

Doktori (PhD) értekezés  
Nyugat-magyarországi Egyetem  
Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar  
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola  
Vezető: Prof. Dr. Tolvaj László egyetemi tanár

Doktori program: Fafeldolgozási technológiák  
Programvezető: Kovács Zsolt egyetemi tanár, CSc  
Tudományág: anyagtudomány és technológiák

**FA ABLAKOK LÉGZÁRÁSI TELJESÍTŐKÉPESSÉGÉNEK  
MEGBÍZHATÓSÁGI VIZSGÁLATA**

Készítette: Bencsik Balázs

Témavezető: Dr. Dénes Levente egyetemi docens

Sopron  
2014

**FA ABLAKOK LÉGZÁRÁSI TELJESÍTŐKÉPESSÉGÉNEK  
MEGBÍZHATÓSÁGI VIZSGÁLATA**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében  
\*a Nyugat-Magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák  
Doktori Iskolája Fafeldolgozási technológiák programja

Írta:

Bencsik Balázs

\*\*Készült a Nyugat-Magyarországi Egyetem Doktori Iskola Cziráki József  
Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskolája Fafeldolgozási technológiák  
programja keretében

Témavezető: Dr. Dénes Levente  
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....  
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton ..... % -ot ért el,  
Sopron, .....

.....  
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr. ....) igen /nem

.....  
(aláírás)

Második bíráló (Dr. ....) igen /nem

.....  
(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr. ....) igen /nem

.....  
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján.....% - ot ért el  
Sopron,.....

.....  
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....  
Az EDT elnöke

## KIVONAT

A nyílászárók használatából, valamint a környezeti hatásokból adódó szabályozatlan légcseré 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.

Jelen disszertációban bemutatott kísérleti eredmények feltárják, és pontos képet adnak 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 termék hibamentes működését. Ennek érdekében először meghatározom a szerkezeti elemek elhasználódásából adódó légzárási teljesítményváltozás időbeni alakulását. A degradációs folyamatok ismeretében kidolgozásra került két megbízhatósági modell, amelyek számításba veszik a működés során becsült valószínűséggel bekövetkező környezeti, valamint használatból származó degradációs hatások mértékét. A modell alapján megvalósult számítógépes szimulációs szoftver segítségével a nyílászárók karbantartása tervezhetővé vált, amelynek eredményeként növelhető a termék élettartama és a légzárási teljesítmény megbízhatósága is.

## **ABSTRACT**

Elimination of the uncontrolled increase in air filtration through windows due to repeated operation and adverse environmental effects is important from both the economical and the comfort-related points of view. From the points of energetics it is not only the losses due to unwanted ventilation that should be reduced; the uncontrolled infiltration of cold air cools down the gap region creating thermal bridging. The cold surfaces and air flow contribute to the formation of local discomforts.

The experimental results of the present dissertation give a clear picture about the influence of structural details on the air permeability of windows. The first step in enhancing the reliability of the air tightness of windows is to create a reliability model capable of predicting the probability of satisfactory performance of a window as a function of operating time, based on the functional parameters defined in the course of product planning. For this in view I first analysed the changes in performance as a result of the wear of respective structural parts as a function of time. On the basis of the knowledge on these degradation processes two models were constructed which take into account the degrading effect of the random environmental and operational impacts in the course of the service life of a window. The simulation software built on the model makes it possible to plan the maintenance of windows in the due time, contributing to the increase of the life of the product and the reliability of the windows' air tightness.

## TARTALOMJEGYZÉK

<b>Tartalomjegyzék .....</b>	<b>5</b>
<b>Bevezetés .....</b>	<b>8</b>
<b>1. A kutatómunka aktualitása, célkitűzések.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Az épületek energiafelhasználása, energiatanúsításának helyzete Magyarországon .....</b>	<b>12</b>
2.1. Az épületek energiafelhasználásának jogi szabályozása .....	12
2.2. Épületek fűtési energiahatékonyságának helyzete Magyarországon .....	13
<b>3. Az épület ablakszerkezeteinek teljesítőképességi jellemzőinek bemutatása ....</b>	<b>15</b>
3.1. Nyílászárók transzmissziós hőátbocsátása.....	15
3.2. Az ablakok légzárási teljesítőképességi jellemzője .....	17
3.3. Az ablakok légzárási teljesítményének és az épület óránkénti légcseré számának kapcsolata .....	19
<b>4. Az épületek nyílászáróin keresztül kialakuló hőtranszport folyamatok jellemzése .....</b>	<b>22</b>
4.1. A nyílászáró szerkezetek légáteresztése, és hatása a transzmissziós energiaáramra.....	22
<b>5. A nyílászárók teljesítményjellemzőinek hatása az ember köz- és komfortérzetére.....</b>	<b>26</b>
5.1. Az ablakok légzárási teljesítményének hatása a belső levegő minőségére és a hőérzettel kapcsolatos huzathatásra. ....	26
<b>6. Műszaki termékek jellegzetes meghibásodási formái, műszaki megbízhatóságuk.....</b>	<b>30</b>
6.1. Károsodási formák és azok következményei .....	30
6.2. Műszaki termékek megbízhatóságága és az általánosan elterjedt működési élettartam elemzési módszerek .....	32
<b>7. A korszerű hőszigetelt ablakok meghibásodási lehetőségei és azok következményei .....</b>	<b>38</b>
<b>8. Nyílászárókon végzet előzetes laboratóriumi és helyszíni légzárási vizsgálatok .....</b>	<b>43</b>
8.1. Nyílászáró szerkezetek légzárásának laboratóriumi és helyszíni vizsgálati módszerei .....	43
8.2. Első típusvizsgálatot követően raktározott nyílászárók laboratóriumi légzárási vizsgálata és hőveszteség számítása .....	45
8.2.1. A légzárási vizsgálatok kiértékelése.....	46
8.3. A beépített nyílászárók helyszíni légzárási vizsgálata mobil mérőkamrával ....	50

8.3.1.	A helyszíni légzárasi vizsgálatok eredményeinek bemutatása .....	51
8.4.	A raktározás utáni és a helyszíni vizsgálatok összefoglalása .....	55
<b>9.</b>	<b>Nyílászárók szerkezeti elemeinek és beállításainak hatása a légzárasi teljesítőképesség kezdeti értékére.....</b>	<b>57</b>
9.1.	A rugalmas ütközések elhelyezkedésének hatása a légzárasi teljesítőképességre .....	57
9.1.1.	A rugalmas ütközések hatásainak kiértékelése a légáteresztési értékek osztályba sorolásával .....	58
9.2.	A tok- és a szárny távolságának változása a vasalatállítás következtében és hatása nyílászárók légzárasi teljesítőképességére .....	61
9.2.1.	A vasalatállítás hatásának kiértékelése a légáteresztési értékek osztályba sorolásával .....	62
9.3.	A tok és szárny távolságának felmérése .....	63
9.4.	A környezeti hőmérséklet hatása a nyílászárók légáteresztési teljesítőképességére.....	66
9.4.1.	A vizsgálat módszerének bemutatása .....	66
9.4.2.	A légzárasi vizsgálatok eredményeinek kiértékelése .....	67
<b>10.</b>	<b>A nyílászárók légzárasi teljesítőképességének megbízhatóságát becsülő modellek.....</b>	<b>71</b>
10.1.	A légzárasi teljesítőképesség becslése a tömítőanyagban kialakuló feszültség alapján (1. MODELL).....	71
10.2.	A légzárasi teljesítőképesség becslése a tömítőanyag viszkózus deformációja alapján (2. MODELL).....	73
10.2.1.	A tömítés terheletlen magasságának modellezése.....	78
<b>11.</b>	<b>A második megbízhatósági modell alkalmazásának bemutatása.....</b>	<b>84</b>
11.1.	A kerület mentén 0 Pascal nyomáson az elsődleges tömítés síkjában a tok- és a szárny távolságának várható értéke (yrés0Pa;z) és szórása. ....	84
11.2.	A mintatest vasalat-rendszerének koptató vizsgálata nyitási-csukási ciklusos fárasztással .....	86
11.2.1.	A koptató vizsgálatok eredményeinek kiértékelése.....	87
11.3.	A fárasztási ciklusszám és a működési élettartam kapcsolata .....	91
11.4.	A rugalmas tömítőanyag reológiai viselkedésének vizsgálata laboratóriumi mérésekkel.....	92
11.4.1.	A vizsgálat során alkalmazott anyagok és módszerek bemutatása.....	92
11.4.2.	A relaxációs vizsgálatok eredményeinek kiértékelése .....	94
11.5.	A hézagzárasi mutató érték és a légáteresztés közötti függvénykapcsolat meghatározása .....	96
11.5.1.	A vizsgálat során alkalmazott anyagok és módszerek bemutatása.....	96
11.5.2.	A légáteresztési vizsgálatok kiértékelése .....	98

<b>12. A megbízhatósági modell numerikus alakjának meghatározása .....</b>	<b>103</b>
12.1. A numerikus modell megoldásához kifejlesztett szimulációs szoftver ismertetése.....	105
12.2. A számítógépes program működésének bemutatása a kiválasztott nyílászáró vizsgálati eredményeinek felhasználásával.....	107
<b>13. A kutatómunka eredményeinek összefoglalása.....</b>	<b>112</b>
<b>14. Tézisek .....</b>	<b>114</b>
<b>15. Irodalomjegyzék .....</b>	<b>118</b>
<b>16. Mellékletek .....</b>	<b>124</b>

## BEVEZETÉS

Az ablakok szerkezetét az idők folyamán folyamatosan módosították a jobb technikai jellemzők érdekében, valamint a kor építészeti stílusának és az építészeti megoldásoknak megfelelően. Napjainkban az esztétikus megjelenés mellett a használhatóság, de leginkább a jó hang-, hő- és légszigetelés áll a tervezők, valamint a felhasználók igényeinek középpontjában.

Az egyre növekvő energiaáraknak, és az egyre szigorodó energetikai direktíváknak köszönhetően mind több figyelmet fordítunk épületeink energia felhasználására. Az európai épületenergetikai direktíva (91/2002/EK) megköveteli minden európai uniós tagországtól az épületek energiahatékonyságát igazoló tanúsító rendszer létrehozását. A Direktívában megfogalmazott szándék egyértelmű, csökkenteni az épületek energiafogyasztását, a fennmaradó energiaigény lehető legnagyobb hányadát megújuló energiával fedezni, előnyben részesíteni a kizárólag hőenergiát előállító rendszerekkel szemben a kapcsolt energiatermelésből származó hőenergiát, és a lehetőségek határáig mérsékelni a villamos energia fogyasztását. A Direktívával kapcsolatos legmagasabb szintű hazai szabályozás a 7/2006.(V.24.) rendelet, amely közvetlenül szabályozza az új, illetve már meglévő, de felújításra szoruló, legalább 1000 m<sup>2</sup> fűtött alapterületű épületek energetikai jellemzőire vonatkozó minimum követelmények alkalmazását is. Az energiahatékonyság tekintetében egyre növekvő elvárások, és az egyre emelkedő energiaárak a kutatókat és építőanyag gyártókat - így a nyílászáró gyártókat - is egyre kedvezőbb hőátbocsátási értékű ( $U_w$ ), és légtömörségű termékek kifejlesztésére sarkalja (Sieberath 2010). Egy épület energiahatékonysága annál nagyobb, minél kevesebb hőt, vagy légkondicionálás esetében hideg levegőt veszít. Ezt a falak, a tető és az ablakok hőszigetelésének és légzárásának fokozásával lehet hatásosan befolyásolni. Az energiahatékonyság mértékét a hűtő/fűtő energiaszükséglet testesíti meg. Az épületgépészeti méretezés során a tervezőnek az épület jó energiahatékonysága mellett törekednie kell arra, hogy az MSZ CR 1752:2000 hatályos nemzetközi szabványban meghatározott, adott kategóriába tartozó komfortkritériumoknak is megfeleljen. A két igényt kompromisszumok nélkül a legtöbb esetben csak komoly épületfizikai tervezőmunkával és épületgépészettel lehet maradéktalanul kielégíteni (Nicol, 2009), (Szánthó, 2007). Az épületek nyílászáró szerkezetei funkciójuknak megfelelően kapcsolatot teremtenek a külső tér és a zárt komforttér között. A kapcsolat minősége mind az épület energiahatékonyságára, mind pedig a komforttérben tartózkodó személyek komfortérzetére hatással van, amit a műszaki gyakorlatban az ablakok teljesítőképességi jellemzőivel jellemezhetünk.

Az építési célú termékek forgalomba hozatalának általános szabályait az Európai Unióban már régóta a 89/1006 EGK Építési Termék Irányelv, Magyarországon pedig, az 1997. évi Építési Törvény és végrehajtási rendelete szabályozza.

A homlokzati nyílászárókra vonatkozó előírásokat az MSZ EN 14351:2006+A1:2010 nemzetközi és magyar követelményszabvány tartalmazza. A külső homlokzati ablakok,



erkélyajtók, tetőablakok és bejárati ajtók forgalomba hozatalához a termékeket CE-jelöléssel kell ellátni, amihez a gyártónak megfelelőségi nyilatkozatot is mellékelnie kell. A hatályos MSZ EN 14351:1-2006+A1:2010 harmonizált termékszabvány a homlokzati szerkezeteket érő hatások alapján 23 teljesítőképességi jellemzőt sorol fel. A nyílászárók teljesítőképességi jellemzőinek követelményértékeit a felhasználás függvényében országokénti nemzeti szabványok rögzítik. A nyílászárók teljesítőképességi jellemzőinek értékét a forgalomba hozataluk előtt terméktípusonként laboratóriumi mérésekkel és/vagy numerikus módszerekkel ellenőrzik. Amennyiben a gyártó rendelkezik üzemi gyártásellenőrzési rendszerrel, abban az esetben elég terméktípusonként csak egyszer bevizsgáltatnia a termékét. A nyílászáró helyszíni beépítését követően azonban - a passzívházaktól eltekintve - nem történik meg a követelményértékek teljesülésének ellenőrzése (Debreczy, 2010). A mindennapos használatból származó hatások, a nyílászárók szerkezetében károsodást okoznak, ami a kezdeti teljesítőképességi értékeket kedvezőtlen irányba változtatják. A megváltozott értékek pedig növekvő energiafelhasználáshoz és kellemetlen komfortérzet kialakulásához vezetnek. Ennek elkerülése végett a gyártóknak törekedniük kellene arra, hogy termékeik a tervezett élettartam alatt kellő biztonsággal teljesítsék a kezdeti követelményértékek szintjét.

## 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 (Urbikain, 2009). Az épületek légtömörségének és a szükséges óránkénti légcseré menyniségének meghatározásával kapcsolatos kutatásokból kiderül, hogy az újonnan beépített és jól záródó korszerű nyílászárókon keresztül az alacsony külső-belső oldali nyomáskülönbség hatására megvalósuló filtrációs energiavesztés töredéke a szerkezet transzmissziós hővesztésének, és az épület egyéb részein keresztül távozó filtrációs energiavesztésnek (Ridley, 2012), (Emery, 2006). Emellett a magas légtömörséget biztosító nyílászárókon keresztül nem biztosítható a megfelelő komfortérzethez szükséges frisslevegő utánpótlás sem (Kvistgaard, 1990), (Andersen, 2007), (Poroszlay, 2007). 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 (Orme, 2001), (Wallace, 2002). Több, valós körülmények között elvégzett kutatás is rámutatott arra, hogy a valós energiafogyasztás közel 50%-kal meghaladhatja a becsült fogyasztás mértékét (Fabi, 2012). 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 eltéréseiből adódik (Branco, 2004). Ennek tudatában kezdtük el a jellemzően épület felújítási munka során beépített és eredetileg kiváló légzárási teljesítménnyel rendelkező nyílászárók pár éves használatát követő állapotfelmérést. A felmérés eredményeként az összes vizsgált nyílászáróról elmondható, hogy a kezdeti légzárási teljesítmény értékében jelentős csökkenés következett be, amely hozzájárulhat a tervezett energiavesztés és a tényleges energiavesztés 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 légzárási teljesítőképességi jellemző megbízhatóságának fokozása. Az utóbbi évtizedekben a fa ablakok helyett egyre nagyobb számban kerülnek beépítésre 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 légzárási értékének megbízhatóságával foglalkozom részletesen, mivel a légzárási 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 (Haldi, 2009), (Nicol, 2004), (Königstein, 2006). A nyílászárók használatából, valamint a környezeti hatásokból adódó szabályozatlan légcserre növekedés megakadályozása mind gazdaságilag, mind pedig komfortérzeti szempontból is kiemelt fontosságú feladat (Inkarojrit, 2004). 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 (Baker, 1996).

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 algoritmusai alapján megvalósuló számítógépes szimulációs szoftver segítségével a nyílászárók karbantartása tervezhetővé válik, amelynek eredményeként növelhető a termék élettartama és a légzárási teljesítmény megbízhatósága is.

## **2. AZ ÉPÜLETEK ENERGIAFELHASZNÁLÁSA, ENERGIATANÚSÍTÁSÁNAK HELYZETE MAGYARORSZÁGON**

### **2.1. Az épületek energiafelhasználásának jogi szabályozása**

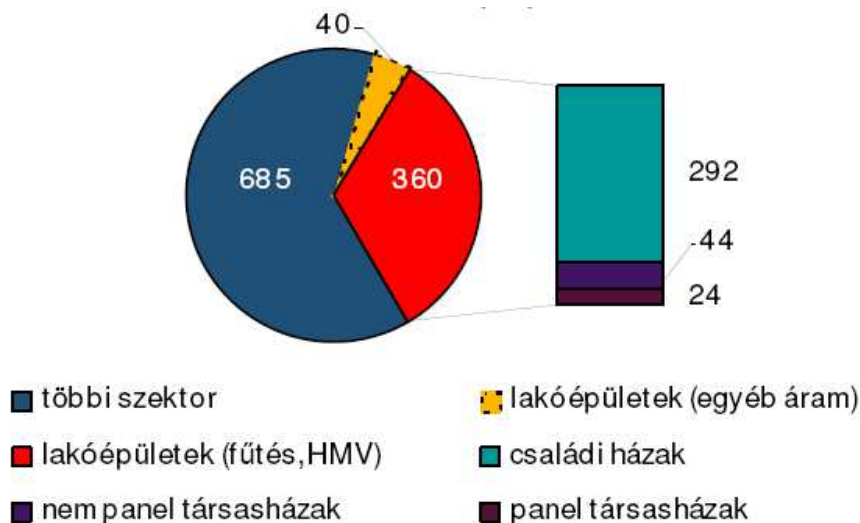
Legújabb kutatási adatok szerint az emberek 85-90%-ka életük nagy részét zárt terekben tölti. A zárt terek alapvető funkciója, hogy megvédje a benntartózkodókat a külső környezeti hatásoktól úgy, hogy a zárt terek biztosítják számukra mind a fizikai, mind pedig a szellemi munkavégzéshez, pihenéshez és kikapcsolódáshoz szükséges optimális környezeti paramétereket (Bánhidi, 2000). Az épületben kialakuló optimális termikus környezet eléréséhez a mérsékelt égövön a legtöbb esetben energia bevitelére van szükség. Az épületek hővédelmi előírásait abból a célból alkották meg, hogy csökkentsék az épületek energiafogyasztását úgy, hogy az épületbe betáplált energiát a lehető legnagyobb hatásfokkal használják fel. Magyarországon az első hővédelmi szabvány (ME 30-65) 1965-ben lépett hatályba, amely csak a falszerkezetek hőátbocsátási tényezőjének maximális értékét rögzítette. A következő szabvány 1979-ben jelent meg (MSZ 04-140/2:-79), amely már az ablakokra legfeljebb  $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  hőátbocsátási tényező értéket írt elő. A szabvány átdolgozott, 1985-ös változata is legfeljebb  $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  hőátbocsátási tényezőt engedélyezett. Fontos megemlíteni, hogy ebbe az értékbe még beszámították a filtráció hatását is.

Az Európai Parlament és Tanács 2002. december 16-án hagyta jóvá az épületek energiafelhasználását szabályozó 91/2002/EK Energy Performance of Buildings” direktívát. A direktíva 2003. január 4-én jelent meg az Európai Közösségek hivatalos lapjában és hatályba lépése is ezen a napon történt. A direktíva hazai szabályozását tartalmazó 7/2006.(V.24.) TNM rendelet 2006. szeptember 1.-jén lépett hatályba. A rendelet három szinten szabályozza az újonnan épülő és a felújítás előtt álló épületek energiafelhasználását. A szabályozás legfelső szintje az összesített energetikai jellemző követelményértékének teljesülése, ami az épület rendeltetészerű használatának feltételeit biztosító épületgépeszeti rendszerek egységnyi fűtött térfogatra vonatkozó, primer energiában kifejezett,  $\text{kWh}/\text{m}^3$ -a mértékegységű éves fogyasztása. Az összesített energetikai jellemző tartalmazza a fűtési, légtechnikai, meleg vízellátási és a világítási rendszerek fogyasztását is. A szabályozás következő szintje az épület fajlagos hőveszteségének meghatározása. Ez részben azért szükséges, mert minden esetben létezik az összesített energetikai jellemzőre vonatkozó követelmény, illetve ezzel biztosítható, hogy az épület önmagában is garantáljon egy elfogadható energetikai minőséget. A fajlagos hőveszteségtényező az összesített energetikai jellemzőtől eltérően csak az épület felület/térfogat arányától függ, az épület rendeltetésétől nem. Ezért a hőveszteségtényező nem veszi figyelembe a szellőzési veszteségeket sem, ami a benntartózkodók számától és tevékenységi aktivitásuktól függően széles határok között mozoghat. Ennek megfelelően a fajlagos hőveszteség tényező a transzmissziós

hőáramok és a fűtési idény átlagos feltételei mellett kialakuló sugárzási hőnyereség hasznosított hányadának algebrai összege egységnyi belső-külső hőmérsékletkülönbségre és egységnyi fűtött térfogatra vetítve. A szabályozás harmadik szintjét az épülethatároló szerkezetek hőátbocsátási tényezőjének meghatározása jelenti. A rendelet előírja az épület határoló szerkezeteinek lehetséges maximális hőátbocsátási tényező értékét. A nyílászárókra a korábbi  $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  érték helyett jóval szigorúbb,  $1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  értéket ír elő. A jövőben várható, hogy az épületek energiahatékonyságát célzó újabb szabályozások a nyílászárók megengedett hőátbocsátási tényezőjét még kisebb értékre redukálják. A 7/2006.(V.24.) TNM rendelet a hőátbocsátási tényezőktől eltérően nem határoz meg határértéket az épületek légcsereszám értékére, azonban a fűtési rendszerrel fedezhető nettó energiaigény számításánál figyelembe veszi a filtrációs energiavesztést is.

## 2.2. Épületek fűtési energiahatékonyságának helyzete Magyarországon

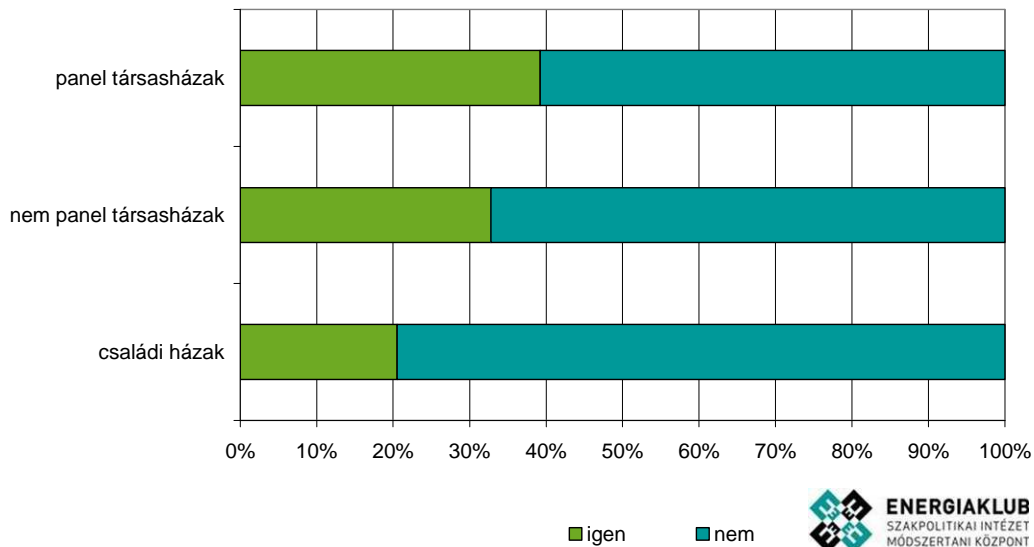
Magyarországon a fűtés-hűtés és a meleg víz előállítására felhasznált energia az országos primerenergia 33%-a (360 PJ). Ennek döntő részét, 81%-át a családi házak energiafogyasztására használjuk fel.



1. ábra Magyarország primerenergia-felhasználás megoszlása szektorok között. [Forrás: Energiaklub Szakpolitikai Intézet]

Magyarország épületállományának energiafogyasztása az EU-15 országok átlagának kétszerese, ami a lakóépületek kedvezőtlen szerkezeti adottságaira, és a korszerűtlen gépészeti rendszerekre vezethető vissza (Prohászka 2007). Amennyiben a háztartások minden rendelkezésre álló energiahatékonysági korszerűsítést megtennének, a felhasznált energia jelenős részét, több mint 42%-át, (152 PJ-t) megtakaríthatnák. Magyarországon a háztartások 66%-a családi házakban, 14% -a panel és 20%-a nem

panel társasházakban él. Az összes háztartás mindössze 24%-a rendelkezik korszerű nyílászárókkal, és 25%-uk hajtott végre külső hőszigetelést az épületen.



2. ábra. Különböző épülettípusokon végrehajtott ablakcserék százalékos arányban. [Forrás: Energiaklub Szakpolitikai Intézet]

Elsősorban a családi házakban rejlenek hatalmas megtakarítási lehetőségek – ennek oka, hogy a családi házak jellemzően jóval nagyobb alapterületűek, mint a társasházi lakások, és arányaiban sokkal nagyobb felületen veszítenek hőt. Az Energiaklub Szakpolitikai Intézet felméréséből látható, hogy az épületek nyílászáróinak cseréje legnagyobb százalékban a panel társasházakban valósult meg, bár ott is csak közel 40%. Legrosszabb a helyzet a családi házak esetében, ahol csupán 21%-os az épületek nyílászáróinak cseréje. Hasonló tendenciát mutat a különböző lakóháztípusok külső falazat szigetelésének aránya. Mind a rossz hőszigetelésű nyílászárók, mind pedig a külső falazat szigetelésének a hiánya a családi házak energiahatékonyására van leginkább negatív hatással, mivel jellemzően a családi házak rendelkeznek a legnagyobb szabad épülethéjjal és a négyzetméterre eső fajlagos nyílászáró felületekkel.

### 3. AZ ÉPÜLET ABLAKSZERKEZETEINEK TELJESÍTŐKÉPESSÉGI JELLEMZŐINEK BEMUTATÁSA

#### 3.1. Nyílászárók transzmissziós hőátbocsátása

Az ablakok egyik lényeges funkciója, hogy megakadályozza a hő áramlását az épületek belső komforttere és a külső környezet között. Mivel az ajtók, ablakok kis szerkezeti vastagságuk, valamint nyitható szerkezetük és átlátszó felületük miatt hőtechnikai szempontból az épület gyenge pontjainak számítanak. A fejlesztések arra irányulnak, hogy korszerű anyagokkal, szerkezetekkel és kiegészítésekkel a tömör határoló szerkezetek hőtechnikai jellemzőihez közeli értékek legyenek elérhetők (Kovács, 2003), (Specht, 2010). Hőtechnikai szempontból az ablakszerkezetek fejlesztése a többrétegű, nemesgázzal töltött, low-E réteggel ellátott üvegszerkezetek kialakítása felé vezetett (Elek, 2010), (Elek, 2011). A low-E réteggel jelentősen csökkenthető az üvegszerkezet hőátbocsátása, mivel a transzmissziós hőátbocsátás 60%-át az üvegfelületek között létrejövő sugárzásos hőátvitel teszi ki (Széll, 2001).

Az energiaáram a fűtött térből transzmisszióval és filtrációval is távozik, azonban jelen dolgozatban - a kutatómunka célkitűzésének megfelelően - csak a filtrációs hővesztéssel foglalkozom részletesebben. Meg kell említeni, hogy hőáram a külső térből a komforttér irányába is létrejön, pl. a napsugárzásból származó sugárzásos, vagy más néven szoláris hőnyereség formájában, amivel az épületek energetikai tervezésénél, illetve minősítésénél számolni kell. A helyiségbe sugárzással jutó energiaáram valamely belső felületre esik, ahol nagyobb része azonnal, másik része pedig gyakorlatilag néhány visszaverődés után elnyelődik (Szabó, 1982). Az elnyelt energiától felmelegedő felületek hőátadással, valamint saját hőmérsékletüknek megfelelő hullámhosszon való sugárzással melegítik környezetüket (Bánhid, 2000).

Téli időszakban az üvegezett nyílászáró szerkezeten keresztül a külső-és belső tér közötti hőmérsékletkülönbség hatására létrejövő transzmissziós energiaáramot hagyományosan az alábbi összefüggéssel számíthatjuk:

$$Q_r = A \cdot U_w \cdot (t_i - t_e) \quad [\text{W}] \quad (1)$$

ahol:

$Q_r$  - energiaáram [W]

$A$  - az ablak teljes felülete [ $\text{m}^2$ ]

$U_w$  - az ablak hőátbocsátási tényezője [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]

$t_i$  - a belső levegő hőmérséklete [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$t_e$  - a külső környezet hőmérséklete [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Az ablak, mint összetett szerkezet hőátbocsátási tényezőjének számításához a következő képletet alkalmazzuk az EN ISO 10077-1:2007 szabvány szerint:

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (2)$$

ahol:

$U_w$  - az ablak hőátbocsátási tényezője

$A_g$  - az üvegezett felület nagysága [ $\text{m}^2$ ]

$U_g$  - az üvegezés hőátbocsátási tényezője [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]

$A_f$  - a tok és szárnykeret vetületi felülete [ $\text{m}^2$ ]

$U_f$  - a tok és szárnykeret átlagos hőátbocsátási tényezője [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]

$l_g$  - az üvegezett keretkitöltés szegélyének hossza [m]

$\psi_g$  - az üvegezett keretkitöltés vonalmenti hőátbocsátási tényezője [ $\text{W}/(\text{mK})$ ]

A (2) összefüggés számításához ismernünk kell az egyes szerkezeti elemek hőátbocsátási tényezőjét ( $U_g, U_f$ ) amiket általánosan a következő képlet segítségével számolunk:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + R + \frac{1}{\alpha_i}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (3)$$

ahol:

$\alpha_e$  és  $\alpha_i$  - a külső és belső ablakfelület hőátadási tényezője [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]

$R$  - hővezetési ellenállás [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ]

Látható, hogy minél nagyobb a szerkezet hővezetési ellenállása, valamint minél kisebb a hőátadási tényezője annál kisebb lesz a szerkezeti elem hőátbocsátási tényezője, ami kisebb energiaáramot eredményez. A komfortteret határoló szerkezetek - mint amilyenek az ablakok is - felületi hőmérsékletének alakulását a belső levegő hőmérsékletéhez képest a hőátbocsátási tényező határozza meg. A stacioner hőáram kialakulását követően a belső teret határoló szerkezetek felületi hőmérséklete és a belső tér léghőmérséklete közötti hőmérsékletkülönbséget a (3) összefüggésből levezethetően a következő összefüggéssel határozzuk meg:

$$\Delta t_i = \frac{1}{\alpha_i} \cdot U_w \cdot (t_i - t_e) \quad [^\circ\text{C}] \quad (4)$$

ahol:

$\Delta t_i$  - a belső tér levegőjének és az ablak belső felületének hőmérsékletkülönbsége

$\alpha_i$  - a belső ablakfelület hőátadási tényezője [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]

$U_w$  - az ablak hőátbocsátási tényezője [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]

$t_i$  - a belső levegő hőmérséklete [ $^\circ\text{C}$ ]

$t_e$  - a külső környezet hőmérséklete [ $^\circ\text{C}$ ]



Az összefüggés összetett szerkezetek – ilyenek az ablakok is - esetében csak formálisan értelmezhető, mivel az  $U_w$  egy átlagos érték, ami a szerkezet egyes elemeinek hőátbocsátási tényezőjéből adódik. Ennek megfelelően a számított érték a hely függvényében fog változni.

A hatályos 7/2006.(V.24.) TNM rendelet szerint az épületek nyílászáróinak hőátbocsátási tényezőjének értéke maximum  $U_w=1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  lehet, amíg a határoló falak hőátbocsátási tényezőjét  $U=0,45 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  értéken maximalizálták. A jövőben ezen a határértékek csökkentése várható. Még a passzívházak nyílászáróitól elvárt kiemelkedően alacsonynak számító  $U_w=0,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  érték is közel a duplája külső falazat követelményértékének. Alacsony hővezetésű anyagok felhasználásával a falazatok eredő hőátbocsátási tényező értékét könnyedén  $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  érték alá lehet csökkenteni.

### 3.2. Az ablakok légzárési teljesítőképességi jellemzője

Az ablakokat méretüktől, terepszint feletti magasságuktól és tájolásuktól függően az év különböző időszakaiban más-más szélhatások érik. Ez a hatás az ablakfelület síkja és a szél iránya által bezárt szögtől függően különböző mértékben változhat. A nyílászáró beépítési és működési rései meghatározó szerepet játszanak az épület légtömörségének szintjében (Stavarakakis, 2011) (Zöld, 1999). A hézagrendszer tulajdonságai a vízzárást is befolyásolják, így a légzárás és a vízzárás rokon feltételeket is követel (Kovács, 1989). A két jellemző azonban nem kezelhető azonos módon, ugyanis a gyakorlat azt mutatja, hogy ahol bejön a levegő, nem mindig jön be a víz és fordítva. Egy nyílászáró légáteresztése alatt értjük az adott nyomáskülönbség hatására, időegység alatt a csukott ablak résein áthaladó levegő mennyiségét. Adott résen  $\Delta p$  nyomáskülönbség hatására átáramló levegő mennyisége az alábbi empirikus összefüggéssel számítható (Ridley, 2006), (Provan, 1986), (Klems, 1983):

$$L = C \cdot (\Delta p)^n \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (5)$$

ahol:

- L - az ablakszerkezet résein keresztül létrejövő (in-, vagy ex-) filtrációs levegő tömegárama [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
- C - légáteresztési tényező (áramlási koefficiens) [ $\text{m}^3/\text{h}, \text{m}, (\text{Pa}^n)$ ]
- $\Delta p$  - az ablakszerkezet két oldala közti nyomáskülönbség [Pa]
- n - áramlási hatványkitevő

A légáteresztést befolyásolja az ütközési rés áramlási ellenállásának megváltozása a nyomáskülönbség hatására, ami a szárnynak a tokhoz viszonyított elmozdulásából adódik. Lényegében arról van szó, hogy az (5) számú összefüggésben szereplő légáteresztési tényező „C” értéke is a  $\Delta p$  nyomáskülönbség függvénye, mivel nagyobb nyomásértékeken a tok és a szárny deformációja nagyobb réseket eredményez.

A valóságban az ablak két oldala között kialakuló nyomáskülönbség a szél torlónyomásából és a levegő sűrűségkülönbségéből tevődik össze (Reis, 2007).

A szél sebességéből származó felületi torlónyomás alapértékét az MSZ EN 1991-1-4:2007-es szabvány szerinti képlettel határozhatjuk meg:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad [\text{Pa}] \quad (6)$$

ahol:

$\rho$  - a levegő sűrűsége [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v_b$  - a szélesebbesség alapértéke [ $\text{m/s}$ ]

A szélesebbesség alapértékét a következő összefüggésbe történő behelyettesítéssel számíthatjuk:

$$v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0} \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

ahol:

$C_{dir}$  - iránytényező, szabvány szerinti értéke  $C_{dir}=0,85$

$C_{season}$  - évszaktényező, szabvány szerinti értéke  $C_{season}=1$

$V_{b,0}$  - szélesebbesség kiindulási alapértéke [ $\text{m/s}$ ], Magyarországon a szabvány szerinti értéke  $V_{b,0}=23,6 \text{ m/s}$

A szél torlónyomása az épületet körbevevő területnek a beépítettségi szintjétől és az épület magasságától is függ (Bangalee, 2012). Az épület nyílászáróin még teljesen szélcsendes időben is kialakul nyomáskülönbség, ami a különböző hőmérsékletű levegő sűrűségkülönbségéből adódik (Szabó, 1982), (Becker, 1979), (Jeong, 2008). A sűrűségkülönbségből származó nyomáskülönbség számítására a következő összefüggést használhatjuk:

$$\Delta p = (\rho_e - \rho_i) \cdot \Delta h \cdot g \quad [\text{Pa}] \quad (8)$$

ahol:

$\Delta p$  - nyomáskülönbség [ $\text{Pa}$ ]

$\rho_e$  - alacsonyabb hőmérsékletű levegő sűrűsége [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho_i$  - magasabb hőmérsékletű levegő sűrűsége [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\Delta h$  - magasság különbség [ $\text{m}$ ]

$g$  - gravitációs gyorsulás [ $\text{m/s}^2$ ]

### 3.3. Az ablakok légzárási teljesítményének és az épület óránkénti légcseréje számának kapcsolata

Az épületek határoló szerkezetein keresztül szabályozott és szabályozatlan formában levegő áramlik, a hajtóerő a külső és belső tér közötti nyomáskülönbsége. Minél nagyobb a két tér közötti nyomáskülönbség, annál nagyobb lesz egy adott keresztmetszetű résen átáramlott levegő tömegárama. Épületfizikában az épületek helyiségeinek szellőzését légcsereszámval fejezik ki, mely megmutatja, hogy 1 óra alatt a szellőztetendő tér teljes légtérfogatának hányszorosa cserélődik ki. Angol nyelvterületen ACH (Air Changes per Hour) rövidítéssel jelölik. Az MSZ EN 13829:2001, valamint az ISO 9972:1996 szabványok jellemzően 50 Pa-os viszonyítási nyomáskülönbség mellett  $h^{-1}$  mértékegységben adják meg az értékét. Sherman nagyszámú mérései alapján igazolta, hogy a Blower Door eljárással 50 Pa-on mért óránkénti légcseréje értékét a következő összefüggéssel lehet a valós működési nyomáskülönbség mellett kialakuló légcserére NL (Normalized Leakage) átszámítani (Sherman, 1998):

$$NL = \frac{ACH_{50}}{20} \quad [h^{-1}] \quad (9)$$

Ahol:

NL - az épület óránkénti légcseréje száma valós működési nyomáskülönbség mellett  
 ACH<sub>50</sub> - óránkénti légcseréje 50 Pa nyomáskülönbség mellett Blower Doors eljárással

Ridley és munkatársa régi épületen végzett légzárási mérésekkel azt vizsgálta, hogy a régi ablakok cseréjével miként változik az épület óránkénti légcseréje. Az elméleti számításhoz a (10) összefüggésből indultak ki, miszerint az eredeti nyílászárókkal az épület teljes filtrációs légmennyisége (Ridley, 2006):

$$F_0 = X + NC_0(50)^{n_0} \quad [m^3/s] \quad (10)$$

ahol:

F<sub>0</sub> - az eredeti ablakokkal rendelkező épületre vonatkozó teljes filtrációs légcseréje mennyiség 50 Pa nyomáskülönbség mellett [ $m^3/s$ ]  
 X - az épület - nyílászáróinak kivételével- az egyéb réseken létrejövő filtrációs légmennyiség 50 Pa nyomáskülönbség mellett [ $m^3/s$ ]  
 N - az épület nyílászáróinak száma  
 C<sub>0</sub> - az eredeti nyílászáró légáteresztési tényezője (áramlási koefficiens)  
 n<sub>0</sub> - az eredeti ablakok réseinek áramlási hatványkitevője

Hasonlóképpen számítható az épület teljes filtrációja az új nyílászárók beépítését követően:

$$F_n = X + NC_n(50)^n \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (11)$$

ahol:

- $F_n$  - az új ablakokkal rendelkező épületre vonatkozó teljes filtrációs légcseremennyiség 50 Pa nyomáskülönbség mellett
- $X$  - az épület - nyílászáróinak kivételével- az egyéb résein létrejövő filtrációs légcseremennyiség 50 Pa nyomáskülönbség mellett
- $N$  - az épület nyílászáróinak száma
- $C_n$  - az új nyílászáró légáteresztési tényezője (áramlási koeficiens)
- $n$  - az új nyílászáró áramlási hatványkitevője

Felhasználva Sherman (9) összefüggését, felírható mind a régi, mind pedig az új ablakkal rendelkező épület óránkénti légcsereszámja:

$$NL_0 = F_0 \cdot \frac{3600}{20 \cdot V} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (12)$$

$$NL_n = F_n \cdot \frac{3600}{20 \cdot V} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (13)$$

Ahol:

- $NL_0$  - az eredeti nyílászárókkal rendelkező épület óránkénti légcsereszámja valós működési nyomáskülönbség mellett  $[\text{h}^{-1}]$
- $NL_n$  - az eredeti nyílászárókkal rendelkező épület óránkénti légcsereszámja valós működési nyomáskülönbség mellett  $[\text{h}^{-1}]$
- $F_n, F_0$  - az új és az eredeti ablakokkal rendelkező épületre vonatkozó teljes filtrációs légmennyiség 50 Pa nyomáskülönbség mellett  $[\text{m}^3/\text{s}]$
- $V$  - az épület teljes légtérfogata  $[\text{m}^3]$

A (12) és (13) egyenletekbe behelyettesítjük a (10) és (11) egyenleteket, majd átrendezve megkapjuk

az épület nyílászáróinak cseréjéből származó óránkénti légcsereszám különbséget (14).

$$\Delta NL = (NL_0 - NL_n) = 180 \cdot \frac{N}{V} \cdot [C_0(50)^{n_0} - C_n(50)^{n_n}] \quad [\text{h}^{-1}] \quad (14)$$

ahol:

- $\Delta NL$  - nyílászáróinak cseréjéből származó óránkénti légcsereszám különbség  $[\text{h}^{-1}]$
- $NL_0$  - az eredeti nyílászárókkal rendelkező épület óránkénti légcsereszámja valós működési nyomáskülönbség mellett  $[\text{h}^{-1}]$
- $NL_n$  - az eredeti nyílászárókkal rendelkező épület óránkénti légcsereszámja valós működési nyomáskülönbség mellett  $[\text{h}^{-1}]$

- N - az épület nyílászáróinak száma  
V - az épület teljes légtérfogata [ $\text{m}^3$ ]

Az összefüggés gyakorlati jelentősége abban rejlik, hogy ha ismert egy épület használt- és új nyílászáróinak légzárási teljesítménye, akkor a (9) összefüggéssel számított eredmény pontosságának megfelelően meghatározható a nyílászáró cseréjéből származó óránkénti légcsereszám változás ( $\Delta\text{NL}$ ) (Ridley, 2006). Természetesen ugyanúgy használható az új nyílászárók légzárási teljesítménycsökkenéséből adódó növekvő légcsereszám változás számítására is.

## 4. AZ ÉPÜLETEK NYÍLÁSZÁRÓIN KERESZTÜL KIALAKULÓ HŐTRANSPORT FOLYAMATOK JELLEMZÉSE

### 4.1. A nyílászáró szerkezetek légáteresztése, és hatása a transzmissziós energiaáramra

Az épületfizikai méretezés során azoknál a porózus falszerkezeteknél, amelyek öntött egyrétegűek vagy többrétegűek és szálal szigetelőanyag hőszigeteléssel készülnek, figyelemre méltó lehet a nagyobb nyomáskülönbség hatására kialakuló szabályozatlan légáramlás (Fekete, 1985). Ugyanez elmondható a nyílászáró szerkezetekről is, mivel azok légzárási tulajdonsága nagymértékben függ a tok és szárny közötti kapcsolat minőségétől.

A nyílászárók résein, valamint a különböző szerkezeti elemek építési hézagain átáramló levegő által okozott konvekciós hőáramot a következő összefüggéssel számítjuk:

$$\dot{Q}_{\text{filt}} = \dot{L} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t \quad [\text{W}] \quad (15)$$

ahol:

$\dot{Q}_{\text{filt}}$  - az építési hézagokon átáramló levegő hőárama [W]

$\dot{L}$  - térfogatáram [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$\rho$  - levegő sűrűsége [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c$  - levegő fajhője [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]

$\Delta t$  - hőmérséklet különbség [K]

A (14) és a (15) összefüggéseket felhasználva kiszámítható egy épület filtrációs energiavesztesége a nyílászárók légzárási teljesítőképességének függvényében:

$$\Delta \dot{Q}_{\text{filtráció}} = 180 \cdot N \cdot [C_0 (50)^{n_0} - C_n (50)^{n_n}] \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t \quad [\text{W}] \quad (16)$$

ahol:

$\Delta \dot{Q}_{\text{filtráció}}$  - a nyílászáró hézagain keresztül átáramló levegő hőáramváltozás [W]

$\rho$  - levegő sűrűsége [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c$  - levegő fajhője [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]

$\Delta t$  - hőmérséklet különbség [K]

$N$  - az épület nyílászáróinak száma

$C_0$  - az eredeti nyílászáró légáteresztési tényezője (áramlási koefficiens)

$C_n$  - az új nyílászáró légáteresztési tényezője (áramlási koefficiens)

A hézagokon keresztül áramló levegő a rés környezetében egy többdimenziós hőmérsékletmezőt alakít ki, ami hőáram változást okozva hőhidszerű jelenség kialakulását eredményezi. Ha hideg levegő áramlik a réseken keresztül a helyiségbe, a

légáram a rések felületét lehűti. Minél nagyobb a szerkezet hővezetési ellenállása, annál alacsonyabb lesz a rés melletti sarkok hőmérséklete és a helyiségbe bejutó levegő hőmérséklete. Ugyanis a jó hőszigetelés miatt kevesebb hő áramlik a rés síkjával párhuzamosan az elem bütüfelülete felé (Fekete, 1985). A porózus falszerkezetekben kialakuló filtrációs és transzmissziós együttes energiaáramát a következő differenciálegyenlet írja le. Az egyenlet ebben a formában:

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{dt}{dx} \right) + V \rho c \frac{dt}{dx} = 0 \quad (17)$$

ahol:

- x - helykoordináta [mm]
- $\lambda$  - határolószerkezet anyagának hővezetési tényezője [W/(mK)]
- V - egységnyi homlokzati felületen átáramoló levegő térfogat áram [m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>]
- t - hőmérséklet [°C]
- $\rho$  - levegő sűrűsége [Kg/m<sup>3</sup>]
- c - levegő fajhője [J/kgK]

A (17) egyenletet ablak illeszkedési résre egyrészt többdimenziós formában kellene felírni. Emellett az egyenlet olyan peremfeltételek meglétét feltételezi, melyek mellett az áramló levegő és a vele érintkező szerkezet hőmérséklete azonos. Mivel a nyílászárók esetében ezek a peremfeltételek maradéktalanul nem teljesülnek, ezért az egyenletet nyílászárókra nem szokták megoldani.

Az egységnyi felületre vonatkozó hőkapacitás-áramot, vagy más néven filtrációs hőátbocsátási tényező a következő összefüggéssel számítható:

$$G = \frac{\dot{V}}{A_{ny}} \cdot \rho \cdot c \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (18)$$

ahol:

- $\dot{V}$  - térfogatáram [m<sup>3</sup>/sec]
- $A_{ny}$  - a nyílászáró teljes felülete [m<sup>2</sup>]
- $\rho$  - levegő sűrűsége [kg/m<sup>3</sup>]
- c - levegő fajhője [J/kgK]

Az irodalomban gyakran találkozni a 10 Pa nyomáskülönbséghez tartozó filtrációs hőátbocsátási tényező értékével, amely jól használható a transzmissziós hőátbocsátás tényezővel történő összehasonlításhoz (Széll, 2011).

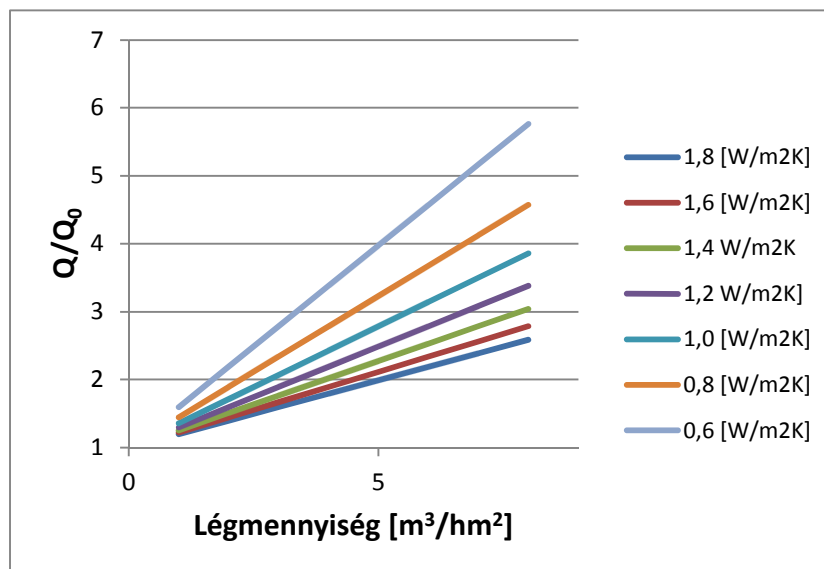
A nyílászáró résein keresztüli filtráció okozta hőveszteség növekmény számításához célszerűnek mutatkozik, egy ún. filtrációs hőátbocsátási tényezőnövekmény bevezetése, amely a beáramló levegő 1 m<sup>2</sup> ablakfelületre eső részének 1 K-nel történő felmelegítéseként fogalmazható meg. A nyílászáró egységnyi felületére számított filtráció okozta hőveszteség-növekményt az (1) valamint a (15) összefüggés alapján a következő egyenlettel írhatjuk le:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{L \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta t + A \cdot U_w \cdot \Delta t}{A \cdot U_w \cdot \Delta t} \quad (19)$$

ahol:

- $\dot{L}$  - térfogatáram [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $\rho$  - levegő sűrűsége [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $c$  - levegő fajhője [ $\text{J}/\text{kg},\text{K}$ ]
- $\Delta t$  - hőmérséklet különbség [ $\text{K}$ ]
- $A$  - az ablak teljes felülete [ $\text{m}^2$ ]
- $U_w$  - az ablak hőátbocsátási tényezője [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]

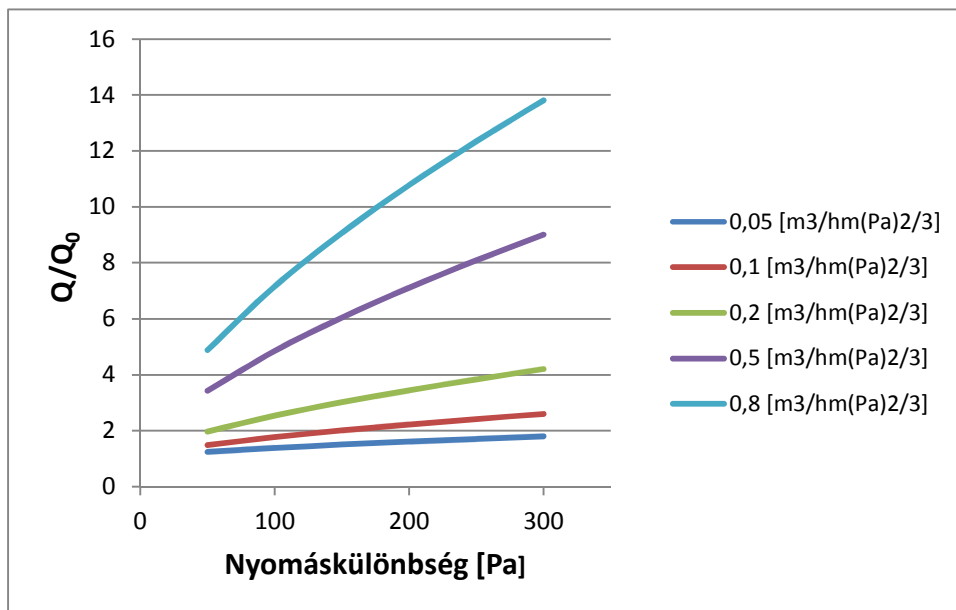
A (19) összefüggést felhasználva készített 3. ábra szemlélteti a különböző hőátbocsátási tényezőjű nyílászárón keresztül egységnyi felületen filtrálódó légtömeg függvényében a  $Q/Q_0$  hányados értékét.



3. ábra. Hővesztés a filtráció függvényében

Az ábráról látható, hogy a kisebb hőátbocsátási tényezőjű határoló szerkezetek a filtráció hatására érzékenyebbek. Ennek a megállapításnak kiemelten nagy jelentősége van a nyílászárók fejlesztése területén is. Fontos belátni, hogy a szerkezet hővezetési ellenállásának növelésével egyre nagyobb hangsúly kell fordítani a légzárási tulajdonságok megbízhatóságának javítására is. Csak a két érték együttes kezelésével lehet az épület energiahatékonyságát hosszútávon biztosítani. Az 4. ábra a  $Q/Q_0$  hányados értékét mutatja különböző réstényező értékek mellett a nyílászáró két oldala között kialakuló nyomáskülönbség függvényében. A diagram készítésénél  $R_0=1$  [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] hőátviteli ellenállással számoltam.





4. ábra A hőveszteség a torlónyomás függvényében

A nyílászárók légáteresztési teljesítményét osztályozó szabványban a legszigorúbb 4. osztályhoz tartozó minősítő egyenes egyenlete a következő:

$$V_{4.oszt} = 0,1396 \cdot \Delta P^{(2/3)} \quad [\text{m}^3/\text{hm}^2] \quad (20)$$

ahol:

$V_{4.oszt}$  - egységnyi felülethez és a 4. légzárási osztályhoz tartozó légáteresztés

Az (20) egyenlet szerint az osztályozó egyenes részarámlási együtthatója  $0,14 \text{ m}^3/(\text{hm}^2\text{Pa}^{2/3})$

Felhasználva a (19) összefüggést megállapítható, hogy azokon a nyílászárókon keresztül, amelyek légzárási teljesítménye a legjobbnak számító 4. osztály határára esik, már 10 Pa-os nyomáskülönbség esetén is 23%-os többlet energiaveszteséggel kell számolni,  $U_w=1 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$  hővezetési tényező mellett. Látható, hogy a filtrációs energiaveszteséggel feltétlenül számolni kell abban az esetben, ha a szerkezet légáteresztési tényezője  $0,1 \text{ m}^3/(\text{hm}^2\text{Pa}^{2/3})$  értéket meghaladja és a szerkezet nagyobb nyomáskülönbségnek van kitéve.

## 5. A NYÍLÁSZÁRÓK TELJESÍTMÉNYJELLEMZŐINEK HATÁSA AZ EMBER KÖZ- ÉS KOMFORTÉRZETÉRE

Mivel a legtöbb ember életének 80-90%-át zárt térben tölti, ezért alapvető fontosságú, hogy benntartózkodásuk során a megfelelő hőmérséklet, kedvező páratartalom, jó minőségű levegő, megfelelő akusztika és megvilágítás legyen biztosítva. Az ember és az őt környező világ kapcsolatának megítélése lehet szubjektív és objektív is. Azért, hogy az utóbbi kapcsolatot az ember szempontjából megfelelő mélységig és szinten tudjuk elemezni, és műszaki következtetéseket tudjunk levonni, bizonyos fokig ismernünk kell az egyes kapcsolatrendszereket, valamint azok szubjektív részét is (Wang, 2008).

A műszaki gyakorlatban az ember és a környezete közti kapcsolat leírásához általánosan használt fogalom a szubjektív közérzet, ami definíció szerint a komplex hatások alapján az egyénben kialakuló szubjektív érzés (Kajtár, 2000). Zárt térben tartózkodó ember szubjektív közérzetének kifejezésére használják a komfortérzet kifejezést is. A komfortérzetet leginkább befolyásoló tényezők (Bánhidi, 2000):

- hőmérséklet
- nedvesség
- légmozgás
- zaj
- megvilágítás
- határoló felületek közepes hőmérséklete

A komfortérzetet kevésbé befolyásoló tényezők között szerepel a napsugárzás, az ionizáció és a rezgések hatása, amelyek rendszerint csak időszakosan jelentkeznek. A komfortérzettel ellentétes fogalom a diszkomfort érzés. Ennek az egyik legáltalánosabb formája a helyi diszkomfort érzés, ami egy zárt térben csak olyan adott diszkrét pontokban jelentkezik, ahol az ott tartózkodó egyénnek jellemzően hőkomfort panaszai vannak (Magyar, 2008), (Magyar, 2011). A helyi diszkomfort érzés kialakulásában az ablakoknak is jelentős szerepük lehet, mégpedig az aszimmetrikus sugárzás és a huzathatás kialakulásában betöltött szerepük révén (Várfalvi, 2006), (Hessinger 2010).

### 5.1. Az ablakok légzárási teljesítményének hatása a belső levegő minőségére és a hőérzettel kapcsolatos huzathatásra.

A belső levegőminőség (BLM) alatt a komfortterek levegőjének minden olyan nem termikus jellemzőjét értjük, melyek az ember közérzetét befolyásolják. A levegőt élettelen anyagok és élő organizmusok szennyezik:

- gázok és gőzök (CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, radon, stb.)
- szaganyagok (emberi, állati, növényi eredetűek, a burkoló anyagok és berendezési tárgyak kipárolgása, továbbá szerves anyagok bomlástermékei)

- aeroszolok (szervetlen és szerves porok)
- vírusok
- baktériumok és spórák
- gombák és spórák

Az ember a belső levegő minőségét alapvetően szaglász útján és a szem kötőhártya viselkedésén keresztül érzékeli.

A belső levegő minőségét számos külső és belső szennyező forrás emissziója rontja, ami megköveteli a helyiség állandó frisslevegő utánpótlását. A szennyezőanyagok származhatnak a külső tér levegőjéből, épületszerkezeti és burkoló elemekből, bútorokból, lakberendezési tárgyakkól, klímatechnikai rendszerből, valamint a komforttérben tartózkodó személyektől.

A belső levegő minősítéséhez Fanger professzor dolgozott ki és vezetett be egy egységet, amely a szennyezőanyag forráserősségének mértékét adja. Mértékegysége az 1 olf. Az ehhez tartozó érzékelhető levegő minőség mértékegysége az 1 decipol. Egy decipol a levegő minősége, ha egy olf szennyezőanyag kibocsátás 10 l/s tiszta, friss levegőben hígulna fel. Az olf-decipol mennyiségek bevezetésével az elégedetlenek százalékos aránya (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) kifejezhetővé vált a fajlagos frisslevegő ráta és az érzékelhető belső levegő minőség függvényében.

A fajlagos frisslevegő ráta miatt elégedetlenek százalékos arányát (PPD) kifejező egyenlet:

$$PPD = 395 \cdot \exp(-1,83 \cdot V^{0,25}) \quad [\%] \quad (21)$$

ahol:

$\dot{V}$  - fajlagos frisslevegő ráta [l/s, olf vagy l/s,fő]

Egy helyiség frisslevegő szükségletének méretezésénél figyelembe kell venni a benttartózkodók légzéséhez szükséges levegőmennyiséget, a légtérben a szennyezőanyag fajtájára vonatkozó egészségügyi határérték koncentrációt, valamint az adott kategóriához és elégedetlenségi arányhoz tartozó érzékelhető levegőminőség eléréséhez szükséges levegőmennyiséget.

A légzéshez szükséges frisslevegő igényt az alábbi képlettel számíthatjuk:

$$\dot{V} = \frac{K_{CO_2}}{k_{meg} - k_k} \left[ \frac{m^3}{h \cdot fő} \right] \quad (22)$$

ahol:

$K_{CO_2}$  - az ember CO<sub>2</sub> kibocsátása  $\left[ \frac{m^3}{h \cdot fő} \right]$

$k_{meg}$  - a CO<sub>2</sub> koncentráció megengedett értéke a komforttérben  $\left[ \frac{m^3}{m^3} \right]$

$k_k$  - CO<sub>2</sub> koncentráció a külső levegőben  $\left[ \frac{m^3}{m^3} \right]$

A szabványok több szempont szerint is előírják az óránkénti szükséges frisslevegő mennyiségét. Általánosságban elmondható, hogy az emberi tevékenységtől függően a légzés frisslevegő igénye minimum 30 m<sup>3</sup>/h, ami jelentősen emelkedhet, ha a helyiségben dohányoznak is.

A frisslevegő igény méretezését elvégezhetjük az érzékelhető belső levegő minőség kielégítése céljából is. A szabványokban táblázatos formában megtalálható az ember aktivitásától és a dohányosok százalékos arányától függően az érzékelhető belső levegő korrigált mennyisége a belső levegőminőséggel elégedetlenek százalékos arányának (PPD) függvényében. Alapesetben a 10% elégedetlenségi arány értékhez 16 l/s légmennyiség tartozik, ami közel 58 m<sup>3</sup>/h frisslevegő mennyiséget jelent személyenként. Kajtár egy irodaházban végzett helyszíni vizsgálat során arra az eredményre jutott, hogy a benttartózkodó személyek a levegő minőségét csak 60 m<sup>3</sup>/h-s frisslevegő betáplálás mellett érezték megfelelőnek (Kajtár 2000).

A belső tér szükséges frisslevegő igényének méretezését az egészségügyi követelményértékek kielégítése alapján is elvégezhetjük, amihez a következő összefüggést alkalmazzák:

$$V = \frac{K}{(k_b - k_k) \cdot \varepsilon} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (23)$$

ahol:

- $K$  - adott szennyezőanyag forráserőssége a belső térben [mg/h]
- $k_b$  - adott szennyezőanyag koncentrációja a tartózkodási zónában [mg/m<sup>3</sup>]
- $k_k$  - adott szennyezőanyag koncentrációja a külső zónában [mg/m<sup>3</sup>]
- $\varepsilon$  - a szellőzés határfoka

A frisslevegő igény méretezéséhez gyakran a szükséges légcsereszámából indulnak ki. Az olyan épületekben, amelyek nem rendelkeznek légvezetési rendszerrel, a frisslevegő utánpótlása az épület résein in- és exfiltrációval, valamint a nyitott ablakon keresztül valósul meg. Az épület szerkezeti elemeinek résein a belső és a külső tér nyomáskülönbségéből adódó légáramlás alakul ki. Az épülethatároló szerkezetek külső és belső oldalán kialakuló nyomáskülönbség a szél torlónyomásából, valamint a levegő hőmérsékletkülönbségéből adódik. Ez a nyomáskülönbség 5 m/s-os szélső sebesség és 30°C hőmérsékletkülönbség mellett mindössze 20 Pa.

Az ablakok légzárását minősítő szabványban (MSZ EN 12207:2001) található osztályozó diagramról leolvasható, hogy 20 Pa-os nyomáskülönbség mellett csak a légzárási igény nélküli ablak tudná biztosítani egy fő számára a szükséges 30 m<sup>3</sup>/h frisslevegő mennyiséget.

A modern hőszigetelt üvegezésű ablakok legalább egy,- de nem ritka, hogy kettő vagy három- rugalmas gumitömítéssel rendelkeznek, ami jó légzárást biztosít, annak érdekében, hogy meggátolják a filtráció kialakulását (Kószó, 1995).

Ha eltekintünk a filtrációs hővesztéstől és csak a belső tér érzékelhető levegőminőségét vizsgáljuk, akkor megállapítható, hogy a jó légzárású ablakok beépítése kedvezőtlenül befolyásolja azt. Az elmondottakból következik, hogy egy helyiség légcseréje igénye az ablakok légáteresztését felülről nem korlátozná, illetve ahol az ablakok nyitásával megvalósuló lökészerű szellőzés nem megoldható – kiegészítő, vagy mesterséges szellőztető berendezés biztosíthatja csak a szükséges frisslevegő mennyiséget.

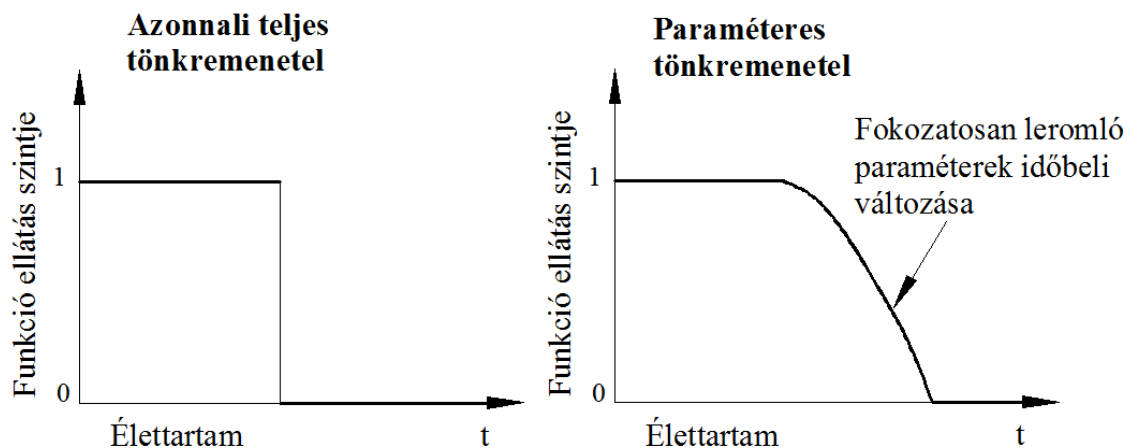
Az ablakok közelében fellépő huzatjelenség, mint helyi diszkomfort tényező oldaláról vizsgálva a légáteresztés kérdését, meg kell említeni a helyi légáteresztés fogalmát is. Mérésekkel igazolható, hogy az ablak tok-szárny kapcsolatánál a záródási helyektől és minőségüktől függően változik az ablak kerülete mentén a légáteresztés mértéke (lásd 11.1. fejezet). Ebből az következik, hogy a kerület mentén az (5) összefüggésben szereplő  $C$  - az ütközési rés hézagzárás minőségére jellemző - érték is változik. Mérések alapján a fűtött lakásban az 5% elégedetlenségi arányhoz tartozó közepes légsebesség értéke (0,1 m/s) a réseken 4-7 m<sup>3</sup>/hm átbocsátott légmennyiség mellett alakul ki (Kovács, 1989). Ennél nagyobb lokális légáteresztés tehát a komfortérzet szempontjából nagy szélsőségek esetén sem volna megengedhető. Magyar és munkatársai a budapesti BME Épületgépészeti Tanszékének Légtechnikai Laboratóriumában mérésekkel igazolták, hogy a huzathatás szempontjából az átlagos légsebességek nem kifogásolhatóak, azonban csak a transzformált eloszlásfüggvény jelzi a tartózkodási zóna inhomogenitását. Ez az inhomogenitás megmutatkozik mind az átöblítettség, mind a turbulens hatás területén is, amelyek hatással vannak a helyiségben tartózkodó személyek komfortszintjére (Magyar, 2008)

Az épületek tervezése során lehetőség nyílik műszaki áramlástan szimulációs modellek (CFD) alkalmazására, amelyek képesek ismert meteorológiai adatok és nyílászáró pozíció alapján megbízhatóan jelezni a komfortérben a természetes szellőzéssel kialakuló hőérzet PMV értékeit (Stavrakakis, 2011); (Rijal, 2007).

## 6. MŰSZAKI TERMÉKEK JELLEGZETES MEGHIBÁSODÁSI FORMÁI, MŰSZAKI MEGBÍZHATÓSÁGUK

### 6.1. Károsodási formák és azok következményei

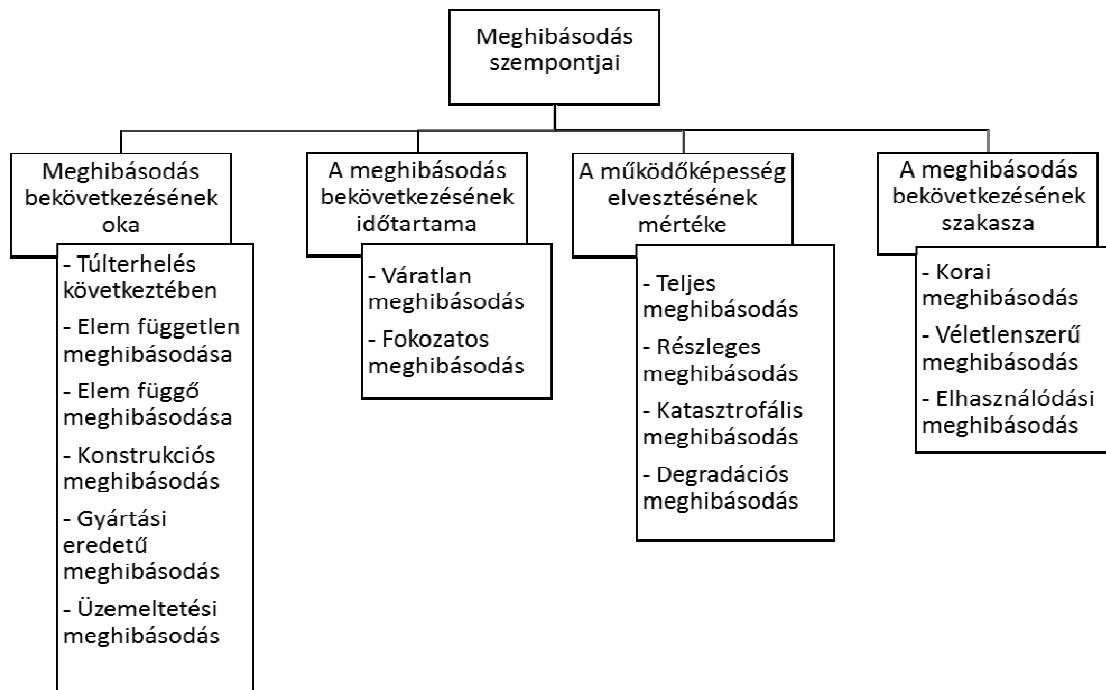
Az ipari termékek tervezése során a termékkel - mint funkcióhordozóval- valamilyen felhasználói igényt szeretnénk kielégíteni. A felhasználói igények kielégítésének mértékéért, azaz a termék értékét jellemzően a termék műszaki, ergonómiai valamint esztétikai funkcióparaméterei határozzák meg. A termék használata során ezek az értékek változhatnak. Műszaki eszközök esetében ezek a változások rendszerint értékcsökkenést eredményeznek. Megkülönböztethetünk olyan funkcióparamétereket, amelyek a használati idővel arányosan, azaz folyamatosan változnak és olyanokat is, amelyekben nagy sebességgel, mondhatni pillanatszerűen következik be változás. Az irodalom az előbbi esetet paraméteres meghibásodásnak, míg az utóbbit pedig azonnali meghibásodásként tárgyalja (Gaál, 1994), (Keedy, 2012). Az 5. ábra a tönkremenetel lehetséges formáit mutatja (Gregász 2009).



5. ábra Tönkremenetel lehetséges formái [Forrás: Gregász, 2009]

Az azonnali teljes tönkremenetel során a termék teljesítőképessége egy adott időpillanatban átlépi a tönkremeneteli határállapotot, amely után a termék tovább nem használható. Jellemzően ilyen típusú tönkremenetel találkozhatunk az elektronikai eszközök meghibásodási folyamatainak elemzésekor, vagy a mechanikai sérülés, esetleg törés hatására bekövetkező teljes funkcióvesztéssel járó meghibásodás során (Huang, 2003). A termék használhatósága szempontjából fontos különbséget tenni, hogy a megváltozott paraméter főfunkció ellátásához, vagy egy részfunkció teljesítéséhez tartozik-e. Abban az esetben, ha a főfunkcióhoz tartozó paraméterben állt be szignifikáns változás, akkor a termék teljes meghibásodásáról kell beszélni. Jellemzően egy részfunkció meghibásodása nem jelenti a termék használatának teljes megszűnését, ez esetben csak részleges meghibásodásról beszélünk. Részleges meghibásodás esetén még megvalósulhat a termék működése, azonban előfordulhat, hogy a részfunkció

kieséséből adódóan a termék a törvényi, vagy termékszabványokban megtalálható kritériumoknak már nem felel meg. A paraméteres meghibásodásra jellemző, hogy nem tapasztalható éles tönkremeneteli határállapot átlépést követő, teljes funkcióvesztéssel járó meghibásodás (Gregász, 2009). A meghibásodások osztályozási szempontjait és fajtáit az 6. ábra szemlélteti (Kövesi, 2004).



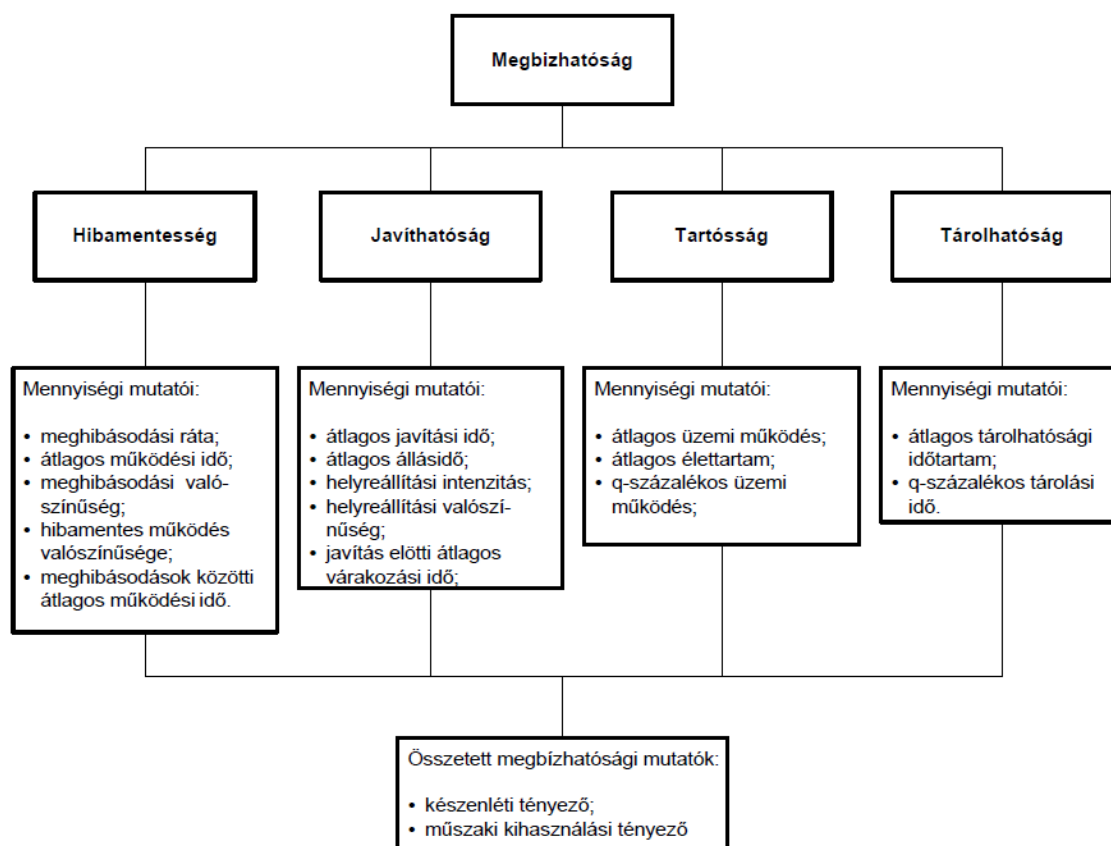
6. ábra A műszaki termékek meghibásodási szempontjai (Forrás: Kövesi, 2004)

Az ipari termékek megbízhatóságának tervezhetőségéhez ismerni kell az élettartam alatt bekövetkező károsító hatásokat, és azok mértékét. Ezek a hatások általában sztochasztikus és determinisztikus jellegűek lehetnek (Balogh, 1987). A károsító hatások ismerete mellett fontos, hogy a meghibásodásokat objektív jellemzőkkel és azok határállapotaival határozzák meg. A meghibásodási határok jelentik a kapcsolatot az üzemképesség és a kár között. Műszaki termékeknél a meghibásodási határ többnyire az üzemi tulajdonságok határértéke, vagy más működési adatok révén adható meg. A károsító hatások miatt folyamatosan változó műszaki paraméterek az időben sztochasztikusan, vagy éppen monoton csökkenő, vagy növekvő tendenciát követhetnek. Ennek eredményeként sokszor szükséges egy felső- és egy alsó határállapot definiálása is. Ezen határok elérésekkor definiálható a termék meghibásodása (Eichler, 1982).

Abban az esetben, ha mind az igénybevétel, mind pedig a teljesítőképesség egymástól függetlenek és értékeik ingadoznak, akkor azokat valószínűségi változóként kell kezelni. Jellemzően a meghibásodások mögött bonyolult ok-okozati összefüggésrendszer áll, ezért annak bekövetkezést teljes biztonsággal előre nem tudjuk jelezni. Ezért az üzembe helyezés és az első meghibásodás közti hibamentes működési időt is valószínűségi változóként kell kezelni (Zvikli, 2006).

## 6.2. Műszaki termékek megbízhatósága és az általánosan elterjedt működési élettartam elemzési módszerek

Alapvetően a termékek megbízhatóságának tervezésénél ismerni kell a meghibásodási folyamatok törvényszerűségeit, a megbízhatóság számszerű jellemzőit. Egy termék, vagy szolgáltatás műszaki megbízhatóságán azt a képességet értjük, hogy a felhasználás, üzemeltetés meghatározott feltételei mellett megőrzi működőképességét. A megbízhatóság fogalmához a hibamentes működés valószínűségén túl a termék javíthatósága, karbantarthatósága és a tartósság kérdésköre is hozzákapcsolódik. A legújabb MSZ IEC (191): 1992 szabvány 191-02-03 pontja a megbízhatóságot olyan általános gyűjtőfogalomként értelmezi, „amelyet a használhatóság és az azt befolyásoló tényezők, azaz a hibamentesség, a karbantarthatóság és a karbantartás ellátás leírására használnak”. A megbízhatóságelmélet alapfogalmainak rendszerét, valamint a lényegesebb mennyiségi mutatókat a 7. ábra szemlélteti (Kövesi, 2004), (Pokorádi; 2002). A termékek megbízhatósági szempontból történő osztályozásakor külön kell választani a helyreállítható és a nem helyreállítható termékeket. A nem helyreállítható termék, vagy rendszer esetében a meghibásodás bekövetkezése teljes funkcióvesztéssel jár együtt. Abban az esetben, ha a termék helyreállítható, akkor a helyreállítás alatt mindig olyan beavatkozást értünk, amely az elem, vagy rendszer eredeti tulajdonságait állítja helyre.



7. ábra A megbízhatósági alapfogalmak és mutatók (Forrás Kövesi, 2004)



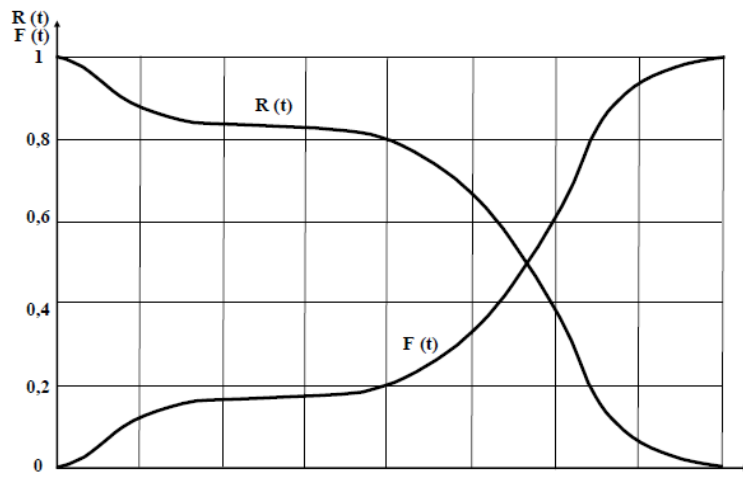
Ha vizsgálunk egy nem helyreállítható terméket, vagy elemet és  $\tau$  valószínűségi változó a hibamentes működési időt jelöli, azaz  $t = \tau$  időpillanatban következik be a meghibásodás, akkor

$$F(t) = P(\tau < t) \quad (24)$$

eloszlásfüggvény a meghibásodási valószínűség eloszlásfüggvényének nevezzük. Az  $F(t)$  függvény helyett gyakran a hibamentes működés  $R(t)$  valószínűségi függvényt alkalmazzák. A megbízhatósági terminológia szerint az irodalomban ezt a függvényt megbízhatósági függvénynek, vagy túlélési valószínűségi függvénynek is szokás nevezni.

$$R(t) = P(\tau \geq t) = 1 - F(t) \quad (25)$$

Tehát a  $R(t)$  és  $F(t)$  a berendezés „t” működési idejét jellemző időfüggvények (lásd 8. ábra), tartalmuknak megfelelően megbízhatósági és megbízhatatlansági függvényeknek nevezzük (Peták, 1981).



8. ábra A hibamentes működés  $R(t)$  és a meghibásodás  $F(t)$  valószínűség függvények jellegzetes alakja az időben [Forrás: Békési, 2007]

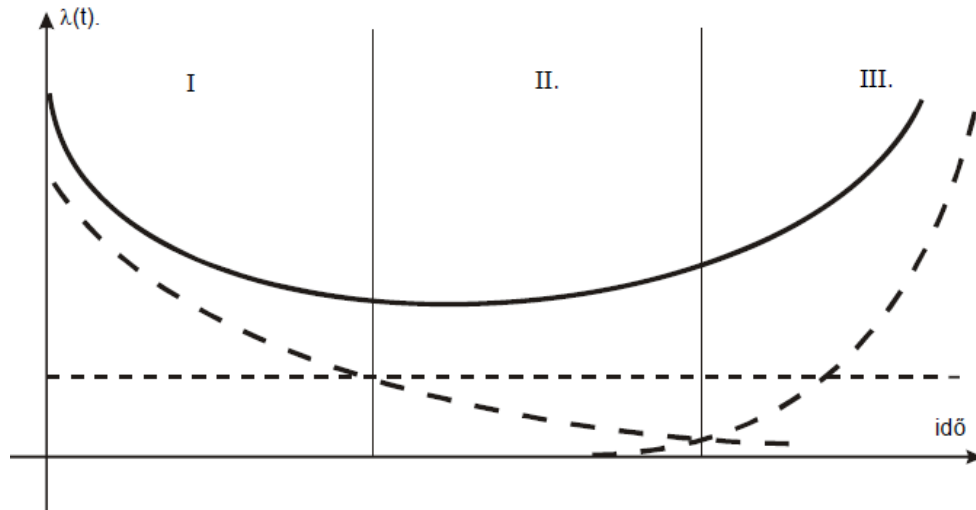
A megbízhatóság alapú karbantartás szervezésben alapvető jelentőségű a meghibásodási ráta, vagy más nevén a meghibásodási tényező  $\lambda(t)$  ismerete. A  $\lambda(t)$  függvény minden  $t$  időpillanatban annak a valószínűségét adja meg, hogy a  $t$  időpillanatig hibamentesen működő elem a következő időegység alatt meghibásodik. Ha a  $\Delta t$  értéke tart a nullához, akkor a meghibásodási ráta a következő összefüggéssel írható le:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (26)$$

A  $\lambda(t)$  függvény lehet monoton csökkenő, konstans, vagy monoton növekvő. Ez a görbe, amely az élettartam három szakaszát írja le, minden berendezés típusra kiszámítható és megrajzolható. Formájából kapta elnevezését, ez az úgynevezett kádgörbe (9. ábra) (Pokorádi, 2002).

Az ábrán látható, hogy az élettartam első szakaszában, amit bejáratási szakasznak is szoktak nevezni, a rejtett gyártási hibáknak köszönhetően a  $\lambda(t)$  viszonylag nagy kezdeti értéke meredeken csökken. A görbe második szakaszára kizárólag a véletlenszerű meghibásodások jellemzőek. Ebben a szakaszban a meghibásodási ráta közel konstans.

A harmadik szakasz az öregedési szakaszt írja le, ahol az irreverzibilis fizikai és kémiai folyamatok következtében az elem megbízhatósága fokozatosan romlik. A meghibásodási függvény jellemzően monoton növekszik.



9. ábra Kádgörbe (Forrás: Kövesi, 2004))

A megbízhatósági jellemzők konkrét értéke, így a kádgörbe alakja is az  $F(t)$  eloszlásfüggvény típusától függ. A megbízhatósági gyakorlatban a leggyakrabban alkalmazott eloszlástípusok az exponenciális eloszlás, Weibull-eloszlás, a normális eloszlás valamint a lognormális eloszlás.

Az exponenciális eloszlásfüggvény a következő alakú:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{ha } t > 0; \lambda > 0 \quad (27)$$

A meghibásodási ráta definíció alapján:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{állandó} \quad (28)$$

Mivel egy vizsgált elem meghibásodás valószínűsége független a  $(t, t+\Delta t)$  szakaszban a  $(0, t)$  intervallum hosszától, ezért az exponenciális eloszlás alkalmas a nem öregedő, azaz véletlen jellegű meghibásodások leírására.

A megbízhatósági gyakorlatban a másik gyakran alkalmazott eloszlástípus a Weibull-eloszlás, amelynek az eloszlásfüggvénye a következő alakban írható le:

$$F(t) = 1 - e^{-at^b} \quad \text{ha } t > 0; a > 0; b > 0 \quad (29)$$

ahol:

a - az eloszlás skálaparamétere

b - az eloszlás alakparamétere

Weibull-eloszlás esetén a meghibásodási ráta:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{abt^{b-1}e^{-at^b}}{e^{-at^b}} = abt^{b-1} \quad (30)$$

A meghibásodási ráta ebben az esetben hatványfüggvény, amely  $b < 1$  értéke esetén monoton csökkenő,  $b = 1$  értékre állandó,  $b > 1$  érték esetében monoton növekszik. Ennek

értelmében ez az eloszlástípus az első esetben a korai meghibásodások, a második esetben a véletlen meghibásodások, míg az utóbbi esetben az öregedő meghibásodások leírására is alkalmas, amely a 9. ábra szerinti kádörbét eredményezi.

Az öregedő jellegű meghibásodások leírására alkalmas a normális eloszlás, melynek értelmezési tartományát a megbízhatósági gyakorlatban csonkolással korlátozzák (Gnyegyenko, 1970). A normális eloszlás függvény:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (31)$$

Az  $F(x)$  eloszlásfüggvényt a  $\mu=0$  várható értékű és  $\sigma=1$  szórású standardizált  $\Phi(u)$  normális eloszlásfüggvénnyel szokás kifejezni:

$$F(t) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \quad (32)$$

A csonkított eloszlásfüggvény:

$$F(t) = \frac{\Phi\left(\frac{t-T}{\sigma}\right) - \Phi\left(-\frac{T_1}{\sigma}\right)}{1 - \Phi\left(-\frac{T_1}{\sigma}\right)} \quad (33)$$

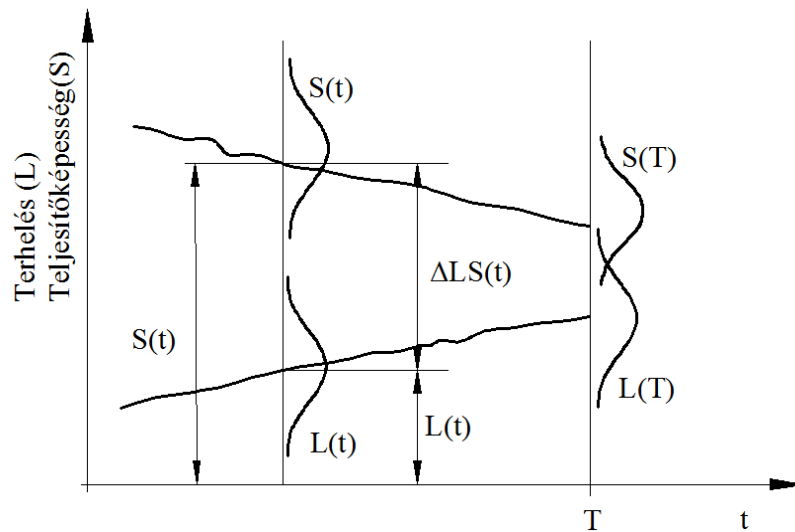
Ahol:

T - az elem átlagos működési ideje

Abban az esetben ha  $T > 3\sigma$ , akkor az előbbi összefüggés helyett kielégítő pontosságot az (32) összefüggés is.

Vannak olyan valószínűségi változók is, amelyeknek a logaritmus mutató normális eloszlást. Ebben az esetben alkalmazható az ún. lognormál eloszlás.

A műszaki termékek egyetlen igénybevétel hatására bekövetkező meghibásodási valószínűségének számítására egyik lehetséges mód, az igénybevétel-teherbírás átfedéssel módszer alkalmazása. Ezt a módszert nem csak a meghibásodás valószínűségének számítására alkalmas, hanem ez az alapja a valószínűségelméleten alapuló méretezésnek is. Ezt a módszert alkalmazzák pl. a teherbíró szerkezetek méretezéséhez is (Szász, 2010), (Mistéth, 2001). Nemzetközi irodalmakban SSI (Stress Strength Interference) rövidítéssel találkozni. SSI modell segítségével meghatározható az igénybevétel megengedhető szórása, illetve az igénybevétel ingadozásának ismeretében a teherbírás megengedett szórása is (Sundararajan, 1995), (Zongwen, 2010). A modell nemcsak mechanikai szerkezeteknél, hanem más technikai berendezéseknél, sőt társadalmi konfliktusok modellezésénél is hatásos lehet (Benedikt, 2007). Az 10. ábra az időben változó terhelés (L) és a teljesítőképesség (S) sűrűségfüggvényét és várható értékét mutatja.



10. ábra A változó terhelés és teljesítőképesség időfüggése [Forrás: Mistéth, 2001]

A méretezés alapját a következő összefüggésekkel lehet matematikailag leírni:

$$P\{[S(t) - L(t)] \geq 0\} \geq 1 - \frac{1}{r} \quad (34)$$

$$P\left[\frac{S(t)}{L(t)} \geq 1\right] \geq 1 - \frac{1}{r} \quad (35)$$

$$0 < t \leq T$$

Az  $1/r$  a tervezés során vállalt kockázatot jelenti. Meghibásodás akkor következik be, ha az igénybevétel nagyobb, mint a szerkezet teherbírása. A tönkremenetel bekövetkezésének valószínűsége, azaz a vállalt kockázat azonos a két görbe átfedő részével, ami interferencia-területként jelentkezik. Az interferencia-terület nagysága függ a két érték várható értékének távolságától és a szórásoktól. Amennyiben ismert az igénybevételi és teljesítőképességi sűrűségfüggvények  $f(L)$  és  $f(S)$ , akkor a sikeres működés valószínűsége kiszámítható:

$$p_S = \int_0^{\infty} \left[ \int_0^{L=S} f(S) \cdot f(L) d(L) \right] d(S) = \int_0^{\infty} f(S) \left[ \int_0^{L=S} f(L) dL \right] dS \quad (36)$$

Terhelhetőségi tartalék  $(S-L)$  sűrűségfüggvényt numerikusan  $-\infty$  és  $0$  között integrálásával is kiszámítható a sikeres működés valószínűsége egy adott  $t_n$  időpontban. A két eloszlásfüggvény egymástól való távolságának jellemzésére használatos mutatószám a biztonsági tartalék „Safety Margin” (SM) és a terhelés változékonyság „Load Roughness” (LR) (Kanagasabai, 1998).

$$SM = \frac{\bar{S} - \bar{L}}{\sqrt{(\sigma_L^2 - \sigma_S^2)}} \quad (37)$$

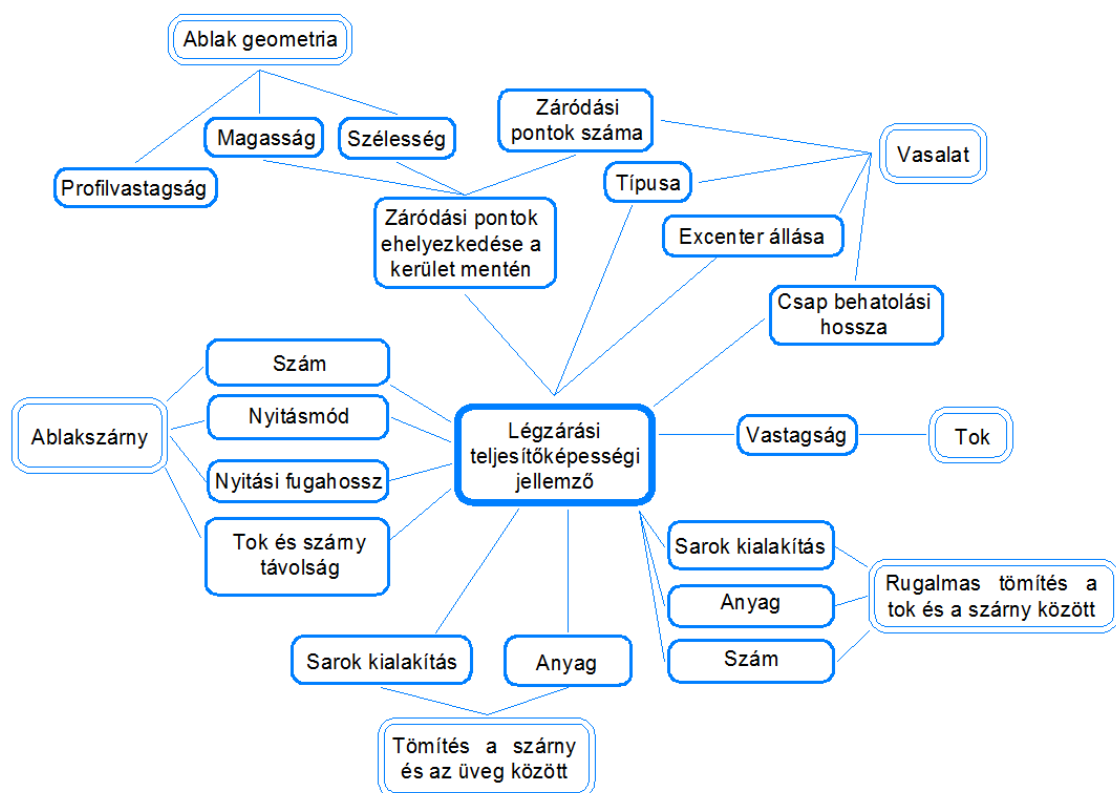
$$LR = \frac{\sigma_L}{\sqrt{(\sigma_S^2 + \sigma_L^2)}} \quad (38)$$

A biztonsági tényező növelése érdekében egyrészt a várható értékeket kell egymástól távolabbra tervezni, másrészt a szórások értékeit kell csökkenteni. Megbízhatóság szempontjából pedig fontos, hogy a várható értékek és a szórások a működési idő folyamán ne vándoroljanak (Kövesi, 2004). Az időben halmozódó hatások, valamint az anyagok degradálódása következtében, azonban mégis bekövetkezik a várható értékek eltolódása, vagy a szórások növekedése, növelve a meghibásodás kockázatát.

Hasonlóan a tartószerkezetek szilárdsági méretezésénél, az SSI modell alkalmas a nyílászárók légzárási teljesítőképességének megbízhatósági jellemzésére. Ebben az esetben nem két eloszlásfüggvénnyel, hanem a nyílászáró óránkénti légáteresztés eloszlásfüggvényének egy konstans követelményértékkel levágott területével kell számolni.

## 7. A KORSZERŰ HŐSZIGETELT ABLAKOK MEGHIBÁSODÁSI LEHETŐSÉGEI ÉS AZOK KÖVETKEZMÉNYEI

Alapvetően a műszaki termékek megbízhatósági vizsgálatainak első fázisa mindig a megbízhatóság-orientált hibaanalízis. Több hibaanalízis módszer áll rendelkezésre, azonban bármelyik módszert is alkalmazzák, első lépésben célszerű a vizsgálat alá vont termék működését, illetve a vizsgált funkcióparamétert befolyásoló szerkezeti elemeket egy szerkezeti gráfba összegezni (Zvikli, 2006). A dolgozat tárgyát képező nyílászárók légzárási teljesítőképességet befolyásoló elemek szerkezeti grábját az 11. ábra szemlélteti.



11. ábra A légzárási teljesítőképességet befolyásoló szerkezeti tényezők

Alapvetően a nyílászárók légzárási teljesítményét azok felületén található ragasztott illeszkedési kapcsolatok és a tok szárny csatlakozásánál kialakított résrendszerek határozzák meg. Az illeszkedési kapcsolatok jellemzően az üvegtáblák, vagy a betétek behelyezése során keletkeznek. A gyártók igyekeznek ezeket a csatlakozásokat rugalmas szigetelőanyagokkal tömíteni, amely képes a hő és nedvesség dilatációból származó dimenzióváltozást követni. A kiváló adhéziót biztosító ragasztóanyagok folytonos légtömör kapcsolatot biztosítanak. A termék rendeltetésszerű használata során csak nagyon kis valószínűséggel fordulhat elő a kapcsolat megszakadása. Következésképpen az illeszkedési kapcsolatokon a nyomáskülönbség hatására átáramló

légmennyiség elhanyagolhatóan kicsi a tok és szárny közötti, nagyságrendekkel sérülékenyebb hézagrendszeren kialakuló áramláshoz képest. Abban az esetben, ha az üveg, vagy a betét csatlakozásának sérülése mégis bekövetkezik, akkor légzárás tekintetében azonnali meghibásodásról kell beszélni. Meg kell említeni, hogy a gyakorlatban egy tökéletesen légtömör ragasztással összeállított szerkezeten keresztül is laboratóriumi eszközökkel mérhető légáteresztés, ami a működtető vasalatok réseivel, valamint az üvegszegezõ lécek tökéletlen illeszkedésével magyarázható. A legtöbb esetben az üveg és tok között található kiszellõztetõ hézagba bejutó levegõ az üvegszegezõ lécz résein keresztül jut a belsõ térbe. A másik jellemzõ esetben a kiszellõztetõ hézagba bejutó levegõ a sarokkötéseken keresztül, a vasalat résein és kilincsfuratán keresztül jut a belsõ térbe. Dolgozatomban a tok és a szárny csatlakozásánál kialakuló levegõáramlási viszonyokra fókuszálok, mivel megbízhatósági problémák jelentõs része a csatlakozás minõségének idõbeni változására vezethetõ vissza (Rüdiger, 1998).

A nyílászárók kritikus hibaokainak összesítésére és hatáselemzésére a minõségügyben gyakran alkalmazott konstrukciós FMEA (Failure Mode and Effect Analysis- Hibamód- és hatáselemzés) módszerét választottam. Az eljárás célja az összes lehetséges hiba, azok hatásainak, okainak és az ellenõrizhetõségének feltárása (Seung, 2003), (Barendsa, 2012).

Az analízis elsõ lépéseként egy szakértõi csoport összeállította az FMEA úrlapot (1. táblázat). A csoport az úrlap készítéses során a vizsgált terméket egyes részegységeire bontotta, majd az adott alkatrészekhez meghatározta az élettartam során elõforduló lehetséges hibákat, azok hatásait és a hibák ellenõrizhetõségét. A táblázat a szakértõi pontszámok átlagát tartalmazza. Fontos kiemelni, hogy az elemzést nem egy adott termékre végeztük el, hanem a gyakorlatban megtalálható, tipikusan fából készült hőszigetelõ üvegezéssel készülvõ nyílászáró termékre fókuszáltunk. Az elemzés célja a típusra jellemzõ esetleges meghibásodások értékelése volt, amely alapul szolgált a megbízhatósági modell kidolgozásához.

A szakértõi csoport további feladata a fontosabb mérõszámok meghatározása volt, amelyekhez a QS-9000 minõségirányítási rendszer ajánlása szerint 1-10 történõ pontskálát rendelt. A fontossági mérõszámokat a melléklet tartalmazza. A hiba súlyossága, elõfordulása, valamint a felderíthetõség osztályértékeinek szorzataként kapott kockázati index RPN (Risk Priority Number) az FMEA elemzés komplex mutatószáma. Hasonlóan a Pareto elemzéshez a RPN értékek sorba rendezésével megkapjuk a termék elemeinek kockázati sorrendjét. A szokásos FMEA analízistõl eltérõen az RPN értékek alapján rangsorolt hibákra a szakértõi csoport nem határozott meg javító intézkedéseket, mivel az elemzés nem egy adott szerkezetre vonatkozóan lett elvégezve.

1. táblázat FMEA űrlap

Alkatrész	Lehetséges hibamód	Lehetséges hibák	A hiba lehetséges hatásai	Jelentőség	Felderíthetőség	Előfordulás	valószínűsége	RPN
<b>Vasalat</b>	Megnövekedett működtetési erő	A tok és a szárny dagadása	Intenzívebb vasalatkopás	3	3	4	36	
		A zár csapok pozíciói megváltoznak, mellézárás	Zárfogadó törése	7	3	2	42	
			Zárfogadó kimozdulás	6	3	4	72	
	Lecsökkent működtetési erő	vasalatkopás	Szelteher hatására a tok- és szárny távolsága növekszik	3	3	4	36	
		A zár csapok nem érintkeznek a zárfogadókkal		3	4	2	24	
	Zárfogadó mozog	Rögzítőcsavarok kimozdulnak	Szelteher hatására a tok- és szárny távolsága növekszik	4	2	4	32	
		A szárny nyíló állapotában is bukik	Vasalat elállítódás	Az egykezes működtetés megszűnik, vasalattörés	5	2	4	40
	Vasalatkopás		4		3	3	36	
	Kopott zárócsap/zárfogadó	Vasalat elállítódás	Szelteher hatására a tok- és szárny távolsága növekszik	6	5	6	180	
				5	2	3	30	
	Törött zárfogadó	Természetes elhasználódás	A megnövekedett szabad záródási vonal	8	3	4	84	
		A zár csapok pozíciói megváltoznak, mellézárás						
<b>Tömítés</b>	Tömítés rideg, repedezett	UV-degradáció	A tömítés nem tölti ki a tok- és a szárny közötti rést	2	5	3	30	
		Oxidáció		2	7	2	28	
		feszültségkorrózió		2	8	3	48	
		Ingadozó hőmérséklet		3	9	1	27	
	Tömítés magasságcsökkenése	Feszültségrelaxáció		6	7	6	252	
	Tömítés mechanikailag sérült	Külső mechanikai behatás	Lokális tömítetlenség	4	3	4	48	
		Zárfogadó felsérti, becsípődés		5	2	3	30	
	Tömítés kimozdult a helyéről	Külső mechanikai behatás	Tömítés mechanikai sérülése a nyitás-zárás során	7	2	3	42	



Alkatrész	Lehetséges hibamód	Lehetséges hibaok	A hiba lehetséges hatásai	Jelentőség	Felderíthetőség	Előfordulás valószínűsége	RPN
Ablakszárny	Derékszögűség megszűnése	Csapok ragasztásainak elmozdulása	A zárcsapok záródási pozíciói megváltoznak	1	5	2	10
		Üveg kiékelésének elmozdulása		2	6	3	36
		Síklapúság megszűnése		3	7	3	63
	Leereszkedés	Vasalat elállítódás	A szárnyban található tömítés nem érintkezik a tokkal	5	4	6	120
			A zárcsapok záródási pozíciói megváltoznak	3	4	5	60
	A szárny dagadása zsugorodása	Felületkezelés sérült	Nyitás-zárás esetén a szárny szorul, megnövekedett működtetési erő	1	3	4	12
	Hasadás	Mechanikai sérülés	A résen keresztül kialakuló légáramlás	5	5	2	50
	Repedés			4	5	2	40
	Profil torzulás			2	7	3	42
	Tok	Dagadás-zsugorodás	Felületkezelés sérült	Nyitás-zárás esetén a szárny szorul, megnövekedett működtetési erő	1	4	4
Derékszögűség hiánya		A beépítés során a tok rögzítésével a tokelemek deformálódnak	A zárcsapok záródási pozíciói megváltoznak	2	5	3	30
Görbülés		Belső feszültségek	A szárnyban található tömítés nem érintkezik a tokkal	1	7	3	21
Profil torzulás		Mechanikai sérülés	A résen keresztül kialakuló légáramlás	1	7	2	14
Hasadás				3	5	1	15
Repedés				3	5	2	30
Vízvető	Kimozdult a helyéről	Külső mechanikai behatás	Romlik a tömítettség	7	1	2	14
Üveg	Repedés	Mechanikai sérülés	üvegtörés	6	1	4	24
Üvegrögzítő tömítés	Elválás	Ragasztóanyag örgedés	A résen keresztül kialakuló légáramlás	7	5	2	70
		Mechanikai sérülés		4	3	2	24
Beszegező lécz	Görbülés	Belső feszültségek	Üvegrögzítő tömítés elválás	4	3	3	36

Az öt fős szakértői csoport pontozása alapján megállapítható, hogy a nyílászárók működési élettartama során bekövetkező légzárási teljesítménycsökkenésért leginkább a tömítőprofil feszültségrelaxációja (magasságcsökkenése), és a vasalatok elállítódásából és kopásából adódó záródási pozíció megváltozása okolható. Mindkét hibára érvényes, hogy a kockázati index magas értékéhez a hiba felderíthetőségének nehézségével járó magas pontszám is hozzájárult. Az elemzés alapján a tömítőprofil feszültségrelaxációjából adódó tömítetlenség mondható a legkritikusabb hibának, ami időben halmozódik és a tömítőprofil teljes elhasználódásáig tart. A teljesen relaxálódott tömítés okozta hiba vagy a vasalatok excenter csapjainak állításával, vagy a tömítés cseréjével javítható ki.

A vasalat elállítódásának, vagy törésének következtében növekvő légszivárgás nagyon súlyos hibának számít, azonban a hibák felderítése, még laikus felhasználó számára sem jelent problémát. Magas kockázati értéket kapott az üvegrögzítő tömítés degradációjából adódó ragasztóanyag elvállás, ami légáteresztés szempontjából súlyos meghibásodást eredményez, azonban, az előfordulásának valószínűsége a szakértők pontozása alapján csekélynek mondható. Az elemzés alapján a légáteresztési teljesítményjellemző megbízhatóságát becsülő modellben kiemelt kockázati tényezőként figyelembe kell venni a három legmagasabb RPN számot elért vaslatkopást, elállítódást, valamint a középtömítés feszültségrelaxációjából származó magasságcsökkenést.

## 8. NYÍLÁSZÁRÓKON VÉGZET ELŐZETES LABORATÓRIUMI ÉS HELYSZÍNI LÉGZÁRÁSI VIZSGÁLATOK

### 8.1. Nyílászáró szerkezetek légzárásának laboratóriumi és helyszíni vizsgálati módszerei

Az ablakok légzárési teljesítőképességi jellemzőjének vizsgálattal történő meghatározását az MSZ EN 1026:2001 szabvány rögzíti. A légáteresztés mérése vizsgálólaboratóriumban termékcsopontonként történik.

A szabványos légzárési vizsgálata során a terméket a külső oldalával egy mérőkamrához rögzítik, majd a kamrában a légköri nyomáshoz képest pozitív és negatív légnyomást hoznak létre. A rögzítés módja mérőberendezés gyártójától és típusától függően is eltérő lehet. A légáteresztés vizsgálat során a nyílászáróval lezárt légkamrába 0-300 Pa nyomáskülönbségig 50 Pascal nyomásfokozatokkal, 300 Pa és 600 Pa között 150 Pascalos lépésként túlnyomást vagy dekompressziót kell felépíteni. A túlnyomás során a nyílászáró esetleges résein keresztül távozó levegő nyomásesést eredményezne, amit folyamatos levegőbetáplálással lehet kompenzálni. Egy nyílászáró légzárési teljesítőképessége alatt azt a légmennyiséget értjük, amely adott nyomáskülönbség hatására adott időegység alatt az ablak réseink keresztül átáramlik.

A szabványos vizsgálatokat 10-30 °C hőmérsékleten és 25-75% relatív páratartalom értékeken kell elvégezni. A mérési eredményeket normál légállapotra a következő összefüggéssel lehet átszámítani:

$$V_0 = V_x \cdot \frac{293}{273 + T_x} \cdot \frac{P_x}{101325} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (39)$$

Ahol:

$V_0$  - normál légköri nyomáson és hőmérsékletre számított légáteresztés [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$V_x$  - adott légköri nyomáson és hőmérsékleten mért légáteresztés [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

$T_x$  - vizsgálati hőmérséklet [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$P_x$  - vizsgálati légköri nyomás [Pa]

A normálállapotra átszámított légmennyiséget a nyomás függvényében az MSZ EN 12207:2001 szabvány szerinti osztályozó diagramban ábrázoljuk. Az osztályozó diagram négy osztályértéket különböztet meg, melyek területét az osztályhatároló egyenesek jelölnék ki. A nyílászárók egységnyi felületére vonatkoztatott osztályozó egyenesek egyenletei:

$$4. \text{ osztály: } L_{4.oszt} = 0,1396 \cdot \Delta P^{(2/3)} \quad (40)$$

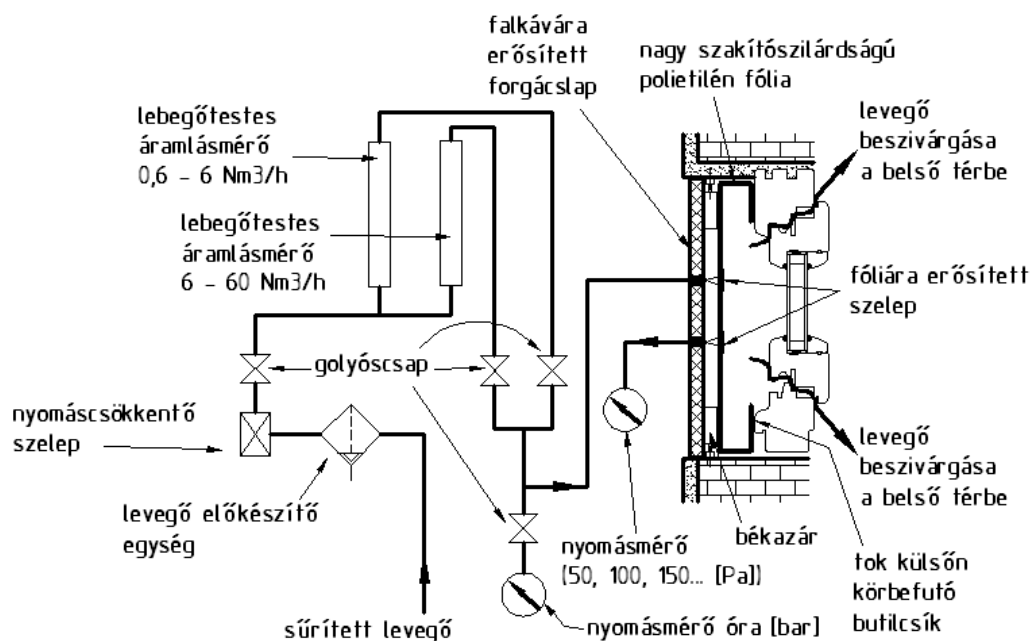
$$3. \text{ osztály: } L_{3.oszt} = 0,4188 \cdot \Delta P^{(2/3)} \quad (41)$$

$$2. \text{ osztály: } L_{2.oszt} = 1,2536 \cdot \Delta P^{(2/3)} \quad (42)$$

$$1. \text{ osztály: } L_{1.oszt} = 2,322 \cdot \Delta P^{(2/3)} \quad (43)$$

Az ablak minősítését az határozza meg, hogy a nyomás függvényében ábrázolt légáteresztési érték melyik minősítő egyenest nem lépi át. Abban az esetben, ha az ablak légáteresztési értékei több osztályközbe esnek, akkor a terméket mindig az érintett osztályok közül a leggyengébbre kell minősíteni.

A dolgozatban található beépített nyílászárók helyszíni légáteresztési vizsgálatához egy általunk kifejlesztett speciális berendezést alkalmaztunk, amellyel a szabványos laboratóriumi légzárési vizsgálatokkal megegyező pontosságú méréseket hajtottunk végre. A mérőműszerbe épített lebegőtestes áramlásmérő méréstartománya 0,6-60 Normál m<sup>3</sup>/h, a kalibrálási adatok mellett  $\pm 4\%$  pontossággal. A beépített ablakok helyszíni légzárési vizsgálatához szükséges nyomáskamra ablakhoz történő rögzítését, valamint a mérőberendezés elvi felépítését az 12. ábra mutatja.



12. ábra Beépített nyílászáró helyszíni légáteresztési vizsgálatához kifejlesztett mérőműszer vázlatja

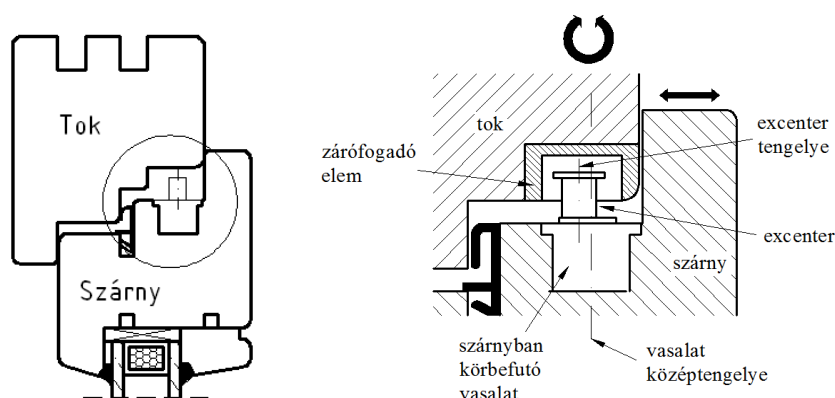
A helyszínen felépíthető kamra két rétegből áll. A kamra légtömorségét egy elhanyagolható permeabilitású fóliaréteg biztosítja, ami tulajdonképpen egy fóliából készült légtömör zsák. A fóliaszák az ablak külső tokfelületéhez kétoldalú rugalmas tömítő ragasztó segítségével rögzíthető. Annak érdekében, hogy a nagyobb nyomásfokokon a fóliaszák ne váljon el a toktól, vagy ne szakadjon ki, szükség van egy merev falú kamrára is. A merev falú kamrát maga az ablak kávája és a kávába excenteres szorítókkal berögzített merev forgácslap biztosítja. A segédkamrában külső levegőbetáplálással a laboratóriumi méréseknél alkalmazott túlnyomás hozható létre, és a lebegőtestes áramlásmérő segítségével mérhető a túlnyomás fenntartásához szükséges

levegőmennyiség. Az laboratóriumi mérésel megegyezően, adott kamranyomás mellett időegység alatt, egységnyi felületre vonatkoztatott levegőmennyiség fogja jellemezni a nyílászáró légzárési teljesítményét. A mérőberendezés kialakítása a felépített kamrába történő dekompresszió létrehozását nem teszi lehetővé.

## 8.2. Első típusvizsgálatot követően raktározott nyílászárók laboratóriumi légzárési vizsgálata és hőveszteség számítása

Vizsgálatainkat négy különböző típusú és gyártmányú fa ablakon végeztük el. Az ablakok műszaki paramétereit Az 1. melléklet tartalmazza. A légzárési vizsgálatokat az MSZ EN 1026:2001 szabvány szerint végeztük az ÉMI Nonprofit Kft. akkreditált ablakvizsgáló laboratóriumában. A mérések a Holten gyártmányú VHEPC típusú kalibrált mérőberendezésen történtek. A mérőműszer méréstartománya 0-1200 m<sup>3</sup>/h kalibrálási adatok mellett  $\pm 5\%$  pontossággal. A szabványban meghatározott minden nyomásfokozaton mért légáteresztési értékhez kiszámítottuk a filtrációs hőáramokat, amelyeket a teljes ablakszerkezetre vonatkoztatott transzmissziós hőveszteséggel hasonlítottam össze.

Az ablakok első vizsgálatára röviddel a gyártásuk után került sor, majd becsukott állapotban a vizsgáló laboratóriumban kerültek elhelyezésre. A nyílászárók a tárolás során mindennemű mechanikai hatásoktól védve, rétegelt lemezből készült zárt dobozokban külön-külön kerültek elhelyezésre függőleges helyzetben. A fűtött laboratóriumi helyiségben évszaktól függően 20-25 °C közötti a hőmérséklet mellett 45-65% relatív páratartalom mérhető. Egy éves tárolás után három próbatesten ismételt légzárési vizsgálatokat hajtottunk végre. A vizsgálat során először a próbatesteket a raktározást követő eredeti állapotukban vizsgáltuk, majd vasalatbeállítást követő ismételt mérést hajtottunk végre. A vasalatállítás során a szárnyban található zárócsapok excenterének állításával a lehetséges legszorosabb zárást hoztuk létre a tok és a szárny között (lásd 13. ábra).



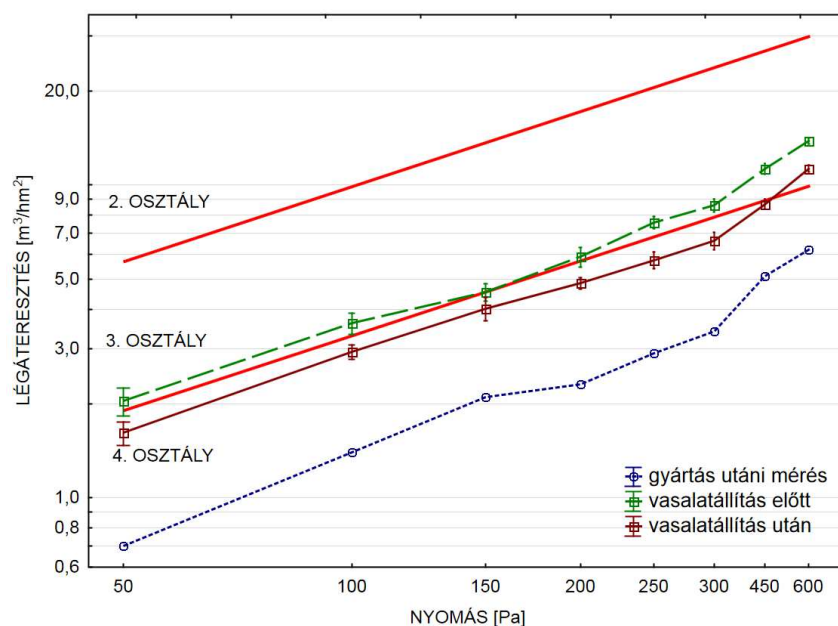
13. ábra A vasalat záró csapjának állítási lehetőségei

A 4. számú próbatestet közel négyéves tárolás után vizsgáltuk. Az adott nyomásfokozatokon mért légzárési adatokból az (1) valamint az (5) összefüggések

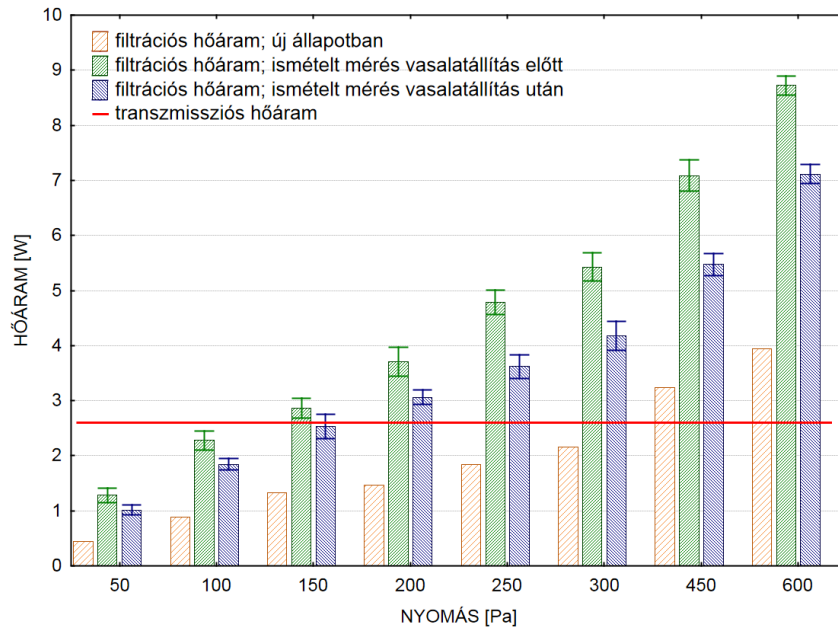
felhasználásával kiszámított, 1 °C hőmérsékletkülönbség hatására kialakuló filtrációs és transzmissziós hőáramokat a 14, 16, 18, 20. diagram szemlélteti. Az ismétléssel végrehajtott mérési adatokból készített oszlopdiagramokon a két értékhez tartozó 95%-os konfidencia intervallumok is feltüntetésre kerültek. Bár az energiaáramok összehasonlítása ilyen formában nem nyújt semmiféle információt arra vonatkozóan, hogy a légzárési teljesítmény csökkenésével miként változik meg az épület fűtési, és hűtési energiaigénye, azonban a változás mértéke és a hőáramok viszonya jól szemléltethető vele.

### 8.2.1. A légzárési vizsgálatok kiértékelése

A vizsgált ablakok légzárési osztályba sorolása az MSZ EN 12207:2001-es szabványban rögzített osztályozó diagram szerint történt. A megvizsgált négy ablak mindegyikénél elmondható, hogy a raktározási idő alatt az ablakok légzárési teljesítményében romlás következett be. A legjelentősebb teljesítményváltozás a 1. és a 2. számú ablaknál tapasztalható (14., 16. ábra). Az 1. próbatest légzárési teljesítménye az eredetileg legjobbnak számító 4. légzárési osztályból 3. osztályba esett vissza.

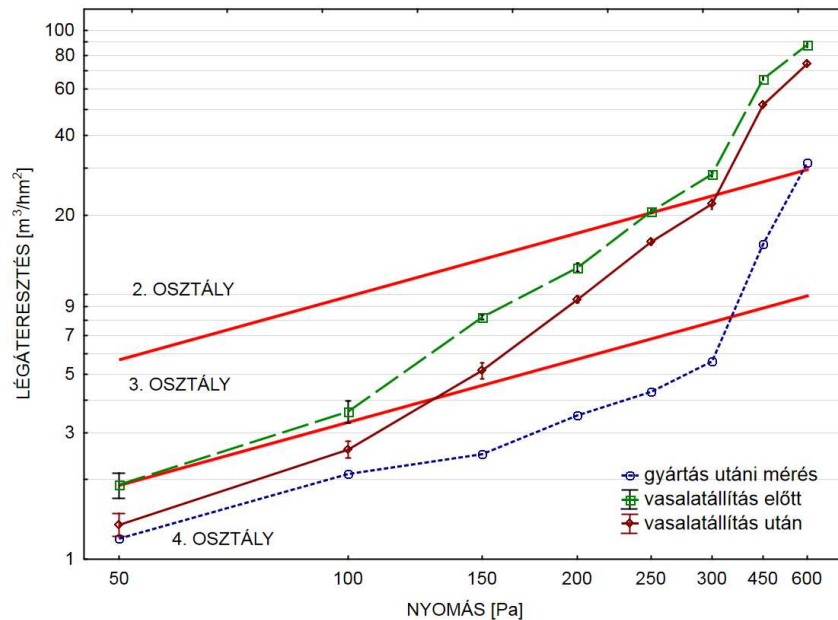


14. ábra Az 1. próbatest osztályozó diagramja

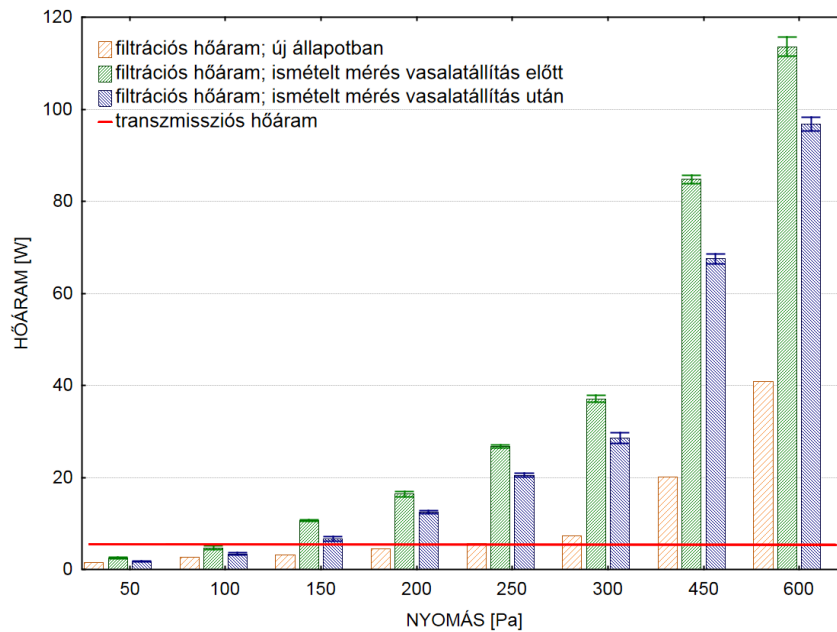


15. ábra Az 1. próbatest hőáram diagramja

A teljesítménycsökkenésből következően megnövekedett filtrációs hőáram már 150 Pa torlónyomás esetén is kicsivel meghaladta a transzmissziós hőáram értékét, és a vasalatok állításával sem lehetett azt jelentősen a transzmissziós hőáram értéke alá csökkenteni (15. ábra). A nyomás fokozásával tovább növekedett a két hőáram közötti különbség. Hasonló trend mutatkozott a 2. próbatest esetében is.

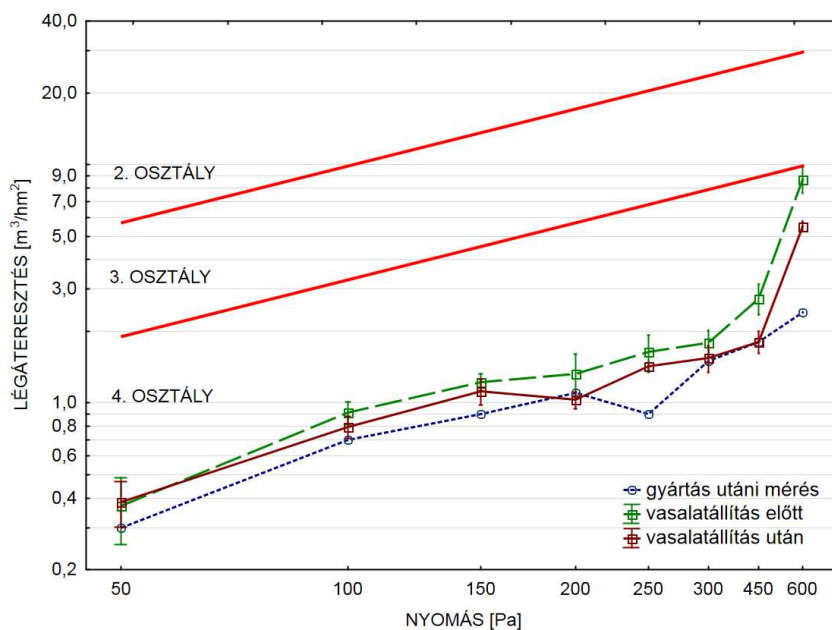


16. ábra A 2. próbatest osztályozó diagramja



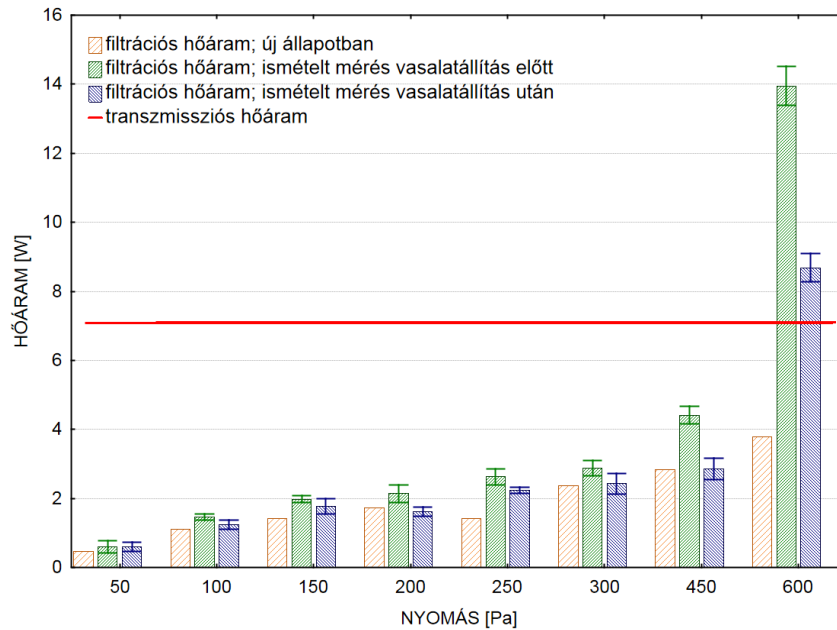
17. ábra A 2. próbatest hőáram diagramja

Az ismételt légáteresztési értékek még vasalatállítást követően is jelentős mértékben nagyobbak, mint a kezdeti állapotukban, ami azt eredményezte, hogy az ablak 300 Pascal nyomáson az eredetileg 4. légzárési osztályból a 2. osztályba csúszott vissza (15. ábra). A többi próbatest teljesítménycsökkenése a vasalatállítást követően nem eredményezett minősítő osztályváltozást. A legkisebb mértékű teljesítményromlás a 3. próbatestnél következett be, amely két középen felnyíló szárnyal, valamint felülvilágítóval rendelkezik.



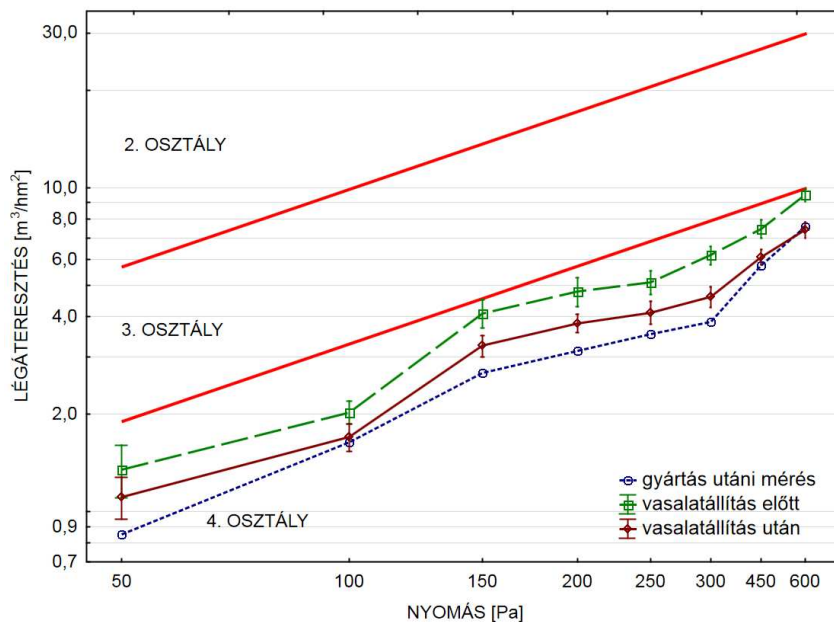
18. ábra A 3. próbatest osztályozó diagramja



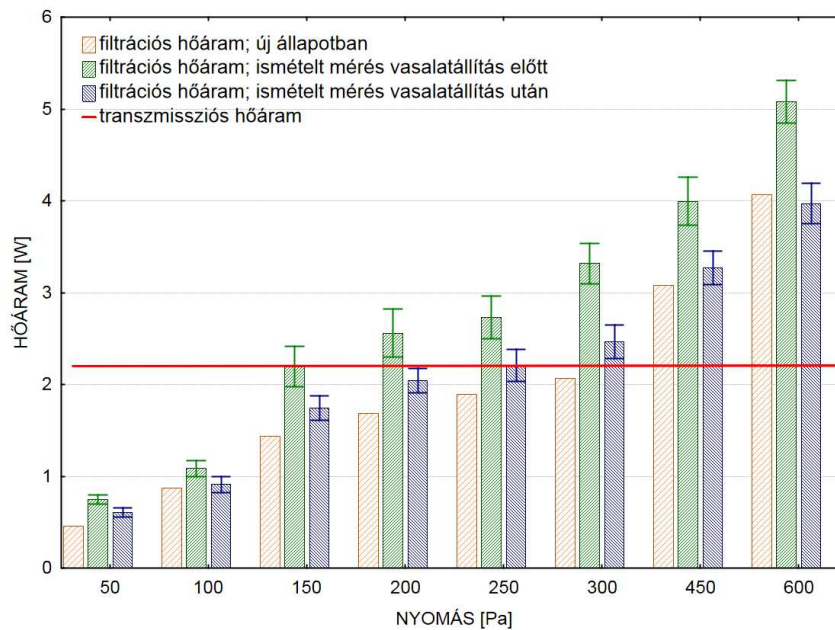


19. ábra A 3. próbatest hőáram diagramja

A mintatest nagy mérete és nagy fugahossza ellenére jó légzárési teljesítménnyel jellemezhető. A jó légzárás mellé azonban relatíve magasabb hőátbocsátási tényező társult, ami azt eredményezte, hogy a filtrációs energiaáram jelenösen elmaradt a vezetési hőármához képest. A 4. mintatest légzárési teljesítménye is csökkent a közel négy éves raktározás során, azonban ez a csökkenés még nagyobb nyomásértékeken sem eredményezett osztályromlást (20. ábra).



20. ábra A 4. próbatest osztályozó diagramja



21. ábra A 4. próbatest hőáram diagramja

Az alacsony légáteresztés ellenére a nyomáskülönbség növelésével 150 Pascal nyomáson elérte, majd tovább növelve a túlnyomást a filtrációs hőáram jelentősen meghaladta a transzmissziós hőveszteség értékét.

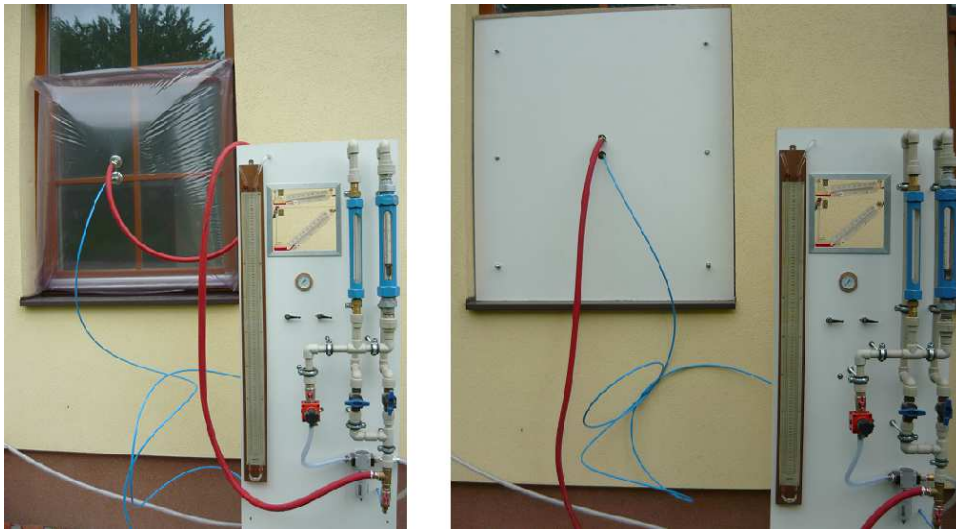
A mérési eredmények alapján elmondható, hogy a raktározás során a próbatestek légzárési teljesítménye annak ellenére csökkent, hogy semminemű mechanikai hatásnak nem lettek kitéve. A csökkenés mértéke próbatestenként változó mértékben jelentkezett, azonban a záródás szorosságának növelésével javult minden próbatest légzárása és megközelítette az eredeti értéket. A számított hőáramok összehasonlításából kiderül, hogy alacsonyabb nyomásértékeken jelentősen elmarad a filtrációs hőáram a transzmisszióhoz képest. Három próbatest esetében a 150 Pascal nyomáskülönbség mellett a réseken kialakuló légáram hatására a filtrációs hőáram már meghaladta a transzmisszió értékét, ami a nyomás növelésével egyre fokozódott.

### 8.3. A beépített nyílászárók helyszíni légzárési vizsgálata mobil mérőkamrával

A vizsgálatra három egyforma kialakítású, azonos használati és környezeti hatásoknak kitett ablakot választottunk. A vizsgált nyílászárók technikai adatai az 1. mellékletben található. Az EN ISO 10077-1:2000 szabvány szerint az ablakok  $U = 1,47 \text{ W/m}^2\text{K}$  hőátbocsátási tényezővel jellemezhetők. A vizsgált nyílászárók  $2,13 \text{ m}^2$  felületén  $1^\circ\text{C}$  hőmérsékletkülönbség hatására kialakuló transzmissziós hőáram mértéke a 1. összefüggés alapján  $3,13 \text{ Watt}$ . Az ablakok 2006 augusztusában egy földszinti laboratóriumi épület déli tájolású homlokzatába lettek beépítve. Az épületet dél-nyugati oldalról egy futballpálya határolja, ezért a nyílászárók mind a szélhatásnak mind pedig a napsugárzásnak is fokozottan ki vannak téve. Az ablakok vasalatainak excenter

állásából és a helyiséget használó személyzet elmondása alapján megállapítható, hogy a beépítésüket követően az üvegtáblák tisztításán kívül semminemű karbantartási művelet nem történt.

A helyszíni légzárési vizsgálatokat az általunk kifejlesztett és az 8. fejezetben bemutatott ablakvizsgáló berendezéssel végeztük el (22. ábra). A nyílászárók első típusvizsgálati jegyzőkönyvei nem állnak rendelkezésünkre, azonban a statisztikai becslésen alapuló szoftveres minősítő program (ECWINS) alapján az új állapotú nyílászáró 4. osztályú légzárési teljesítménnyel jellemezhető. A felmérés során először a nyílászárókat eredeti állapotukban vizsgáltuk, majd a vasalat excenter csapjainak fokozatos állítását követően történtek a légzárési vizsgálatok.



22. ábra Beépített nyílászáró helyszíni légzárési vizsgálata

Mindhárom nyílászáró esetében ezek a zárócsapok nyitott excenter állásban voltak, ami a legnagyobb távolságot engedi a tok és a szárny között.

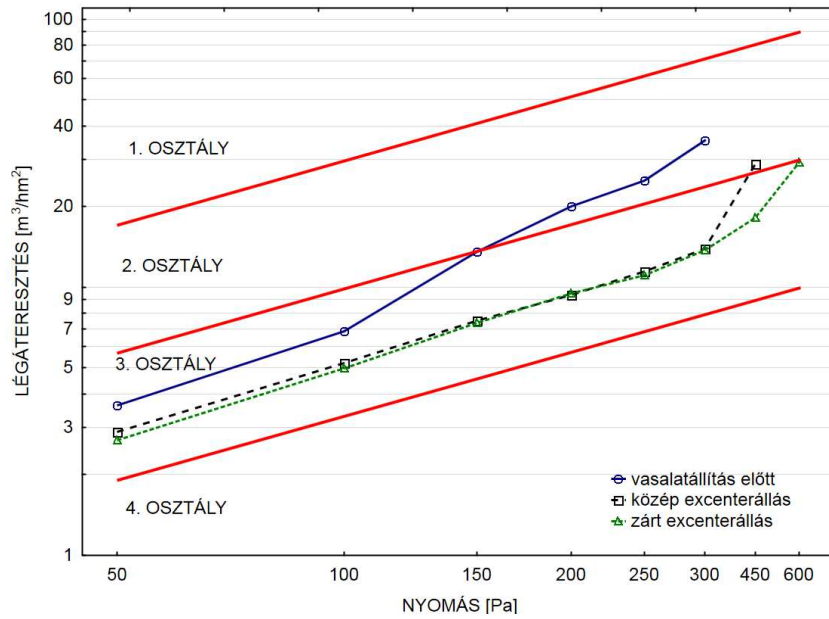
A mérőberendezés sűrítettlevegő előállító egységének korlátozott kapacitása miatt volt olyan nyomásfokozat, amelyen nem lehetett a mérést végrehajtani. A vizsgálatokat 23 °C hőmérsékleten és 57% relatív páratartalom mellett végeztük el.

### 8.3.1. A helyszíni légzárési vizsgálatok eredményeinek bemutatása

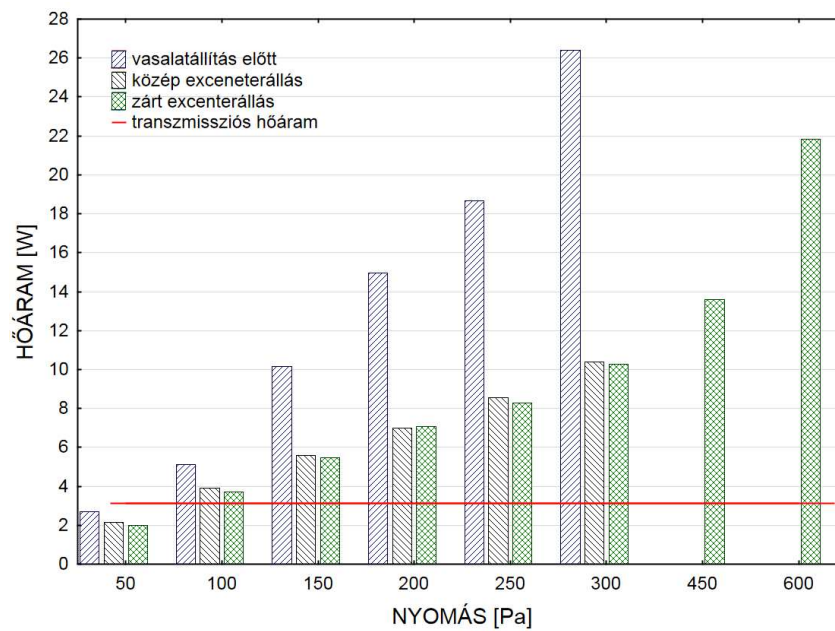
A helyszínen elvégzett vizsgálatok alapján minden ablakról elmondható, hogy az eredetileg 4. osztályértékkel minősíthető légzárési teljesítmény a hat éves működés alatt több osztályértéket romlott. Annak ellenére, hogy mindhárom nyílászáró azonos működési és környezeti hatásnak volt kitéve, a teljesítménycsökkenés nyomásfokozatonként elég nagy szórást mutat. Magasabb nyomáskülönbségeken és nyitott állapotú excenter beállításokon végzett vizsgálatok során a légáteresztés olyan értékig nőtt, ami a mérőeszközünk mérési tartományán kívül esett. Az 5. számú próbatest alacsony nyomásértékeken még 3. osztálynak megfelelő légzárással jellemezhető, azonban ez a légmennyiség is akkora filtrációs energiaveszteséget eredményezett, amely meghaladta a transzmisszió mértékét (23. ábra). A nyomás

fokozásával az egyenes meredeksége megváltozott, ami a rés méretének növekedését jelenti. A megnövekedett résnek köszönhetően a számított filtrációs hőveszteség többszörösen meghaladta a transzmisszió 3,13 Watt értékét. A záródási pontok excentereinek közép-, majd zárt állapotba történő állításával látványos javulás volt tapasztalható, azonban így sem lehetett elérni az eredeti 4. osztályú légzárást. Az állításnak köszönhetően egészen 300 Pascal légnyomás különbségig nem következett be változás a légrés geometriájában. A 6. számú próbatest nyitott excenterrel mért légáteresztése a nyomás növelésével ugrásszerűen emelkedett, ami az áramlási rés méretének növekedését valószínűsíti. 150 Pa torlónyomás felett a légzárás mértéke meghaladta a mérőműszer mérési határát, azonban a görbe menetéről látható, hogy a légáteresztés 200 Pascal nyomáskülönbség mellett feltehetően 1. légzárési osztály eredményezett volna (25. ábra). A hőáramok tekintetében elmondható, hogy az excenter állásától függetlenül, már 50 Pascalon is meghaladta a filtrációs hőáram a transzmisszió értékét (26. ábra). A záródás szorosságának állításával jelentős mértékben javult a légzárás, azonban ennél a próbatestnél is megfigyelhető a 300 Pa nyomás hatására bekövetkező ugrásszerű résnövekedés, ami 2. osztályú légáteresztést eredményez. A 7. próbatest már alacsony nyomásértékeken is csupán 2. osztályú légzárással jellemezhető, ami magas filtrációs hőáram értéket eredményez. 50 Pa nyomáskülönbségnél is a filtráció okozta hőáram több mint kétszerese a transzmissziós hőáram értékének (27.-28. ábra). Az alacsony légzárési teljesítmény ellenére, a nyomás fokozásával sem következett be résméret változás. Az excenter középállásba történő állításával kismértékben lehetett javítani a légzárást, azonban osztályérték javulást csak az excenter teljes állítás tartományának kihasználásával lehetett elérni. A szorosság állításával 100 Pa nyomáskülönbségig a filtrációs hőáram kicsivel alulmaradt a transzmisszióhoz képest. Zárt excenter állásnál azonban itt is megfigyelhető, a résnövekedést jelző törés az egyenesben.

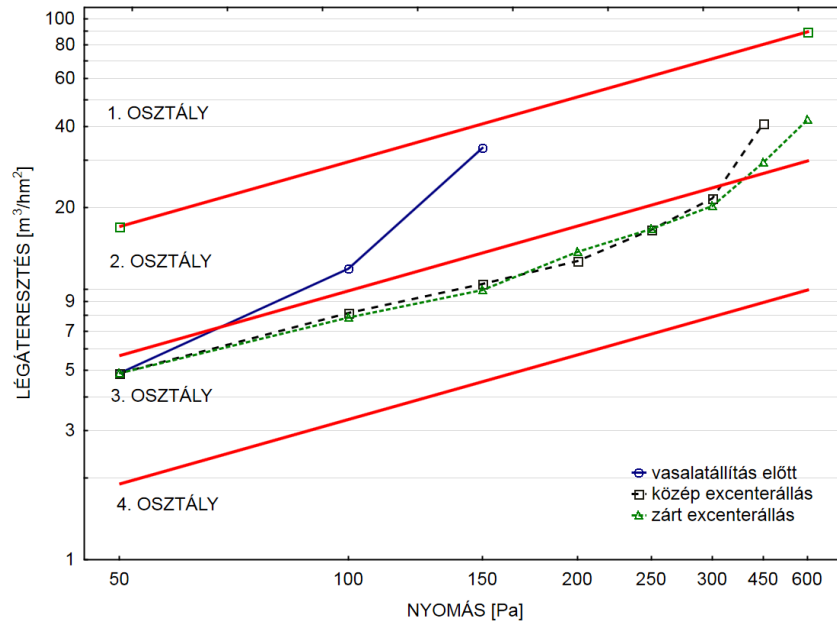
A beépített ablakokon elvégzett vizsgálatok alapján elmondható, hogy a vizsgált három azonos típusú és elhelyezésű ablak légzárési teljesítménye a vasalatok szorosságának állításával jelentősen javítható, azonban egyik próbatest esetében sem sikerült az eredeti 4. osztályú légzárást visszaállítani. Az eredményekből számított hőáramok összehasonlítása jól mutatja, hogy a légzárás csökkenésével már 50 Pa nyomáskülönbség hatására is annyi levegő jut át az ablak hézagain keresztül, amely nagyobb veszteségeket eredményez, mint a transzmisszióból származó energiaveszteség.



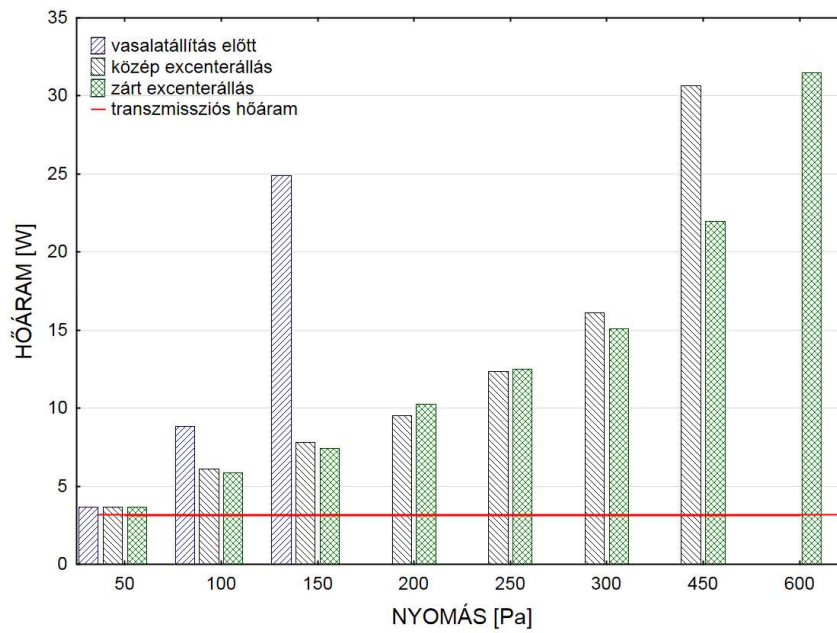
23. ábra Az 5. számú próbatest osztályozó diagramja



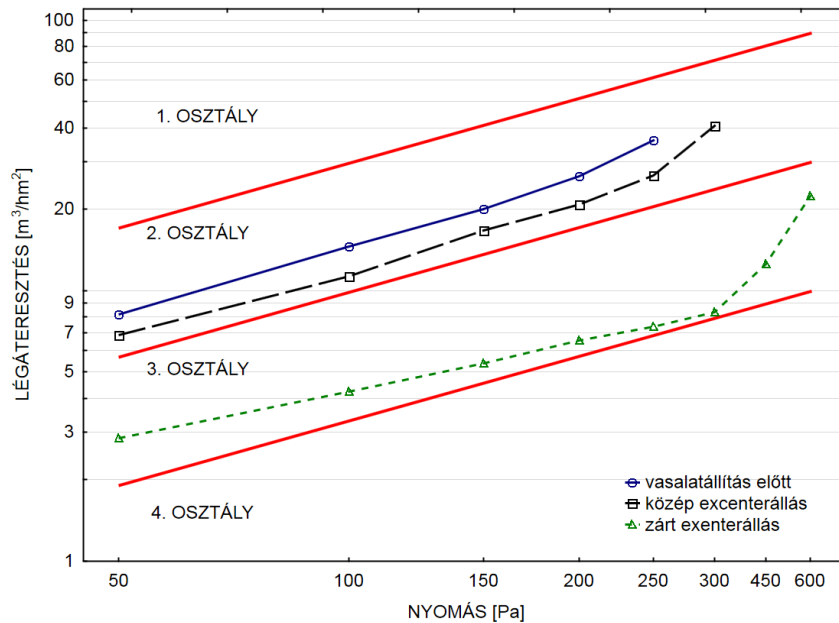
24. ábra Az 5. számú próbatest hőáram diagramja



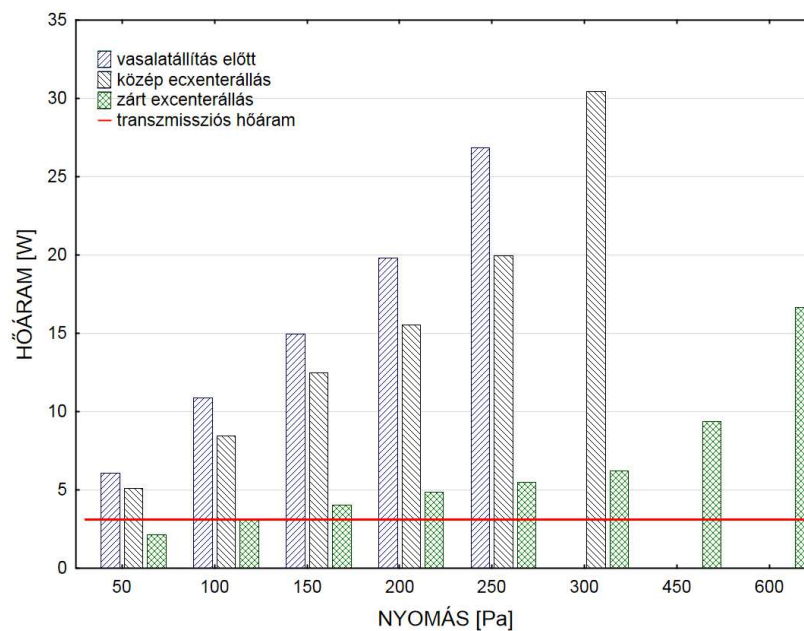
25. ábra A 6. számú próbatest osztályozó diagramja



26. ábra A 6. számú próbatest hőáram diagramja



27. ábra A 7. számú próbatest osztályozó diagramja



28. ábra A 7. számú próbatest osztályozó és hőáram diagramja

#### 8.4. A raktározás utáni és a helyszíni vizsgálatok összefoglalása

A légzárási teljesítmény időbeni változásának mértékére irányuló előzetes vizsgálatok alapján elmondható, hogy mind a raktározott, mind pedig a valós működési körülményeknek kitett nyílászárók légzárási teljesítményében is jelentős változás következett be. A teljesítménycsökkenés mértéke a várakozásnak megfelelően a

beépített ablakok esetében jelentősebbnek bizonyult, azonban mindkét esetben a zárás szorosságával mérsékelhető volt a légáteresztés mértéke.

A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy az épületeink fontos részét képező ablakok tervszerű karbantartásának elmulasztásával, már rövid használati idő után is jelentős teljesítménycsökkenés következhet be. A minősítő egyenes meredekségének ugrásszerű változásával az áramlási koefficiens is változik, ami azt jelenti, hogy az 50 Pa nyomáson elvégzett ún. Blower-door teszt nem alkalmas a nyílászárók légzárási teljesítményének meghatározására. A leromlott légzárási teljesítmény javítására a záródási pontok szorosságának állítása jó alternatívát jelenthet, azonban az állítás mértékének és időzítésének ismerete nélkül a szakszerű karbantartás nem végezhető el. A raktározott nyílászárók teljesítménycsökkenése első megközelítésben a rugalmas tömítőprofil relaxációból adódó hézagzárési képességének csökkenésével magyarázható, mivel a próbatestek vaslatait semminemű koptató hatás nem érte. A beépített nyílászárók jelentősebb teljesítménycsökkenéséért feltehetően a vasalatok elmozdulása, kopása, valamint a gumitömítések relaxálódása felelős.

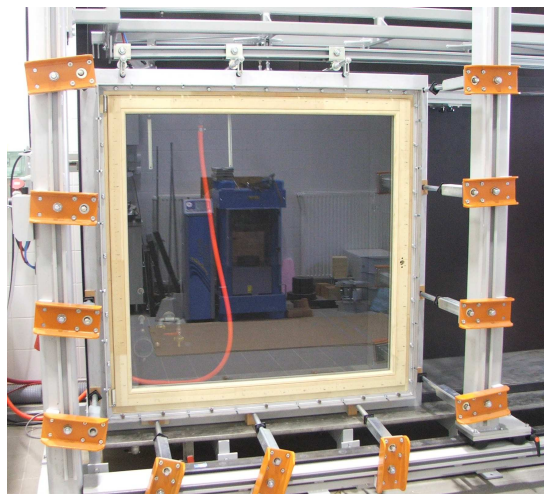


## 9. NYÍLÁSZÁRÓK SZERKEZETI ELEMEINEK ÉS BEÁLLÍTÁSAINAK HATÁSA A LÉGZÁRÁSI TELJESÍTŐKÉPESSÉG KEZDETI ÉRTÉKÉRE

A nyílászárók légzárási teljesítőképességének megbízhatósági modelljének kidolgozásához, elengedhetetlenül szükséges a nyílászáró egyes elemeinek a rendszer működésére vonatkozó hatásvizsgálata. Ebben a fejezetben a korszerű fa nyílászárók szerkezeti elemeinek a légzárási teljesítőképességre gyakorolt hatásának vizsgálatával foglalkozom.

### 9.1. A rugalmas ütközések elhelyezkedésének hatása a légzárási teljesítőképességre

A nyílászárók gyártása során használt marószerszám készletek már szinte kivétel nélkül tartalmaznak kétszeres rugalmas ütközés kialakításához szükséges profilkéseket. A dolgozat 1. mellékleteiben bemutatott profilokon is láthatók, hogy a védett elsődleges tömítésnek számító középtömítés mellett az ablakszárny belső oldali pereménél is kialakítható egy folytonos rugalmas felütődés. Ebben a fejezetrészben e két rugalmas tömítés szerepét vizsgálom öt különböző próbatestet. A nyílászárók technikai adatai a mellékletben találhatóak. A 29. ábra a 11. számú próbatestet vizsgálat közben ábrázolja.

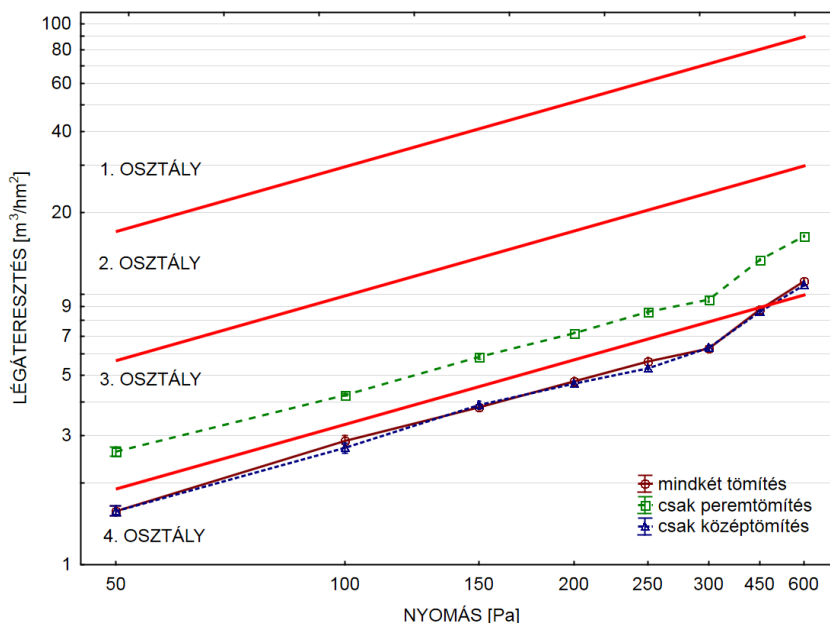


29. ábra A 11. számú próbatestet légzárási vizsgálat

Minden próbatesten a szabványos légzárási vizsgálatot három kísérleti beállítással és háromszori ismétléssel végeztük el. A mérések az ÉMI Nonprofit Kft. valamint a Nyugat-magyarországi Egyetem FAIMEI akkreditált ablakvizsgáló laboratóriumában történtek. A légzáráshoz használt műszerek korábban ismertetésre kerültek.

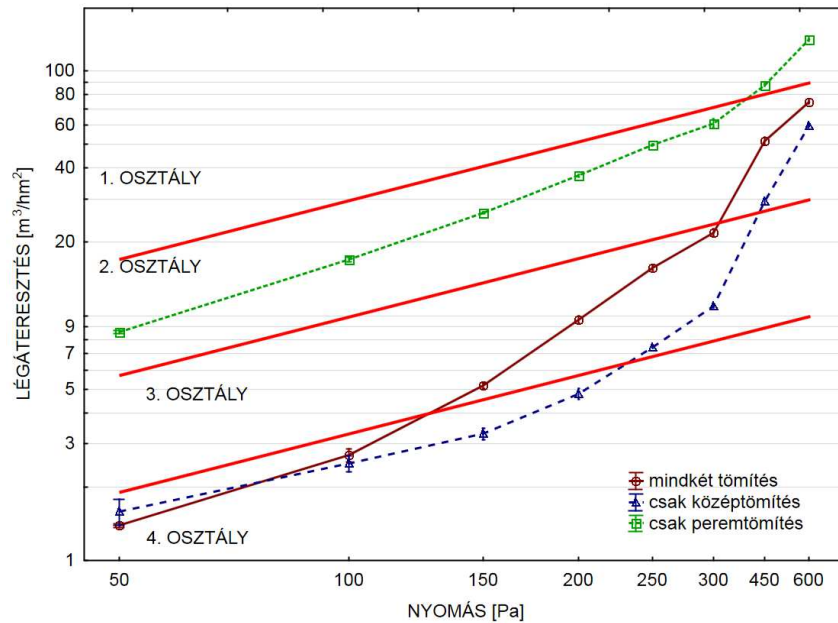
### 9.1.1. A rugalmas ütközések hatásainak kiértékelése a légáteresztési értékek osztályba sorolásával

Az 8. számú próbatest légzárási diagramja látható a 30. ábrán. A peremtömítés eltávolításával a próbatest légzárási teljesítményében nem következett be változás. A 450 Pascal nyomáskülönbség hatására bekövetkező ugrásszerű teljesítménycsökkenés minden kísérleti beállításnál tapasztalható volt. A kettős tömítéshez képest a középtömítés eltávolítása egy osztályértékű teljesítménycsökkenést eredményezett.

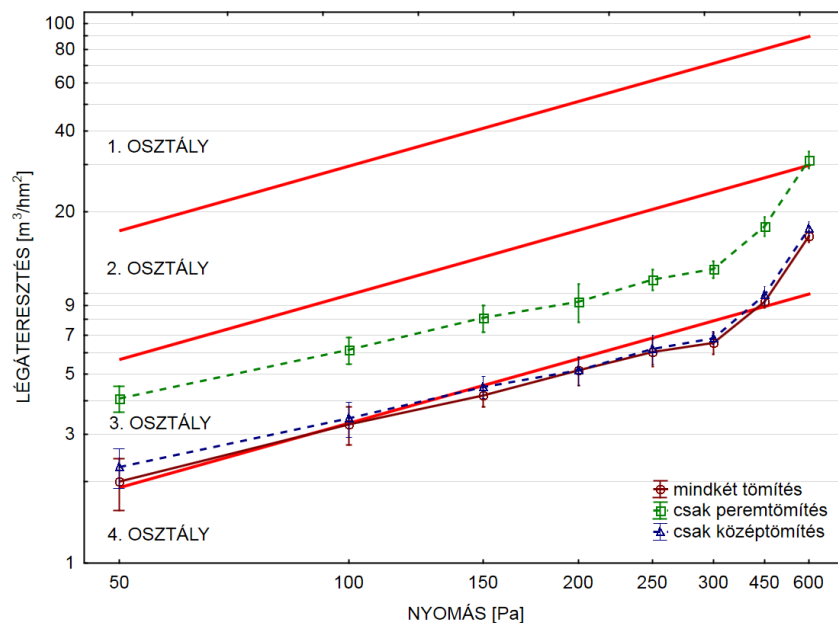


30. ábra A 8. számú próbatest osztályozó diagramja különböző kísérleti beállítás mellett

A 9. próbatest középtömítésének eltávolításával a légzárási teljesítménye 600 Pascal nyomáskülönbségen kicsivel meghaladta a 3. osztályhoz tartozó minősítő értékét, ezért a tömítés eltávolítása két osztályértékű teljesítménycsökkenést jelentett (31. ábra). A peremtömítés eltávolítása nem volt hatással a légzárási teljesítményre. A 10. számú próbatest vizsgálata során a peremtömítés eltávolításával a nyílászáró mindhárom ismételt mérés alkalmával javuló légzárást mutatott (32. ábra). A középtömítés eltávolításával már az alacsony nyomáskülönbség hatására bekövetkező légszivárgás mértéke is meghaladta a 3. osztályhoz tartozó küszöbértéket, így két osztályértéket is romlott az ablak légzárási teljesítménye.



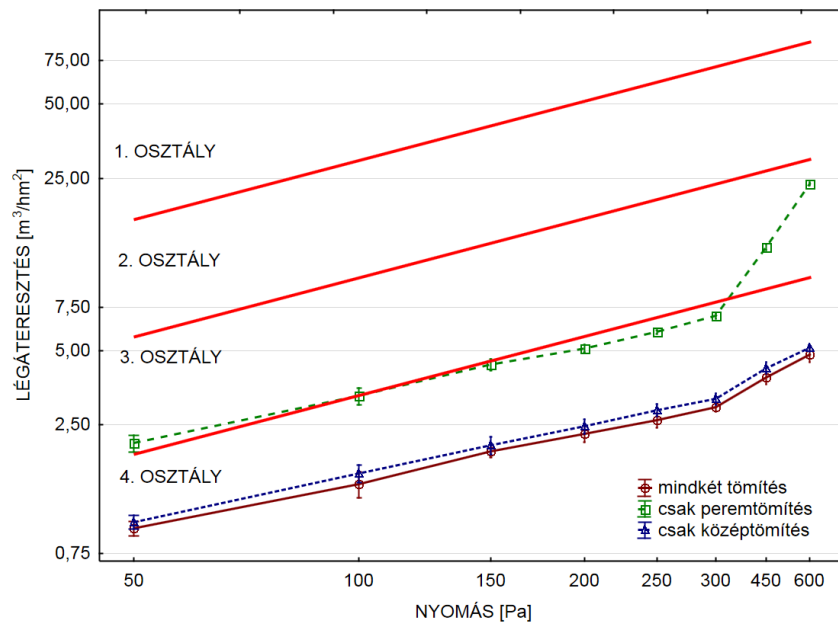
31. ábra A 9. számú próbatest osztályozó diagramja különböző kísérleti beállítás mellett



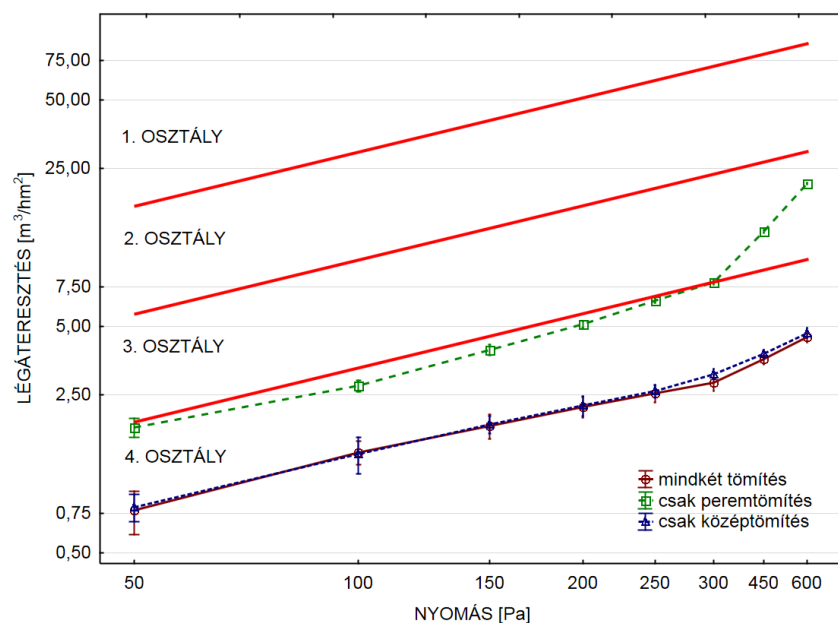
32. ábra A 10. számú próbatest osztályozó diagramja különböző kísérleti beállítás mellett

A 11. számú próbatest teljesítményére a peremtömítés eltávolítása nem volt hatással, azonban a középtömítés eltávolításával jelentős teljesítménycsökkenés következett be (33. ábra). A tárgyalt próbatestnél is megfigyelhető a 450 Pascal nyomáskülönbség mellett megjelenő ugrásszerű légszivárgás, amely a középtömítés eltávolításával vált igazán jelentősé. A 12. próbatest méretébe és záródásában is megegyezett a 11. számú próbatestével, csak a profilvastagságban és az üvegezésében volt eltérés. A 11. próbatest 68 mm profilvastagsággal és kettős üvegezéssel készült, míg a 12. próbatest 78 mm vastagságban és hármas hőszigetelt üvegezéssel. A 12. próbatest légzárásának változása

a különböző kísérleti beállításokon megegyezett a 11. próbatest vizsgálata során tapasztaltakkal.



33. ábra A 11. számú próbatest osztályozó diagramja különböző kísérleti beállítás mellett



34. ábra A 12. számú próbatest osztályozó diagramja különböző kísérleti beállítás mellett

A vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a másodlagos peremtömítés szerepe elhanyagolható a nyílászárók légzárási teljesítményének alakulásában. A középtömítés peremtömítéssel történő kiegészítésével a nyílászáró légzárási teljesítmény lényegesen nem javítható. Mivel nincs hatással a légzárási teljesítményre, ezért annak öregedése, sérülése, vagy hiánya nem eredményez teljesítményváltozást. Következésképpen egy

nyílászáró légzárési teljesítőképességét jellemzően a középtömítés állapota határozza meg. Abban az esetben, ha a középtömítés sérül és nem tudja ellátni feladatát, a peremtömítés szigetelőképesége válik meghatározóvá, ekkor azonban osztályátléppéssel járó teljesítménycsökkenéssel kell számolni.

## 9.2. A tok- és a szárny távolságának változása a vasalatállítás következtében és hatása nyílászárók légzárési teljesítőképességére

A vizsgálat célja annak kimutatása volt, hogy az új állapotú rugalmas tömítések fokozódó deformációja eredményez-e légzárési teljesítményváltozást. A 8. fejezetben bemutatott vizsgálati eredmények azt mutatták, hogy a vasalatok záródási csapjainak állításával a használt nyílászárók légzárési teljesítménye növelhető.

A tok- és szárny távolságának mérése a korábban már bemutatott 11. és 12. számmal jelölt próbatesteken történt. A légzárési vizsgálatok az elsődleges és másodlagos tömítések eltávolítását követően, nyitott, közép és zárt excenter beállításokon történtek.



35. ábra. A tok és szárny távolságának meghatározása

A vizsgálatokat 21 °C levegőmérsékleten és 49% relatív páratartalom mellett végeztük el aNyME-FAIMEI ablakvizsgáló laboratóriumában. A középtömítések eltávolítását követően került sor a tok és a szárny egyes excenter beállítások hatására kialakuló távolságának plasztilinnal történő meghatározására (35. ábra).

A plasztilin alakíthatóságát kihasználva, előnyösen alkalmazhatónak bizonyult a tok- és szárny távolságának meghatározására. A szárny becsukásával kialakuló deformált magasságának leméréséhez mikrométert használtunk, amelynek hitelesített pontossága 0,001 mm.

### 9.2.1. A vasalatállítás hatásának kiértékelése a légáteresztési értékek osztályba sorolásával

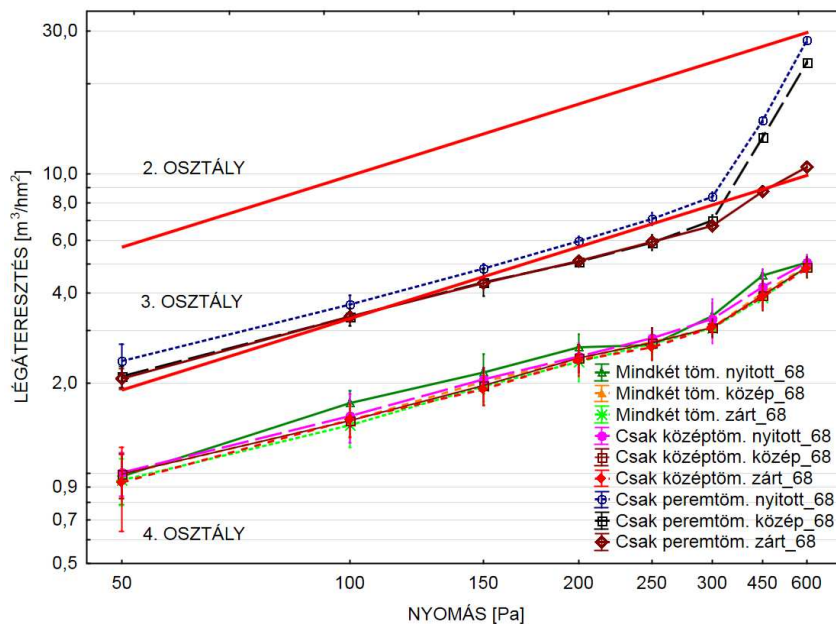
A nyílászárónként 18 mérési ponton felvett adatok összesített statisztikai jellemzőit az 2. táblázat tartalmazza. Megfigyelhető volt, hogy a záródási vonal mentén a tok-és szárny távolsága a vasalat záródási kapcsolatai közelében csökken, majd attól távolodva nő. Ez azt jelenti, hogy a mérési adatok szórása feltételezhetően nem a véletlennek köszönhető, azaz nem lehet normális eloszlással közelíteni.

2. táblázat A tok-és a szárny távolságának statisztikai jellemzői

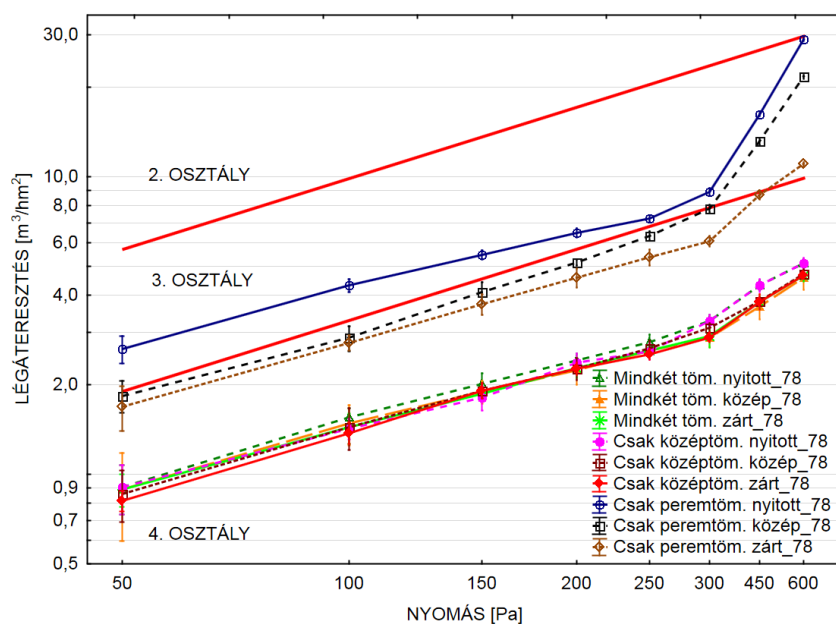
Tok- és a szárny távolsága a középtömítés síkjában	Mérések száma	Számtani középérték	Tapasztalati szórás	Konfidencia intervallum -95,00%	Konfidencia intervallum 95,00%
nyitott excenter állás	36	5,973	0,447	5,821	6,124
közép excenter állás	36	5,717	0,421	5,574	5,859
zárt excenter állás	36	5,393	0,431	5,247	5,540

A laboratóriumi körülmények között elvégzett légáteresztési vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy a másodlagos tömítésként szolgáló peremtömítés eltávolításával, valamint a vasalat állításával a légzárási teljesítményben nem következett be változás (36. és 37. ábra). Az elsődleges tömítésnek számító középtömítés eltávolításával mindkét próbatest légáteresztése egy osztályértéket csökkent. Megfigyelhető, hogy a középtömítés eltávolításával 450 Pascal túlnyomás mellett a légáteresztésben ugrásszerű változás következett be, ami a szivárgási rés geometriájában bekövetkező változásra utal.

Az állítható záró csappal készülő vasalatok állításával a tok-és szárny távolsága vassalattípustól függően adott határok között változtatható, azonban annak hatását az új termékek légzárási teljesítőképességére nem tudtuk kimutatni. A vasalatállítás hatása csak a középtömítés eltávolításával válik kimutathatóvá, jelentős légzárási teljesítőképesség csökkenéssel párosulva. Megállapítható, hogy a légzárási teljesítőképesség megbízhatóságának szempontjából előnyös, ha nyílászáró beépítését követő vasalat beállításakor a - gyakorlattól eltérően - a tömítésben kialakuló legkisebb kompressziót jelentő nyitott excenterállások alkalmazására kerül sor.



36. ábra A 11. számú próbatest osztályozó diagramja különböző vasalatbeállításokat alkalmazva



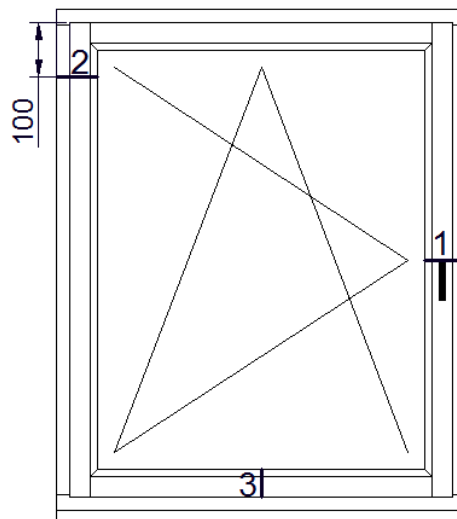
37. ábra A 12. számú próbatest osztályozó diagramja különböző vasalatbeállításokat alkalmazva

### 9.3. A tok és szárny távolságának felmérése

Amint az látható, a tok és szárny távolságának beállítására már a beépítést követően is gondot kell fordítani. A használat során a vasalatok kopásából, valamint elállítódásának következtében ezek a távolságok folyamatosan változnak. Az ingadozáshoz hozzájárulhat még az alkatrészek hő valamint nedvesség dilatációja is.

Kitüntetett jelentősége van a hézagrendszernek a tömítésben ébredő szorító erő alakulásában. Minél kisebb tér áll a tömítés rendelkezésére, annál nagyobb erőt kell kifejteni a nyílászáró becsukásakor, ami többletterhelést jelet a kerület mentén elhelyezett vasalatokra, és magára a gumitömítésre is. Minél nagyobb a deformálódás, annál nagyobb lesz a tömítésben ébredő feszültség, és annál nagyobb lesz, az un. feszültségkorrózió hatása is.

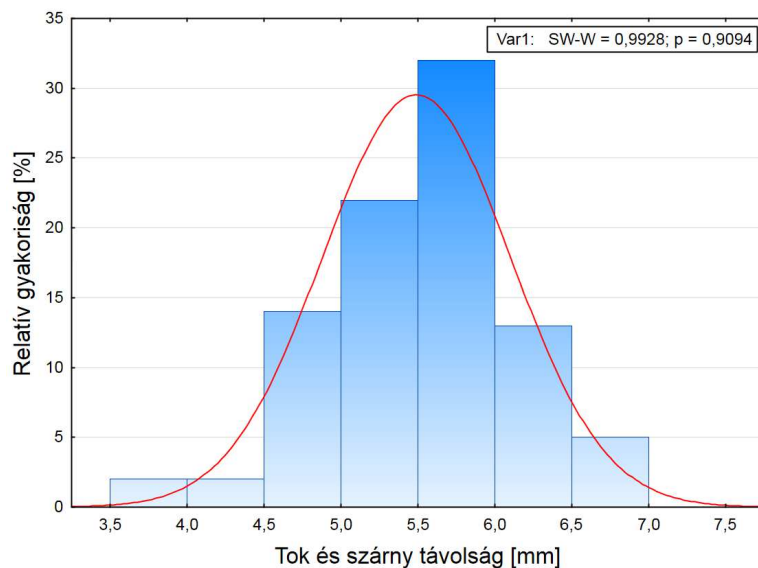
Az előző fejezetben ismertetett mérési eljárással több használt nyílászárón is végeztünk résmérési vizsgálatokat. Három különböző épület összesen 30 nyílászáróján 3 azonos pontban mértük a tok és szárny távolságokat. A nyílászárók kiválasztása véletlenszerűen történt. Volt olyan ablak, amelyet naponta több alkalommal is működtetnek, és volt olyan is, amit a közel 8 éves beépítése óta nem nyitottak ki. A mérési pontok elhelyezkedését az 38. ábra mutatja. A mérési módszer és eszközök megegyeznek az előző fejezetben bemutatottakkal.



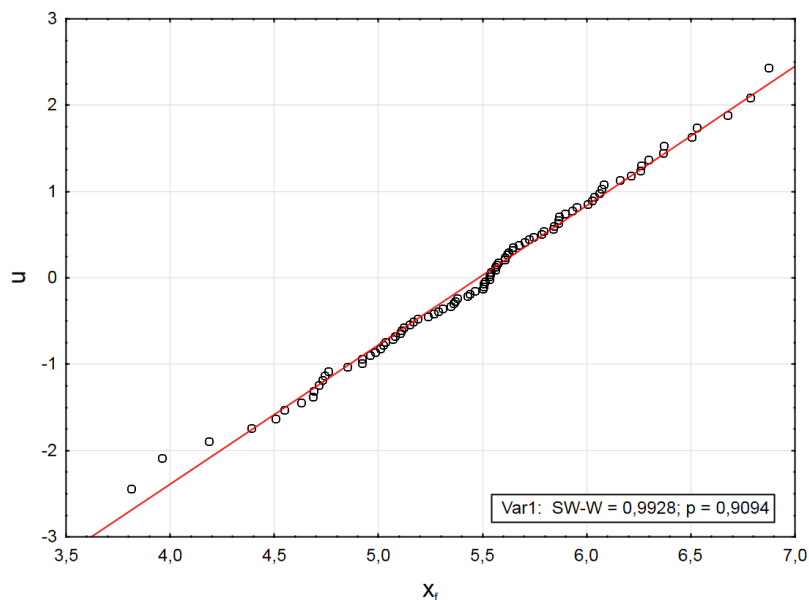
38. ábra A résméreték mérési pontjainak helyzete a kerület mentén

Az összesen 90 adatra illesztett hisztogramot és elméleti sűrűségfüggvényt az 39. ábra szemlélteti. A feltételezett normális eloszlás illeszkedését  $\chi^2$  próbával, Shapiro-Wilks próbával, valamint Gauss-hálós grafikus illeszkedésvizsgálatával is ellenőrizhetjük. A 40. ábra szerint, a mért adatok a pirossal rajzolt egyenes körül ingadoznak, ezért feltételezhető, hogy az adatok normális eloszlást követnek. Mivel mindkét próbastatisztika kiszámított értéke kisebb, mint az  $\alpha=0,05$  megengedett valószínűséghez tartozó érték, így a nullhipotézis elfogadható, azaz az adatok normális eloszlású sokaságból származnak.





39. ábra A tok- és a szárny távolságának a tapasztalati és elméleti sűrűségfüggvénye



40. ábra Az adatok ábrázolása Gauss-hálón

A legtöbb ablakprofil úgy tervezik, hogy - a nyílászáró becsukott állapotában - a tok- és a szárny között az elsődleges rugalmas ütközés síkjában 5 mm-es távolság alakuljon ki, azaz a távolság várható értéke  $\mu=5$  mm. A mérési adatokból a Statisztika 11 programmal számított jellemzőket a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat A tok-és a szárny távolságának statisztikai jellemzői

Mért érték	Mérések száma	Számtani középérték	Tapasztalati szórás	Konfidencia intervallum -95,00%	Konfidencia intervallum 95,00%
Tok- és a szárny távolsága a középtömítés síkjában	90	5,48	0,6	5,35	5,60

A 3. táblázat alapján elmondható, hogy a  $\mu=5 \text{ mm}$  várható értékkel jellemezhető tok- és szárny távolság jelentősen kívül esik a mérési eredményekből számított 95%-os konfidencia intervallum határain. Megállapítható, hogy a tervezett 5mm-es értéktől a tényleges résméret 95%-os valószínűséggel (5,35; 5,6) intervallumba fog kerülni.

#### 9.4. A környezeti hőmérséklet hatása a nyílászárók légáteresztési teljesítőképességére

Mivel a beépített ablakok általában két különböző hőmérsékletű teret választanak el, ezért szerkezetükben hőmérséklet gradiens jön létre, ami hőtágulásbeli különbségeket és belső feszültségeket eredményezhet. A lucfenyő (*Picea abies*) hűrirányú lineáris hőtágulási együtthatója  $34,6 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha$  (Molnár, 1999). Ez azt jelenti, hogy egy 78 mm vastagságú profil 40 °C hőmérsékletkülönbség hatására 0,1 millimétert tágul, vagy zsugorodik. A dilatáció mellett a hőmérséklet változásával az ablak szerkezeti elemeinek a rugalmassági modulusa is változik. Különösen fontos a fa alkatrészekben hűtés következtében bekövetkező merevség növekedés, ami a lucfenyőből (*Picea abies*) készült alkatrészeknél 1°C hőmérsékletkülönbségre 0,45%-ot ér el. (Bodig 1982). A laboratóriumi minősítő vizsgálatok során azonban a vizsgálati szabvány előírja a próbatestek kondicionálását. Ezzel a standardizált módszerrel mért légáteresztési értékek egymással jól összehasonlíthatók, azonban ezek az értékek megváltoznak, mielőtt az ablak beépítésre kerül és valóságos környezeti hatások érik.

Vizsgálatunk elsődleges célja az volt, hogy kimutassuk a hőmérsékletváltozás hatását az ablakok légzárási teljesítményére.

A vizsgálat másik célja, hogy hőkamerás felvételek segítségével meghatározzuk a légzárási vizsgálat során kialakuló szivárgási helyek pozícióját. A légzárási vizsgálat magas és alacsony hőmérsékletre hűtött nyílászárón végeztük el.

##### 9.4.1. A vizsgálat módszerének bemutatása

A légzárási vizsgálatok elvégzéséhez az ÉMI Nonprofit Kft. Épületfizikai Szakági Laboratóriumában található Holten VHEPC ablakvizsgáló berendezést használtunk, amelyhez egy levegő előkészítő egység is tartozott, ami képes  $2 \text{ m}^3$  vizsgáló levegőnek a hőmérsékletét -40°C-fok és +50°C-fok között temperálni. A vizsgálatokat az MSZ EN 1026:2001 vizsgálati szabvány alapján végeztük. Méréseink során a szabványos módszertől csak a vizsgálati hőmérséklet megváltoztatásával és a negatív nyomásfokozatokon mért légáteresztés vizsgálat elhagyásával tértünk el.

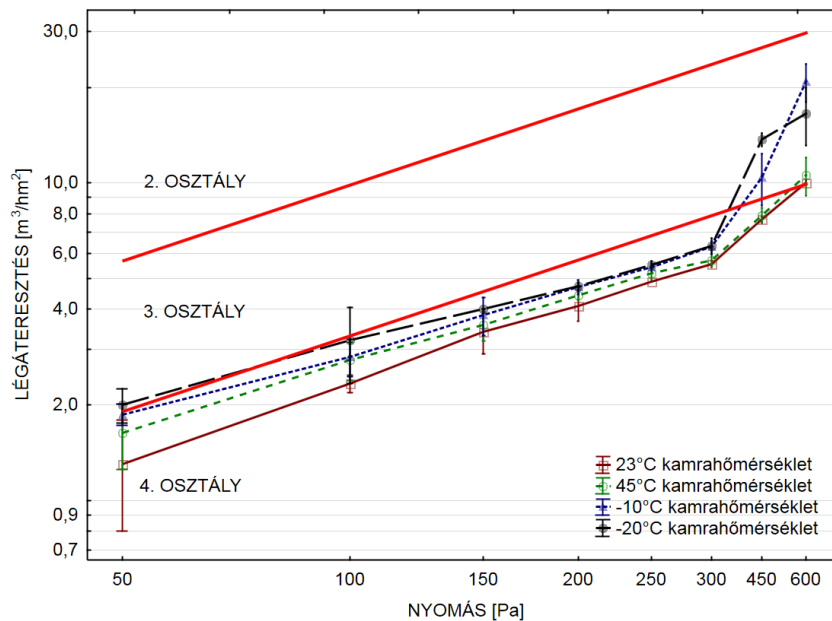
A mérésorozat első lépéseként a mintatesten vasalatállítást és a gumitömítés épségének ellenőrzése történt, majd 23°C-on és 45°C-on légzárásivizsgálat következett.

A méréseket követően a próbatest 18 órán keresztül visszahűlt 23°C-ra. Az alacsony hőmérsékleten történő mérések előtt történt egy újabb légáteresztés vizsgálat 23°C-on,

ami után megkezdődött az ablak kamra felőli oldalának  $-10^{\circ}\text{C}$ -ra történő hűtése. A beállított hőmérséklet elérésekor légzárás mérés történt, majd ezt követte az ablak továbbhűtése  $-20^{\circ}\text{C}$ -ig. A tok és szárny között a torlónyomás hatására kialakuló rések okozta filtráció helyének meghatározására, a több lehetséges megoldás közül, a hőkamerás felvételt választottuk, kihasználva az ablak két oldalán jelentkező hőmérséklet különbséget. A fényképek elkészítéséhez egy VarioCam HR típusú hőkamerát alkalmaztunk.

### 9.4.2. A légzárási vizsgálatok eredményeinek kiértékelése

A különböző hőmérsékleteken mért légáteresztési értékek a (39) összefüggés felhasználásával átszámítottam  $20^{\circ}\text{C}$ -fokos hőmérsékletre, így biztosítva a különböző hőmérsékleten mért áteresztett levegőmennyiségek összehasonlíthatóságát. A 41. ábra a különböző kamrahőmérsékleteken mért légáteresztési értékeket és az osztályozó egyeneseket tartalmazza. Látható, hogy a hőmérséklet csökkenésével a légáteresztési értékek növekedtek.



41. ábra A 8. számú próbatest különböző kamrahőmérsékletek mellett mért légáteresztés osztályozó diagramja

A kamrahőmérséklet hatásának kimutatásához varianciaanalízist (MAIN EFFECT ANOVA) alkalmaztam. Az analízis során két faktor – a vizsgálati nyomást és a kamrahőmérséklet – hatását vizsgáltam. A nyomásváltozás determinisztikus hatásának kiküszöbölése végett független változóként az áramlási koefficiens (C) értékét választottam. A vizsgálati nyomás és a mért légáteresztési értékek függvényében az áramlási koefficiens értékét az (5) összefüggés alapján számítottam. A determinisztikus hatás kiiktatásával képesek vagyunk a hőmérséklet és a nyomásváltozás tényleges

hatásának kimutatására. A hőmérsékletet négy szinten, a nyomás hatását három szinten vizsgáltam.

A varianciaanalízis alkalmazási feltételeit, miszerint a csoportok varianciája megegyezik, a hibák függetlenek, valamint az adatok normális eloszlást mutatnak, az eljárás alkalmazása előtt ellenőriztem. A számításokat a STATISTICA 11 programmal végeztem el.

4. táblázat A variancia analízis eredményei

Az eltérés forrása	Df	SS	MS	F	P*
Nyomás	2	0,044868	0,022434	26,0704	<0,001
Hőmérséklet	3	0,028461	0,009487	11,0247	<0,001
Hiba	30	0,025815	0,000861		
Összesen	35	0,099144			

\*amennyiben a valószínűség kisebb, mint 0,05 akkor a faktor hatása szignifikáns

Mivel mindkét faktor esetében az F próbastatisztika értéke magas, így kicsi annak a valószínűsége, hogy a különböző beállításokon mért eredmények különbsége csak a véletlennek tulajdonítható (Kemény, 2000). Tehát mind a nyomásnak mind pedig a hőmérsékletnek hatása van a résáramlási koeficiens alakulására.

A Post-hoc elemzés során Duncan teszttel vizsgáltam a faktorok különböző szintjeinek hatását. A 5. táblázat az összehasonlító teszt eredményeként kapott valószínűségi értékek mátrixa. A *p* - értékek azt mutatják, hogy a hőmérsékletnek, mint jellemző környezeti tényezőnek, csak alacsony hőmérsékleti értékeken van kimutatható hatása a vizsgált szerkezeti kialakítású ablakok légzárására. Az összehasonlítás szerint a -10 és -20°C fokos, valamint a 23 és 45°C fokos kamrahőmérséklet mellett a valószínűség érték  $p > 0,05$ , azaz a beállításnak a hatása nem szignifikáns.

5. táblázat A hőmérséklet faktorhatásának vizsgálata Duncan teszttel

Hőmérséklet [°C]	"P" valószínűség értékei			
	-20	-10	23	45
-20	-	<b>0,260067</b>	0,000093	0,000558
-10	<b>0,260067</b>	-	0,000902	0,007501
23	0,000093	0,000902	-	<b>0,347367</b>
45	0,000558	0,007501	<b>0,347367</b>	-

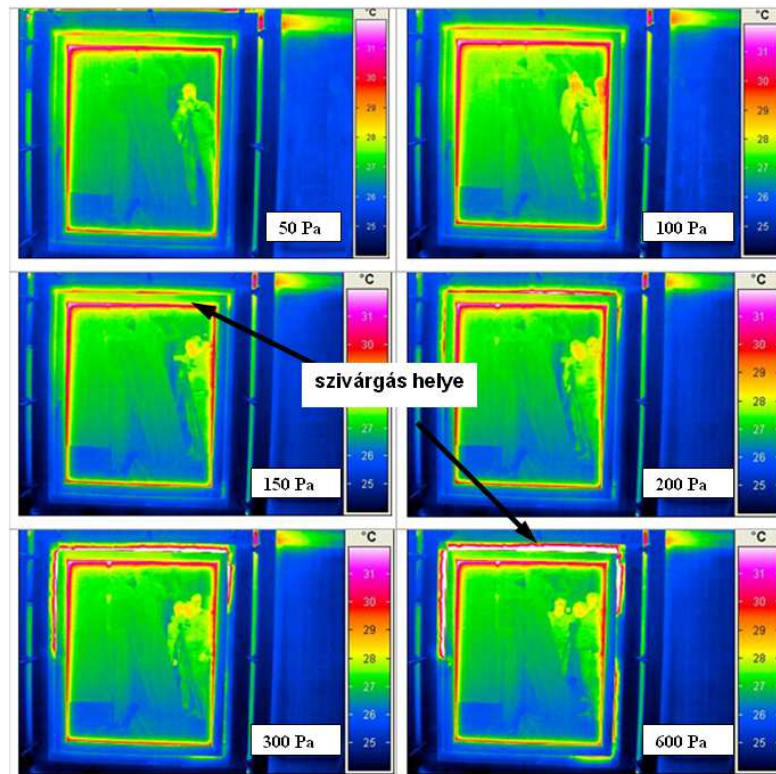
A nyomás különböző beállítási szintjeit összehasonlító Duncan teszt eredménye azt mutatja (6. táblázat), hogy csak a 600 Pascal nyomáskülönbséghez tartozó beállítás eredményezett szignifikáns változást a légzárási koeficiens értékében.

6. táblázat A nyomás faktorhatásának kimutatására elvégzett Duncan teszt eredményei

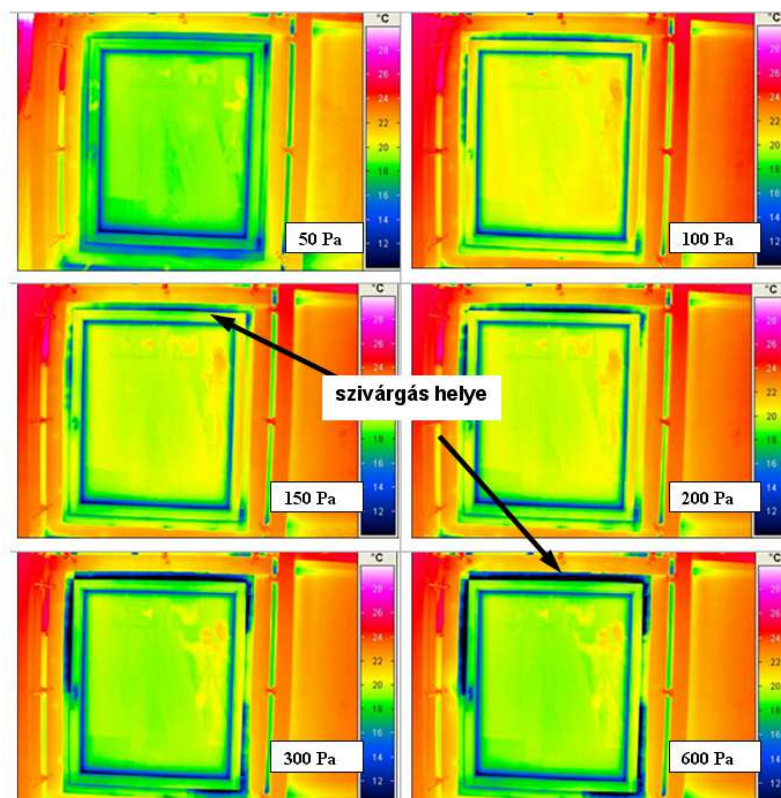
Nyomás [Pa]	"P" valószínűség értékei		
	50	250	600
50	-	<b>0,538465</b>	0,000061
250	<b>0,538465</b>	-	0,000138
600	0,000061	0,000138	-

A 45°C-on mért kedvező légzárási teljesítmény azzal magyarázható, hogy a fa alkatrészek a hőmérséklet emelkedésével változtatták keresztmetszeti méretüket. A filtráció helyének meghatározása érdekében készített hőkamerás felvételeken jól látható, hogy a nyomás növekedésével egyre hosszabb szakaszokon jelenik meg légszivárgást jelző lehűlt, vagy éppen felmelegedett terület a tok és a szárny találkozásánál mentén (42.,43. ábra). Mind melegítés, mind pedig hűtés hatására a szivárgás először az ablak felső vízszintes tok-szárny kapcsolatánál jelentkezett, majd a nyomás emelkedésével folyamatosan terjedt a sarkok felé. 200 Pascalon és felette már észrevehető szivárgás volt látható a függőleges csatlakozásoknál is. Melegítés hatására kevésbé jelentkezett a pánt felőli oldal alsó sarkában megjelenő szivárgás, azonban -20 °C –on már jól látható a légáteresztés helyét jelző elszíneződés. A képeken megfigyelhető, hogy a pánt felőli oldalon elhelyezett záródási pont környékén nincs szivárgás, ami a megfelelő záródás szorosságára utal. A felső vízszintes tok és szárny találkozásánál egyenletes elszíneződés látható, ami azt jelenti, hogy a záróelemek nem töltötték be funkciójukat és a torlónyomás hatására a szárny elmozdult. Az egyik legintenzívebb elszíneződés az ablak jobb felső sarkától balra, a vízszintes szakaszon jelentkezett ott, ahol a bukó-nyíló vasalat ollókarja is található. A másik kritikus pont pedig az alsó sarokcsapágnál található. Az ablak kerülete mentén jelentkező légszivárgás helye és intenzitása jól összevethető az irodalomban megtalálható hasonló kialakítású ablakon műszeres méréssel meghatározott légszivárgási adatokkal (Kovács 1989).

A hőmérséklet hatásának vizsgálata roppant bonyolult feladat, mivel több ciklusban és széles határok között kell a hőmérsékletkülönbséget biztosítani, ezért célszerűnek látszik a jövőben a fizikai vizsgálatok elvégzése helyett, a VEM szimulációs eszközök alkalmazása.



42. ábra Az ablak hőkamerás felvételei 45°C-os kamrahőmérsékleten



43. ábra Az ablak hőkamerás felvételei -20°C-os kamrahőmérsékleten

## **10. A NYÍLÁSZÁRÓK LÉGZÁRÁSI TELJESÍTŐKÉPESSÉGÉNEK MEGBÍZHATÓSÁGÁT BECSLÓ MODELLEK**

Ebben a fejezetben kerülnek bemutatásra az előzetes mérési eredmények, valamint az FMEA elemzéssel meghatározott magas kockázati indexszel jellemzett szerkezeti elemek ismeretében, a nyílászárók légzárási teljesítőképességének megbízhatóságát becsülő két modell. A bemutatott modellek jelentik a disszertáció súlypontját. Mindkét modellel a meghibásodás szempontjából kritikus szerkezeti elemek időben változó műszaki jellemzőit felhasználva becsülhető a légáteresztési teljesítőképesség megbízhatósága. A modellek alkalmazásával lehetőség nyílik a nyílászárók légzárási szempontú karbantartásának tervezésére, illetve a megbízhatóságuk fokozására.

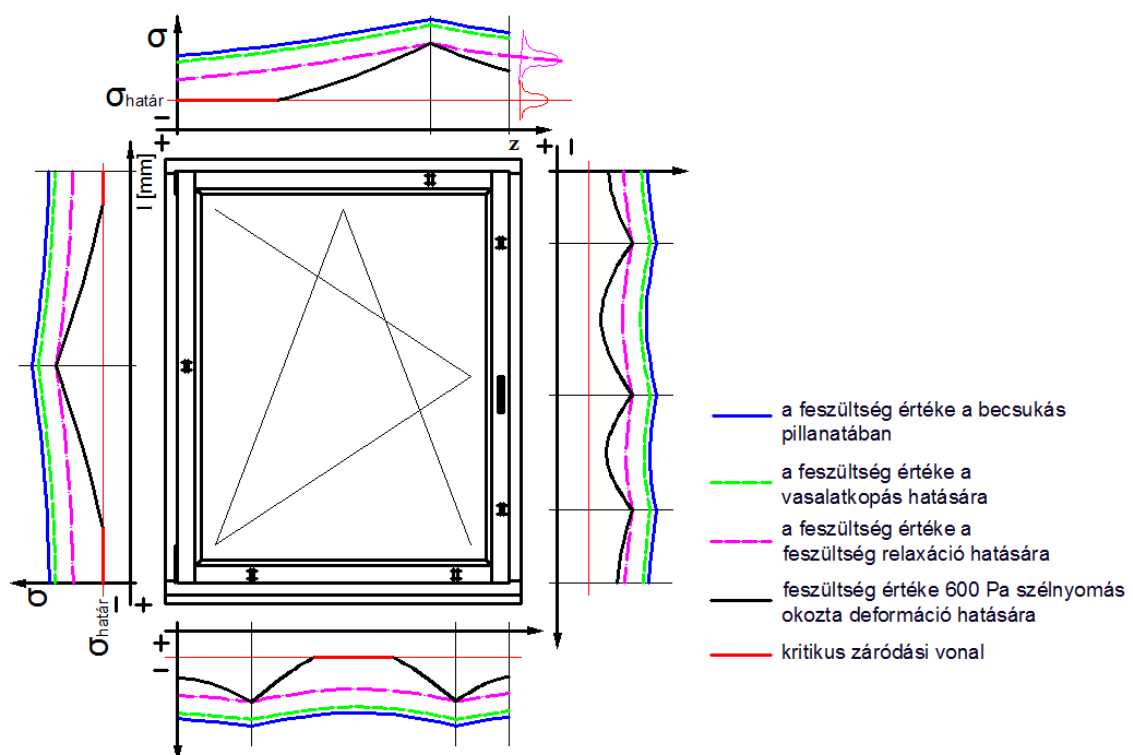
### **10.1. A légzárási teljesítőképesség becslése a tömítőanyagban kialakuló feszültség alapján (1. MODEL)**

A nyílászárók tok és a szárny csatlakozásának tömítésére lég-, víz- és hangszigetelés fokozása érdekében olyan szigetelőanyagot helyeznek el, amely a rugalmas deformálódási tulajdonságából következően adott érintkezési nyomással jellemezhető kontaktust biztosít a két csatlakozó elem között. Az utóbbi években a tömítésgyártók egyre inkább áttérnek a költségesebb, ritkán térhálós elasztomerek helyett a jóval egyszerűbben gyártható, hőre lágyuló elasztomerek (*TPE*) alkalmazására (Markarian, 2008). A fából készült nyílászáró szerkezeteknél a profilvastagság függvényében a szárnyprofilok tagoltságának növelésével több síkban is elhelyezhető rugalmas tömítőelem, így elméletben fokozható a résrendszer tömítettsége. Ez a teljesítményjavulás azonban laboratóriumi mérésekkel nem támasztható alá lásd. 9. fejezet. A tömítettség úgy jön létre, hogy a tömítő-profilra külső kényszert gyakorolva, az eredeti alakját megváltoztatva - összenyomott állapotában - kitölti a csatlakozó elemek közötti hézagot. A külső kényszer hatására az elasztomerben feszültség ébred. Mivel a tömítőprofil geometriája, anyagi minősége gyártónként és típusonként is eltérő lehet, úgy az adott mértékű deformáció az elasztomerben különböző feszültség szinteket eredményez. A deformáció mértékét alapvetően a tok és a szárny hézagrendszere, a vasalat beállítása és a tömítőprofil eredeti geometriája határozza meg. Mivel az ablakszárny kerülete mentén csak bizonyos pontokban működik csatlakoztató elem, ezért a tok és a szárny között kialakuló záródási hézag mentén változó mértékű lehet a tömítőprofil összenyomódása. A deformáció a csatlakoztató elemek közötti szabad szakaszokon csökkenhet a szárnyra ható szélnyomás következtében. A nyílászáró becsukását követően a tömítésben ébredő feszültség tehát egyrésztől függ a tömítés anyagi és geometriai tulajdonságaitól, másrésztől függ a nyílászáró becsukásának pillanatában a tömítés deformációjának mértékétől. Mivel a tömítések mechanikai

szempontból viszkoelasztikus tulajdonságúak, ezért nem elhanyagolható a tartósan deformált tömítésben végbemenő feszültség csökkenés, vagy más néven feszültségrelexáció. A relaxációs folyamatot alapvetően a tömítés anyagi minősége és a rákényszerített állandó deformáció értéke határozza meg (Bodor, 2005). A nyílászáró tömített résein a nyomáskülönbség hatására két esetben indulhat meg nem kívánatos légáramlás.

- Első esetben a tömítés anyagában valamilyen mechanikai sérülés következtében folytonossági szakadás következik be
- A másik esetben pedig akkor, ha a tartósan deformált tömítésben lezajló feszültségrelexáció következtében a tömítés maradó alakváltozása olyan mértékűre nő, hogy már nem képes a tok-és a szárny közti hézag kitöltésére.

Tervszerű karbantartással mindkét esetet kezelni kell. Megfigyeléseink alapján a folytonossági szakadás bekövetkezésének oka rendszerint mechanikai sérülésére, vagy a tömítés kimozdulására vezethető vissza. Ezen események bekövetkezésekor légzárási tekintetében azonnali meghibásodásról kell beszélni és a tömítés azonnali cseréjével vagy rögzítésével kell a hibát elhárítani. A tömítésben ébredő feszültség csökkenése degradációs tönkremeneteli folyamat során következik be, amely egyrészt a változó alakváltoztató kényszer mellett a feszültségrelexációból, másrészt a klimatikus öregítő hatásból tevődik össze. A 44. ábra egy egyszárnyú ablak feltételezett feszültség eloszlását mutatja a kerület mentén. Megjegyzés, mivel a legtöbb tömítőprofil bonyolult geometriájú elem, ezért a terhelés hatására a különböző keresztmetszetekben különböző feszültségállapot alakul ki. Ezért a továbbiakban a feszültség értéke alatt a tok és a tömítőprofil találkozási élén kialakuló érintkezési feszültséget kell érteni.



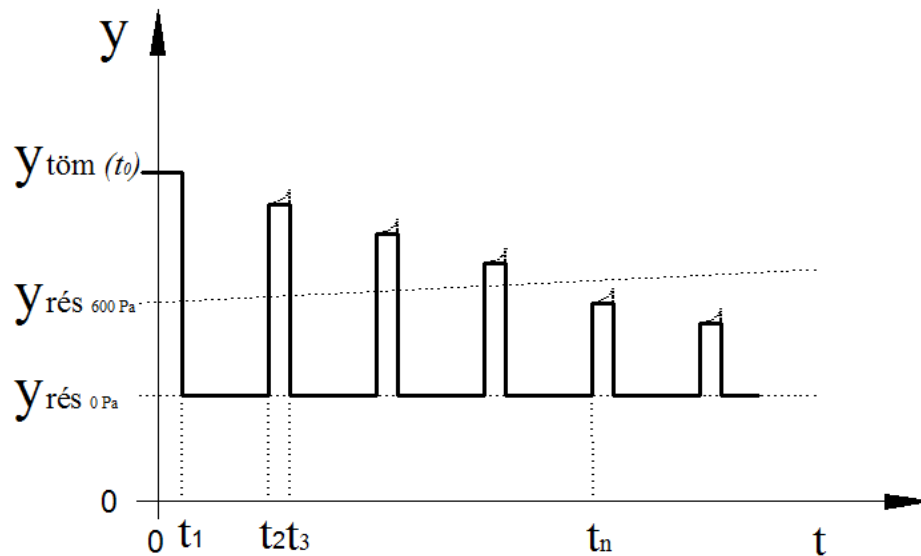
44. ábra A tömítőprofil felfekvésénél kialakuló érintkezési feszültségek az ablak kerülete mentén



A 44. ábrán a görbék által szemléltetett elméleti feszültség értékek és a megjelölt határérték nem determinisztikus értéként, hanem valószínűségi változóként tekintendők. A különböző színű görbék a különböző degradáló hatásokra a rugalmas tömítésben ébredő feszültség várható értékét mutatják. A kék színű jelzett vonal a tömítésben kialakuló feszültség értékét mutatja a fugahossz mentén a záródási pontok helyzetének és kezdeti beállításának függvényében. A használat során számolni kell a vasalatkopásból adódó résnövekedéssel (zöld vonal), valamint a szélteher deformáló hatásával (fekete vonal), ami az alakváltoztató kényszer csökkenéséhez és ebből adódóan a feszültség csökkenéséhez vezet. Az ábrán ibolyaszínű szaggatott vonal egy adott időpillanathoz tartozó, a rugalmas tömítésben végbemenő feszültség relaxáció következtében kialakuló feszültség értékét mutatja. Mivel a relaxációs feszültségcsökkenés függ a  $t_0$  időpillanatban ébredő kezdeti feszültségtől, az időtől, a hőmérséklettől, a kémiai vagy foto-degradáció mértékétől, ezért az ábrán szemléltetett állapot mindig egy adott időpillanatra érvényes csak. Ugyanez igaz a vasalatkopás és a szélterhelés várható értékére is. Amennyiben ismert a feszültség függvényében az egységnyi záródási hosszra eső légáteresztés, akkor a kritikus feszültség értékének azt a feszültséget érdemes választani, amelynél az egységnyi záródási vonalra számított légáteresztés éppen zérus. A záródási vonal mentén azokon a pontokon indul meg a légáramlás, ahol a tömítésben ébredő szorítóerő lecsökken a meghatározott kritikus érték alá, amit az ábrán piros színű vonal jelöl. A záródási vonal diszkrét pontjain a feszültség függvényében meghatározott légáteresztési értékek vonal menti numerikus integrálásával kiszámítható az ablakon keresztül megvalósuló teljes légáram. A modell hátránya, hogy abban az esetben nem becsülhető a légáteresztés, amikor akkora mértékű alakváltozást szenved a szerkezet, hogy a tömítés már nem érintkezik a tokkal, azaz tényleges rés alakul ki. Ekkor már nem használható a feszültség függvényében meghatározott légáteresztési függvénykapcsolat. Ezért ez a modell inkább a légzárási teljesítőképesség korlátozott értékig való becsülésére alkalmas.

## 10.2.A légzárási teljesítőképesség becslése a tömítőanyag viszkózus deformációja alapján (2. MODELLEL)

A második modell alapját a rövid megszakításokkal folyamatosan terhelt rugalmas termoplasztikus elasztomer tömítőprofil rugalmas deformációjának függvényében becsült légáteresztési teljesítőképességi jellemző meghatározása képezi. A modell számol a zárt szárny záródási vonalának adott pontján (egy kezdőponttól adott  $z$  távolságban) kialakuló hézag méretével ( $y_{rés0Pa; z}$ ), a 600 Pascal légnyomás hatására kialakuló résmérettel ( $y_{rés600Pa; z}(t)$ ), valamint adott időpillanatban a terheletlen tömítőprofil magasságával ( $y_{töm; z}(t)$ ) (lásd 45. ábra). (A  $z$  értéke célszerűen a záródási vonal bal alsó sarokpontjától, az óramutató járásával ellenkező irányba haladva mért távolságot jelenti.)



45. ábra A tömítés magasságának változását mutatja az egymást követő terhelt és terheletlen állapotban

A 45. ábra szerint  $t_1$  időpillanatban, a szárny becsukásával az eredetileg ( $y_{töm}(t_0)$ ) magasságú tömítés lecsökken a tok és a szárny között kialakított hézag méretére ( $y_{rés0Pa;z}$ ). A kényszer nagysága a tok-és a szárny távolságának függvényében a kerület mentén változik ( $y_{rés0Pa;z}$ ).

A szárny becsukásának következtében tartósan deformált állapotba hozott tömítőprofilban megindul a relaxáció. A  $t_2$  időpillanatban a szárny nyitásával a kényszert megszüntetve, a pillanatnyi rugalmas alakváltozási komponens ugrásszerűen alakul vissza, majd a késleltetett rugalmas komponens az időben fokozatosan alakul vissza (pontvonallal jelölve az ábrán). A késleltetett visszaalakulást követően mindig fellep maradó alakváltozás, amely a tömítés magasságcsökkenését eredményezi.

$$y_{töm}(t_0) - y_{töm;z}(t_2) = \Delta y_{töm;z}(t_2) > 0 \quad (44)$$

Általánosságban a nyitott állapot nagyságrendekkel rövidebb idejű, mint a zárt állapot, ezért az adott időpillanatban a maradó alakváltozásból származó tömítő profil magasságcsökkenése:

$$y_{töm}(t_0) - y_{töm;z}(t) = \Delta y_{töm;z}(t) > 0 \quad (45)$$

Adott időpillanatban, a záródási vonal egy adott ( $z$ ) pontjában a tömítés jellemezhető egy **hézagzárási mutató** ( $\Delta y_z(t)$ ) értékkel, amely a 600 Pascal légnyomás hatására kialakuló résméret ( $y_{rés600Pa;z}(t)$ ) és a tömítés terheletlen magasság különbségéből ( $y_{töm;z}(t)$ ) számítható.

$$\Delta y_z(t) = y_{töm;z}(t) - y_{rés600Pa;z}(t) \quad (46)$$

Az anyagra jellemző feszültségfeloldódási tulajdonság és a használati körülmények ismeretében megbecsülhető az a  $t_n$  időpont, amikor a tömítés terheletlen magassága ( $y_{töm;z}(t_n)$ ) megegyezik az ablakra ható 600 Pascal nyomás hatására kialakuló, tok- és

szárny között mérhető távolsággal ( $y_{rés600Pa;z}(t)$ ). Ekkor a tömítés hézagzárási mutató értéke zérus lesz. Ez azt jelent, hogy ha  $t_n$  időpontba a nyílászárót a szabványban meghatározott legnagyobb szélteher éri, akkor tömítés éppen érinti a tok felületét

$$t_n : y_{töm;z}(t_n) = y_{rés600Pa;z}(t_n) \Rightarrow \Delta y_z(t_n) = 0 \quad (47)$$

A kényszer további gyakorlásával a maradó deformáció növekszik, miközben a **hézagzárási mutató** ( $\Delta y_z(t)$ ) várható értéke negatív értékeket vesz fel. Ekkor a szélnyomás hatására kialakuló deformáció miatt a tömítés már nem fog érintkezni a tok felületével, azaz tömítetlen légrés alakul ki. Megjegyzés, a mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a légáramlás akkor is megindul, ha a tömítés és a tok érintkezik egymással, azaz a hézagzárási mutató zérus, vagy annál nagyobb (lásd. 65. ábra).

Abban az esetben, ha a tömítés termoplasztikus elasztomerből készül, akkor a záródási vonal adott ( $z$ ) pontjában a tömítés terheletlen magassága ( $y_{töm;z}(t)$ ) elegendően nagy idő után a tartósan deformált magasságával ( $y_{rés0Pa;z}$ ) lesz egyenlő.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_{töm;z}(t) = y_{rés0Pa;z} \quad (48)$$

Azaz a hézagzárási mutató ( $\Delta y_z(t)$ ) várható értéke 45. ábra szerint a becsukás pillanatában és a 600 Pascal szélnyomás hatására kialakuló rés méretének különbségével lesz egyenlő:

$$\Delta y_z(t_\infty) = y_{rés0Pa;z} - y_{rés600Pa;z}(t_\infty) \quad (49)$$

Tehát minél nagyobb a szélteher hatására bekövetkező alakváltozás, annál nagyobb lesz a teljes relaxálódás következtében bekövetkező légrés nagysága, azaz annál kisebb lesz a hézagzárási mutató ( $\Delta y_z(t)$ ) várható értéke.

Konstrukciós szempontból kedvező, ha a szárny a szélteher hatására a tokhoz képest lehető legkisebb mértékben távolodik el, azaz

$$y_{rés600Pa;z}(t) - y_{rés0Pa;z} = \Delta y_{rés}(t) \rightarrow 0 \quad (50)$$

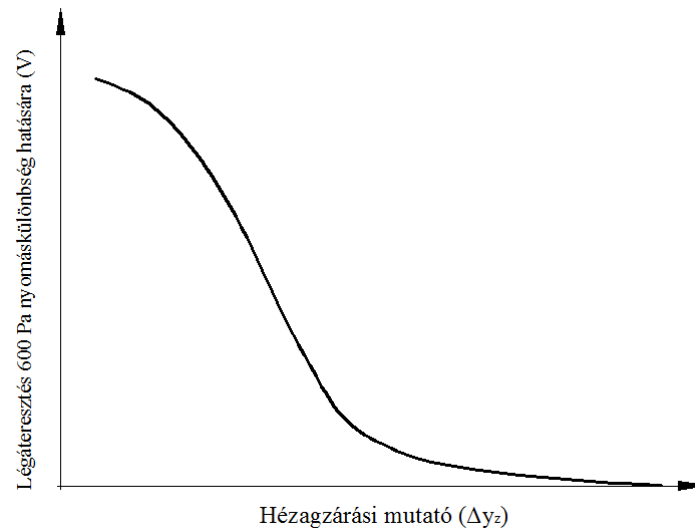
Ekkor a hézagzárási mutató ( $\Delta y_z(t)$ ) várható értéke 0-hoz tart, azaz nem válik negatívvá:

$$\lim_{\Delta y_{rés} \rightarrow 0} \Delta y_z(t) = 0 \quad (51)$$

Ez azt jelentené, hogy a tömítés akár teljesen relaxált állapotában is képes lenne kitölteni a tok- és szárny közötti rést. A nagyobb méretű ablakok esetében a záródási pontok távolságának növelésével a szárnyak deformációja is nő, ezért a gyakorlatban szinte lehetetlen a szélteher hatására bekövetkező résnövekedést megakadályozni. A termékek használata során a tok- és a szárny távolsága a vasalat elállítódásának, valamint kopásának következtében időben növekszik. A résnövekedés a szélnyomás fellépésekor fokozottabban jelentkezik, mint terheletlen állapotban, azért a 45. ábrán az ( $y_{rés600Pa;z}(t)$ ) rés mért értéke az idő függvényében egy zérusnál nagyobb meredekségű egyenes egyenletével közelíthető.

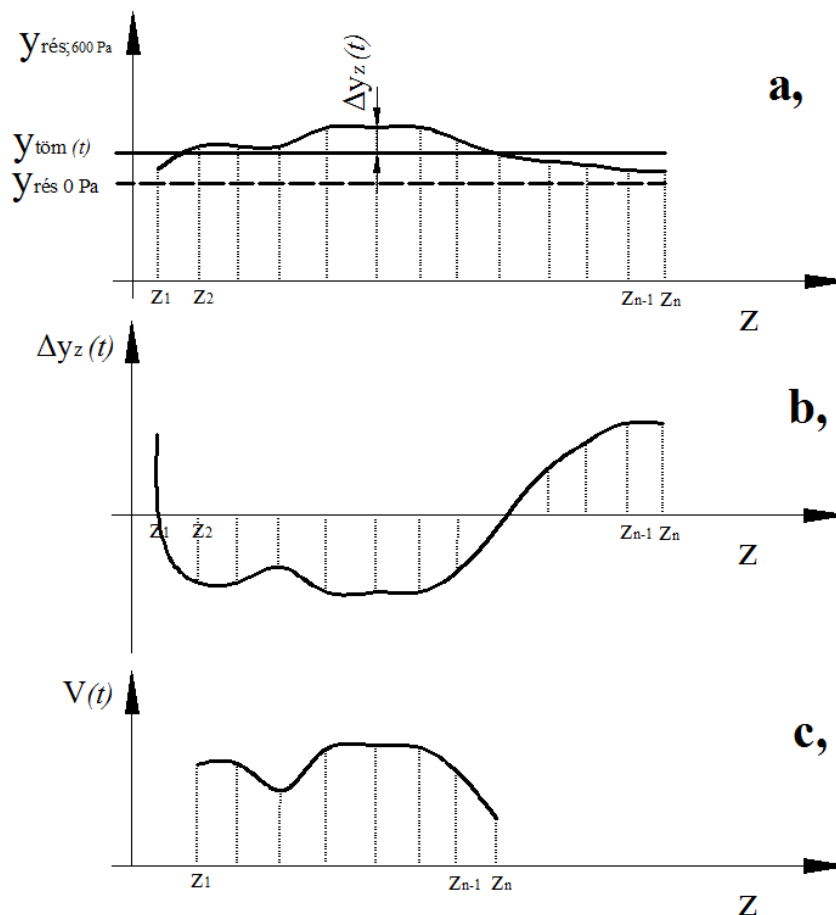
A záródási vonal ( $z$ ) pontjában a lokális légáteresztés számításához a hézagzárási mutató ( $\Delta y_z$ ) várható értékének, valamint a  $V(\Delta y_z)$  légáteresztési függvénynek az ismerete szükséges.

Ha a légáteresztési tényező értékét az időben folytonos változóként vizsgáljuk, akkor a légáteresztési függvény az idő és a hézagzárási mutató parciális függvénye lesz. A hézagzárási mutató és az egységnyi záródási hézagra vonatkozó légáteresztés függvénykapcsolatát a 46. ábra szemlélteti.



46. ábra A légáteresztés és a hézagzárási mutató kapcsolata

Adott időpillanatban a záródási vonal diszkrét pontjaiban meghatározott hézagzárási mutató értékekből (47/a,b ábra) számítható az adott ( $z_i$ ) pontban az egységnyi záródási részre vonatkozó légmennyiség.



47. ábra Adott időpillanatban a záródási vonal diszkrét pontjaiban a résméreték és a tömítés terheletlen magassága (a), a hézagzárási mutató (b), valamint az egységnyi záródási vonalra számított légáteresztés (c)

Amennyiben adott időpillanatban ismert a  $V(t)=f(\Delta y_z(t))$  függvénykapcsolat, akkor a függvény integrálásával kiszámítható a teljes résrendszeren átáramló levegő mennyisége:

$$V(t) = \int f(\Delta y_z(t)) dz \quad (52)$$

Mivel a diszkrét pontokhoz tartozó légáteresztési értékek és a záródási rés között a függvénykapcsolat meghatározása elég komplikált feladat, ezért a nyílászáró teljes záródási résén keresztül megvalósuló légmennyiség meghatározásához a numerikus integrálási módszerek egyikének alkalmazása szükséges. Jellemzően a numerikus módszerek közelítő megoldást adnak, azonban a mérési pontok számának növelésével a valós és a becsült légáteresztés közti különbség csökkenthető.

A modell segítségével adott időpontban megbecsült légáteresztés és a termékre vonatkozó követelményszinthez tartozó légáteresztés összevetéséből a karbantartási beavatkozás szükségessége megállapítható, valamint előre tervezhetővé válik.

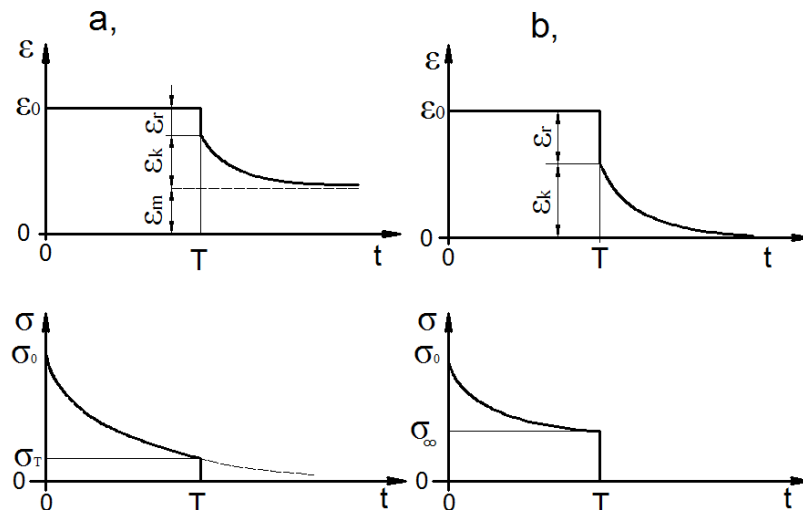
A viszkoelasztikus tulajdonságokat mutató anyagokra jellemző, hogy az anyagra gyakorolt alakváltoztató kényszer növelésével arányosan nő a feszültségkorrózió mértéke. Ez azt jelenti, hogy mindig található egy adott anyagtulajdonságokkal és  $(y_{töm;z}(t_0))$  kezdeti magassággal rendelkező tömítőprofilhoz olyan optimális tok-és szárny távolság (alakváltoztató kényszer)  $(y_{rés0Pa;z}(t))$ , amely mellett a tömítésben lejátszódó feszültségfeloldódási sebesség a legkisebb lesz, úgy hogy a hézagzárási mutató  $(\Delta y_z(t))$  várható értéke a lehető lekeisebb érje el a zérus értéket. A légzárási teljesítőképességi jellemző megbízhatóság- fokozásának egyik lehetséges módja ezen értékek optimális megválasztásával lehetséges.

A megbízhatósági modellhez szükséges bemenő információk:

- a nyílászáró elsődleges tömítőprofiljának kezdeti magassága várható értékkel és szórással  $(y_{töm}(t_0))$  jellemezve
- a tömítőprofil feszültségrelaxációs függvénye, melyből minden  $t > 0$  időpillanatra kiszámítható a tömítőprofil terheletlen magasságának várható értéke  $(y_{töm;z}(t))$  és szórása
- a kerület mentén 0 Pascal nyomáson a tok- és a szárny távolságának az elsődleges tömítés síkjában mérhető várható értéke  $(y_{rés0Pa;z})$  és szórása.
- a kerület mentén 600 Pascalos nyomáson a tok- és a szárny az elsődleges tömítés síkjában mérhető távolságának várható értéke  $(y_{rés600Pa;z})$  és szórása.
- a hézagzárási mutató  $(\Delta y_z(t))$  és a légáteresztés közötti függvénykapcsolat

### 10.2.1. A tömítés terheletlen magasságának modellezése

A nyílászárókhoz használt rugalmas tömítőanyagok mechanikai szempontból a műanyagokra jellemző viszkoelasztikus viselkedést mutatnak. Ez azt jelenti, hogy a tömítőanyag mechanikai viselkedése függ a terhelés időtartamától. Ezt a viselkedést polimer láncok között kialakuló kémiai kötéstípus és a polimer morfológiája határozza meg. A nyílászárók tömítőanyagainak feszültségrelaxációs jelleggörbéit szemlélteti a 48. ábra.



48. ábra Amorf termoplasztikus polimer (a) és gyengén térhálós elasztomer (b) tipikus feszültségrelaxációs jelleggörbéi

Abban az esetben, ha a nyílászáró tömítése termoplasztikus polimerből készül, akkor a termék élettartama során számolni kell a tömítésben végbemenő maradó deformációval is ( $\epsilon_m$ ). Az idő előrehaladtával a csökkenő feszültséghez tartozó pillanatnyi rugalmas deformáció ( $\epsilon_r$ ) mellett késleltetett ( $\epsilon_k$ ) rugalmas és maradó alakváltozás is fellép. Mivel a feszültség tart a nullához, ezért elegendően nagy T terhelési idő után a tömítésben ébredő feszültség zérusra csökken és a teljes kezdeti deformáció maradóvá válik. Ezzel szemben, a gyengén térhálós polimer esetében a molekulaláncok között ható elsődleges kémiai kötések, mintegy térhálót alkotva magakadályozzák a láncok teljes elcsúszását, ezért az ilyen szerkezetű anyagokból készült tömítés esetében nem következik be a maradó deformáció. A feszültség  $\sigma_\infty > 0$  értékhez tart, melyhez egy időben állandósuló pillanatnyi deformáció ( $\epsilon_{r\infty}$ ) párosul.

A viszkoelasztikus anyagok mechanikai viselkedésének leírására több klasszikus modell is létezik. A kétparaméteres Maxwell modell az amorf termoplasztok feszültségrelaxációjának minőségi leírásához jól használható. A Maxwell modell és egy rugó párhuzamos kapcsolásával kapott Standard- Solid modell a gyengén térhálós elasztomerek relaxációjának minőségi leírásához alkalmazható összefüggést biztosít. A Maxwell modell részletes ismertetésétől eltekintve a 48. ábrán látható termoplasztikus polimerekre érvényes feszültségrelaxációs függvény

$$\sigma(t) = E \cdot \epsilon_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (53)$$

ahol:

- $\epsilon_0$  - relatív alakváltozás a  $t=0$  időpillanatban
- $E$  - a  $t=0$  időpillanathoz tartozó rugalmassági modulus
- $\tau$  - a Maxwell modell időállandója ( $\tau = \eta/E$ )

Az  $\varepsilon_0$  relatív alakváltozáshoz tartozó  $\sigma(t)$  válaszból meghatározható az un. relaxációs modulus:

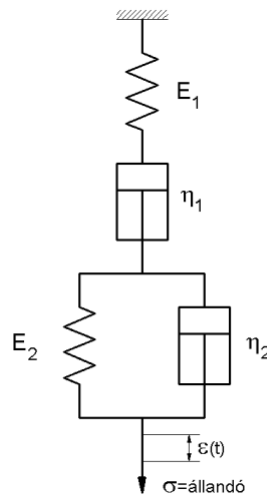
$$E_R(t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (54)$$

A reális termoplasztikus polimerek feszültségrelaxációs görbéje eltér a Maxwell és a Standard- Solid modell görbétől, mivel a Maxwell modell időállandója ( $\tau$ ) nem konstans érték, hanem egy értéktartományban eloszló időállandó halmazzal jellemezhető. Ez azzal magyarázható, hogy a polimerek esetében a relaxációs idők minden különböző tömegű részecskéknél, szegmenseknél, molekulaláncoknál eltérnek. Ezért feszültségrelaxáció mennyiségi leírásához az összetett Maxwell modell feszültségválasza a következőképpen alakul:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \sum_{i=1}^n E_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (55)$$

Az időállandó sztochasztikus jellege miatt nagyon nehéz a reális polimerek feszültségrelaxációjának pontos mennyiségi – pontosági- leírása.

A Maxwell-modellel sorba kapcsolva a Kelvin- Voigt modellt előállítható a négyparaméteres Burgers modell, amely már a három alakváltozás komponensét is (rugalmas, maradandó és késleltetett rugalmas) tartalmazza (49. ábra).



49. ábra A Burgers- modell

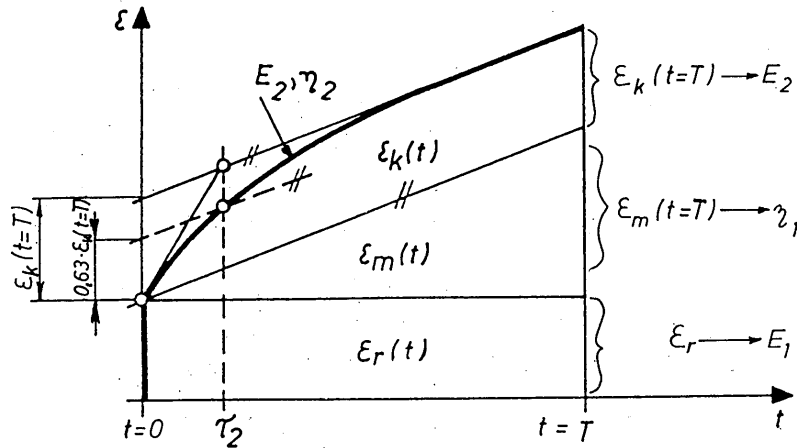
A Burgers modell paraméterei a kúszásvizsgálat során állandó feszültség mellett felvett alakváltozás-idő diagramról leolvasott alakváltozási komponensek felhasználásával számítás útján határozhatók meg. A kúszási és relaxációs modellek egyenértékűsége alapján a  $\sigma_0$  feszültségek helyére a csökkenő feszültség  $\sigma(t)$  időfüggvényét írva kapjuk az állandó alakváltoztató kényszer alatt lévő anyag alakváltozás komponenseit (Bodig, 1982). A nyílászárók tömítő profiljában végbemenő deformációk előrejelzéséhez tehát elég, ha a tömítőanyagból vett mintatesteken elegendően nagy ideig kúszásvizsgálatot hajtunk végre és meghatározzuk a Burgers-modell paramétereit.



A következőben egy jól alkalmazható eljárást mutatok be, amellyel a felvett relatív elmozdulás- idő görbéből (50. ábra) a vizsgált anyagra vonatkozóan meghatározhatók a nagyságrendekkel nagyobb időbeni alakváltozást leíró Burgers-modellhez szükséges modellparaméterek ( $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ). Az  $E_1$ ,  $E_2$  modelljellemzők a mechanikai modellben található rugók rugalmassági modulusait [MPa] jelölik, míg a  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  paraméterek alatt a viszkózus elemek dinamikai viszkozitási tényezőit [Pas] értjük. A modellparaméterek ismeretében lehetőség nyílik arra, hogy a vizsgált anyag várható deformációját - bizonyos határokon belül - más feszültségugrás terhelés és/vagy más terhelési idő esetére a modell pontosságának megfelelően kiszámítsuk (BME elektronikus jegyzet).

A kúszásvizsgálat során kapott Burgers-féle összetett modell nyúlás-válaszfüggvénye a következő összefüggéssel írható le:

$$\varepsilon_{\sigma}(t) = \varepsilon_r(t) + \varepsilon_m(t) + \varepsilon_k(t) \Rightarrow \varepsilon_{\sigma}(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} \cdot t + \frac{\sigma_0}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t} \right) \quad (56)$$



50. ábra A felvett kúszásgörbe kiértékelése (forrás: BME elektronikus jegyzet)

A  $t=0$  időpillanatban az ugrásgerjesztés hatására mérhető rugalmas alakváltozási komponens  $\varepsilon_r(t)$ , amelyből az  $E_1$  paraméter kiszámítható:

$$\varepsilon(t=0) = \varepsilon_r = \frac{\sigma_0}{E_1} \rightarrow E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_r} \quad (57)$$

A  $t=T$  ponthoz húzott érintővel párhuzamosan húzott egyenesek az 50. ábra szerint az  $\varepsilon(t)$  görbe alatti területet az  $\varepsilon_r(t)$ , az  $\varepsilon_m(t)$ , és az  $\varepsilon_k(t)$  alakváltozási komponenseknek megfelelő mezőkre osztják.

Az ábráról lemérhető alakváltozási komponensek, és a Burgers-modell válaszfüggvénye alapján felírható:

$$\varepsilon_k(t=T) \approx \frac{\sigma_0}{E_2} \rightarrow E_2 \approx \frac{\sigma_0}{\varepsilon_k(t=T)} \quad (58)$$

$$\varepsilon_m(t=T) = \frac{\sigma_0}{\eta_1} \cdot T \rightarrow \eta_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_m(t=T)} \cdot T \quad (59)$$

A  $\eta_2$  modellparaméter kiszámításához első lépésként szerkesztéssel meg kell határozni a  $\tau_2$  időállandót. Az  $\varepsilon(t)$  görbe  $t=0$  időpontjához tartozó, kezdeti érintőjének és a  $t=T$  időponthoz tartozó érintőjének a metszéspontját merőlegesen levetítve a  $t$  időtengelyre, közelítőleg a keresett időállandó értékét kapjuk. Mivel a görbe kezdeti érintője csak igen pontatlanul szerkeszthető meg, ezért az időállandó meghatározására a  $t=\tau_2$  időponthoz kiszámított késleltetett rugalmas alakváltozásból kiindulva és felhasználva az (56), (58) összefüggéseket azt kapjuk, hogy:

$$\varepsilon_k(t = \tau_2) \approx 0,63 \cdot \varepsilon_k(t = T) \quad (60)$$

Ennek alapján, a  $t=0$  helyen az  $\varepsilon = \varepsilon_r + 0,63 \cdot \varepsilon_k(t = T)$  pontból a görbe  $t=T$  időpontjához tartozó érintőjével húzott párhuzamos egyenes és a görbe metszéspontját levetítve a  $t$  időtengelyre kapjuk a  $\tau_2$  időállandót.

A  $\tau_2$  ismeretében a  $\eta_2$  modellparaméter már meghatározható az alábbi összefüggéssel:

$$\eta_2 = E_2 \cdot \tau_2 \quad (61)$$

Ezzel a Burges- modellhez szükséges mind a négy anyagjellemző meghatározásra került.

A kúszási és relaxációs modellek egyenértékűsége alapján a viszonylag rövid idejű kúszásvizsgálatból származó modellparamétereket felhasználva kiszámíthatók az állandó feszültség helyett az időben állandó alakváltoztató kényszer alatt tartott, majd tetszőleges időpontban felengedett anyag deformáció komponensei is.

A pillanatnyi rugalmas alakváltozási rész kezdeti értéke megegyezik a relatív alakváltozással,  $\varepsilon_0$  majd arányosan csökken a feszültséggel:

$$\varepsilon_r(t) = \frac{\sigma_0(t)}{E_1} = \varepsilon_0 \left[ \frac{\tau_{11} - T_2}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_1 - \tau_{11}}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right] \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0 \quad (62)$$

ahol:

$\varepsilon_0$  - a relatív alakváltozás a  $t=0$  időpillanatban

$\tau_{11}$  és  $\tau_{22}$  - a modell különböző időállandói

$T_1$  és  $T_2$  - időállandók

$t$  - idő

A modell  $\tau_{ij}$  ( $i, j=1, 2$ ) időállandói:

$$\tau_{ij} = \frac{\eta_i}{E_j} \quad (63)$$

A  $T_1$  és  $T_2$  időállandó meghatározásához először a csillapítási tényezőt kell kiszámítani:

$$\xi = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\eta_2}{\eta_1} + \frac{E_2}{E_1} \right) \sqrt{\frac{\eta_1 E_1}{\eta_2 E_2}} \quad (64)$$

ezután a két új időállandó:

$$T_1 = \frac{\sqrt{\tau_{11} \tau_{22}}}{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}} \quad (65)$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{\tau_{11}\tau_{22}}}{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}} \quad (66)$$

A maradó alakváltozási komponens nulláról indulva fokozatosan nő és  $\varepsilon_0$ -hoz tart:

$$\varepsilon_m(t) = \varepsilon_0 \left[ 1 - \frac{T_1 - \tau_{22}}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \frac{\tau_{22} - T_2}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right] \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \varepsilon_0 \quad (67)$$

Végül a késleltetett rugalmas alakváltozás zérusról indulva egy darabig nő, majd a maximumát elérve monoton csökkenve nullához tart:

$$\varepsilon_k(t) = \varepsilon_0 - \varepsilon_r - \varepsilon_m = \frac{T_1 + T_2 - (\tau_{11} + \tau_{22})}{T_1 - T_2} \left[ \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right] \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0 \quad (68)$$

Az (62), (67), (68), összefüggések segítségével a nyílászárók lineárisan viszkoelasztikus tömítőanyagainak időben történő deformációja előre jelezhető. Meg kell jegyezni, hogy a nyílászárók élettartamuk során rendszeres időközönként nyitott állapotban vannak, ezért a nyitás pillanatában az alakváltoztató kényszer megszűnik, aminek hatására a rugalmas, valamint a késleltetett alakváltozási komponensek visszaalakulhatnak. Ugyanez a jelenség játszódik le, ha a szélteher hatására a nyílászáró szárnya eltávolodik a toktól.

## **11. A MÁSODIK MEGBÍZHATÓSÁGI MODELL ALKALMAZÁSÁNAK BEMUTATÁSA**

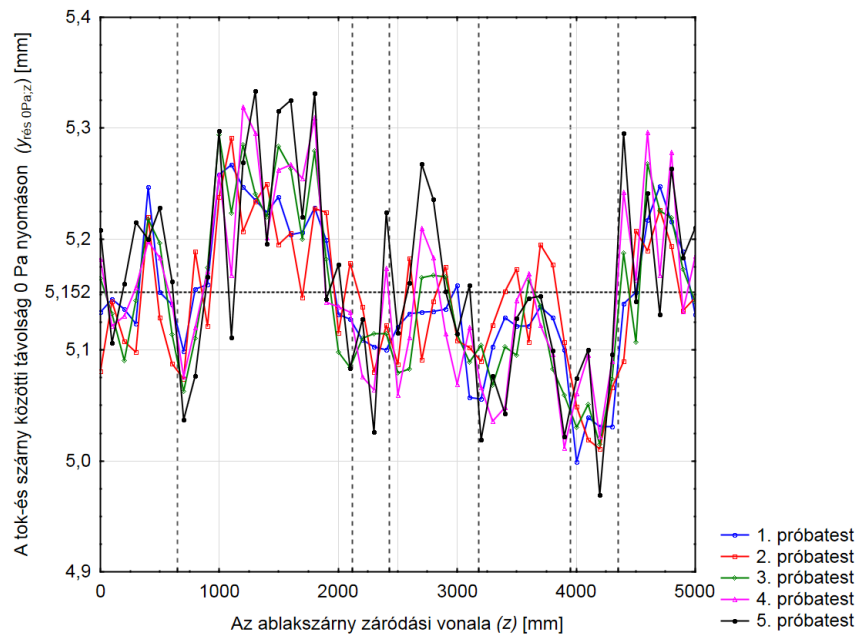
A modell működésének személtetésére egy hazai közepes méretű ablakgyártó üzem, a Holtz Team Kft. által készített terméket választottam (13. próbatest). A cég több mint 10 éves múlttal rendelkezik a minőségi fa nyílászárók gyártásában. A nyílászárók a legmodernebb CNC megmunkáló központokon, csak első osztályú alapanyagokból készülnek. A rendelkezésünkre bocsátott 1240x1480 mm tokkülméretű, 68/78 mm profil keresztmetszetű hőszigetelt üvegezésű fa nyílászáró mind méretében, mind kialakításában jelentős éves volument képvisel az üzem termelési profiljában. A próbatest részletes műszaki adatlapja a mellékletben található.

A megbízhatósági légzárási teljesítmény modellel történő becsülésének pontosságát nagymértékben meghatározza a számításhoz szükséges input adatok mennyisége és pontossága, amit a bevizsgált mintatestek, és a mintatesteken felvett mérési pontok számának növelésével lehet fokozni. A dolgozatban praktikusán csak egy próbatesten elvégzett vizsgálatok eredményei kerülnek bemutatásra és felhasználásra a megbízhatósági modellel történő számításokhoz.

A következő alfejezetekben a megbízhatósági modellhez szükséges input adatok meghatározásához szükséges eljárások és rutinok bemutatása következik.

### **11.1.A kerület mentén 0 Pascal nyomáson az elsődleges tömítés síkjában a tok- és a szárny távolságának várható értéke ( $y_{rés0Pa;z}$ ) és szórása.**

A megbízhatósági modell számol, az elsődleges gumitömítés helyén a szárny záródási vonal diszkrét pontjain meghatározott tok-és szárny távolságával. Az előzetes vizsgálatokhoz hasonlóan a vizsgált 13. próbatest esetén is elmondható, hogy a záródási vonal mentén a záródási pontok elhelyezkedésének függvényében ez a távolság tendenciózusan ingadozik (51 ábra).



51. ábra Résméret a záródási vonal mentén

A vizsgálat során plasztilint alkalmazva 51 pontban mértük az elsődleges középtömítés síkjában a tok-szárny távolságot. A mérési módszer, és a méréshez felhasznált eszközök megegyeznek a korábban bemutatottakkal. Az ábrán függőleges vonalak jelölik a vasalat záródási pontjainak pozícióit, míg a vízszintes szaggatott vonal, a próbatestek záródási vonala mentén mérhető átlagos tok-szárny távolságot. Megállapítható, hogy a zárócsapok közelében mérhető a legkisebb távolság, míg attól távolodva a távolság szisztematikusan növekszik. Továbbá az is látszik, hogy a záródási pontok közelében mért távolságok szórása kisebb, mint zárócsapok közötti szabad szakaszokon. A tendenciózus távolságváltozás a megbízhatósági modellel történő légáteresztési teljesítmény becslését annyiban bonyolítja, hogy a modellben az  $(y_{rés0Pa,z})$  réstávolság nem jellemezhető egy várható értékkel és annak szórásával, ugyanis ezzel szisztematikus hibát vinnénk a becslésbe, továbbá jóval nagyobb szórással számolnánk, mint amennyi valójában a kerület mentén felvett diszkrét pontban mérhető. Ennek megfelelően csak a záródási vonal egy adott pontján ismert a tok szárny távolságának várható értéke és annak szórása. A mért összes adat átlaga, ami a vizsgált ablakon 5,152 mm, csupán tájékoztató jellegű információ. A vasalatok zárócsapjainak excenter állításával, ez az átlagérték változtatható (lásd. 8. fejezet).

## 11.2.A mintatest vasalat-rendszerének koptató vizsgálata nyitási-csukási ciklusos fárasztással

A nyílászárók vasalatainak működtetése során, azok koptató hatásoknak vannak kitéve. A fárasztási vizsgálat célja, a megbízhatósági modellhez szükséges tok-és szárny között mérhető távolság időbeni változásának meghatározása. Mivel a nyílászáró vasalt-rendszerét érő hatások közül a legintenzívebbnek annak nyitás-csukás mondható, ezért az elmozdulás időbeni változását legkönnyebben a működtetési ciklusszámmal lehet korreláltatni. A vizsgálófalra felrögzített próbatest kilincsművéhez csatlakoztatott programozható nyitogató berendezéssel több ciklusban végeztük fárasztó vizsgálatokat. Egy nyitási ciklus során a berendezés a zárt állapotban lévő kilincs  $90^\circ$  fokkal történő elfordításával megszünteti a kapcsolatot a tok és szárny zárelemei között. Ezt követi a szárny függőleges tengely körüli  $10^\circ$  fokos nyitása-zárása, majd a kilincs  $90^\circ$  fokkal történő elfordításával a szárnyban található zárcsapok a zárfogadóba csúszva zárul a ciklus. Egy ciklus során a zárcsap kétszer súrlódik a záróelem felületén. A kísérletet a próbatest gyártója által átadott kenési állapotban kezdtük meg, és közben sem pótoltuk a kenőanyagot. A fárasztás során 2000, 4000, 6000, 10000, 12000, valamint 24000 ciklus után következtek az elmozdulás vizsgálatok. A fárasztó vizsgálat kísérleti tervének mátrixát foglalja össze a 7. táblázat.



52. ábra Szárny elmozdulásának mérése 600 Pa túlnyomás alkalmazása során

7. táblázat A fárasztó vizsgálat mátrixa

Próbatest száma	Fárasztási ciklusok száma						
	0	2000	4000	6000	10000	12000	24000
1	x	x	x	x	x	x	
2	x		x	x	x	x	
3	x		x	x	x	x	x

A 600 Pascal kamranyomás mellett a szárny tokhoz képesti abszolút elmozdulás mérését az 52. ábrán látható módon, 0,001 mm hitelesített pontosságú Mitutoyo mérőórával végeztük el. A kerület mentén a mérési pontok pozíciói megegyeznek az előző fejezetben bemutatottakkal, azzal a különbséggel, hogy a nagyszámú mérés miatt, az eredeti 51 mérőpont helyett csak 26 pontban mértük az elmozdulásokat. A vizsgálat elvégzésére egy próbatest állt rendelkezésre, amelybe három azonos Roto gyártmányú NT típusú vasalat került beszerelésre, valamint tesztelésre. A kopás résnövelő hatásának kimutatása céljából a különböző ciklusszám után mért elmozdulások értékeit a fárasztás megkezdése előtt mért elmozdulás értékekkel csökkentve használtam fel a statisztikai próbákhoz, valamint a kopási függvény illesztéséhez. Ezzel kiszűrhetővé váltak a záródási pontok merevítő hatásai is, ugyanis azok közelében mérsékeltebb a szárnyak szélteher hatására kialakuló deformálódása, mint azoktól távolabb.

Alapvetően a nyílászárók vasalata több mozgó alkatrészt tartalmaz, azonban a szárny-és tok távolságát leginkább a zárcsapok és zárfogadók pozíciói és geometriái határozzák meg. A nyílászáró élettartama során a működtetés következtében a zárcsapok súrlódnak a zárfogadó elemekben, amitől azok folyamatos koptató igénybevételnek vannak kitéve. Egy adott kenési állapot mellett a kopás annál intenzívebb, minél nagyobb a felületekre ható szorító erő nagysága. Nyílászárók esetében ezt a szorító erőt a tok és a szárny közé helyezett gumitömítés biztosítja. Láttuk, hogy a tömítés idővel relaxál, így a zárócsap és a zárfogadó felületére és ebből következően a többi mozgó alkatrészeire is egyre kisebb szorító erő hat. Ennek ismeretében könnyen belátható, hogy csökkenő szorító erő következtében degresszív kopási folyamat játszódik le, így a működési élettartam növekedésével a szárny elmozdulása egy maximális érték felé konvergál. Mindebből az következik, hogy a ciklusszám és szárnyelmozdulás értékek kapcsolatának leírására leginkább egy aszimptotikus függvény alkalmazható.

### 11.2.1. A koptató vizsgálatok eredményeinek kiértékelése

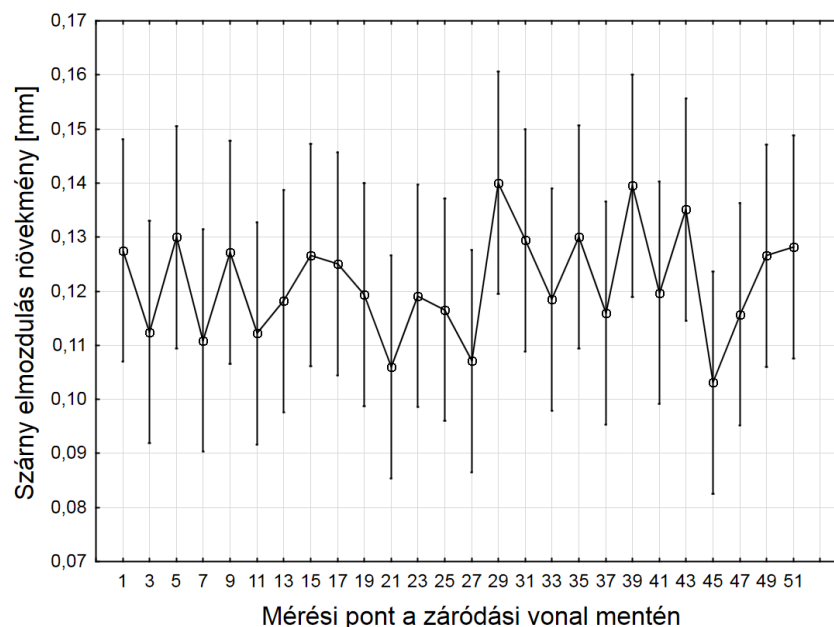
Az előző fejezetben bemutatott résmérés eredményei rámutattak arra, hogy a záródási pontok pozíciói alapvetően meghatározzák a tok-és szárny közötti távolságokat. A kopásvizsgálat során a mért adatok varianciaanalízisével egyrészt arra kerestük a választ, hogy a koptatási ciklusszám növelésével statisztikailag igazolhatóan növekszik-e a távolság, másrészt, hogy a mérési pont pozíciójának van-e jelentősége. Ennek megfelelően az egyik kategorizáló faktor a nyitási ciklus, a másik pedig a mérési pont

száma. Az analízis függő változója a növekvő nyitási ciklusok után mért elmozdulási értékek a 0 ciklushoz tartozó elmozdulás mértékével csökkentett értéke. Azaz a fárasztás során kialakuló elmozdulás növekmények. Az analízis megkezdése előtt az alkalmazási feltételek ellenőrzése megtörtént. A varianciák állandóságának vizsgálata során sem a Bartlett, sem a Levene-teszt nem bizonyult szignifikánsnak. Az adatok normális eloszlásnak ellenőrzésre a reziduumok Gauss-hálón történő ábrázolását választottuk, ami igazolta a normális eloszlás feltételezését. A reziduumok mérések sorrendjében történő ábrázolásakor, azok véletlenszerűen helyezkedtek el.

8. táblázat A koptató vizsgálat ANOVA táblázata

Az eltérés forrása	Df	SS	MS	F	P*
<b>Ciklusszám</b>	5	1,253798	0,250760	213,118	<0,001
<b>Mérési pont száma</b>	25	0,026324	0,001052	0,892	0,616170
<b>Kölcsönhatás</b>	125	0,180250	0,001449	1,232	0,092277
<b>Hiba</b>	208	0,24474	0,001175		
<b>Összesen</b>	364	1,705112			

A globális F-próba statisztika alapján megállapítható, hogy csak a nyitogatási ciklusszámnak volt hatása a tok-és szárny távolságára. A mérési pontok pozíciójának 5% szignifikancia szint mellett nem mutatható ki a hatása. A mérési pont hatásdiagramja is ezt támasztja alá (53. ábra). Az ábrán a különböző mérési pontokhoz tartozó elmozdulás növekmények átlaga és 95 %-os konfidenciaintervalluma látható.



53. ábra A mérési hely hatásdiagramja

Mivel nem mutatható ki szignifikáns különbség a különböző mérési pontokban mért elmozdulás növekmények között, ezért a fárasztási ciklusszám és a távolság függvény regressziójánál a mérési pontok pozícióját nem kell külön változóként kezelni. Ebből az következik, hogy a regresszió során a három próbatest összes mérési ponton mért elmozdulás adata együtt kezelhető adott ciklusszámnál. Természetesen ezzel némileg



növeljük az adott ciklusszámhoz tartozó mérési eredmények szórását. A szárnyelmozdulás és a nyitási ciklusszám függvénykapcsolat meghatározására nemlineáris regresszió analízist alkalmaztam.

A mérési pontokra illesztett függvény alakja:

$$f(x) = \beta_1 \cdot \left[ \frac{x}{\beta_2 + x} \right] \quad (69)$$

ahol:

$f(x)$  – szárny elmozdulása a toktól (mm)

$x$  – működtetési ciklusszám (db)

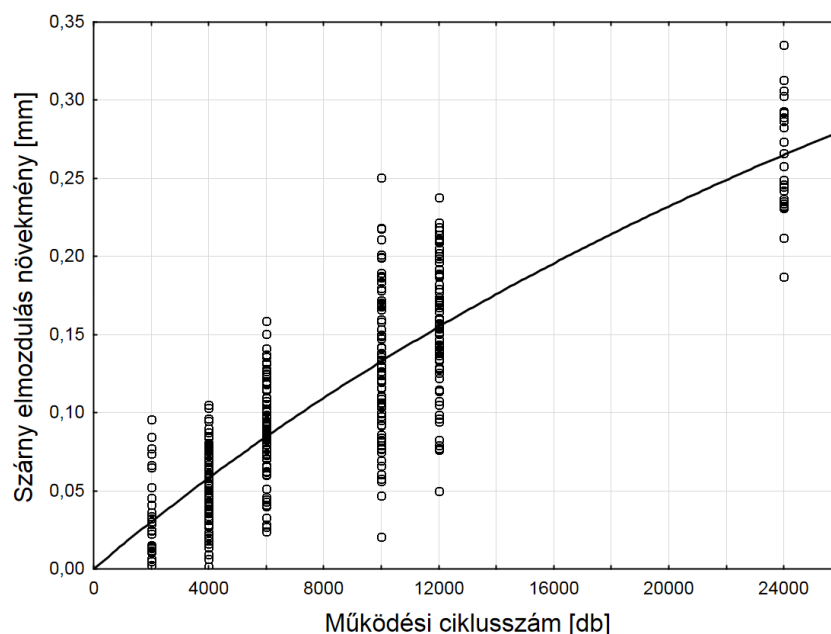
$\beta_1, \beta_2$  – az illesztett függvény paraméterei

Az 54. ábra a mérési pontokra illesztett függvényt mutatja. Az illesztés determinációs együtthatójának értéke:  $R^2 = 0,728$

A függvény paraméterei és statisztikai próbáinak eredményét a 9. táblázat foglalja össze. A becült értékek t- próbája szignifikánsnak bizonyult, tehát a  $\beta=0$  nullhipotézist elutasíthatjuk.

9. táblázat A regresszió analízis során becült paraméterek

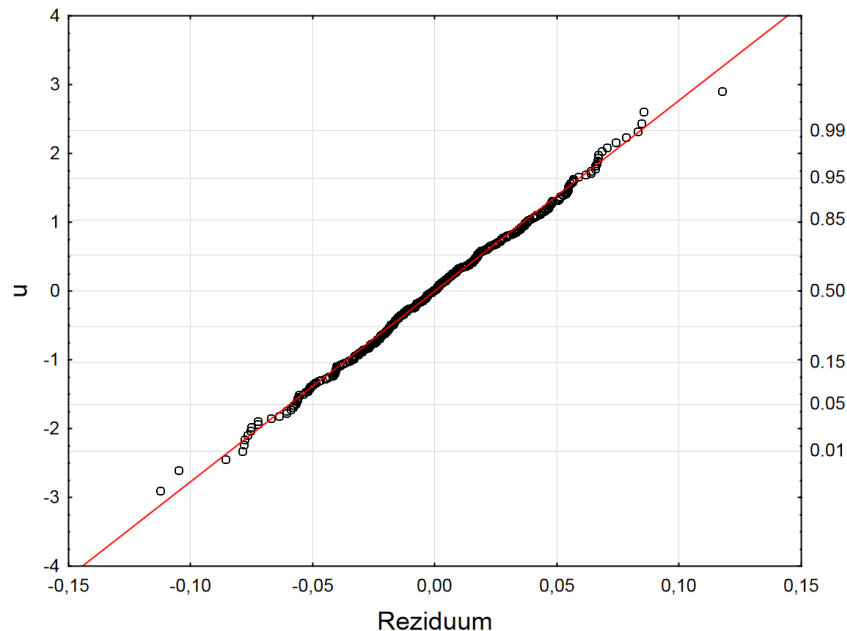
Függvény paraméter	Becült értéke	Standard hiba	t-érték (df=362)	p-valószínű. értéke	Konfidencia intervallum -95,00%	Konfidencia intervallum 95,00%
$\beta_1$	0,91	0,15	6,08	0,000000	0,62	1,21
$\beta_2$	58844	11859	4,96	0,000001	35522,98	82165,48



54. ábra A működési ciklusszám függvényében a szárny elmozdulása

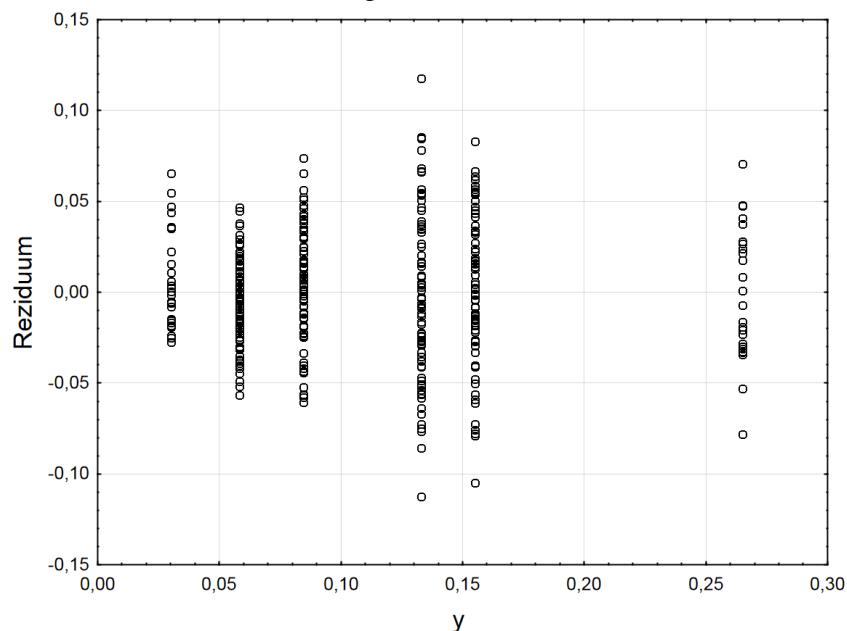
A regresszióanalízis során feltételeztük, hogy a különböző pontokban elkövetett  $\varepsilon$  mérési hibák egymástól függetlenek, varianciájuk konstans, és normális eloszlást

követnek. Az alapfeltevések teljesülését először a residuumok normális eloszlásának ellenőrzésével kezdem. A residuumok normális eloszlásának ellenőrzésének egyik módja azok Gauss-hálón történő ábrázolása. Mivel a maradékok a piros színnel berajzolt egyenes vonal mentén helyezkednek el, és nem találni kiugró pontot, vagy szisztematikus eltérést, így feltételezhetjük azok normális eloszlását (55. ábra).



55. ábra A residuumok ábrázolása Gauss-hálón

A residuumok konstans voltának ellenőrzésére a számított  $y$  értékek függvényében ábrázolt residuumok szóródásának vizsgálata alkalmas.



56. ábra A standardizált residuumok az  $y_i$  mérési adatok függvényében

Ha a mérési hiba varianciája konstans, a residuumok véletlenszerűen szóródnak zérus körül, függetlenül  $y$  értékétől. Mivel a pontok véletlenszerűen ingadoznak a zérus körül,

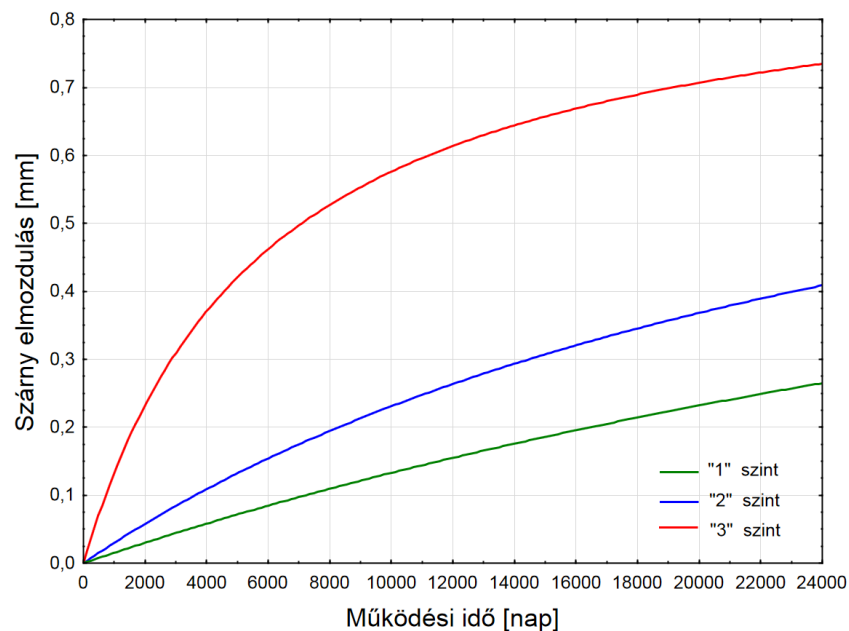
és a reziduumok eltolódást sem mutatnak, így a hibák varianciájának azonosságának feltételezése alátámasztható, azaz az illesztett függvény adekvát (56. ábra).

### 11.3.A fárasztási ciklusszám és a működési élettartam kapcsolata

Könnyen belátható, hogy a nyílászárók az élettartamuk alatt a működtetési igénybevételnek különböző mértékben vannak kitéve. Vannak olyan termékek, amelyek elhelyezkedésüknek köszönhetően egyáltalán nincsenek, vagy csak nagyon ritkán vannak nyitott állapotban. Ennek ismeretében célszerű a kopási igénybevétel mértékét több osztályértékkel jellemezni. Nem szabad figyelmen kívül hagyni azt a tényt sem, hogy időben folyamatosan csökken a tömítés által biztosított szorító erő mértéke, ami a kopás intenzitásának csökkenését eredményezi. Mivel kísérleti úton kimérni roppant bonyolult és időigényes, feltételezhető, hogy a tömítés teljes relaxálódásával a kopási folyamat megáll, és a tok- szárny között mérhető elmozdulás időben állandósul. Ehhez ismerni kell a tömítés feszültségfeloldódási függvényét. A korábban bemutatott Burgers-modell-paraméterei ismeretében azonban ez a függvény meghatározható, és kiszámítható a teljes feszültségfeloldódás. Mindebből az következik, hogy a fárasztóvizsgálat ciklusszámából adódó kopási függvény csak egy előre meghatározott értelmezési tartományon használható. A tömítés teljes feszültségrelaxálódását követően a tok szárny között mérhető távolság egy időben konstans függvénnyel jellemezhető. Praktikusasan 4 használati szintet különböztet meg a nyílászáró napi nyitási-zárási ciklusszámától függően:

- 0 szint:** az ablak élettartama alatt egyáltalán nincs kitéve működtetési igénybevételeknek
- 1 szint:** átlagosan napi egyszeri működtetés
- 2 szint:** átlagosan napi kétszeri működtetés
- 3 szint:** átlagosan napi tízszeri működtetés

A működtetési szinteknek megfelelően a működtetési ciklusszám függvényében meghatározott szárnyelmozdulás függvénykapcsolat átalakítható úgy, hogy a ciklusszám helyett működési idő függvényében adjuk meg az elmozdulás értékeket. A különböző működési szinteknek megfelelő szárny elmozdulás- idő függvényeket az 57. ábra mutatja.



57. ábra Szárny elmozdulás a működési idő függvényében

A különböző szintekhez tartozó függvények paraméterei:

„0” szint:  $\beta_1, \beta_2=0$

„1” szint:  $\beta_1=0,91; \beta_2=58844,23$

„2” szint:  $\beta_1=0,91; \beta_2=29422,11$

„3” szint:  $\beta_1=0,915; \beta_2=5884,423$

A megbízhatósági modellel történő számítás során a jellemezni kívánt nyílászáró várható működési körülményeinek megfelelő függvénykapcsolatot kell alkalmazni.

## 11.4.A rugalmas tömítőanyag reológiai viselkedésének vizsgálata laboratóriumi mérésekkel.

### 11.4.1. A vizsgálat során alkalmazott anyagok és módszerek bemutatása

A megbízhatósági modellel történő számításhoz szükség van a vizsgált nyílászáró rugalmas elsődleges tömítésének reológiai vizsgálatára. A modell működésének bemutatásához választott hőszigetelt üvegezésű nyílászárót Deventer SV-12 típusú középtömítéssel látták el. A reológiai vizsgálatokat a tömítés hazai forgalmazójától, a SZILKER Kereskedelmi és Szolgáltató Kft-től kapott mintákon végeztük el. Az SV-12 típusú elsődleges rugalmas középtömítés anyagát tekintve *poli-vinil-klorid (PVC)* monomerből készülő termoplasztikus elasztomer (*TPE*). A tömítések anyagának használat közbeni degradációját gyorsított hőregítési eljárással idéztük elő. Az eljárás

során az MSZ 493:2001 szabványnak megfelelően 5-5 db mintatestet 48 és 168 órára 70 °C –okos légkeveréses szárító szekrénybe helyeztünk, majd 48 órás kondicionálást követően megkezdődött az első öregített minta kúszási vizsgálata. Az öt darab öregítetlen mintával együtt, összesen 15 db próbatesten hajtottunk végre kúszási vizsgálatokat.

A reológiai vizsgálathoz a LLOYD–LR 5K univerzális szakítógépet alkalmaztuk, 5 kN-os erőmérő cellával (58. ábra). Az erőmérő cella  $\pm 0,01$  N felbontású, a berendezés visszaállási pontossága:  $\pm 2$   $\mu\text{m}$ .



58. ábra A kúszás vizsgálata a LLOYD –LR 5K univerzális szakítógépen

A nyomásos kúszásvizsgálatokhoz 250 mm hosszú próbatesteket készítettünk. Egységesen minden mintatest kúszási vizsgálata 75 órán keresztül, állandó 0,05 MPa feszültségen és 22°C hőmérsékleten, valamint 56%-os relatív páratartalom mellett történt. A kúszásvizsgálat során kapott anyagjellemzők ismeretében a 10. fejezetben bemutatott összefüggések alapján, az állandó alakváltoztató kényszer alatt tartott termoplasztikus elasztomer tömítőanyag deformáció komponensei kiszámíthatók.

A kúszásvizsgálatot követően egy kezeletlen mintatesten ciklusos feszültségrelaxációs vizsgálatot végeztünk. A vizsgálat elvégzését az indokolta, hogy az épületek ablakainak rendszeres időközönkénti nyitásával a tömítőprofil tehermentesített állapotba kerülésével a relaxációs folyamat szakaszossá válik. A vizsgálatnál arra kerestük a választ, hogy a feszültségmentesített ciklusok milyen mértékben változtatják meg a feszültségrelaxációs folyamatokat.

A vizsgálat során összesen 9 relaxációs ciklust hajtottunk végre, ciklusonként 12 órás állandó alakváltoztató kényszerrel alkalmazva. Minden 12 órás ciklus után következett 15 perc tehermentesítés, ezzel biztosítva a szellőztetés során megszűnő alakváltoztató kényszerrel. A vizsgálat alatt az eredetileg 11,5 mm névleges magasságú tömítőprofil 5,5 mm állandó magasságra lett összepréselve, ami 52,17%-os relatív alakváltozást jelent.

### 11.4.2. A relaxációs vizsgálatok eredményeinek kiértékelése

A különböző mértékben öregített próbatestek kúszásvizsgálata során kapott alakváltozás-idő görbéről szerkesztés útján meghatározott alakváltozási komponensek átlagát és tapasztalati szórását az 10. táblázat tartalmazza. A kúszási görbéket és a szerkesztést lásd a mellékletben.

10. táblázat A Burgers- modell-paraméterei

Öregítési fokozat	T [s]	$\sigma_0$ [Mpa]	$\epsilon_0$		$\epsilon_m$		$\epsilon_k$		$\tau_2$	
			átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
0	270000	0,05	0,233	0,0075	0,0017	0,00032	0,011	0,00210	5720,5	780,50
1	270000	0,05	0,270	0,0076	0,0023	0,00024	0,012	0,00112	5735,8	251,43
2	270000	0,05	0,285	0,0032	0,0027	0,00084	0,014	0,00445	5971,9	628,61

A szerkesztéssel meghatározott alakváltozási komponensek, valamint időállandó ismeretében az (57), (58), (59), (61), összefüggések alapján számított Burgers- modell-paramétereinek átlagát és szórását az 11. táblázat tartalmazza.

11. táblázat A mechanikai Burgers-modell paraméterei

Öregítési fokozat	E1		E2		$\eta_1$		$\eta_2$	
	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
0	0,213	0,00698	4,468	0,726	7952358,6	1350627,7	25435,9	4930,3
1	0,184	0,00520	4,048	0,373	5848378,0	681950,2	23270,7	2944,8
2	0,175	0,00196	3,658	1,187	5265927,2	1540041,5	21482,6	5904,2

A  $T=270000$  s időpontban mérhető maradó alakváltozási komponensek értékét varianciaanalízis alkalmazásával hasonlítottuk össze, annak megállapítása céljából, hogy a hosszantartóan magas hőmérsékletnek kitett tömítőprofil anyagában bekövetkező változások, okoznak-e szignifikáns eltérést a maradó alakváltozási komponensek értékeiben.

12. táblázat A hőöregítés ANOVA táblázata

Az eltérés forrása	SS	Df	MS	F	p*
Öregítés	0,000003	2	0,000001	4,4985	0,034846
Hiba	0,000003	12	0,000000		

Mivel a globális F-próba kimutatta, hogy a vasalatbeállítás különböző szintjeinek szignifikáns hatása van a tok-és szárny távolságára (12. táblázat), ezért további összehasonlításokra ad lehetőséget a Fisher-féle LSD statisztikai próba.

## 13. táblázat LSD próba eredményei

Beállítás	"p" valószínűség értékei		
	kezeletlen	48h öregítés	168h öregítés
Kezeletlen	-	0,109036	<b>0,011339</b>
48h öregítés	0,109036	-	0,233092
168h öregítés	<b>0,011339</b>	0,233092	-

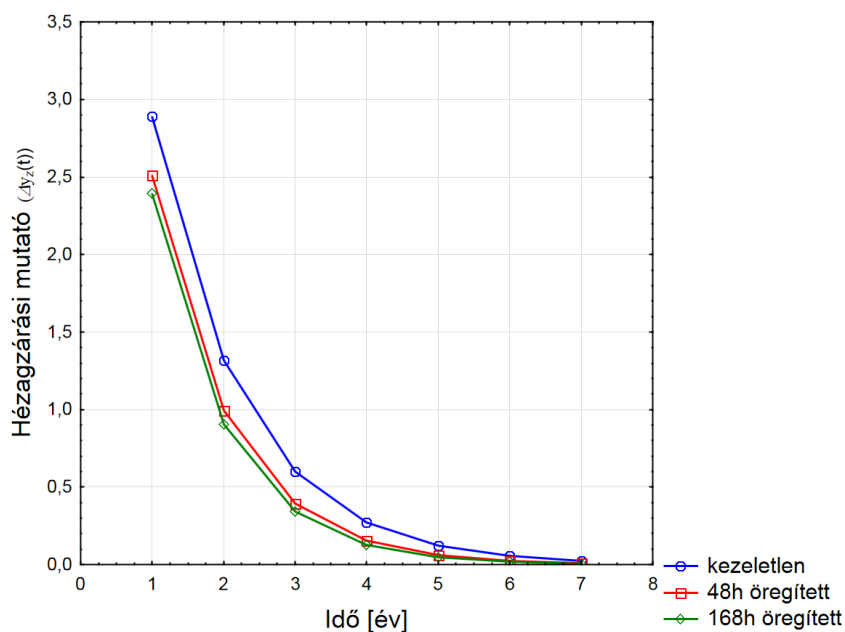
Az Fisher-féle LSD próba alapján megállapítható, hogy csak a 168 órás hőöregítésnek volt hatása a maradó alakváltozási komponens értékére (13. táblázat). 95% -os szignifikancia szinten nem mutatkozott különbség a 48 órán át öregített minta és a kontrolminta maradó alakváltozása között.

Mindebből arra lehet következtetni, hogy csak a hosszú időn keresztül tartó, magas hőmérsékletnek kitett tömítés reológiai tulajdonságaiban várható szignifikáns változás. A különböző mértékben öregített tömítések anyagjellemzőinek ismeretében számított hézagzárási mutató-idő görbéket az 59. ábra szemlélteti.

A számításokat az anyagjellemzők középértékeivel és a mintaablak záródási vonala mentén mért tok- és szárny távolságának középértékével végeztem el. Az eredetileg 11,5 mm névleges magasságú SV-12 típusú tömítés az ablak becsukását követően átlagosan 5,152 mm-re préselődik össze (lásd. 51. ábra). Az átlagos relatív alakváltozás az alábbiak szerint:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{11,5 - 5,152}{11,5} = 0,552$$

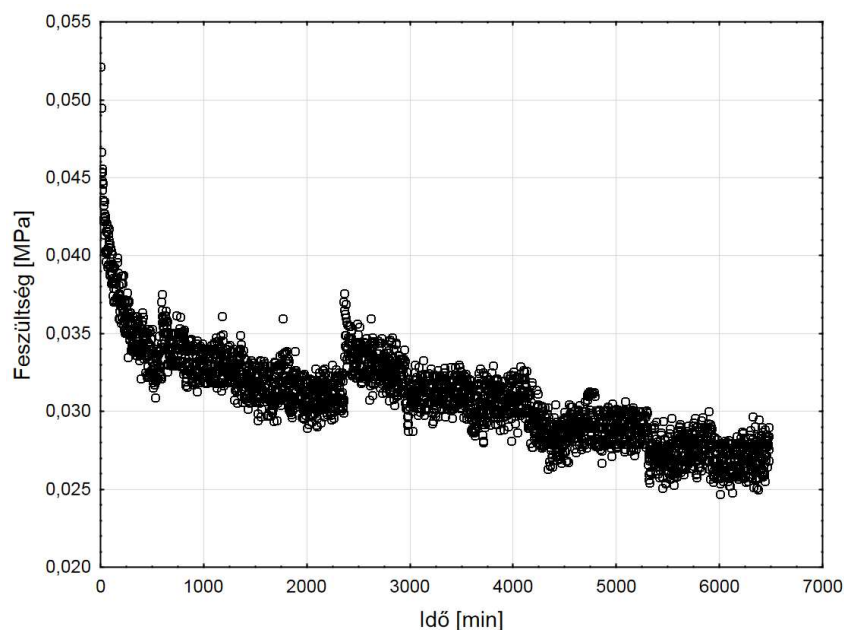
Ez a kényszer a tömítőprofil magasságára vonatkozóan 55,2%-os relatív alakváltozást jelent.



59. ábra Az öregítés hatása a tömítőprofil hézagzárási mutató alakulására

A tehermentesítési ciklusokat tartalmazó feszültségrelaxációs vizsgálat során a tömítőprofilban ébredő feszültséget vizsgáltam az idő függvényében (60. ábra). Az ábrán látható, hogy a kezdeti feszültség az első terhelési szakaszban meredeken csökken, majd a tehermentesítést követő újabb kényszer rövid ideig tartó feszültségugrást eredményezett. A további szakaszokban is megfigyelhetőek a relaxációs ciklusok kezdetét jelző magasabb feszültségértékek, azonban azok mértéke a ciklusszám emelkedésével folyamatosan csökken. Ha nézzük a teljes vizsgálati időtartamot, akkor megállapítható, hogy a tömítésben ébredő feszültség egy exponenciális függvény szerint monoton csökkenő tendenciát mutat.

Ez azt jelenti, hogy az élettartam alatti alakváltozási komponensek alakulását a rövididejű szellőztetési ciklusokból álló tehermentesítési szakaszok nem befolyásolják. Ennek alapján a Burgers-modell anyagállandóival a teljes működési élettartam alatt lehet számolni.



60. ábra Az SV-12- típusú tömítőprofil ciklusos feszültségrelaxációs vizsgálata

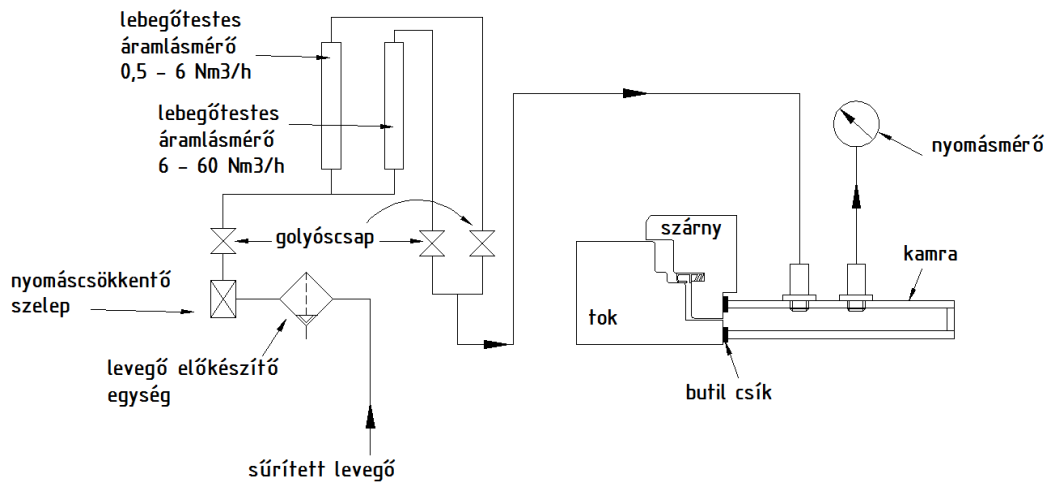
## 11.5.A hézagzárási mutató érték és a légáteresztés közötti függvénykapcsolat meghatározása

### 11.5.1. A vizsgálat során alkalmazott anyagok és módszerek bemutatása

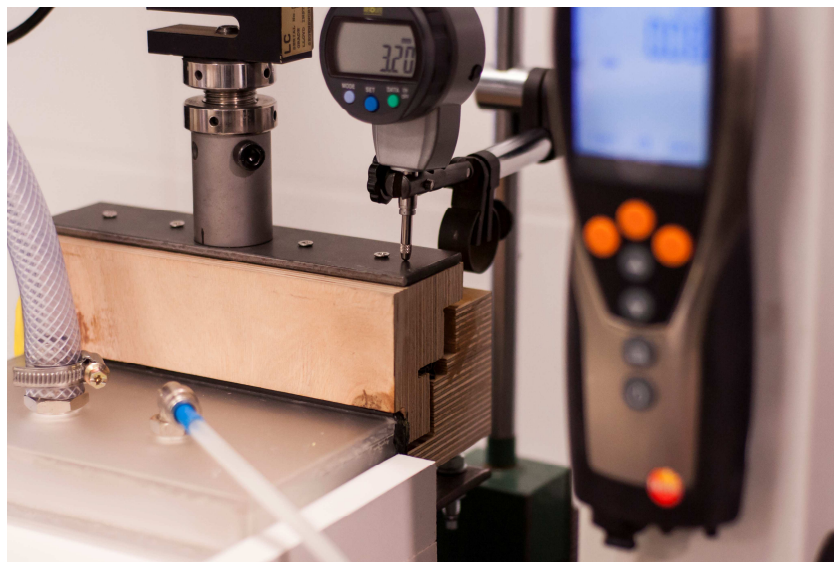
A légzárási megbízhatósági modellel történő légáteresztés becsléséhez ismerni kell adott nyomáskülönbség mellett a hézagzárási mutató függvényében a tok és szárny között kialakuló légáteresztést. A kutatott szakirodalomban nem találhatók erre



vonatkozó mérési eredmények, mérési eljárások, ezért egy egyedi mérőkamra kialakítására volt szükség. A mérőberendezés elvi vázlatát az 61. és 62. ábra szemlélteti.



61. ábra A résáramlás meghatározásához használt mérőberendezés elvi vázlatja



62. ábra A résáramlás meghatározásához használt mérőberendezés

A mérőkamra részét képező tok és szárny elemek a korábban bemutatott LLOYD –LR 5K univerzális szakítógép alsó és felső gerendájához lettek rögzítve. A keresztgerenda függőleges mozgatásával lehet a tok- és szárny között elhelyezett rugalmas tömítőprofil összenyomódását szabályozni. A kamra légtömörségét 5 mm vastag PMMA lemez biztosítja, ami kétoldalas vákuumtechnikában alkalmazott rugalmas tömítőanyaggal csatlakozik a tok és szárny elemekhez. A profilok végein a légszivárgást plasztilin réskitöltő tömítőanyag alkalmazásával gátoltuk meg. A kamra kialakításánál fogva a betáplált levegő csak a tok és szárny között elhelyezett tömített szakaszon távozhat. A vizsgálat során a kamrában 50, 100, 300, 600 Pascal nyomást hoztunk létre, és a tömítőprofil összenyomódásának függvényében mértük a 200 mm réshosszon keresztül kialakuló légáteresztést.

A kamrában uralkodó nyomás mérésére Testo 435 típusú univerzális mérőműszert alkalmaztunk, melynek hitelesített pontossága  $\pm 0,02$  hPa. A kamrába betáplált levegő tömített folyóméterére átszámított térfogatmennyiséget lebegőtestes áramlásmérővel mértük. A vizsgálatokhoz Deventer SV-12 típusú tömítést használtunk fel. Minden nyomásfokozaton adott beállítással tok és szárny távolságon három mintán, háromszor véletlenszerűen megismételt mérést hajtottunk végre.

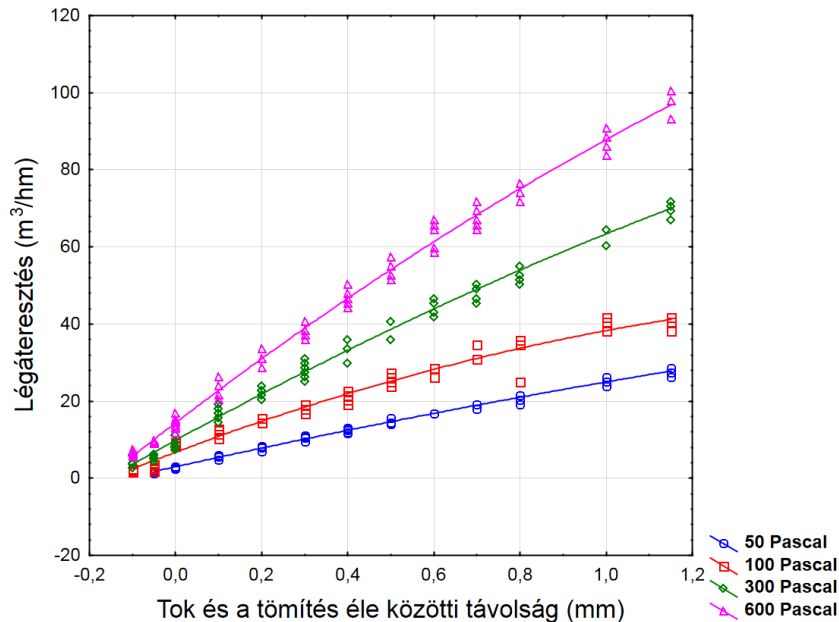
### 11.5.2. A légáteresztési vizsgálatok kiértékelése

A hézagzárási mutató függvényében a folyóméterenkénti légáteresztési értékek átlagát és tapasztalati szórását a 14. táblázat tartalmazza. Az átlagok és szórások a kilenc ismételt mérésből adódnak. A tömítés felülete és a tok felülete közötti távolság függvényében ábrázolt légáteresztési értékeket a 63. ábra mutatja. Megfigyelhető, hogy abban az esetben is mérhető légáramlás következett be, amikor a nyomáskülönbség felállítása előtt a tömítés fizikailag is érintkezett a tok felületével. 600 Pascal nyomáskülönbség mellett, még 0,1 mm tömítés összenyomódás esetén is  $6,5 \text{ m}^3/\text{hm}$  levegő áramlást lehetett mérni. A befogás miatt a tok és szárny elmozdulása nem következhetett be, ezért feltételezhető, hogy a nyomáskülönbség hatására a tömítés deformálódott, így engedve utat a légáramlásnak. Alacsonyabb nyomáskülönbségeken ez a légáramlás mérséklődött. 50 Pascal nyomáskülönbségen már 0,1 mm-es tömítés összenyomódás mellett a légáteresztés nem volt mérhető.

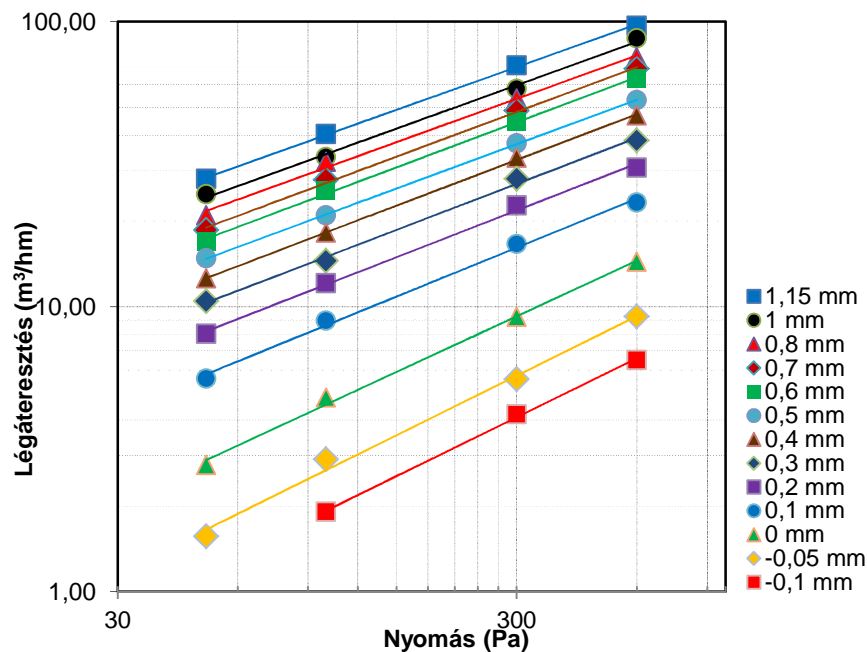
14. táblázat Különböző nyomáson mért légáteresztés a hézagzárási mutató függvényében

Hézagzárási mutató	Légáteresztés [ $\text{m}^3/\text{hm}$ ]							
	600 Pascal		300 Pascal		100 Pascal		50 Pascal	
	átlag	szórás	Átlag	szórás	átlag	szórás	átlag	szórás
-1,15	96,81	2,95	70,16	2,05	40,32	1,30	28,12	0,87
-1	87,53	2,39	57,96	16,46	33,50	2,62	24,80	0,80
-0,8	75,06	2,11	53,71	1,89	32,23	1,79	20,95	0,87
-0,7	68,30	3,03	48,67	1,96	27,85	1,19	18,57	0,63
-0,6	63,13	3,01	44,56	1,58	25,60	1,48	16,93	0,67
-0,5	53,05	2,16	37,40	2,39	20,95	1,21	14,77	0,71
-0,4	46,82	1,77	33,29	2,76	18,17	1,16	12,57	0,60
-0,3	38,33	1,93	28,12	2,32	14,46	0,40	10,45	0,53
-0,2	30,77	1,87	22,68	1,58	12,10	0,86	8,04	0,45
-0,1	23,21	1,80	16,58	1,52	8,94	0,34	5,60	0,36
0	14,35	1,71	9,20	1,43	9,20	1,43	2,79	0,21
0,05	9,23	0,40	5,57	0,66	2,92	0,59	1,56	0,24
0,1	6,50	0,61	4,19	1,35	1,91	0,24	0,00	0,00

Adott geometriájú résen a nyomáskülönbség hatására kialakuló légáteresztés az (5) összefüggés alapján, hatványfüggvény szerint változik. A műszaki gyakorlatban a függvény hatványkitevőjét  $n=2/3$ -ban határozzák meg. A különböző résméret mellett a nyomáskülönbség függvényében mért légáteresztések átlagát a 64. ábra szemlélteti. Adott résmérethez tartozó mérési pontok átlagára illesztett trendvonal függvényparamétereit, valamint az illesztés korrelációs együtthatóját a 15. táblázat tartalmazza.



63. ábra A légáteresztés a tok és a tömítés felületének távolsága függvényében



64. ábra Különböző résméret mellett mérhető légáteresztés-nyomás görbék

15. táblázat A mérési pontokra illesztett hatványfüggvény paraméterei

Résméret (mm)	Áramlási koefficiens (c-tényező)	Hatványkitevő (n)	Az illesztett trendvonal korrelációs együtthatója ( $R^2$ )
1,15	4,0299	0,4987	0,9996
1	3,3356	0,5061	0,9967
0,8	2,9992	0,5056	0,9963
0,7	2,462	0,521	0,9988
0,6	2,2139	0,5255	0,9987
0,5	1,9533	0,5165	0,9999
0,4	1,5683	0,5327	0,9996
0,3	1,2648	0,5365	0,9967
0,2	0,9701	0,5455	0,9971
0,1	0,6215	0,5707	0,9964
0	0,2288	0,6488	0,9969
-0,05	0,1096	0,6936	0,9936
-0,1	0,0817	0,6864	0,999

A mérési pontokra illesztett hatványfüggvények determinációs együtthatóinak értéke igen magas. A nyomáskülönbség-légáteresztés kapcsolatát leíró hatványfüggvény kitevőjének vizsgálatakor megfigyelhető, hogy a résméret változásával az is változik. Mindez azt jelenti, hogy a nyomáskülönbség hatására kialakuló légáramlás leírására használt függvény ((5) összefüggés) a rés geometriájától is függ, azaz a függvény kétváltozósá válik. A műszaki gyakorlatban használt  $n=2/3$  hatványkitevő értékét csak a nulla résméretre közelíti meg. A hatványkitevő változása azt eredményezi, hogy alacsony nyomásértéken mért légáteresztések alapján nagyobb nyomáskülönbségekre történő légáteresztés extrapolálása pontatlan eredményekre vezethet. Fontos megjegyezni, hogy egy tényleges nyílászáró záródási kerülete mentén a záródás szorossága pontról pontra változik, így az áramlási viszonyok is változnak. A dolgozat korábbi fejezeteiben bemutatott légzárési osztályozó diagramokon látható, hogy a legtöbb esetben a mért értékekre illesztett görbe párhuzamosan helyezkedik el az osztályozó egyenessel, így a teljes kerület mentén kialakuló áramlások integrált értékeként a kitevő valóban a szakirodalomban megtalálható 0,66 értékre adódik.

A megbízhatósági modellel történő légáteresztés becslésekkor szükség van a hézagzárési mutató és a légáteresztés függvénykapcsolatára. Mivel a modellel a légzárési teljesítőképesség szempontjából a legkedvezőtlenebb esetet modellezzük, ezért a légáteresztési függvényt a szabvány szerinti legnagyobb (600 Pascal) nyomáskülönbségen határoztuk meg. Az illesztett függvényt az 65. ábra szemlélteti.

A mérési adatokra illesztett exponenciális függvénykapcsolata következő összefüggéssel írható le:

$$g(x) = \beta_4 \cdot \left(1 - \exp(-1 \cdot ((\beta_3 \cdot x - 1 \cdot \beta_2)^{\beta_1}))\right) \quad (70)$$

ahol:

$g(x)$  – légáteresztés ( $\text{m}^3/\text{hm}$ )

$x$  – hézagzárési mutató (mm)

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  – az illesztett függvény paraméterei

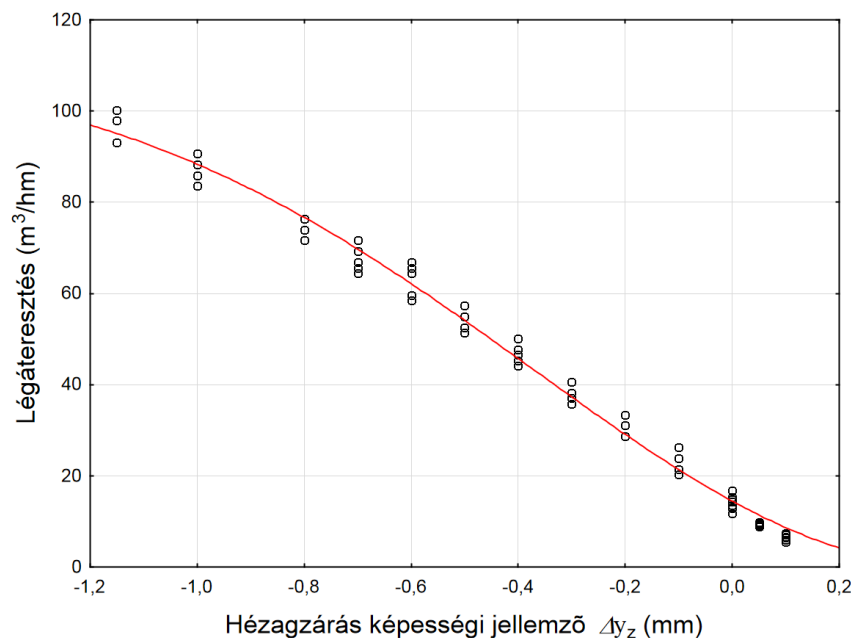
Az illesztett függvény konstansai:

$\beta_1 - 2,00$

$\beta_2 - 0,421$

$\beta_3 - 0,887$

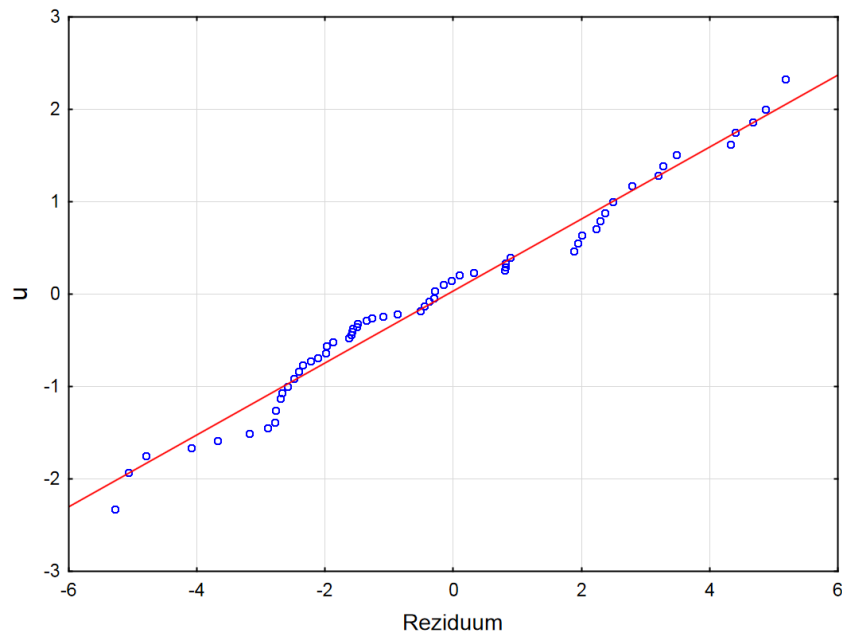
$\beta_4 - 110,961$



65. ábra Légáteresztés a hézagzárési mutató függvényében

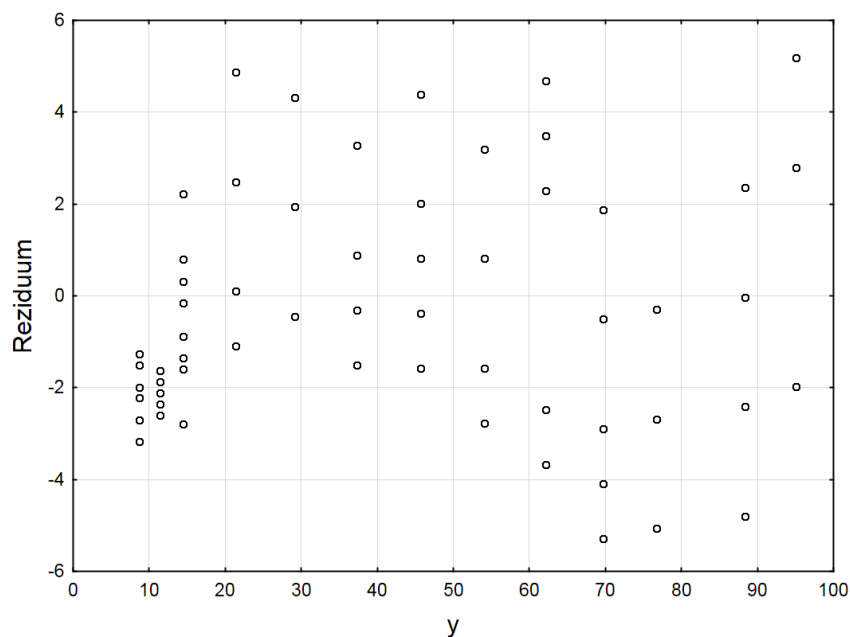
Az illesztett függvény determinációs együtthatójának értéke  $R^2=0,996$

A regresszióanalízis során feltételeztük, hogy a különböző pontokban elkövetett  $\varepsilon$  mérési hibák egymástól függetlenek, varianciájuk konstans, és normális eloszlást követnek. Az alapfeltevések teljesülését először a residuumok normális eloszlásának ellenőrzésével kezdem. A residuumok normális eloszlásának ellenőrzésének egyik módja azok Gauss-hálón történő ábrázolása. Mivel a maradékok a piros színnel berajzolt egyenes vonal mentén helyezkednek el és nem találni kiugró pontot, vagy szisztematikus eltérést, így feltételezhetjük azok normális eloszlását (66. ábra).



66. ábra A reziduumok ábrázolása Gauss-hálón

A reziduumok konstans voltának ellenőrzésére a számított  $y$  értékek függvényében ábrázolt reziduumok szóródásának vizsgálata alkalmas. Ha a mérési hiba varianciája konstans, a reziduumok véletlenszerűen szóródnak zérus körül, függetlenül  $y$  értékétől.



67. ábra A standardizált reziduumok az  $y_i$  mérési adatok függvényében

Mivel a pontok véletlenszerűen ingadoznak a zérus körül, és a reziduumok eltolódást sem mutatnak, így a hibák varianciájának azonosságának feltételezése alátámasztható, azaz az illesztett függvény adekvát (67. ábra) így a megbízhatósági modellel történő számítás során felhasználható.

## 12. A MEGBÍZHATÓSÁGI MODELL NUMERIKUS ALAKJÁNAK MEGHATÁROZÁSA

Az előző fejezetben bemutatott kísérleti eredmények ismeretében már meghatározható a vizsgált nyílászáró légáteresztésének várható értéke egy adott időpillanatban. Ehhez azonban a megbízhatósági modell ismertetése során bemutatott modellparaméterek részletesebb kifejtésére lesz szükség. Ennek megfelelően a hézagzárási mutató értékének meghatározása a következők alapján történik:

$$\Delta y_z(t) = y_{i\ddot{o}m;z}(t) - y_{r\acute{e}s600Pa;z}(t) \quad (71)$$

$$y_{i\ddot{o}m,z}(t) = y_{r\acute{e}s0Pa,z} + y_{i\ddot{o}m}(t_0) \cdot \varepsilon_r(t) = y_{r\acute{e}s0Pa,z} + y_{i\ddot{o}m}(t_0) \cdot \left[ \varepsilon_0 \cdot \left[ \frac{\tau_{11} - T_2}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_1 - \tau_{11}}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right] \right] \quad (72)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{y_{i\ddot{o}m}(t_0) - y_{r\acute{e}s0Pa,z}}{y_{i\ddot{o}m}(t_0)} \quad (73)$$

$$y_{r\acute{e}s600Pa,z}(t) = y_{r\acute{e}s600Pa,z}(t_0) + \beta_1 \cdot \left( \frac{t}{t + \beta_2} \right) \quad (74)$$

tehát a kerület mentén a z-edik pontban a hézagzárási mutató számítására a következő összefüggés alkalmazható:

$$\Delta y_z(t) = y_{i\ddot{o}m}(t_0) \cdot \left[ \left[ \frac{y_{i\ddot{o}m}(t_0) - y_{r\acute{e}s0Pa,z}}{y_{i\ddot{o}m,z}(t_0)} \right] \cdot \left[ \frac{\tau_{11} - T_2}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + \frac{T_1 - \tau_{11}}{T_1 - T_2} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \right] \right] + y_{r\acute{e}s0Pa,z} - \left[ y_{r\acute{e}s600Pa,z}(t_0) + \beta_1 \cdot \left( \frac{t}{t + \beta_2} \right) \right] \quad (75)$$

A hézagzárási mutató függvényében a tömítetlen résen keresztül megvalósuló légáramlást a következő függvénykapcsolat írja le:

$$g(x) = \beta_4 \cdot \left( 1 - \exp(-1 \cdot ((\beta_3 \cdot x - 1 \cdot \beta_2)^{\beta_1})) \right) \quad (76)$$

Ha az x-ek helyére behelyettesítjük a hézagzárási mutató értékét, akkor a következő összefüggésre jutunk:

$$V(t) = \int_0^L \left[ \beta_4 \cdot \left( 1 - \exp(-1 \cdot ((\beta_3 \cdot \Delta y_z(t) - 1 \cdot \beta_2)^{\beta_1})) \right) \right] dl \quad (77)$$

Az integrálás numerikus elvégzésével meghatározható az adott időpillanatban a nyílászáró teljes zárási hosszában megvalósuló légáramlás.

A korábbi fejezetekben bemutatott mérési eredmények ismertetése során már kiderült, hogy az eredmények kisebb nagyobb mértékben szórást mutatnak. Mind a termékekre jellemző megmunkálási pontosság, mind pedig a felhasznált anyagok tulajdonságainak változékonysága miatt azokat valószínűségi változóként kell kezelni. Így a modellben a következő paraméterek lesznek valószínűségi változók, amelyeket egy eloszlástípussal, egy várható értékkel, valamint egy szórással jellemezhetünk.

A tömítőprofil anyagi tulajdonságának változékonysága a relaxációs folyamatokra lesz hatással:

$$E_1, E_2, \eta_1, \eta_2, T_1, T_2, \tau_{11}, \tau_{22} \longrightarrow y_{\text{töm},z}(t): N(\mu, \sigma)$$

A tömítőprofil kezdeti magassága a gyártási körülményektől függően ingadozik:

$$y_{\text{töm}}(t_0): N(\mu, \sigma)$$

A profilok megmunkálási pontatlansága, nedvesség-és hődilatációja, vasalat zárscapjainak mérete, valamint állása a tok és szárny között mérhető távolság változékonyságát eredményezi:

$$y_{\text{rés0Pa},z}: N(\mu, \sigma)$$

A szárny merevségi tulajdonságának, valamint a vasalat kotyogásának változékonyságából következik, hogy a szélnyomás hatására a tok és szárny között mérhető távolságot is sztochasztikus változóként kell kezelni:

$$y_{\text{rés600Pa}}(t): N(\mu, \sigma)$$

Meg kell említeni, hogy az utóbbi két paraméter a záródási vonal mentén pontról pontra, azaz a z függvényében változik.

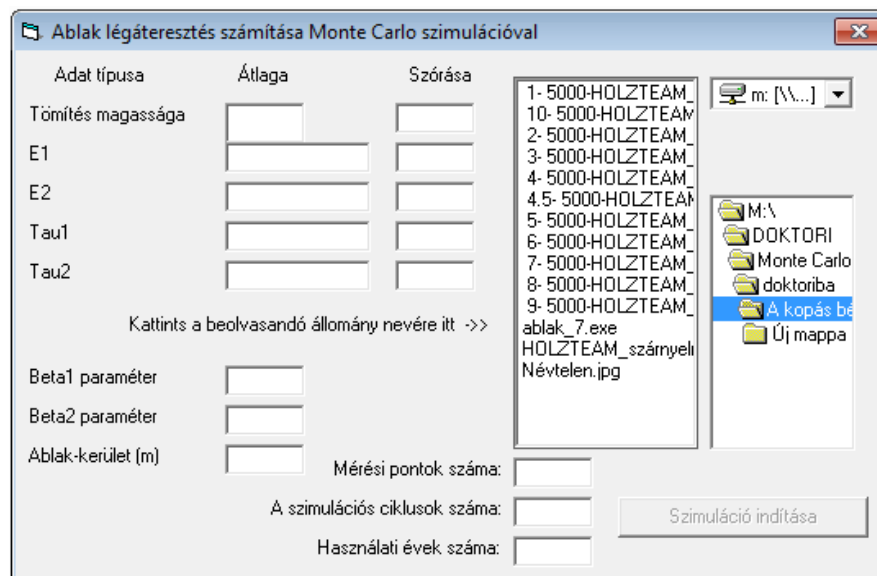
Látható, hogy a numerikus modell használata a nagyszámú bizonytalan input adat miatt önmagában nem vezet pontos eredményre. Ezért ezzel a bizonytalansággal számolnunk kell, azaz le kell tudni írni egy alkalmas modellel, mely összhangban van a fizikai rendszerről rendelkezésre álló információinkkal, és az valamilyen numerikus módon megoldható. Erre alkalmas eszközt kínál a Monte-Carlo matematikai szimulációs módszer, amely alkalmas arra, hogy véletlen paraméterek sorozatával megoldjon determinisztikus problémákat. A módszert széles körben alkalmazzák különböző események lehetséges kimeneteleinek szimulációjára, amikor a rendszer gerjesztő paraméterei sztochasztikus jellegűek. A módszer lényege, hogy az egyes bizonytalan tényezőkhöz rendelt valószínűség-eloszlás alapján véletlenszerűen választunk ki értékeket, amelyeket a szimulációs vizsgálat egy-egy kísérletében használunk fel (Vose, 2006). Ha a paraméterek sztochasztikusan függetlenek, akkor minden paramétert külön-külön egyváltozóként szimulálhatunk, vagyis megkerülhető a többváltozós mérési eredmény szimulációja. Példánkban a paraméterek egy része ( $y_{\text{rés0Pa},z}$ ,  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ )



függetlennek tekinthető, de a záródási vonal mentén végzett mérések viszont nem. Adott iterációval lefuttatott szimuláció eredményeinek statisztikai kiértékelésével meghatározható, hogy az adatok milyen gyakorisági eloszlást követnek. Az iterációs szám növelésének célja, hogy megfelelően megválasztott nagyszámú iteráció esetén jellegzetes valószínűség sűrűségfüggvénnyel is jellemezhetővé váljanak a szimuláció eredményei. A kereskedelmi forgalomban több Monte-Carlo szimulációs szoftver is kapható, azonban a feladat speciális volta miatt, szükség volt egy saját szimulációs program írására.

### 12.1.A numerikus modell megoldásához kifejlesztett szimulációs szoftver ismertetése

A kifejlesztett számítógépes program a 77. numerikus összefüggést a Monte-Carlo módszer alkalmazásával oldja meg. A szoftver specialitása abban mutatkozik meg, hogy a nyílászáró zárási vonalának diszkrét pontjaiban meghatározott paraméterek statisztikai jellemző értékeinek megfelelő megválasztásával futtatja le a szimulációt. Erre azért van szükség, mert a nyílászáró záródási vonala mentén a hézagzárési mutató értéke adott időpillanatban a konstrukciónak megfelelően pontról pontra változik. Annak érdekében, hogy a szimuláció megfelelő eredményt adjon, nem csak az iterációk számát kell növelni, hanem a záródási vonal mentén a lehető legtöbb pontban kell megadni az  $y_{rés0Pa,z}$ :  $N(\mu,\sigma)$ , valamint a  $y_{töm600Pa}(t)$ :  $N(\mu,\sigma)$  paraméterek értékeit. Ezzel a numerikus integrálás pontossága növelhető. A program kezelőfelületét a 68. számú ábra szemlélteti.



68. ábra. A kifejlesztett szimulációs program kezelőfelülete

A programba beépítésre került egy un. geometriai szűrőmodul is, aminek az a feladata, hogy a záródási vonal diszkrét pontjaiban meghatározott előbbi paraméterek eloszlásából véletlenszerűen generált szomszédos értékei ne vehessenek fel fizikailag

irreális szélső értékeket. Ez azt jelenti, hogy ha a záródási vonal menti távolságméréseket egyváltozós függvényként ábrázoljuk, ahol - a korábbi jelölésnek megfelelően -  $z$  tengely mentén a mérési pozíciókat, az  $y$  tengely mentén pedig a mérési eredményeket visszük fel, akkor az így kapott függvénygörbe geometriai kényszerfeltételnek tekinthető. A vizsgált termék legyártott példányai hasonló viselkedést mutatnak, azaz a rajtuk mért görbék 'hasonlítani' fognak, amit korreláció-analízissel sikerült alátámasztani. Azért, hogy elkerüljük a távolságmérések szimulálására az adott együttes eloszlású többdimenziós véletlen-vektor generálást, úgy jártunk el, hogy a vektorokat független komponensűnek tekintettük, majd a generált vektorokat megszürtük, 'hasonlítanak-e' a valós mérésekből származtatott (várható érték=átlag) mintafüggvényekre. Ha a hasonlóság teljesült, a generált vektort elfogadtuk, és továbbléptünk a légáteresztés meghatározására, egyébként pedig új véletlen-vektor generáltunk mindaddig, míg a hasonlóság nem teljesült.

A 'görbehasonlóság' vizsgálatára két módszer kínálkozott, az egyik, a már említett korreláció-analízis, a másik pedig a geometriai kényszerek teljesülésének vizsgálata. Mi ez utóbbit választottuk, mert szigorúbb kritériumnak tűnt, és jobban illeszkedett a feladat természetéhez. A geometriai kényszerfeltételt a görbe három egymást követő pontjára a következőképpen írtuk fel:

A középső pont kilógását vizsgáltuk a szélső pontok definiálta egyeneshez képest. Először a mintagörbén határoztuk meg ezt az eltérést, majd a szimulált mérési sorozat alapján; ha a két kilógás különbsége egy adott korlátnál nagyobbak bizonyult, akkor elvetettük a hasonlóságot, egyébként pedig folytattuk a mérési sorozat további ponthármasainak ellenőrzését.

Az elfogadási korlát definiálásához ismert a tényleges ablakok záródási vonala mentén mért, és a mintagörbét adó távolságmérések várható értékei, szórásai (ezek a várakozásnak megfelelően gyakorlatilag azonosak voltak), és ennek kétszeresében határoztuk meg az elfogadási korlátot.

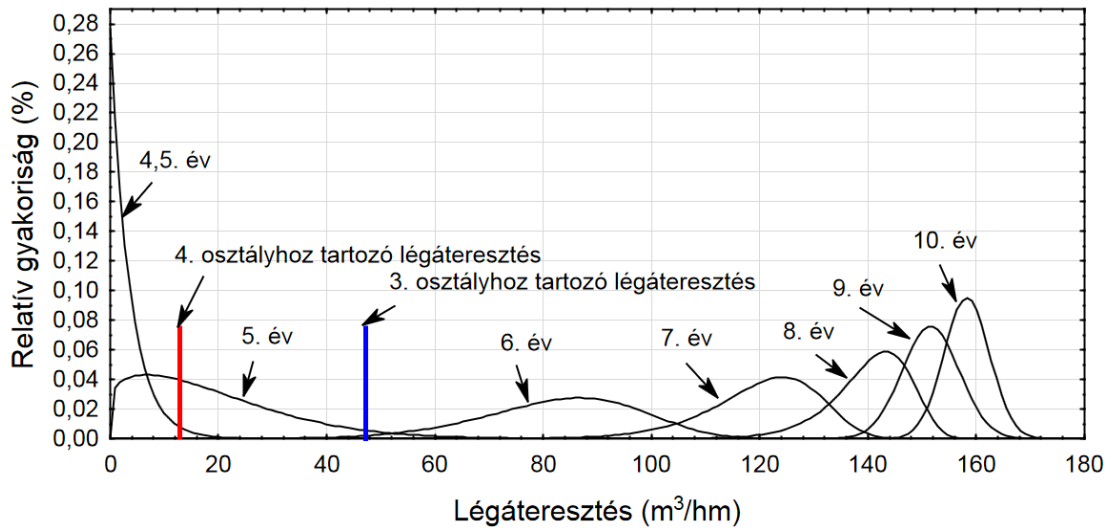
Mivel a légzárás megbízhatósági modellezése során a használati idő függvényében szeretnénk meghatározni a várható légáteresztés értékét, ezért a programban a felhasználó szabadon megválaszthatja, hogy mely időpontnak megfelelően futtassa le a szimulációt. A (69) összefüggéssel leírható kopási folyamat különböző igénybevételi szintjeihez tartozó függvényparaméterek megadásával, a felhasználónak lehetősége nyílik a különböző használati igénybevételek légzárásra gyakorolt hatásának vizsgálatára.

Praktikusan a program egy *txt* fájlból olvassa be a záródási vonal mentén mért  $y_{rés0Pa,z}$ ,  $y_{töm600Pa}(t)$  várható értékeit, valamint szórásait. A lefuttatott szimuláció output adatait a program szintén egy *txt* fájlba írja ki. Az adatok további statisztikai elemzések elvégzése céljából Excel vagy más statisztikai számítógépes programba lehet importálni.

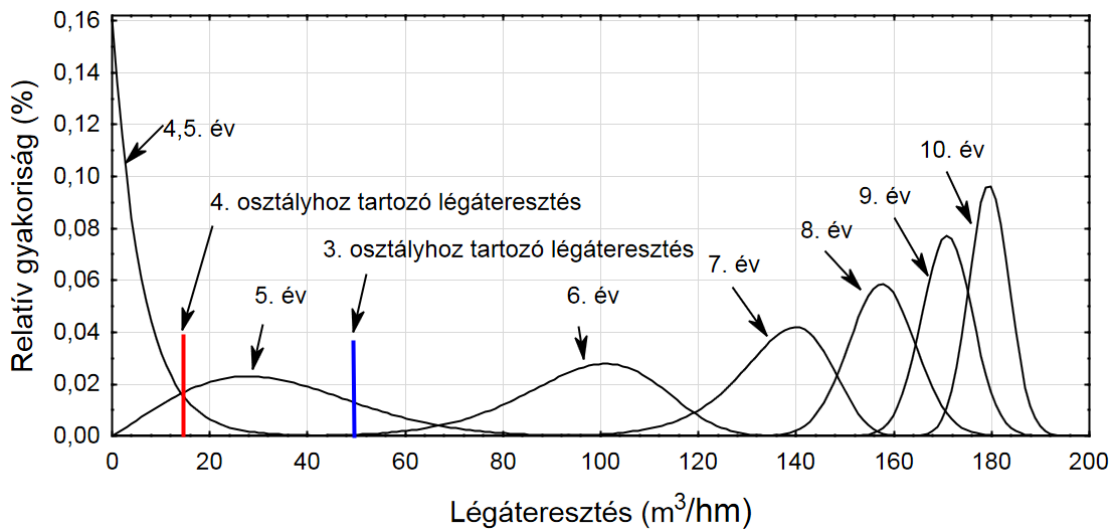
## **12.2. A számítógépes program működésének bemutatása a kiválasztott nyílászáró vizsgálati eredményeinek felhasználásával**

Az utóbbi fejezetekben bemutatott próbatest vizsgálati eredményeit felhasználva, a kifejlesztett programmal lehetségessé vált a kiválasztott próbatest légzárási teljesítőképességi jellemzőjének megbízhatósági vizsgálata.

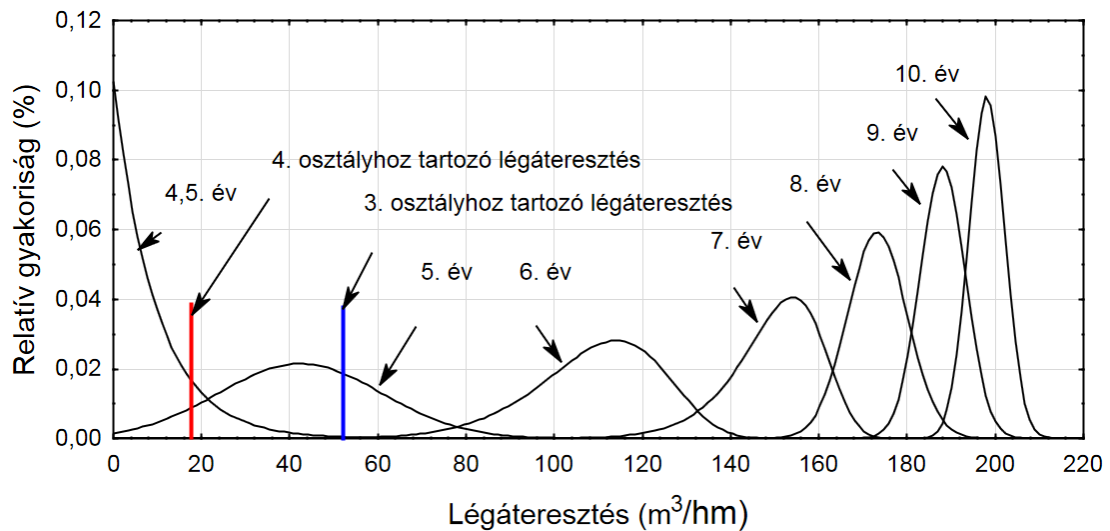
A program akár 100.000 iteráció lefuttatására is alkalmas, azonban a geometriai szűrés miatt megnövekedett számítási igény miatt, ez roppant idő-, és hardverigényes művelet. A program működésének, valamint a vizsgált termék légzárási teljesítmény becslésének bemutatásához 5000 iteráció számmal futtattam le a programot, mivel az előzetes vizsgálatok azt mutatták, hogy az iterációs szám növelésével nem volt kimutatható változás a szimulált eredmények statisztikai kiértékelése során. A különböző időpontokhoz tartozó szimulációs eredmények alapján a relatív gyakorisági hisztogramokat, és az azokra illesztett valószínűség-sűrűségfüggvényt a Statistica 11 programmal végeztem el. A relatív gyakoriság hisztogramokat lásd a mellékletben. A szimulációkat mind a négy igénybevételi szinten 0-10 éves időintervallumban futtattam le. A program 0-4 éves intervallumban zérus légáteresztési értéket becsült. Az eredményekre illesztett sűrűségfüggvényeket egy diagramban ábrázoltam (69-71. ábrák), amelyeken feltüntettem a vizsgált ablak teljes 5 m fugahosszához tartozó 4. valamint 3. légzárási osztályhoz tartozó küszöbértékeket is. Az elvégzett szimuláció eredményeit szembevetően befolyásolta az a nyílászáró nyitásából-zárásából származó igénybevétel. A növekvő használati időben ábrázolt relatív gyakorisági hisztogramok kezdetben exponenciális eloszlást, majd Weibull-és normális eloszlást mutattak. Az időben eltolódó sűrűségfüggvények egyre csúcsosabbá váltak, ami az adatok csökkenő szórását mutatják. A jelenség azzal magyarázható, hogy az SV-12 típusú tömítés körülbelül a 6. év végére teljesen relaxálódik (lásd. 59. ábra). Ennek az lesz az eredménye, hogy a szélnyomás hatására az ablak teljes záródási vonala mentén egységesen megindul a légáteresztés, és a tömítés kontaktusának változékonysága már nem növeli tovább a becsült értékek szórását. Légzárási megbízhatóság szempontjából a legtöbb információt az eloszlások 95%-os kvantiliséhez tartozó légáteresztési értékek időben történő ábrázolása adja.



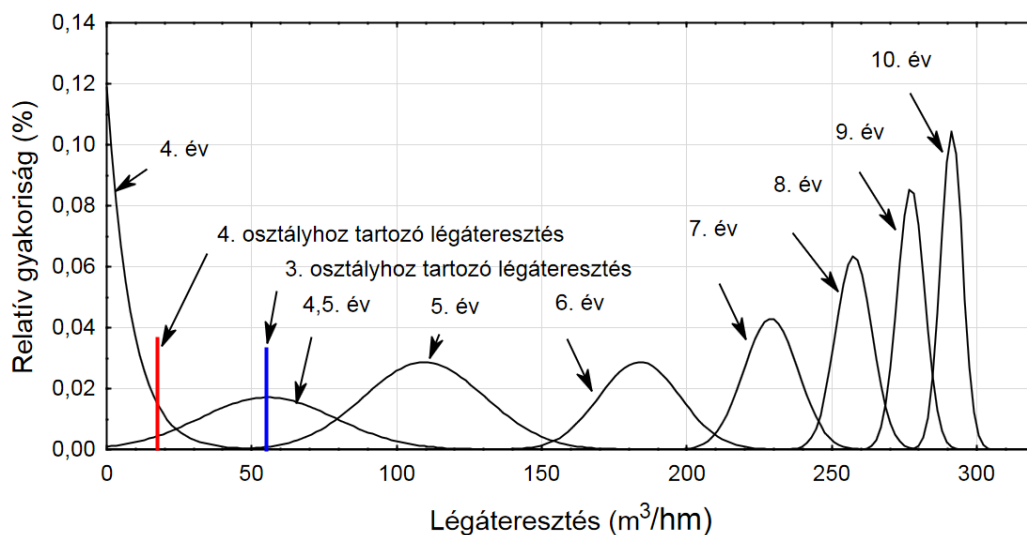
69. ábra A vizsgált nyílászáró 0 igénybevételi szintjéhez tartozó légzárési sűrűség-függvények



70. ábra A vizsgált nyílászáró 1 igénybevételi szintjéhez tartozó légzárési sűrűség-függvények



71. ábra A vizsgált nyílászáró 2 igénybevételi szintjéhez tartozó légzárési sűrűség-függvények



72. ábra A vizsgált nyílászáró 3 igénybevételi szintjéhez tartozó légzárési sűrűség-függvények

A 95%-os kvantilis kiszámításához az adott időpillanatban ismert eloszlásfüggvényeket kell az  $F(x)=0,95$  esetre megoldani.

A korai használati időpontban az exponenciális eloszlás esetében a következőképpen írható fel:

$$0,95 = 1 - \exp(-\lambda \cdot V) \quad (78)$$

ahol :

$\lambda$  - az eloszlás állandó paramétere

$V$  - légzárás ( $m^3/hm^2$ )

A Weibull-eloszlás esetén:

$$0,95 = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V}{\alpha}\right)^\gamma\right) \quad (79)$$

ahol:

- $\gamma$  - eloszlás alakparamétere
- $\alpha$  - eloszlás skálaparamétere
- $V$  - légáteresztés ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )

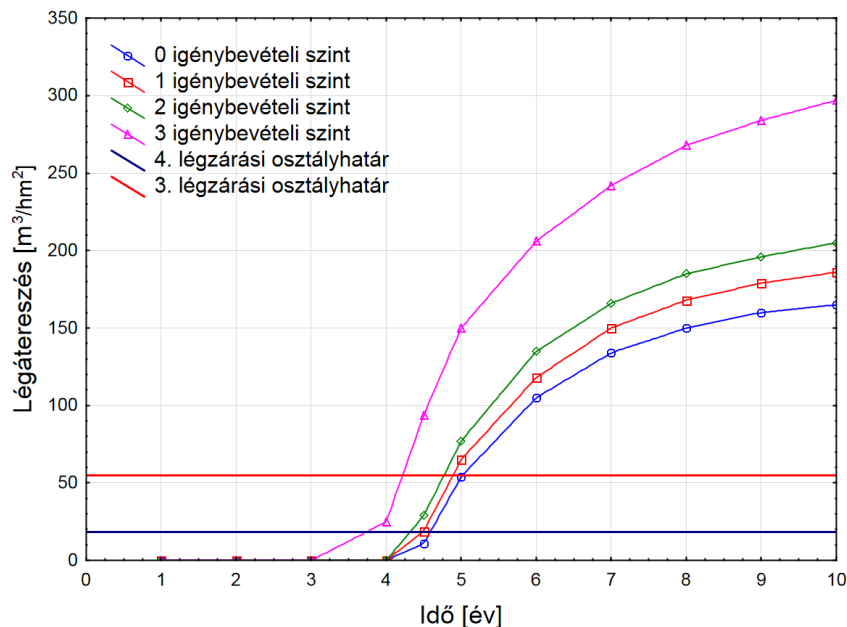
Normális eloszlás esetén:

$$0,95 = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \int \exp\left(-\frac{(V - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (80)$$

ahol:

- $\sigma$  - szórás
- $\mu$  - eloszlás várható értéke
- $V$  - légáteresztés ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )

Az idő függvényében ábrázoltam az adott használati időpontokban szimulációval előállított eloszlásokból számított 95%-os kvantilishez tartozó légáteresztési értékeket (73. ábra). Az ábrán feltüntettem még a 4. és a 3. légzárési osztályhoz tartozó maximálisan megengedett légzárési határértéket is.



73. ábra Légáteresztés az idő függvényében

A 73. ábra alapján megállapítható, hogy a vizsgált nyílászáró légzárési teljesítménye kicsivel 4,5 év használat után, koptató igénybevétel nélkül is 95%-os biztonsággal el

fogja érní a 4. osztályhoz tartozó küszöbértéket. Ugyanezen igénybevételi szinten a progresszív teljesítmény csökkenésből kifolyólag az ötödik évre eléri 3. osztályhatárt is. Megfigyelhető, hogy a nyitási-csukási igénybevétel növelése csekély mértékben befolyásolja a légzárási teljesítmény alakulását. A koptató igénybevétel csak a 3. igénybevételi szinten, azaz napi tízszeri nyitás-csukási ciklus okoz jelentős teljesítménycsökkenést, azonban ez az igénybevétel is, csak 8 hónappal rövidíti le a 4. osztályú légzárási teljesítmény biztosításához szükséges karbantartási beavatkozás időpontját. A légzárási görbék menetéből látható, hogy azok aszimptotikusan egy érték felé tartanak. Erre a jelenségre a következő magyarázat adható. Láthattuk, hogy idővel a kisebb megszakításokkal terhelt tömítésben az összes feszültség relaxálódik. Ez a feszültségcsökkenés hatással lesz a vasalat kapcsolóelemeinek súrlódási folyamataira is. A szorítóerő megszűnésével az elemek kopottsági állapota állandósul, így a 600 Pa nyomáskülönbség hatására a levegő egy állandó réskeresztmetszeten keresztül fog áramlani, ami konstans légzárási teljesítményt eredményez.

### 13. A KUTATÓMUNKA EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A napjainkban egyre nagyobb figyelmet kapnak az épületek energiahatékonyságának növelését célzó eszközfejlesztések. A megtermelt primer energiák felelős felhasználásának szabályozása, nem csak nemzetgazdaságilag kiemelt fontosságú feladat, hanem a környezetünk védelméhez, az erőforrásaink megtartásához is szorosan kapcsolódik. Az épületek nyílászárói, hőtechnikai szempontból az épületek gyenge pontjainak számítanak. Rajtuk keresztül komforttérből a megtermelt hőenergia mind transzmisszió, mind pedig filtráció útján is távozhat. A hőenergia áramlása az energiaveszteségek mellett kellemetlen komfortpanaszokat is eredményezhetnek. A transzmissziós hőáramlás intenzitása az anyagok hővezetési képességével, hőátadó képességével, valamint a hőmérséklet gradiensekkel arányos. A nyílászáró élettartama során az anyagra jellemző értékek jelentősen nem változnak, ezért adott hőmérsékleti viszonyok mellett a szerkezeteken keresztül kialakuló transzmissziós hőáram a használati élettartam során sem fog jelentősen változni. A zárt nyílászárók tömítetlen résein keresztül létrejövő szabályozatlan filtráció okozta hőáramlás a rések növekedésével egyre fokozódik. A nyitható nyílászárók a szerkezeti kialakításukból kifolyólag, folyamatosan ki vannak téve mind a környezeti, mind pedig a használatból adódó degradációs folyamatoknak. Mindezek hatására, a csatlakozási pontok tömítettségei fokozatosan csökkennek.

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

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

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



Légzárási teljesítőképesség megbízhatóságát a peremtömítés alkalmazása nem növeli, ezért alkalmazása légzárási szempontból nem indokolt.

Különböző kamrahőmérsékleteken ( $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $+23^{\circ}\text{C}$ ,  $+45^{\circ}\text{C}$ ) elvégzett légáteresztési vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy csak 600 Pa nyomáskülönbség mellett mutatható ki a környezeti hőmérséklet légzárási 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 végeeselemes szimulációs elemzés jó alternatívát jelenthet a jövőben.

A kutatómunkám legnagyobb eredményeként kidolgoztam két modellt, amelyekkel az épületek nyílászáróinak légzárási 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 hézagzárási 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 légzárási teljesítmény szimulációs elemzés eredményei alapján megállapítottam, hogy az épületek transzparens nyílászáróinak légzárási teljesítmény, a nyitási-csukási igénybevételelől függően aszimptotikusan egy maximális érték felé tart. A teljesítménycsökkenés sebességét kisebb mértékben a mozgó alkatrészek kopása, nagyobb mértékben pedig az elsődleges tömítőprofil reológiai tulajdonságai határozzák meg.

## 14. 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 légzárási 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 légzárási teljesítményének megbízhatósága.

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

Egyedileg kifejlesztett helyszíni légzárási mérésekre alkalmas mérőberendezéssel, valamint laboratóriumi mérőeszközzel, használt nyílászárókon elvégzett vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy 3-4 éves használat során a nyílászárók légzárási teljesítménye legalább egy osztályértékkel lecsökkent. A teljesítménycsökkenés hatására kialakuló filtrációs hőáram nagyobb torlónyomások esetén meghaladta transzmissziós hőáram mértékét.

3. A légzárási teljesítményt becsülő modelljének kidolgozása során bevezettem egy új jelzőszámot a **HÉZAGZÁRÁSI MUTATÓT**. A bevezetett mutató megadja,

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

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 távolságát is. A hézagzárási mutató a következő numerikus alakban írható le:

Ahol:

$\tau_{11}$  és  $\tau_{22}$  - a Burgers-anyagmodell időállandói

$T_1$  és  $T_2$  - a Burgers-anyagmodell időállandói

$t$  - használati idő

$\beta_1, \beta_2$  - 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 fásasztó 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.

**Köszönetnyilvánítás**

Dolgozatom befejezésekkor szeretnék mindazoknak köszönetet mondani, akik segítségükkel, támogatásukkal, szakmai javaslataikkal hozzájárultak a dolgozatom elkészítéséhez.

Köszönöm családomnak, hogy türelmükkel és folytonos biztatásukkal segítettek munkámat.

Külön szeretnék köszönetet mondani **Prof. Dr. Kovács Zsoltnak**, Professzoromnak, akitől az évek folyamán méretlenül sok értékes tudományos ismeretanyagot és szakmai segítséget kaptam. Hasznos tanácsai jelentősen hozzájárultak dolgozatom színvonalának növeléséhez.

Köszönet **Dr. Dénes Leventének**, aki mentoromként, témavezetőmként értékes szakmai észrevételeivel, és a kutatáshoz szükséges eszközök beszerzésével nagyban hozzájárult a dolgozatom elkészítéséhez.

Köszönettel tartozom kollégáimnak, **Szövérfi Tibornak, Utassy Viktornak, Vas Zsigmondnak**, akiknek önzetlen segítségére mindig számíthattam a kutatómunkám során.

Köszönet **Papp Imrének**, az ÉMI Nonprofit Kft. munkatársának, aki sokéves vizsgálómérnöki tapasztalatait osztotta meg velem, és a mérésekhez nyújtott önzetlen segítségéért.

Köszönet **Dr. Csanády Viktóriának** a statisztikai problémák megoldásában nyújtott segítségéért.

Köszönettel tartozom **Dr. Kalmár Jánosnak** a számítógépes szoftver elkészítésében nyújtott segítségéért.

Köszönet a **Nemzeti Kiválóság Programnak**, amely anyagi támogatásával segítette kutatómunkámat.

A kutatás a TÁMOP-4.2.4.A/2-11/1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## 15. IRODALOMJEGYZÉK

- ANDERSEN RV, TOFTUM J, ANDERSEN KK, OLESEN BW. 2007: Simulation of the effects of occupant behavior on indoor climate and energy consumption. In: Proceedings of Clima2007: 9th REHVA world congress: wellbeing indoors, Helsinki, Finland; 2007.
- BAKER N, STANDEVEN M. 1996: Thermal comfort in free running buildings. *Energ Build* 1996;23:175e82.
- BALOGH A., DUKÁTI F., SALLAY L. 1987: Minőségellenőrzés és megbízhatóság. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987.
- BANGALEE M.Z.I., LIN S.Y., MIAU J, 2012:, Wind driven natural ventilation through multiple windows of a building, *Energy and Buildings* 45 (2012) 317–325
- BÁNHIDI L., GARBAI L. BARTAL I. 2008: A humánkomfort komplex mutatói, az emberi test statikus és dinamikus hőmérlege. *Magyar Épületgépészet*, LVII. évfolyam, 10. szám
- BÁNHIDI L., KAJTÁR L. 2000: Komfortelmélet. Műegyetemi Kiadó, Budapest
- BARENDSA D.M., OLDENHOFA M.T., VREDENBREGTA M.J, NAUTA M.J. 2012: Risk analysis of analytical validations by probabilistic modification of FMEA *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis* Volumes 64–65, May–June 2012, Pages 82–86
- BECKER R. 1979: Window Air Tightness and its Influence on Energy Saving and Minimum Required Ventilation\* *Building and Environment*, Vol. 14, pp. 157-165 Pergamon Press Ltd. 1979. Printed in Great Britain
- BÉKÉSI B. 2007: a megbízhatóság leggyakrabban használt mérőszámai. *Repüléstudományi közlemények. Különszám 2007 április.*
- BENEDIKT SZ., KUN I., SZÁSZ G. 2007: SSI modellel analóg kockázatelemzés, *INFORMATIKA*, IX. évf. 2. szám. 2007. május, pp. 33-36.
- BODIG, J.; JAYNE; A. B. 1982; *Mechanics of Wood and Wood Composites*. Van Nostrand Reinhold Publishing, New York, N.Y.
- BODOR G., VAS L. M. 2000: *Polimer anyagszerkezettan*, Műegyetemi Kiadó, Budapest
- BRANCO G, LACHAL B, GALLINELLI P, WEBER W. 2004: Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data. *Energ Build* 2004;36:543e55
- DEBRECZY Z. 2010: *Passzívházak tervezésének alapjai*. Kiadó: Passzívház Akadémia Kft. Budapest. 49-56. old
- EICHLER C. 1982: *A karbantartás tervezése*. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1982

- ELEK L. 2011. Ablakszerkezetek hőátbocsátási tényezőjének meghatározása hőhídhatások figyelem-bevételével LIX - Faipar 2011/1. Kiadó: NYME-FMK Sopron.
- ELEK L., KOVÁCS ZS., DÉNES L. 2010: Wood windows in the 21st Century: end user requirements, limits and opportunities; The future of quality control for wood & wood products, The final conference of COST Action E53: 'Quality control for wood & wood products', Edinburgh.
- EMERY AF, KIPPENHAN CJ. 2006: A long term of residential home heating consumption and the effect of occupant behavior on homes in the Pacific Northwest constructed according to improved thermal standards. Energy 2006;31:677e93.
- FABI V., RUNE VINTHER ANDERSEN R. V., CORGNATI S., BJARNE S. C., OLESEN W. 2012: Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models Original Research Article Building and Environment, Volume 58, December 2012, Pages 188-198
- FEKETE I. 1985: Épületfizika kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest. ISBN 963 10 6428 X
- GAÁL Z.; KOVÁCS Z., 1994: Megbízhatóság Karbantartás Veszprémi Egyetem, Kiadói Iroda 1994
- GNYEGYENKO, BELJAJEV, SOLOVJEV 1970: A megbízhatóság-elmélet matematikai módsze-rei. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1970
- GREGÁSZ T. 2009: Nemfémes szerkezeti anyagok élettartam-problémáinak minőségügyi megköze-lítése Ph.D értekezés. Sopron
- HALDI F, ROBINSON D 2009: Interactions with window openings by office occupants. Build Environ 2009;44:2378e95.
- HESSINGER J. 2010. User comfort through sound insulation and adequate air quality. International Rosenheim Window & Facade Conference 2010. Rosenheim 7.-8 October 2010, Németország.
- HUANG W, ASKIN RG., 2003: Reliability analysis of electronic devices with multiple competing failure modes involving performance aging degradation. Quality and Reliability Engineering Inter-national 2003;19:241-54.
- INKAROJRIT V, PALIAGA G. 2004: Indoor climatic influences on the operation of windows in a naturally ventilated building. In: Proceedings of Plea2004 e The 21th Conference on passive and low energy architecture; 2004.
- JEONG J-W, FIRRANTELO J, BAHNFLETH WP, FREIHAUT JD, MUSSER A., 2008: Case studies of building envelope leakage measurement using an air-handler fan pressurization approach. Build Serv Eng Res Technol, Vol. 29(2) pp. 137-155.
- KAJTÁR L., ERDŐSI I., BAKÓ-BÍRÓ ZS. 2000: Thermal and air quality comfort of office buildings based on new principles of dimensioning in Hungary. Periodica Polytechnika Ser. Mech. Eng. Vol. 44, No.2, pp.265-274

- KANAGASABAI 1989: Safety margins correlations in system reliability. *Computers & Structures* Volume 31, Issue 5, 1989, Pages 747–750
- KEEDY E., FENG O. 2012: A physics-of-failure based reliability and maintenance modeling framework for stent deployment and operation *Reliability Engineering and System Safety* 103(2012)94–101
- KEMÉNY, S., DEÁK, A., 2000: Kísérletek tervezése és értékelése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 492 old.
- KLEMS J.H., 1993: Methods of Estimating Air Infiltration through Windows 1983 *Energy and Buildings* Volume 5, Issue 4, September 1983, Pages 243–252
- KÓSZÓ J. 1995: Ablak a házban. Dunakanyar 2000 Kiadó, Budapest
- KOVÁCS ZS. 1989. Ablakok és ajtók műszaki jellemzőkre való tervezése. Oktatási segédlet, Sopron. 12-14. old.
- KOVÁCS ZS. 1989: Ablakok és ajtók műszaki jellemzőkre való tervezése. Sopron
- KOVÁCS ZS. 2000: Épületfizikai alapfogalmak és követelmények. In: Mérnöki faszervezetek I. Szerk.:Dr. Wittmann Gyula, Mezőgazdasági szaktudás Kiadó, Budapest. Pp.160-197.
- KOVÁCS ZS. 2003: A nyílászárók épületfizikai és szilárdsági jellemzőiről. *Magyar Építéstechnika, Az Építési Vállalkozók Országos Szövetségének lapja* 2003/11-12
- KÖNIGSTEIN T., :2006: Az energiatakarékos építkezés kézikönyve. Z-Press Kiadó Kft, Miskolc.
- KÖVESI J., ERDEI J.:2004: Kockázat és megbízhatóság termékmegbízhatóság oktatási segédanyag Budapest,
- KVISTGAARD B, COLLET PF. 1990: The user's influence on air change, air change rate and air tightness in buildings. ASTM. STP 1067. In: Sherman MH, editor. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 1990. p. 67e76.
- MAGYAR T. 2008: Laboratóriumi kísérletek a huzathatás mérésének továbbfejlesztésére. *Magyar Épületgépészet*, LVII. Évfolyam 5. szám
- MAGYAR Z., AMBRUS CS. 2011: Sugárzási hőmérséklet aszimmetria vizsgálata termikus műem-berrel. *Magyar Épületgépészet*, LX. évfolyam 6. szám
- MARKARIAN, J.2008: Thermoplastic elastomer compounds continue upward trend *Plastics Additives & Compounding*, 10. k. 9/10. sz.
- MISTÉTH E. 2001: Méretezéselmélet Akadémiai Kiadó, 2001 Budapest ISBN: 963057778X
- MOLNÁR S. 1999; Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest. 241. old.
- NICOL JF, HUMPHREYS M. 2004: A stochastic approach to thermal comfort-occupant behavior and energy use in buildings. *ASHRAE Trans* 2004;110(2):554e68.



- ORME M, 2001: Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures, *Energy and Buildings* 33 (2001) 199–205.
- PETÁK, GY. 1981: A repülőtechnika üzemeltetése és javítása. Főiskolai jegyzet. KGYRMF, Szolnok, 1981.
- POKORÁDI L. 2002: Karbantartás elmélet. Elektronikus tansegédlet, Debrecen 2002
- POKORÁDI L., MOLNÁR M: 2010: Monte-carlo szimulációs valószínűségi bizonytalanságelemzés szemléltetése *Repüléstudományi Közlemények* 2010. április 16.
- POKORÁDI, L. 2002: Haditechnikai eszközök üzemeltetési megbízhatósága. Új honvédségi szemle, 2002/5. (146-153) o.
- POROSZLAY I. 2007; A szellőztetés nélkülözhetetlen I. Magyar Építéstechnika Az Építési Vállalkozók Országos Szövetségének lapja 2007/10. 28-29. old.
- PROVAN T.F., YOUNGER J.D., 1986: Air Infiltration characteristics of Windows . *Energy and Buildings* Volume 9, Issue 4, December 1986, Pages 281–292
- REIS F., VÁRFALVI J., ZÖLD A. 2007: Az épületfizika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest.
- RIDLEY I., FOX J., ORESZCZYN T. HONG H. S. 2006: The Impact of Replacement Windows on Air Infiltration and Indoor Air Quality in Dwellings, *International Journal of Ventilation* Vol. 1 (3) pp. 209-218
- RIJAL H.B., TUOHY P., HUMPHREYS M.A., NICOL J.F., SAMUEL A., CLARKE J., 2007: Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy and buildings*,
- SEUNG J. 2003: Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability *Advanced Engineering Informatics* Volume 17, Issues 3–4, July–October 2003, Pages 179–188
- SFAKIANAKI A, PAVLOU K, SANTAMOURIES M, LIVADA I, ASSIMAKOPOULOS M-N, MANTAS P, et al. 2008: Air tightness measurement of residential houses in Athens, Greece. *Build Environment*; Vol. 43, pp. 398-405.
- SHERMAN M, 1998: “The use of Blower Door Data Lawrence Berkley Lab Report 35173. LLBL USA
- SIEBERATH, U. 2010; Green Windows – more than just energy-efficient? *International Rosenheim Window & Facade Conference 2010*. Rosenheim 7.-8 October 2010, Németország
- SPECHT, K. 2010; Where is energy optimisation heading? New designs, materials, provision in prEN 10077 and dispensations regarding documentary evidence. *International Rosenheim Window & Facade Conference 2010*. Rosenheim 7.-8 October 2010, Németország.
- STAVRAKAKIS G.M., ZERVAS P.L., SARIMVEIS H., MARKATOS N.C. 2011: Optimization of window-openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings. *Applied Mathematical Modelling*,

- SUNDARARAJAN C., WITT F. J., 1995: Stress-Strength Interference Method. Probabilistic Structural Mechanics Handbook 1995, pp 8-26
- SZABÓ GY. 1982: Ablakszerkezetek energetikai méretezése. Építésügyi Tájékoztatási Központ, Budapest.
- SZÁNTHÓ Z., CHAPPON M., ELEKES L. 2007; Légtömör épület önmagában még nem elég. Hírhullám – Épületgépészeti szaklap 8(4):20–24.
- SZÁSZ G. 2010: Application of Taguchi quality assurance method in case of mechanical structures, on the basis of SSI model, INFORMATIKA, vol. XII. No. 2. July 2010 pp. 20-21
- SZÉLL M. 2001: Transzparens épületszerkezetek. Szerényi és Gázsó Bt., Pécs.
- SZÉLL M., 2011: Épületek Rekonstrukciós Tervezése - Transzparens homlokzati szerkezetek diagnosztikája és energia-hatékony, fenntartható felújítása BMEEOMEMAT3
- URBIKAIN M.K., SALA J.M 2009: , Analysis of different models to estimate energy savings related to windows in residential buildings, Energy and Buildings 41 (2009) 687–695
- VÁRFALVI J. 2006: Kellemes hőérzet és energiamegtakarítás korszerű üvegszerkezetekkel Magyar Épületgépészet, LV. évfolyam, 2. szám
- VOSE, D., 2006: Risk analysis. John Wiley&Sons Ltd. : New York 418. p.
- WALLACE LA, EMMERICH SJ, HOWARD-REED C. 2002: Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans, and windows. J Expo Anal Environ Epidemiol 2002;12:296e306.
- WANG B.,TAKIGAWA T.,YAMASAKI Y.,SAKANO N., WANG D. H., OGINO K.2008: Symptom definitions for SBS (sick building syndrome) in residential dwellings. International Journal of Hygiene and Environmental Health 211 (1-2), pp. 114-120
- ZONGWEN AN, HUANG H., WANG Z., ZHANG X., WANG G.. 2010: Discrete StressStrength Interference Model of Reliability Analysis Under Multioperating Conditions CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING•1• Vol. 23,aNo. 3,a2010
- ZÖLD A. 1999: Energiatudatos építészet. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- ZVIKLI S. 2006: Üzemeltetés elmélete I. Elektronikus jegyzet Széchenyi István Egyetem Műszaki Tudományi Kar Győr, 2006

### **Hivatkozott szabványok**

- MSZ CR 1752:2000; Épületek szellőztetése. Épületek belső környezetének tervezési alapjai
- MSZ EN 1026:2001; Ablakok és ajtók. Légzáróság. Vizsgálati módszer.
- MSZ EN 12207:2001; Ajtók és ablakok. Légtárolás. Osztályba sorolás.

- MSZ EN 14351:1-2006+A1:2010, Ablakok és ajtók. Termékszabvány, teljesítőképességi jellemzők
- ME 30-65 Épületek és épületszerkezetek hőtechnikai méretezése
- MSZ-04-140/2:1979 Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai. Hőtechnikai méretezés.
- EN ISO 10077-1:2007 Ajtók, ablakok és társított szerkezetek hőtechnikai viselkedése. A hőátbocsátási tényező számítása. 1. rész: Általános előírások
- MSZ EN 1991-1-4:2007 Eurocode 1:A tartószerkezeteket érő hatások.
- MSZ EN 13829:200; Épületek hőtechnikai viselkedése.
- ISO 9972:1996; Épületek légáteresztő képességének meghatározása. Túlnyomásos eljárás
- MSZ IEC (191): 1992 Nemzetközi elektrotechnikai szótár. 191. kötet: Megbízhatóság és a szolgáltatás minősége

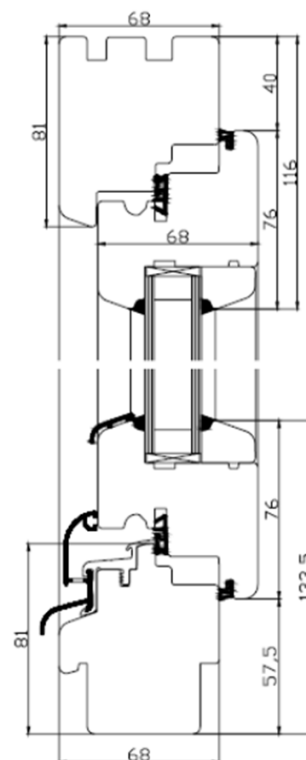
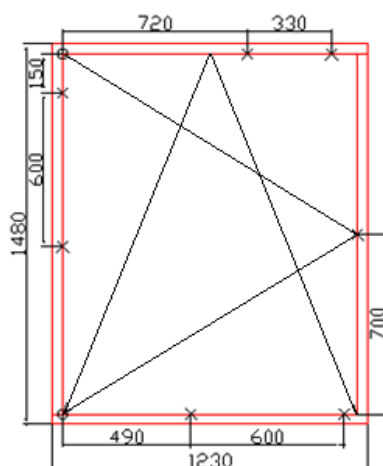
### **Elektronikus jegyzetek**

- BME Gépészmérnöki Kar Polimertechnikai Tanszék. Kúszás- Polimerek időfüggő mechanikai tulajdonságai. [http://www.pt.bme.hu/segedletek/b5\\_kuszas\\_v5.pdf](http://www.pt.bme.hu/segedletek/b5_kuszas_v5.pdf) (letöltés: 2013. május 3.)

## **16. MELLÉKLETEK**

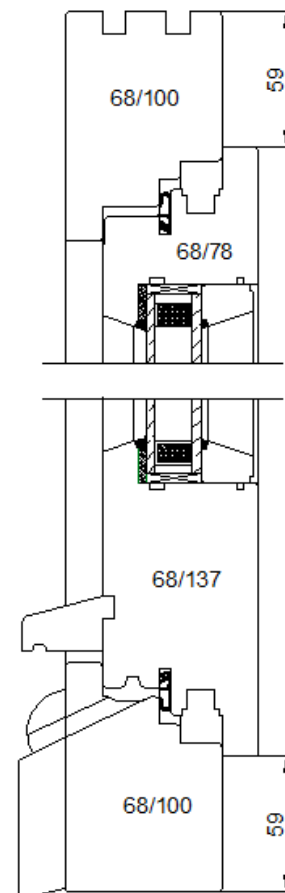
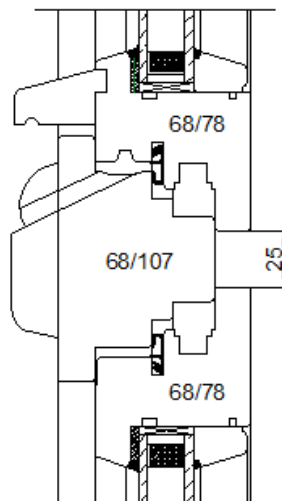
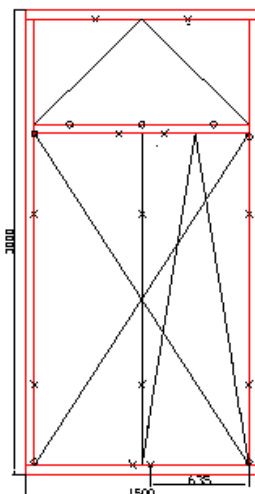
**I. Melléklet. A vizsgálatba bevont nyílászárók műszaki adatlapjai****Próbatest száma: 1., 8., próbatest**

Ablak típusa		Korszerű hőszigetelt üvegezésű ablak
Nyitási módok		egyszárnyú, balos nyíló és buktatható
Alapanyaga		sötétvörös meranti fűrészáru, melyből az alkatrészek hibakiejtéssel, hosszoldással készülnek
Tok méretei	szélesség	1230 mm
	magasság	1480 mm
Szárny méretei	szélesség	1150 mm
	magasság	1380 mm
Tömb mérete		68 x 81 mm (tok); 68 x 76 mm (szárny)
Felületkezelés színe és típusa		barna színű, Remmers típusú
Vasalat típusa		hét ponton záródó ROTO NT E5 20
Tömítés típusa		Deventer SV 12
Tömítés hossza	közép	4914 mm
	perem	5060 mm
Tömítés illesztése a sarkokon		45°-ban elcsípve
Beépített üvegvastagság		4-16Ar-4
Üveg Ug értéke		1,1 W/m <sup>2</sup> K



**I. Melléklet. A vizsgálatba bevont nyílászárók műszaki adatlapjai****Próbatest száma: 2. próbatest**

Ablak típusa		Korszerű hőszigetelt üvegezésű ablak
Nyitási módok		Háromszárnyú, közepén felnyíló (jobbos bukó-nyíló), felső buktatható
Alapanyaga		vörösfenyő
Tok méretei	szélesség	1500 mm
	magasság	3000 mm
Szárnny méretei	szélesség	1380; 705;705 mm
	magasság	725; 2125 mm
Tömb mérete		68 x 78 mm (szárny; szárny alsó vízszintes: 68 x 137 mm); 68 x 100 mm (tok)
Felületkezelés színe és típusa		festett, fehér
Vasalat típusa		Siegenia Titan ip
Tömítés típusa		Deventer SV 12
Tömítés hossza	közép	13100 mm
	perem	-
Tömítés illesztése a sarkokon		45°-ban hegesztett
Beépített üvegvastagság		4-16Ar-4
Üveg Ug értéke		1,1 W/m <sup>2</sup> K



**I. Melléklet. A vizsgálatba bevont nyílászárók műszaki adatlapjai****Próbatest száma: 3., 10., próbatest**

Ablak típusa	Korszerű hőszigetelt üvegezésű ablak
Nyitási módok	Háromszárnyú, középen felnyíló (jobbos bukó-nyíló), felső buktatható

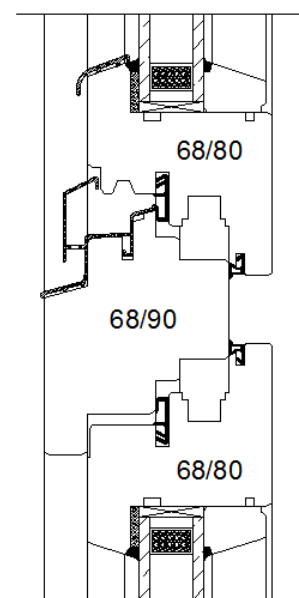
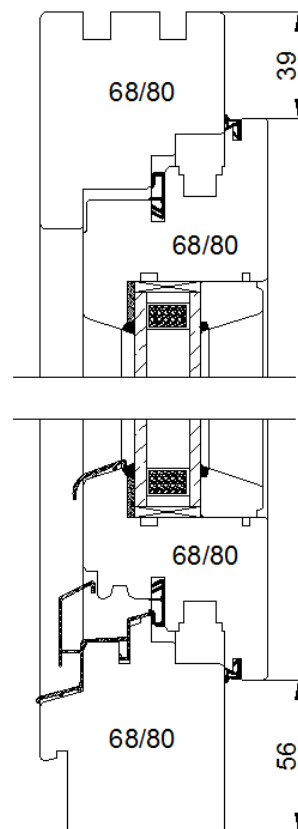
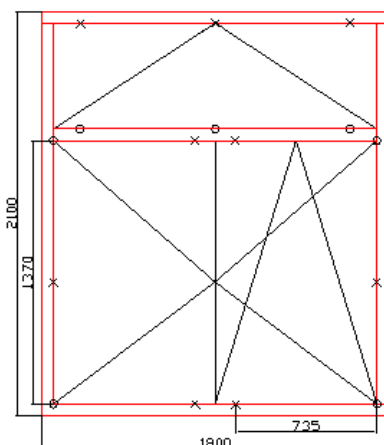
Alapanyaga	borovi fenyő	
Tok méretei	szélesség	1780 mm
	magasság	2080 mm
Szárny méretei	szélesség	1700; 863; 832 mm
	magasság	550; 1370; 1370 mm
Tömb mérete	68 x 80 mm	

Felületkezelés színe és típusa	foltos lazúrfestés, Adler
--------------------------------	---------------------------

Vasalat típusa	Siegenia vasalatrendszer
----------------	--------------------------

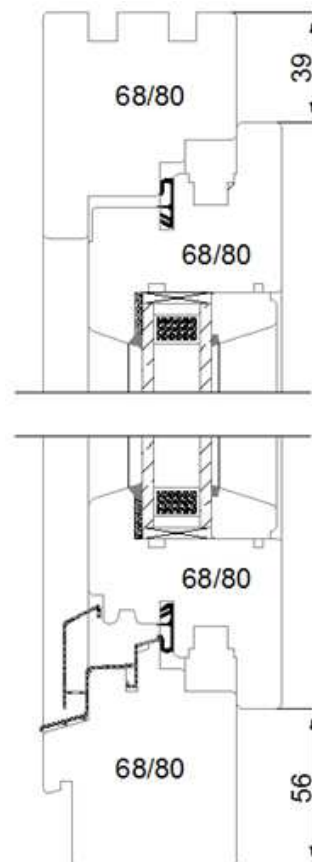
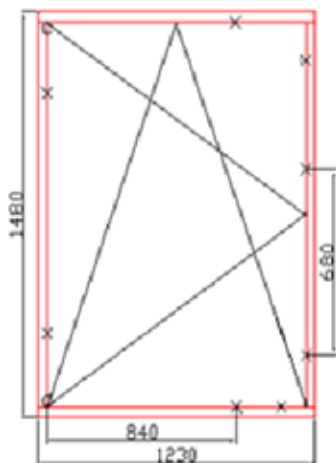
Tömítés típusa	Dipro CS 125	
Tömítés hossza	közép	11640 mm
	perem	12000 mm
Tömítés illesztése a sarkokon	45°-ban elcsípve	

Beépített üvegvastagság	4-16Ar-4
Üveg Ug értéke	1,1 W/m <sup>2</sup> K



**I. Melléklet. A vizsgálatba bevont nyílászárók műszaki adatlapjai****Próbatest száma: 4. próbatest**

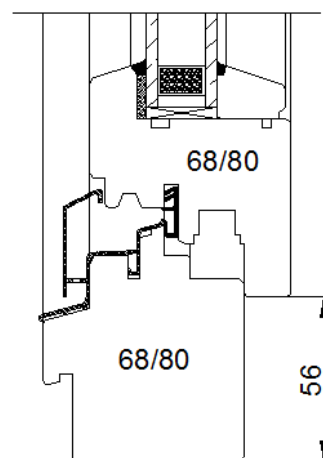
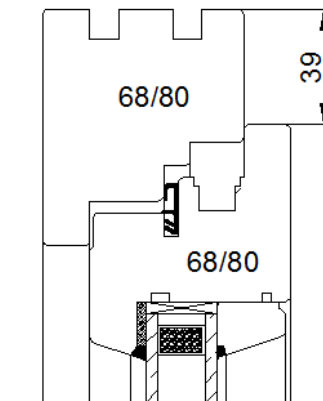
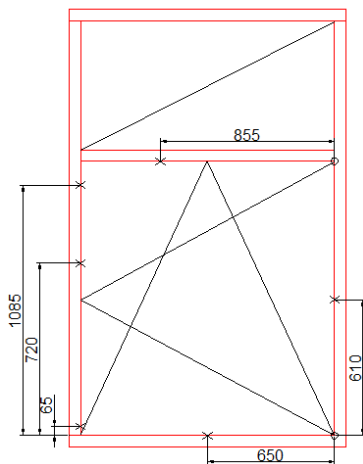
Ablak típusa		Korszerű hőszigetelt üvegezésű ablak
Nyitási módok		egyszárnyú, balos nyíló és buktatható
Alapanyaga		lucfenyő
Tok méretei	szélesség	1230 mm
	magasság	1480 mm
Szárny méretei	szélesség	1150 mm
	magasság	1380 mm
Tömb mérete		68 x 80 mm
Felületkezelés színe és típusa		festett, fehér
Vasalat típusa		nyolc ponton záródó Winkhaus vasalatrendszer
Tömítés típusa		Deventer SP 125, S6600c, SP 103
Tömítés hossza	közép	4930 mm
	perem	-
Tömítés illesztése a sarkokon		45°-ban elcsípve
Beépített üvegvastagság		4-16Ar-4
Üveg Ug értéke		1,1 W/m <sup>2</sup> K





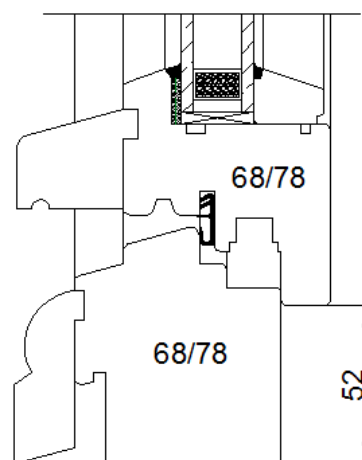
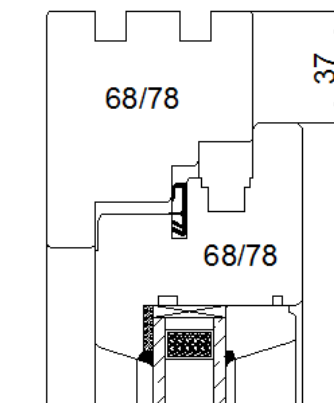
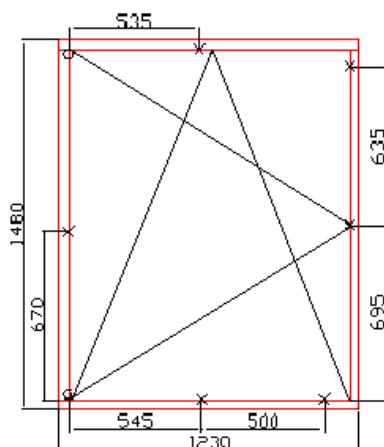
**I. Melléklet. A vizsgálatba bevont nyílászárók műszaki adatlapjai****Próbatest száma: 5., 6., 7. próbatest**

Ablak típusa		Korszerű hőszigetelt üvegezésű ablak
Nyitási módok		egyszárnyú, jobbos nyíló és buktatható
Alapanyaga		lucfenyő
Tok méretei	szélesség	1200 mm
	magasság	1900 mm
Szárny méretei	szélesség	1126 mm
	magasság	1295 mm
Tömb mérete		68 x 78 mm
Felületkezelés színe és típusa		kültéri lazúrfestés
Vasalat típusa		hat ponton záródó ROTO Centro vasalatrendszer
Tömítés típusa		Deventer SV 12
Tömítés hossza	közép	4770 mm
	perem	-
Tömítés illesztése a sarkokon		45°-ban elcsípve
Beépített üvegvastagság		4-16-4
Üveg Ug értéke		1,4 W/m <sup>2</sup> K



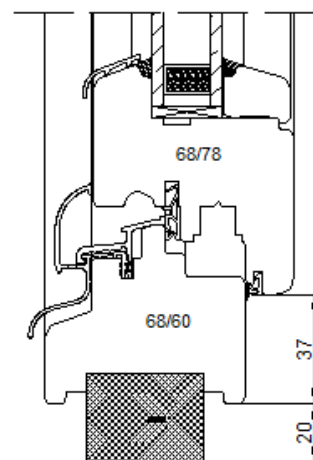
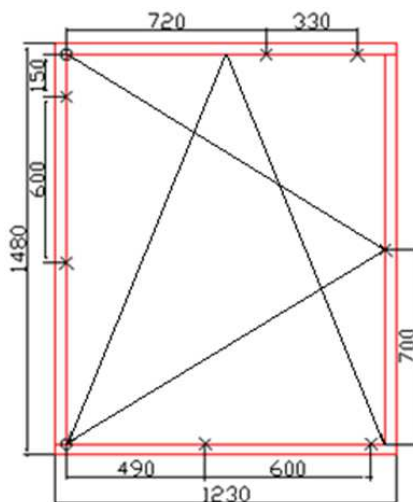
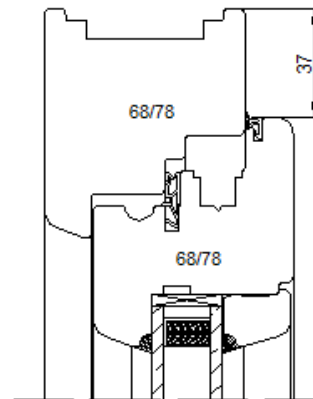
**I. Melléklet. A vizsgálatba bevont nyílászárók műszaki adatlapjai****Próbatest száma: 9. próbatest**

Ablak típusa		Korszerű hőszigetelt üvegezésű ablak
Nyitási módok		egyszárnyú, balos nyíló és buktatható
Alapanyaga		lucfenyő
Tok méretei	szélesség	1230 mm
	magasság	1480 mm
Szárny méretei	szélesség	1150 mm
	magasság	1380 mm
Tömb mérete		68 x 78 mm
Felületkezelés színe és típusa		festett, fehér
Vasalat típusa		hat ponton záródó Gretsch-Uniter (GU) biztonsági vasalat
Tömítés típusa		GU ACF 5558
Tömítés hossza	közép	4894 mm
	perem	5060 mm
Tömítés illesztése a sarkokon		45°-ban elcsípve
Beépített üvegvastagság		4-16Ar-4
Üveg Ug értéke		1,1 W/m <sup>2</sup> K



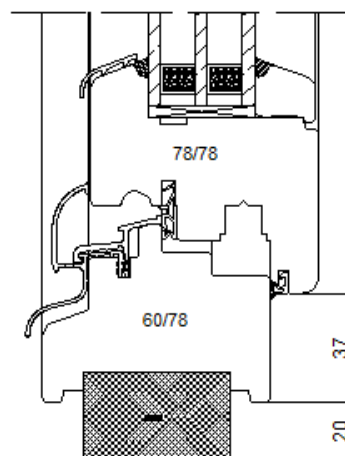
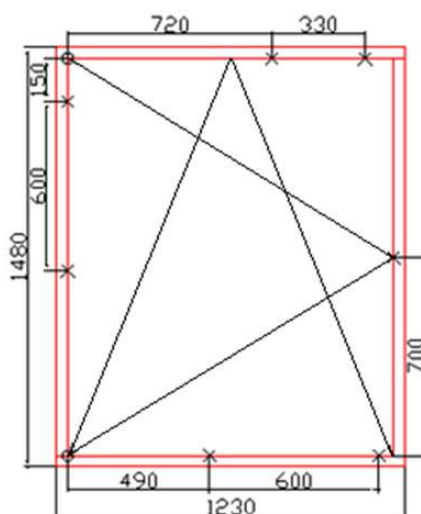
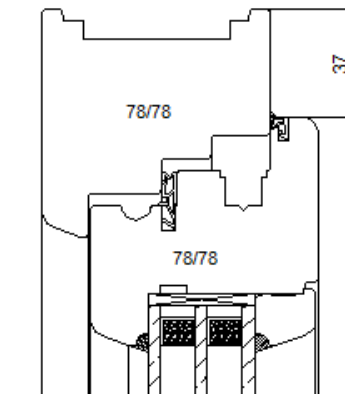
**I. Melléklet. A vizsgálatba bevont nyílászárók műszaki adatlapjai****Próbatest száma: 11. próbatest**

Ablak típusa		Korszerű hőszigetelt üvegezésű ablak
Nyitási módok		egyszárnyú, balos nyíló és buktatható
Alapanyaga		borovi fenyő
Tok méretei	szélesség	1230 mm
	magasság	1480 mm
Szárny méretei	szélesség	1150 mm
	magasság	1380 mm
Tömb mérete		68 x 78 mm
Felületkezelés színe és típusa		nincs felületkezelve
Vasalat típusa		hat ponton záródó Siegenia vasalatrendszer
Tömítés típusa		Deventer SV 12
Tömítés hossza	közép	4914 mm
	perem	5060 mm
Tömítés illesztése a sarkokon		45°-ban elcsípve
Beépített üvegvastagság		4-16Ar-4
Üveg Ug értéke		1,1 W/m <sup>2</sup> K



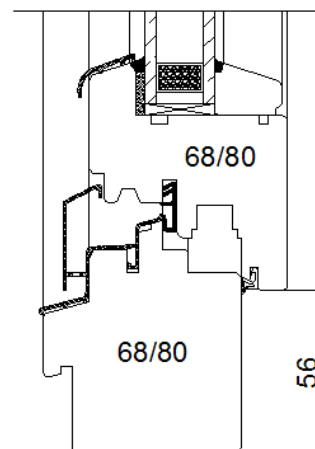
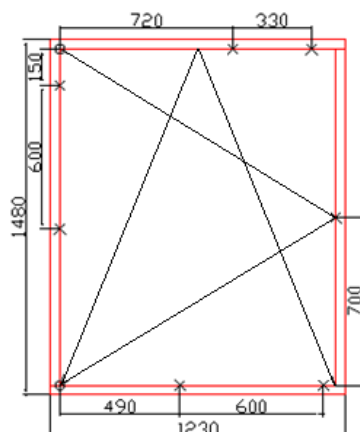
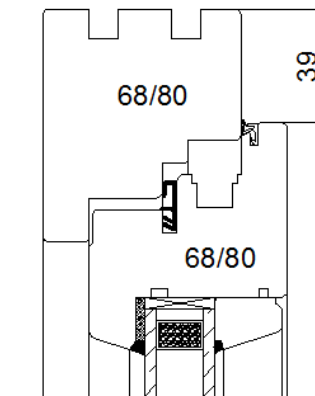
**I. Melléklet. A vizsgálatba bevont nyílászárók műszaki adatlapjai****Próbatest száma: 12. próbatest**

Ablak típusa		Korszerű hőszigetelt üvegezésű ablak
Nyitási módok		egyszárnyú, balos nyíló és buktatható
Alapanyaga		borovi fenyő
Tok méretei	szélesség	1230 mm
	magasság	1480 mm
Szárny méretei	szélesség	1150 mm
	magasság	1380 mm
Tömb mérete		78 x 78 mm
Felületkezelés színe és típusa		nincs felületkezelve
Vasalat típusa		hat ponton záródó Siegenia vasalatrendszer
Tömítés típusa		Deventer SV 12
Tömítés hossza	közép	4914 mm
	perem	5060 mm
Tömítés illesztése a sarkokon		45°-ban elcsípve
Beépített üvegvastagság		4-16Ar-4
Üveg Ug értéke		1,1 W/m <sup>2</sup> K



**I. Melléklet. A vizsgálatba bevont nyílászárók műszaki adatlapjai****Próbatest száma: 13. próbatest**

Ablak típusa		Korszerű hőszigetelt üvegezésű ablak
Nyitási módok		egyszárnyú, balos nyíló és buktatható
Alapanyaga		borovi fenyő
Tok méretei	szélesség	1218 mm
	magasság	1405 mm
Szárny méretei	szélesség	1145 mm
	magasság	1378 mm
Tömb mérete		68 x 78 mm
Felületkezelés színe és típusa		kültéri lazúrfesték
Vasalat típusa		hét ponton záródó ROTO NT E5
Tömítés típusa		Deventer SV 12
Tömítés hossza	közép	4896 mm
	perem	5046 mm
Tömítés illesztése a sarkokon		45°-ban elcsípve
Beépített üvegvastagság		4-16Ar-4
Üveg Ug értéke		1,1 W/m <sup>2</sup> K



**II. Melléklet. Az FMEA elemzés osztályozó értékei**

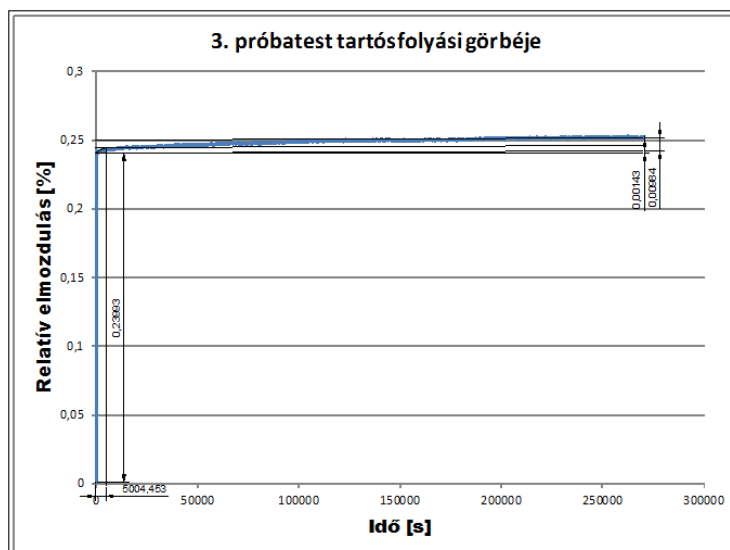
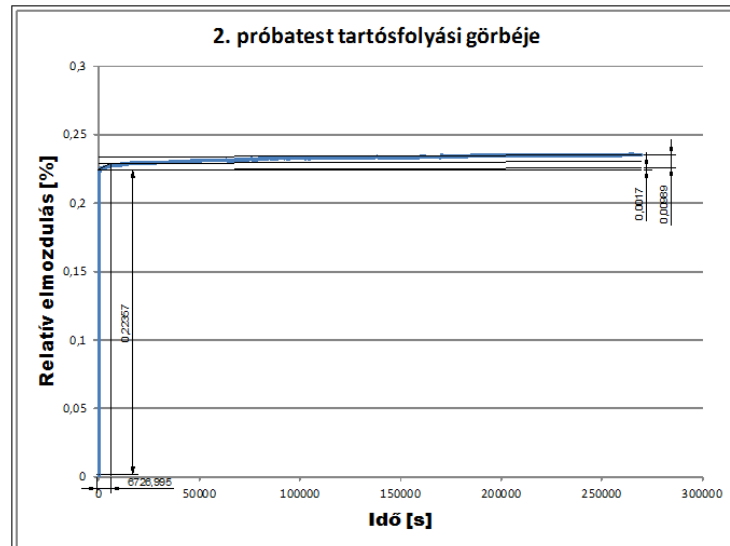
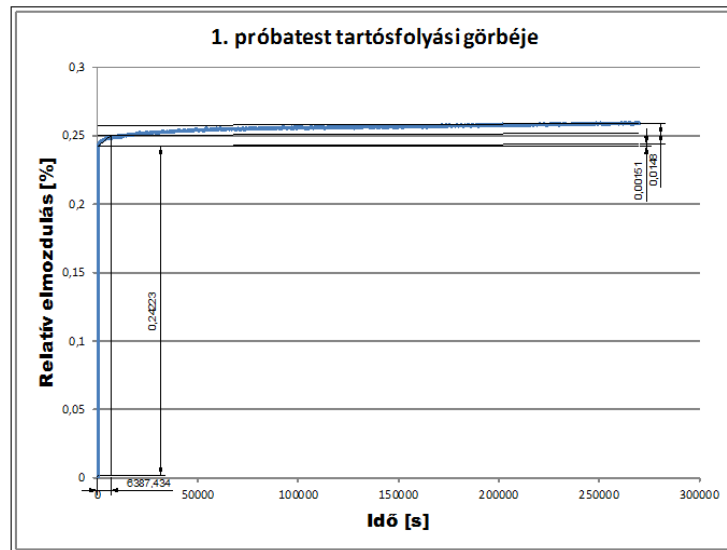
<b>JELENTŐSÉG</b>	
<b>1</b>	A vevő nem észleli a légáteresztés kedvezőtlen hatását vagy, hogy szignifikáns lenne. (A vevő valószínűleg nem érzékeli a légzárási teljesítmény változását)
<b>2 Csekély</b>	A vevő valószínűleg érez egy kis bosszúságot a szélteher hatásakor bekövetkező légáteresztés miatt. (Csak kevés vevő érzékel némi teljesítményváltozást)
<b>3 Alacsony</b>	A vevő bosszankodik a kis teljesítményromlás miatt. (Az átlagos vevő érzékeli a légzárási teljesítményváltozást)
<b>4</b>	Vevői elégedetlenség a lecsökkent teljesítmény miatt. (Minden vevő érzékeli)
<b>5</b>	Vevőt kellemetlenül érinti. (A vevőt kismértékben zavarja)
<b>6</b>	Szavatossági javítás szükséges. (A vevőt zavarja a lecsökkent légzárási teljesítmény)
<b>7</b>	Nagymértékű elégedetlenség a komponens meghibásodása miatt
<b>8 Súlyos</b>	Igen nagyfokú elégedetlenség a légzárási funkció elvesztése miatt, de a biztonságra gyakorolt negatív hatás, vagy a kormányrendelet/előírások megsértése nélkül
<b>9 Túl súlyos</b>	Igen nagyfokú elégedetlenség a légzárási funkció elvesztése miatt
<b>10</b>	Igen nagyfokú elégedetlenség a légzárási funkció elvesztése miatt, a teljesítménycsökkenés a kormányrendelet/előírások megsértését vonja maga után, és a hiba veszélyezteti a vevő testi épségét

<b>ELŐFORDULÁS VALÓSZÍNŰSÉGE</b>	
<b>Osztályozás</b>	<b>HIBAARÁNY</b>
<b>1 Elhanyagolható</b>	1/1500000
<b>2 Nagyon alacsony</b>	1/150000 (csak egyedi hibák fordulnak elő)
<b>3 Alacsony</b>	1/15000
<b>4 Közepes</b>	1/2000 (eseti meghibásodások)
<b>5 Közepes</b>	1/400
<b>6 Közepes</b>	1/80
<b>7 Magas</b>	1/20
<b>8 Magas</b>	1/8
<b>9 Nagyon magas</b>	1/3 (a meghibásodás szinte biztos a szavatossági időn belül)
<b>10 Nagyon magas</b>	1/2

**II. Melléklet. Az FMEA elemzés osztályozó értékei**

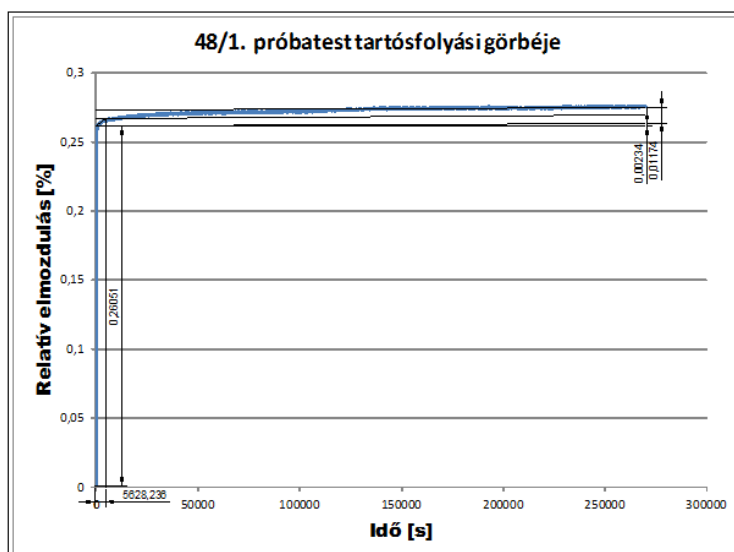
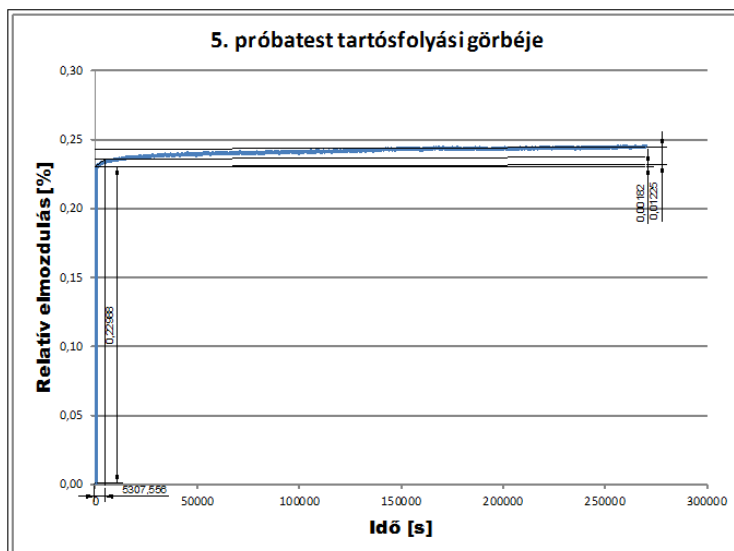
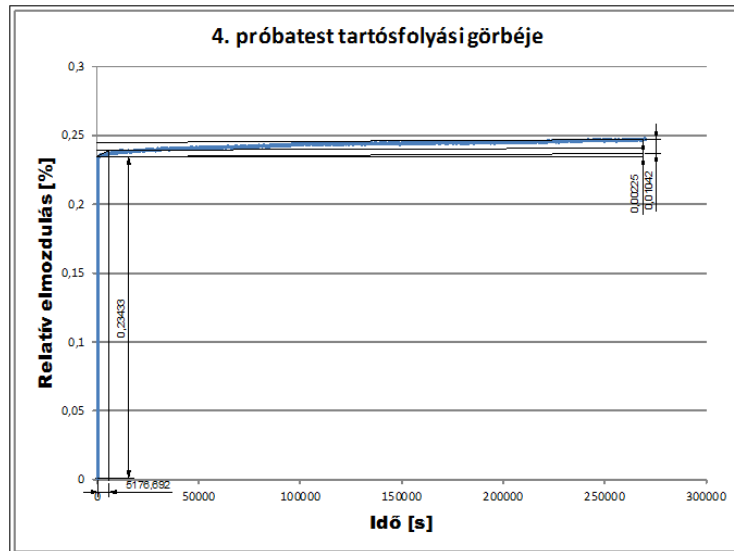
<b>FELDERÍTHETŐSÉG</b>	
<b>Osztályozás</b>	
<b>1 Biztos</b>	A hibát biztosan felderítik (laikus számára is egyértelmű a hiba megállapítása)
<b>2 Nagyon magas</b>	A hiba felfedezésének valószínűsége nagyon magas (a hiba célzott keresésével)
<b>3 Magas</b>	Az ellenőrzés nagy valószínűséggel felfedi a hibát
<b>4 Közepesen magas</b>	Közepesen magas valószínűséggel fedezhető fel a hiba
<b>5 Közepes</b>	Közepes valószínűséggel fedezhető fel a hiba (egyszerűbb mérőeszköz, idomszer, derékszög kell a kimutatásához)
<b>6 Alacsony</b>	A hiba felfedezésének valószínűsége kicsi.
<b>7 Nagyon alacsony</b>	A hiba felfedezésének valószínűsége nagyon alacsony (pontos műszeres mérést igényel)
<b>8 csekély</b>	
<b>9 Nagyon csekély</b>	
<b>10 Majdnem lehetetlen</b>	Majdnem biztos, hogy a hiba nem fedezhető fel

### III. Melléklet. Az SV-12 tömítés kúszásvizsgálata

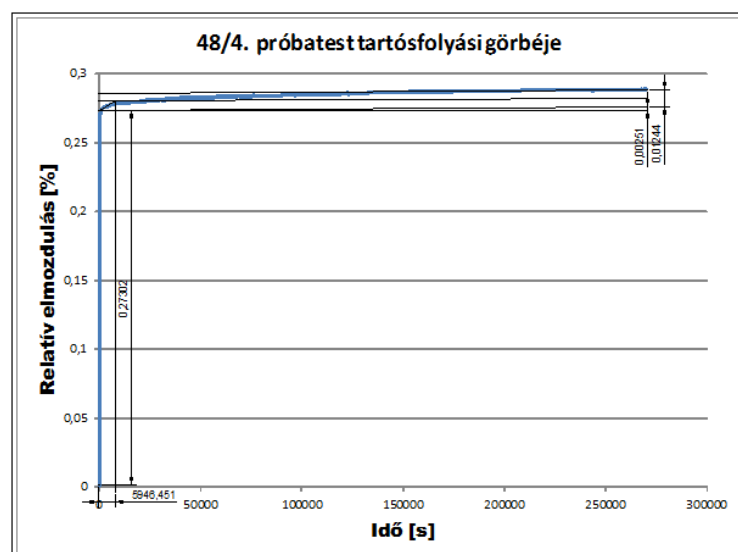
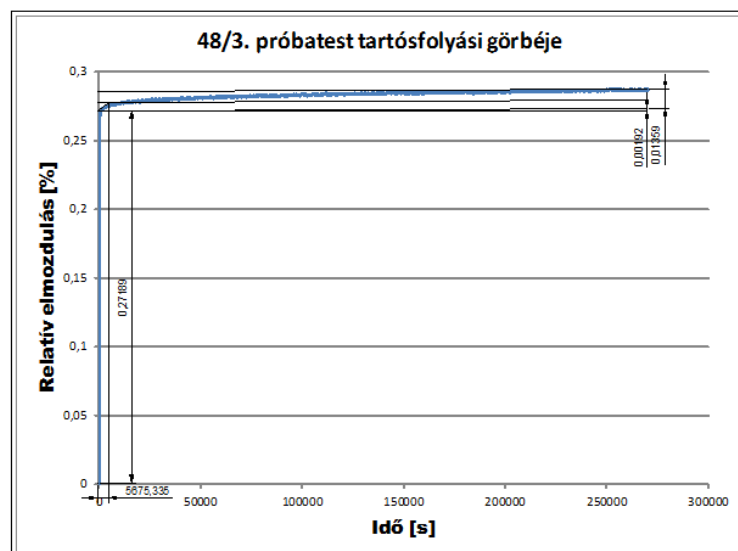
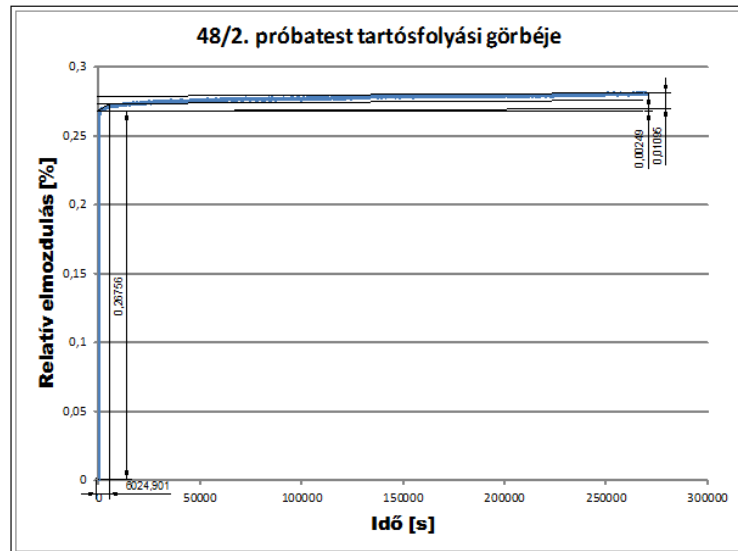




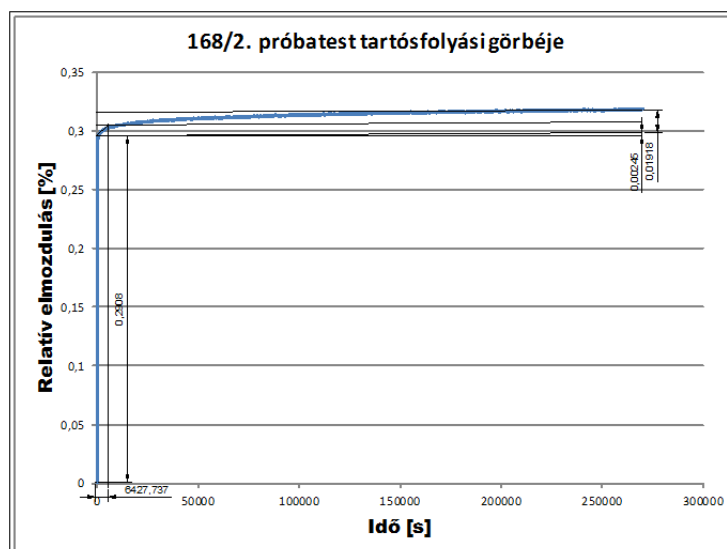
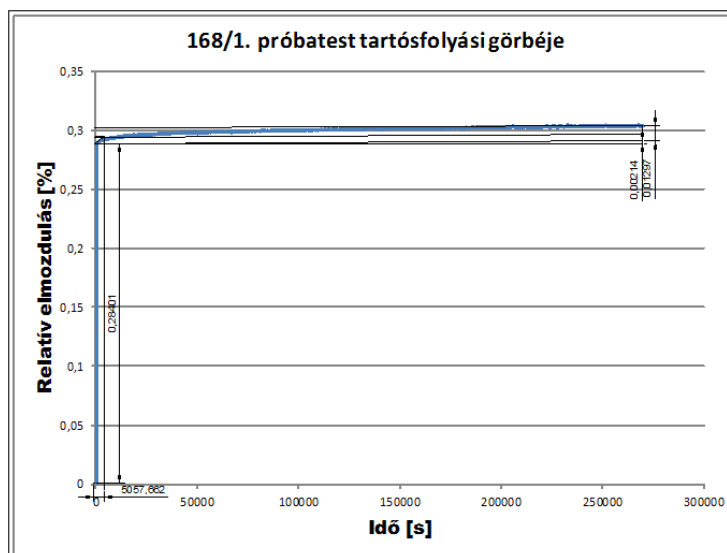
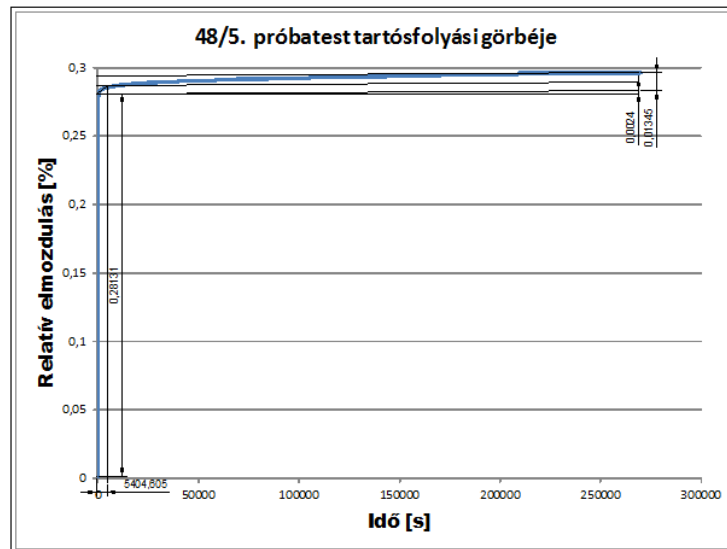
### III. Melléklet. Az SV-12 tömítés kúszásvizsgálata



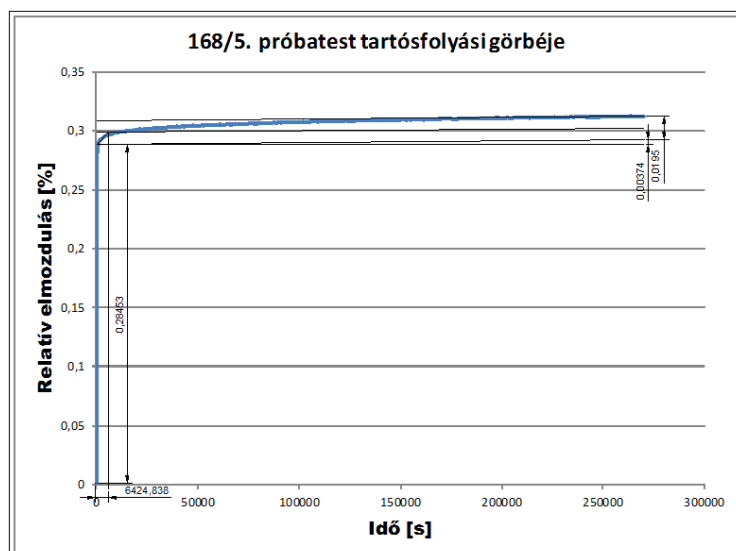
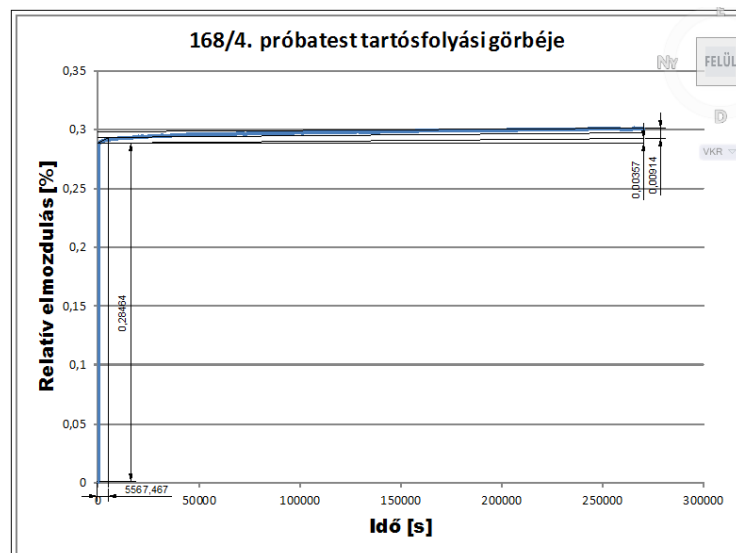
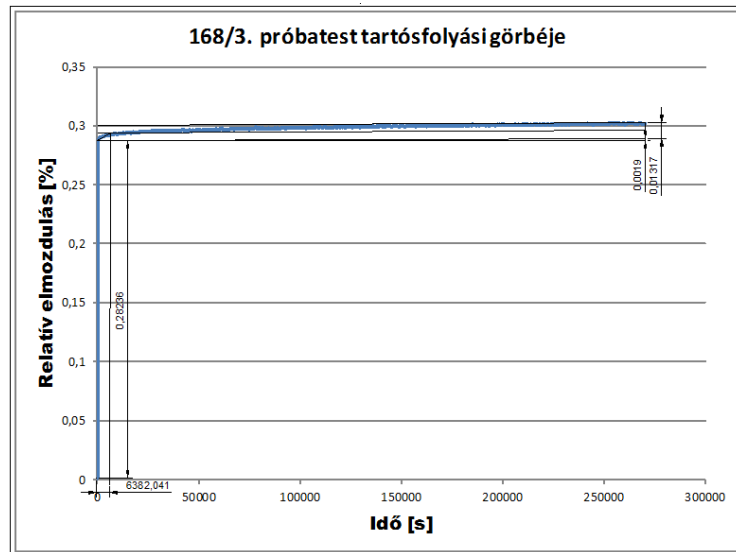
### III. Melléklet. Az SV-12 tömítés kúszásvizsgálata



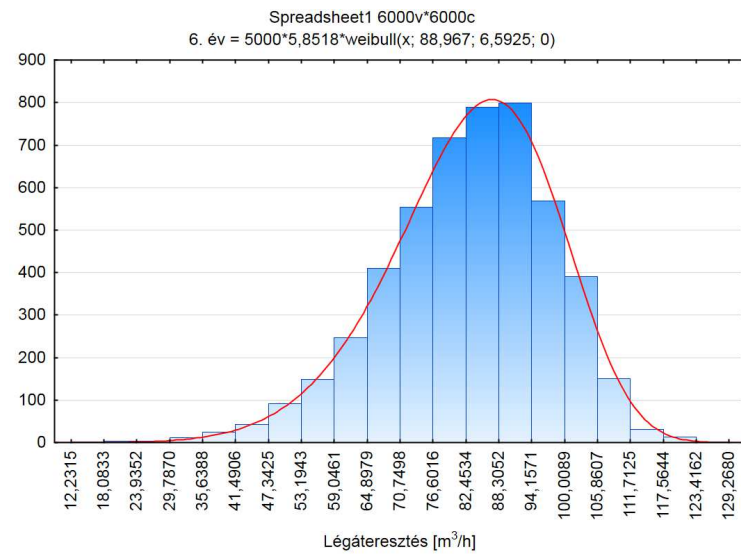
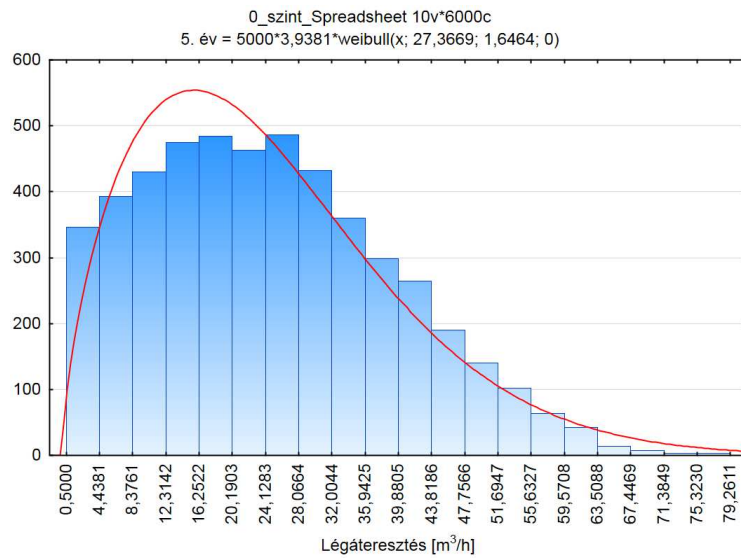
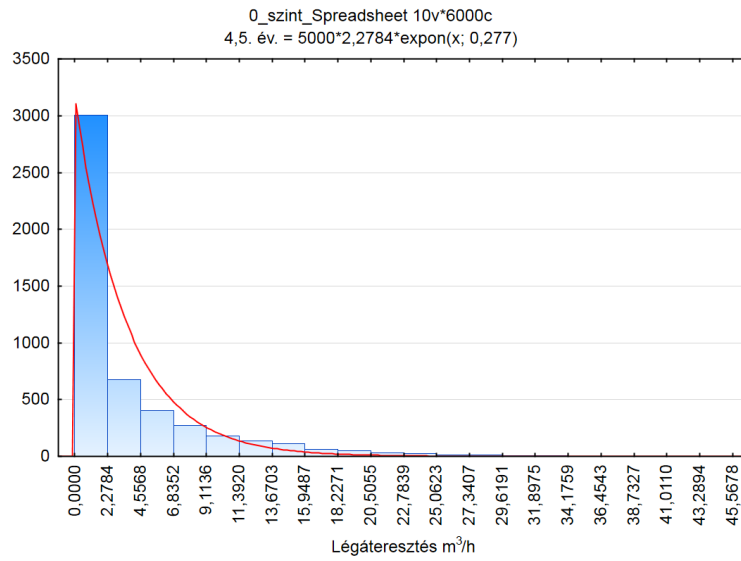
### III. Melléklet. Az SV-12 tömítés kúszásvizsgálata



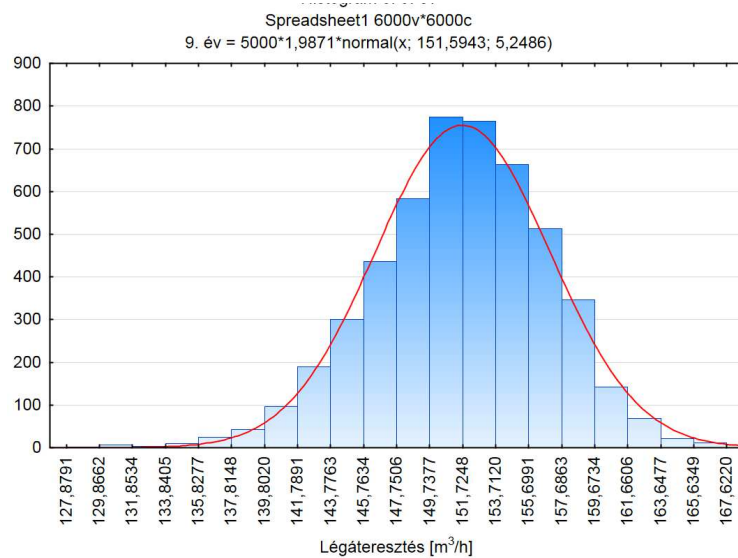
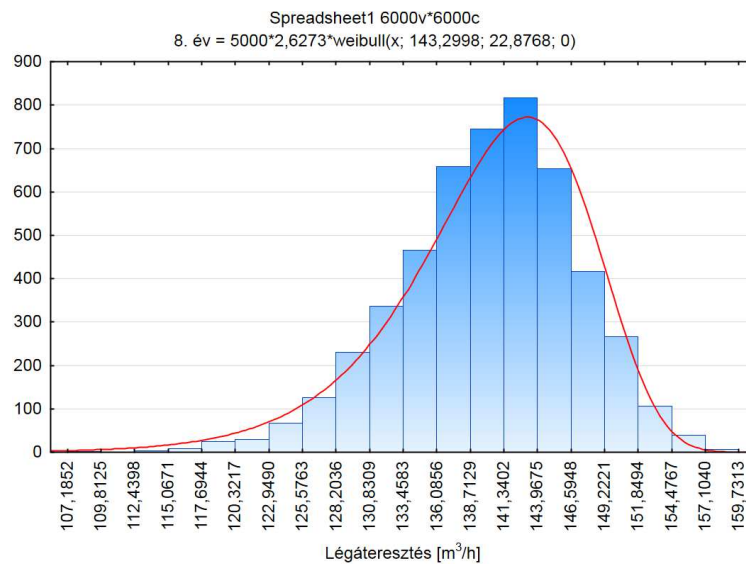
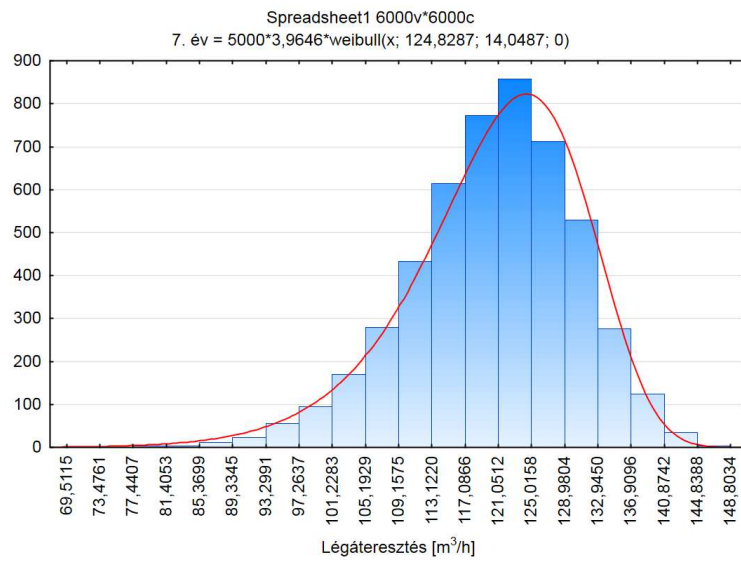
### III. Melléklet. Az SV-12 tömítés kúszásvizsgálata



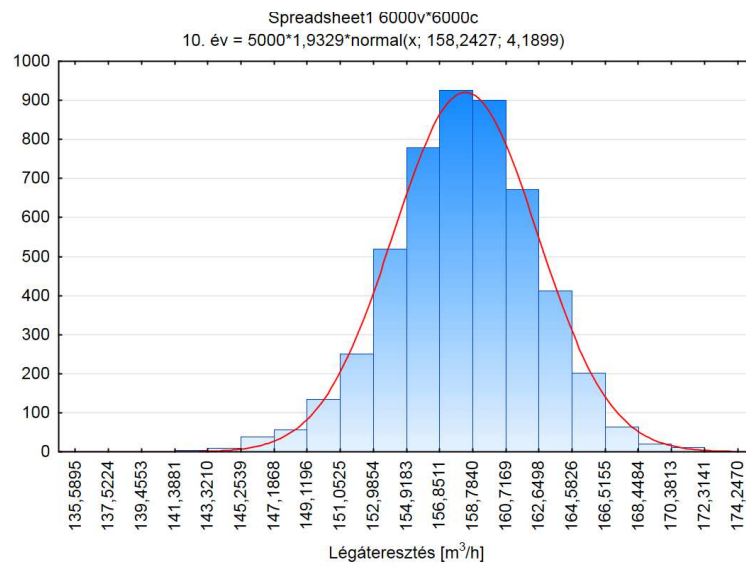
**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (0-szint)**



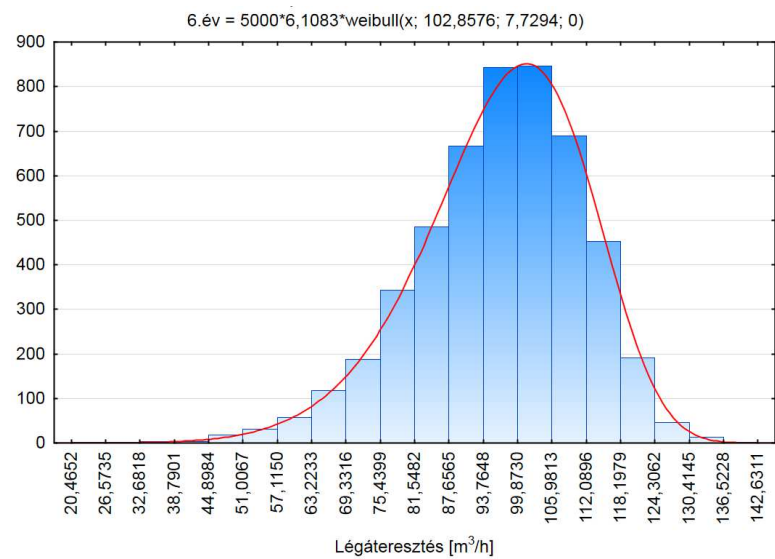
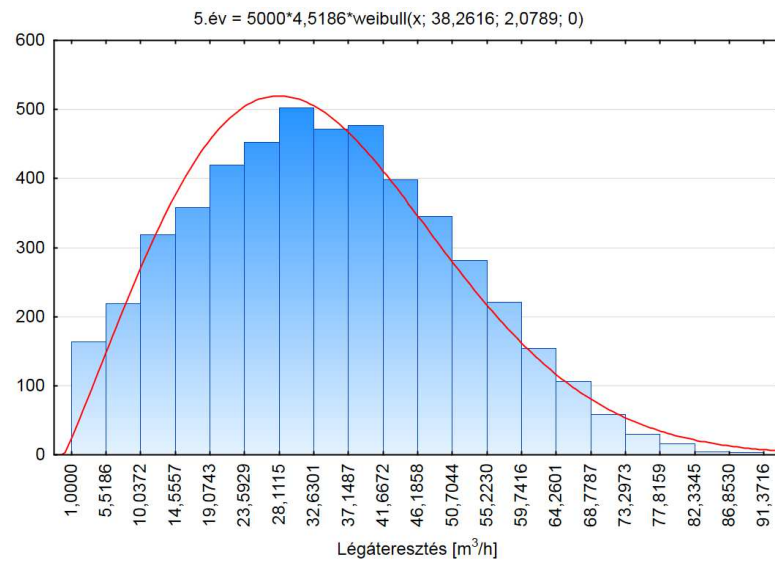
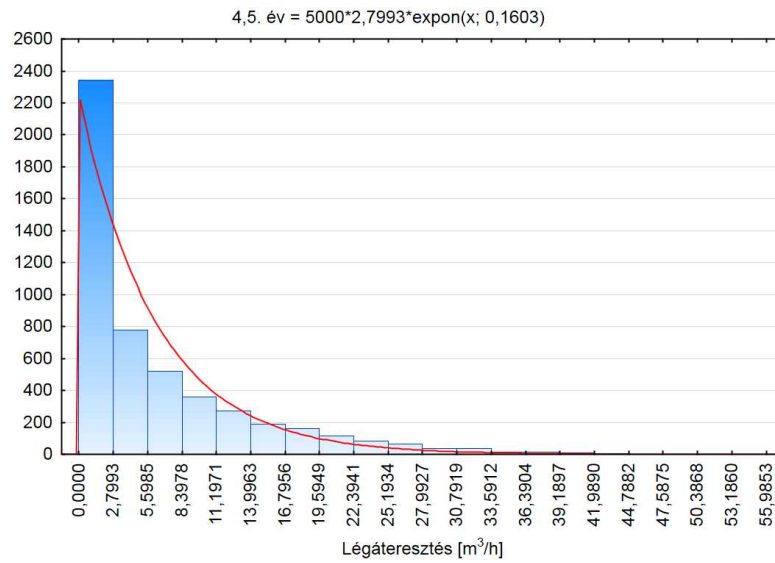
**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (0-szint)**



**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (0-szint)**

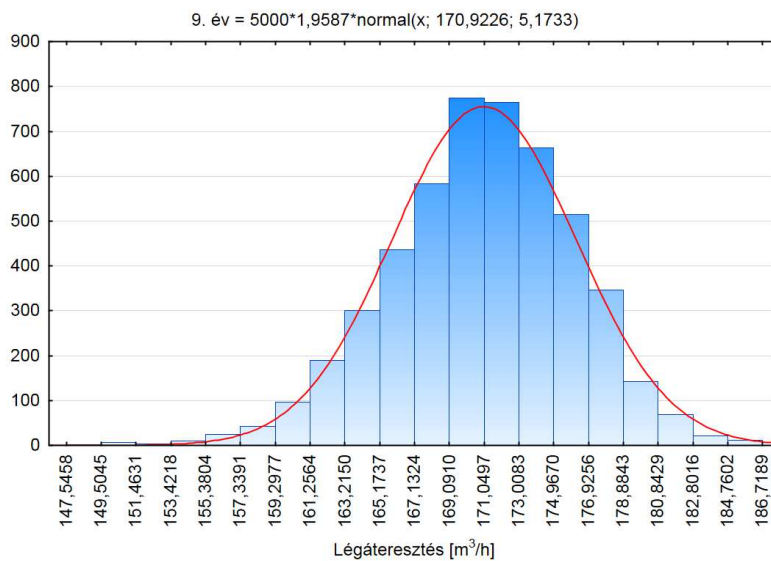
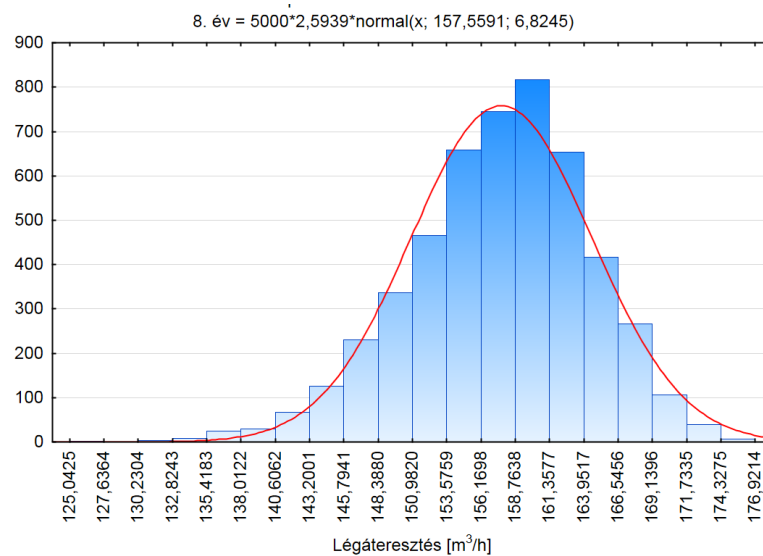
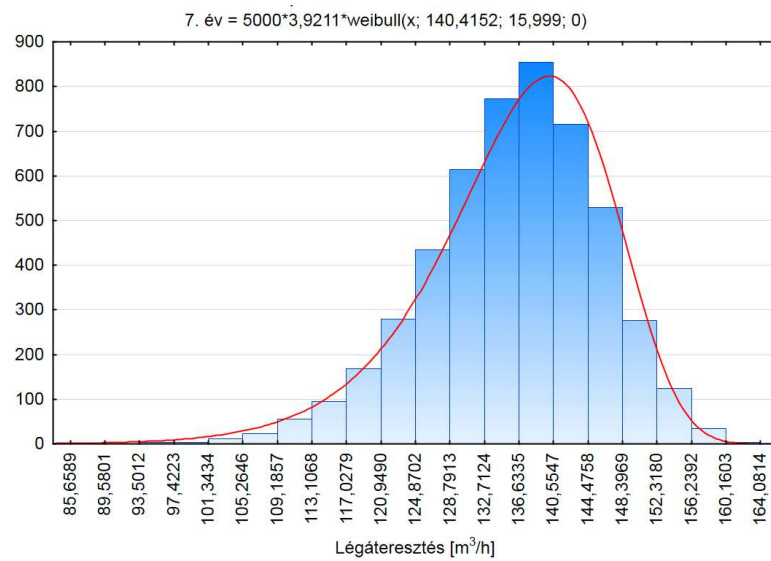


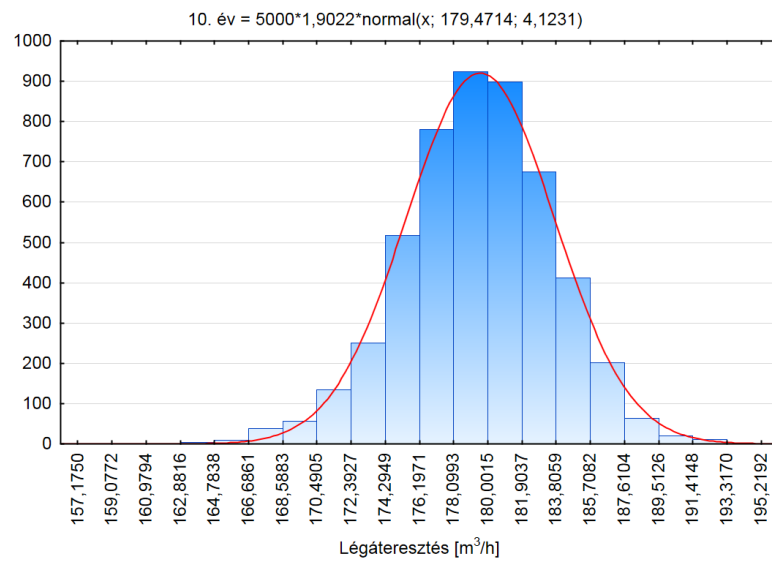
**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (1-szint)**



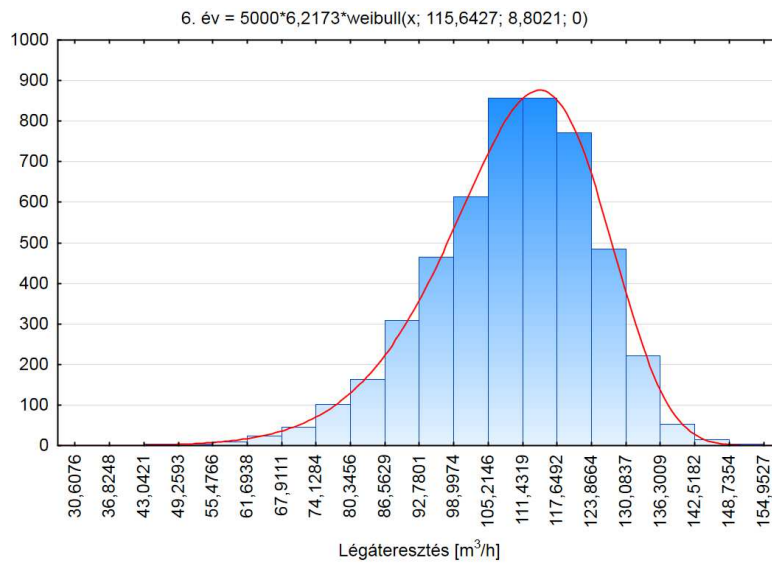
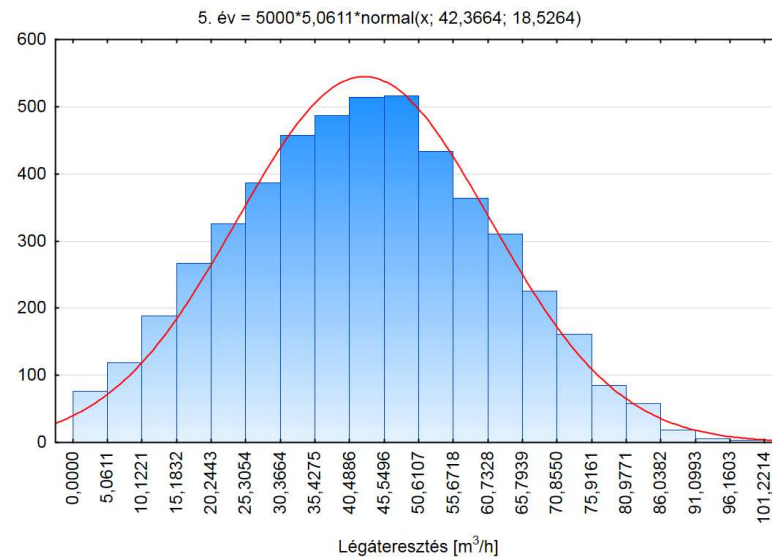
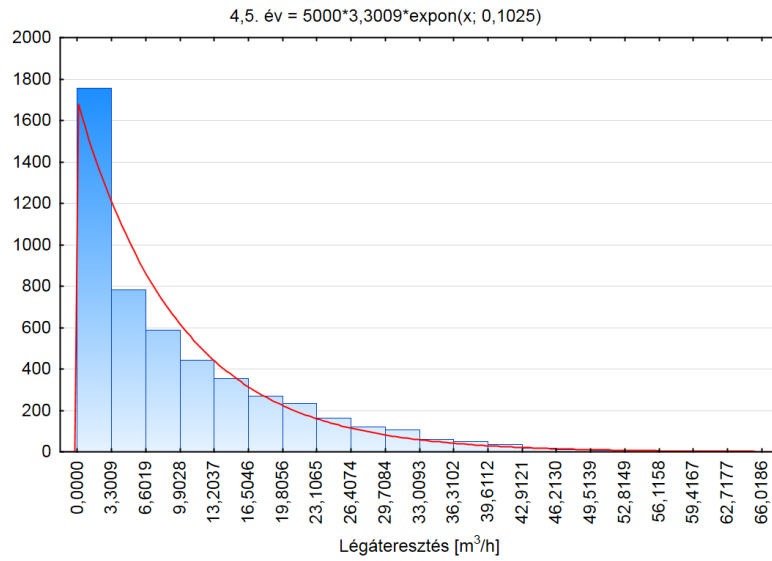


**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (1-szint)**

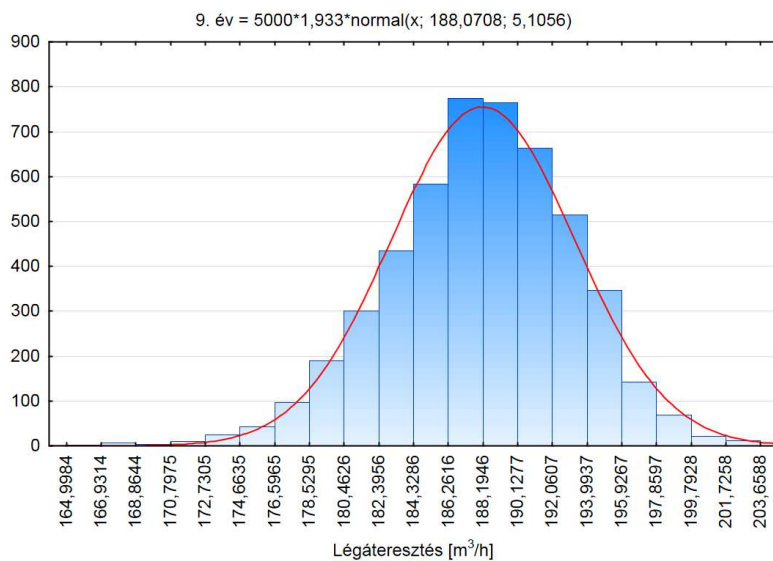
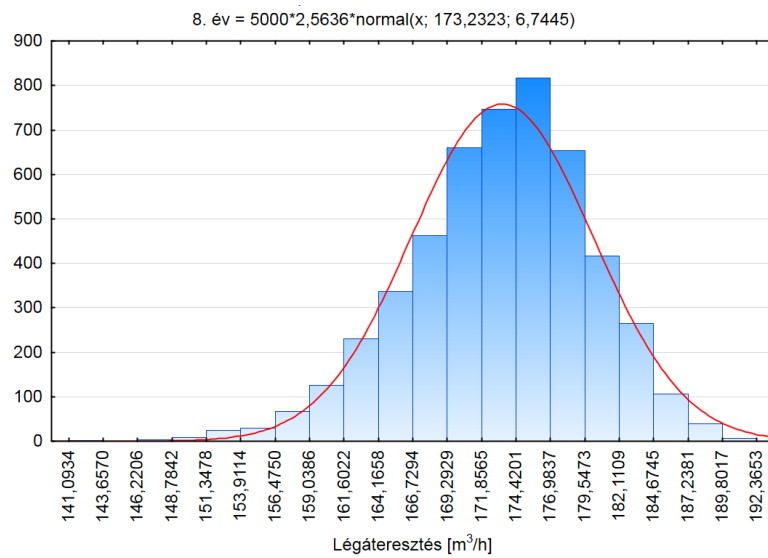
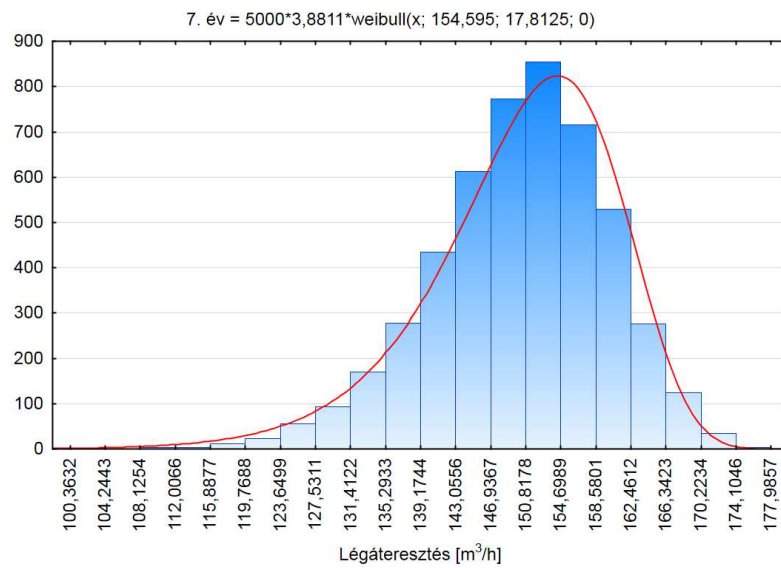


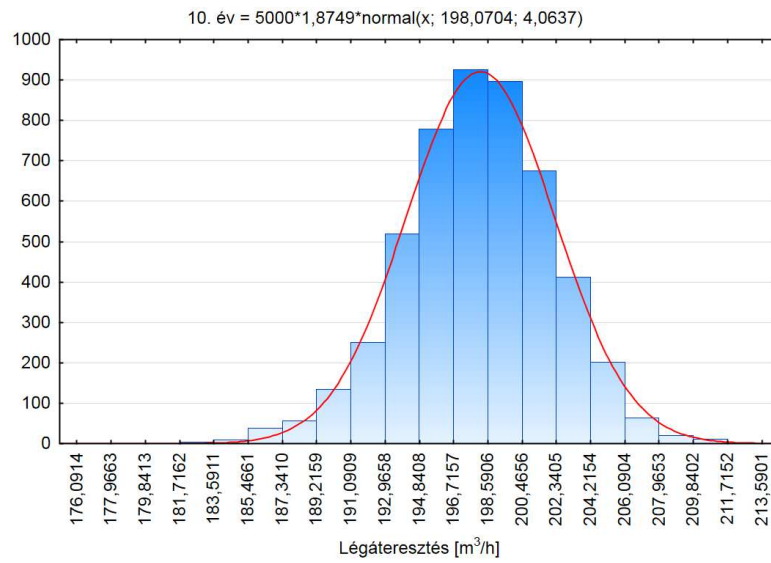
**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (1-szint)**

**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (2-szint)**

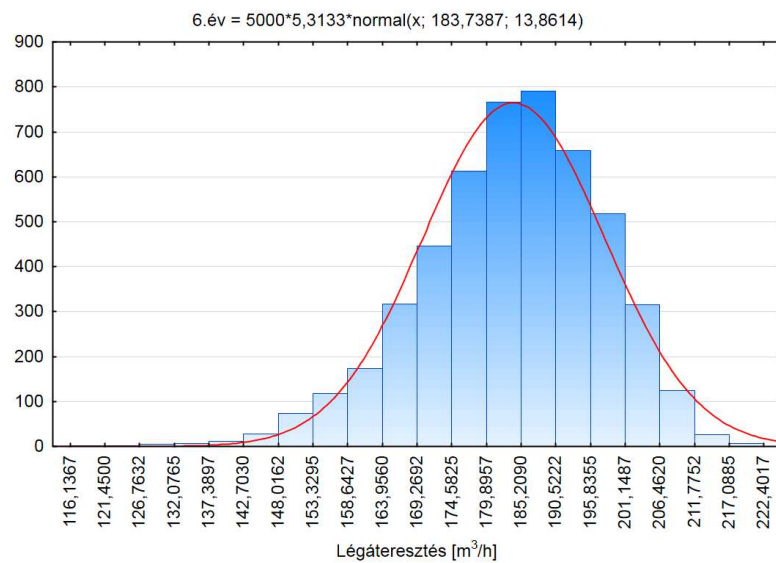
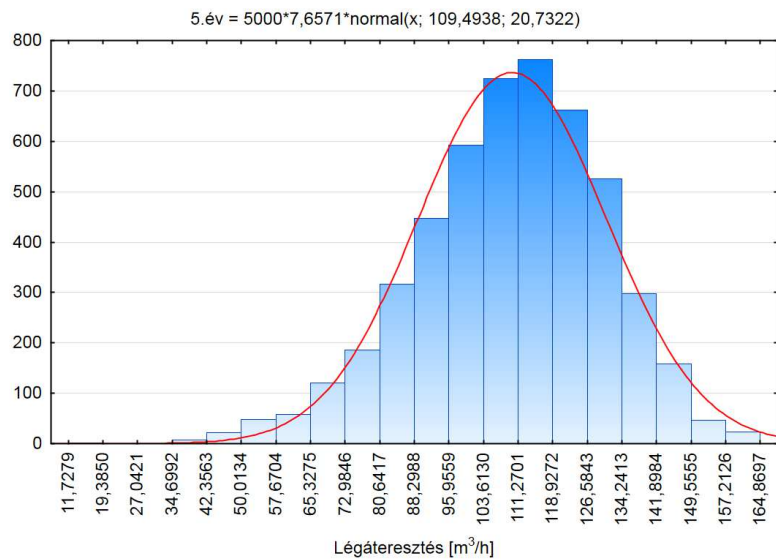
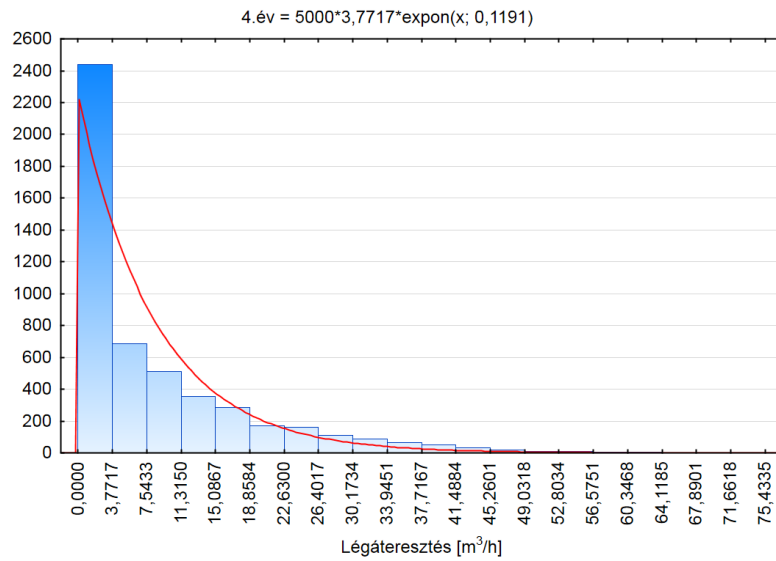


**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (2-szint)**

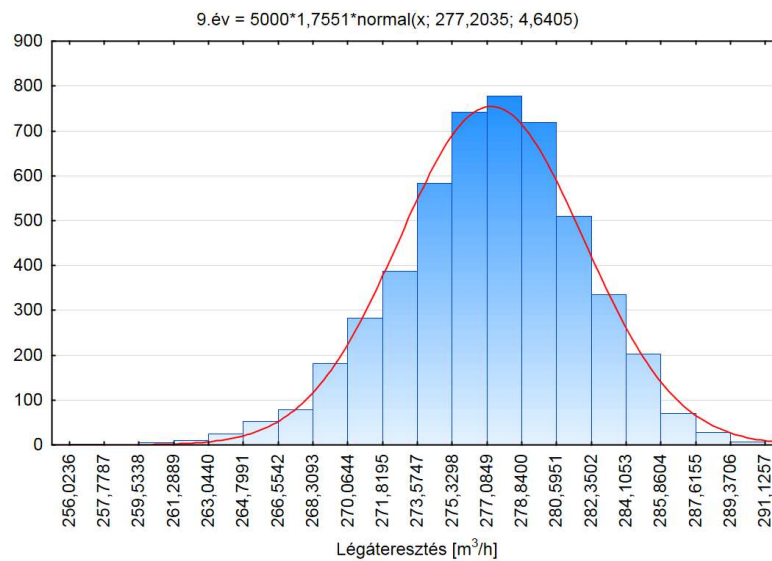
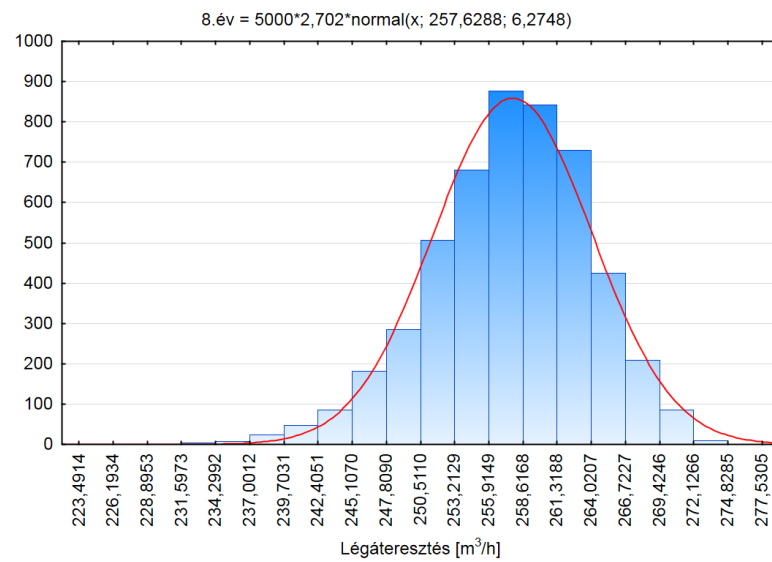
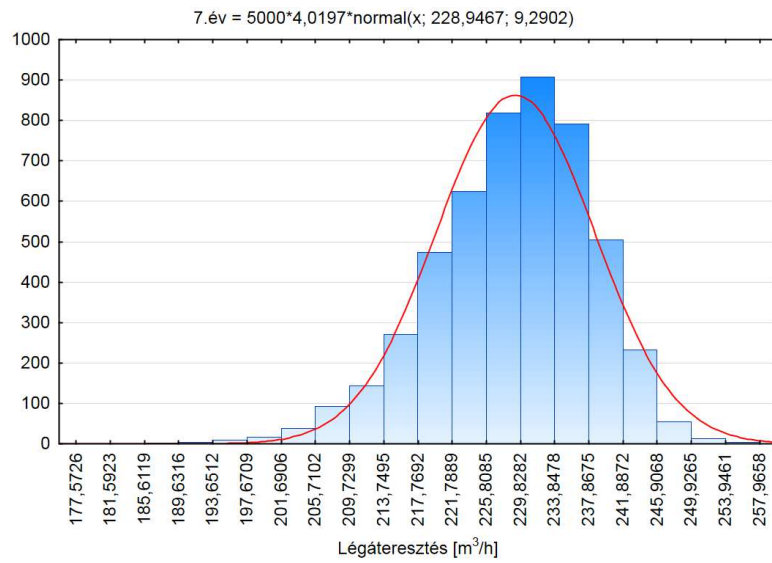


**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (2-szint)**

**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (3-szint)**



**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (3-szint)**



**IV. Melléklet. A szoftverrel számított eredmények relatív sűrűségfüggvényei (3-szint)**

