézőként a 30,00 m szabadnyílás alatti hidak, kisvasutak, sífelvonók, távolsági szalagpályák hatósági engedélyezését végezte. A hivatal átszervezését követően 2007-től az NKH ÉMRI osztályvezetője, majd főosztályvezetője.

2011. szeptemberétől a Nemzeti Közlekedési Hatóság Útügyi, Vasúti és Hajózási Hivatal Út- és Hídügyi Főosztály Engedélyezési és Forgalm szabályozási Osztály, osztályvezetője. Átszervezést követően 2017-től a Budapest Főváros Kormányhivatala Közlekedési Főosztály Útügyi Osztály, osztályvezetője, ahol feladata az egész országra kiterjedően az országos gyorsforgalmi utak, vasúti átjárók hatósági engedélyeztetésének (építése, létesítése, forgalomba helyezése, egyéb hatósági ügyeinek) irányítása.

2020. január 1-jétől nyugdíjas. A családja és a szabadidős

tevékenysége mellett, 2019 júniusától a megyei kormányhivatalok részére egyedi megbízások (kirendelések) alapján munkát végez és a 30 m szabadnyílás alatti hidak engedélyezési eljárásaiban vesz részt.

Munkája során az alábbi munkabizottságokban működött közre:

- Az országos közúthálózat területén megvalósuló kísérleti út- és hidépítési munkák szabályozásáról szóló ITM rendelet megalkotása (2018),

- A Nemzeti Fejlesztési Minisztérium megbízásából a Magyar Közút Zrt. által felállított munkabizottság az útügyi műszaki szabályozási rendszer felülvizsgálatára. Útépítési alapfogalmak, valamint a közutak igazgatásáról szóló 19/1994. (V.31) KHVM rendelet módosítása munkabizottságok (2017-2018).

- A Nemzeti Közlekedési Hatóságnál indított „Nemzeti tengelysúly- és kapcsolódó ellenőrzéseket támogató hálózat kialakítása” című projekt (2015).

Gratulálunk a tartalmas és eredményes szakmai életúthoz, és kívánjuk, hogy Szalai György tagtársunk továbbra is jó egészségben töltsé nyugdíjas éveit a családja körében, emellett végezze felelősségteljes szakértői munkáját.

*Vörös József*

## MIHALEK TAMÁS KÖSZÖNTÉSE 70. SZÜLETÉSNAJÁN



Mihalek Tamás Budapesten született 1950-ben. Középiskolai tanulmányait a Kvassay Jenő Híd-Vízműépítő Technikumban végezte, majd a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karán diplomázott.

Az egyetem elvégzése után első munkahelye a Hídépítő Vállalat volt, azon belül a győri építésvezetőség.

Rövidesen Budapestre a cég központjába került, ahol a Műszaki Osztályra helyezték, ahol eleinte monolit és előregyártott gerendás vasbeton hidakat tervezett, valamint technológiai tervek készített. Itt dolgozott közel 40 évig, majdnem egészen nyugdíjba vonulásáig különböző beosztásokban: volt tervező, vezető tervező, tervezési főmérnök stb.

A hetvenes évek közepétől a szakma egyre több figyelmet fordított az utófesztített vasbeton szerkezetekre, ezen belül is a hidakra. Ennek megfelelően a Hídépítő Vállalatnál is egyre több mérnök ismerkedett a feszített hidak tervezésével, akik közül Mihalek Tamás volt az egyik legtevékenyebb. Megszerzett tudásával és időközben kialakult tapasztalatával kiemelkedett a Műszaki Osztályon dolgozó tervezők közül. Kollégái elismerték tudását; véleményét és segítségét mindig kérték és használták.

Számos műtárgy tervezésénél tervezőként, vezető tervezőként tevékenykedett. Ilyen volt például a szabadszereléssel épített Marx (most Nyugati) téri felüljáró, illetve a 3-as metrónak és az M1-es autópályának egyes műtárgyai. Jelentős mérföldkő volt az ő szakmai életében is az 1988-ban a Magyarországon először alkalmazott szakaszos előretolásos technológiával épített berettyóújfalui közúti Berettyó-híd, a 4-es főút Szolnokot elkerülő szakaszán épített betolt hidak, illetve az orosházi Szőlő körúti felüljáró. A Lágymányosi- (Rákóczi-) híd pesti, Soroksári út fölötti felhajtóinak tervezésében éppúgy oroszlanrészt vállalt, mint az M5-ös autópálya budapesti bevezető szakaszán a vasútvonal és a honvédségi laktanya fölött épített Gyáli úti felüljáró, illetve a debreceni Homokkerti felüljáró második ütemének tervezésében. A feszített vasbetonszerkezetek területén meglévő tudását folyamatosan fejlesztette, irányításával a Műszaki Osztály statikusai rátértek a számítógépes, végeselemes programmal végzett méretezésre.

Lehetetlen feladat (és egy ilyen köszöntőben talán felesleges is) lenne az összes, közreműködésével megépült műtárgynak a felsorolása. Legjelentősebb munkáinak megemlézése során semmiképpen sem maradhat ki a magyar - szlovén vasútvonalon 1999-2000-ben Nagyrákos mellett szakaszos előretolással épült két, 1400 és 200 méter hosszú, feszített

monolit vasbeton szekrény felszerkezettű vasúti völgyhíd, illetve az M7-es autópálya 2005-ben átadott Balatonszárszó-Ordacsehi szakaszára tervezett, szintén szakaszosan betolt S27 jelű völgyhíd Balatonszemesnél, és végül, de egyáltalán nem legutolsó sorban mind közül a legnagyobb, a szintén az M7-esen 2004 és 2007 között szerelőhíddal segített szabadbetonozásos illetve később szabadszereléses technológiával épült, 1872 méter hosszú Köröshegyi völgyhídnak a tervezése sem. Az általa tervezett műtárgyak közül több is országos elismerést kapott (Nívódíj, Innovációs Nagydíj stb.)

Mihalek Tamás az új technológiák iránt érdeklődő, a munkában fáradhatatlan mérnök volt egész pályafutása során. Amikor az élet úgy hozta, hogy már nem az előbb felsorolt nagy hidak és műtárgyak tervezésével kellett (lehetett) foglalkoznia, az egyéb tervezési munkák roppant változatos terepén is megállta a helyét. Ennek ellenére mindig is a vasbeton szerkezetek, ezen belül is a feszített vasbeton hidak voltak a legszűkebb szakterületének tekinthetőek. A Vasbetonépítés-ben és más szakmai folyóiratokban, kiadványokban számos cikke jelent meg és a tervezési munkáiról szakmai konferenciákon előadásokat is tartott.

Több fiatal generáció is felnőtt mellette, akik tőle tanulták a szerkezettervezés, illetve a szerkezet-méretezés fortélyait. Közülük többen ma már más cégek kötelékében hasznosítják a Tamástól (is) megszerzett tudásukat, de Ő mindig büszkén gondol a „tanítványai”-ra, mint ahogy a „tanítványok” is hálával tekintenek vissza azokra az időkre, amikor tőle tanulhattak, vele dolgozhattak együtt. Jellemző erre a kapcsolatra, hogy amikor 2013-ban elhagyta addigi egyetlen munkahelyét, és egy tervező irodába hívták dolgozni, a kollégái közül többen követték, hogy Vele dolgozhasanak tovább. Végül 2014-ben fejezte be végleg a munkát, és nyugdíjba vonult, hogy attól kezdve már csak a családjának szentelhesse az idejét.

Régi Hídépítő kollégái és a valaha köztük dolgozó mai cégtulajdonos is azonban pontosan tudták értékelni a cégnél végzett több évtizedes munkáját és ennek eredményeképpen 2018-ban életműdíjjal ismerték el tevékenységét, bevásárolva ezzel Őt egy olyan szűk, illusztris, már-már exkluzív társaságba, amelyben előtte csupán heten voltak.

Mihalek Tamás a **fib** Magyar Tagozatának a volt és jelenlegi Hídépítő kollégák közül az egyik legrégebben regnáló, nyugdíjba vonulása óta Örökös Tagja. 2019-ben a **fib** Magyar Tagozata Palotás László-díj adományozásával ismerte el a munkásságát. Gratulálunk az ünnepezt gazdag szakmai életútjához, és a **fib** Magyar Tagozata nevében kívánunk neki szerető családjá (felesége, lánya és unokái) körében még sok-sok boldog esztendőt, és kitűnő egészséget!

*Barta János*

## TÁPAI ANTAL KÖSZÖNTÉSE 80. SZÜLETÉSNAPOJA ALKALMÁBÓL



Megbecsült tagtársunk Szegeden született 1940. október 16-án. Mérnöki oklevelét 1964-ben, majd vasbetonépítési szakmérnöki oklevelét 1974-ben szerezte a BME Építőmérnöki Karán. Több más szakképzettségre is szert tett. Kiváló képességeit hallgató korától napjainkig a vasbeton előregyártásnak szentelte. Munkáját művezetőként kezdte a BVM-nél, 1984-től volt főmérnök, 1995-től műszaki igazgató, 2003-tól műszaki vezérigazgató. Kiemelkedő munkája volt a tübbing gyártás a budapesti metró és külföldi létesítmények (Prága, Kalkutta stb.) számára. Erre ma is büszkén gondol vissza, de tudja, hogy egy egész mérnökcsapat segítette ebben a munkájában is, akikre hálásan és szeretettel gondol vissza. Az EHGT, UB és UH-típusú hídgerendák, előregyártott víztornyok, vázpaneles szerkezetek, ipari csarnokszerkezetek, a szobi vasúti völgyhíd megerősítéséhez előre gyártott dongaboltozatok és sok más szerkezeti elem az ő sikeres mérnöki munkájának köszönhető. Oktató munkát végzett meghívott előadóként az Ybl Miklós Műszaki Főiskolán. Több kutatási-fejlesztési témában dolgozott: a betonacél-megmunkálás, új típusú útátjáró, előfeszített vasbeton tartószerkezetek fejlesztése stb. Szakmai

közéleti tevékenysége során különböző funkciókat töltött be. Így például az ÉTE előregyártási szakosztály elnöke, a MÉASZ elnökségi tagja, a **fib** Magyar Tagozat tagja, a Palotás László-díj kuratóriumának tagja, a Magyar Betonelemgyártó Szövetség elnöke volt különböző időszakokban. 2004-2008-ig a Magyar Betonszövetség elnöke. Számos kitüntetésben részesült: Alpár-érem, kiváló feltaláló (arany fokozat), BVM 2008 nivódíj, ÉVM kiváló munkáért, Budapestért kitüntetés, miniszteri elismerés, a Magyar Betonszövetségért érdemérem és Palotás László-díj 1997-ben.

A gazdag életút tanulságaként elmondta, hogy gyorsuló világunkban legfontosabbnak tartja a folyamatos tanulást továbbképzést, új ismeretek elsajátítását, amit a fiatal nemzedék figyelmébe ajánl. Enélkül ma már nem lehet senki sikeres mérnök, de ehhez szerencsére a technikai feltételek minden korábbinál szélesebb körben állnak rendelkezésre.

A **fib** Magyar Tagozata nagyra értékeli tagtársunk munkáját, amelyet nyugállományba vonulása óta is folytat. Szakmai tudása, embersége, áldozatkészsége példamutató a felnövekvő mérnök-nemzedékek számára. Kívánjuk, hogy tudásával és tapasztalatával továbbra is jó egészségben gyarapítsa a hazai vasbeton előregyártás és az egész építőipar sikereit.

*Dr. Balázs L. György*

## DR. TASSI GÉZA KÖSZÖNTÉSE 95. SZÜLETÉSNAPIJÁN



Egy ilyen szép kor mellett nem mehetünk el megállás nélkül. Kivételes lehetősé-  
günk volt, hogy a köszöntés interjú for-  
májában készülhetett. Ilyen magas, kerek  
évfordulóra még nem számolhattunk e  
hasábjainkon.

### *Bevezetésként:*

Aki átélte a XX. század háromnegyed  
részét és két évtizedet a XXI. századból,  
az megismerhette a földi lét árny- és fényoldalát. Tassi Géza  
pályafutására jellemző volt, hogy a harmonikus család és jó  
barátok köre mindig mellette volt. Biztosították számára, hogy  
a tanulási, illetve a munka segítse át a gondokon, bajokon.

A szigorú állami Madách Imre katedra mellett arra,  
hogy minden eredményért meg kell küzdeni. Két év fizikai  
munka az építésben erősítette testi és szellemi állóképességét. A  
BME Mérnöki Karán végzett tanulmányok meghozták számára a  
műszaki tudományok, a technika, az építés szépségeit. Az 1950.  
januárjában szerzett jeles minősítésű oklevele predesztinálta arra,  
hogy munkássága legnagyobb részét az oktatás és a tudományos  
kutatás töltsse ki. Emellett hallgató korától egész aktív életén át  
szorosban kapcsolódott a gyakorlati építő munkához. Részt vett  
a hazai és nemzetközi szakmai egyesületek munkájában.

Érdeklődése hamar a vasbeton felé fordult.

E folyóirat „személyi hírek” rovatának hagyománya, hogy  
egyesületi tagjaink kerek évfordulói alkalmával írt köszöntés  
gerince szakmai életrajz volt. 95 éves személy esetén ez több-  
szörös ismétlés lenne.

E sorok írója jó kollegiális barátságban van az ünnepelttel.  
Ezért megengedheti magának, hogy Tassi Géza elejtett szavai-  
ból, egyéb alkalmakra készített feljegyzéseiből, más személyek  
elmondásaiból merítsen e köszöntő céljára.

### *Pillanatképek Tassi Gézáról:*

Hallgatói évek: Jó oktatóktól, kiváló évfolyamtársak kö-  
zösségében a szigorú követelmények, sűrű zárhelyik, igényes  
rajzfeladatok közepette is öröm volt a tanulás. Hiszen erre  
vágyott. Az alapszigorlat (matematika, mechanika) után érdeklő-  
dése a kari egységes oktatás keretében a tartószerkezetekre  
irányult. Maga se tudta, minek köszönhette, jeles Hídépítés-  
tan vizsgája után kedvelte őt Mihailich Győző. A professzor  
tanárelnöke volt egy bizottságnak, amely külföldi termelési  
gyakorlatra jelentkezők közül választott. Így került a hallgató  
egy morvaországi munkahelyre, ahol vasúti vasbeton ívhíd  
épült. Önálló mérnöki munkát bíztak rá (persze ellenőrzéssel).

Oktatás: Az I.sz. Hídépítéstani tanszéken tanársegéd lett.  
Jegyzetet írt Korányi Imre professzor előadásai alapján „Vas-  
és hídszerkezetek” tantárgyból. Ennek kiegészített további  
kiadásait a hallgatók hosszú évekig használták, amikor Tassi  
Géza már régen nem volt a tanszéken.

Sokat tett a háború miatt vizsgáikkal elmaradt hallgatók se-  
gítésében. Tartók statikájából hétvégén és más szabadnapokon  
a résztvevők által „manrészának” nevezett előadásokat tartott.

Honvédség: Váratlanul katonai behívót kapott. Mihailich  
professzor tekintélyével elérte, hogy egy idő után elbocsássák  
a katonaságtól. A II. sz. Hídépítéstani tanszéken néhány év után  
adjunktusi kinevezést nyert, Az építőanyagok és az összes vasbeton  
tárgyból vezetett laboratóriumi, ill. tantermi gyakorlatokat.

Palotás László professzor vette át a tanszék vezetését.

Minden ambiciózus oktatónak törekvése, hogy nappali  
hallgatók elé katedrára kerüljön. Tassi Géza már régebben  
tartott előadásokat az esti és levelező tagozaton. Az 1958. őszi

félévben Palotás professzor külföldre ment, a vasbeton szer-  
kezetek alapelemei és szilárdságtana témakör előadását Tassi  
Gézára bízta. Ő a professzor korábbi előadásai alapján jegyzetet  
írt. Ez volt az első nyomtatott oktatási anyag, amely vasbeton  
szerkezetek rugalmas-képlékeny elvek szerinti, azaz n-mentes  
számítását ismertette. Megalakult a Vasbetonszerkezetek tan-  
széke: Böleskei Elemér professzor egy évre Tassi Gézát bízta  
meg a felületi tartószerkezetek és tározók oktatásával. Ezután  
a vasbeton hidak előadása lett a feladata. Ennek keretében dol-  
gozta ki a feszített vasbeton szerkezetek témakörét, amelyből  
jegyzet, majd könyv is készült.

1974-ben, amikor a tanszék új laboratóriuma vezetője lett,  
bevezette a szerkezetvizsgálat c. gyakorlatokat.

Hosszú időn át volt több tantárgy előadója az angol nyelvű  
kurzuson, egy ideig a németen is. Egyetemi docenssé nevezték  
ki 1962-ben.

Az oktatás körébe tartozó egyéb feladatokat is ellátott. Volt  
dékánhelyettes, évfolyamvezető tanár, számos egyetemi és kari  
bizottság elnöke, ill., tagja. Államvizsga bizottsági tag volt  
1962-től, már mint egyetemi tanár, elnök 1977-től.

FIP: Palotás László és Fritz Leonhardt professzorok meg-  
látogatták Tiszaszederkényben a vegyi művek építkezését. Az  
éppen ott dolgozó Tassi Géza ismertette a folyamatban levő,  
három fajta feszített vasbeton szerkezetet. Leonhardt professzor  
megkérdezte, ha ilyen frekvenciánál a feszített vasbeton, Magyar-  
ország miért nem csatlakozik a FIP (Nemzetközi Feszítettbeton  
Szövetség) munkájához. Amikor Tassi Géza legközelebb Pestre  
érkezett, felkereste az ÉTE központját, ott találta a funkciójából  
leköszönő Garay Lajost, aki felajánlotta, hogy a FIP Magyar  
Tagozata szervezésének élére áll. Ketten olyan egyesületet  
szerveztek, amely kész volt az 1962. évi Rómában és Nápoly-  
ban tartott kongresszusra küldött magyar csoport kiállítására.

Megindult a munka itthon és a nemzetközi kongresszuso-  
kon. 1970 és 1998 között hat alkalommal Tassi Géza tartott  
plenáris ülésen (volt, hogy 2000, ill. 5000 résztvevő előtt)  
magyar nemzeti beszámolót. Felemelő érzés volt számára.

Az 1996. évi utrechti FIP tanácsülésen Tassi Géza bemutatta  
Balázs L. Györgyöt, a magyar tagozat titkárát. Rövidesen Ba-  
lázs L. György lett a FIP MT elnöke. Tassi Géza mind a hazai  
mind a nemzetközi munkában segítette őt.

Elkövetkezett 2010, amikor Washingtonban Balázs L. Györ-  
gyöt a nemzetközi egyesület elnökévé választották, elsőként, aki  
erre a posztra Európa Lajttól keletre eső országából érkezett.

Tassi Géza is büszke lehet erre a kimagasló eredményre.  
Gondolhatja, hogy Balázs L. György érdemein túl ebben benne  
volt a magyar vasbetonépítés nemzetközi fórumon általa vég-  
zett ismertetése, az új elnöknek a tanács előtti bemutatása és  
volt tanítványának, ill. munkatársának sokoldalú támogatása.

Tassi Géza sokat tett a létrejött fib MT szolgálatában más-  
más aktivitással dolgozott egyéb szervezetekben is. Hazánk-  
ban: MTA, KTE, ÉTE, MMK, MAMEK. Nemzetközi vonalon:  
IVBH-IABSE-AIPC, IASS, RILEM, GAMM, IGIP. A Kárpát-  
medencében: EMT, a Kárpát-medence hídjai. Kilenc éven át  
aktívan részt vett a csiksomlyói építéstudományi konferencián.  
Több határainkon túli kollégának segített az áttelepülésben,  
másoknak a lakóhelyükön végzett munkájukban.

### *Kutatási munka:*

A feszítőacél és beton kapcsolata terén elméleti és kísérleti  
kutatást végzett a feszítőerő lehorgonyzódása megismerésére.  
Az elméleti és kísérleti vizsgálat látszólagos ellentmondása ve-  
zetett egyik tézisére. Kandidátusi fokozatot 1957-ben szerzett.

Helyi igénybevételek: Finit eljárást dolgozott ki főként



helyi igénybevételek (pl. utófeszített tartóvég) vizsgálatára a nem feszített hosszbetétek és kengyelek figyelembe vételével. Kísérleti kutatás is folyt.

A repedezettség vizsgálatára egydimenziós modellen mátrixszámítási eljárást dolgozott ki. Egyéb témák mellett ezekkel a kérdésekkel foglalkozott MTA doktori értekezése, amelyet 1976-ban védett meg.

Abban az évben nevezték ki egyetemi tanárrá.

További kutatásainak -kevés kivétellel - csak a tárgykörét tartalmazza ez az írás.

Elsőként alkalmazott mátrixszámítási módszert tartószerkezetek rugalmas-képlékeny állapotban végzett vizsgálatára. Szerencséje volt, hogy A.A. Gvozgyevnek Moszkvában személyesen adhatta át a dolgozatot, és a vasbetonelmélet apostola elismerően reagált rá. Emlékezetes hangulatot keltett, hogy amikor Tassi Géza Londonban, a FIP plenáris ülésén gratulált a híres professzornak a Freyssinet-medálhoz, Gvozgyev emlékezett „a magyar kollégára”.

Tassi Géza számításokat végzett hajlított tartón analitikus beton szigma-epszilon diagram alapján. Továbbá: Feszített vasbeton tartók kétparaméteres teher alatt, nyírási repedezettség sokszor ismételt teher esetén, súrlódási vizsgálatok, sajtolt csőhüvelyes betonacél toldás, szálerősítésű betonok, könnyűbeton feszített tartó, szerkezetek összehasonlító elemzése, modellkísérletek szekrényes és sokbordás szerkezetekkel, kör és körgyűrű alaptestekkel, környezetbarát szerkezetek, stb.

Publikációinak száma 250+, köztük könyv, könyvrészlet, nyomtatott egyetemi jegyzet, folyóirat-cikk, konferencia-kiadvány, nagy részük idegen nyelven. Folyóiratunk személyi hírek rovatába sok tucat köszöntő-emlékező cikket írt.

Egyetemi oktatáson kívül: tartott szakmai-tudományos előadásainak száma 110+, többségük idegen nyelven. Ausztráliában és Kínában tartott vendégprofesszori kurzust.

Építőmérnöki munka:

Amint ez írásban másutt szerepel, a hidépítési tevékenységét bemutatja e folyóirat 2019, évi cikke.

Amikor a Honvédséget szolgálta, ott is építőmérnöki feladatai voltak.

Egy időszakban másodállásban dolgozott az FTV-nél, rövid ideig az Uvaterv-ben, ill. az Iparterv-ben.

1961-62-ben a 31. sz. ÁÉV-ben volt a főtechnológus helyettese. Ellenőrizte, ill. irányította az utó-és az előfeszítési munkákat. Monolit vázas szerkezetet áttervezett helyszínen előregyártott változatra.

Főnökével, Mók Lászlóval és gépész munkatársával, Lányi Jenővel kidolgozta a Mo-Ta-La néven szabadalmaztatott eljárást, amellyel 80+ kör alaprajzú szerkezet utófeszítési munkáit végezték el. Az eljárást két országban külföldön is bevezették. A vállalatnál sok más feladatot is ellátott.

A tanszékek ipari munkáiban intenzíven részt vett. Nagyszámú, jórészt nagy jelentőségű ipari-és középület ellenőrző vizsgálatát végezte el. Bauxitcement alkalmazásával készült több jelentős köz- és ipari épület tartószerkezeteinek erősítésében is részt vett.

Sok előregyártott elem laboratóriumi vizsgálatát végezte el. Közreműködött feszített vasbeton vezeték tartó oszlopok és vasúti keresztaljak fejlesztésében. Utóbbi téren dolgozott FIP munkacsoportban is. Részt vett szabványok fejlesztésében, bíráló és más szakértői munkákban.

*Elismerések:*

Kiadói nívódíj: A szakajtó 50 év után is megemlékezett a Bölcskei Elemérrel írt „Feszített tartók” könyvről, amely megjelenésekor nívódíjban részesült.

Tassi Géza a lehorgonyzási tartományokról CEB Bulletint szerkesztett Windisch Andor, Balázs L. György és más munkatársával. A munkacsoport tevékenységéről e kötet kapcsán J. Perchat elismerését fejezte ki.

FIP érem Tassi Géza számára nagy öröm volt 1992-ben, hogy (Garay Lajossal együtt) első magyarként kapott R. Walter elnök kezéből ezüst érmet a nemzetközi egyesülettől.

Oszakában kapta „a fib első kongresszusának kitüntetését” elismerést Shoji Ikeda elnök kezéből.

Továbbra is sok szolgálatot tett a magyar vasbetonépítésnek. E téren végzett mindenkori tevékenységét ismerte el a kuratórium, amikor 2005-ben nekiítélte a Palotás László díjat. Emlékezetes, hogy a díj Balázs L. György kezéből való átadásakor előadást tartott azokról a munkákról, amelyeket Palotás professzor tanítása nyomán végzett.

Meghatottan vette át Köllő Gábortól az EMT elnökétől a magyar-magyar kitüntetését.

A folyóiratunkban eddigi kerek születésnap üdvözlőleveken kívül az ünnepelt életének színes állomása volt egy könyv. A fib Magyar Tagozata elnöke főszerkesztői égisze alatt megjelent egy 402 oldalas kötet: „Cikkgyűjtemény Prof. Tassi Géza 90. születésnapjára” fejléccel. A könyvben 14 országból küldött cikkek jelentek meg. Tassi Gézát is felkérték egy cikk írására. Ez „Az örökzöld vasbeton - életem” címet viseli.

Rendkívül megtisztelő számára, hogy 2019-ben – Orosz Árpáddal megosztva – Clark Ádám életmű-díjat vehetett át Rubovszky András (Széchenyi Társaság) kezéből. Ebben tükröződött Tassi Géza hidakhoz fűződő vonzalma, érdemei a szakterület oktatásában, tudományos kutatásában, gyakorlati munkában, a hidász szakemberek iránti barátságában.

Tassi Géza folyóiratunk főszerkesztőjének felkérésére a 2019/4 szám 114-118. oldalán bemutatta a hidak terén folytatott tevékenységét, ezért e területre ez a köszöntő nem tér ki.

Az ünnepeltet a BME a 2020, évben rubin mérnöki és gyémánt doktori díszoklevélben részesítette. Szakmai életrajza megjelent a BME Építőmérnöki Kar 2020 évi díszoklevéllel kitüntetettéről szóló évkönyvében.

*Zárszóként:*

Tassi Géza sokat hasznosított abból, amit tanult, és ehhez sokat tett hozzá. Napjainkban meg van győződve arról, hogy az informatika mind inkább helyet kap az építőipari tervezésben, sőt belátható időn belül a gyakorlati építésben is.

Tassi Géza a tanulásban, tanításban és az élet minden területén segített, akinek tudott. Alma Materét hűségesen szolgálta, követte mindenkori főnökét. A hallgatókat, általában az embereket jól ismerte. Javaslaival, támogatásával legalább tíz kollégát segített, biztatott ahhoz, hogy egyetemi dolgozó legyen. Előljárói bíztak javaslataiban.

Gratulálunk ehhez a tartalmas életúthoz. További jó egészséget kívánunk.

*Vörös József*



**SKALÁR**

*Tervezd velünk a jövőt*

**WWW.SKALAR.HU**



# Colas - vasbeton szerkezetben is az élvonalban!



**Colas Közlekedésépítő Zrt.**

1113 Budapest, Bocskai út 73.

Telefon: +36 1 883 1180

Fax: +36 1 883 1137

[kozlekedesepito@colas.hu](mailto:kozlekedesepito@colas.hu)

**Colas Alterra Zrt.**

1113 Budapest, Bocskai út 73.

Telefon: + 36 1 883 1440

Fax: +36 1 883 1599

[alterra@colas.hu](mailto:alterra@colas.hu)



Fotó:© Lisanne Redegeld

Belvedere Tower, Hollandia Szerkezettervező: Adviesbureau van de Laar

Látogassa meg új weboldalunkat!

[www.axisvm.hu](http://www.axisvm.hu)