

Öntöttvas hidaktól a 3D betonnyomtatásig

From cast iron bridges to 3D concrete printing

Prof. Dr. habil BALÁZS L. György

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar,
Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3., H-1521 Budapest,
balazs.gyorgy@emk.bme.hu

Abstract

There is a rapid technological increase starting from the industrial revolution. The production of iron then steel enabled us to construct bridges of increasing spans and buildings of increasing heights.

Invention of portland cement then concrete enabled development of reinforced concrete and prestressed concrete for wider and wider use. Nowadays we can speak about high performance concrete and ultra high performance concrete.

With the use of automatization and digitilazation, nowadays we can already speak about concrete products without using any formwork.

In this way, starting from the cast iron technology we arrived to the concrete printing.

Kivonat

Az ipari forradalom óta ugrásszerű fejlődésnek vagyunk részesei. A vas és acélgyártás lehetővé tette az egyre nagyobb fesztávolságú, ill. egyre nagyobb magasságú szerkezetek építését. Jelen cikk segítségével gyönyörködhetünk az első öntöttvas híd szerkezetekben.

A portland cement és a beton megjelenése rohamos fejlődést tett lehetővé a beton és vasbeton, majd feszített beton szerkezetek a vonatkozásában.

A vasalás helyes kialakításának és elhelyezésének kezdeti keresésétől a vasbeton mellett kialakult a feszített vasbeton, a szálerősítésű beton, az ultra nagy teljesítő képességű beton, öntömörödő beton. Mindezen beton típusok előnyök új szerkezetek építéséhez valamint szerkezetek rekonstrukciójához.

Ma már arra készülünk, hogy zsaluzat alkalmazása nélkül készítsünk betonszerkezeteket a 3D betonnyomtatás technológiájával.

Vagyis eljutottunk az öntöttvas szerkezeti alkalmazásától a beton hidak nyomtatásáig.

Kulcsszavak: ipari forradalom, öntöttvas, első öntöttvas híd, vasbeton kialakulása, feszített vasbeton, UHPC, 3D betonnyomtatás, automatizálás, digitalizáció

1. BEVEZETÉS

Mondhatjuk, hogy az ipari forradalom különböző fázisait éljük át ma is. Napjaink automatizálás és digitalizációs törekvései felfoghatók a az ipari forradalom új állomásainak.

Más iparágakhoz képest, talán az építőipar volt leginkább lemaradva, így az automatizáció és digitalizáció éppen az építőiparban vezethet a leglátványosabb eredményekre.

Jelen cikk olvasása során gyönyörködhetünk az első öntöttvas híd könnyed szerkezetében, és végezetül láthatjuk a 3D betonnyomtatással épült első hidak egyikét.

Megállapíthatjuk, hogy az ipari forradalom kezdetén a gőzgép és megjelenése rohamos fejlődést váltott ki az acéliparban. Majd a cement, a beton és a vasbeton megjelenése folyamatos fejlődése, valamint napjaink automatizációs és digitalizációs törekvései arra vezettek, hogy nyomtatott betonról és betonszerkezetekről beszélhetünk a robot technika és a számítástechnika eszközeit felhasználva.

2. AZ ÖNÖTTVAS ÚJ UTAKAT NYITOTTA AZ IPAR FORADALOM KEZDETÉN

A világ első, teljes mértékben öntöttvasból épült hídja a Severn folyó felett, Coalbrookdale (UK) bányászváros közelében épült a *The Iron Bridge* (1. ábra). Ma is forgalomban áll. *The Iron Bridge* megépítésére az ipari nyersanyagok szállítása miatt vált szükségessé. A *The Iron Bridge* építéséhez akkor parlamenti döntés volt szükséges. 384 tonna öntöttvasat használtak fel a híd építéséhez. A 1. ábrán látható a *The Iron Bridge* gyönyörű, karcsú szerkezete, mindamellett, hogy követte a természetes kőből épült korábbiak íves teherviselését, de már sokkal könnyedebb formában.



1. ábra. *The Iron Bridge over river Severn. Toll Bridge. Épült 1779 (Coalbrookdale, UK World Heritage Site (Courtesy of Gordon Clark)*

A *Firth of Forth híd* 1890 márc. 4-én nyílt meg a vasúti forgalom előtt a Forth folyó fölött Edinburgh közelében. Teljes hossza 2528,7 m. Magassága 46 m. A két fő támaszköz 521 m. A híd felszerkezete 50 513 t acél felhasználásával készült. 6,5 millió szögecs került felhasználásra. A *Firth of Forth híd* jellegzetes alakjával és méreteivel hívta fő magára a figyelmet.

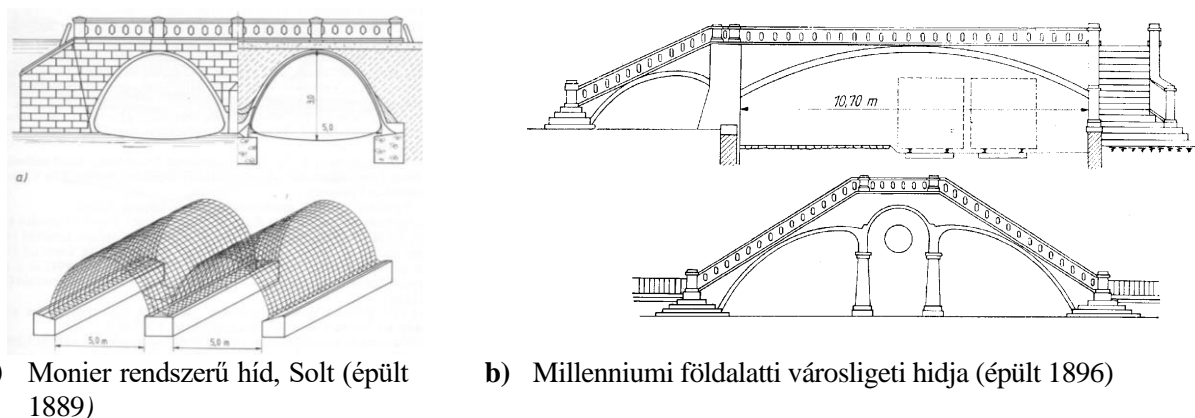
A *Firth of Forth híd* jellegzetes alakjával és méreteivel hívta fő magára a figyelmet.

James Hancock Tower 344 m magas, 100 szintes magasház Chicagóban épült 1965-ben. A magasházak közül azzal hívta föl magára a figyelmet, hogy a vízszintes terhekkel szembeni biztonság megjelenítése érdekében az épület mind a négy oldalán andráskereszteket alkalmazott a homlokzaton. A 20 szintet átfogó andráskereszteket minden szemlélő számára megnyugtató benyomást nyújtanak. A térbeli keretszerkezetként épült toronyház a homlokzaton megjelenő oszlopokkal és átkötésekkel tette lehetővé 100 szint magas épület létrehozását a toronyházak építésének korai időszakában (Weingardt, Engineering Legends, 2005).

A *Sears Tower* 1982-ben épült Chicagóban, és 1998-ig a világ legmagasabb acélszerkezetű épülete volt. Az épület szerkezete egy nagy konzolra emlékeztet, aminek a merevsége a szintelhagyások számával fölfelé csökken. A 440 m magas Sears Tower közvetlen szomszédságában állt az akkoriban legmagasabb beton épület 330 m magasságával a Michigan river partján (Weingardt, Engineering Legends, 2005).

3. A BETON ÉS A VASBETON KEZDETEI

A vasbeton kezdeteinek meghatározó példái Magyarországon a solti híd és a Millenniumi földalatti városligeti hídja (2. ábra). Ezek építési technológiája Hennebique szabadalmára vezethető vissza, amelynek lényege, hogy hálós vasbetét került alkalmazásra, de a háló a keresztmetszet középvonalát követte.

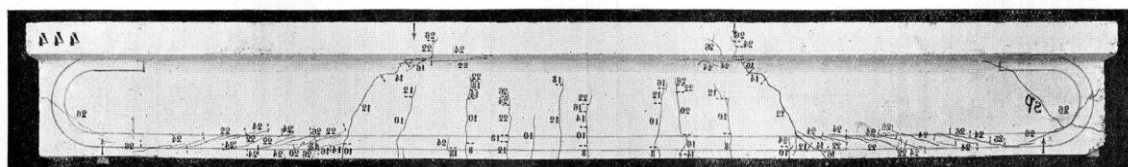
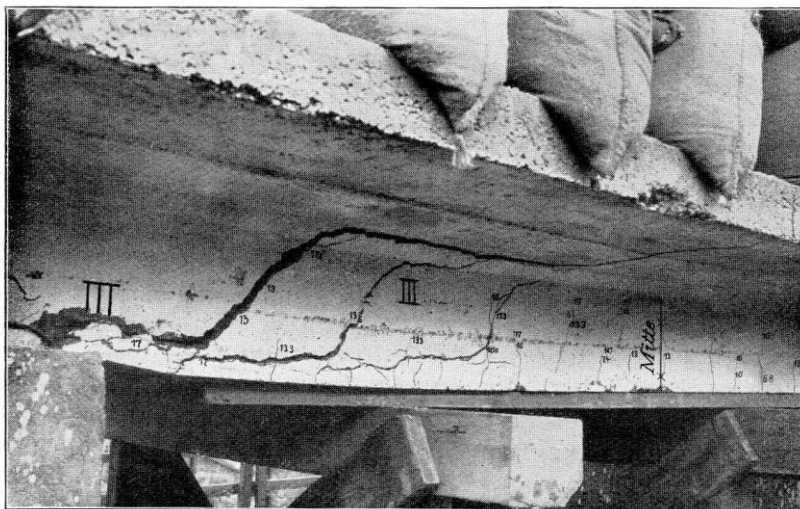


a) Monier rendszerű híd, Solt (épült 1889)

b) Millenniumi földalatti városligeti hidja (épült 1896)

2. ábra. Első vasbeton hidak Magyarországon (Balázs, 1995)

A XIX. század végén és a XX. század elején széleskörű kutatások kezdődtek (Ritter, 1899; Mörsch, 1908) a vasbeton működési elvének és tervezési lehetőségeinek tisztázására. Hajlított tartó viselkedésére mutat példát Mörsch 1908-ban megjelent könyvében közölt kísérlet (Mörsch, 1908; 3. ábra). Jól láthatóak a tönkremenetel közelében kialakuló repedések.



3. ábra. A vasbetonkutatás kezdetei. Hajlított-nyírt T tartó vizsgálata. Kísérlet: Wayß & Freytag AG. (Mörsch, 1908)

Eugen Freyssinet (1879-1962) megalkotta a feszítés gondolatát és technológiáját az 1920-as években. Világossá tette, hogy a feszítés csak nagy szilárdságú betonnal és nagy szilárdságú acéllal végezhető annak érdekében, hogy a beton zsugorodása és az acélbetét relaxációja ne eméssze fel a feszítőerő hatását. A feszített vasbeton megjelenése révén vált a vasbeton felhasználása kis és nagy fesztávok esetén meghatározóvá.

4. A BETON ÉS VASBETON EGYRE MEGHATÁROZÓBB SZEREPE

A betonszerkezetek egyre meghatározóbb szerepe magával ragadó példákon keresztül valósult meg, amikből csak néhányat tudunk itt bemutatni.

A koncepcionális tervezés egyik legszebb sikeres példjaként *Eduardo Torroja* Lovasverseny lelátójának lefedését említhetjük, amit 1935-ban építettek Madridban. A statikai váz egyszerűsége, a geometriai méretek merészsége – mind konzol kinyúlásban, mind héjvastagságban – jelentős mértékben hozzájárul a kiváló esztétikai megjelenéshez (4. ábra).



4. ábra. A madridi Zarzuela ügetőpálya lefedése (Eduardo Torroja, épült 1935)

Pier Luigi Nervi betonfejlesztését saját gondolatai alapján végezte, ami a *ferrocement* elnevezésű betont eredményezte. Ez olyan beton volt, ami kis szemcseméretű habarcsban kis átmérőjű acélbetéteket tartalmazott. A *ferrocement* felhasználása lehetséges volt vékony héj elemként, de lehetséges volt használata zsaluzatként. A *ferrocement* alkalmazásának kiváló példáját mutatja az 5. ábra.



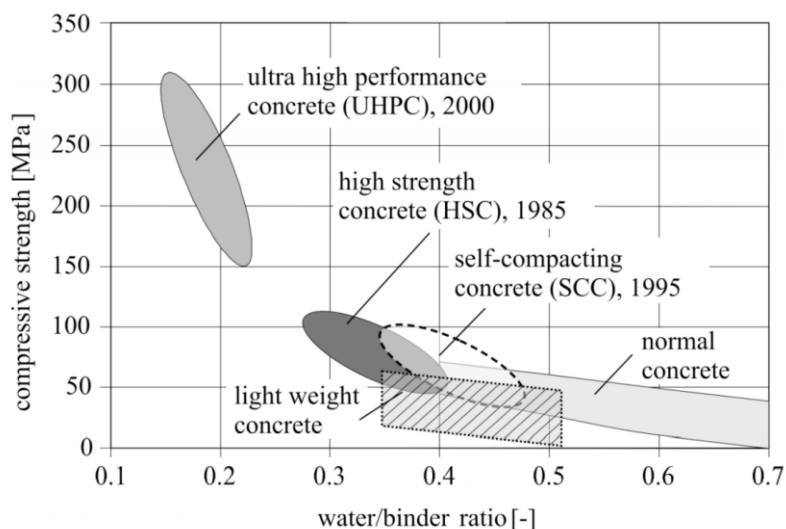
5. ábra. Pier Luigi Nervi, Kis sportcsarnok, Palazzetto dello sport, épült 1995

Fontos, hogy itt vasbeton előregyártásról is álljon példa. Az előregyártás egyre növekvő szerepet játszik ismét a vasbetonépítésben a helyszíni betonozás elkerülhetősége és az üzemi minőségellenőrzés magas szintje révén. A 6. ábrán előregyártott vasbeton váz csomópontja látható.



6. ábra. Előregyártott vasbeton keretszerkezet csomópontja

Az utóbbi évtizedekben a beton, mint szerkezeti anyag egyre szélesebb körű elfogadottságát tapasztalhattuk. Ez azért volt lehetséges, mert a beton ismeret és a betontechnológia hihetetlen fejlődésen ment át (7. ábra). Az adalékszerek és a betontervezés elveinek fejlődése (packing density) új típusú betonok, ill. megnövekedett beton tulajdonságok kifejlődését tette lehetővé.



7. ábra. A beton nyomószilárdság fejlődése a víz-kötőanyag (w/b) függvényében különböző típusú betonok esetében (Müller, 2007; fib, 2009)

Millau viadukt szép példája az acél és a vasbeton harmónikus alkalmazásának: acél pályaszerkezet és ferdekábelek, valamint vasbeton pilonok (a világ legmagasabban elhelyezkedő pályaszerkezete a völgyben levő vízfolyás szintjéhez képest) (8. ábra).



8. ábra Millau viadukt

5. A 3D BETONNYOMTATÁS MEGJELENÉSE

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 anyagtudományifejlesztése” című kutatás fejlesztési pályázaton keresztül kezdtünk foglalkozni a 3D betonnyomtatás technológiai lehetőségeinek megismerésével (Balázs, Nehme, Lublós, Kopeckó, Balogh, Kasik, Sóllyom, 2020).

A 3D betonnyomtatás sajátos technológiájának köszönhetően, a költséges és időigényes zsaluzási munkálatok kiválthatók.

A betonnyomtatás során 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.

Iroda épület 3D betonnyomtatással

A világ első, 3D betonnyomtatással készült iroda épülete Dubaiban (Egyesült Arab Emírségek) 2016. május 23-án nyitotta meg kapuját (9. 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 világ első 3D betonnyomtatással készült irodaépületét Dubai központjában, egy toronyházak közötti parkban helyezték el, ezzel is felhívva a figyelmet a műszaki megoldás fontosságára (9. ábra).



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

(Balázs, Nehme, Lublós, Kopecskó, Balogh, Kasik, Súlyom, 2020)

Híd 3D betonnyomtatással

A Tsinghua Egyetem kutatói vezetésével elkészítettek a 3D betonnyomtatási technológia alkalmazásával egy 26,3 m hosszú ívhídat (10. ábra), ami elkészültekor (2019) a leghosszabb volt a világon.

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

A híd szerkezete 44 üreges elemből épül fel, további 68 elemet használtak fel a járófelület kialakítására, míg 64 elem a korlátok megépítését szolgálta. Az elemek műanyag szálerősítésű beton felhasználásával készültek (Ravenscroft, 2019) (Balázs, Nehme, Lublós, Kopecskó, Balogh, Kasik, Súlyom, 2020)



10 ábra. 3D nyomtatott betonhíd, Sanghaj, Kína (Dixon, 2019; Ravenscroft, 2019)

6. A 3D BETONNYOMTATÁS MEGJELENÉSE

A műszaki-technológiai fejlődés folyamatos igényeket támasztott az építőipar és azon belül a betonipar számára is. Az automatizálás és digitalizáció módszereinek fejlődésével váltak, ill. válnak napjainkban lehetővé az épületiparosítás legújabb megoldásai a betonnyomtatáson keresztül. Számos kérdés van még, amik részben vagy teljes egészében megválaszolásra várnak:

Betonnyomtató tulajdonságai

- a betonnyomtatás technológiai eszközei
- az adagoló méretének és geometriájának hatása
- a nyomtathatóság teljesítménye

Rétegek

- a rétegek vastagsági és magassági korlátai
- a rétegek állékonysága
- a réteges porozitás

Betonösszetétel, frissbeton tulajdonságok és szilárdság

- nyomtatható betonok, kiindulási követelményei
- a friss beton vizsgálatai
- a friss beton bedolgozhatósága
- a betonösszetétel: lehetséges adalékanyag, cement, kiegészítő anyagok, adalékszerek, levegőtartalom
- a nyomtatott beton nyomószilárdsága
- a nyomtatott beton húzószilárdsága
- a nyomtatott elem nyírási ellenállása
- a húzó-és a nyomószilárdság rétegekre merőlegesen

Reológiai tulajdonságok

- a friss beton korai deformációi és a reológiai tulajdonságai
- a nyomtatható beton összetételének hatása a reológiai tulajdonságokra
- a reológiai tulajdonságok befolyásolhatósága
- a reológiai tulajdonságok szálak esetén

Tervezhetőség

- a nyomtatott beton tervezhetősége
- a tervezési és használati határállapotok teljesülése
- a lokális hatásokra való ellenállóképesség
- a szintmagasság, emeletek száma
- a topológiai optimalizálás nyomtatott beton-szerkezetek esetén

Vasalás, tűzállóság, diagnosztika, esztétika, újrahajsznosítás, gazdaságosság

- a vasalási lehetőségek és korlátok
- a diagnosztika-vizsgálhatóság
- a tűzállóság
- az esztétikai tulajdonságok teljesülése
- a nyomtatás gazdaságossági kérdései
- a bontás, újrahajsznosítás.

7. MEGÁLLAPÍTÁSOK

Napjaink automatizálás és digitalizációs törekvései tekinthetők az ipari forradalom új állomásainak. Más iparágakhoz képeset, talán az építőipar volt leginkább lemaradva, így az automatizáció és digitalizáció éppen az építőiparban vezethet leglátványosabb eredményekre.

Jelen cikk olvasása során gyönyörködhettünk az első öntöttvas híd könnyed szerkezetében, míg végezetül láthattuk a 3D betonnyomatással épült első hidak egyikét is.

Megállapíthatjuk, hogy az ipari forradalom kezdetén a gőzgép megjelenése rohamos fejlődést váltott ki az acéliparban. Majd a cement, a beton és a vasbeton megjelenése, folyamatos fejlődése, valamint napjaink automatizációs és digitalizációs törekvései arra vezettek, hogy nyomtatott betonról és betonszerkezetekről beszélhetünk a robot technika és a számítástechnika eszközeit felhasználva.

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

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk szerzője köszönetet mond a VKE 2018-1-3-1_0003 “Korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztése” című pályázaton keresztül kapott kutatási támogatásért.

HIVATKOZÁSOK

- Balázs Gy., „Beton és vasbeton története II.”, *Akadémiai Kiadó*, 1995
- Balázs L.Gy., Nehme, S.G., Lublós É., Kopecskó, K., Balogh T., Kasik T., Sólyom S. „3D betonnyomatás – korszerű betonelemek anyagtudományi fejlesztés a BME-n”, *VASBETONÉPÍTÉS* 2020/4, pp. 113-117., <https://doi.org/10.32969/VB.2020.4.3>
- 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>
- fib* (2009), „Structural Concrete – Textbook on behaviour, design and performance”, Vol 1, Second edition *fib Bulletin* 51, Lausanne
- Müller, H. S. (2007), *Zum Baustoff der Zukunft. Gebaute Visionen – 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton im DIN* (Ed.), Beuth Verlag, Berlin, Germany, pp. 195-221.
- Mörsch, E. (1908), „Der Eisenbetonbau, seine Theorie und Anwendung”, *Verlag von Korad Wittwer*, Stuttgart
- Nilson, A. (1987), High strength concrete – An overview of concrete research. Utilization of High strength Concrete, *Proceedings*, Stavanger, Norway
- 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>
- Ritter, W. (1899), *Construction method of Hennebique (Die Bauweise Hennebique)*, *Schweizerische Bauzeitung*, February 1899, pp. 41-61.
- Weingardt, R. G. (2005), „Engineering Legends”, *ASCE Press*,