

**Pécsi Tudományegyetem  
Műszaki és Informatikai Kar  
Breuer Marcell Doktori Iskola**



**Történeti épületek falazatainak  
állapotértékelése**

**Szilárdság értékelés roncsolásmentes  
diagnosztikai módszerek felhasználásával**

Tézisfüzet

Szerző:

**Dormány András**  
tanársegéd

Témavezető:

**Dr. Orbán Zoltán**  
egyetemi docens

Pécs, 2023

## Bevezetés

A történeti falazott szerkezetek tartószerkezetének erőtani vizsgálata komoly nehézséget jelent az építőmérnökök számára a számítások elvégzéséhez szükséges paraméterek nagy bizonytalansága miatt. Ellentétben egy új építésű szerkezettel, az építéskori tervek jellemzően nem állnak rendelkezésre a vizsgálatokat megelőzően, pedig az eredeti tervdokumentáció ismerete rendkívül hasznos információval szolgáltatna az épület szerkezeti kialakításáról, építéstechnológiájáról és anyaghasználatáról. Ezen ismereteket nem lehet pusztán irodalomkutatás alapján pótolni, hiszen a falazott szerkezetek kialakítása rendkívül változatos lehet (pl. tömör vagy üreges, egy- vagy több rétegű, illetve anyagát tekintve téгла, kő vagy egyes falazat), a falazat építőanyagainak jellemzői jelentősen eltérhetnek egymástól még az adott falazaton belül is, illetve a falazóelemek használatos mérete is folyamatosan változott az elmúlt történelmi időszakok alatt. A történeti épületek teherhordó falazatai általában helyi alapanyagok felhasználásával készültek, emiatt eltérő anyaghasználat fordulhatott elő régióként (kőben gazdag térségben kőből, míg kőszegény térségekben általában téglából építkeztek), csak kiemelten fontos épületek esetén (pl. egyházi, kormányzati épületek és paloták) engedhették meg, hogy távolról szállított, jó minőségű építőanyagokat használjanak. A falazóelemek mellett a falazóhabarcsok tekintetében is hasonló eltérések tapasztalhatók az anyaghasználatban. Történeti falazatok esetében gyakori megoldás volt a vegyes falazat alkalmazása, amikor téгла és kősorok váltakozásával építkeztek, vagy a falazat magja és külső burkolata eltérő anyagokból készült. Ennek oka a jó minőségű építőanyag iránti igény és a korlátozott anyagi erőforrás kompromisszuma volt. Előfordult azonban hogy idő és/vagy pénz hiányában a falazat belsejében üreges tartományokat alakítottak ki, melyeket pl. építési törmelékkel, vagy jóval gyengébb minőségű anyagokkal töltöttek fel. Az ipari léptékű téglagyártás megjelenése után a

felhasznált falazóelemek jellemzői még hosszú évtizedekig igen változékonyak voltak, akár téglagyáranként is eltérő méretű és minőségű termékek készültek. Csak a szabványosítás elterjedése hozott e tekintetben pozitív változást. Az 1893-ban megjelent Részletes Építésügyi Szabályzat már megengedhető feszültségeket írt elő különböző falazatokra és 1894-ben rögzítve lett hazánkban a nagyméretű tömör téglák mérete, ezáltal a falazatok általános minősége is javult. Az erőtani elemzés szempontjából további nehézség, hogy a látható szerkezetek csak ritkán adnak támpontot a teherhordó szerkezet valós méreteit illetően, mivel jellemzően díszítések vagy vastag vakolat takarják. A történeti épületek a korukból fakadóan akár többször is funkcióváltáson eshettek át, ami miatt átépítési vagy bővítési munkákat hajtottak végre rajtuk. Az építési munkák során az aktuális korban alkalmazott építőanyagokat és technikákat használták, mely nehezíti az épület tényleges felépítésének megállapítását. Összességében elmondható, hogy a fent felsorolt tényezők miatt a történeti falazatok erőtani vizsgálatához szükséges tervezési paraméterek bizonytalansága általában igen nagy, ami szokványos állapotvizsgálati módszerekkel nehezen csökkenthető. Az utóbbi időben kidolgozott új roncsolásmentes diagnosztikai eljárások viszont új távlatokat nyitnak a falazatok ismeretlen jellemzőinek helyszínen történő megállapításához.

Történeti épületek esetén kifejezetten fontos azok történeti jellegének vagy építészeti értékének megőrzése. A helyszíni diagnosztikai vizsgálatok elvégzése során a roncsolással járó vizsgálati módszerek (pl. nagy átmérőjű fűrt magmintán történő vizsgálatok) emiatt nem, vagy csak korlátozott mértékben használhatók. A kis roncsolással járó vagy roncsolásmentes módszerek viszont alkalmasak lehetnek a szükséges tervezési paraméterek meghatározására (pl. falvastagság, fal szerkezeti felépítése, belső üregek mérete, falazatalakotók szilárdsági jellemzői), viszont megbízhatóságuk elmarad a roncsolásos

vizsgálatokétól, mert nem közvetlenül adnak információt a statikai elemzéshez szükséges paraméterekről.

Dolgozatomban felkutattam azokat a vizsgálati módszereket, amelyek alkalmasak lehetnek a történeti falazott szerkezetek mechanikai, geometriai és egyéb állapot jellemzőinek helyszíni vizsgálatára. Ezek között megtalálhatók a felületi keménység mérésén illetve penetrációs elven működő szilárdságvizsgálati módszerek, különböző geofizikai módszerek, valamint ezek kombinációján alapuló eljárások a nedvességmérésekkel kiegészítve. Az irodalomkutatásom eredményeként azt a következtetést vontam le, hogy a szerkezetben lévő nedvesség a szerkezeti károsodáson felül a vizsgálati módszer megbízhatóságát is befolyásolja, azonban az ezzel kapcsolatos ismeretek jelenleg még nem elég részletesek. További konklúzió, hogy egyes geofizikai (pl. a szónikus elven működő) vizsgálati módszerrel végzett, a falazat nyomószilárdságának megállapítására szolgáló eddigi kutatások szinte kizárólag modern falazatokon történtek, történeti falazatokról kevés ismeretanyag található ebben a témában. Ennek ismeretében kísérleti program végrehajtása mellett döntöttem, mely alapvető célja az előbb említett hiányos ismeretanyag bővítéséhez való hozzájárulás.

### **Kísérleti program célja és módszertana**

A kísérleti program keretében korabeli építőanyagok rekonstrukciójával és felhasználásával 1800-as években épült falazat imitálása történt. A vizsgálatok egyik fő célja a nedvesség hatásának vizsgálata falazott próbatestek és a falazatalkotók nyomószilárdságára, továbbá a roncsolásmentes diagnosztikai vizsgálatok megbízhatóságára. Ennek érdekében a próbatestek egyik felét „szobaszáraz”, másik felét telítettséig nedvesített állapotban vizsgáltam meg N típusú Schmidt kalapács, szónikus tomográf készülék és penetrációs elven

működő habarcs szilárdság vizsgáló készülék felhasználásával, roncsolásmentes módon. A több roncsolásmentes módszerrel végrehajtott szilárdsági mérések mellett a szabványban előírt roncsolásos módon is megállapítottam a próbatestek tényleges nyomószilárdságát. Az így nyert adatok elemzésével megállapítottam a nedvesség okozta nyomószilárdság csökkenés kimutatható mértékét az egyes vizsgálatokkal a „szobaszáraz” állapothoz képest, valamint a roncsolásmentes vizsgáló készülékek által mért jellemzőket összevettem a roncsolásos mérések eredményeivel.

A kísérleti program másik fő célja a szónikus vizsgálati módszer alkalmazhatóságának igazolása történeti falazatok esetén, továbbá a hanghullámok terjedési sebességét befolyásoló hatások és azok mértékének megállapítása, különböző falazat kialakítás és nedvességi állapot mellett. A falazatban lévő nedvesség hatásának elemzésén túl a fal terheléséből adódó nyomófeszültség és a hanghullámok fugán való áthatolásának hatása is a vizsgálatok tárgyát képezte. A szónikus vizsgálatok további célja az volt, hogy megállapítsuk a próbafalba épített rejtett anomáliák (pl. üregek) felderítésének megbízhatóságát. Ugyanezen vizsgálatokat georadarral is elvégeztem, így lehetőséget biztosítva a két módszer hatékonyságának összehasonlítására.

## Új tudományos eredmények bemutatása

### **I-es Téziscsoport: Nedvesség hatása a falazatalkotók nyomószilárdságára és a roncsolásmentes diagnosztikai módszerek megbízhatóságára (vonatkozó publikáció: 5, 13)**

Laboratóriumi roncsolásos és roncsolásmentes módszerekkel végrehajtott vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy a történeti téglá falazatok nedvességének növekedése jelentős mértékben csökkentheti a falazat jellemző nyomószilárdságát, növeli a szilárdság variabilitását, valamint a roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel kapott eredmények bizonytalanságát.

#### **Altézis 1**

A falazat nedvesség hatására bekövetkező szilárdságcsökkenése és annak eloszlása visszavezethető a falazatalkotók mért szilárdságcsökkenésére, amely az egyes összetevők esetében különböző mértékben jelentkezett. Ezzel kapcsolatos megállapításaim:

- Nagy méretű téglákon elvégzett szabványos nyomószilárdsági vizsgálatok eredményeként kimutattam, hogy a telítettségig nedvesített téglák nyomószilárdsága a „szobaszáraz” állapothoz képest közel 20%-kal csökkent, a nyomószilárdság relatív szórás pedig megduplázódott.
- A rekonstruált korabeli különböző habarcs keverékek esetén a szilárdság csökkenés eltérő volt különböző anyagi összetételek esetén: agyagos és bányahomokos habarcs esetén 15-19 %-os, míg kvarchomokos habarcsnál 42%-os szilárdságcsökkenést mutattam ki.

	<b>Száraz téglá</b> <b>[N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Nedves téglá</b> <b>[N/mm<sup>2</sup>]</b>
Átlagos nyomószilárdság	12,6	10,1
Relatív szórás	0,072	0,151

*9. táblázat: Téglá minták nyomószilárdsággal kapcsolatos jellemzői száraz és nedves állapotban*

## Altézis 2

A falazataalkotók nyomószilárdságának meghatározására irányuló roncsolásmentes vizsgálati módszerek kiértékelését követően megállapítottam, hogy a falazatok nedvességének növekedésével a mért eredmények változása a szilárdság csökkenéssel eltérő mértékű volt.

- A szónikus vizsgálat eredményeként a rekonstruált korabeli habarcsokban a hanghullám terjedési sebesség 10-20%-os növekedését mutattam ki, míg a korabeli tömör téglák esetén átlagosan 6,5% növekedést.
- A falazott próbatestek fekvőhézagain elvégzett penetrációs vizsgálat alapján megállapítottam, hogy a mért behatolás és a nedvességtartalom egyenes arányosságot mutat. A nedvesség okozta relatív szórás növekedés miatt a gyártó által ajánlott jelleggörbe nedves állapotú habarcs nyomószilárdságának megállapítására kevésbé alkalmas (száraz állapotban 0,05 N/mm<sup>2</sup> különbség volt a tényleges és prediktív érték között, míg nedves állapotban 0,07 N/mm<sup>2</sup>).
- A Schmidt kalapácsos vizsgálat eredményei alapján megállapítottam, hogy a visszapattanási értékek átlagosan 8,5%-os csökkenést mutattak nedvesítés hatására, miközben a falazott próbatestek szilárdság csökkenése a roncsolásos vizsgálatok alapján átlagosan 18,7% volt. A visszapattanások relatív szórásában nem volt jelentős különbség a száraz állapothoz képest.

	<b>Száraz próbatestek</b>	<b>Nedves próbatestek</b>
Átlagérték	32,6	29,8
Relatív szórás	0,119	0,116

14. táblázat A falazott próbatesteken elvégzett Schmidt kalapácsos vizsgálatok visszapattanási értékei

## **II-es Téziscsoport: Hanghullámok terjedési sebességét befolyásoló tényezők (vonatkozó publikáció: 14)**

Korabeli falazott szerkezethez hasonlóan kialakított, rekonstruált próbatesteken elvégzett szónikus vizsgálat alapján megállapítottam, hogy a hanghullámok terjedési sebességét a nedvességtartalom, a nyomófeszültség és a fugán való áthatolás miatti közegváltás befolyásolja.

### **Altézis 1**

Nagy méretű tömör téгла és rekonstruált korabeli mészhabarcs próbatesteken mért hanghullám terjedési sebesség és szilárdság kapcsolat fordított arányosságot mutat a nedvességtartalom függvényében. A falazatalkotók külön-külön történő szónikus vizsgálata során bebizonyítottam, hogy nem lehet a kellő megbízhatósággal elvégezni az eredmények kiértékelését a falazatalkotók nedvességtartalmának ismerete nélkül.

### **Altézis 2**

Megállapítottam, hogy az előterhelés okozta nyomófeszültség a hanghullámok terjedési sebességének növekedését okozta a terheletlen állapothoz képest a rekonstruált korabeli mészhabarcs próbatesteken.

- Előterhelés okozta nyomófeszültség a rekonstruált korabeli mészhabarcs mintákban a hanghullámok sebesség növekedését okozta. Habarcs fajtától függően száraz állapotban 28-44%-os növekedés történt, nedves állapotban 44-64%-os.

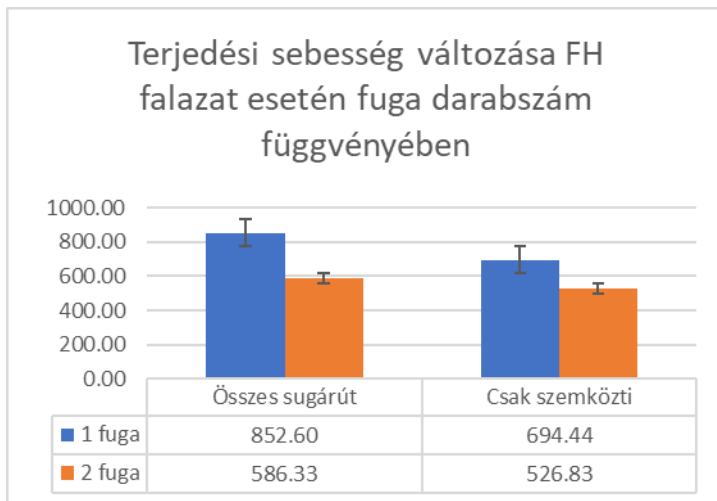
### **Altézis 3**

A falazott próbatesteken elvégzett szónikus vizsgálatok alapján bebizonyítottam, hogy a hanghullámok terjedési sebessége lecsökken minden egyes fugán való áthatoláskor a mészhabarcs és a falazóelem eltérő akusztikai jellemzői miatt.

- Kvarchomokos és bányahomokos mészhabarcsból készült falazatok esetén 23 és 24%, míg magas agyagtartalmú mészhabarcs alkalmazása esetén 9%-os



terjedési sebesség csökkenést lehetett megállapítani 1 db fugán történő áthaladás során. A csökkenés aránya a 4. elmetszett fugáig állandó.



37. ábra Terjedési sebesség változása 1 és 2 db fuga esetén FH habarcsból készült falazott próbatesten

### III-as Téziscsoport: szónikus vizsgálat kiértékelése falazott szerkezet esetén (vonatkozó publikáció: 14)

Bebizonyítottam, hogy falazott szerkezetek szónikus vizsgálatának kiértékelése során az egyes érzékelési pontok között mért szónikus sebesség adatok egyenkénti elemzése - és szükség esetén egyes mérési adatok figyelmen kívül hagyása - elengedhetetlen a falazatjellemzők és azok térbeli eloszlásának megbízható megállapításhoz.

#### Altézis 1

Bebizonyítottam, hogy P hullám érzékelésre kalibrált szónikus vizsgáló készülék esetén a mért sebesség adatok szűrése indokolt. A vizsgálatok alapján az egymással szemközt lévő

szenzorok sugárútjai adják a legmegbízhatóbb eredményeket, míg az egymás mellett lévő szenzorok esetén, a felület mentén mért sebesség értékek általában nem reálisak, így a kiértékelésnél ezeket az eredményeket javasolt kivenni az adatsorból.

- Az egymás mellett lévő szenzorok között 38%-kal alacsonyabb a sebesség értéket tapasztaltam korabeli tömör téglákon, valamint a rekonstruált mészhabarc mintákon 18-28%-os csökkenését mértem (habarcsfajtától függően) az egymással szemközt lévő szenzorokhoz képest.

<b>Adat szűrési mód</b>	<b>Száraz terheletlen minta [m/s]</b>
Összes sugárút	1563 (0,301)
Csak az egymással szemközti sugárutak	1839 (0,053)
Egymás melletti sugárutak kivételével	1850 (0,056)
Egymás melletti sugárutak	1132 (0,328)

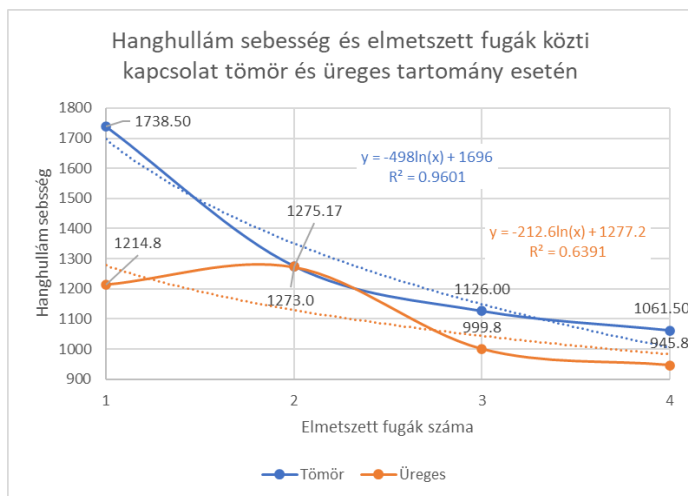
*8. táblázat Téglákon mért sebesség átlagértékek terheletlen és előterhelt, valamint száraz és nedves állapotban (zárójelben relatív szórás), táblázat részlete lett beszűrva*

## **Altézis 2**

Bebizonyítottam, hogy a standard tomográfiai képalkotás eredményeként hibás, a szerkezet valós kialakítását nem megfelelően mutató sebesség-eloszlási kép rajzolódhat ki többretegű falazott szerkezet közepén. A fellépő kiértékelési hiba miatt tévesen azt a következtetést lehet levonni, hogy üreges a szerkezet belseje. Az általam kidolgozott logaritmikus összefüggésen alapuló elemzési eljárással a fent említett

kiértékelési hiba kiküszöbölhető, így a valós szerkezeti kialakítás detektálási pontossága javítható.

- Amennyiben a mért hanghullám sebességek és az elmetszett fugák alapján felírt logaritmikus regressziós görbe magas korrelációs értéket mutat ( $R^2 > 0,95$ ) a keresztmetszet tömörsége igazolható.



60. ábra Hanghullám sebesség és elmetszett fugák közti kapcsolat tömör és üreges tartomány esetén

#### **IV-es Tézis: Roncsolásmentes diagnosztikai vizsgálatok ajánlott kombinálása. (vonatkozó publikációk: 2, 4, 6, 9)**

Laboratóriumi kísérletek eredményei alapján megállapítottam, hogy a Schmidt kalapácsos szilárdságvizsgálat, a penetrációs elven működő habarcs vizsgálat, valamint a georadaros és szónikus vizsgálatok önállóan nem adnak kellően megbízható eredményt a falazat szilárdsági és geometriai jellemzőire vonatkozóan, így ezen vizsgálatok kombinálása indokolt lehet az egyes vizsgálatokban rejlő bizonytalanság csökkentése érdekében.

- A felületi keménység és behatolás mérésen alapuló vizsgálatok egyszerű és gyors használatával nagy mennyiségben lehet vizsgálatokat végezni, így az eredmények statisztikai elemzésével nemcsak a szilárdsági jellemzők közelítő értéke határozható meg, hanem azok statisztikai eloszlása is. Ezen mérésekkel ugyanakkor csak a felület közeli jellemzők határozhatók meg, így nem nyújtanak információt a szerkezet belső (eltakart) részének állapotáról, sem annak kialakításáról.
- Georadaros vizsgálat viszonylag gyorsan elvégezhető és a helyszínen történő azonnali közelítő értékelés lehetőségét nyújtja. Megállapíthatók a tömör, illetve üreges tartományok (a mérési frekvencia függvényében) helyei és mérete, de az anyagjellemzők kvantitatív meghatározására általában nem alkalmas.
- A szónikus vizsgálat hasznos információt nyújthat a szerkezet struktúrális kialakításáról és durva szilárdságbeli anomáliáiról, de az anyagjellemzők kvantitatív meghatározására csak igen közelítően alkalmas. A vizsgálat időigénye miatt csak célirányos jelleggel használható, olyan helyeken, ahol más vizsgálatok alapján a szerkezeti kialakítással, vagy az anyaghasználattal kapcsolatos anomália volt kimutatható.

## Saját publikációk listája

- [1] Orbán Zoltán, Dormány András, Juhász Tamás: Korai vasbeton építmények tartószerkezeti biztonságának megítélése, In: anon (szerk.) Építményeink 2018: mély- és infrastruktúraépítés, felújítás, Budapest, Magyarország: Konferencia Iroda Bt. (2018) 68 p. pp. 11-12. , 2 p.
- [2] Orbán Zoltán, Dormány András, Török Brigitta: Hidak állapotvizsgálata kombinált szerkezet-diagnosztikai módszerekkel, In: anon (szerk.) Építményeink 2018: mély- és infrastruktúraépítés, felújítás, Budapest, Magyarország: Konferencia Iroda Bt. (2018) 68 p. pp. 33-34. , 2 p.
- [3] Orbán Zoltán, Török, Brigitta, Dormány András: Műemlék épületek tartószerkezetének állapot-vizsgálata, In: Szalay, László (szerk.) Épületeink és Műemlékeink 2018, Budapest, Magyarország: Konferencia Iroda Bt. (2018) 76 p. p. 76
- [4] Orbán Zoltán, Török, Brigitta, Dormány András: Assessment and rehabilitation of heritage structures helped by combined non-destructive tests, In: Tamás, Molnár; Aleksandra, Krstić-Furundžić; Eva, Vaništa Lazarević; Aleksandra, Djukić; Gabriella, Medvegy; Bálint, Bachmann; Milena, Vukmirović Conference Proceedings 6th International Academic Conference on Places and Technologies, Pécs, Magyarország : Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar Breuer Marcell Doktori Iskola (2019) 660 p. pp. 64-71. , 8 p.
- [5] Balla Brigitta, Orbán Zoltán, Dormány András: Falazott szerkezetek szilárdságvizsgálati eredményeinek hasznosítása infrastruktúra létesítmények tartószerkezeti értékelésében, absztraktfüzet, Építményeink 2019, Konferencia Iroda Bt. (2019)
- [6] Dormány András, Orbán Zoltán, Balla Brigitta: Falazott hidak geometriai felmérése georadaros és 3D szkenneléses vizsgálattal, absztraktfüzet, Építményeink 2019, Konferencia Iroda Bt. (2019)

- [7] Orbán, Z., Kovács, I. P., Roncik, L., Dormán, A., & Kovács, D. M. (2021). Az InSAR technológia integrálása a szerkezeti stabilitás értékelésébe. *Kalasznyikov ISTU Bulletin*, 24(2), 60–67. <https://doi.org/10.22213/2413-1172-2021-2-60-67>
- [8] Dormány András, Orbán Zoltán: Történeti vasbeton építmények tartószerkezeti vizsgálata = Structural assessment of heritage reinforced concrete buildings, In: Prisztóka, Gyöngyvér; Kertai, Bendegúz (szerk.) XIX. Szentágotthai János Mutidiszciplináris Konferencia és Hallgatói Verseny: Absztrakt kötet = XIX. János Szentágotthai Multidisciplinary Conference and Student Competition: Book of Abstracts, Pécs, Magyarország : Szentágotthai János Szakkollégium (2021) 272 p. pp. 47-48. , 2 p.
- [9] Orbán, Z., Dormány, A. (2022). Assessment of Masonry Bridges with the Help of Combined NDT Methods. In: Pellegrino, C., Faleschini, F., Zanini, M.A., Matos, J.C., Casas, J.R., Strauss, A. (eds) *Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures. EUROSTRUCT 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 200. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4_38)
- [10] Dormány, A., Orbán, Z. (2022). Structural and Durability Assessment of Heritage Reinforced Concrete Structures. In: Pellegrino, C., Faleschini, F., Zanini, M.A., Matos, J.C., Casas, J.R., Strauss, A. (eds) *Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures. EUROSTRUCT 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 200. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4_37)
- [11] R.K. Shetiya, S. Elhadad, Z. Orban, A. Dormany, A. Fulop, A. Len, "A Comparative Investigation of Self- Repairing Concrete Incorporating Penetron Admix with Ordinary Concrete", in P. Ivanyi, J. Kruis, B.H.V. Topping, (Editors),

- "Proceedings of the Seventeenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing", Civil-Comp Press, Edinburgh, UK, Online volume: CCC 6, Paper 11.3, 2023, doi:10.4203/ccc.6.11.3
- [12] Orbán Zoltán, Dormány András, Kovács Dániel Márton, Állapotmonitoring roncsolásmentes diagnosztika és műholdradar alapú mérések alkalmazásával, HÍDÉPÍTŐK 50. : 1 pp. 42-47. , 6 p. (2023)
- [13] Dormany, A., & Orban, Z. (2023). The relationship between compressive strength and sonic velocity depending on moisture content in case of historical masonry. Acta Technica Jaurinensis, 16(2), 75–82. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00695>
- [14] Dormany, A., & Orban, Z. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SONIC VELOCITY IN HISTORICAL MASONRY WALLS, Pollack Periodica, 2023, lektorálás alatt