



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Építőmérnöki kar

Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Tézisfüzet

***Porózus építőanyagok mechanikai vizsgálata és
modellezése***

Zoltán Gyurkó

okl. szerkezet-építőmérnök

okl. gépészmérnök

Tudományos vezető

Dr. Nemes Rita

egyetemi docens

Budapest, 2020

1. A KUTATÁS JELENTŐSÉGE

Jelen PhD kutatási program hiánypótló jelleggel porózus kőszerű anyagok laboratóriumban végzett mechanikai vizsgálatát és numerikus elemzését célozza. A kutatási program várható eredményei hozzásegítenek a porózus kőszerű anyagok vizsgálatának és viselkedésének pontosabb megértéséhez és anyagmodellek felépítéséhez.

A roncsolásmentes vizsgálati módszereknek (elsősorban keménységmérésnek) kiterjedt és részletes irodalma van homogén anyagokra, míg a porózus anyagok esetében az irodalomból hiányzik a következetes eredmények és következtetések ismertetése. Ezen kívül a legtöbb kutatás a témában elavult, mivel azóta új eljárásokat és eszközöket fejlesztettek, melyek mélyebb betekintést nyújthatnak az anyag viselkedésébe. A numerikus modellek az egyik ilyen megközelítés, mely le tudja írni a porózus anyag viselkedését mikro és makro szinten. Roncsolásmentes vizsgálati módszerek és numerikus modellek segítségével egyetlen anyagdarab segítségével nagyszámú adat érhető el, ami – az esetenként költséges és nem is mindig lehetséges – roncsolásos vizsgálatok számának csökkenéséhez vezet.

Az anyagvizsgálatok egyik vonatkozása a mérrethatás, mely alaposan kutatott a beton nyomószilárdsága esetében, de a mai napig döntő bizonyítékot nem szolgáltatott és átfogó modellt nem eredményezett. Bážant szerint ezt a témát tovább kell tanulmányozni numerikus módszerek segítségével, különösen a diszkrét elemes módszerrel (DEM), hogy jobban megértsük az anyagban végbemenő folyamatokat a tönkremenetel során (Bážant, 1999). A legszélesebb körben használt mérnöki modellezés, a végeselemes módszer nem alkalmas ilyen diszkrét jellegű jelenségek modellezésére. A DEM manapság kutatási fázisban van és nem használható egyszerűen a mérnöki gyakorlatban, leginkább a hosszú ideig tartó modellkalibrálás miatt. Ezért különösen hasznos lenne olyan módszer megalkotása, amely lerövidíti a kalibrálás idejét és gyorsabbá teszi a diszkrét elemes modellek használatát mérnökök számára. Jelen PhD dolgozatnak jelentőséget ad, hogy a numerikus modelleket laboratóriumi vizsgálatok támasztják alá, analitikai és mikroszerkezeti vizsgálatok bevonásával.

Ezen felül, világunk olyan irányba tart, ahol a szerkezetek szilárdsága és tartóssága mellett a fenntarthatóság is egyre fontosabb szempont lesz. Ezért olyan speciális betonokat kell kifejleszteni, amelyeknek nagy a szilárdsága, jó a tartóssága és fenntartható. A legkézenfekvőbb módja az új, zöld megközelítésű beton előállításának az, hogy az összetevők egy adott mennyiségét újrahasznosított anyagokkal helyettesítjük, mint például építési hulladékkal, mely máshogy nem hasznosítható, ellenben nagy mennyiségben elérhető. Nagy mennyiségű építési hulladék keletkezik por formában az építőiparban. Ezen anyagok közül némelyik a beton számára előnyös tulajdonságokkal is rendelkezik, ezért érdemes velük részletesebben is foglalkozni, így nemcsak a hulladéktól szabadulunk meg, hanem a beton jellemzői is javíthatók. Kutatásom során ezek hatását is vizsgáltam a beton mechanikai tulajdonságaira.

2. A KUTATÁS ALKALMAZÁSI KÖRE ÉS KORLÁTAI

A kutatás porózus építőanyagok mechanikai vizsgálataira (szilárdság és tartósság), valamint modellezésükre koncentrál. A PhD dolgozatnak két fő szakasza van:

1. Az első részben szerkezeti építőanyagok széles körét vizsgáltam laboratóriumi vizsgálatok (nyomószilárdság, különböző keménységmérések, rugalmassági

modulus) és numerikus modellezés (diszkrét elemes módszer) segítségével. A vizsgált anyagok csoportosítva a következők voltak:

- betonok: normál szilárdságú beton, nagyszilárdságú beton, polimerbeton;
 - egyéb kalcium-szilikát-hidrát alapú anyagok: pórusbeton falazóelemek (Ytong), mészhomok téglák (Silka);
 - keramiák: klinker téglák, burkolótégla, klinker burkoló lap;
 - természetes kövek: durva mészkő és tömött mészkő, riolitufa;
 - fémek: alumínium, lágyacél, szerkezeti acél (S235).
2. A második részben a betonra, mint legelterjedtebb porózus építőanyagra koncentrálok. Különböző betonok mechanikai jellemzőit és tartósságát értékelem. Ezen kívül az anyag mikroszerkezetét is vizsgálom.
- a) Az adalékanyag típus hatásának vizsgálatához a betonkeverék fő változói az alábbiak voltak (*1. táblázat*):
- adalékanyag típusa: természetes kavics, zúzott kő, könnyű adalékanyag; normál szilárdságú betonon,
 - adalékanyag szemmegoszlása: A és C görbe, valamint egyszemcsés; normál szilárdságú betonon.

1. táblázat Változó és állandó paraméterek az adalékanyag típus vizsgálatához tartozó beton keverékekben

Változók	
1.	Adalékanyag típusa: kvarckavics; zúzottkő; könnyű adalékanyag (Liapor)
2.	Adalékanyag szemmegoszlása (%)
2.1	0/0,5 0 – 40
2.2	0,5/4: 0 – 30
2.3	4/8: 15 – 100
2.4	8/16: 0 – 50
Állandók	
3.	$d_{\max}$ (mm): 16 mm
4.	Cement típus: OPC - CEM I 42,5 N
5.	v/c tényező (tömeg): 0,67
6.	Cement tartalom (kg/m^3): 264

Ezekből a keverékekből 150 mm oldalhosszúságú kocka alakú próbatesteket készítettem a nyomószilárdság vizsgálatához.

- b) A por formátumú hulladékanyag (pórusbeton por – cellular concrete powder (CCP)) hatását tanulmányoztam és hasonlítottam össze hagyományos cementkiegészítő anyagokkal (SCM), mint például metakaolin:
- cementhabarcs (CEM I 42,5 N cement; v/c = 0.5)
 - normál szilárdságú betonon (C20/25)
 - CEM I 42,5 N cement (270 kg/m^3); v/c = 0,57; $d_{\max} = 16 \text{ mm}$
 - nagyszilárdságú betonon
 - CEM I 42,5 N cement (325 kg/m^3); v/c = 0,40; $d_{\max} = 16 \text{ mm}$

Az alkalmazott pórusbeton por (CCP) legnagyobb szemnagysága ($d_{\max}$) kisebb, mint 0,09 mm. A PhD disszertációmban ismertetett eredmények csak akkor érvényesek CCP-re, ha annak legnagyobb szemnagysága

kisebb, mint 0,09 mm. A cementkiegészítő anyagok (cement tömegéhez viszonyított) aránya a következő volt:

- CCP: 0-17%
- MK: 10%
- CCP-MK keverék: 3 és 7%
- téglapor: 10%

Minden keverékből 150 mm oldalhosszúságú kocka alakú próbatesteket készítettem a nyomószilárdság vizsgálathoz és 100 mm oldalhosszúságú kockákat a fagyállóság vizsgálathoz. A cementpépből 40×40×160 mm oldalhosszúságú hasábokat készítettem a hajlító-húzó és nyomószilárdság vizsgálatokhoz.

- c) A mérethatás vizsgálatánál a normál szilárdságú betonokat vizsgáltam, mely a dolgozatban a C20/25 és C50/60 szilárdsági osztály közé eső betonokat jelenti. Az ebben a részben bemutatott eredmények erre a szilárdsági osztály tartományra korlátozódnak. A beton keverékekhez tartozó változó és állandó paramétereket a [2. táblázat](#) tartalmazza. A fő változó paraméterek a cementtartalom, az adalékanyag szemmegoszlása és a víz-cement tényező, míg a többi paraméter állandó. Végül 5 különböző szilárdsági osztályba tartozó beton keverék állt elő, melyből különböző méretű kocka és henger alakú próbatesteket készítettem; összesen mintegy 150 mintán végeztem nyomószilárdság vizsgálatot.

2. táblázat Változó és állandó paraméterek a mérethatás vizsgálatához tartozó beton keverékekben

<i>Változók</i>	
1.	Cement tartalom (kg/m^3): 264 – 500
2.	v/c tényező (tömeg): 0,35 – 0,67
3.	Adalékanyag szemmegoszlása (kg/m^3)
3.1	0/4: 594 – 910
3.2	4/8: 357 – 542
3.3	8/16: 447 – 733
<i>Állandók</i>	
4.	$d_{\max}$ (mm): 16
5.	Cement típus: OPC - CEM I 42.5 N
6.	Adalékanyag típusa: kvarc kavics

Általánosságban az alkalmazott beton keverékekben az összetevők mennyisége normál tartományban mozgott és az összetevők típusa az építőiparban általánosan alkalmazott típusú volt (kivéve ahol ezt külön jelzem), azért, hogy a speciális összetevők hatásai ne befolyásolják az eredményeket (pl. ezért alkalmaztam CEM I típusú cement):

- szemmegoszlási görbe A és C görbe között ([EN 12620](#)),
- CEM I 42,5 N típusú portland cement ([EN 197-1](#)),
- természetes kavics adalékanyag (kivéve az adalékanyag típus hatásának vizsgálatánál),
- víz-cement tényező 0,35 és 0,67 között,
- szükség esetén SIKA Viscocrete 5 Neu típusú folyósító a lehető legkisebb mennyiségben.

Összesen több mint 800 próbatestet készítettem és vizsgáltam meg. Valamint, több mint 300 tanulmányt használtam fel tudományos folyóiratokból, doktori értekezésekből, könyvekből és szabványokból és a belőlük készült szemelvények segítségével készült ez az értekezés, mely értékes anyagként szolgálhat a területen későbbiekben dolgozó kutatóknak.

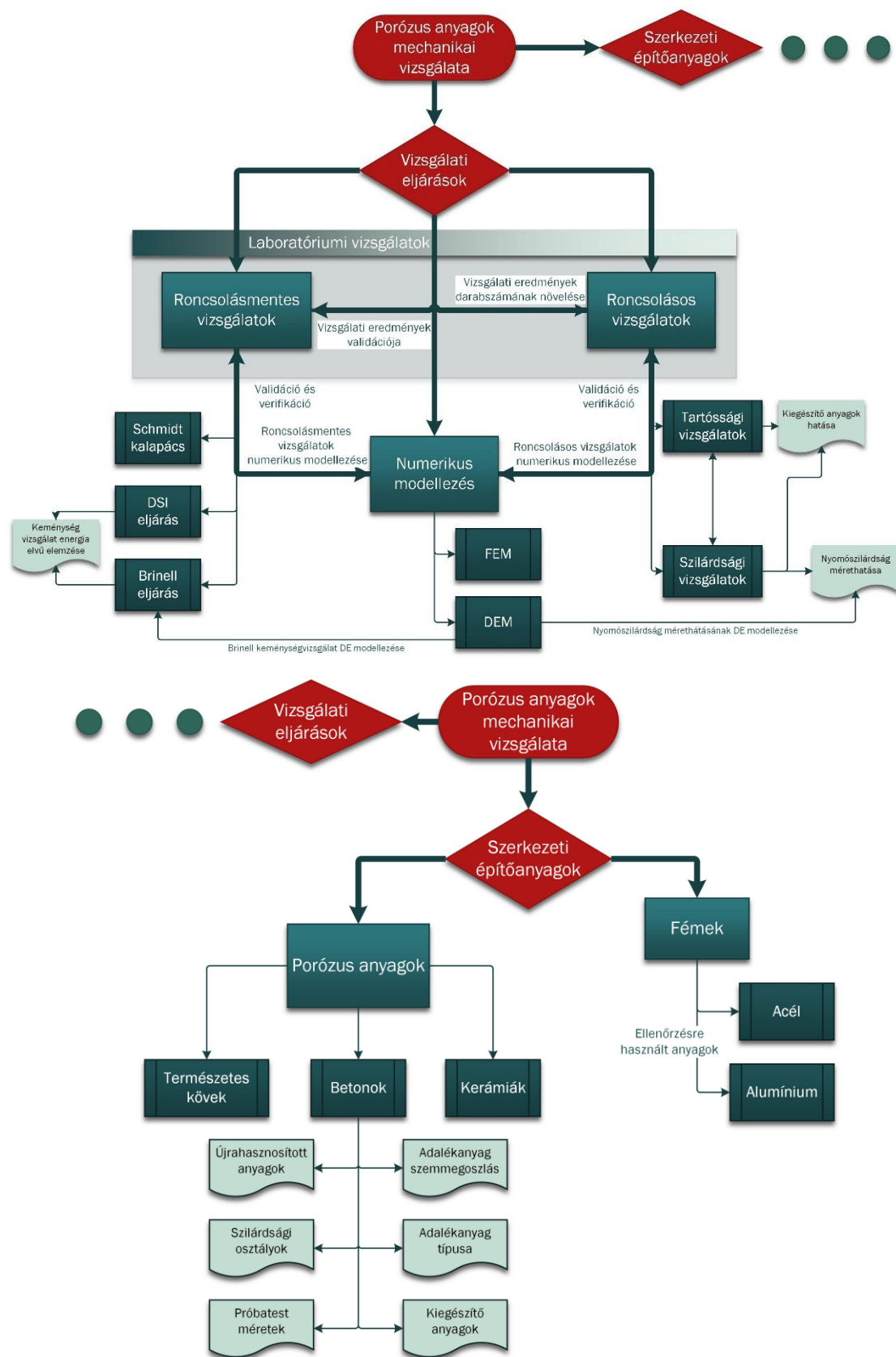
3. A KUTATÁS CÉLKITÚZÉSEI

A kutatás egyik célja egy olyan módszer keresése volt (akár laboratóriumi vizsgálat vagy modellezési eljárás), ami csökkenti a szükséges roncsolásos vizsgálatok számát. Ez különösen hasznos meglévő épületek és szerkezetek (például műemlékek) vizsgálatánál, ahol korlátozott számú vizsgálati minta vehető. Az épületek felújítása környezetbarát megközelítés (bontás és újra építés helyett), azonban egy teherhordó szerkezet élettartamának meghosszabbítása csak akkor engedhető meg, ha a szükséges teherbíró képesség bizonyított. A legelterjedtebb roncsolásmentes vizsgálati módszer szerkezeti anyagok esetén a keménységmérés. Porózus építőanyagok esetében a keménységmérés csak dinamikus keménység vizsgálat formájában alkalmaztak, melynek pontossága a roncsolásos laboratóriumi vizsgálatokhoz képest jelentősen kisebb. A statikus keménység vizsgálat előnyösebb ebből a szempontból, azonban a múltban ritkán alkalmazták ezt porózus anyagokon. A PhD dolgozat célja az anyagban keménység mérés közben lezajló folyamatok jobb megértése. Emellett kutatásom célja volt az is, hogy a porózus anyagok mechanikai vizsgálatának és modellezésének témáján belüli legfontosabb nyílt kérdéseket vizsgáljam, elsősorban a legszélesebb körben használt porózus építőanyagra, a betonra vonatkozóan.

Ezek elérése érdekében a PhD kutatásomban a következő célokat tűztem ki:

- Egy olyan keménység vizsgálati módszer keresése, amely több információval szolgál az anyagban végbemenő változásokról, mint a hagyományos keménység vizsgálati módszerek.
- Modellezési eljárás meghatározása, mely alkalmas porózus anyagok modellezésére és lehetőséget nyújt anyagvizsgálat modellezésére numerikus környezetben:
 - a modellnek tudnia kell különböző szemcseméret eloszlásokat kezelni;
 - a modellnek képesnek kell lennie hasonlóan követni (elfogadható pontossággal) az anyag viselkedését különböző terhelési módok esetén megfelelő kalibráció után
- A fő befolyásoló tényezők (vizsgálati minták mérete, adalékanyag típusa és szemmegoszlása, cement kiegészítő anyagok és újrahasznosított anyagok alkalmazása) hatásának vizsgálata a beton laboratóriumi vizsgálatai és numerikus modellezése során.
 - Újrahasznosított anyag keresése, mely hasznosítható betonkeverékben
 - Az anyagnak a beton mechanikai és tartóssági tulajdonságaira gyakorolt hatásának vizsgálata.
 - Az anyag belső szerkezetének elemzése.
 - Eljárás kidolgozása, mely a különböző típusú adalékanyagokat figyelembe veszi a numerikus modellben.
 - Annak a vizsgálata, hogy a próbatestek mérete milyen hatást gyakorol a beton nyomószilárdságára és ez hogyan befolyásolja a numerikus modell paramétereit.

4. A KUTATÁS MÓDSZERTANA



1. ábra Kutatási program

A PhD értekezésem kutatási programja két fő részre osztható. Az első rész porózus anyagok vizsgálatával foglalkozik általánosságban, különböző mechanikai vizsgálati módszerekkel. A második rész a legszélesebb körben használt porózus építőanyagra fókuszál: a betonra. Irodalomkutatás alapján három fő témát mutatok be a beton anyagvizsgálatával kapcsolatban, mely nem szerepel kellő részletességgel a szakirodalomban: beton numerikus modellezése (és anyagvizsgálatok beton numerikus modellezése), mérethatás a nyomószilárdságra, újrahasznosított anyagok hatása a beton szilárdságára és tartósságára ([1. ábra](#)).

A kutatási program a következő lépéseket foglalta magába:

1. Porózus anyagok mechanikai jellemzőinek vizsgálata
 - a. Irodalomkutatás mechanikai vizsgálati módszerek körében. A DSI módszert választottam ki, mint egy lehetséges eszköz a porózus anyagok keménységmérésére.
 - b. Építőanyagok széles körét választottam ki (ld. [2. fejezet](#)). A kiválasztott anyagokon a következő vizsgálatokat végeztem: nyomószilárdság mérés, Brinell keménység mérés, DSI vizsgálat, visszapattanási keménység mérése, rugalmassági modulus vizsgálat, sűrűség mérés. Az eredményeket kiértékeltem és a különböző jellemzők kapcsolatát vizsgáltam a benyomódási energia alapján is.
 - c. Numerikus módszereket tanulmányoztam porózus anyagok modellezéséhez. A DEM módszert választottam ki, mint várhatóan a legkedvezőbbet.
2. Beton mechanikai vizsgálata és modellezése
 - a. A betonhoz, valamint a nyomószilárdsági és keménységi vizsgálatokhoz diszkrét elemes modellt készítettem.
 - b. A beton szilárdságát az alkotóelemein kívül a próbatestek mérete is befolyásolja. A témában a szakirodalmi adatok között ellentmondás fedezhető fel. A téma kutatása érdekében normál szilárdságú betonból különböző méretű és szilárdsági osztályba tartozó próbatesteket készítettem és nyomószilárdságukat megvizsgáltam.
 - c. Ezután azt vizsgáltam, hogy a mérethatás hogyan vehető figyelembe a numerikus modellben és az mennyire pontosan írja le a jelenséget.
 - d. Fenti modell segítségével a szemmegoszlás és adalékanyag típus hatását vizsgáltam. A különböző betonokon végzett nyomószilárdsági laboratóriumi vizsgálatok leírását a [2. fejezet](#) tartalmazza.
 - e. A betont alkotó finom porokat nem lehet diszkrét elemesen modellezni, csak azok hatását lehet figyelembe venni a szilárdsági paraméterekre. A valóságban azonban jelentős hatásuk lehet a beton mechanikai és tartóssági jellemzőire. Ezért az újrahasznosított, por alakú anyagok hatását tanulmányoztam a beton mechanikai és tartóssági tulajdonságaira, egy hulladékanyag por (CCP) használatával, mely nagy mennyiségben elérhető, de ebben a formában még nem foglalkoztak vele. A CCP tartalmú betonok szilárdságát és tartósságát vizsgáltam, valamint mikroszerkezetét elemeztem, hogy a betonra gyakorolt hatás érthetőbb legyen.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben a disszertációban leírt új tudományos eredményeket mutatom be téziscsoportokra bontva.

1. Téziscsoport: A porózus szerkezeti anyagok statikus keménység vizsgálata

Jelölések, rövidítések;

- F : keménységvizsgálat során alkalmazott terhelő erő [N];
- d : keménységvizsgálat során kialakuló benyomódási átmérő [mm];
- DEM: Diszkrét Elemes Módszer;
- HB: Brinell keménység;
- W_i : keménységvizsgálat során kialakuló teljes benyomódási munka;
- W_e : keménységvizsgálat során kialakuló rugalmas benyomódási munka

Porózus kőszerű építőanyagok valamint fémek felületi keménységét vizsgáltam, statikus keménységmérési eljárással (Brinell ill. DSI). A vizsgált anyagok a következők voltak: alumínium, lágyacél, betonacél, kétféle durva mészkő, tömött mészkő, riolit tufa, normál szilárdságú beton, nagyszilárdságú beton, polimerbeton, klinker burkolólap, klinkertégla, burkolótégla, mészhomoktégla, pórusbeton. Roncsolásmentes vizsgálatok mellett a roncsolásos vizsgálatokat is elvégeztem minden anyagra, hogy azok mechanikai tulajdonságait meghatározzam (nyomószilárdság, rugalmassági modulus, (test)sűrűség). A vizsgálatokat (nyomószilárdság valamint keménység vizsgálatok) Diszkrét Elemes Módszer segítségével modelleztem is. Ezek alapján a témában az új tudományos eredményeim a következők:

1.1 Laboratóriumi mérések alapján igazoltam, hogy gömb alakú szűrőszerszámmal végzett keménység vizsgálatok során a terhelő erő és a maradó benyomódási átmérő négyzetének a kapcsolata lineáris. Ebből következően a Meyer-féle hatványtörvényben szereplő n kitevő értéke porózus építőanyagokra 2, valamint a Meyer-féle hatványtörvényben szereplő a szorzótényező egy anyagfüggő jellemző, amely külön-külön meghatározható minden porózus építőanyagra, [1][2] és 2. ábra. Igazoltam, hogy a Brinell-keménységnek van egy maximum értéke a terhelő erő függvényében, [1][2] és 3. ábra. Megfigyeléseim megerősítik és kiterjesztik a betonokon megfigyelt maximum értékre vonatkozó hipotézis érvényességét más porózus építőanyagokra.

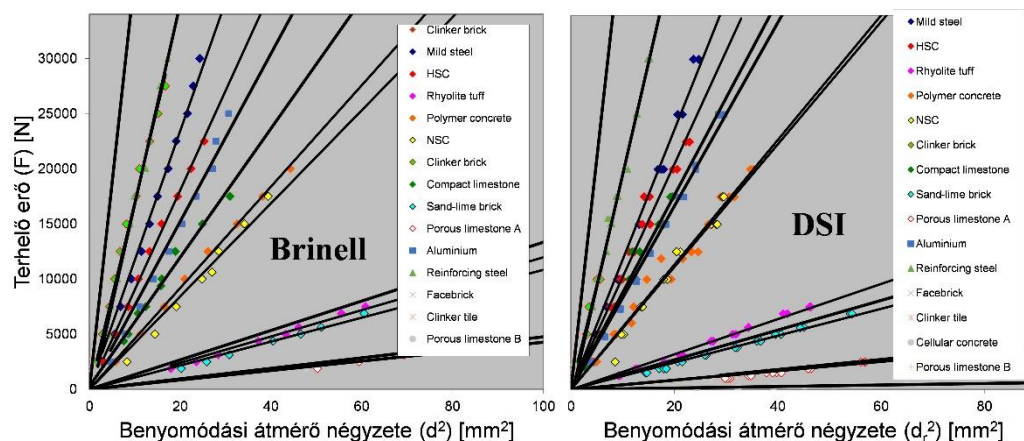
Tudományos háttér:

A Brinell-keménység nem független a terhelő erőtől. A kapcsolat a terhelő erő és a benyomódás mérete között, golyó alakú mérőfej esetén felírható empirikus összefüggésekkel. Meyer szerint, egy azonos méretű golyót ugyanabba az anyagba különböző erővel benyomva eltérő felületi keménységet kapunk (Meyer, 1908). Ezt fejezi ki a róla elnevezett határtörvény is:

$$F = a \times d^n \quad (1)$$

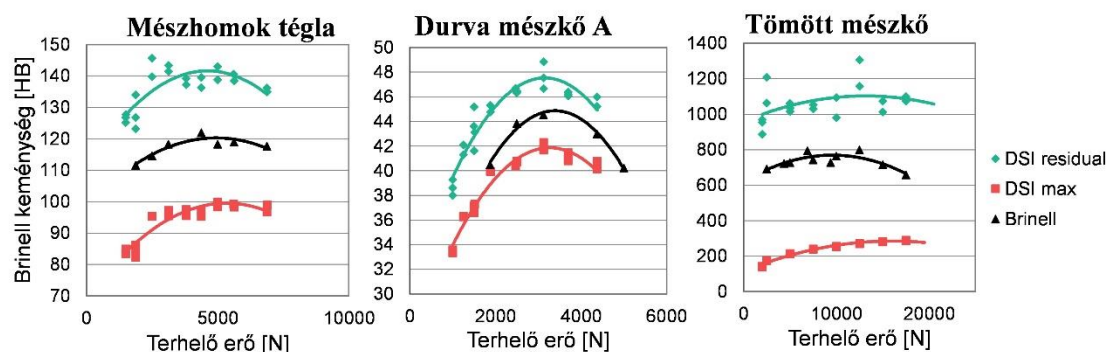
Ez az összefüggés a terhelő erő és a benyomódás átmérője között teremt kapcsolatot. Az a és n paraméterek anyagjellemzők. A szakirodalomban fellelhető adatok alapján az n kitevő értéke általában nagyobb, mint 2 és legtöbbször 2 és 2,5 közé esik. Az irodalom rámutat, hogy az n értéke teljesen megmunkálatlan anyagok esetén 2,5-höz közeleli, míg jól megmunkált anyagoknál közel 2-nek tekinthető. Vizsgálataim során

összehasonlítottam a terhelő erőt valamint a benyomódási mélységet (a benyomódási átmérő mellett). Az eredmények alapján igazoltam, hogy a benyomódási mélység valamint a terhelő erő között lineáris összefüggés van, ami a benyomódási átmérő és a benyomódási mélység kapcsolatát felíró összefüggés alapján arra vezethető vissza, hogy a Meyer-féle hatványtörvényben szereplő n kitevő értéke porózus építőanyagok esetében nem 2 körüli érték, hanem pontosan 2, ahogy az a 2. ábrán látható. Ezek alapján a Meyer-féle hatványtörvényben szereplő a szorzótényező egy kizárólag az anyagtól függő érték, amely minden anyagra egyenként megadható. [1][2]



2. ábra A terhelő erő a benyomódási átmérő négyzetének függvényében Brinell (bal) valamint DSI (jobb) vizsgálat esetén minden vizsgált anyagra

A vizsgálati eredményekből megfigyelhető volt az a szakirodalomban a közelmúltban publikált megfigyelés, amely szerint betonok Brinell-keménysége a terhelő erő függvényében ábrázolva maximális értéket vesz fel (Szilágyi et al, 2011). A Brinell keménység terhelő erő függvényében létező maximumára vonatkozó megfigyelést alátámasztották az én vizsgálati eredményeim is, azonban ezt a jelenséget nem csak betonokra figyeltem meg, hanem minden vizsgált porózus szerkezeti építőanyagra is, ahogy azt a 3. ábra is mutatja [1][2].



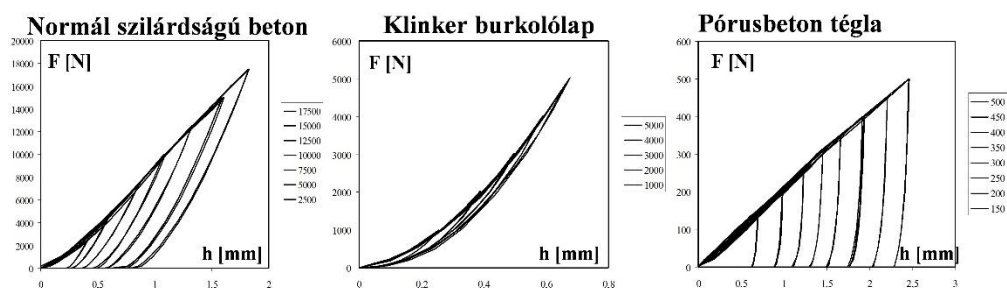
3. ábra Brinell keménység a terhelő erő függvényében különböző porózus építőanyagok esetén (mészhomoktégla, durva mészkő, tömött mészkő)

1.2 Laboratóriumi kísérletekkel igazoltam, hogy a DSI módszer alkalmazható porózus építőanyagok keménységvizsgálatára. Az eljárás megbízható eszközt biztosít a keménységmérés pontosságának növeléséhez, valamint lehetővé teszi a benyomódás energia-elvű vizsgálatát. Igazoltam, hogy a benyomódási energia közelebbi kapcsolatot mutat mechanikai anyagjellemzőkkel (szilárdság, rugalmassági modulus), mint a Brinell vizsgálatból megkapható benyomódási átmérő. Meghatároztam egy lineáris összefüggést a Brinell-keménység legnagyobb értéke és a teljes és rugalmas benyomódási munka aránya között, és bizonyítottam ennek érvényességét rugalmas-képlékeny valamint képlékeny porózus építőanyagokra [1][2][6][7].

Tudományos háttér:

Kísérletekkel igazoltam, hogy a DSI eljárás alkalmazható porózus anyagok keménységvizsgálatára. A DSI eljárás alkalmazása előnyösebb a Brinell eljáráshoz képest, mivel ez adatokat szolgáltat a teljes terhelési-tehermentesítési folyamatról, valamint nagyobb a pontossága, és kiküszöböli az emberi leolvasásból eredő bizonytalanságokat is. Kiszámítható belőle a benyomáshoz szükséges munka, amely közvetlenebb kapcsolatot mutat a beton mechanikai jellemzőivel, különös tekintettel a rugalmassági modulusra [1][2][6][7].

A DSI eljárás terhelési-tehermentesítési görbéi alapján (4. ábra) a szerkezeti anyagok csoportokba sorolhatók, amely csoportok az egyes anyagok mechanikai viselkedésére utalnak: rugalmas, rugalmas-képlékeny valamint képlékeny. A csoportba sorolás a terhelési-tehermentesítési görbék alakja valamint a maradó és maximális benyomódási mélység arányának függvényében adható meg. Mérési eredményeim alapján a képlékeny anyagok csoportjába azokat az anyagokat soroltam, amelyeknek a tehermentesítési görbéje közel függőleges (a maradó és maximális alakváltozás aránya nagyobb mint 85%), míg a rugalmas anyagok csoportjába azokat az anyagokat soroltam, amelyek tehermentesítési görbéje közel megegyezik a terhelési görbéjével (a maradó és maximális alakváltozás aránya kisebb mint 15%). Az ezen értékek közötti anyagokat rugalmas-képlékenynek osztályoztam [2][16].

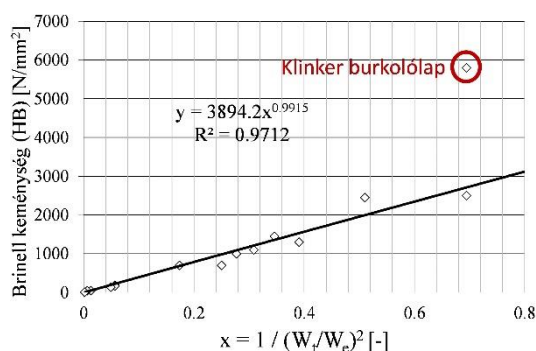


4. ábra DSI vizsgálatok eredményei: (a) normál szilárdságú beton – rugalmas-képlékeny, (b) klinker burkolólap – rugalmas és (c) pórusbeton téglá - képlékeny

Az anyagok keménységi és szilárdsági jellemzői kapcsolatba hozhatók egyéb, energia elven megfogalmazott jellemzőikkel is. Kutatásaimban igyekeztem kapcsolatot találni a benyomódási munka (teljes, rugalmas, illetve disszipálódó benyomódási munka) és a mechanikai jellemzők között. Ezzel igyekeztem lépéseket tenni a keménység, mint fizikai jellemző pontosabb megértése felé, mivel a mai napig nem tisztázott a

szakirodalomban, hogy a keménységi mérőszámok milyen jellegű mechanikai jellemzőt mutatnak meg leginkább. Logikai alapon a rugalmas benyomódási munka az anyag rugalmassági modulusával, míg a disszipálódó benyomódási munka az anyag szilárdságával lenne kapcsolatba hozható. Vizsgálati eredményeim ezt a feltételezést nem támasztották alá elég erősen. Az energiaelvű megközelítés alapján azt figyeltem meg, hogy az anyagok Brinell-keménysége azok rugalmas jellemzőivel (rugalmas benyomódási munka) van bizonyítható kapcsolatban. A képlékeny jellemzőkkel való összefüggés inkább csak feltételezhető. Meghatároztam azt az összefüggést (2) amellyel általánosan az általam vizsgált összes rugalmas-képlékeny és képlékeny anyagra (kétféle durva mészkő, tömött mészkő, riolit tufa, normál szilárdságú beton, nagyszilárdságú beton, polimerbeton, burkolótégla, mészhomoktégla, pórusbeton) megadja a *maximális Brinell keménység* és a *rugalmas és teljes benyomódási munka* összefüggését. Ezekre az anyagokra (rugalmas-képlékeny, képlékeny) lehet ugyanazt az összefüggést használni, mint fémekre (alumínium, lágyacél, betonacél). Tökéletesen rugalmas anyagokra az összefüggés nem alkalmazható (elsősorban a klinker burkolólapra), ahogy azt az 5. ábra is mutatja [1][16].

$$HB = k \cdot \frac{1}{\left(\frac{W_t}{W_e}\right)^2} \quad (2)$$



5. ábra A Brinell keménység és a rugalmas valamint teljes benyomódási munka arányának kapcsolata

1.3 Numerikus kísérletekkel igazoltam, hogy létrehozható Diszkrét Elemes (DE) modell, amely nyomószilárdság alapú kalibrálást követően, leköveti a Brinell keménységvizsgálat során megfigyelt jelenségeket: a benyomódási átmérő négyzetének lineáris összefüggését a terhelő erővel (6. ábra), valamint a Brinell-keménység maximum értékét a terhelő erő függvényében, (7. ábra) [3][5][6][7][9].

Tudományos háttér:

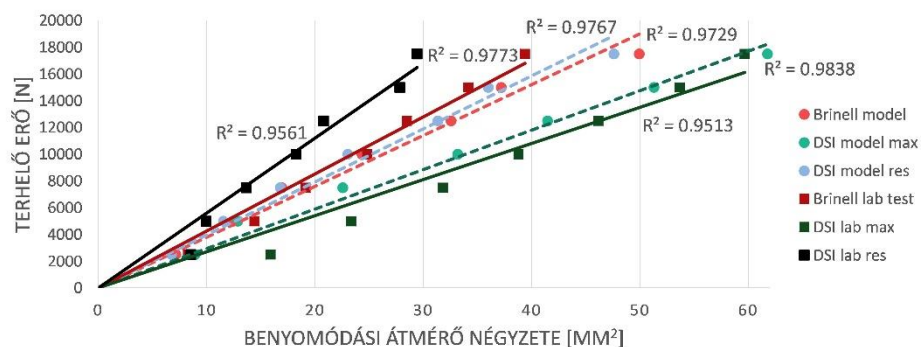
Betonok esetén az 1.1 altézisben bemutatott viselkedés lekövethető egy a nyomószilárdsági vizsgálattal beállított DE (Diszkrét Elemes) modellel. Létrehoztam erre egy DE modellt, amelynek legfontosabb bemenő paraméterei: az anyag testsűrűsége, szemmegoszlása valamint nyomószilárdsága. Az ezek alapján beállított modell leköveti a tényleges laboratóriumi vizsgálatokkal kapott viselkedést. A modell képes leírni a rugalmas-képlékeny viselkedést (amelyre alapesetben egy végeselemes modell nem képes). A laboratóriumi kísérletek során megfigyelt speciális karakterisztikák:

- a terhelő erő és a benyomódási átmérő négyzetének összefüggése lineáris (6. ábra),

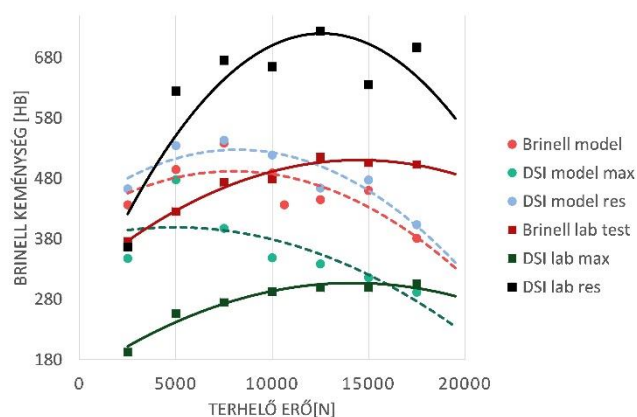
- a terhelő erő függvényében a Brinell keménységnek van egy maximum pontja (7. ábra)

lekövethetőek DE modell segítségével is [3][5][6][7][9].

Az ábrán megfigyelhető, hogy a DE Brinell-modell jól közelíti a laboratóriumi eljárást és jelentősebb eltérés csak nagy terhelőerő esetén adódott.



6. ábra A terhelő erő a benyomódási átmérő négyzetének függvényében a laboratóriumi vizsgálatok és DE modellek esetén



7. ábra A Brinell keménység a terhelő erő függvényében a laboratóriumi vizsgálatok és DE modellek esetén

2. Téziscsoport: A próbatest méret hatása a normál szilárdságú beton nyomószilárdságára

Jelölések, rövidítések; Mix 1 egy C20/25, Mix 2 egy C30/37, Mix 3 egy C35/45, Mix 4 egy C45/55 és Mix 5 egy C50/60 szilárdsági osztályú normál szilárdságú beton.

- B , S és α a mérethatást leíró törvény (MSEL (Modified Size Effect Law)) empirikus paraméterei;
- d a próbatest egyik hosszmérete;
- A a próbatest keresztmetszeti területe;
- V a próbatest térfogata.

A beton nyomószilárdságát jelentősen befolyásoló tényező a próbatest mérete. A beton laboratóriumi vizsgálatának és modellezésének szempontjából is előnyösebb lenne kisebb próbatestek használata, ehhez azonban a mérethatás jelenségének pontosabb megértése szükséges. Új tudományos eredményeim a témában a következők:

2.1 Kidolgoztam egy olyan algoritmust, amely megfelelő pontossággal megadja normál szilárdságú betonok (C20/25-C50/60) esetén a szabványos próbatest (150 mm-es kocka vagy Ø150/300 mm-es henger) nyomószilárdságát, amennyiben a próbatestek testsűrűsége a 2200-2400 kg/m³-es tartományba esik. [20]

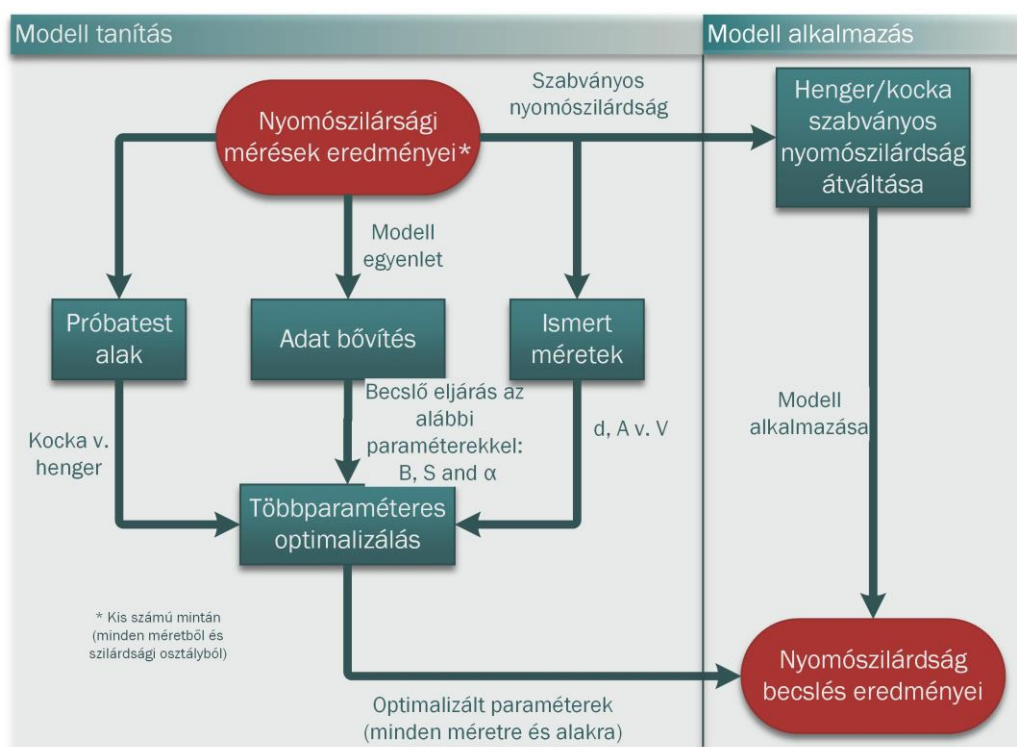
Tudományos háttér:

A modell előállítható az módosított mérethatás törvény (modified size-effect law – MSEL) alapján, és az irodalomban fellelhetőkhöz képest pontosabb eredményt ad kocka próbatest esetén és hasonlóan pontos eredményt ad henger próbatestek esetén (Kim et al, 1999; Del Viso, 2002).

Az algoritmus az alábbi lépésekből épül fel (8. ábra):

1. Kiszámú laboratóriumi mérési adat (különböző méretű (kocka oldalhosszúság 50-200 mm; henger átmérő 60-150 mm), normál szilárdságú betonokból (C20/25-C50/60) készült, különböző méretű kockákon és hengereken végzett nyomószilárdsági vizsgálatok eredmények) alapján meghatároztam egy modell egyenlet (hatványfüggvény alakjában).
2. A modell egyenletből származó görbék felhasználásával új adatpontokat definiáltam egy adott felbontással. Ez a lépés hasznos az optimalizáló algoritmusok számára, a több rendelkezésre álló adatpont alapján képesek realisabb paraméterkészletet találni.
3. Ezután többparaméteres optimalizálást hajtottam végre a becslési modell paraméterein (B , S és α), figyelembe véve a minta alakját (kocka vagy henger) és a minta ismert méretét (d , A vagy V). Ennek eredményeként 2 (alak) $\times$ 3 (méret) = 6 paraméterkészletet határoztam meg.

Ezek után a paraméterkészletek rendelkezésre állnak, a minta szabványos nyomószilárdsága alapján meg lehet határozni bármilyen méretű minta nyomószilárdságát, vagy fordítva. Ehhez felhasználjuk azt a megfigyelést, amely szerint a normál szilárdságú betonok tartományában a szabványos henger és a kocka nyomószilárdságának összefüggése lineáris regresszióval leírható. A modell használható a DE-modell 'parallel bond'-jai normál szilárdságának becslésére is. A fenti algoritmussal, amelyet kiegészítünk ezzel a lépéssel, az adott beton szabványos nyomószilárdsága alapján elfogadható pontossággal meg lehet határozni bármilyen méretű minta 'parallel bond'-jainak értékét [20].

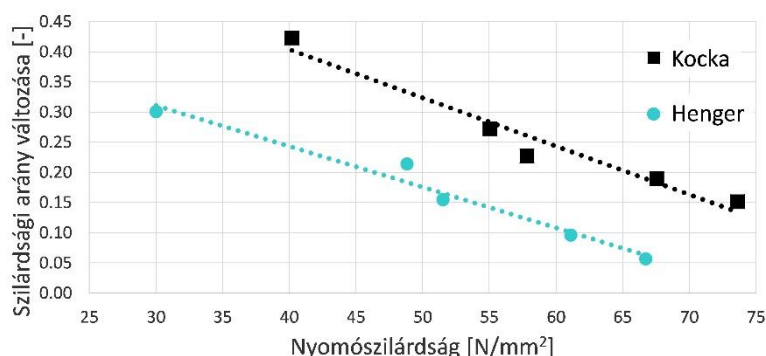


8. ábra Mérethatás figyelembe vételére használt algoritmus folyamatábrája

2.2 Normál szilárdságú betonból készített különböző méretű henger illetve kocka próbatesteken végzett laboratóriumi kísérletekkel igazoltam, hogy a mérethatás (a minta nyomószilárdságának és a szabványos méretű próbatesten végzett nyomószilárdság vizsgálatból kapott nyomószilárdság aránya) nagyobb a kisebb szilárdsági osztályú betonok esetében. Az így számított szilárdsági arány lineáris összefüggést mutat a vizsgált tartományon (C20/25-C50/60) [20] és 9. ábra. Kísérletileg igazoltam, hogy a mérethatás jelentősebb kocka próbatestek esetében, mint henger próbatestek esetében a vizsgált szilárdsági tartományon [20] és 10, 11 és 12. ábra.

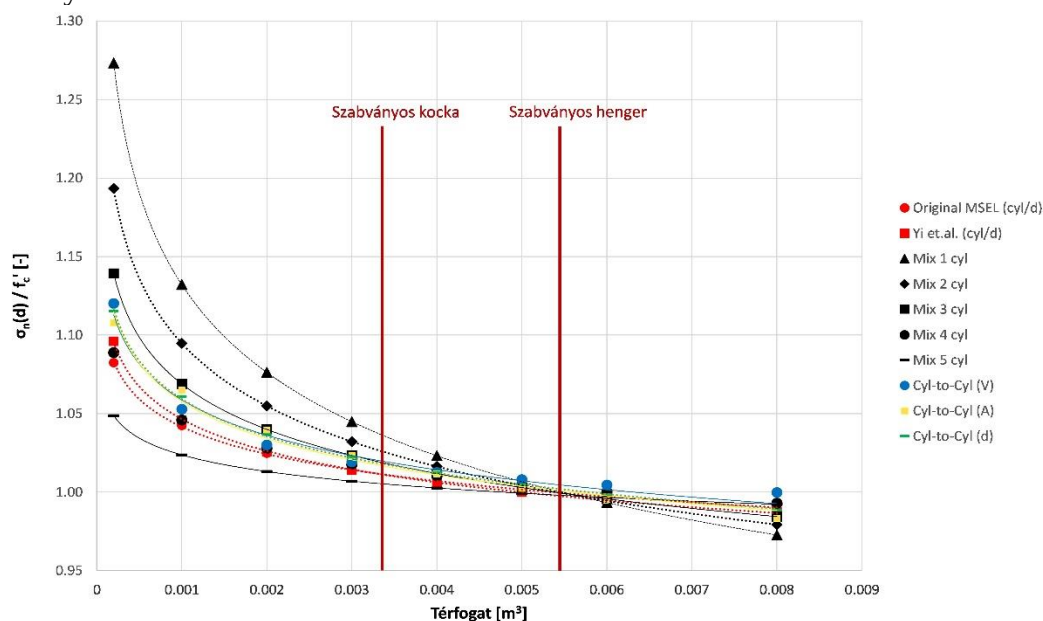
Tudományos háttér:

Laboratóriumi mérésekkel bizonyítottam, hogy a szabványos próbatest szilárdságához viszonyított szilárdsági arány változása a vizsgált mérettartományon nagyobb, a kisebb szilárdsági osztályba tartozó betonok esetén. Ennek mértéke lineáris összefüggést mutat a beton szilárdságával normál szilárdságú betonok tartományában (C20-C50). Ennek oka, hogy a nagyobb szilárdsági osztályú betonok kevésbé inhomogének a kisebb szilárdságúakhoz képest. Ez megfigyelhető a 9. ábrán [20].

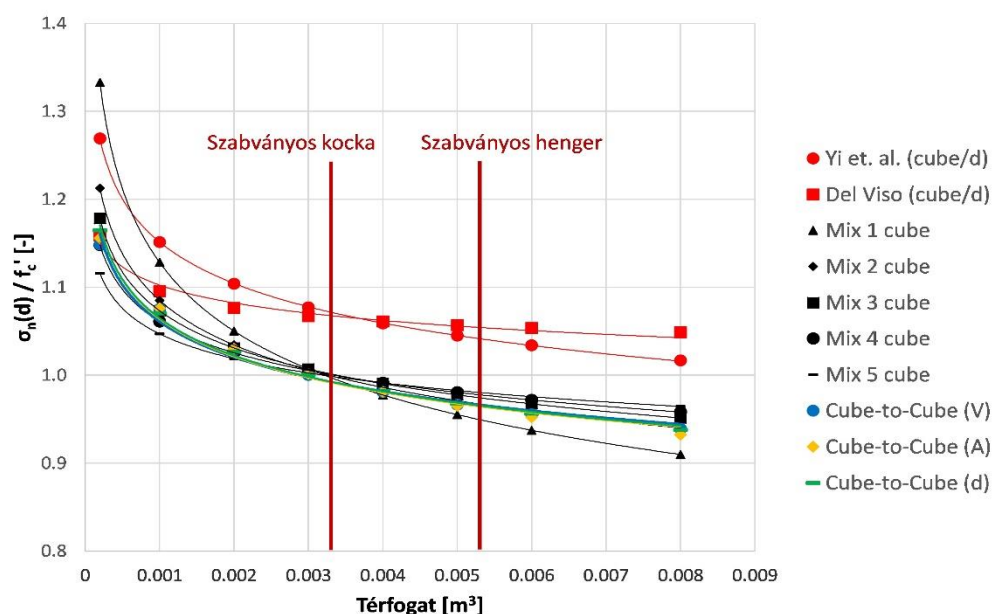


9. ábra A szilárdsági arány változása különböző szabványos kocka/henger szilárdság esetén

A 10. és 11. ábrán látható görbéket és értékeket megfigyelve ugyanez a jelenség látható. Az 1. keverék (amelynek legkisebb szilárdsági osztálya: C20/25) maximális és minimális értéke 1,32 / 1,29 és 0,90 / 0,99 kocka/henger esetében, míg az 5. keverék esetében (amely a legnagyobb szilárdsági osztályú): C50/60) ezek az értékek 1,13 / 1,05 és 0,95 / 0,99. Az értékek eltérése a nagyobb szilárdsági osztályú minták esetében lényegesen kisebbek, amint azt a 9. ábra mutatja. Ez azt jelenti, hogy a mérethatás a betonminta szilárdságától függ, aminek oka feltehetően a különböző keverékek eltérő szintű inhomogenitása. Kisebb szilárdságú beton esetében a cementkő és az adalékanyag közötti nyomószilárdság és rugalmassági modulus különbsége szignifikáns, míg nagyobb szilárdság esetén ez a különbség kevésbé jelentős. Érdekes megemlíteni azt is, hogy a kisebb szilárdságú betont sokféle keverékkel elő lehet állítani (különböző v/c , a/c , porozitás stb.), míg a nagy szilárdságú beton esetében általában nincs ilyen sok variáció.

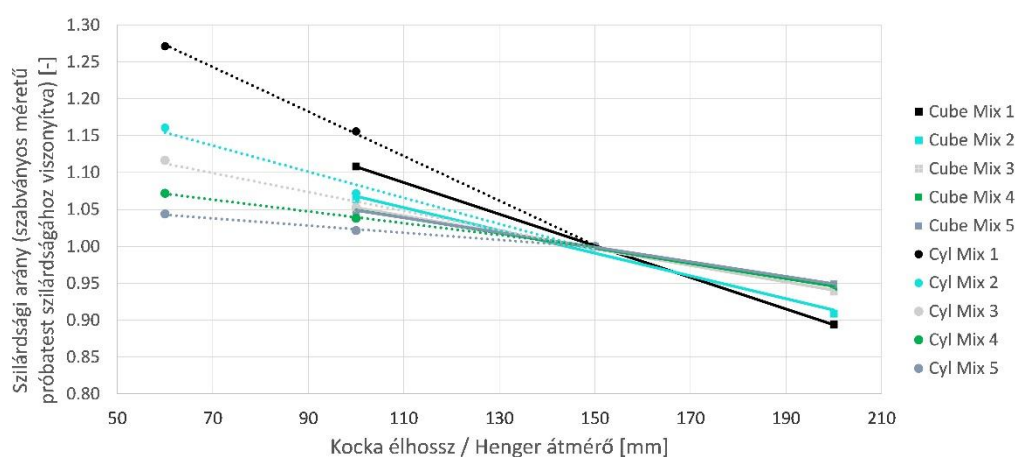


10. ábra Henger szilárdság becslés eredményei (piros – irodalmi adatok; fekete – mérési adatok; továbbiak – saját szilárdságbecslő modellek)



11. ábra Kocka szilárdság becslés eredményei (piros – irodalmi adatok; fekete – mérési adatok; továbbiak – saját szilárdságbecslő modellek)

Laboratóriumi kísérletek eredményei alapján belátható, hogy a normál szilárdságú betonok nyomószilárdságára a mérathatás jelentősebb a kocka próbatestek esetén (nagyobb eltérést mutatnak a szilárdsági arányban, 10., 11. és 12. ábra), mint a henger próbatesteken. A kockák nyomószilárdsági arányai nagyobb variációval rendelkeznek, mint a hengerek szilárdsági arányai. 1:2 arányú henger esetén a nyomószilárdsági vizsgálat során a középső 1:1 arányú zónában már nincs hatása a peremfeltételeknek (nyomólapoknak); ebben a zónában tiszta erőjáték alakul ki, amely során a keresztkontrakció miatt kialakuló húzás hatására megy tönkre a próbatest, míg egy kocka esetében nincs ilyen zóna. Ez a megfigyelés az oldalaránybeli eltérésre valamint a nyomott zóna méretére vezethető vissza [20].



12. ábra Szilárdsági arány (szabványos méretű próbatest szilárdságához viszonyítva) a kocka élhossz / henger átmérő függvényében

2.3 Kísérletileg meghatároztam a méretre vonatkozó határértéket mind a kocka (0,006 m³), mind a henger (0,004 m³) mintákra, amelyek felett a méretnek a nyomószilárdságra gyakorolt hatása elhanyagolható (kisebb mint 1% a szabványos nyomószilárdság arányában) [20]. Valamint numerikus kísérletekkel meghatároztam azt a legkisebb DE modell próbatest méretet, ami kellően pontosnak tekinthető a DE modellek paraméterezéséhez és anyaggenerálásához, valamint a mérethatás becsléséhez az általam vizsgált próbatest méret tartományon.

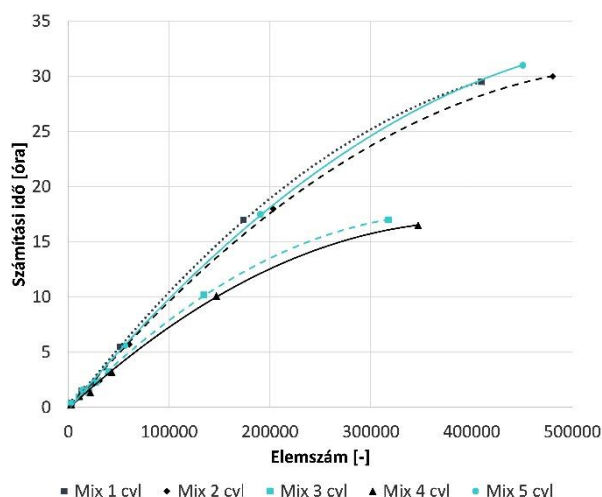
Tudományos háttér:

Vizsgálataim alapján a 0,004 m³-nél (137 mm-es átmérő; 1:2-es arány mellett) nagyobb térfogatú hengerek egyenértékűnek tekinthetők (nyomószilárdság szempontjából), míg a kockáknál ez az érték 0,006 m³ (182 mm-es élhosszúság). Ezen méretek felett a szilárdság csökkenés már 1% alatti a méret növekedésével. Példaként a Mix 3 jelű keverék értékei láthatók a [3. táblázatban](#).

3. táblázat Szilárdsági arányok és két egymást követő méret szilárdsági arány eltérése

Térfogat [m ³]	Mix 3			
	$\sigma_c(d)/f_c$ [-]		Különbség [-]	
	Kocka	Henger	Kocka	Henger
0.0002	1.15	1.14	0.095	0.070
0.001	1.06	1.07	0.039	0.029
0.002	1.02	1.04	0.022	0.017
0.003	1.00	1.02	0.015	0.012
0.004	0.98	1.01	0.012	0.009
0.005	0.97	1.00	0.009	0.007
0.006	0.96	1.00	0.007	0.006
0.008	0.94	0.98	-	-

Meghatároztam azt a legkisebb DE modell próbatest méretet amivel még biztonságosan közelíthető a vizsgált maximális méretű próbatest, amelyet ekvivalensnek (megegyezőnek) tekintünk a szerkezeti elemként használatos betonnal. Megállapítottam, hogy 120 mm-es élhosszúságú kocka vagy 100 mm-es átmérőjű 1:2-es arányú henger használatával a 200 mm-es élhosszúságú kocka vagy a 170 mm átmérőjű henger nyomó- vagy 'parallel bond' szilárdsága elfogadható pontossággal (5% alatti) becsülhető meg. Ez a DE modellben a számítási idő jelentős csökkenéséhez vezet. Példaként egy 200 mm-es kocka (kb. 400000 szemcse) próbatest helyettesítése 120 mm-essel (kb. 100000 szemcse) esetén a futtatási idő a harmadára csökken, ahogy az a [13. ábrán](#) látható.



13. ábra Számítási idő az elemszám függvényében mind az 5 vizsgált beton keverék esetén

3. Téziscsoport: Adalékanyag típusának, szemmegoszlásának, valamint a beton telítettségének figyelembe vétele a beton diszkrét elemes nyomószilárdság modellezésének szempontjából.

Jelölések, rövidítések;

- f_{pb} – a 'parallel bond'-ok normal szilárdsága;
- f_c – szabványos méretű próbatest (henger/kocka) nyomószilárdsága;
- ρ – a próbatest testsűrűsége;
- m_R – szorzótényező, amely a nyomó- és 'parallel bond' szilárdság kapcsolatát írja le;
- m_C – szorzótényező, amely a zúzottkő adalékanyag hatását veszi figyelembe;
- m_L – szorzótényező, amely a könnyű adalékanyag hatását veszi figyelembe;
- m_N – szorzótényező, amely az egyszemcsés (finomrészhányos) adalékanyag hatását veszi figyelembe;
- m_{Dens} – szorzótényező, amely a testsűrűség hatását veszi figyelembe;
- c_L , c_N és c_{Dens} empirikus állandók.

A DE modellek paramétereinek kalibrálása időigényes folyamat. Ez az egyik fő oka, hogy a DE szoftvereket nem olyan széles körben használják a mérnöki gyakorlatban. Gyakorlati szempontból előnyös lenne olyan módszereket találni, amelyek támogatják a DE-modell kalibrálási folyamatát.

A témában az új tudományos eredményeim a következők:

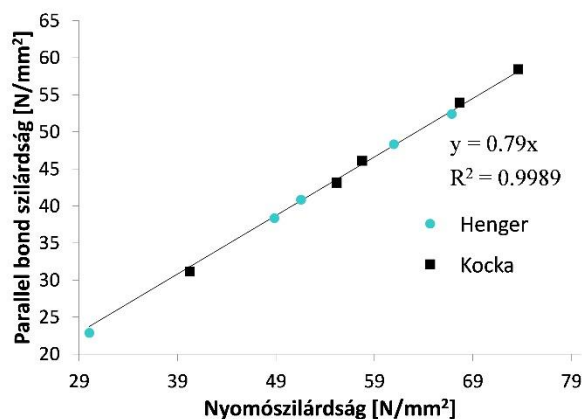
3.1 Numerikus vizsgálatokkal igazoltam, hogy normál szilárdságú (C20/25-C50/60), 2200-2400 kg/m³ közötti testsűrűségű beton esetén a DE modell 'parallel bond'-jainak normál szilárdsága és a szabványos méretű (150 mm kocka vagy Ø150/300 mm henger) beton próbatest átlagos nyomószilárdsága között lineáris kapcsolat írható fel.

Tudományos háttér:

Meghatároztam egy lineáris összefüggést, amely megadja a szabványos méretű minta 'parallel bond' normál szilárdságának értékét a laboratóriumban mért szabványos méretű minta nyomószilárdsága alapján, annak alakjától (kocka vagy henger)

függetlenül. Az összefüggés normál szilárdságú (C20/25-C50/60), 2200-2400 kg/m³ testsűrűségű beton próbatestek esetén alkalmazható, ezeken kívül ezek hatását is figyelembe kell venni. Az összefüggés a (3)-as egyenletben található, igazolása pedig a 14. ábrán látható.

$$f_{pb} = 0,79f_c \quad (3)$$



14. ábra 'Parallel bond' szilárdság a szabványos nyomószilárdság függvényében kocka és henger próbatesteken

3.2 Kidolgoztam egy új paraméter optimalizáción alapuló becslő eljárást a DE modell 'parallel bond'-jai szilárdságának becslésére, amely figyelembe vesz különböző adalékanyag típusokat, különböző szemmegoszlásokat valamint a beton telítettségét. [13] [17]

Tudományos háttér:

A probléma következő általános összefüggéssel írható fel:

$$f_{pb} = f(\rho, f_c) \quad (4)$$

ahol f_{pb} a 'parallel bond'-ok normál szilárdsága (DE modellparaméter), ρ a megszilárdult beton testsűrűsége és f_c a valós mintákon mért nyomószilárdság. A 'parallel bond' szilárdság és a modellben beállított sűrűség a legfontosabb befolyásoló tényezők a DE modellben mért nyomószilárdságra. Ha megadjuk a modell szemcseméret-eloszlását, akkor a 'parallel bond'-ok normál szilárdságát (normál szilárdságú beton esetén) a testsűrűség és egy szorzótényező függvényében lehet becsülni, amely a f_{pb} és f_c aránya. Esetünkben a modell célja az adalékanyag típusának és a szemcseméret-eloszlás hatásának figyelembe vétele is. Mindezek szorzó tényezőként vehetők figyelembe (hasonlóan az előzőhöz). A könnyű adalékanyag és a szemcseméret-eloszlás (pl. szemcsehézagos adalékanyag) hatása szorosan kapcsolódik a vizsgált minta sűrűségéhez, így ezeket a tényezőket a sűrűség függvényében kell megadni.

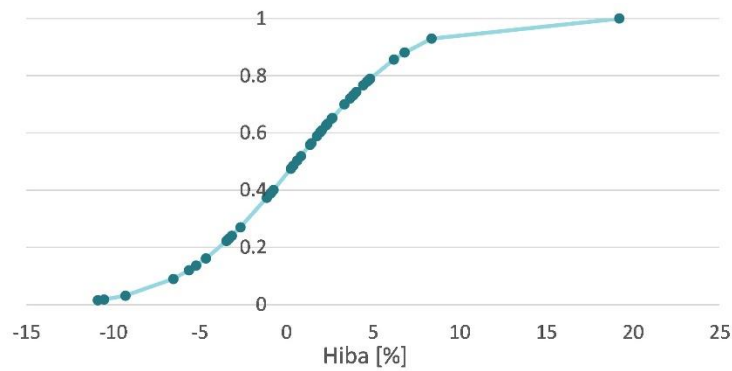
$$f_{pb} = m_R \cdot m_C \cdot m_L(\rho) \cdot m_N(\rho) \cdot m_{Dens}(\rho) \cdot f_c \quad (5)$$

Az optimalizált paraméterek a 4. táblázatban láthatók. Ezen paraméterek felhasználásával a modellt egy nagyobb adatsoron teszteltem, amely különféle típusú betonmintákat tartalmazott. Az egyes vizsgálati minták hibáját (a becsült és a kalibrált

‘parallel bond’ szilárdság közötti különbség) a 15. ábrán látható kumulatív eloszlási függvényként ábrázoltam.

4. táblázat Az optimalizált modell paraméterek

m_R [-]	m_C [-]	c_N [kg/m ³]	c_L [kg/m ³]	c_{Dens} [kg/m ³]
0,845	1,04	2022,9	2438,1	2153,9



15. ábra A hibák kumulált eloszlása (a becsült és a kalibrált ‘parallel bond’ szilárdság különbsége) az ellenőrzésre használt adatokon

4. Téziscsoport: Pórusbeton por alkalmazása cement helyettesítő anyagként normál szilárdságú betonok esetén

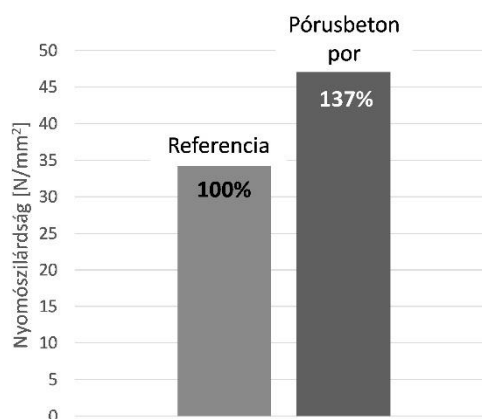
Jelölések, rövidítések: CCP – pórusbeton por; MK – metakaolin; TG – termogravimetria; SEM – pásztázó elektronmikroszkóp

Manapság egyre jelentősebb az igény a beton keverékekben az újrahasznosított anyagok minél nagyobb arányban történő hasznosítására. Nagy mennyiségben keletkezik építési hulladék a pórusbeton épületek bontása valamint azok építése során egyaránt. A pórusbeton törmelék durva adalékanyagként való alkalmazását többen kutatták a szakirodalomban (Fenyvesi, 2014), a finom adalékanyagként, illetve kiegészítő anyagként történő alkalmazása azonban kevésbé részletezett a szakirodalomban (Abed et al, 2019). Kutatásaim során a pórusbeton elemek véséséből keletkező pórusbetonpor (CCP – Cellular Concrete Powder) hatását vizsgáltam a beton mechanikai valamint tartóssági jellemzőire.

A témában az új tudományos eredményeim a következők:

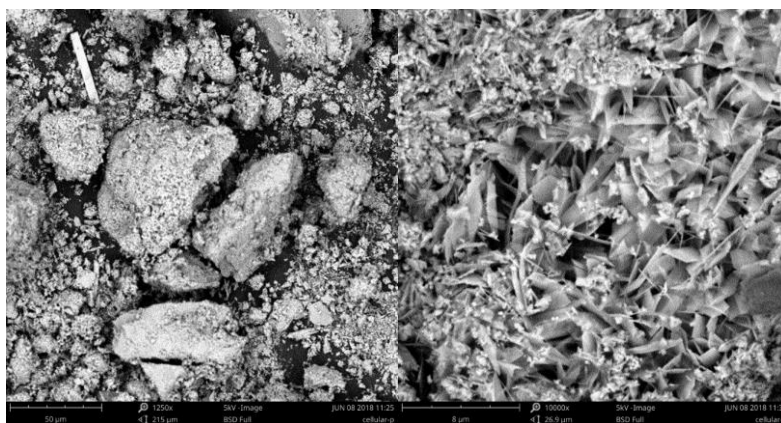
4.1 Kísérleti úton meghatároztam, hogy a pórusbeton por használata megfelelő adagolás mellett képes a normál szilárdságú beton (C20/25-C50/60) mechanikai és tartóssági tulajdonságainak javítására. A mikroszerkezeti analízissel igazoltam, hogy cementes környezetben a CCP duzzad a szilárdulás során. Igazoltam, hogy a duzzadás mértéke függ a CCP szemcseméretétől és nagyobb méretű szemcsék esetén mikrorepedésekhez vezethet. Meghatároztam, hogy $d_{\max} = 0,09$ mm szemcseméret alatt nem keletkezik mikrorepedés a cementkőben. Kísérleti úton meghatároztam a CCP optimális adagolási mennyiségét, amely 10 % ((m/m) a cement tömegéhez viszonyítva), amely a legelőnyösebb viselkedést adja. 16. ábra
Tudományos háttér:

Korábbi vizsgálatok azt mutatták, hogy az Ytong por kitöltő anyagként használható, és korlátozott mennyiségben alkalmazva csak lineárisan csökkenti a szilárdságot (Abed, 2018). Ezt a szilárdságcsökkentő hatást az adalékanyagot vizsgáló kutatók a pórusbeton duzzadásával és az ez által okozott mikrorepedésekkel magyarázták (Fenyvesi and Jankus, 2015). Kísérleti úton meghatároztam, hogy a pórusbeton por használata megfelelő adagolás mellett képes a normál szilárdságú beton (C20/25-C50/60) mechanikai valamint tartóssági tulajdonságainak javítására, ahogy ez a 16. ábrán látható. Ezek alapján a CCP por alkalmas betonban alkalmazható kitöltő anyagnak [11][12][14][18][19].



16. ábra Laboratóriumi nyomószilárdság vizsgálatok eredményei

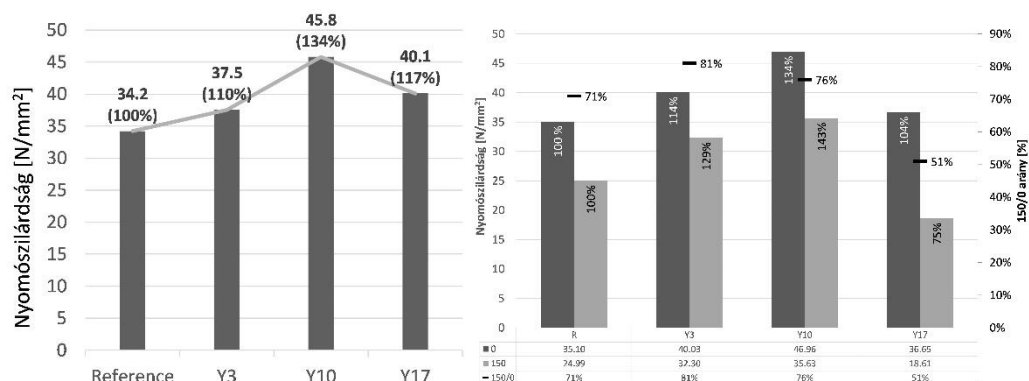
Laboratóriumi vizsgálatokkal megállapítottam, hogy a CCP nem a tradicionális cement kiegészítő anyagokhoz hasonlóan (kémiai kötések által) fejti ki hatását, hanem duzzad. Ez nagyobb szemméret esetén mikrorepedéseket és így szilárdságcsökkenést okoz. Azonban a pórusmérethez képest megfelelően kicsi szemcseméret alkalmazása esetén ennek a duzzadásnak pozitív hatása van. Ennek a duzzadásnak póruskitöltő és ezáltal szilárdság, valamint tartósság növelő hatása van, amit pásztázó elektronmikroszkópos felvételek elemzésével igazoltam. A pásztázó elektronmikroszkópos felvételek elemzése alapján megállapítható volt, hogy az általam használt CCP részecskéi ideális méretűek a beton pórusainak kitöltésére ([17. ábra](#)). A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy egy bizonyos méret felett az Ytong por finomrésztartalomként működik (ahogy azt az irodalom is igazolja ([Abed et al, 2019](#)), míg ez alatt a tömörséget növelő kristálykápződés zajlik le az anyagban, ahogy az látható a [17-as ábrán](#) [[18](#)][[19](#)].



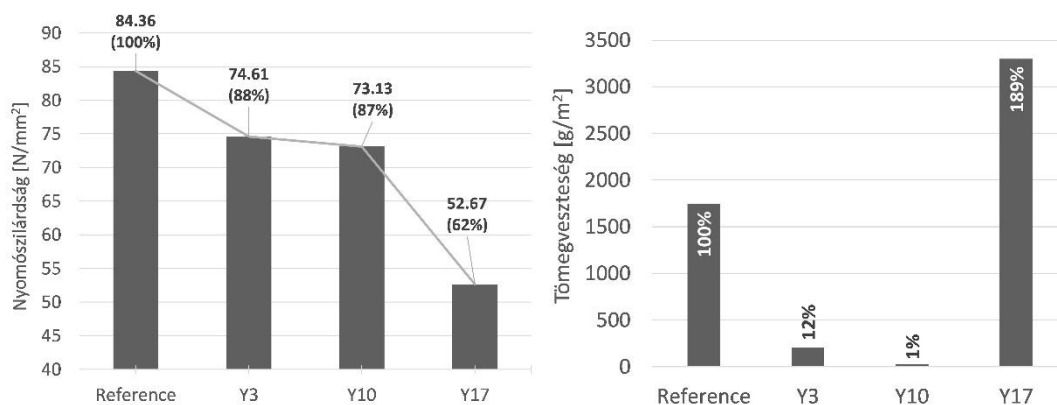
17. ábra CCP minták pásztázó elektronmikroszkóppal készített képei 1250x (bal) és 10000x (jobb) nagyításban

Kísérleti úton meghatároztam, hogy a pórusbeton por maximális mérete, amely alatt pozitív hatást fejt ki $d_{max} < 0,09$ mm, valamint, hogy a pórusbeton por optimális (maximális újrahasznosított anyag felhasználás, maximális szilárdság valamint tartósság növelés) adagolási mennyisége 10% a cement tömegére vonatkoztatva, normál szilárdságú betonok (C20/25-C50/60) esetén, ahogy ez a [18. ábrán](#) látható. Azonban minél kevesebb a pórus a betonban a CCP kedvező hatása annál kisebb. Kísérletileg is igazoltam, hogy ha kis méretűek a pórusok, akkor a finom ($d_{max} < 0,09$ mm) CCP sem tudja kifejteni pozitív hatását. Kísérletileg igazoltam nagyszilárdságú

betonok tartományában, hogy a normál szilárdságú betonok esetén megfigyelt szilárdság és tartósság növelés nem érzékelhető, és egy adott CCP mennyiség alkalmazása felett még rontja is ezeket a jellemzőket, ahogy az a 19. ábrán látható. Nagy szilárdságú betonokban nincs elegendő és megfelelően méretű pórus, ahol a CCP kifejtheti kedvező hatását. Ezen esetben a CCP szemcsék duzzadása belső feszültséget generál a cementkőben, amely mikrorepedésekhez vezethet. A CCP pozitív hatása annál jobban érvényesül, minél kisebb a pórusbeton por szemcsemérete és minél nagyobb a beton porozitása. Érdeemes megemlíteni, hogy vizsgálataim alapján, ha kizárólag tartóssági szempontok alapján optimalizálunk, akkor a 3%-os CCP adagolás lenne a legelőnyösebb [12][14][19].



18. ábra Nyomószilárdság (bal) és fagyasztási ellenállása 0 és 150 fagyasztási ciklus után (jobb) normál szilárdságú beton esetén különböző mennyiségű CCP adagolás mellett



19. ábra Nyomószilárdság (bal) és 56 fagyasztási-olvasztási ciklus utáni tömegvesztés (jobb) nagyszilárdságú beton esetén különböző mennyiségű CCP adagolás mellett

JÖVŐBELI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK

Jelen PhD kutatás számos további kutatási lehetőségre rámutat. Az alábbi témák tarthatnak érdeklődésre a jövőben.

1. DEM

- a. Anyagvizsgálati módszerek modellezése DEM segítségével, melyek összetettebb vizsgálati berendezést és sok előkészületet igényelnek, mint például rugalmassági modulus mérése, szabványos vagy ciklikus betonacél kihúzóvizsgálatok. Az utóbbi két területen jelenleg is kutatást folytatnak. A lehetséges megoldásról röviden: ha a betonacélról feltételezhetjük, hogy mereven viselkedik a vizsgálat közben, akkor lehet mereven kapcsolódó gömbök halmazának, vagy (előnyösebben) falként modellezni. Ha a betonacél CAD leírása elérhető, STL file-ként exportálható. Egy rögzített sebesség rátehető a falra és a reakció erő mérhető. A következő lépés a megfelelő kapcsolati modell használata, amellyel a beton gömbök és a betonacél közötti interakció kezelhető (egyedi modell létrehozása szükséges lehet), valamint megfelelő részletességű felbontás szükséges, hogy a betonacél bordái közti interakciót is kezelni tudja. A modell kifejlesztéséhez végeztem laboratóriumi vizsgálatokat is.
- b. Egy másik DEM-hez kapcsolódó téma, melyet érint, de részleteiben nem tartalmaz jelen PhD kutatás, a könnyű adalékanyagok DE modellezéséhez kapcsolódik.

2. CCP

- a. A CCP-ről, mint hulladék anyagról bebizonyosodott, hogy rejlik benne lehetőség arra, hogy szerkezetekben használják. Következő lépésként szerkezeti elemek (pl. vasbeton gerendák) készülhetnek betonból (mely CCP-t tartalmaz), ezeket különböző teher esetekre lehet vizsgálni.

3. Keménységmérés

- a. SCM-et vagy hulladék anyagot tartalmazó betonok keménységmérése, DSI vizsgálattal. Ebben a témában is végeztem vizsgálatokat, azonban az eredményeket a PhD dolgozat keretein belül nem ismerttettem.
- b. Könnyű adalékanyagok keménységvizsgálata. Különböző típusú könnyű adalékanyagok alkalmazása mellett vizsgálandó, hogy a keménység vizsgálati módszerek működnek-e könnyű adalékanyagok betonon vagy sem. Ebben a témában is végeztem vizsgálatokat, azonban az eredményeket a PhD dolgozat keretein belül nem ismerttettem.
- c. A DSI vizsgálat terhelés-tehermentesítés görbéi alapján egy összefüggést lehet definiálni a rugalmassági modulus vagy a nyomószilárdság és az anyag teljes/képlékeny/rugalmas benyomódási alakváltozási energiája között, melyet gyakorló mérnökök is használhatnak. Ezáltal, jelen kutatás DSI vizsgálat eredményeit felhasználva a nyomószilárdság becsülhető.

SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

- [1] Szilágyi, Katalin; Borosnyói, Adorján; **Gyurkó, Zoltán** (2012). Kőszerű anyagok statikus keménységvizsgálata, *Engineering Geology Rock Mechanics Conference 2011*, 297-312, 16 p. ISBN 978-615-5086-04-5
- [2] Szilágyi, Katalin; Borosnyói, Adorján; **Gyurkó, Zoltán** (2013). Static hardness testing of porous mineral-based building materials, *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 65:1, 6-10, 5 p. ISSN 00 13-970x, <http://dx.doi.org/10.14382%2Fepitoanyag-jsbcm.2013.2>
- [3] **Gyurkó, Zoltán**; Bagi, Katalin; Borosnyói, Adorján (2014) A. Discrete Element Modelling of uniaxial compression test of hardened concrete, *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 66:4, 113-119, 7 p. ISSN 00 13-970x, <https://doi.org/10.14382%2Fepitoanyag-jsbcm.2014.21>
- [4] **Gyurkó, Zoltán**; Borosnyói, Adorján (2015). Normál szilárdságú beton keménységvizsgálatának diszkrét elemes modellezése, *Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2015*, 276-283, 8 p.
- [5] **Gyurkó, Zoltán**; Borosnyói, Adorján (2015). Keménységmérés diszkrét elemes modellezése, *XII. Magyar Mechanikai Konferencia*, 340-348, 9 p.
- [6] **Gyurkó, Zoltán**; Borosnyói, Adorján (2015). Static hardness testing and DEM modelling of hardened concrete, *Concrete Structures*, 16, 52-56, 5 p.
- [7] **Gyurkó, Zoltán**; Borosnyói, Adorján (2015). Brinell-hardness testing and discrete element modelling of hardened concrete, *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 67:1, 8-11, 4 p. ISSN 00 13-970x, <https://doi.org/10.14382%2Fepitoanyag-jsbcm.2015.2>
- [8] **Gyurkó, Zoltán**; Nemes, Rita (2016). Effect of Standard Deviation of Contact Normal Strength in DEM for Concrete, *Contemporary Achievements in Civil Engineering 2016: Conference Proceedings*, 373-380, 8 p.
- [9] **Gyurkó, Zoltán**; Borosnyói, Adorján (2016). DEM modelling of hardness testing of normal-strength concrete, *Proceedings of 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, 477-484, 8 p.
- [10] **Gyurkó, Zoltán**; Nemes, Rita (2016). Size Effect on Cylinder and Cube Strength of Concrete, *Concrete Structures*, 17, 18-22, 5 p.
- [11] **Gyurkó, Zoltán**; Szijártó Anna; Nemes, Rita (2017). Increasing freeze-thaw resistance of concrete by additions of powdered cellular concrete and clay bricks, *Procedia Engineering*, 193, 11-18, 8 p. <https://doi.org/10.1016%2Fj.proeng.2017.06.180>
- [12] **Gyurkó, Zoltán**; Szijártó Anna; Abed, Mohammed; Nemes, Rita (2017). Effect of Cellular Concrete Powder on Durability of Normal Strength Concrete, *The 12th Central European Congress on Concrete Engineering. CCC2017 Proceedings*, 179-186, 8 p.
- [13] **Gyurkó, Zoltán**; Nemes, Rita (2018). Discrete Element Modelling of Compressive Strength Testing of No-Fines Concrete, *Proceedings*, 2, 555-561, 7 p., <https://doi.org/10.3390%2FICEM18-05470>
- [14] **Gyurkó, Zoltán**; Nemes, Rita (2018). Comparison of modelling of hardness testing with DEM and FEM, *Proceedings of the 12th International PhD Symposium in Civil Engineering*, 405-412, 8 p.
- [15] **Gyurkó, Zoltán**; Nemes, Rita (2018). Energy-based evaluation of hardness testing with discrete element method, *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 426, 8 p., <https://doi.org/10.1088%2F1757-899X%2F426%2F1%2F012013>
- [16] **Gyurkó, Zoltán**; Szijártó Anna; Abed, Mohammed; Nemes, Rita (2018). Effect of Cellular Concrete Powder on Durability of Normal Strength Concrete, *Architecture Civil Engineering Environment*, 11:2, 59-64, 6 p. <https://doi.org/10.21307/ACEE-2018-022>
- [17] **Gyurkó, Zoltán**; Nemes, Rita (2019). Fracture modelling of normal concrete using different types of aggregates, *Engineering Failure Analysis*, 101, 464-472, 9 p., <https://doi.org/10.1016%2Fj.engfailanal.2019.04.008>
- [18] **Gyurkó, Zoltán**; Jankus, Bence; Fenyvesi, Olivér; Nemes, Rita (2019). Sustainable applications for utilization the construction waste of aerated concrete, *Journal Of Cleaner Production*, 230, 430-444, 15 p., <https://doi.org/10.1016%2Fj.jclepro.2019.04.357>
- [19] **Gyurkó, Zoltán**; Szijártó Anna; Nemes, Rita (2019). Cellular concrete waste as an economical alternative to traditional supplementary cementitious materials, *Journal of Thermal Analysis And Calorimetry*, 15 p., <https://doi.org/10.1007%2Fs10973-019-08303-8>

- [20] **Gyurkó, Zoltán**; Nemes, Rita (2020). Specimen Size and Shape Effect on the Compressive Strength of Normal Strength Concrete, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64:1, 276-286, 11 p., <https://doi.org/10.3311/PPci.15338>

ELŐADÁSOK

1. *MaMek XII (XII. Magyar Mechanikai Konferencia), Miskolci Egyetem - Miskolc, Magyarország, 2015*
2. *Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban, Debreceni Egyetem – Debrecen, Magyarország 2015*
3. *4th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Építőmérnöki Kar, Újvidéki Egyetem, Szabadka, Szerbia, 2016*
4. *11th fib PhD Symposium in Civil Engineering, Tokiói Egyetem, Tokió, Japán, 2016*
5. *Service life of cement-based materials and structures, COST képzés, Dán Műszaki Egyetem, Lyngby, Dánia, 2016*
6. *International Conference on Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures (AMCM'2017), Sziléziai Műszaki Egyetem, Gliwice, Lengyelország, 2017*
7. *OATK XI. – Országos Anyagtudományi Konferencia, Balatonkenese, Magyarország, 2017*
8. *ICEM 2018 International Conference on Experimental Mechanics, Brüsszel, Belgium, 2018*
9. *8th International Conference on Engineering Failure Analysis (ICEFA VIII), Budapest, Magyarország, 2018*
10. *12th fib International PhD-Symposium in Civil Engineering, Cseh Műszaki Egyetem, Prága, Csehország, 2018*

SZABVÁNYOK

- EN 197-1:2011 "Cement. 1. rész: Az általános felhasználású cementek összetétele, követelményei és megfelelőségi feltételei".
- EN 12390-3:2009 "A megszilárdult beton vizsgálata. 3. rész: A próbatestek nyomószilárdsága".
- EN 14146:2004 "Természetes építőkövek vizsgálati módszerei. A dinamikus rugalmassági modulus meghatározása (alaprezonancia-rezgés mérésével)"
- EN 12620:2002 "Kőanyag-halmazok (adalékanyagok) betonhoz"
- CEN/TS 12390-9:2018 "A megszilárdult beton vizsgálata. 9. rész: Fagyállóság jégolvasztó sóval. Lehámlás".

IRODALOMJEGYZÉK

- Abed, M., Nemes, R. "Characteristics of cement pastes incorporating different amounts of waste cellular concrete powder", *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 70 (5), 151–154, 2018. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2018.28>
- Bažant, Z. P. "Size effect on structural strength: a review", *Archive of Applied Mechanics*, 69, 703–725, 1999. <https://doi.org/10.1007/s004190050252>
- del Viso, J. R., Carmona, J. R., Ruiz, G. "Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete", *Cement and Concrete Research*, 38(3), pp. 386-395, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.020>
- Fenyvesi, O. "Recycling of different industrial wastes as concrete aggregate" (in Hungarian). *Meddő? Hulladék? Nem! Haszonanyag! Conference, Budapest, Hungary (2014)* 111–118, 2014.
- Fenyvesi, O., Jankus, B. "Opportunities in recycling AAC waste as aggregate for lightweight concrete", *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials* 67, 66–70, 2015. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2015.11>
- Kim, J. K., Yi, S. T., Park, H. K., Eo, S. H. "Size effect on compressive strength of plain and spirally reinforced concrete cylinders", *ACI Structural Journal*, 96(1), pp. 88–94, 1999. <https://doi.org/10.14359/599>
- Meyer, E. „Untersuchungen über Hartprüfung und Harte”, *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, Vol. 52, No. 17, 645–654, 740–748, 835–844, 1908.
- Szilágyi, K., Borosnyói, A., Dobó, K. "Static indentation hardness testing of concrete: A long established method revived", *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Volume 63, Issue 1-2, pp. 2-8, 2011. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2011.1>

Gyurkó Zoltán (1989) okl. szerkezet-építőmérnök és gépészmérnök (MSc), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék doktorjelöltje. Főbb kutatási területek: Numerikus módszerek és modellezés, Építőanyagok mechanikai vizsgálata, Újrahasznosított adalékanyagok, Cement kiegészítőanyagok, Beton roncsolásmentes vizsgálata, Tartóssági vizsgálatok. Tagja a fíb Magyar Tagozatának, Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja. 2019 óta az Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials folyóirat szerkesztője.

Tel.: +36-30 5000-317

Email: zoltan.gyurko@epito.bme.hu

Weboldal: <https://epito.bme.hu/gyurko-zoltan?language=hu>

Cím: H-1111 Budapest Műegyetem rkp. 3. K ép. I. 85/9