

CLT szerkezetű lakóépület légtömörségének vizsgálata ISO 9972 szabvány szerint – esettanulmány és szivárgástípus-elemzés

Airtightness testing of a CLT residential building according to ISO 9972 standard – leakage analysis

KÁDÁR Ferenc^{1,2,3} Dr. MOGA Ligia^{1,2}

¹Technical University of Cluj-Napoca/ Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca/ Kolozsvári Műszaki Egyetem, str. Memorandumului 28, 400114 Cluj-Napoca/ Kolozsvár, Románia

www.constructii.utcluj.ro

² European University of Technology, European Union

³ Kadar Energy KFT, 407505 Săvădisla/ Tordaszentlászló 254 A, Románia, office@kadar-energy.ro www.kadar-energy.ro

Abstract

With the growing use of cross-laminated timber (CLT) technology, airtightness has become a key factor in energy efficiency and structural durability. This study applies a flow exponent-based analysis to investigate the relationship between airtightness performance and junction detailing. The results highlight the importance of understanding leakage mechanisms beyond the conventional n50 value. The paper also demonstrates the diagnostic role of blower door testing in CLT buildings.

Keywords: CLT structure; airtightness; blower door test; flow exponent

Összefoglaló

A keresztlaminált fa (CLT) technológia terjedésével a légtömörség az energiahatékonyság és a szerkezeti tartósság kulcstényezőjévé vált. A tanulmány áramlási kitevő-alapú elemzéssel vizsgálja a légtömörégi eredmények és a csomóponti kialakítások kapcsolatát, valamint bemutatja a blower door mérés diagnosztikai szerepét CLT szerkezetű épületek esetében.

Kulcsszavak: CLT szerkezet; légtömörség; blower door vizsgálat; áramlási kitevő

1. BEVEZETÉS

A fenntartható építés és az energiahatékonysági követelmények szigorodása következtében a fa mint építőanyag jelentős szerepet kapott az építőiparban. A korszerű faépítészet – különösen a CLT technológia – gyors fejlődése új kihívásokat hoz az épületfizika területén. Az energiahatékonysági követelmények szigorodásával az épületek légtömörése kulcsfontosságú paraméterre vált.

Számos kutatás igazolta, hogy a nem megfelelő légtömörség jelentős többlet hővesztiséget és komfortromlást okoz, valamint növeli a szerkezetek nedvességekockázatát [2]. Az infiltrációból származó hővesztés a teljes épületenergia-mérleg jelentős részét is kiteheti [1].

A légáramlással történő nedvességszállítás különösen érzékeny kérdés fa szerkezetek esetében, mivel a levegővel együtt a szerkezetbe jutó nedvesség hosszú távon higrotermikus problémákhoz és anyagkárosodáshoz vezethet [3].

A CLT panelek alapvető légtömörségét a többrétegű, ragasztott szerkezeti kialakítás biztosítja, amelyben kulcsszerepet játszanak a rétegek közötti ragasztott kapcsolatok, különösen a külső rétegek között kialakított ragasztóréteg. Ugyanakkor a teljes épületszintű légtömörség szempontjából meghatározó jelentőségűek a szerkezeti csomópontok, illesztések és kapcsolati kialakítások. A légtömörség szempontjából különösen kritikusak a falszakaszok közötti illesztések, a fal–tető és fal–födém csatlakozások, az előregyártott panelek kapcsolatai, a nyílászárók és egyéb áttörések környezete, valamint a CLT elemek és más szerkezeti rendszerek – például vasbeton szerkezetek – közötti csomópontok. Ezen pontok megfelelő tömítése elengedhetetlen a kívánt légtömörégi szint eléréséhez.

A tanulmány az áramlási kitevő alkalmazhatóságát vizsgálja a CLT épületek szivárgástípusainak meghatározásában.

2. VIZSGÁLT ÉPÜLET

A vizsgált épület egy földszintes, 155,98 m² alapterületű és 288 m³ nettó térfogatú, CLT szerkezetű családi ház Ajton (Aiton) településen, Romániában.

2.1. Talajon fekvő padlószerkezet

A talajon fekvő padlószerkezet teljes vastagsága 125 cm. A szerkezet felső rétegét 2 cm vastag háromrétegű parketta burkolat alkotja, amely 6 cm vastag vasalt aljzat esztrichre került elhelyezésre. Az esztrich alatt elválasztó polietilén fólia található.

A hőszigetelést 20 cm vastagságú extrudált polisztirol (XPS) réteg biztosítja, amely alatt 15 cm vastag vasbeton lemezszerkezet helyezkedik el. A nedvesség elleni védelmet kétszeres rétegű, lángolvasztással rögzített bitumenes vízszigetelő membrán biztosítja.

A szerkezet alsó részében 5 cm vastag kiegyenlítő esztrich, elválasztó fóliaréteg, valamint 20 cm vastag kapilláris megszakító zúzottkő réteg található. A rétegrend geotextília elválasztó rétegre és tömörített feltöltésre épül.

2.2. Külső falszerkezet

A külső falszerkezet teljes vastagsága 48 cm. A külső oldalon ásványi vakolat biztosítja a homlokzati felületképzést. A homlokzati hőszigetelő rendszer részeként 6 cm vastag merev farostlemez került alkalmazásra.

A külső oldali szélzárást szélzáró membrán biztosítja, míg a fő hőszigetelő réteget 24 cm vastag ásványgyapot alkotja. A belső oldali párazárást párafékező/pározáró membrán biztosítja.

A teherhordó szerkezetet 10 cm vastag CLT panel alkotja. A belső oldalon további 6 cm vastag szerelőfal került kialakításra, amely hőszigetelő réteggel kerül kitöltésre, majd gipszkarton burkolat zárja a rétegrendet.

2.3. Födémszerkezet a földszint felett

A födém teljes szerkezeti vastagsága 52,5 cm. A felső réteg OSB járófelületből áll, amely alatt fólia helyezkedik el.

A hőszigetelést 40 cm vastagságú bazaltgyapot réteg biztosítja, I-joist másodlagos tartószerkezettel kombinálva. A párazárást külön membránréteg biztosítja.

A fő teherhordó szerkezetet 10 cm vastag CLT födémpanel alkotja. Az alsó oldalon – igény szerint – álmennyezeti technikai tér került kialakításra, belső oldali festett felületképzéssel.

A blower door mérés időpontjában az épület határoló szerkezete még nem rendelkezett teljes rétegrendi kialakítással. A talajon fekvő padlószerkezet esetében a 15 cm vastag vasbeton lemez fölötti rétegek még nem kerültek beépítésre. A külső falszerkezetnél kizárólag a CLT falpanelek voltak jelen, a párazáró fólia, a hőszigetelés és a külső szélzáró réteg kivitelezése előtt. A padlásfödém esetében a tervezett rétegrendek már elkészültek.

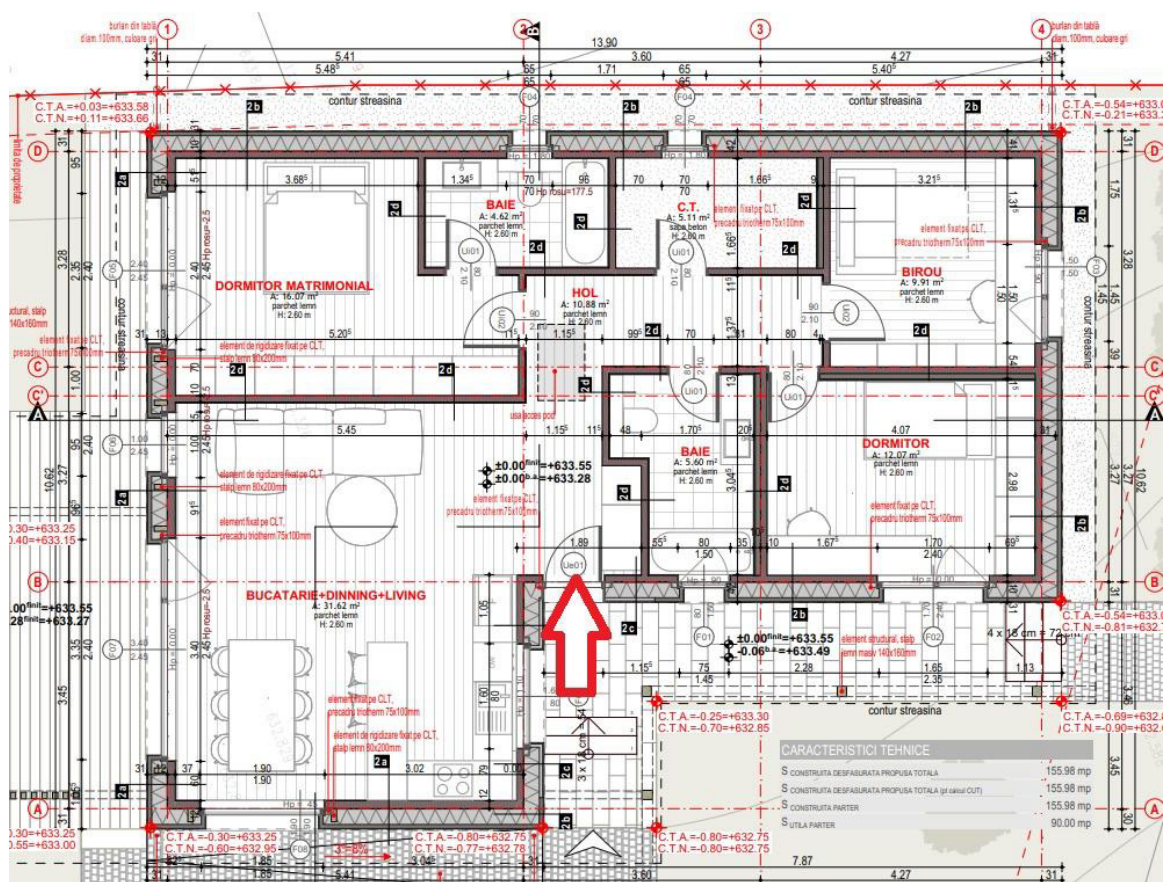
Ez a vizsgálati állapot lehetővé tette a CLT szerkezeti rendszer légtömörégi teljesítményének közvetlen vizsgálatát, a később beépülő rétegek hatásától függetlenül.



1. ábra. A vizsgált CLT épület korai kivitelezési fázisban, párazáró réteg, szélzárás és hőszigetelés nélkül
(Fotó: Kádár Ferenc)



2. ábra. A vizsgált CLT épület a kivitelezés befejezett állapotában (Fotó: Ovidiu Terchilă)



3. ábra. A légtömörégi vizsgálatához használt ventilátoros mérőberendezés a bejárati ajtó nyílásába került beépítésre (piros nyíllal jelölve), az ábrán látható módon

A faépületek légtömörége alapvetően a csomóponti kialakításoktól és a kivitelezési minőségtől függ, nem kizárólag a szerkezeti rendszertől [4].

3. MÉRÉSI MÓDSZER

A blower door módszer az épület légtömörségének meghatározására szolgáló legelterjedtebb vizsgálati eljárás, amely során a légáramlás és a nyomáskülönbség közötti kapcsolatot határozzák meg [1].

A légtömörégi vizsgálat az MSZ EN ISO 9972:2015 szabvány előírásainak megfelelően, 2024. február 20-án történt. A méréshez a Retrotec képviselet által biztosított berendezéseket alkalmaztuk. A fő mérőeszközök a következők voltak: Retrotec 1000 ventilátor (fan #1FT001706) és Retrotec DM2 Mark II digitális nyomásmérő (#209579).

A légszivárgási helyek azonosításához kiegészítő eszközöket is használtunk, többek között Testo 405i típusú anemométert (#05601405), valamint egy Power Tiny kompakt füstgenerátort (#PowTi122122).



4. ábra. Blower door mérőberendezés telepítése (Fotó: Kádár Ferenc)

A mérési rendszer kalibrált, ipari alkalmazásban széles körben használt berendezés volt, amely biztosította a mérési eredmények megbízhatóságát.

A mérés során vákuumos (depressziós) és túlnyomásos vizsgálat is készült. Összesen 10 mérési pont került rögzítésre, a nyomáslépcsők közötti különbség megközelítőleg 5 Pa volt. Minden nyomásszinten 30 másodperces mérési időt alkalmaztak.

A mérési körülmények:

- szél: gyenge,
- belső hőmérséklet: ~9 °C,
- külső hőmérséklet: ~8 °C.

A légáramlás a következő összefüggéssel írható le:

$$q = C \cdot \Delta p^n \quad (1)$$

ahol:

q = légáram [m³/h]

C = légáteresztési együttható

Δp = nyomáskülönbség [Pa]

n = flow exponent / áramlási kitevő, amely a szivárgás jellegére utal [5].

4. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

A mérés alapján az épület n_{50} értéke 0,38 1/h, vagyis a vizsgált CLT lakóépület a passzívház-követelményként gyakran alkalmazott $n_{50} = 0,6$ 1/h határérték alatt teljesített. A kombinált q_{50} érték 110,50 m³/h, az effektív szivárgási felület ELA₅₀ pedig 33,69 cm² volt. A 95%-os bizonytalanság mindössze ±2,6%, ami stabil mérési eredményre utal.

A mérés tudományos szempontból azért különösen érdekes, mert a depressziós és túlnyomásos mérés eltérő, de egymáshoz közeli flow exponent értékeket adott:

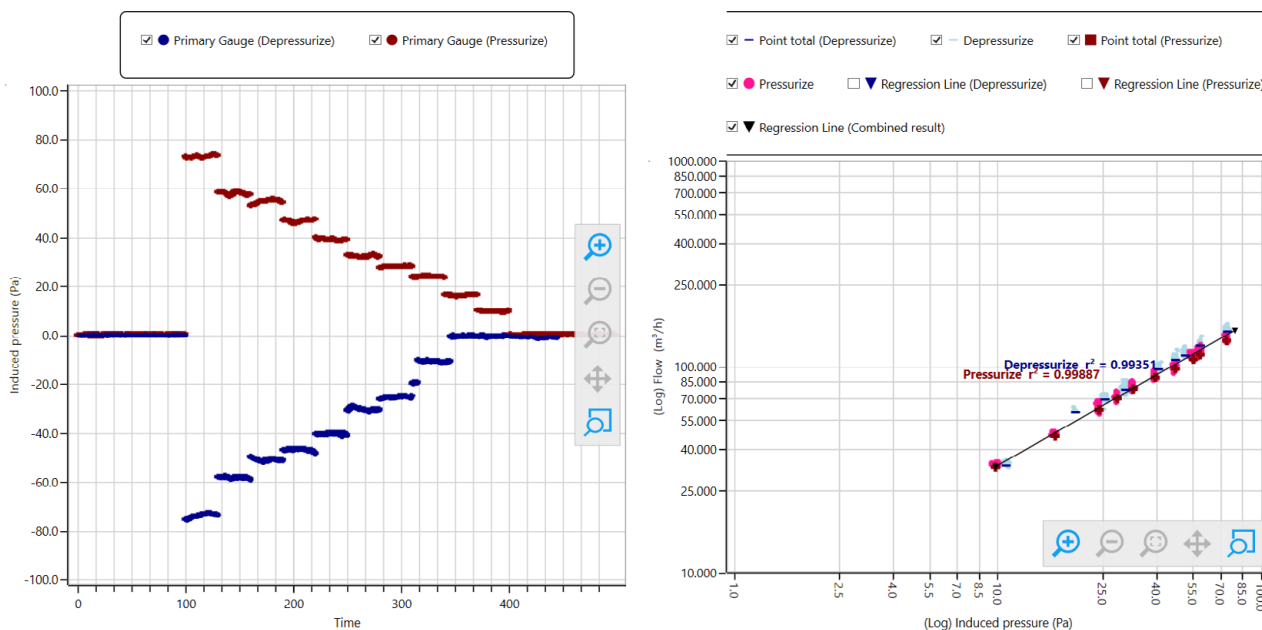
1. táblázat. Eredmények összefoglalása

	n	r^2	q_{50} (m ³ /h)	n_{50} (1/h)
Vákuumos (depressziós) mérés	0,756	0,9935	115,21	0,400
Túlnyomásos mérés	0,704	0,9989	105,82	0,367
Kombinált eredmény	-	-	110,50	0,380

A mérési bizonytalanság ±2,6% (q_{50} és n_{50} esetén), ami kiváló minőségű mérésre utal.

A regressziós illesztés mind a depressziós, mind a túlnyomásos mérés esetében magas korrelációt mutatott. A meghatározási együttható értéke depressziós mérésnél $r^2 = 0,99351$, míg túlnyomásos mérésnél $r^2 = 0,99887$ volt, ami a mérési adatok és az illesztett görbe közötti kiváló egyezést igazolja.

A kapott eredmény egyaránt megfelel a passzívházakra vonatkozó légtömörségi követelménynek ($n_{50} \leq 0,6$ 1/h), valamint az alacsony energiaigényű épületekkel szemben támasztott elvárásoknak is [6].



5. ábra. Az ábra a vákuumos (depressziós) és túlnyomásos mérések kombinált, átlagolt eredményeit mutatja.
(Forrás: Kádár Energy)

A görbe a légáramlás és a nyomáskülönbség közötti összefüggést szemlélteti, a regressziós illesztés alapján meghatározott átlagos paraméterekkel. A magas korrelációs érték a mérési adatok és az illesztett görbe közötti kiváló egyezést, valamint a mérés megbízhatóságát igazolja. Ez megfelel a szakirodalomban javasolt minőségi kritériumoknak [2].

5. ÁRAMLÁSI KITEVŐ ALAPÚ (FLOW EXPONENT) SZIVÁRGÁSTÍPUS-ELEMZÉS

A blower door mérésekben az áramlás az (1)-es összefüggéssel írható le. Az n értéke segít értelmezni a szivárgás jellegét:

- $n \approx 0,5 \rightarrow$ turbulens áramlás, nagyobb rések, nyílások
- $n \approx 1,0 \rightarrow$ laminárisabb jelleg, hosszú, keskeny rések, repedésszerű szivárgások
- $n = 0,65-0,75 \rightarrow$ vegyes jellegű szivárgási kép

Ebben az épületben az $n = 0,704-0,756$ tartomány arra utal, hogy az épület burkolatán keresztül történő légáramlás nem egy domináns nyíláson keresztül történik, hanem több, eltérő geometriai karakterisztikájú szivárgási útvonal kombinációjaként.

A magasabb n érték ($\approx 0,75$) arra utal, hogy a szivárgások [Sherman] jelentős része:

- hosszabb áramlási útvonalakon,
- keskeny rések mentén,
- illetve többrétegű csomópontokon keresztül történik.

Ez összhangban van a CLT épületek esetében gyakran megfigyelt jelenséggel, miszerint a légzárás nem homogén felületen, hanem csatlakozási pontok mentén sérül és megegyezik más faépületeken végzett mérések eredményeivel is [7].

6. VÁKUUMOS ÉS TÚLNYOMÁSOS MÉRÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A mérési eredmények alapján megfigyelhető, hogy vákuumos (depressziós) üzemmódban az 50 Pa nyomáskülönbséghez tartozó légáram magasabb volt, mint túlnyomás esetén:

- depressziós mérés: $q_{50} = 115,21 \text{ m}^3/\text{h}$
- túlnyomásos mérés: $q_{50} = 105,82 \text{ m}^3/\text{h}$

A két mérési mód között megközelítőleg 8–9% eltérés mutatkozott. Ez az eltérés nem tekinthető jelentősnek, ugyanakkor arra utal, hogy bizonyos szivárgási pontok depresszió hatására jobban megnyílnak, míg túlnyomás esetén részben záródnak.

A jelenség hátterében a szerkezeti kapcsolatok deformációja, a rugalmas hézagok viselkedése, valamint az illesztések nyomásirány-függő működése állhat. Hasonló effektust a szakirodalom is dokumentál, különösen könnyűszerkezetes és faépületek esetében [AIVC; Walker].

A Flow vs. Induced Pressure grafikonokon a mérési pontok jól illeszkednek a regressziós egyeneshez. A depressziós $r^2 = 0,99351$ és a túlnyomásos $r^2 = 0,99887$ nagyon jó korrelációt jelez, tehát a mérés megbízható és tudományosan jól használható.

Az épület belső nyomáskülönbségének alakulását bemutató grafikon szintén fontos információkat szolgáltat, mivel jól látható, hogy a mérés több nyomáslépcsőben, megközelítőleg 10–70 Pa tartományban történt. Ez megfelel az ISO 9972 szabvány szerinti mérési eljárásnak, és alkalmas regressziós elemzés elvégzésére. A jelentés alapján mind depressziós, mind túlnyomásos üzemmódban 10 mérési pont került rögzítésre, nyomásszintenként 30 másodperces adatfelvételi idővel.

7. SZIVÁRGÁSI HELYEK ELEMZÉSE

A helyszíni vizsgálatok során több, légtömörégi szempontból kritikus csomópont került azonosításra. A legjelentősebb légszivárgások a nyílászárók és azok csomóponti csatlakozásai mentén voltak megfigyelhetők, különösen az ablaksarkok és a tolóajtó kapcsolatok környezetében. Jelentős szivárgások jelentkeztek továbbá a föliacsomópontok átlapolásainál és sarokcsatlakozásainál, valamint a fal–padló kapcsolatok peremzónáiban is. További kritikus területet jelentettek a gépészeti és elektromos áttörések, különösen az elektromos kábelátvezetések, illetve a különböző fa szerkezeti elemek csatlakozásai.

A dokumentált hibák jellemzően kis méretű, de nagy számú szivárgási pontként jelentkeztek.



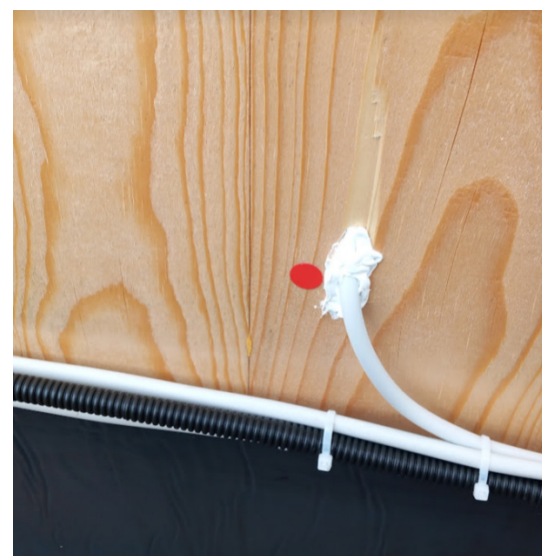
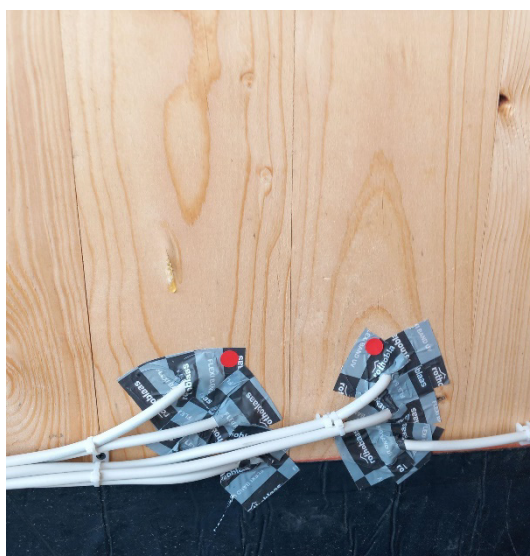
6. ábra. Légszivárgás helyszínen módosított CLT panelnél
(Fotó: Kádár Ferenc)



7. ábra. Légszivárgás a toloajtónál (Fotó: Kádár Ferenc)



8. ábra. Légszivárgás nyílászáró beépítéseknél (Fotó:Kádár Ferenc)



9. ábra. Légszivárgás kábelátörésnél (Fotó:Kádár Ferenc)



10. ábra. Légszivárgás a külső sarok és a vasbeton lemez csatlakozásánál
(Fotó: Kádár Ferenc)

Ezek a pontok a nemzetközi tapasztalatok szerint is a legkritikusabb légtömörégi helyek közé tartoznak [4].

8. KÖVETKEZTETÉSEK

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált CLT szerkezetű épület kiváló globális légtömörégi teljesítményt mutat ($n_{50} = 0,38$ l/h). Ugyanakkor a helyszíni vizsgálatok és a mérési paraméterek elemzése rámutat arra, hogy lokális légszivárgások jelen vannak, amelyek elsősorban a nyílászárók és a csomóponti kapcsolatok mentén jelentkeznek.

A mérés sajátossága, hogy az épület a vizsgálat időpontjában még nem rendelkezett teljes rétegrenddel, így az eredmények elsősorban a CLT panelek és azok csatlakozásai által biztosított légtömöriséget tükrözik, kizárva a később beépülő rétegek hatását.

A flow exponent elemzés és a helyszíni hibafeltárás kombinációja lehetővé teszi a szivárgások jellegének mélyebb megértését. Az $n \approx 0,70-0,76$ tartomány arra utal, hogy a légszivárgás nem koncentrált nyílásokon keresztül történik, hanem több kisebb, elosztott csomóponti résen és illesztésen keresztül valósul meg.

Ez megerősíti, hogy az n_{50} érték önmagában nem elegendő a légtömörégi teljesítmény teljes körű értékeléséhez. A légtömörég CLT épületek esetében nem tekinthető kizárólag anyagtulajdonságnak, hanem alapvetően a csomóponti kialakítás, a kivitelezési minőség és az építési folyamat eredménye.

Továbbá fa szerkezetek esetében olyan specifikus tényezők is befolyásolják a légtömöriséget, mint a nedvességtartalom-változásból eredő méretváltozások, a bütüfelületek érzékenysége, valamint az építési sorrend és technológia. Ennek megfelelően a légtömöriséget integrált, rendszerszintű teljesítményként szükséges értelmezni, nem pedig statikus szerkezeti jellemzőként.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző köszönetét fejezi ki a Retrotec vállalatnak a kutatás támogatásáért, valamint az ipari partnereknek a műszaki háttér biztosításáért. Köszönet illeti Arh. Ovidiu Terchilăt (Atelier de Arhitectura Terchilă S.R.L. / AATOstudio) a tervdokumentáció kutatási célú felhasználásának engedélyezéséért. A támogatók nem vettek részt az eredmények kiértékelésében és értelmezésében.

A szerző köszönetét fejezi ki a Technical University of Cluj-Napoca / Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca / Kolozsvári Műszaki Egyetem részére a kutatáshoz nyújtott adminisztratív és technikai támogatásért.

IRODALOMI HIVATKOTÁSOK

- [1] AIVC 11887 Sherman, M. H., Dickerhoff, D. J. (1998): *Air-tightness of U.S. dwellings*. https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_11887.pdf
- [2] Kalamees, T. (2007). *Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia*. Building and Environment, 42(6), 2369–2377
- [3] Straube, J. F., Burnett, E. F. P. (2005): *Building Science for Building Enclosures*. Building Science Press, Westford, MA. p. xxx.
- [4] Carrié, F. R., Jobert, R., Leprince, V. (2012): *Methods and Techniques for Airtight Buildings*. AIVC Contributed Report 14. [Air Infiltration and Ventilation Centre \(AIVC\)](#).
- [5] ISO 9972:2015: *Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method*.
- [6] Passive House Institute (2015): *Criteria for Passive Houses, EnerPHit and PHI Low Energy Building*. Elérhető: <https://passivehouse.com> (letöltés dátuma: 2026.05.10.)
- [7] Sherman, M. H. (1992): *A Power-Law Formulation of Laminar Flow in Short Pipes*. Journal of Fluids Engineering, 114(4), pp. 601–605.