

DOKTORI (PH.D.) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**FA ABLAKOK LÉGZÁRÁSI TELJESÍTŐKÉPESSÉGÉNEK MEGBÍZHATÓSÁGI
VIZSGÁLATA**

Bencsik Balázs

Témavezető:
Dr. Dénes Levente

Nyugat-magyarországi Egyetem
Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Sopron
2014

1. A KUTATÓMUNKA AKTUALITÁSA, CÉLKITŰZÉSEK

Az utóbbi években az új technológiáknak, valamint a szigorúbb épületenergetikai direktíváknak köszönhetően a nyílászáró szerkezeti fejlesztések felgyorsultak. A fejlesztések során legnagyobb figyelmet a szerkezetek hőátbocsátási ellenállásának növelésére fordítottak. Ez azzal magyarázható, hogy még a legkorszerűbb, társított szerkezetű nyílászárók hőátbocsátási tényezője is meghaladja a modern építési technológiák és alapanyagok felhasználásával készült épületek határoló falainak hőátbocsátási értékét. Az épületek légtömörségének és a szükséges óránkénti légcserre mennyiségének meghatározásával kapcsolatos kutatásokból kiderül, hogy az újonnan beépített és jól záródó korszerű nyílászárókon keresztül az alacsony külső-belső oldali nyomáskülönbség hatására megvalósuló filtrációs energiaveszteség töredéke a szerkezet transzmissziós hőveszteségének, és az épület egyéb résein keresztül távozó filtrációs energiaveszteségnek. Emellett a magas légtömörséget biztosító nyílászárókon keresztül nem biztosítható a megfelelő komfortérzethez szükséges frisslevegő utánpótlás sem. Ennek tudatában, napjainkban kevésbé került a kutatások fókuszába a nyílászárók légzáró teljesítményének megbízhatósági vizsgálata, és annak javítása. Ismert tény, hogy az épületek energiafelhasználásának alakulásában alapvetően az épületeket használó személyek szokásai és az épület szerkezeti elemeinek, elektromos berendezéseinek tényleges teljesítménye játszik jelentős szerepet. Több, valós körülmények között elvégzett kutatás is rámutatott arra, hogy a valós energiafogyasztás közel 50%-kal meghaladhatja a becsült fogyasztás mértékét. A különbség a két érték között az épületet használó személyek szellőztetési, fűtési - alapvetően komfort - szokásainak és az épületbe beépített szerkezeti elemek számított és a tényleges teljesítményének eltéréséből adódik. Ennek tudatában kezdtük el a jellemzően épület felújítási munka során beépített és eredetileg kiváló légzáró teljesítménnyel rendelkező nyílászárók pár éves használatát követő állapotfelmérést. A felmérés eredményeként az összes vizsgált nyílászáróról elmondható, hogy a kezdeti légzáró teljesítmény értékében jelentős csökkenés következett be, amely hozzájárulhat a tervezett energiaveszteség és a tényleges energiaveszteség különbségének alakulásához.

A dolgozatom tárgyát képezi a Magyarországon, és az Európai Unió északi országaiban is jelentős számban beépített fa ablakok meghibásodási folyamatainak feltárása, valamint a légzáró teljesítőképességi jellemző megbízhatóságának fokozása. Az utóbbi évtizedekben a fa ablakok helyett egyre nagyobb számban kerülnek beépítésre a műanyagból készülő nyílászárók, azonban az alapanyag sajátosságai, valamint a szerkezeti kialakítások különbözősége miatt, korlátozottan érvényesek rájuk a fa ablakokon végzett műszaki megbízhatósági vizsgálatok eredményei.

A szabványban rögzített 23 műszaki jellemző közül az ablakok légzáró értékének megbízhatóságával foglalkozom részletesen, mivel a légzáró teljesítmény megváltozása több teljesítményjellemző változását is maga után vonja. Az épületek szellőztetése mind az épületek állagmegóvása, mind pedig a benne élők egészségi állapota szempontjából nagyon lényeges feladat, azonban ez csak abban az esetben hatékony, ha az nem ellenőrizetlenül megy végbe, hanem pontosan és szabályozott módon történik. A nyílászáró használatából, valamint a környezeti hatásokból adódó szabályozatlan légcserre növekedés megakadályozása mind gazdaságilag, mind pedig komfortérzeti szempontból is kiemelt fontosságú feladat. Energetikai

szempontból nem feltétlenül az óránkénti légcseréből származó közvetlen ventilációs veszteségek jelentenek nagyobb többletenergiát; valójában a szerkezet résein szabályozatlan filtrációs hideg levegő jelentősen lehűti a rések környezetét, ami lokális hőhidat eredményez. Ezek a lehűlő felületek és a helyi levegő beáramlások nagymértékben hozzájárulnak a helyi diszkomfortérzet kialakulásához is.

A dolgozat egyik célja, hogy feltárja, és pontos képet adjon a nyílászárók légzárási teljesítményét befolyásoló szerkezeti elemekről és azok jelentőségéről. A nyílászárók légzárási teljesítőképesség megbízhatóság növelésének első lépése, hogy kidolgozásra kerüljön egy olyan megbízhatósági modell, amely alkalmas a terméktervezés során rendelkezésre álló funkcióparaméterek ismeretében, bármely használati időpillanatban, adott valószínűséggel előre jelezni a hibamentes működés valószínűségét. Ennek érdekében először meghatározom a szerkezeti elemek elhasználódásából adódó légzárási teljesítményváltozás időbeni alakulását, amelyhez a szerkezeti elemeket célzott fárasztó és öregítő vizsgálatoknak vetem alá. A szerkezeti elemek degradációs folyamatainak ismeretében célokom egy megbízhatósági modell kidolgozása, amely számításba veszi a működés során becsült valószínűséggel bekövetkező környezeti, valamint használatból származó degradációs hatások mértékét is. A modell algoritmus alapján megvalósuló számítógépes szimulációs szoftver segítségével a nyílászárók karbantartása tervezhetővé válik, amelynek eredményeként növelhető a termék élettartama és a légzárási teljesítmény megbízhatósága is.

2. KUTATÁSI MÓDSZERTAN

A kutató munka négy különálló szakaszra bontható. Az első két szakaszban szekunder kutatást végeztem, míg a harmadik és negyedik munkaszakaszban a szekunder kutatás eredményei alapján megalkottam a fa ablakok légzárási teljesítőképességének becslésére alkalmas modelljét.

A kutatás első szakaszában beépített és raktározott nyílászárókon végeztem légzárási teljesítőképesség megbízhatóságát feltáró vizsgálatokat. A helyszíni légzárási vizsgálatok elvégzéséhez egy speciális vizsgálóberendezés kifejlesztésre kerül sor, amellyel a szabványos laboratóriumi légzárási vizsgálatokkal megegyező pontosságú méréseket hajtottam végre. A raktározott nyílászárók légzárási vizsgálatát az MSZ EN 1026:2001 szabvány szerint végeztem, a mérési eredmények az MSZ EN 12207:2001 szabvány szerint értékeltem ki.

A második munkaszakaszban a nyílászárók szerkezeti elemeinek a légzárási teljesítőképességre gyakorolt hatását vizsgáltam. A kutatás során több különböző méretű és kialakítású nyílászáró rugalmas tömítéseinek elhelyezkedését, valamint vasalatrendszerének beállításának hatását vizsgálta. A környezeti tényezők közül a hőmérséklet szerepének vizsgálatára került sor az EMI Nonprofit Kft. ablakvizsgáló laboratóriumában.

A harmadik munkaszakaszban a szekunder kutatás eredményi alapján megalkottam a légzárási teljesítőképesség becslésére alkalmas modellt. A modell magába foglalja a résgeometria és légáteresztés függvénykapcsolatát, a tömítés reológiai anyagmodelljét, a kezdeti tömítés geometriáját, a szélnyomás, valamint a koptató igénybevételek hatására kialakuló résgeometriáját.

A negyedik munkaszakaszban egy választott nyílászárón a modellhez szükséges input adatok mérésére, és a modell numerikus alakjának megoldására került sor. A mérési adatok sztochasztikus jellege miatt a modell megoldáshoz Monte-Carlo szimulációt alkalmaztunk.

3. A KUTATÓMUNKA EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A doktori katasom során kiterjedt vizsgálatokat végeztem a természetes faanyagból készült nyílászárók légzárési teljesítőképesség megbízhatósági modelljének kidolgozásához.

A kutatómunka első szakaszában használt nyílászárókon végeztem előzetes laboratóriumi és helyszíni légzárési vizsgálatokat. A vizsgálatok elvégzéséhez kifejlesztettem egy olyan mérőeszközt, amely alkalmas beépített nyílászárók légzárési teljesítőképességének meghatározására. Az első típusvizsgálatot követően raktározott nyílászárókon elvégzett vizsgálatok során megállapítottam, hogy a nyitási- csukási igénybevételektől teljesen megkímélt nyílászárók esetében is kell számítani légzárési teljesítménycsökkenésre. A beépített nyílászárók légzárési vizsgálataival rámutattam arra, hogy az alkalmazott torlónyomás fokozásával az áramlási koefficiens értéke változik, ezért az alacsony nyomáson elvégzett ún. Blower-Door eljárással mért légzárési értékek alapján, extrapolálásával nem lehet a nyílászáró légzárési teljesítőképességét meghatározni.

A kutatás második szakaszában a légzárési teljesítményt befolyásoló konstrukciós elemek vizsgálata történt. A nyílászárók szárnyában több síkban elhelyezett rugalmas tömítőprofilok légzárési teljesítményre gyakorolt hatásának vizsgálata során megállapítottam, hogy a másodlagos peremtömítés alkalmazása nem javítja a nyílászáró légzárési teljesítőképességét, és a szigetelőképesége is elmarad a középtömítésétől. Légzárési teljesítőképesség megbízhatóságát a peremtömítés alkalmazása nem növeli, ezért alkalmazása légzárési szempontból nem indokolt.

Különböző kamrahőmérsékleteken (-10°C , -20°C , $+23^{\circ}\text{C}$, $+45^{\circ}\text{C}$) elvégzett légáteresztési vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy csak 600 Pa nyomáskülönbség mellett mutatható ki a környezeti hőmérséklet légzárési teljesítőképességre gyakorolt hatása.

A középtömítés reológiai tulajdonságának vizsgálata során elsőként alkalmaztam a Burgers-reológiai anyagmodellt, amellyel a thermoplasztikus elasztomer alapanyagból készített tömítőanyagok feszültségrelaxációs folyamatait lehet numerikusan jellemezni. A bonyolult geometriájú és különböző anyag-összetételű tömítőprofilok relaxációs folyamatainak meghatározása szabványos anyagvizsgálati módszerek alkalmazásával nem lehetséges, ugyanis a profil egyes elemeiben többdimenziós feszültségi állapotok alakulnak ki. A szabványos anyagvizsgálatokkal meghatározott anyagjellemzők ismeretében elvégzett VEM végeselemes szimulációs elemzés jó alternatívát jelenthet a jövőben.

A kutatómunkám legnagyobb eredményeként kidolgoztam két modellt, amelyekkel az épületek nyílászáróinak légzárési teljesítőképességét igénybevételi szinttől függően a teljes használati élettartamra előre lehet becsülni.

Az első modell csak korlátozott mértékig használható a légzárás becslésére. Az első modellre épülő pontosabb becslést adó második modell numerikus alakját is meghatároztam. A modell számol a tok és szárny záródási szorosságát jelző hézagzárési mutató értékében, 600 Pascal

nyomáskülönbség mellett kialakuló légáteresztési függvénykapcsolattal. Az adekvát függvény meghatározása egyedi kialakítású kamra segítségével mért légáteresztési adatok regresszió-analízisével történt.

A modellben található input paraméterek sztochasztikus jellege miatt, a légáteresztés becslésére Monte-Carlo szimuláción alapuló számítógépes programot készítettünk. A modell algoritmusának valamint, az arra épülő szimulációs program működését egy kiválasztott nyílászárón mutattam be. A légzárési teljesítmény szimulációs elemzés eredményei alapján megállapítottam, hogy az épületek transzparens nyílászáróinak légzárési teljesítménye, a nyitási-csukási igénybevételtől függően aszimptotikusan egy minimális érték felé tart. A teljesítménycsökkenés sebességét kisebb mértékben a mozgó alkatrészek kopása, nagyobb mértékben pedig az elsődleges tömítőprofil reológiai tulajdonságai határozzák meg.

4. TÉZISEK

1. Egy műszaki termék megbízhatóság növelésének első lépése, hogy kidolgozzunk egy olyan modellt, amely alkalmas a tervezés során rendelkezésre álló input adatokból a tervezett élettartam bármelyik időpontjában a vizsgált funkcióparaméter értékének adott biztonsággal történő becslésére.

Megalkottam az épület nyílászáró légzárési teljesítményének becslésére alkalmas modellt, amely a következő numerikus alakban írható le:

$$V(t) = \int_0^L \left[\beta_4 \cdot \left(1 - \exp(-1 \cdot ((\beta_3 \cdot \Delta y_z(t) - 1 \cdot \beta_2)^{\beta_1})) \right) \right] dl$$

Ahol:

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ - függvény paraméterei

$\Delta y_z(t)$ - t időpontban a hézagzárési mutató

A modellben szereplő változók sztochasztikus jellege miatt, annak megoldásához a Monte-Carlo módszert alkalmaztam.

A modellem alapján megalkotott szimulációs szoftver a szakemberek számára egy teljesen új eszközt biztosít, amellyel a termékfejlesztés során rendelkezésre álló input adatok ismeretében tervezhetővé vált a nyílászárók légzárési teljesítményének megbízhatósága.

2. A kutatómunkám során egy egyedi vizsgálóberendezést fejlesztettem ki, amellyel a szabványosított laboratóriumi mérésekkel megegyező módon lehet a beépített nyílászárók légzárési teljesítményét meghatározni.

Egyedileg kifejlesztett helyszíni légzárési mérésekre alkalmas mérőberendezéssel, valamint laboratóriumi mérőeszközzel, használt nyílászárókon elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy 3-4 éves használat során a nyílászárók légzárési

teljesítménye legalább egy osztályértékkel lecsökkent. A teljesítménycsökkenés hatására kialakuló filtrációs hőáram nagyobb torlónyomások esetén meghaladta transzmissziós hőáram mértékét.

3. A légzárasi teljesítményt becslő modelljének kidolgozása során bevezettem egy új jelzőszámot a **HÉZAGZÁRÁSI MUTATÓT**. A bevezetett mutató megadja, hogy a nyílászáróba beépített rugalmas tömítőanyag mennyire képes kitölteni a szélteher hatására kialakuló tok és szárny közt kialakuló rést. A mutató magába foglalja a tömítés reológiai anyagmodelljét, a kezdeti tömítés geometriáját, a szélnyomás, valamint a koptató igénybevételek hatására kialakuló tok és szárny távolságot is. A hézagzárasi mutató a következő numerikus alakban írható le:

$$\Delta y_z(t) = y_{\text{töm}}(t_0) \cdot \left[\frac{y_{\text{töm}}(t_0) - y_{\text{rés0Pa,z}}}{y_{\text{töm,z}}(t_0)} \right] \cdot \left[\frac{\tau_{11} - T_2}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_1 - \tau_{11}}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right] + y_{\text{rés0Pa,z}} - \left[y_{\text{rés600Pa,z}}(t_0) + \beta_1 \cdot \left(\frac{t}{t + \beta_2}\right) \right]$$

Ahol:

τ_{11} és τ_{22} - a Burgers-anyagmodell időállandói

T_1 és T_2 - a Burgers-anyagmodell időállandói

t - használati idő

β_1, β_2 , - függvény paraméterei

$y_{\text{töm}}(t_0)$ - t_0 időpillanatban a tömítés terheletlen magassága

$y_{\text{rés0Pa,z}}$ - a záródási vonal z pontjában 0 Pascal nyomáson a tok- és a szárny távolságának az elsődleges tömítés síkjában mérhető távolság

$y_{\text{rés600Pa,z}}$ - a záródási vonal z pontjában 600 Pascal nyomáson a tok- és a szárny távolságának az elsődleges tömítés síkjában mérhető távolság

4. Mérésekkel igazoltam, hogy a nyílászárók működtetésük során azok koptató igénybevételeknek vannak kitéve. A kopás hatására kimutatható módon változik a tok és szárny közötti távolság. Az elvégzett nagyszámú ciklusos fárasztó vizsgálatok alapján meghatároztam a működési ciklusszám és szárnyelmozdulás függvénykapcsolatát, amely a következő formában írható le:

$$f(x) = 0,91 \cdot \left[\frac{x}{5884 + x} \right]$$

Ahol:

x - a működtetési ciklusszám

5. Egyedileg kifejlesztett mérőkamrával légáteresztési méréseket végeztem a nyomáskülönbség hatására a nyílászáró tok- és szárny részrendszerén keresztül létrejövő légmennyiség meghatározására. A rugalmas tömítés és a tok felületének távolsága

függvényében meghatároztam az egységnyi záródási réshosszra jutó légáteresztési függvénykapcsolatot, amely a következő formában írható le:

$$g(x) = 110,96 \cdot \left(1 - \exp(-1 \cdot ((0,98 \cdot x - 0,42)^2))\right)$$

Ahol:

x- a tömítés és a tok felülete között mérhető távolság

6. A megbízhatósági modell alapján készített szimulációs szoftveres elemzéssel meghatároztam, hogy a gyengén térhálós elasztomer tömítőanyaggal szerelt nyílászáró légzárási teljesítménye a nyitási-zárási igénybevételtől függően a használati idő növelésével aszimptotikusan tart egy minimális érték felé.

A DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

1. Szövérfi Tibor, Bencsik Balázs, Utassy Viktor, Dénes Levente: Beépített nyílászárók légzárásának helyszíni vizsgálata.
Brassó-Sopron Faipari Tudományos és Diákköri Konferencia: PhD konferenciakötet. Konferencia helye, ideje: Sopron, Magyarország, 2013.07.19 Győr: Palatia Kiadó, 2013. pp. 81-95. (ISBN:978-963-359-023-2)
2. Bencsik Balázs, Kovács Zsolt, Szövérfi Tibor, Dénes Levente: Stress Relaxation of Elastic Sealing Used for Windows. 4th International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies
Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2013.11.20-2013.11.22. Budapest: Óbuda University, p. &. (ISBN:&)
3. Bencsik Balázs, Szövérfi Tibor, Kovács Zsolt, Dénes Levente: A tok és szárny távolság változásának hatása a nyílászárók légzárási teljesítőképességére.
Brassó-Sopron Faipari Tudományos és Diákköri Konferencia: PhD konferenciakötet. Konferencia helye, ideje: Sopron, Magyarország, 2013.07.19 Győr: Palatia Kiadó, 2013. pp. 45-56. (ISBN:978-963-359-023-2)
4. Bencsik Balázs, Kovács Zsolt, Dénes Levente: A nyílászárók légzárási teljesítménycsökkenésének hatása a filtrációs hőveszteségre.
FAIPAR LXI:(4) pp. 5-11. (2013)
5. Bencsik Balázs, Szövérfi Tibor, Dénes Levente: Intelligent Window Sealing with Improved Air Tightness.
The Impact of Urbanization, Industrial and Agricultural Technologies on the Natural Environment : International Scientific Conference on Sustainable Development and Ecological Footprint. 400 p.
Konferencia helye, ideje: Sopron, Magyarország, 2012.03.26-2012.03.27. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó; Nyugat-magyarországi Egyetem, 2012. pp. 377-385. (ISBN:978-963-19-7352-5)
6. Bencsik Balázs, Dénes Levente, Szövérfi Tibor: Gap Independent Window Sealing With High Air Thightness Performance

The Impact of Urbanization, Industrial and Agricultural Technologies on the Natural Environment : International Scientific Conference on Sustainable Development and Ecological Footprint. 400 p.

Konferencia helye, ideje: Sopron, Magyarország, 2012.03.26-2012.03.27. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó; Nyugat-magyarországi Egyetem, 2012. p. eDOC. (ISBN:978-963-19-7352-5)

7. Bencsik Balázs, Kovács Zsolt, Dénes Levente: Az ablakok légzárési teljesítményének változása a környezeti hőmérséklet függvényében.
FAIPAR 60:(1) pp. 10-16. (2012)
8. Bencsik Balázs, Kovács Zsolt, Dénes Levente: Nyílászárók szerkezeti elemeinek hatása a teljesítményjellemzőkre I. rész. A rugalmas ütközések hatása az ablak légzárására
FAIPAR 59:(2-3) pp. 26-34. (2011)
9. Bencsik Balázs, Kovács Zsolt, Dénes Levente: A környezeti hőmérséklet hatása a nyílászárók légzárési teljesítményére
Brassó-Sopron Faipari Tudományos és Diákköri Konferencia. Konferencia helye, ideje: Sopron, Magyarország, 2011.07.19 Győr: Palatia Kiadó, 2011. p. &. (ISBN:978-963-9883-79-6)
10. Bencsik Balázs, Kovács Zsolt, Dénes Levente: The effect of structural elements on windows performance characteristics: Part1. The influence of sealing's on air tightness
Proceedings of International Conference „Wood Science and Engineering ” – ICWSE 2011. Konferencia helye, ideje: Brasov, Románia, 2011.11.02-2011.11.04.pp. 467-473.
11. Bencsik Balázs, Kovács Zsolt, Dénes Levente: Sealings Influence on Window Air Tightness Performance
PRO LIGNO 7:(4) pp. 83-91. (2011)
Bencsik Balázs, Kovács Zsolt, Dénes Levente: Performance characteristics of windows in the course of their service life.
Proceedings of 2nd International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2011.11.21-2011.11.22. Budapest: Óbudai Egyetem, 2011. p. CD. (ISBN:978-615-5018-23-7)