



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

# Beton visszapattanási keménységének és anyagjellemzőinek kapcsolata

PhD értekezés  
új tudományos eredményei

Szilágyi Katalin  
okl. építőmérnök

Témavezető:  
Dr. Zsigovics István  
okl. építőmérnök, PhD

Budapest, 2013

# Tartalomjegyzék

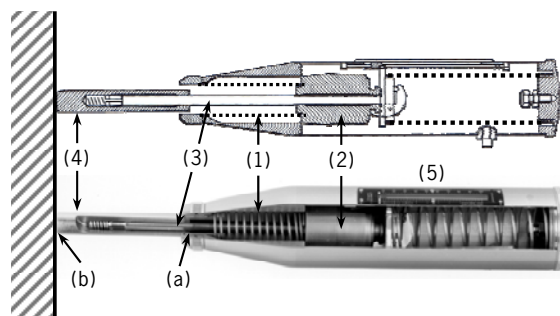
1. A kutatás háttere	1
2. A kutatás jelentősége	2
3. A kutatás célkitűzései	2
4. A kutatás módszere	
4.1 Statisztikai elemzés	3
4.1.1 Ismételhetőségi paraméterek meghatározása	3
4.1.2 Ismételhetőségi paraméterek illeszkedés vizsgálata	3
4.1.3 Az ismételhetőségi paramétereket befolyásoló tényezők	3
4.2 Modellezés	3
4.2.1 Működési modell kidolgozása	3
4.2.2 Alkalmazhatóság vizsgálat paraméterelemzéssel	4
4.2.3 Ellenőrzés laboratóriumi vizsgálatokkal	4
4.3 Célirányos kísérletek	4
5. A kutatás eredményei, hipotézisei és tézisei	
5.1 Statisztikai megállapítások	5
5.2 A visszapattanási keménység működési modellje	10
5.2.1 A modell felépítése	12
5.2.2 A paraméterelemzés eredménye	13
5.2.3 Az ellenőrző laboratóriumi vizsgálatok eredménye	15
5.3 A célirányos kísérletek eredményei	16
6. A kutatás elméleti és gyakorlati haszna	18
7. Kitekintés és jövőbeni feladatok	19
8. Köszönetnyilvánítás	19
9. Közlemények a kutatás témakörében	19
10. Irodalomjegyzék	20

## 1. A KUTATÁS HÁTTERE

A keménységmérés egy több évszázados múltra visszatekintő roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer. A felületi keménység mérése már jóval a szisztematikus anyagvizsgálat előtt megjelent – az első anyagvizsgáló laboratórium 1857-ben alakult meg Londonban, és David Kirkaldy skót mérnök nevéhez fűződik (Timoshenko, 1951) – a geológiában és műszaki tudományokban a karcolási keménység bevezetésével (Barba, 1640; Réaumur, 1722; Haüy, 1801; Mohs, 1812). Az anyagok keménységének tudományos kutatását Heinrich Hertz az érintkezési feladatok megoldása terén végzett úttörő elméleti munkája indította el az 1880-as években. Ennek nyomán a képlékeny benyomódási keménységmérési módszerek sokasága fejlődött ki, amelyeket más szakterületeken napjainkig alkalmaznak helyszíni vizsgálatokhoz is (Brinell, 1900; Rockwell, 1920; Vickers, 1924 and Knoop, 1934 (Fisher-Cripps, 2000)).

A Brinell-féle keménységvizsgálat cementhabarcsra és betonra adaptálásának terén a Brinell-készülék párizsi világiállításon történő bemutatásának évét követő négy évtizedben végeztek vizsgálatokat abból a célból, hogy a felületi keménység és szilárdság között összefüggést találjanak. Ezekben az évtizedekben a felületi keménység mérésére szolgáló dinamikus elven működő hordozható készülékek is megjelentek (Albert F. Shore durométere, 1920; a Rational GmbH duroszkópja, 1930; Gaede rugós kalapácsa, 1934; Einbeck ingás kalapácsa, 1944; utóbbi kettő betonra).

A rugalmas visszapattanás elvén működő Schmidt-kalapácsot Ernst Schmidt fejlesztette ki 1950-ben Svájcban, amely ötvözi elődjei előnyeit (Schmidt, 1950). Annak köszönhetően, hogy beszerzése és használata költségkímélő, és ráadásul nem igényel különleges elvárásokat a felhasználótól, a világon mindenütt közismert (és talán azt is mondhatjuk, hogy közkedvelt) helyszíni vizsgáló eszközzé vált az elmúlt 60 évben. Napjainkban a beton felületi keménységének vizsgálatához a rugalmas visszapattanás elvét alkalmazó Schmidt-kalapácsok tekinthetők a legelterjedtebben használt eszközöknek. A vizsgálat elve, hogy a készülékben (1. ábra) lévő munkarugó (1) egy vezetőrúdhoz (3) csatlakozó ütőtömeget (2) mozgásba lendít, amely a felületre merőlegesen tartott, íves kontaktfelületű ütőszegről (4) keresztül, adott energiával megüti a vizsgált felületet, és az ütés után az ütőtömeg visszapattanásának mértékét a készülék rögzíti. Az ütési energia konstans és független a vizsgálatot végző személytől, mivel a megfeszített rugó automatikusan oldódik ki maximális helyzetéből ezzel azt okozva, hogy az ütőtömeg a megfeszített rugó által közvetített energia felhasználásával nekiütközik az ütőszegnek. Az ütőtömeg visszapattan az ütőszegről, és eközben magával von egy kijelző csúszkát (5). A visszapattanási érték (R) dimenzió nélküli szám: a mozgó tömeg visszapattanást követően megtett útjának ( $x_r$ ) és ütés közben megtett útjának ( $x_0$ ) aránya százalékban kifejezve ( $R = x_r/x_0 \cdot 100$ ).



1. ábra: A Schmidt-kalapács szerkezete.

A készülék ütőszegjének érintkezési felületén keresztül, az ütés pillanatában a beton lokális morzsolódásán keresztül elnyelődő energiavesztés teszi lehetővé, hogy a Schmidt-kalapács a beton mechanikai tulajdonságainak vizsgáló eszköze lehessen. A keménységgel kapcsolatos kutatási kérdések gyakran megjelennek a fizikai és az anyagtudományi szakirodalomban, mivel a mechanika érintkezési feladatokkal kapcsolatos elméletében még számos hiányosságot fedezhetünk föl. A téma gyakran filozófiai kérdéseket is fölvet, mint pl.: a keménység egyáltalán anyagjellemző-e? Fontos megjegyezni, hogy a keménység fogalmára máig nem létezik egyetlen, mindenki által elfogadott definíció (Fisher-Cripps, 2000).

---

## 2. A KUTATÁS JELENTŐSÉGE

A Schmidt-kalapácsos vizsgálatok elsődleges célja, hogy olyan összefüggést találjunk a beton felületi keménysége és nyomószilárdsága között, amely segítségével elfogadható mértékű bizonytalansággal megbecsülhető a beton szilárdsága. Ezért a becsült nyomószilárdság bizonytalansága függ a szerkezeti beton átlagos nyomószilárdságának az adott vizsgálati területre vonatkozó változékonyságától, a vizsgálati módszerek (ill. a vizsgáló eszköznek) a roncsolásmentes anyagjellemző mért értékeit befolyásoló saját bizonytalanságától, valamint a beton nyomószilárdsága és a roncsolásmentes anyagjellemző között feltételezett függvénykapcsolat bizonytalanságától. Kiterjedt szakirodalmi kutatás alapján megállapítható, hogy számos, kísérleti eredményeket és azok elemzését tartalmazó közlemény elérhető, azonban:

- A visszapattanási érték statisztikai paramétereinek nagyszámú adat alapján történő meghatározása hiányzik a szakirodalomból. Még a jelenleg hatályos szabványokban és irányelvekben fellelhető statisztikai paramétereket is kisszámú adat alapján állapították meg.

- A visszapattanási keménység és a nyomószilárdság kapcsolatának leírására sem általános érvényű elméleti, sem tapasztalati összefüggés nem található a szakirodalomban. Ennek ellenére számos műszaki közlemény szerzője azt állítja, hogy a beton felületi keménysége és nyomószilárdsága között a kapcsolat létezik és a módszer közismert és általánosan elfogadott. Egyes kutatók viszont úgy vélik, hogy a módszerrel a szilárdságbecslés nem is lehetséges és az eszköz csak minőségegyenletesség ellenőrzésére alkalmas. A szakirodalomban fellelhető függvénykapcsolatokra tett több tucat javaslat jelentős eltérése elemzésre és magyarázatra szorul.

- A visszapattanási keménységet csak akkor lehet összefüggésbe hozni a nyomószilárdsággal, ha elegendő mennyiségű energia nyelődik el a betonban az ütközés során. Az eredeti Schmidt-kalapács feltalálója a készülék ütési energiáját az 1950-es években rendelkezésre álló betonok nyomószilárdságához igazította. A mai betonépítési technológia azonban jellegzetesen nagyobb szilárdságú betonokat használ.

- A módszerrel kapcsolatos tudományos egyetértés hiányában a Schmidt-kalapács csaknem elvesztette a szerepét a szilárdságbecslésben, ti. a jelenleg hatályos nemzetközi és európai szabványok kizárják a Schmidt-kalapács önmagában történő használatát a beton nyomószilárdságának becslésére. Ha egy műtárgy betonjának nyomószilárdságát szeretnénk megbecsülni, akkor a Schmidt-kalapácsos vizsgálatot ki kell egészítenünk kifúrt magminták egyidejű nyomószilárdság vizsgálatával.

## 3. A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI

Jelen PhD kutatás a rugalmas visszapattanás elvén működő keménységvizsgáló módszerrel elvégzett szilárdságbecsléssel kapcsolatos kérdések okait igyekszik feltárni és átfogó elemzést nyújtani a módszerről a visszapattanási keménység és a szilárdság kapcsolatának pontosabb megértésének elősegítésére.

Jelen kutatás keretein belül három általános célkitűzést fogalmaztam meg:

- 1) Első célkitűzésem, hogy kiterjedt szakirodalmi kutatás és a rendelkezésre álló saját helyszíni és laboratóriumi vizsgálati eredmények statisztikai elemzése alapján megállapítsam, hogy a visszapattanási keménység statisztikai jellemzői hasonlóak-e a nyomószilárdság statisztikai jellemzőihez, továbbá felülvizsgáljam a nemzetközi előírások rugalmas visszapattanás elvén működő keménységvizsgáló módszerre vonatkozó ismételtelhetőségi feltételeit.

- 2) Második célkitűzésem, hogy kiterjedt szakirodalmi kutatás és elméleti megfontolások alapján azonosítsam a visszapattanási keménység elsődleges befolyásoló tényezőit (kizárólag szakszerűen elkészített betonokat figyelembe véve), amelyekből kiindulva kifejleszhető egy általános működési modell a visszapattanási keménység és a nyomószilárdság közötti kapcsolat leírására. A modellt laboratóriumi verifikáló kísérlettel és paraméterelemzés kívántam ellenőrizni.

- 3) Harmadik célkitűzésem, hogy célzott laboratóriumi kísérletek alapján megállapítsam, hogy a visszapattanási értéket hogyan befolyásolja a beton víz-cement tényezője és az eszköz ütési energiájának nagysága, továbbá mely mechanikai jellemző (nyomószilárdság vagy rugalmassági modulus) hozható leginkább összefüggésbe a visszapattanási keménységgel.

---

## 4. A KUTATÁS MÓDSZERE

Kutatómunkám rendszerbe foglalása a következő alapelvek mentén igyekeztem haladni. Szakirodalmi és saját régebbi helyszíni, ill. laboratóriumi vizsgálati eredményeim alapján kijelöltem azokat a kérdéses vagy vitatható, vagy nem kellően részletesen tárgyalt területeket, amelyek alapján hipotézist állítottam föl. Statisztikai elemzések, elméleti megfontolások és laboratóriumi kísérletek által szolgáltatott eredmények alapján tézist alkottam meg, amely vagy alátámasztja, vagy megcáfolja a hipotézisben megfogalmazott feltevéseket.

Jelen fejezetet az értekezés három fő célkitűzésével összhangban építettem föl.

### 4.1 STATISZTIKAI ELEMZÉS

#### 4.1.1 Ismételhetőségi paraméterek meghatározása

Részletes ismételhetőségi elemzést végeztem 48 különböző forrásból (4785 helyszíni mérőhely, 4170 laboratóriumi mérőhely, amely több mint nyolcvanezer egyedi visszapattnási értéket eredményezett) származó 8955 összetartozó visszapattnási érték átlagának és szórásának adatpárján (saját mérések: 2699 laboratóriumi adatpár, 578 helyszíni adatpár, összesen 3277 adatpár). Az elemzett betonok szilárdságának terjedelme  $f_{cm} = 3,3 \dots 105,7$  MPa, és visszapattnási értékének terjedelme pedig  $R = 10 \dots 63$  volt. Az átlagokat és a szórásokat laboratóriumi vizsgálat esetén azonos próbatest felületen, helyszíni vizsgálat esetén azonos mérőhelyen mért 10...20 ismétlésszámú visszapattnási értékből számítottam. Az adatok elemzésének az volt a fő célja, hogy a Schmidt-kalapácsos vizsgálat ismételhetőségét megfigyelhessem. A szóráson kívül a terjedelmet és a relatív szórást is kiszámítottam és elemeztem. Az elemzett adatok terjedelme a visszapattnási érték átlagára vonatkozóan  $R_{m,min} = 12,2$  és  $R_{m,max} = 59,0$ , a szórását tekintve pedig  $s_{R,min} = 0,23$  és  $s_{R,max} = 7,80$  volt. A relatív szórás terjedelme  $V_{R,min} = 0,43\%$  és  $V_{R,max} = 31,12\%$  volt.

#### 4.1.2 Ismételhetőségi paraméterek illeszkedés vizsgálata

Részletes statisztikai elemzést végeztem az adatbázison (8955 mérőhely), hogy megállapítsam a visszapattnási érték statisztikai jellemzőinek (szórás, relatív szórás, terjedelem) valószínűségi eloszlását.

A vizsgálati eredmények elméleti eloszlásfüggvényekkel történő összevetéséhez illeszkedésvizsgálatokat végeztem. Három vizsgálatot futtattam annak érdekében, hogy több mint 60 különböző eloszlásfüggvényből kiválasszam a legjobban illeszkedőt: Kolmogorov-Smirnov próba, Anderson-Darling próba és  $\chi^2$  próba.

#### 4.1.3 Az ismételhetőségi jellemzőket befolyásoló tényezők

A szórást, a relatív szórást, a terjedelmet és a studentizált terjedelmet befolyásoló tényezőket elemeztem a rendelkezésre álló adatbázison. A következő lehetséges befolyásoló paramétereket választottam ki: a beton víz-cement tényezője, a beton kora, a cement típusa, a beton állapota a vizsgálatkor (száraz/hedves), a beton karbonátosodási mélysége, a vizsgálati eszköz ütési energiája (N jelű Schmidt-kalapács esetében 2207 Nmm, L jelű Schmidt-kalapács esetében 735 Nmm).

## 4.2 MODELLEZÉS

### 4.2.1. Működési modell kidolgozása

A modell kifejlesztésének igényét a beton visszapattnási keménységének kiterjedt irodalomkutatása ösztönözte, az elmúlt 60 év több mint 150 műszaki közleményének áttanulmányozását követően.

Kutatásaim elméleti részében deduktív elveket követtem. Ahol lehetett, a gondolatmenetemet elméleti megfontolásokra alapoztam, míg más esetekben tapasztalati összefüggéseket tanulmányoztam. Olyan általános érvényű megfigyeléseket és elméleti modelleket vizsgáltam át, amelyek a beton nyomószilárdságával és visszapattnási értékével közvetlenül vagy közvetetten kapcsolatba hozhatók, és a cementkő hidratációs fokára, mint elsődleges okra vezethetők vissza. Mivel a hidratációs fok matematikai modellezése és laboratóriumi meghatározása a gyakorlati alkalmazás egyszerűségére törekvésének elvét általában nem elégíti ki, ezért azt az egyszerűsítést vezettem be, hogy a hidratációs fokot három

változóval: a cement típusával, a víz-cement tényezővel (v/c) és a beton korával jellemeztem. Elméleti kutatásaim során az általános törvényszerűségekre koncentrálna a jelenségek véletlenszerűségét nem vettem figyelembe, azaz az egyes befolyásoló tényezők (vezérlő paraméterek) valószínűségi változóként történő felírását nem alkalmaztam. A lehetséges belső kapcsolódási pontok feltárása elvezetett egy olyan fenomenológiai működési modell hipotéziséhez a beton nyomószilárdsága és visszapattanási értéke között, amely öt általános függvénykapcsolat segítségével képes generálni, adott cement típusból, adott víz-cement tényezővel készített, adott korú betonokra vonatkozóan az összetartozó nyomószilárdság – visszapattanási érték adatpontokat. A generátorfüggvények a következők (amelyek mindegyike empirikus úton validálható): a víz-cement tényező és a beton 28 napos korú nyomószilárdságának kapcsolata; a beton nyomószilárdságának időbeli fejlődése; a beton nyomószilárdságának és visszapattanási értékének kapcsolata 28 napos korban; a karbonátosodási mélység időbeli változása; a karbonátosodási mélység és a visszapattanási érték kapcsolata.

#### 4.2.2 Alkalmazhatóság vizsgálat paraméterelemzéssel

Paraméterelemzéssel igazoltam a modell alkalmazhatóságát: tetszőleges függvényparaméterek előzetes felvételével olyan függvényseregeket tudtam generálni, amelyek a valós megfigyelésekhez hasonló eredményeket szimuláltak. A paraméterelemzéshez a modell generátorfüggvényeként a szakirodalomban található empirikus függvénykapcsolatokból választottam ki az általam leginkább megalapozottnak vélt javaslatokat.

#### 4.2.3 Ellenőrzés laboratóriumi vizsgálatokkal

Kutatásaim laboratóriumi vizsgálati részében a hipotetizált működési modell valós alkalmazhatóságát kívántam bizonyítani (verifikálás). Induktív elveket követtem, azaz szigorúan szabályozott kísérleti feltételek között, elégségesen nagyszámú vizsgálati paraméter bevezetésével, és azok széles spektrumon történő változtatásával hajtottam végre laboratóriumi méréseket nagyszámú próbatesten kétszeri ismétléses vizsgálattal, és az egyes megfigyeléseket grafikusán ábrázolva kerestem a hipotetizált működési modell általános szabályszerűségeit.

A vizsgált 72 beton keverék össze-tételét a jelenlegi betonépítési igényekkel összhangban terveztem meg, azaz különböző adalékszerekkel készített, enyhén túltelített keverékeket állítottam össze. A betonkeverékek területtel mért  $500 \pm 20$  mm konzisztenciáját folyósító adalékszerrel biztosítottam. A betömörített frissbeton tervezett levegőtartalma 1,0 V% volt. A próbatesteket utókezelésként 7 napig víz alatt, a 7. nap után pedig laboratóriumi körülmények között tároltam. A vizsgálati paraméterek a következők voltak:

Víz-cement tényező:	0,38 – 0,41 – 0,43 – 0,45 – 0,47 – 0,50 – 0,51 – 0,55 – 0,60
Cement típusa:	CEM I 42,5 N – CEM III/B 32,5 N
Cementtartalom ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ):	300 – 350 – 400
Víztartalom ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ):	150 – 165 – 180
Cementpép tartalom ( $\text{liter}/\text{m}^3$ ):	247 – 263 – 278 – 293 – 294 – 309
Adalékanyag-cement tömegarány:	4,5 – 4,6 – 4,7 – 5,3 – 5,4 – 5,5 – 6,3 – 6,5 – 6,6
Adalékszer típusa:	kötésgyorsító/cementmodifikáló adalékszer (3 típus)
A beton kora vizsgálatkor (nap):	7 – 14 – 28 – 56 – 90 – 180

A 72 keverék (9 víz-cement tényező  $\times$  2 cement típus  $\times$  (3 adalékszer típus + 1 etalon keverék)) 6 különböző korban kétszeri ismétléssel elvégzett vizsgálata (összesen 864 darab 150 mm élhosszúságú kocka alakú próbatest) több mint 3  $\text{m}^3$  beton elkészítését igényelte kizárólag ehhez az ellenőrző kísérletsorozathoz. A felületi keménység vizsgálatokat N-jelű Schmidt-kalapáccsal végeztem el. Összesen 10-10 egyedi visszapattanási értéket rögzítettem a 150 mm élhosszúságú kocka alakú próbatestek bedolgozási iránnyal párhuzamos egy-egy felületén hidraulikus nyomógépben 40 kN erővel befogott állapotban, közvetlenül az EN 12390-3 szabvány szerint elvégzett nyomószilárdság vizsgálat előtt. A betonok karbonátosodási mélységét fenolftalein alkoholos oldatával mutattam ki.

#### 4.3 CÉLIRÁNYOS KÍSÉRLETEK

Az előzőekben részletezett modellverifikáló kísérlet mellett egy további laboratóriumi kísérletsorozatot is, normál testsűrűségű, széles nyomószilárdsági tartományt felölelő, számos eltérő vizsgálati korú betonokon a beton visszapattanási

értéke, nyomószilárdsága és rugalmassági modulusa közötti kapcsolat tanulmányozása céljából. A betonokat dunai homokos kavicsból, és CEM I 42,5 N típusú cementből kevertem. A cementpép tartalom minden keverék esetében konstans (304 liter/m<sup>3</sup>) volt annak érdekében, hogy azonos adalékanyag váz mellett a víz-cement tényező tiszta hatását vizsgálhassam. A betonkeverékek területtel mért 500±20 mm konzisztenciáját folyósító adalékszerrel biztosítottam. A betömörített frissbeton tervezett levegőtartalma 1,0 V% volt. A próbatesteket utókezelésként 7 napig víz alatt, a 7. nap után pedig laboratóriumi körülmények között tároltam. A kísérletekhez 150 mm élhosszúságú kocka alakú, valamint 120×120×360 mm méretű hasáb alakú próbatesteket készítettem. A vizsgálati paraméterek a következők voltak:

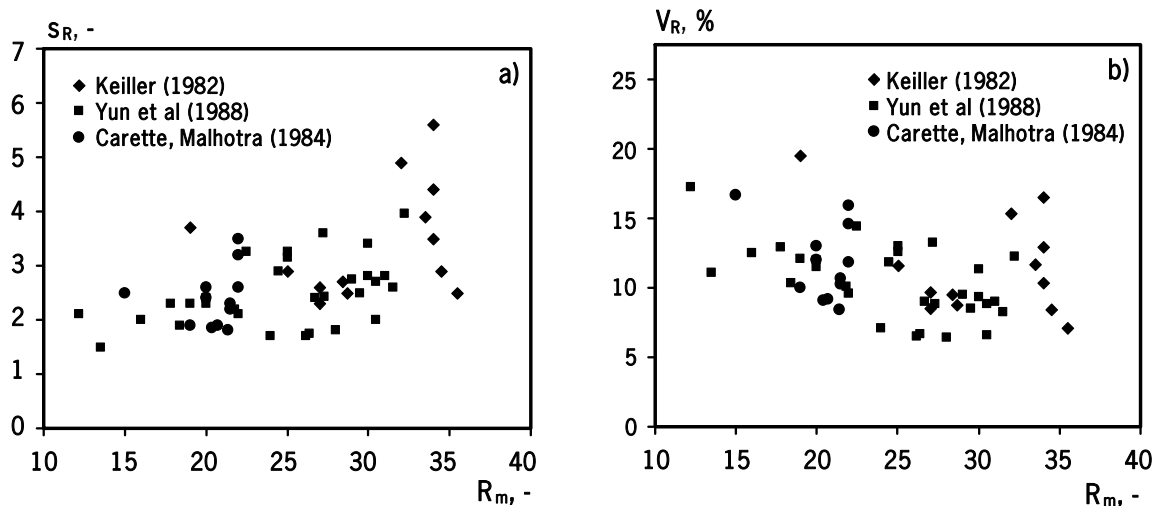
Víz-cement tényező:	0,40 – 0,50 – 0,65
Cementtartalom (kg/m <sup>3</sup> ):	315 – 375 – 425
Víztartalom (kg/m <sup>3</sup> ):	170 – 185 – 205
Adalékanyag-cement tömegarány:	4,25 – 4,85 – 5,75
A beton kora vizsgálatkor (nap):	3 – 7 – 14 – 28 – 56 – 90 – 240 – 1100

A 3 keverék 8 különböző korban kétszeri ismétléssel elvégzett vizsgálata (összesen 48 darab 150 mm élhosszúságú kocka alakú és 48 darab 120×120×360 mm méretű hasáb alakú próbatest) több, mint 50 liter beton elkészítését igényelte kizárólag ehhez a kísérlethez. A felületi keménység vizsgálatokat L- és N-jelű Schmidt-kalapáccsal, valamint alternatív kontroll készülékként a kis ütési energiájú D-típusú Wolpert Leeb szkleroszkóppal is elvégeztem. A három készüléknek azonos a működési elve (egy megfeszített rugó egy ütőtömeget mozgásba lendít, amely a vizsgálandó felületet megüti, majd arról visszapattan). Az N-jelű Schmidt-kalapács ütőtömege 380 g, L-jelű Schmidt-kalapáccsá 125 g, a Wolpert Leeb szkleroszkópé pedig 5,5 g, amelyek 2207 Nmm, 735 Nmm és 11 Nmm ütési energiát jelentenek. Összesen 10-10 egyedi visszapattanási értéket rögzítettem a 150 mm élhosszúságú kocka alakú próbatestek bedolgozási iránnyal párhuzamos egy-egy felületén hidraulikus nyomógépben befogott állapotban, közvetlenül az EN 12390-3 szabvány szerint elvégzett nyomószilárdság vizsgálat előtt. A Leeb-keménység vizsgálatokat a 120×120×360 mm méretű hasáb alakú próbatesteken végeztem közvetlenül az ISO 6784 szabvány szerint elvégzett rugalmassági modulus mérések után. Összesen 120 Leeb keménység leolvasást rögzítettem a próbatestek bedolgozási iránnyal párhuzamos egy-egy felületén.

## 5. A KUTATÁS EREDMÉNYEI, HIPOTÉZISEI ÉS TÉZISEI

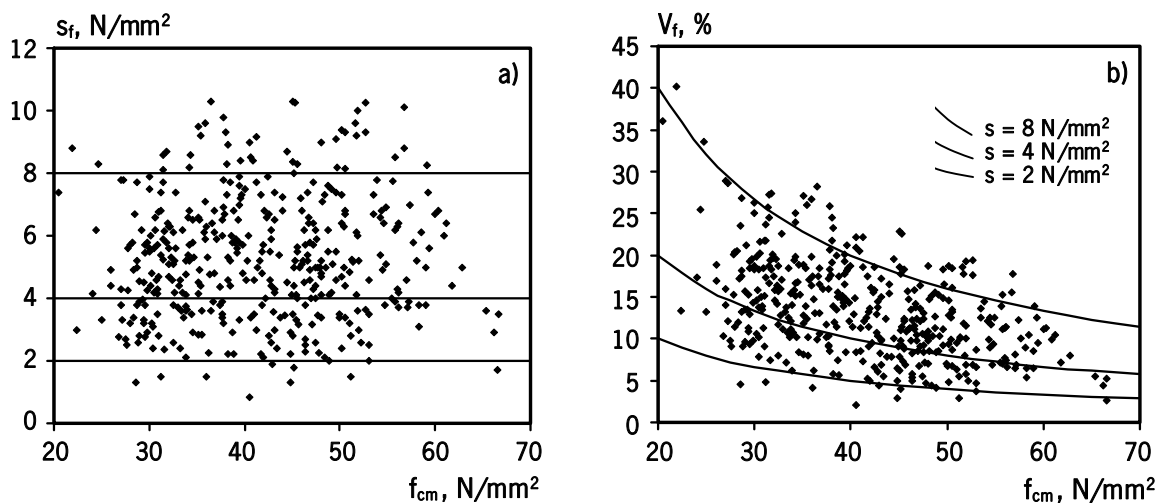
### 5.1 STATISZTIKAI MEGÁLLAPÍTÁSOK

A szakirodalom szerint a visszapattanási érték mérőhelyre\* vonatkozó szórása ( $S_R$ ) nő a mérőhelyre vonatkozó átlagérték függvényében, illetve a mérőhelyre vonatkozó relatív szórás ( $V_R$ ) közel állandó és 10% körüli értékű (ACI, 2003) (\*mérőhely: olyan 10×10 cm-nél nem nagyobb betonfelület, amelyen Schmidt-kalapáccsal ugyanazon vizsgáló személy, ugyanazon vizsgálóeszközzel rövid időintervallumon belül tíz visszapattanási értéket mér oly módon, hogy egy pontra nem üt egynél több alkalommal).



2. ábra: A visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó a) szórása és b) relatív szórása az átlag függvényében a szakirodalom szerint (ACI, 2003).

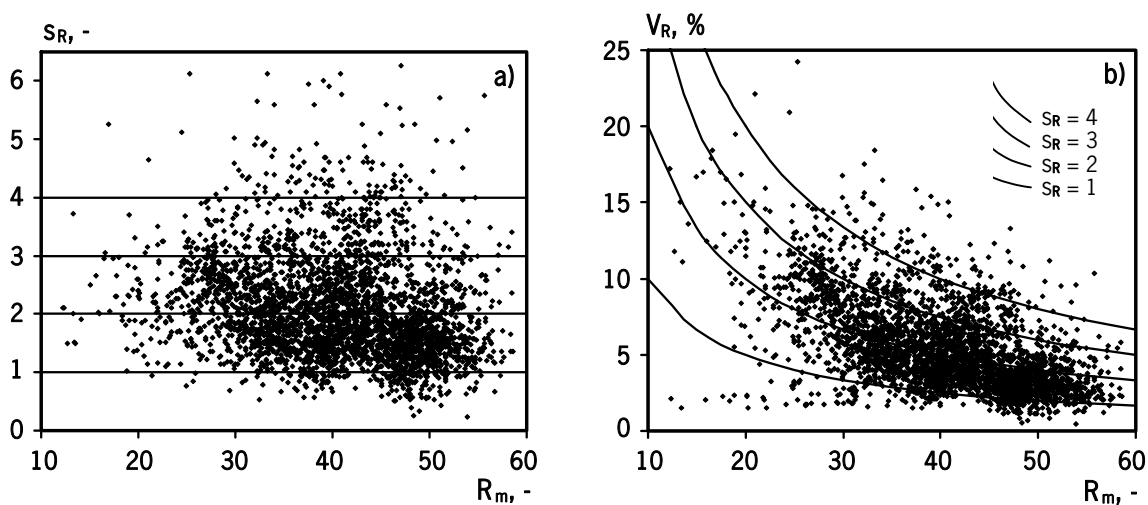
A szakirodalom szerint a beton nyomószilárdságának szórása a betonkészítés minőségétől függ, és nem függ a nyomószilárdság átlagértékétől (3.a és b ábra) (fib, 1999).



3. ábra: A nyomószilárdság a) szórása és b) relatív szórása az átlag függvényében a szakirodalom szerint (fib, 1999).

**H1.1 hipotézis:** A felületi keménység és a nyomószilárdság beton anyag esetén összefügg egymással. Nagyobb szilárdságú betonok készítése során nagyobb valószínűséggel érvényesítenek szigorú minőségellenőrzést, így a nyomószilárdság szórása várhatóan nem nő, inkább csökken a növekvő szilárdsággal. Ezért várhatóan a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó szórása sem nő, inkább csökken a mérőhelyre vonatkozó átlagérték növekedésével.

**T1.1 tézis** [3, 11]: Vizsgálatokkal igazoltam 8955 mérőhely eredménye alapján (amelyből 4170 mérőhely laboratóriumi vizsgálat és 4785 mérőhely helyszíni vizsgálat eredménye volt; az összes egyedi visszapattanás érték száma meghaladta a nyolcvanezret), hogy a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó szórása a betonkészítés minőségétől függ, és *nem függ* a mérőhelyre vonatkozó visszapattanási átlagértéktől (4.a ábra), következésképpen a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó relatív szórása a mérőhelyre vonatkozó átlagértékkel fordított arányosságban áll (4.b ábra). Értelmezési tartomány:  $R = 10 - 63$ , illetve  $f_{cm} = 3,3 \text{ MPa} - 105,7 \text{ MPa}$ . A szakirodalmi feltételezések a valós megfigyelésekkel nem állnak összhangban.



4. ábra: A visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó a) szórása és b) relatív szórása az átlag függvényében saját elemzéseim alapján.



A szakirodalomban megállapítások találhatóak a Schmidt-kalapácsos keménységvizsgálati módszer precizitásával kapcsolatban (precizitás: előírt feltételek mellett elvégzett vizsgálatok eredményei egyezésének mértéke). Ezek alapjául a következő két feltételezés szolgál: 1) a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó szórása konstans és független a beton tényleges tulajdonságaitól, valamint a vizsgálatot végző személy tényleges hibájától; továbbá 2) az  $N(\mu, 1)$  normális eloszlású populáció standardizált terjedelmének értékei használhatók a mérőhelyre vonatkozó visszapattanási érték megengedhető terjedelmének meghatározásához.

A szakirodalom szerint a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó szórása  $s_R = 2,5$  ezért a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó legnagyobb megengedett terjedelme  $r_R = (R_{\max} - R_{\min}) = 12$  (ASTM, 2008). A visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó terjedelmének számítása a mérőhelyre vonatkozó szórás,  $s_R = 2,5$  (ASTM, 2008) és egy 4,5 értékű konstans (ASTM, 2003) szorzataként számítandó. A szorzótényező egy  $N(\mu, 1)$  normális eloszlású populációból vett 10-elemű minta standardizált terjedelmére vonatkozó,  $p = 95\%$ -os valószínűségi szinthez tartozó kritikus érték  $k = 4,474124$  ( $p = 0,95$ ;  $n = 10$ ) egy tizedes jegyre kerekített értéke (pl. Harter, 1960). A mérőhelyre vonatkozó szórás függése az átlagtól, valamint a mérőhelyre vonatkozó terjedelem és szórás egyéb statisztikai jellemzői (eloszlás típusa, alulmaradási valószínűség) nem ismeretesek.

**H1.2 hipotézis:** A visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó terjedelme normális eloszlású valószínűségi változóval írható le, és az  $r_R = 12$  érték  $p = 0,95$  valószínűségi szinthez tartozik  $n = 10$  esetén.

A visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó szórásának  $s_R = 2,5$  értéke normális eloszlású valószínűségi változó várható értéke, ha  $n = 10$ .

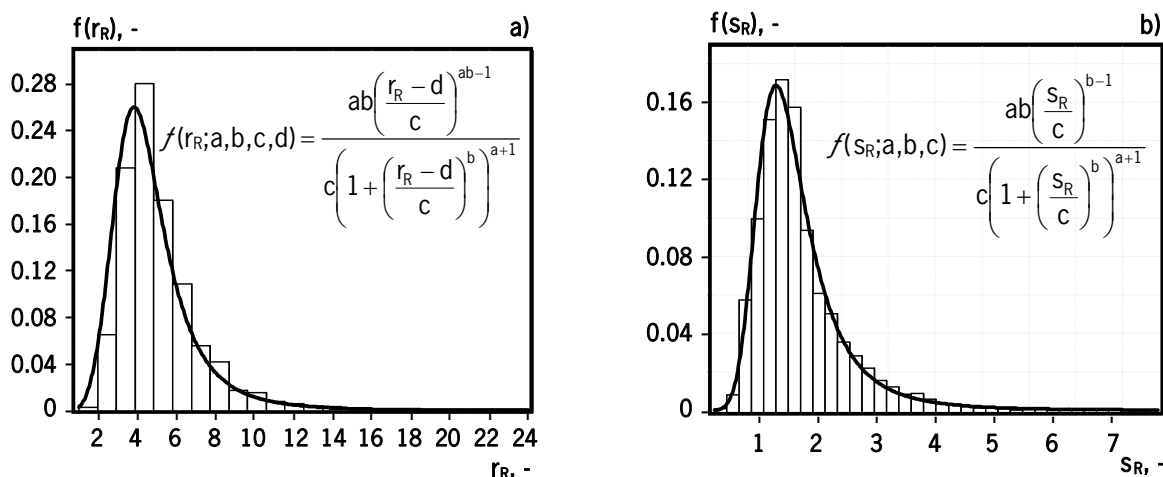
A szakirodalom szerint a beton nyomószilárdságának relatív szórása viszont lognormális valószínűségi eloszlással írható le, miközben a nyomószilárdság eloszlása normális valószínűségi eloszlást követ (Shimizu *et al*, 2000).

A felületi keménység és a nyomószilárdság beton anyag esetén összefügg egymással. Ezért feltételezhető, hogy a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó relatív szórásának eloszlása is pozitív ferdeséggel rendelkező valószínűségi eloszlást követ.

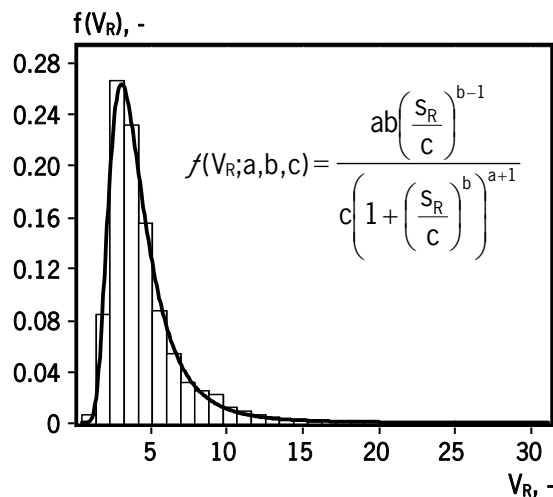
**T1.2 tézis** [3, 11]: Vizsgálatokkal *igazoltam* 8955 mérőhely eredménye alapján (amelyből 4170 mérőhely laboratóriumi vizsgálat és 4785 mérőhely helyszíni vizsgálat eredménye volt; az összes egyedi visszapattanási érték száma meghaladta az nyolcvanezretet), hogy a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó:

- terjedelmének ( $r_R$ ) eloszlása (8342 mérőhely alapján), és
- szórásának ( $s_R$ ) eloszlása (8955 mérőhely alapján)
- relatív szórásának ( $V_R$ ) eloszlása (8955 mérőhely alapján)

pozitív ferdeséggel rendelkezik ( $\gamma_r = 1,9432$ ;  $\gamma_s = 1,7064$ ;  $\gamma_v = 2,2472$ ), következésképpen nem írhatók le normális valószínűségi eloszlás feltételezésével. Az ASTM C 805 feltételezései a valós megfigyelésekkel nem állnak összhangban, viszont a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó relatív szórásának pozitív ferdeségére vonatkozó feltételezést az elemzések igazolták.



5. ábra: A visszapattanási érték a) terjedelmének és b) szórásának relatív gyakorisági histogramja a legjobban illeszkedő sűrűségfüggvényvel együtt.



6. ábra: A visszapattanási érték relatív szórásának relatív gyakorisági hisztogramja a legjobban illeszkedő elméleti sűrűségfüggvénnyel együtt.

Hatvan eloszlástípus illeszkedés vizsgálata alapján igazoltam, hogy a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó:

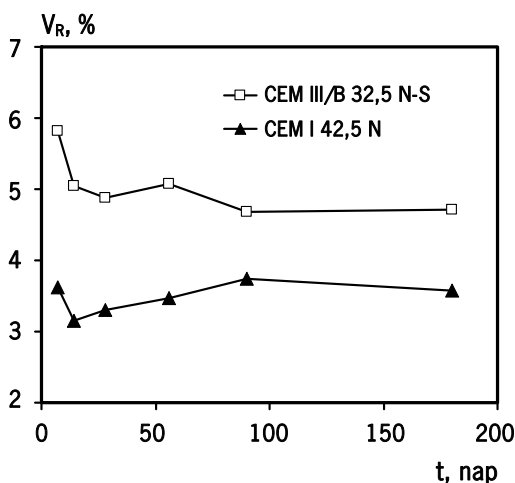
- terjedelmének ( $r_R$ ) eloszlása négyparaméteres *Burr* eloszlással írható le ( $a=0,89001$ ;  $b=4,0809$ ;  $c=3,755$ ;  $d=0,41591$ ), várható értéke  $E[r_R] = 4,8068$ ; mediánja  $m[r_R] = 4$ ; módusza  $Mo[r_R] = 3,75$ ; a 95%-os kvantilis értéke  $v_{95}[r_R] = 9$ ; a vizsgált értéktartomány  $r_R = 1 - 24$  (5.a ábra). Az  $r_R = 12$  érték az esetek 98,7%-ában meghaladja a tapasztalati értéket.
- szórásának ( $s_R$ ) eloszlása háromparaméteres *Dagum* (általánosított logisztikus-Burr, inverz Burr) eloszlással írható le ( $a=1,7958$ ;  $b=3,7311$ ;  $c=1,2171$ ), várható értéke  $E[s_R] = 1,667$ ; mediánja  $m[s_R] = 1,5$ ; módusza  $Mo[s_R] = 1,45$ ; a 95%-os kvantilis értéke  $v_{95}[s_R] = 3,1526$ ; a vizsgált értéktartomány  $s_R = 0,23 - 7,80$  (5.b ábra). Az  $s_R = 2,5$  érték az esetek 88,5%-ában meghaladja a tapasztalati értéket.
- relatív szórásának ( $V_R$ ) eloszlása háromparaméteres *Dagum* (általánosított logisztikus-Burr, inverz Burr) eloszlással írható le ( $a=2,2255$ ;  $b=3,1919$ ;  $c=2,7573$ ), várható értéke  $E[V_R] = 4,4021\%$ ; mediánja  $m[V_R] = 3,8\%$ ; módusza  $Mo[V_R] = 3,125\%$ ; a 95%-os kvantilis értéke  $v_{95}[V_R] = 9,2132\%$ ; a vizsgált értéktartomány  $V_R = 0,43\% - 31,12\%$  (6. ábra).

A megbízhatósági eljárás alapján történő méretezési számítások során a különböző anyagjellemzők változékonyságának figyelembevételére az (abszolút) szórás helyett többnyire a relatív szórást alkalmazzuk. E tekintetben célszerű lehet a visszapattanási érték ismételtetőségi paraméterének is a relatív szórást tekinteni. Ehhez azonban szükséges megismerni a relatív szórás értékét befolyásoló tényezőket és azok nagyságrendjét.

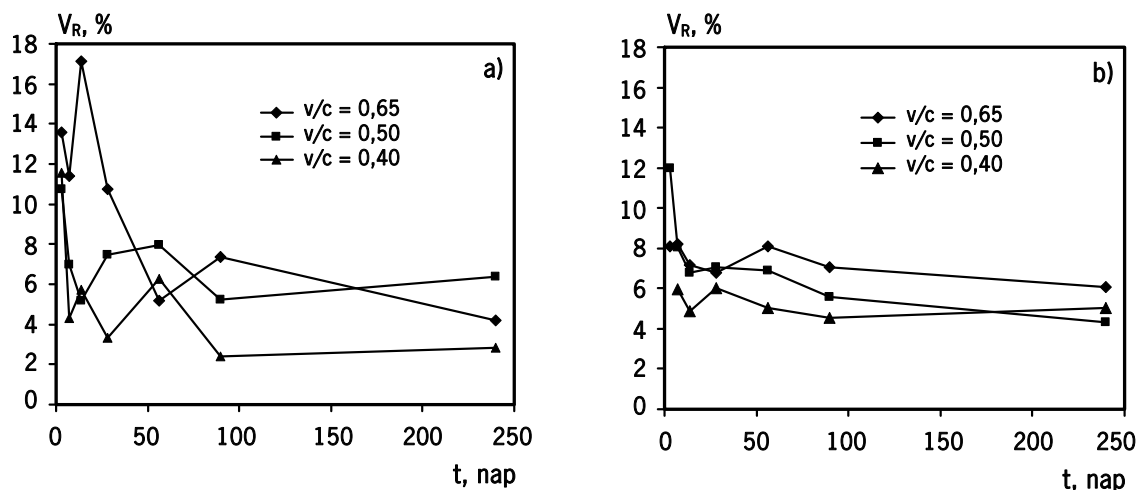
**T1.3 tézis** [3, 11]: Laboratóriumi és helyszíni vizsgálatok eredményei alapján igazoltam, hogy a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó relatív szórásának ( $V_R$ ) mértékét befolyásolja az alkalmazott cement típusa, a beton víz-cement tényezője, a beton kora, a beton karbonátosodási mélysége és a visszapattanás-méréshez befektetett ütési energia.

- Kilenc eltérő cementtípus és 102 eltérő betonösszetétel laboratóriumi vizsgálatának eredményei alapján igazoltam, hogy tiszta portlandcementtel (CEM I) készített betonok esetén a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó átlagos relatív szórása ( $V_R$ ) *kisebb* ( $\sim 3.5\%$ ), mint a heterogén portlandcementekkel (CEM II) vagy kohósalak-cementekkel (CEM III) készített betonoké ( $\sim 5.0\%$ ) (7. ábra). Igazoltam, hogy a tiszta portlandcementek (CEM I) esetén a szilárdsági osztály növelése a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó relatív szórásának ( $V_R$ ) csökkenését eredményezi. Vizsgált cement típusok: CEM I 32,5; CEM I 42,5 N; CEM I 42,5 N-SR5; CEM I 52,5; CEM II/A-S 42,5; CEM II/A-V 42,5 N; CEM II/B-M (V-L) 32,5 N; CEM III/A 32,5 N-MSR; CEM III/B 32,5 N-SR.

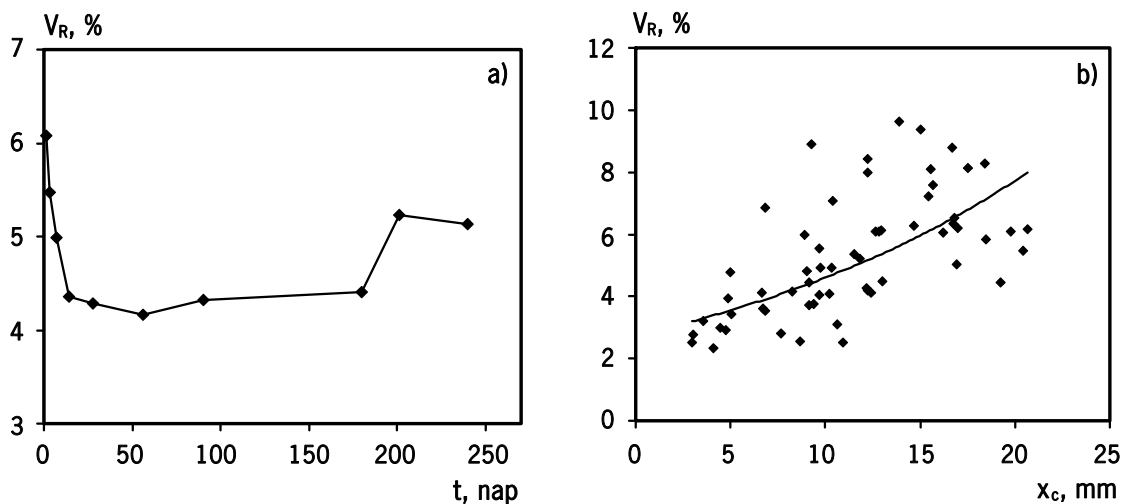
- Hat eltérő cementtípus és 93 eltérő betonösszetétel laboratóriumi vizsgálatainak eredményei alapján igazoltam, hogy a víz-cement tényező növelése a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó átlagos relatív szórásának ( $V_R$ ) növekedését eredményezi (8. ábra). A különböző víz-cement tényezőjű betonok visszapattanási értékének mérőhelyre vonatkozó átlagos relatív szórása közötti különbség 1-10 % között változik, a beton korától és az mérőeszköz ütési energiájától függően. Vizsgált víz-cement tényező tartomány:  $v/c = 0,35 - 0,65$ .
- Kilenc eltérő cementtípus és 102 eltérő betonösszetétel laboratóriumi vizsgálatainak eredményei alapján igazoltam, hogy 14 napos korig a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó relatív szórása ( $V_R$ ) erőteljesen csökken (~6 %-ról), 28-56 napos korban minimum értéket ér el (~4 %-on), majd idővel az értéke fokozatosan növekszik (~5 %-ra) (9.a ábra). Vizsgált tartomány: 1 – 1100 napos kor.
- Harminc eltérő betonösszetétel laboratóriumi vizsgálatainak eredményei alapján igazoltam, hogy a beton karbonátosodási mélységének növekedése a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó átlagos relatív szórásának ( $V_R$ ) növekedését eredményezi (9.b ábra). Vizsgált karbonátosodási mélység tartomány:  $x_c = 2,2 \text{ mm} - 22,8 \text{ mm}$ , a két szélsőértékhez tartozó mérőhelyre vonatkozó átlagos relatív szórások ~3 % ill. ~8 %. Vizsgált beton nyomószilárdság tartomány:  $f_{cm} = 42,6 \text{ MPa} - 91,7 \text{ MPa}$ .
- Tiszta portlandcementtel készített betonok laboratóriumi vizsgálatainak eredményei alapján igazoltam, hogy kisebb ütési energia esetén a visszapattanási érték mérőhelyre vonatkozó relatív szórása ( $V_R$ ) nagyobb (akár 17 %-ot is elérhet), 56 napnál fiatalabb betonok esetén, majd ezt követően a különbség kiegyenlítődik (8. ábra). Vizsgált víz-cement tényező tartomány:  $v/c = 0,40 - 0,65$ . Vizsgált kor: 3 – 1100 nap. Vizsgált ütési energia: 735 Nmm és 2,207 Nmm.



7. ábra: A cement típusának hatása a visszapattanási érték relatív szórására az idő függvényében.



8. ábra: A víz-cement tényező és az ütési energia (a) 735 Nmm, b) 2207 Nmm) hatása a visszapattanási érték relatív szórására.



9. ábra: A a) beton korának és b) karbonátosodási mélységének hatása a visszapattanási érték relatív szórására.

## 5.2 A VISSZAPATTANÁSI KEMÉNYSÉG MŰKÖDÉSI MODELLJE

A Schmidt-kalapácsos betonvizsgálat elsődleges célja általában a szilárdságbecslés. A szilárdságbecsléshez szükségünk van egy függvénykapcsolatra a szerkezeti beton nyomószilárdsága és a vizsgált keménységi mérőszám (visszapattanási érték) között. Ilyen függvénykapcsolatok megalkothatók tervezett laboratóriumi kísérletekkel, vagy szerkezetből kifűrt magminták alapján.

Kizárólag tapasztalati összefüggésre találhatunk utalást a legkorábbi szakirodalmi közleményekben (Anderson et al, 1955; Kolek, 1958) és napjainkból is (Bungey et al, 2006; Kausay, 2013), azonban olyan egyetlen, általános érvényű elméletet ez ideig nem alkottak meg a kutatók, amely le tudná írni a beton visszapattanási keménysége és nyomószilárdsága közötti kapcsolatot.

Meg kell jegyeznünk, hogy a kutatók általában nem választják szét a kísérleti eredményeiket a különböző befolyásoló paraméterek szerint az összetartozó visszapattanási érték – nyomószilárdság adatpárok grafikus ábrázolásában és az elmúlt 60 évben ez általánosan tapasztalható volt.

A szakirodalomban számtalan ajánlást találhatunk a visszapattanási érték – nyomószilárdság összefüggésre, azonban ezek többnyire egyszerű laboratóriumi kísérleteken alapuló egyváltozós regressziós függvények (10. ábra). Csupán néhány olyan átfogó kutatási beszámoló született, amelyben több befolyásoló tényező együttes hatását tanulmányozták részletes paraméterelemzéssel (Herzig, 1951; Borján, 1981; Tanigawa et al, 1984), azonban ezek eredményei is egyváltozós regresszióval megalkotott összefüggések voltak.

**H2.1 hipotézis:** A megszilárdult betonok nyomószilárdságát és felületi keménységét csak részben határozzák meg egyazon fizikai jellemzők ill. kémiai folyamatok, és ezek időbeli változása esetenként eltérő. Nem várható el, hogy létezik olyan, egyváltozós függvénykapcsolat, amellyel a megszilárdult betonok nyomószilárdsága és felületi keménysége között, mérnöki alkalmazásra alkalmas megbízhatósági intervallummal találhatunk összefüggést  $R_m - f_{cm}$  vagy  $f_{cm} - R_m$  koordináta rendszerben (ahol  $R_m$  a felületi keménység átlagértéke,  $f_{cm}$  a nyomószilárdság átlagértéke).

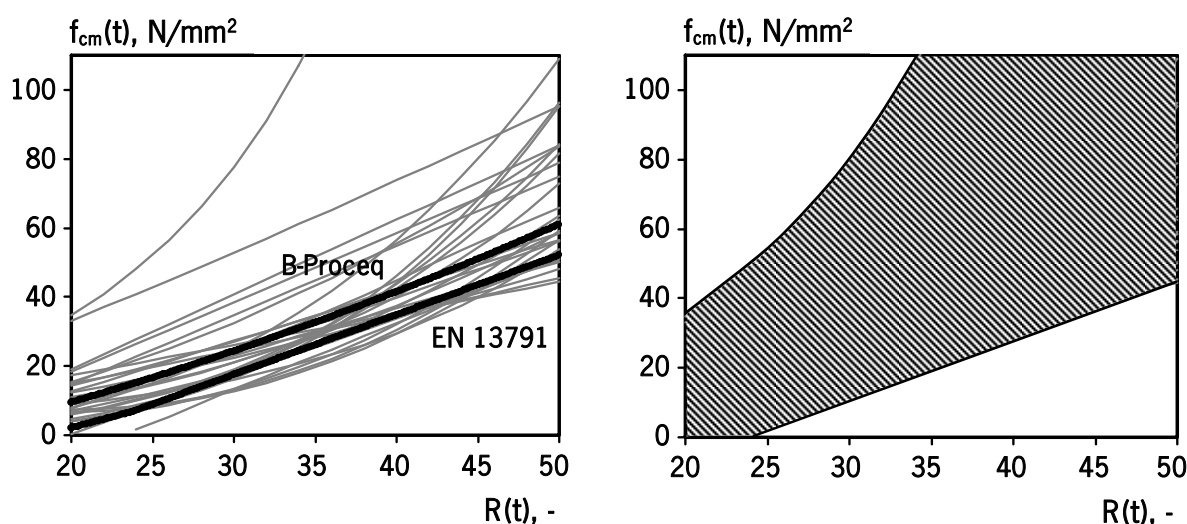
**T2.1 tézis** [2, 11, 12]: Kiterjedt irodalomkutatással – több mint 150 publikáció eredményeinek áttanulmányozásával – és saját laboratóriumi ill. helyszíni vizsgálatokkal bebizonyítottam, hogy nem lehetséges, és az elmúlt, több mint 60 évben nem is sikerült találni olyan, egyváltozós függvénykapcsolatot, amely tetszőleges összetételű és korú megszilárdult betonok nyomószilárdsága és felületi keménysége között, mérnöki alkalmazásra alkalmas megbízhatósági intervallummal adna meg összefüggést  $R_m - f_{cm}$  vagy  $f_{cm} - R_m$  koordináta rendszerben.

A szakirodalomban közzétett  $R_m - f_{cm}$  összefüggések alapján a következő megfigyelések tehetők:

- A leginkább elfogadott függvénytípus a hatványfüggvény.
- Ugyanazon visszapattnási értékhez akár 40-60 N/mm<sup>2</sup> különbséggel is rendelhetünk nyomószilárdságot, ha eltérő javaslatokat követünk.
- Egy-egy javaslat csak az adott kísérleti háttér által szolgáltatott peremfeltételek között értelmezhető és használható biztonsággal. A javaslatok kiterjesztése más összetételű betonokra igen nagy bizonytalanságot hordoz magában.

Az MSZ EN 13791:2007 azon kijelentése, hogy az abban javasolt alapgörbe olyan, a biztonság javára tett közelítést definiál, amelyből a függvény transzformáció, azaz az alapgörbe eltolása mindig pozitív értelmű (fölfelé történik) nem minden esetben helytálló. Esetenként 6-8 N/mm<sup>2</sup> mértékű negatív eltolás is szükséges lehet (amely a szabvány szerint nem történhet meg) (10. ábra).

- A szakirodalomban javasolt függvénykapcsolatok jelentős eltérése (10. ábra) többváltozós regressziós elemzést igényel, amellyel felfedezhetővé válhatnak a visszapattnási keménység legfontosabb befolyásoló tényezői.



10. ábra: A szakirodalomban található visszapattnási érték és nyomószilárdság közötti tapasztalati összefüggések és azok teljes tartománya.

A beton felületi keménysége és nyomószilárdsága számos tényezőtől függ (pl. a cement típusa és mennyisége, az adalékanyag típusa és mennyisége, a szerkezeti beton tömörítésének módja és mértéke, az utókezelés módja, a betonfelület minősége, a beton kora, a beton karbonátosodási mélysége, a beton nedvességtartalma, a szerkezeti elem tömege, hőmérséklet és feszültségállapot), ezért a keménység és szilárdság kapcsolatának egyváltozós regressziós elemzése félrevezető eredményhez vezethet és elfedheti a kapcsolat valódi mozgatórugóját.

**H2.2 hipotézis:** Szakirodalmi adatok és saját mérési eredmények megfigyelései szerint, megszilárdult betonokra vonatkozóan, a víz-cement tényező és az idő, mint független változók szerint a következő összefüggések feltételezhetőek:

- 28 napos korú betonok átlagos nyomószilárdsága cement típusonként megadható a víz-cement tényező exponenciális függvényeként (pl. Ujhelyi, 2005),
- tetszőleges korú betonok nyomószilárdsága egyszerűsített módon (a víz-cement tényezőtől függetlenül felírva), cement típusonként megadható a 28 napos korra vonatkozó nyomószilárdság exponenciális függvényeként (pl. CEB-FIP Model Code 1990); bár a betonok nyomószilárdságának időbeli fejlődése valójában függ a víz-cement tényezőtől (pl. Washa, Wendt, 1975),
- tetszőleges korú betonok karbonátosodási mélysége egyszerűsített módon megadható az idő, a víz-cement tényező és a cement típus függvényeként (pl. Papadakis *et al*, 1992),

- különböző korú, azonos környezetben tárolt, azonos cement típussal készített betonok visszapattanási értékének változása felírható az idő függvényében (pl. Kim et al, 2009),
- található függvénykapcsolat a betonok visszapattanási értéke és a karbonátosodási mélysége között (pl. JGJ, 2001),
- található függvénykapcsolat azonos korú, azonos környezetben tárolt, azonos cement típussal készített betonok visszapattanási értéke és nyomószilárdsága között.

A felsoroltak alapján hipotetizálható, hogy tetszőleges (t) korú betonokra található olyan többváltozós függvény, amely az átlagos visszapattanási érték ( $R_m(t)$ ) és az átlagos nyomószilárdság ( $f_{cm}(t)$ ) között egyértelmű kapcsolatot létesít. A függvény független változói a cementke hidratációs foka (amelyet meghatároz a víz-cement tényező, az idő, a cement típusa és a tárolási-környezeti feltételek), illetve a cement és az adalékanyag mennyiségét, a tömörítés mértékét és a vizsgálati körülményeket leíró változók.

**T2.2 tézis** [2, 6, 9]: Igazoltam, hogy konstruálható olyan többváltozós függvény, amely tetszőleges (t) korú betonok esetén egyértelmű kapcsolatot létesít az átlagos visszapattanási érték ( $R_m(t)$ ) és az átlagos nyomószilárdság ( $f_{cm}(t)$ ) között. Felírtam a függvény egyszerűsített, kétváltozós alakját, amelyben a két független változó a víz-cement tényező és az idő. Paraméterelemzéssel demonstráltam, hogy a modell alkalmas a szakirodalmi eredmények reprodukálására. Két cement típus (CEM I 42.5 N és CEM III/B 32.5 N) felhasználásával, 864 darab próbatest vizsgálatán keresztül verifikáltam a modellt  $v/c = 0,38 \dots 0,60$  víz-cement tényező és  $t = 7 \dots 180$  nap tartományra.

### 5.2.1 A modell felépítése

A modell felépítését és az azt alkotó egyes függvények szimbolikus alakját (11. ábra) az (1) – (5) egyenletek írják le. A modell a következő tapasztalati összefüggéseket tartalmazza:

A) 28 napos korú betonok átlagos nyomószilárdsága a víz-cement tényező exponenciális függvényével írható le (1).

$$f_{c,28} = a_1 \cdot \exp\{a_2 \cdot (v/c)^{a_3}\} \quad (1)$$

ahol  $a_1 > 1$ ,  $a_2 < 0$ ,  $0 < a_3 < 1$

B) Tetszőleges korú betonok nyomószilárdsága egyszerűsített módon (a víz-cement tényezőtől függetlenül felírva), cement típusonként megadható a 28 napos korra vonatkozó nyomószilárdság exponenciális függvényeként (2).

$$f_c(t)/f_{c,28} = \exp\{a_4 \cdot (1 - (28/t)^{a_5})\} \quad (2)$$

ahol  $0 < a_4 < 1$ ,  $0 < a_5 < 1$

valójában  $a_4$  és  $a_5$  is a  $v/c$  függvénye.

C) Függvénykapcsolat tételezhető fel azonos korú, azonos környezetben tárolt, azonos cement típussal készített 28 napos korú betonok visszapattanási értéke és nyomószilárdsága között (3).

$$f_{c,28} = a_6 \cdot R_{28}^{a_7} \quad (3)$$

ahol  $a_6 > 0$ ,  $a_7 \geq 1$

D) Tetszőleges korú betonok karbonátosodási mélysége egyszerűsített módon megadható az idő, a víz-cement tényező és a cement típus függvényeként (Fick diffúziós törvénye alapján) (4).

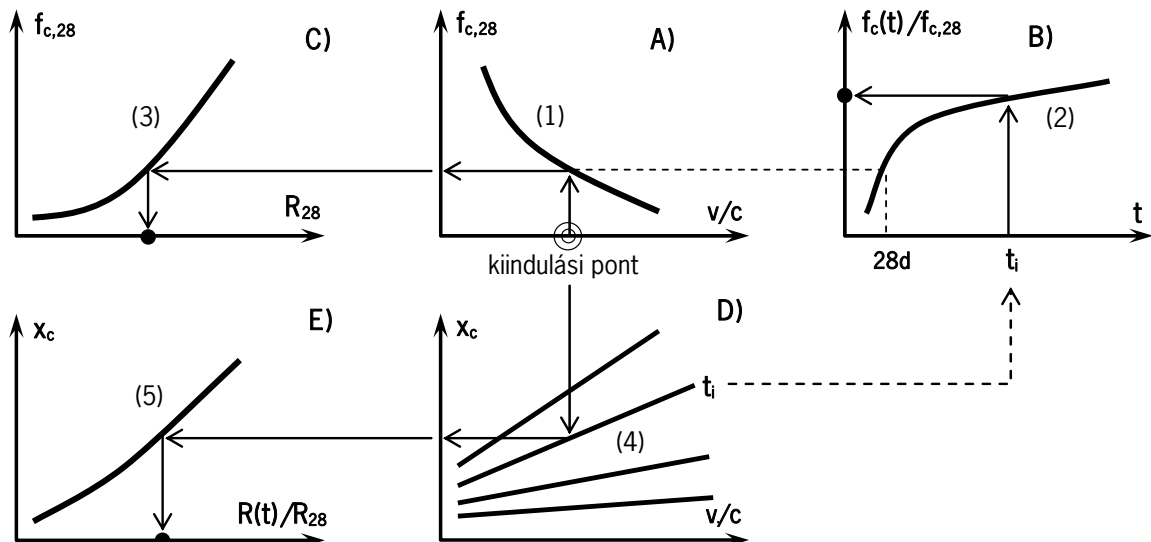
$$x_c = (a_8 \cdot (v/c) - a_9) \cdot t^{a_{10}} \quad (4)$$

ahol  $0 < a_8 < 1$ ,  $0 < a_9 < 1$ ,  $0 < a_{10} < 1$

E) Különböző korú, azonos környezetben tárolt, azonos cement típussal készített betonok visszapattanási értékének változása az idő függvényében feltételezhetően a karbonátosodási mélység hatványfüggvényével modellezhető (5).

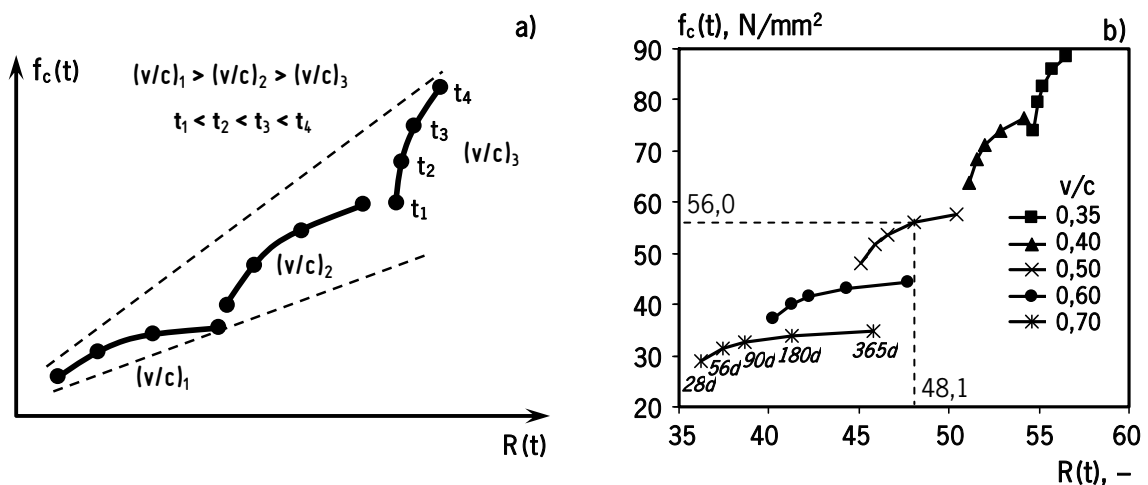
$$R(t)/R_{28} = \frac{1}{1 + a_{11} \cdot x_c^{a_{12}}} \quad (5)$$

ahol  $a_{11} < 0$ ,  $a_{12} > 0$



11. ábra: A modell sematikus felépítése.

A modell összetartozó  $R(t)$  és  $f_c(t)$  adatpárokat szolgáltat tetszőleges víz-cement tényező ( $v/c$ ) és kor ( $t$ ) esetére. A modell eredménye egy különböző víz-cement tényezőhöz tartozó, különböző korú adatpontok által alkotott görbék által álló görbesereg (12.a ábra). Az egyes függvények alakját és meredekségét az (1) – (5) egyenletek  $a_1 \dots a_{12}$  empirikus paramétereinek tényleges értéke határozza meg.



12. ábra: A modell a) jellemző grafikus  $f_c(t) - R(t)$  kimenete és b) paraméterelemzésének eredménye.

## 5.2.2 A paraméterelemzés eredménye

A paraméterelemzéshez a következő tapasztalati összefüggéseket választottam ki a szakirodalomból a modellt alkotó függvényekhez.

28 napos korú betonok átlagos nyomószilárdsága és víz-cement tényezője közötti kapcsolat leírására Ujhelyi javaslatát választottam (CEM I 42.5 N típusú cementre) Ujhelyi és Popovics (2006) feltételezése alapján:

$$f_{c,28} = 406 \cdot \exp\left\{-3,30 \cdot (v/c)^{0,63}\right\} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (6)$$

A nyomószilárdság időbeli fejlődése függ a cement típusa mellett a víz-cement tényezőtől is függ (Washa, Wendt, 1975; Wood, 1991) (lásd H3.2 hipotézis). A szakirodalomban található modellek azonban általában nem veszik figyelembe a víz-cement tényező hatását.

A paraméterelemzéshez a nyomószilárdság időbeli fejlődésének leírására a CEB-FIP Model Code 1990 (CEB, 1993) javaslatát választottam, amely figyelmen kívül hagyja a víz-cement tényező hatását:

$$f_c(t)/f_{c,28} = \exp\left(0,25 \cdot (1 - (28/t)^{0,50})\right) \quad (7)$$

A 28 napos korú betonok visszapattnási értékének és nyomószilárdságának kapcsolata általában nemlineáris. A paraméterelemzéshez a Proceq SA (Schmidt kalapácsok gyártója) javaslatát (Proceq, 2003) választottam:

$$f_{c,28} = 3,07 \cdot 10^{-2} \cdot R_{28}^{1,952} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (8)$$

A megszilárdult cementpép kémiai reakcióba lép a szén-dioxiddal (CO<sub>2</sub>). A légkörben található CO<sub>2</sub> mennyiség elegendő ahhoz, hogy hosszú időn keresztül jelentős változásokat okozzon a cementkőben. A kémiai reakció (karbonátosodás) során a légkör CO<sub>2</sub> tartalma a cementkő kapilláris pórusaiba diffundálva a portlandit (CaOH<sub>2</sub>) egy részét mészkővé (CaCO<sub>3</sub>) alakítja. A karbonátosodás sebessége függ a relatív páratartalomtól, a legnagyobb érték ~50 RH% mellett mérhető (Neville, 1995). A beton karbonátosodási mélységének növekedése az idő függvényében közelíthető a Fick diffúziós törvényen alapuló modellek segítségével. A paraméterelemzéshez Papadakis et al (1992) modelljét választottam, amelynek általános alakja a következő:

$$x_c = \psi 0,35 \rho_c \frac{v/c - 0,30}{1 + \frac{\rho_c}{1000} v/c} f(\text{RH}) \cdot \left( \left( 1 + \frac{\rho_c}{1000} v/c + \frac{\rho_c}{\rho_a} a/c \right) C_{\text{CO}_2} \frac{23,8}{44} 10^{-6} t \right)^{0,50} \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

A (9) egyenletben az  $f(\text{RH})$  paramétert Matoušek (1977) eredményei alapján vehetjük fel. Ha feltételezzük, hogy  $f(65\% \text{ RH}) = 0,45$ ,  $C_{\text{CO}_2} = 800 \text{ mg/m}^3$ ,  $\rho_c = 3150 \text{ kg/m}^3$  és  $\rho_a = 2650 \text{ kg/m}^3$ , akkor a (9) egyenlet a következő alakra egyszerűsíthető és rendezhető át:

$$x_c = (0,50 \cdot (v/c) - 0,14) \cdot \sqrt{t} \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

A (10) egyenlet alkalmazhatóságának korlátai  $0,35 < v/c < 0,65$  and  $4,50 < a/c < 6,50$ . Ez azt jelenti, hogy a cementtartalmat  $c = 290 \text{ kg/m}^3$  és  $420 \text{ kg/m}^3$  közé tételezzük föl. Más relatív páratartalmak ( $\text{RH} \neq 65\%$ ) és CO<sub>2</sub> koncentrációk esetére a (9) egyenlet használható.

A felületi keménységet jelentősen megnövelheti a karbonátosodás (Kim et al, 2009). Ezért a karbonátosodás hatását számításba kell venni a Schmidt-kalapácsos vizsgálatok értékelésénél. A paraméterelemzéshez a kínai JGJ/T23-2001 szabvány ajánlását választottam a karbonátosodási mélység visszapattnási értékre gyakorolt hatásának figyelembevételére (JGJ, 2001):

$$R(t)/R_{28} = \frac{1}{1 - 0,067 \cdot x_c^{1,0}} \quad (11)$$

A (11) egyenlet alkalmazhatóságának korlátja  $x_c < 6,0 \text{ mm}$ .

A paraméterelemzés egyik jellegzetes eredményét figyelhetjük meg a 12.b ábrán öt különböző víz-cement tényezőre. Példaképpen a görbesereg egy pontja (a 12.b ábrán szaggatott vonallal jelölve) a következő számítási lépésekből adódik. A kiindulási érték  $v/c = 0,50$  víz-cement tényezőhöz és  $t = 180$  napos korhoz tartozik.

A (6) – (11) egyenleteket alkotó formulák segítségével számíthatók az alábbi numerikus adatok:

- (6) egyenletből:  $f_{c,28} = 406 \cdot \exp(-3,30 \cdot 0,50^{0,63}) = 48,13 \text{ N/mm}^2$
- (7) egyenletből:  $f_c(180) = 48,13 \cdot \exp(0,25 \cdot (1 - (28/180)^{0,50})) = 56,0 \text{ N/mm}^2$
- (8) egyenletből:  $R_{28} = 5,96 \cdot 48,13^{0,512} = 43,35$
- (10) egyenletből:  $x_c(180) = (0,50 \cdot 0,50 - 0,14) \cdot \sqrt{180} = 1,48 \text{ mm}$
- (11) egyenletből:  $R(180) = 43,35 / (1 - 0,067 \cdot 1,48) = 48,11$

Megállapítható, hogy a modell realiztikusan ábrázolja a beton visszapattnási keménységének időbeli alakulását. Egyértelműen megfigyelhető, hogy nem lenne elfogadható, ha az adatpontokat egy populációba tartoznának tekintenénk, viszont a paraméterek megfelelő kiválasztásával egy átlátható és megbízható görbesereg generálható, amely követi a valós viselkedést.



### 5.2.3 Az ellenőrző laboratóriumi vizsgálatok eredménye

A modell ellenőrzését célzó kísérleti program a modell részletes ellenőrzését tette lehetővé széles nyomószilárdsági tartományban, számos eltérő vizsgálati korú betonon.

Jellegzetes vizsgálati eredményeket mutatok be a 13. ábrán CEM I 42.5 N típusú cementtel készült beton próbatestek esetére. A következő megfigyelések tehetők:

1) Egy látszólag egységes adatpopulációt kapunk eredményül, ha a grafikus megjelenítésben nem választjuk szét az adatokat a beton víz-cement tényezője és vizsgálati kora szerint (13.a ábra). Az eredmények teljesen félrevezető trendjét állapíthatjuk meg és a regressziós analízis eredményeként egy látszólagos hatvány- vagy exponenciális függvényt kaphatunk (általában meglehetősen jó korrelációs együtthatóval, amely a félrevezető elemzés helyességének látszatát kelti). A 13.a ábrán 108 próbatest 54 átlag-adatpontja látható (amely magában foglal 9 különböző víz-cement tényezőt és 6 különböző vizsgálati kort). Az ábrán feltüntettem egy regressziós függvény korrelációs együtthatóját is, amelynek értéke erre a félrevezető összefüggésre  $r^2 = 0.84$ .

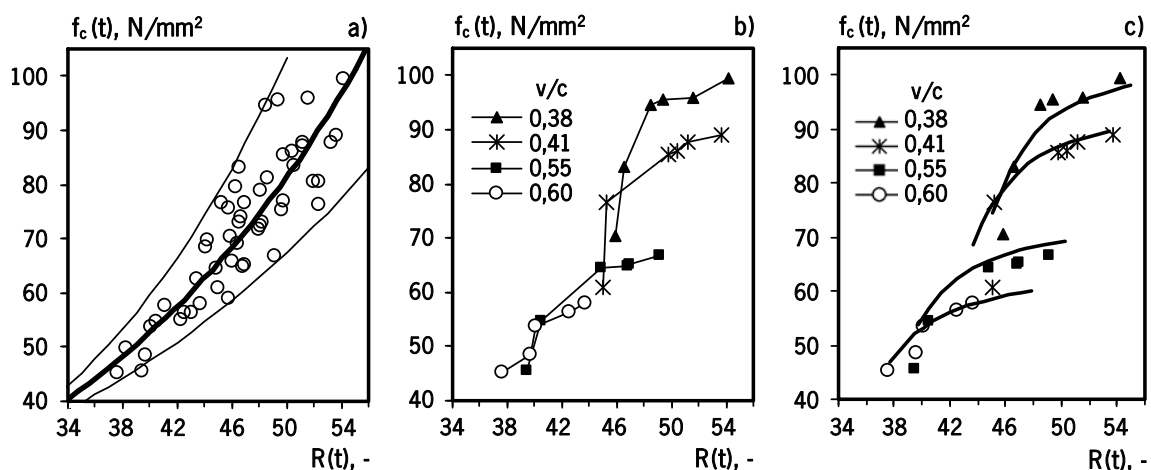
2) Ha a visszapattanási érték – nyomószilárdság adatpárokat nem választjuk szét víz-cement tényező és vizsgálati kor szerint, akkor a grafikus ábrázolásban az adatok heteroszkedasztikus viselkedése is megmutatkozik (13.a ábra). A 13.a ábrán megfigyelhető, hogy az alsó és a felső határgörbék közötti távolság nő a visszapattanási érték növekedésével, azaz a szilárdság szórása növekszik a visszapattanási érték növekedésével.

3) A valódi viselkedés csak akkor tűnik elő, ha a visszapattanási érték – nyomószilárdság adatpárokat víz-cement tényező szerint szétválasztjuk (13.b ábra). A jobb szemléltethetőség céljából a 13.b ábrán csak 4 görbét ábrázoltam a 9 vizsgált víz-cement tényezőhöz tartozókból. Megállapítható, hogy a korábban látszólag egységes adatpopuláció különböző víz-cement tényezőkhöz tartozó monoton növekvő függvényekké válik szét.

4) A valós viselkedés láthatóvá válása után megfigyelhető, hogy a visszapattanási érték – nyomószilárdság kapcsolat érzékeny (de nem egységesen) az alkalmazott víz-cement tényezőre (13.b ábra). Az anyagválaszt jelentő függvények kezdeti meredeksége és irányultsága megmutatja a különböző víz-cement tényezőjű betonok kapilláris pórus mennyiségének különböző hatását a szilárdság- és karbonátosodási mélység időbeli fejlődésére. Feltételezhető, hogy a megfigyelt jelenségek teljes magyarázata a betonok víz-cement tényezőtől függő szilárdság- és karbonátosodási mélység időbeli fejlődésében keresendő.

A verifikáló kísérlet eredménye alátámasztja azt a feltételezést, hogy a visszapattanási érték legjelentősebb befolyásoló tényezői a beton víz-cement tényezője és vizsgálati kora, valamint a cement típusa. A többi paraméternek sokkal kevésbé markáns a hatása, ahogy ezt feltételeztem is.

5) A modell jól alkalmazható a visszapattanási érték – nyomószilárdság kísérleti eredményekkel történő összehasonlításra (13.c ábra). A modell empirikus paramétereinek megfelelő illesztésével bármely kísérleti eredmény elfogadhatóan reprodukálható numerikusan. A részletes verifikáló vizsgálat igazolta a modell alkalmazhatóságát CEM I 42.5 N, CEM III/B 32.5 N típusú cementekre, széles víz-cement tényező tartományra és vizsgálati kor tartományra.



13. ábra: A modell laboratóriumi kísérleti verifikálásának eredménye (csak CEM I 42.5 N cementtel készített betonok); a) adatpontok egy populációként ábrázolva, b) adatpontok víz-cement tényező szerint rendezve/csoportosítva, c) csoportosított adatok együttesen ábrázolva a paraméter illesztéssel pontosított modellel.

### 5.3 A CÉLIRÁNYOS KÍSÉRLETEK EREDMÉNYEI

A statikus szűrőkeménység vizsgálatok közben kialakuló képlékeny alakváltozás a duktilis anyagokkal hozható összefüggésbe (pl. fémek). Rideg anyagok (pl. beton) általában rugalmas viselkedést mutatnak, és a nagy deformációk során nem képlékeny alakváltozás (megfolyás), hanem törés következik be. A rideg anyagokban kvázi-képlékeny alakváltozás figyelhető meg a mérőtest érintkezési pontja alatt, azonban ez a tömörödés eredménye, amely során az anyag fázisátalakuláson megy keresztül a mérőtest alatt, a gátolt alakváltozási mezőben kialakuló nagy nyomófeszültségek következtében (Swain, Hagan, 1976). A kvázi-képlékeny anyagválasz jelentősen eltér a fémek képlékeny alakváltozásától (Tabor, 1951).

A dinamikus keménységvizsgálatok során a beton lágyulási jellege miatt a nemrugalmas tulajdonságok éppolyan fontosak lehetnek, mint a rugalmas tulajdonságok.

A visszapattanási érték a kalapács ütőtömegének részben rugalmas ütközéséből, az ütközéssel közölt energiának a beton lokális morzsolódása és belső súrlódása következtében bekövetkező disszipálódásából, valamint az ütés által gerjesztett mechanikai hullámok terjedéséből és visszaverődéseiből alakul ki. Az ütés, illetve visszapattanás során elnyelődő energia egy része a készüléken belül, az ütőtömeg mozgása közben súrlódással vesz el, más része a beton és a készülék ütőszondájának érintkezési felületén keresztül, az ütés pillanatában a betonban nyelődik el.

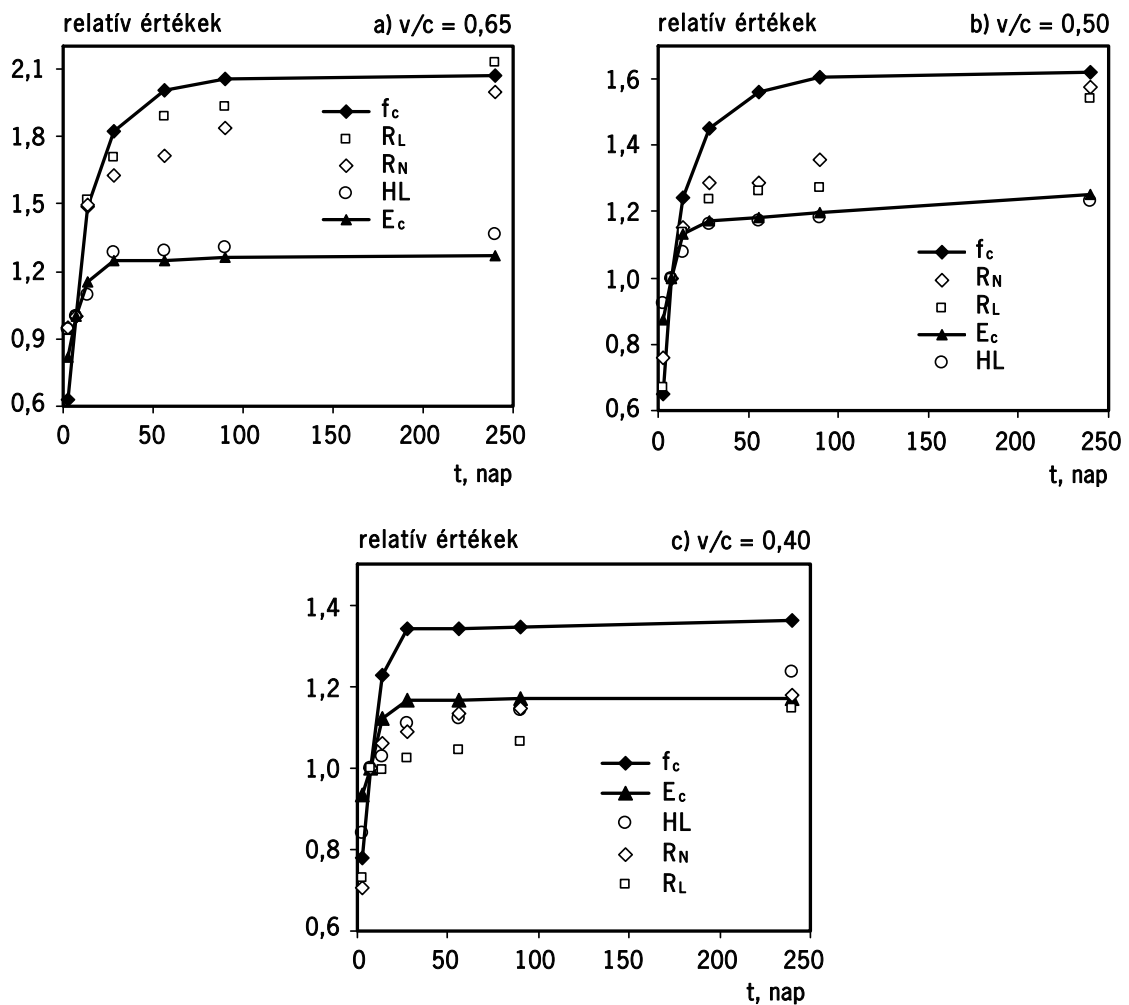
**H3.1 hipotézis:** Időben változó mechanikai jellemzők (nyomószilárdság és rugalmassági modulus), ill. a felületi keménység egy adott korra vonatkoztatott relatív értékeinek az idő függvényében megjelenített összehasonlítása elősegítheti a keménység és valamely mechanikai jellemző közötti kapcsolat feltárását. A rugalmas visszapattanás elvén működő keménységvizsgáló eszközök mérőszámai feltételezhetően érzékenyek a vizsgált beton szilárdsága mellett annak merevségére és a vizsgáló eszköz által kifejtett ütési energiára is.

**T3.1 tézis** [2, 4, 7]: Laboratóriumi kísérletekkel igazoltam, hogy a vizsgálat során befektetett energia mennyisége a keménységi jellemzőn keresztül meghatározza a keménységgel összefüggésbe hozható anyagjellemzőt. A visszapattanási keménységet mérő eszközök mérőszámai nem csak a beton szilárdságára, hanem merevségére is érzékenyek, és befolyásolja őket az eszköz ütési energiája. Kis energia elnyelődést eredményező vizsgálat során (pl. Leeb-készülékkel bármely betonon, vagy Schmidt-kalapácsokkal kis víz-cement tényezőjű betonon) a keménységi mérőszám inkább a rugalmassági modulussal hozható kapcsolatba (az alakváltozás nagyobb hányada inkább rugalmas), a nyomószilárdsággal azonban nem. Nagy energia elnyelődést eredményező vizsgálat során (pl. Schmidt-kalapácsokkal nagy víz-cement tényezőjű betonon) a keménységi mérőszám inkább a nyomószilárdsággal hozható kapcsolatba (a vizsgálat közben az alakváltozási energia nagyobb hányada nyelődik el), a rugalmassági modulussal azonban nem.

A laboratóriumi kísérletek alapján megállapítható, hogy az L- és az N-típusú Schmidt-kalapács visszapattanási értékeinek 7 napos korra vonatkoztatott relatív értékei nagy víz-cement tényező esetén ( $v/c = 0,65$ ) a nyomószilárdság relatív értékeinek tendenciáját követik, kis víz-cement tényező esetén ( $v/c = 0,40$ ) pedig a rugalmassági modulus relatív értékeinek tendenciáját követik, függetlenül a vizsgálati kortól. Köztes víz-cement tényező esetén ( $v/c = 0,50$ ) e két, szélsőséges viselkedés közötti átmenet figyelhető meg.

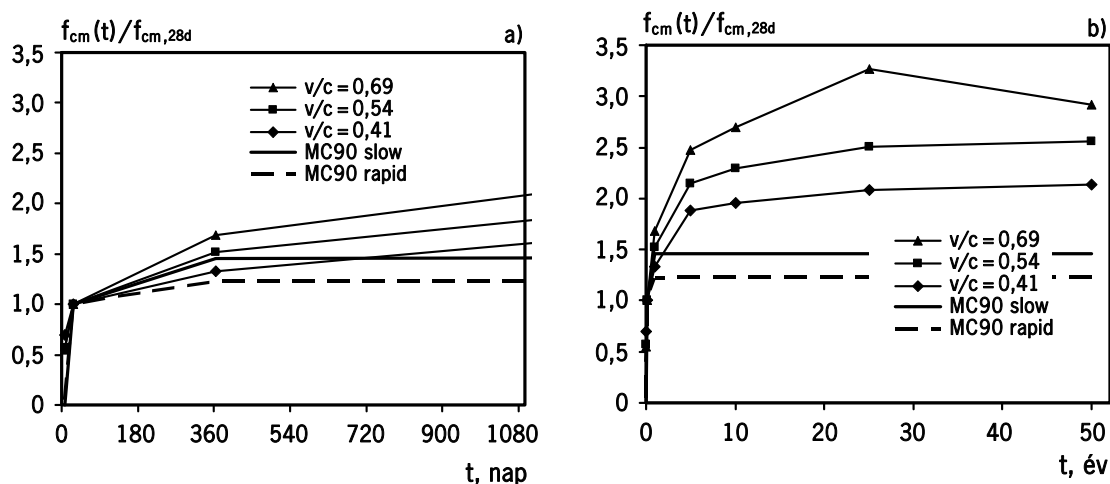
A Schmidt-kalapácsokéhoz képest számottevően kisebb ütési energiát kifejtő Leeb szkleroszkóppal végzett keménységvizsgálat közben a beton rugalmas tulajdonságai dominálnak. A Leeb-keménység mérőszámainak 7 napos korra vonatkoztatott relatív értékei gyakorlatilag megegyeznek a rugalmassági modulus relatív értékeivel a vizsgált víz-cement tényező teljes tartományában ( $v/c = 0,40 - 0,65$ ), függetlenül a vizsgálati kortól. (14. ábra).

A szakirodalomban a beton nyomószilárdsága 28 napos korra vonatkoztatott relatív értékeinek időbeli fejlődését befolyásolja az alkalmazott cement típusa (pl. CEB, 1993), azonban a víz-cement tényező esetleges hatását általában nem elemzik. A CEB-FIP Model Code 1990 javaslata csak a cement típusának (gyors és lassú szilárdulású) hatását veszi figyelembe. Szakirodalmi és saját kísérleti eredmények feldolgozása során megállapítottam, hogy rövid távú kísérletek által szolgáltatott eredmények esetében nem mutatható ki egyértelműen a víz-cement tényező hatása.



14. ábra: A vizsgált anyagjellemzők 7 napos korra vonatkoztatott relatív értékei az idő és a víz-cement tényező ( $v/c = 0,40; 0,50; 0,65$ ) függvényében.

**H3.2 hipotézis:** Szakirodalmi eredmények feldolgozását követően megállapítottam, hogy betonok nyomószilárdság fejlődésének hosszú távú (20-50 éves időtartamú) vizsgálataival (pl. Washa, Wendt, 1975; Wood, 1991) az alkalmazott cement típusán kívül, a víz-cement tényező beton relatív nyomószilárdságának időbeli fejlődésére gyakorolt hatása is kimutatható. Feltételezhető, hogy a beton relatív felületi keménységének időbeli fejlődése is függ a víz-cement tényezőtől. (16. ábra).



16. ábra: A beton relatív nyomószilárdsága (28 napos korra vonatkoztatva) az idő függvényében (Washa, Wendt, 1975) szerint; a) rövid távú ábrázolási mód, b) hosszú távú ábrázolási mód.

**T3.2 tézis** [2, 4, 7]: Laboratóriumi vizsgálatok eredményei alapján igazoltam, hogy a keménységi mérőszámok (visszapattanási érték L- és N-típusú Schmidt-kalapáccsal mérve) 28 napos korra vonatkoztatott relatív értékei függenek a víz-cement tényezőtől (17. ábra). A hatás a beton korának növekedésével markánsabbá válik, különösen nagy víz-cement tényezők esetében.

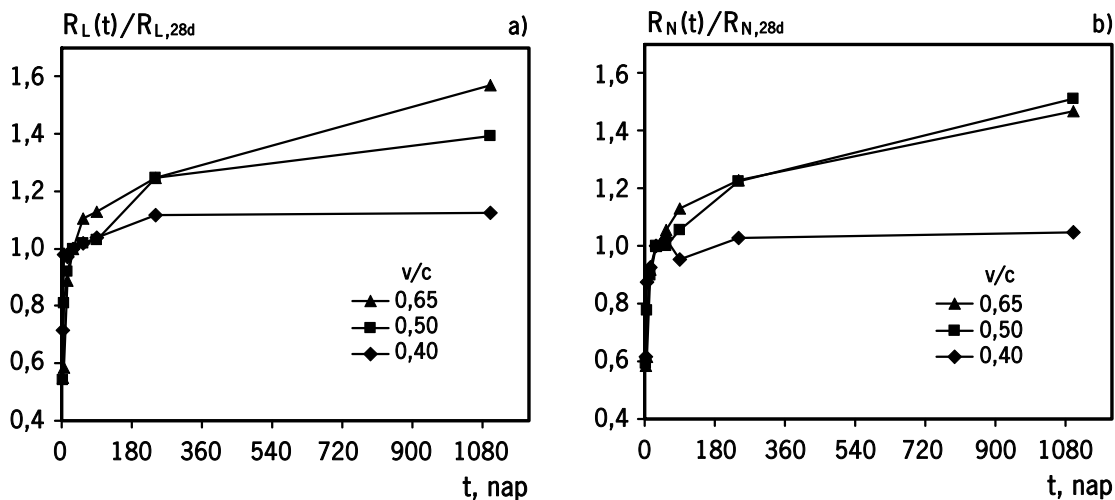


Fig 17. A víz-cement tényező hatása a relatív visszapattanási érték időbeli fejlődésére, a) L jelű Schmidt kalapács, b) N jelű Schmidt-kalapács.

## 6. A KUTATÁS ELMÉLETI ÉS GYAKORLATI HASZNA

A jelenleg hatályos nemzetközi és európai szabványok nem javasolják a Schmidt-kalapács önmagában történő használatát szilárdságbecslés céljára. Az EN 13791 koncepciója megalapozottnak tekinthető, mivel a roncsolásmentes módszerrel meghatározott közvetett szilárdságjellemzőt nagyszámú tényező befolyásolja, ezért a szerkezeti beton nyomószilárdsága akkor becsülhető a legnagyobb megbízhatósággal, ha a szabvány javaslatát követjük (azaz kifúrt magminták egyidejű nyomószilárdság vizsgálata történik). Azonban meg kell jegyeznünk, hogy ezzel kizárjuk azoknak a szerkezeteknek a vizsgálatát, amelyekből nem lehetséges legalább 9 darab magmintát kifúrni. Ez a viszonylag nagy mintaszám korlátozza a Schmidt-kalapácsos vizsgálat gyakorlati alkalmazhatóságát.

Jelen PhD kutatás igyekezett néhány lépést tenni a beton visszapattanási keménységének pontosabb megértése felé.

- Kijelenthető, hogy van kapcsolat a visszapattanási érték és a nyomószilárdság között, azonban nem létezik egy általános egyváltozós összefüggés a két anyagjellemző között. A bevezetett, hidratációs fok által vezérelt görbeseregbről álló fenomenológiai működési modell képes jól leírni a kapcsolatot. A modell átláthatósága ígéretes továbbfejlesztési lehetőséget kínál, azonban már jelen formájában is hiánypótlónak tekinthető a módszer elmúlt 60 éves történetében. A modell grafikus ábrázolásában a görbesereget alkotó görbék alakja és változó meredeksége magyarázat lehet a szakirodalomban található számos javaslat jelentős eltérésére is.
- A visszapattanási érték statisztikai jellemzőinek tendenciája hasonló a nyomószilárdság statisztikai jellemzőinek tendenciájához. Ez a megfigyelés további igazolása lehet annak a feltételezésnek, hogy a két anyagjellemző között van kapcsolat. A statisztikai elemzések eredményei alapján pontosíthatók a szabványokban szereplő precizitási feltételek.
- A visszapattanási érték relatív értékeinek időbeli fejlődése esetenként hasonló a szilárdsághoz, azonban a felhasználóknak tisztában kell lenni azzal, hogy a nagyszilárdságú betonok vizsgálata esetén a visszapattanási érték inkább az anyag rugalmassági modulusával hozható összefüggésbe, és idős betonok esetén a rugalmassági modulusból nem tudjuk megbecsülni a nyomószilárdságot.

Az eredmények nemzetközi referált folyóiratokban is megjelentek, mely közlemények egyike független hivatkozásokat kapott. A dolgozat szerzőjét Prof. Denys Breyse a RILEM ISC (Non destructive in situ strength assessment of concrete) munkabizottság elnöke 2012-ben a bizottság tagságába invitálta, és a kifejlesztett modell alapján gyümölcsöző jövőbeli együttműködést prognosztizált.

---

## 7. KITEKINTÉS ÉS JÖVŐBENI FELADATOK

A felépített fenomenológiai modell elméleti feltételezéseit a verifikáló laboratóriumi kísérletek igazolták. Azonban további vizsgálatok szükségesek a modell gyakorlati alkalmazhatóságának megerősítéséhez. A modell jelen formájában világos és átlátható magyarázatot nyújt a beton felületi keménységének leírására. A megfigyelések arra engednek következtetni, hogy a modell felépítése lehetővé teszi a modell kiterjesztését 180 napnál idősebb betonok keménységére. Megállapítható, hogy a modell előrejelzése jóval pontosabb, mint amilyen pontosnak tekinthetők az eddigi egyváltozós regressziós elemzések eredményei. Másrészt viszont a modell empirikus paramétereinek száma kihívó paraméterillesztési feladatokat elvégzését jelöli ki az esetleges gyakorlati alkalmazás előtt. A modellt generáló alap-függvények jellegzetes alakját tisztázni kell és a gyakorlati alkalmazás korlátait meg kell határozni. Hangsúlyozható azonban, hogy a modell kifejlesztésének elsődleges célja az volt, hogy a beton visszapatpanási keménységét pontosabban megértsük és magyarázatot találjunk az elmúlt 60 év kísérleti eredményeire, amely sikeresen megtörtént. A szerző további fejlesztési lehetőségeken dolgozik, és reméli a modell sikeres gyakorlati alkalmazását.

A jövőbeni kutatás további célja a modell megbízhatósági eljárás irányába történő kiterjesztése valószínűségi változók felhasználásával, hogy a modell még megfelelőbb legyen napjaink gyakorlata számára.

## 8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen PhD kutatás a TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002 program által támogatott "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" c. projekt, a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 program által támogatott "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" c. projekt, valamint a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## 9. KÖZLEMÉNYEK A KUTATÁS TÉMAKÖRÉBEN

- [1] Szilágyi K. – Borosnyói A. – Gyurkó Z. (2013) „Static hardness testing of porous building materials”, *Építőanyag (Journal of Ceramics and Composite Materials)*, Vol. 65:(1-2), 2013. ISSN 0013-970x (*megjelenésre elfogadva*)
- [2] Szilágyi K. – Borosnyói A. – Zsigovics I. (2013) „Understanding the rebound surface hardness of concrete”, *Journal of Civil Engineering and Management*, IF: 2,171 (*megjelenés alatt*)
- [3] Szilágyi, K. – Borosnyói A. – Zsigovics I. (2013) „Variability of concrete surface hardness measurement parameters”, *Concrete Structures*, Vol. 14, 2013, pp. 24-30. HU ISSN 2062 7904
- [4] Szilágyi K. (2012) „Hardness studies on porous solids”, *Conference of Junior Researchers in Civil Engineering*, Budapest, 2012.06.19-2012.06.20, pp. 240-247.
- [5] Szilágyi K. – Borosnyói A. – Gyurkó Z. (2012) „Kőszerű anyagok statikus keménységvizsgálata”, *Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Konferencia 2011*, Budapest, 2012.01.26, pp. 297-312.
- [6] Szilágyi K. – Borosnyói A. – Zsigovics I. (2011) „Rebound surface hardness of concrete: Introduction of an empirical constitutive model”, *Construction and Building Materials*, Vol. 25:(5), May 2011, pp. 2480-2487. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.070, IF: 1,834
- [7] Szilágyi, K. – Borosnyói A. – Zsigovics I. (2011) „Surface hardness and related properties of concrete”, *Concrete Structures*, Vol. 12, 2010, pp. 51-57, ISSN 2062 7904

- 
- [8] Szilágyi, K. – Borosnyói A. – Dobó K. (2011) „Static indentation hardness testing of concrete: a long established method revived”, *Építőanyag*, Vol. 63:(1-2), 2011, pp. 2-8, ISSN 00 13-970x
- [9] Szilágyi, K. – Borosnyói A. – Zsigovics I. (2010) „Introduction of a constitutive model for the rebound surface hardness of concrete”, *Concrete Structures*, Vol. 11, 2010, pp. 46-52, ISSN 1419 6441
- [10] Borosnyói A. – Szilágyi K. (2010) „A hazai Schmidt-kalapácsos betonvizsgálási szabályozásról”, *Beton*, Vol. 18:(1), 2010/1, pp. 14-16, ISSN 1218 4837
- [11] Szilágyi, K. – Borosnyói A. (2009) „50 years of experience with the Schmidt rebound hammer”, *Concrete Structures*, Vol. 10, 2009, pp. 46-56, ISSN 1419 6441
- [12] Szilágyi K. – Borosnyói A. (2008) „A Schmidt-kalapács 50 éve: Múlt, jelen, jövő. 1. rész: Módszerek és szakirodalmi összefoglalás”, *Vasbetonépítés*, Vol. 10:(1), 2008/1, pp. 10-17, ISSN 1419 6441
- [13] Szilágyi K. – Borosnyói A. (2008) „A Schmidt-kalapács 50 éve: Múlt, jelen, jövő. 2. rész: Az európai szabványosítás és annak hazai jelentősége”, *Vasbetonépítés*, Vol. 10:(2), 2008/2, pp. 48-54, ISSN 1419 6441
- [14] Szilágyi K. – Borosnyói A. (2008) „A Schmidt-kalapács 50 éve: Múlt, jelen, jövő. 3. rész: Tudományos megfontolások és kitekintés”, *Vasbetonépítés*, Vol. 10:(3), 2008/3, pp. 73-82, ISSN 1419 6441
- [15] Szilágyi K. (2008) „Beton roncsolásmentes szilárdságvizsgálata”, BME Építőmérnöki PhD Szimpózium, Budapest, 2008.11.28.

## 10. IRODALOMJEGYZÉK

- ACI (1989) „Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures”, ACI 228.2R-89, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan
- ACI (2003) “In-Place Methods to Estimate Concrete Strength”, ACI 228.1R-03, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan
- Anderson A. R, Bloem D. L, Howard, E. L, Klieger P, Schlitz H. (1955) „Discussion of a paper by Greene G. W: Test Hammer Provides New Method of Evaluating Hardened Concrete”, *Journal of the American Concrete Institute*, December 1955, Vol. 27, No. 4, Part 2 (Disc. 51-11), pp. 256-1...256-20.
- ASTM C 670 – 08 (2003) "Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials", ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia
- ASTM C 805/C 805M – 08 (2008) "Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete", ASTM International, West Conshohocken, Philadelphia
- Barba A. A. (1640) „Arte de los metales”, Reprint, Lima, 1817.
- Borján J. (1981) „Roncsolásmentes betonvizsgálatok”, Műszaki Könyvkiadó, 204 p.
- CEB (1993) „CEB-FIP Model Code 1990 – Design Code”, Comité Euro-International du Béton, *Thomas Telford*, London, 1993 (CEB Bulletin d'Information No. 213/214.)
- Bungey J. H, Millard J. H, Grantham M. G. (2006) „Testing of Concrete in Structures”, Taylor and Francis, New York, 352 p.
- Einbeck C. (1944) „Einfaches Verfahren zur Feststellung der Betongüte im Bauwerk”, *Bauwelt*, Vol. 35, 1944, p. 131.
- EN 12390-3 (2009) „Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens”, European Standard
- EN 13791 (2007) „Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components”, European Standard
- fib Bulletin 3 (1999) “Structural Concrete – Textbook on Behaviour, Design and Performance”, Vol. 3, *fédération internationale du béton (fib)*, December 1999, pp. 247-248.
- Gaede K. (1934) „Ein neues Verfahren zur Festigkeitsprüfung des Betons im Bauwerk“, *Bauingenieur*, 1934/15, Vol. 35-36, pp. 356-357.
- Gaede K, Schmidt E. (1964) „Rückprallprüfung von Beton mit dichtem Gefüge”, Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 158, p. 37.

- 
- Hertz H. (1881) „Über die Berührung fester elastischer Körper“, *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1881/5, p. 12-23.
- Herzig E. (1951) „Versuche mit dem neuen Beton-Prüfhammer an der Abteilung für Beton und Eisenbeton der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, Zürich“, *Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik*, V. 17, Mai 1951, pp. 144-146.
- ISO 6784 (1982) „Concrete - Determination of static modulus of elasticity in compression“, International Organization for Standardization
- Kausay T. (2013) „Beton – A betonszabvány néhány fejezetének értelmezése“, Magyar Mérnöki Kamara Nonprofit Kft, Budapest, 2013.
- Kim J-K, Kim C-Y, Yi S-T, Lee Y. (2009) „Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete“, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 31, No. 2, pp. 139-144.
- Kolek J. (1958) „An Appreciation of the Schmidt Rebound Hammer“, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 10, No. 28, March 1958, pp. 27-36.
- Matoušek M. (1977) „Působení vybraných atmospherických činitelů na stavební konstrukce“, PhD Thesis, Technical University of Brno, Czech Republic, 1977.
- Mindess S, Young J. F. (1981) „Concrete“, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 671 p.
- Mohs F. (1812) „Versuch einer Elementar-Methode zur Naturhistorischen Bestimmung und Erkennung von Fossilien“, *Österreich Lexikon*
- Neville A. M. (1995) „Properties of Concrete“, Prentice Hall, Essex, 844 p.
- Papadakis V. G, Fardis M. N, Vayenas C. G. (1992) "Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation", *Materials and Structures*, Vol. 25, No. 5, pp. 293-304.
- Proceq SA (2003) „Concrete Test Hammer ORIGINAL SCHMIDT N/NR and L/LR – Addition to the Operation Manual“, Info sheet
- Rational (1930) "Durosokop Härteprüfer", Berlin Wilmersdorf: Rational GmbH, 2 p.
- Réaumur R. A. F. (1722) „L'art de convertir le fer forgé en acier“, *French Academy of Sciences*, Paris, 1722.
- Schmidt E. (1950) „Der Beton-Prüfhammer“, *Schweizerische Bauzeitung*, 15. Juli 1950, 68. Jahrgang, Nr. 28, pp. 378-379.
- Shimizu Y, Hirokawa M, Zhou J. (2000) "Statistical analysis of concrete strength in existing reinforced concrete buildings in Japan", *Proceedings 12WCEE 2000: 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, January 30 – February 4, 2000, Auckland, New Zealand, No. 1499, pp. 1-8.
- Swain M.V, Hagan J.T. (1976) „Indentation plasticity and the ensuing fracture of glass“, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 9, 1976, pp. 2201-2214.
- JGJ/T23-2001 The People's Republic of China industry standard. Technical Specification for Inspection of Concrete Compressive Strength by Rebound Method. Approved by the People's Republic of China Ministry of Construction, 1 October 2001. p. 32. (in Chinese)
- Tabor D. (1951) „The hardness of metals“, *Oxford University Press*, 1951, 175 p.
- Tanigawa Y, Baba K, Mori H. (1984) „In Situ Tests: Estimation of concrete strength by combined non-destructive testing method“, *ACI Publication SP-82 In Situ/Nondestructive Testing of Concrete*, Malhotra, V. M. (Editor), American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1984, pp. 57-76.
- Timoshenko S. P. (1951) „History of strength of materials“, McGraw-Hill, New York, 1951, 452 p.
- Ujhelyi J, Popovics S. (2006) „A betonszilárdság és a víz-cement tényező közötti összefüggés megbízhatóságának javítása“, *Vasbetonépítés*, VIII. évf, 1. sz, pp. 2-9.
- Ujhelyi J. (2005) „Betonismeretek“, *Műegyetemi Kiadó*, 346 p.
- Washa G. W, Wendt K. F. (1975) "Fifty Year Properties of Concrete", *ACI Journal*, Vol. 72, No. 1, pp. 20-28.
- Williams J. F. (1936) „A Method for the Estimation of Compressive Strength of Concrete in the Field“, *The Structural Engineer (London)*, Vol. 14, No. 7, July 1936, pp. 321-326.
- Wood S. L. (1991) „Evaluation of long-term properties of concrete“, *ACI Materials Journal* 88-M65, pp. 630-642.