

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: Prof. Dr. Kovács Zsolt  
Tudományág: anyagtudomány és technológiák

**Ablakok hőtechnikai elemzése, az üvegezés teljesítőképességének javítása**

Készítette: Elek László  
Témavezető: Prof. Dr. Kovács Zsolt, egyetemi tanár

Sopron

2014

**ABLAKOK HŐTECHNIKAI ELEMZÉSE, AZ ÜVEGEZÉS  
TELJESÍTŐKÉPESSÉGÉNEK JAVÍTÁSA**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében  
a Nyugat-magyarországi Egyetem  
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskolája  
Fafeldolgozási technológiák programja keretében.

Írta:  
Elek László

Témavezető: Dr. Kovács Zsolt

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton 96,28 % -ot ért el.

Sopron, 2011. május 6.

.....  
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

# TARTALOMJEGYZÉK

KIVONAT .....	5
ABSTARCT .....	6
ELŐSZÓ .....	8
1. BEVEZETÉS, A TÉMA AKTUALITÁSA .....	9
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	12
2.1 Általános ismeretek.....	12
2.1.1 Az ember és környezete közötti általános kapcsolat .....	12
2.1.2 Az ablak kialakulása, fejlődése .....	13
2.1.3 Az üveg, üvegszerkezet kialakulása, fejlődése .....	15
2.1.4 Az ablak teljesítőképességi jellemzői .....	16
2.1.5 Helyiségek természetes megvilágítása, fény és energia kapcsolata .....	17
2.1.6 Energiatudatos építészet.....	18
2.2 Tudományos előzmények.....	20
2.2.1 A hőterjedés folyamata .....	20
2.2.2 Transzparens test energiamérlege .....	21
2.2.3 Üvegezések fontosabb jellemzői.....	26
2.3 Nanotechnológiás rétegeképzés és annak modellezési lehetősége .....	32
2.3.1 Az elektrosztatikus önrendeződés rétegeképzés technológiája .....	32
2.3.2 A nanobevonat modellezési lehetőségei .....	34
2.4 Végeselemes modellezés .....	35
3. CÉLKITŰZÉSEK.....	39
4. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK ÉS ANYAGOK.....	41
4.1 Ablakszerkezetek végeselemes hőtechnikai számítógépes modellezése .....	41
4.1.1 A vizsgált szerkezetek bemutatása.....	41
4.1.2 Az alkalmazott hőtechnikai számítási eljárás ismertetése .....	42
4.1.3 A hőtechnikai elemzés grafikus előkészítése .....	44
4.2 Falazatba illesztett ablakszerkezetek végeselemes hőtechnikai szimulációja .....	47
4.3 Beépített ablak üvegzésének helyszíni vizsgálata .....	49
4.3.1 Hurst kitevő .....	52
4.3.2 Wavelet transzformáció .....	53
4.4 Nano felületbevonás normál ablaküvegen .....	54
4.4.1 Alkalmazott anyagok .....	54
4.4.1.1 Kolloidok előállítása .....	55
4.4.1.2 LbL-rétegek létrehozása, hőkezelése .....	56

4.4.2	Alkalmazott vizsgálati módszerek .....	57
4.4.2.1	UV-VIS-NIR spektrofotometria .....	57
4.4.2.2	Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia .....	58
4.4.2.3	Felületi energia, peremszög mérés .....	58
4.4.2.4	A bevonatok felület tisztító hatásának vizsgálata .....	59
4.4.2.5	Hőátbocsátási tényező meghatározása .....	60
4.4.2.6	A vékony film modellezésének előkészítése .....	61
5.	VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI .....	67
5.1	Ablakszerkezetek vége-selemes hőtechnikai számítógépes modellezése .....	67
5.2	Falazatba illesztett ablakszerkezetek vége-selemes hőtechnikai szimulációja .....	70
5.3	Beépített ablak üvegezésének helyszíni vizsgálata .....	74
5.3.1	Hurst kitevő .....	76
5.3.2	Wavelet transzformáció .....	77
5.4	Nano felületbevonás normál ablaküvegen .....	79
5.4.1	UV-VIS-NIR spektrofotometria .....	79
5.4.2	Felületi energia, peremszög mérés .....	87
5.4.3	A bevonatok felület tisztító hatásának vizsgálata .....	90
5.4.4	Hőátbocsátási tényező .....	91
5.4.5	A nanobevonat modellezésének eredményei .....	93
6.	ÖSSZEFOGLALÁS .....	99
7.	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK .....	101
8.	TOVÁBBI KUTATÁSI FELADATOK .....	102
9.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....	103
10.	IDÉZETT IRODALOM .....	104
11.	ÁBRA- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK .....	112
12.	MELLÉKLETEK .....	115

## KIVONAT

Az épületek energetikai tulajdonságának javítását és a megtakarítási lehetőségek minél jobb kihasználását célzó energetikai direktívák, rendeletek közvetlenül hatnak az épületek homlokzatának szerves részét képező ablakszerkezetekre. Mivel még a legkorszerűbb nyílászárók sem képesek megközelíteni az épülethatároló falazat hőátbocsátásának értékét indokolt ezen terület célirányos fejlesztése, az energiaveszteség csökkentése.

Kutatásom fő célja tisztázni, hogy a jelenleg elterjedten alkalmazott ablakszerkezetekkel, anyagokkal, megoldásokkal hőtechnikailag milyen szint érhető el, továbbá egy hatékony megoldást ajánlani az ablakok hőszigetelésének további fokozására.

A disszertációban végesem módszer (VEM) alkalmazásával meghatároztam három fa, illetve fa-alumínium kombinációjú kerettel rendelkező ablakszerkezetre a hőtechnikai teljesítőképességet. Az ablakok „független” termékként való vizsgálata mellett elvégeztem azok három különféle típusú falszerkezetbe illesztett számítógépes modellezését is.

A beépített ablak üvegezésének vizsgálatára, ellenőrzésére vonatkozóan helyszíni méréseket végeztem, ami a számítógépes és laboratóriumi vizsgálatokkal szemben, valós környezeti hatások mellett történt. A mérés eredményeit az alkalmazott matematikában ismert transzformációkkal értékeltem, továbbá sikerült olyan spektrális diagramokat készíteni, amelyekkel egyértelműen jellemezhetőek a hőtranszport folyamatok.

Az üveg optikai és termikus teljesítőképességének javítására irányulóan egy, a nanotechnológiában ismert eljárást (LbL) alkalmaztam. A kutatás ezen részében az elektrosztatikus önrendeződéses eljárással 3 félvezető anyag ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  és  $\text{SiO}_2$ ) felhasználásával kilenc féle ultravékony bevonatot készítettem. Az alkalmazott anyagokkal és módszerrel sikerült az ablaküveg hőátbocsátását csökkenteni.

## ABSTARCT

Energetic directives and regulations, which are intended to improve the energy performance and economics of buildings, directly affect the window structures that constitute an integral part of the facade of the buildings. Since even the state of art/most modern/most advanced/windows are unable to approach the  $U$ -value of the walls in a building, the development of this area and to find solutions in reducing the heat loss is still demanded.

The main goal of my research was to clarify and determine the maximal heat efficiency level that can be reached with the currently used window structures, solutions and materials. Moreover the objective of the thesis was also to offer an effective solution to further improve the thermal insulation of windows.

Finite element method (FEM) was used to evaluate the overall heat performance of three different window structure: two wooden frame and one wood-alumina frame windows. FEM method was also used to evaluate the complex interaction of windows in different wall structures.

In order to examine the overall heat performance of a built-in window in-situ measurements were carry out in real environmental circumstances. Further, mathematical transformations were used to characterize the environmental effects, which are represent the heat transport processes.

To improve the optical and thermal energy performance of window glass layer-by-layer technique was applied. To build up 9 different ultrathin multilayers onto the glass substrate with the self-assembly technique three types of semiconductors ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  and  $\text{SiO}_2$ ) were used. According to the measurements the nanostructured coatings offered reduced heat transfer properties.



*„... a napsugárzás, a fény, a hő az új építészet anyagai, amelyekkel ugyanolyan gondosan kell bánni, mint az acéllal vagy a betonnal.”  
(M. Papadopoulos)*

## ELŐSZÓ

Egy adott természeti környezet lokális entrópiáját, tehát hogy mennyi hőt ad le vagy vesz fel, esetleg molekuláris szinten milyen a rendezettsége, a földrajzi elhelyezkedés mellett számos tényező befolyásolja. Állandósult állapotok a nappalok és éjszakák változásának következtében nehezen alakulnak ki. A mikroklíma a környezeti elemek (domborzat, páratartalom, tengerszint feletti magasság stb.) változásán alapul. Ha ebből a természeti környezetből egy falakkal elhatárolt térrészt választunk le, épületet hozunk létre. Az épített környezet mind külső, mind pedig belső jellegében megbontja a korábbi rendezettséget, entrópiája megváltozik. Belső jellegét tekintve komfortos, tehát megfelelő páratartalmú, hőmérsékletű és fényű helyiséget az emberek igényeinek megfelelően alakítjuk ki, illetve szeretnénk befolyásolni, amely komfortélmények a természeti környezet állandósult állapotaiból vezethetők le. Éppen ezért a falakkal határolt térrészbe megfelelő állapotú és minőségű fény juttatásához transzparens ablakokra és ajtókra van szükség. Ezen tárgyi elemek a falak homogén szerkezetét, entrópiáját szintén megbontják. Egy adott felület átvágása, kialakítása határfelületi jelleggel a felületi molekuláris rendszer átrendeződéséhez vezet. Az új szerkezeti elem megjelenése a falnyílásban a hőtranszport folyamatok megváltozását célozza, tehát entrópiája a tömbi fal elemhez képest csökken. Ha ez az entrópia változás minimálisnak tekinthető, a humán komfort érzet megnövekszik.

A fal homogén szerkezetét megbontó elemek teljesítmény paramétereit számos módon lehet befolyásolni. Erre irányuló módszerekkel részletesen vizsgálták már például az ablakok esetében a felhasznált keret anyagokat (fa, műanyag, fém, kompozit) és az üvegezést. A tudomány jelenlegi állása szerint már képesek vagyunk alacsony emisszivitású (Low-E) üvegezések és jól, több ponton szigetelő keretszerkezetek létrehozására. A modern ablakoknak ezáltal egy meghatározott falszerkezeti rend esetén olyan új tulajdonsága jelenik meg, ami a fal tömbi fázisát, struktúráját nem, vagy csak kis mértéken bontja meg.

A nanoszerkezetű anyagok alkalmazása az üvegek célirányos fejlesztése és anyagtudományi kutatások középpontjában áll. Segítségével új anyagokat, hatásokat hozhatunk létre. Munkám során a lakóházak ablak rendszerében az üveg felületi módosításait végeztem el nano félvezető anyagok alkalmazásával és a rendszerek végesem szimulációjával.

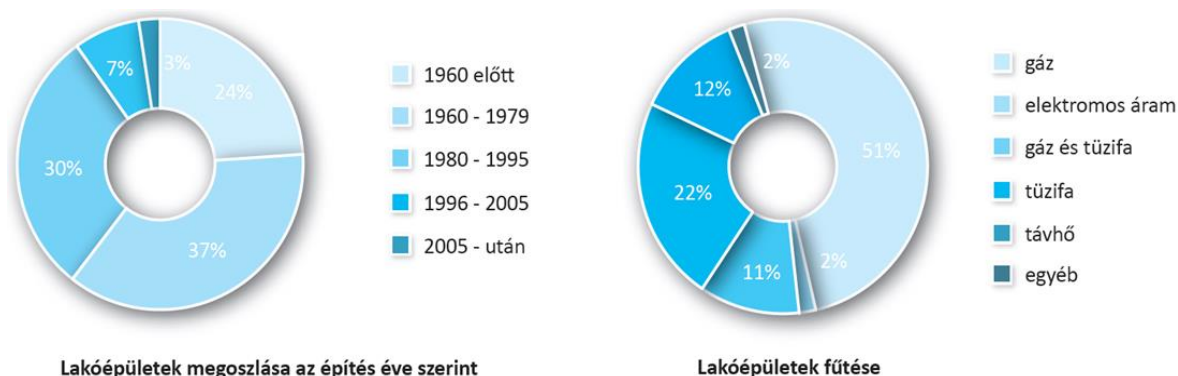
Mivel a kutatás egyaránt érint fizikai, technológiai, matematikai és anyagtudományhoz köthető tudományterületet is, így a választott téma jól illeszkedik a Nyugat-magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola több tudományterületet átfogó szakmai profiljához.



## 1. BEVEZETÉS, A TÉMA AKTUALITÁSA

A gazdasági környezettől a ház- és lakásépítések kapcsán sem tudjuk függetleníteni magunkat. A házépítések terén az elmúlt évszázadokhoz képest az utóbbi néhány évtized jelentős változásokat eredményezett. A korábbiakkal ellentétben egyre hangsúlyosabban előtérbe került a gazdaságosság kérdése, hiszen a világ energiafogyasztásának közel felét (45%-át) az épületek üzemeltetése teszi ki, míg felépítésük csupán 5%-ot [Paul 1984, Zöld 1999]. Ennek a ténynek az energiaárak kapcsán való figyelembe vétele számos Nyugat- és Észak-Európai országban megnyilvánul. Ilyen előírás pl. az 1975-ben Svédországban a fűtésre fordított energia megtakarítására vonatkozó SBN 75 rendelet, amely az egyes szerkezetek hőátbocsátási tényezőit maximálta. A folyamat más Nyugat-Európai országban is lendületet vett, amely még ma is erőteljesen tart. Németországban az előírások több lépcsőben váltak egyre szigorúbbá. A rendeletek szigorításának eredményeként az 1979-es 260 kWh·m<sup>-2</sup>-es éves átlagos energiaszükségletről 1984-re az átlag 190 kWh·m<sup>-2</sup>, 1995-re pedig 180 kWh·m<sup>-2</sup>-re csökkent. A svéd SBN 75 rendelet, már 20 évvel korábban is 60-80 kWh·m<sup>-2</sup> értéket tartalmazott [Informationsdiens Holz 2000, Humm 2000].

Magyarországon az Európai Unióhoz való csatlakozást követően az épületek hőtechnikai jellemzőire vonatkozó előírásokban jelent meg ez a kezdeményezés. Az Európai Parlament által elfogadott 91/2002/EK irányelvek bevezetése az épületállomány energetikai tulajdonságainak javítására, valamint a megtakarítási lehetőségekre irányultak. Egy 2011-es kutatás szerint a hazai épületállomány jelentős része, közel 60 %-a 1980 előtt épült és csupán 10 %-uk az elmúlt 15 évben. A takarékosági törekvések is egyértelműek, hiszen a háztartások több mint fele földgáz alapú fűtési rendszert használ, ami az ország jelentős földgáz-függősége miatt hosszútávon komoly veszélyeket rejt magában (1. ábra). Összességében az épületek energiahatékonysága rendkívül kedvezőtlen, az EU-15 országok átlagának kétszerese. Az új (háromszintű) energetikai szabályozás a korábbiakhoz képest hazánkban is szigorúbb feltételeket támasztott az épületekkel szemben [Zöld 2006, Prohászka 2007, web 1].



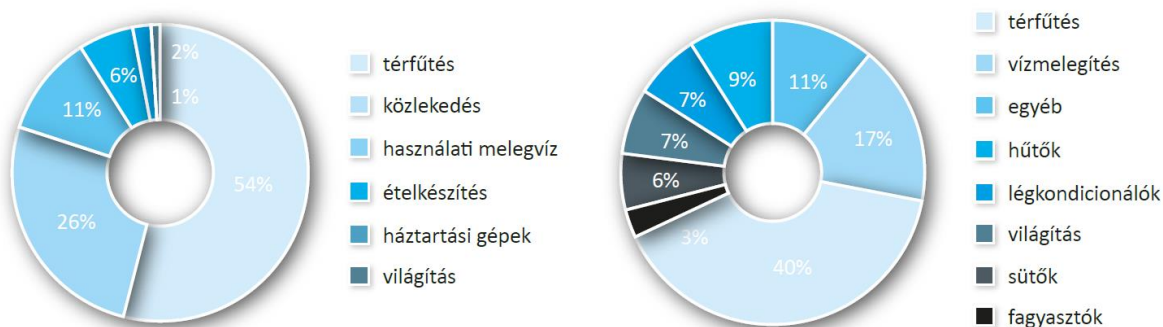
1. ábra. A magyar lakóépületek megoszlása az építés éve és fűtési energiafelhasználása szerint [Forrás: web 1]

Az épületek energetikai jellemzőinek meghatározására vonatkozóan, jelenleg a 40/2012 BM rendelet az irányadó, amely az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról szóló 7/2006-os TNM rendelet módosítása. A hatályos rendelet az épületek nyílászáróira

vonatkozó hőátbocsátási tényező határértékét  $1,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ , míg a határoló falak esetében  $0,45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$  értékben maximalizálta.

Általánosságban megállapítható, hogy az előírások az egyre kevesebb energiát fogyasztó épületek építésére ösztönöznek, ezáltal a fűtési időszakokban jelentős mértékben csökkenthető az üzemeltetés költsége. Az eddigi előrejelzések szerint a mai energiaszükséglet kb. 80 %-át kitevő fosszilis energiahordozók egy-két évszázadon belül elfognak, ezért célszerűen úgy kell csökkenteni az épületek üzemeltetésére fordított energiafelhasználást, hogy a kényelmi szint megmaradjon, vagy inkább javuljon. Ebben jelentős szerep jut a homlokzati nyílászáróknak is, ugyanis nagyobb hőátbocsátásuk miatt, a teljes homlokzat felületéhez viszonyított (általában) kis hányaduk ellenére, ezek okozzák a legnagyobb hőveszteséget. Még a legmodernebb ablakok hőszigetelő képessége is jelentősen elmarad a falszerkezetétől, amelynek oka, hogy a falazathoz képest sokkal vékonyabb ablakszerkezeteknek a jelenlegi anyagokkal és szerkezeti megoldásokkal bizonyos korlátai vannak, gyakorlatilag elérték teljesítőképességük határát. A fejlesztések arra irányulnak, hogy korszerű anyagokkal és megoldásokkal az ablakok hőszigetelését tovább fokozva, minimalizálják a különbséget a falazathoz képest, és lehetőség szerint a jövőben biztosítsák azt az ideális állapotot, amikor a homlokzati nyílászárók hőszigetelő képessége a falazattal azonos értékű [Kovács 2003, Thomas 2006, Urbikain 2009, Specht 2010].

Magyarország és az Egyesült Államok lakosságának energiafogyasztását, a felhasználási területek megoszlásában a 2. ábra mutatja. Míg hazánkban éves viszonylatban a felhasznált energiamennyiség több mint felét fordítjuk fűtésre, addig az USA-ban ez csupán 40 %, tehát ezen terület fejlesztése kiemelt fontossággal bír [Zöld 1999].



2. ábra. Magyarország (bal oldal) és az Egyesült Államok (jobb oldal) lakosságának energiafelhasználása [Forrás: web 2, web 3]

Több kutatás is rávilágított arra a tényre, hogy a valós energiafogyasztás akár 50 %-kal is meghaladhatja az előzetesen becsült fogyasztás mértékét [Fabi et al. 2012]. A tényleges és a becsült értékek közötti eltérés az épületet használó személyek komfortszokásainak (pl. szellőztetés, fűtés) és az épületben megtalálható szerkezeti elemeknek a számított és a tényleges teljesítményének különbségéből következik [Branco et al. 2004].

A háztartások energiafelhasználásának és az épületek hőveszteségének csökkentése nem csupán gazdaságossági kérdés, hanem a fenntarthatóság szempontjából is ajánlatos. Ennek

egyik lehetséges módja – a megújuló energiaforrások és természetes anyagok alkalmazása mellett – az épületek és azok szerves részeként az ablakok, hőszigetelésének fokozása [Maier 2009, Sieberath 2010]. Szakszerű hőszigeteléssel az épület határoló szerkezetein átáramló hőmennyiség, tehát a teljes hőveszteség nagymértékben csökkenthető, amellyel jelentős fűtési energia takarítható meg. Sajnos a hazai hőszigetelési „kedv” (az anyagi vonzata miatt) ennek tudatában is jelentősen elmarad az Európai Unió gyakorlattól. Magyarország épületállományának energiahatékonysága rendkívül kedvezőtlen. Az országos teljes primer energiafelhasználásnak közel egyharmadát (360 PJ) használjuk fel lakóépületeinkben, amelyet többnyire fűtésre és melegvíz előállítására fordítunk. Ennek közel 80 %-át a családi házak energiafogyasztása teszi ki. A magyar lakosság által elfogyasztott energia több mint 40 %-a (152 PJ) megtakarítható lenne az épületek energiahatékonyabbá tételével [web 1].

A legnagyobb energiamegtakarítási potenciállal a családi házak rendelkeznek, ami nem meglepő, hiszen a magyar lakosság közel kétharmada ilyen típusú épületekben él, valamint ezen épülettípusok jellemzően jóval nagyobb alapterülettel rendelkeznek, mint a társasházi vagy panellakások, így arányaiban sokkal nagyobb felületen veszítenek hőt. Sajnos az elmúlt időszakban csak kismértékben történtek energiahatékonysági korszerűsítések: az összes háztartás mindössze 24 %-a korszerűsítette nyílászáróit. A magyar lakóépületekben rejlő energiamegtakarítási lehetőségek című NegaJoule2020 kutatási projekt megállapítása szerint: „a családi házak nagy része számára a hőszigetelés és nyílászáró-csere együttes elvégzése jövedelmezőbb befektetés lenne, mint a hosszú távú banki lekötés” [web 1]. Egy régi családi ház felújítása kapcsán az energianyereségek és veszteségek a 12.1 mellékletben látható ábra szerint alakultak.

Az 50, vagy akár 100 év múlva jelentkező előírásokat jelenleg még nem ismerhetjük, így ezeknek megfelelni sem tudunk, de az új épületek és épületszerkezeti elemek pl. nyílászárók tervezésénél lehetőségeinkhez képest célszerű a várható igényeket figyelembe venni és amennyire lehet azokra tervezni.

A nyílászárók megfelelő hőszigetelése nem napjaink elvárása, hiszen az ablakok téli légmentes zárására (hőszigetelésére) már az 1900-as évek környékén is felmerült az igény. Akkor úgy védekeztek a hideg ellen, hogy durva rozslisztből, hamuból és forró vízből kovászt készítettek, amellyel az ablak tok-szárny kapcsolata mentén körbe bekenték a csatlakozó felületeket. A szakirodalom szerint ez a megoldás több nyitás-zárás során védelmet biztosított, de pontos tartósságára nincs utalás [Hankó 1902]. Feltehetően még ma is működnének a régi praktikák, de a mai modern felhasználók ennél egyszerűbb, beavatkozást nem igénylő, ugyanakkor hatékony megoldást várnak el az ablakaiktól.

A fejezethez kapcsolódóan a 12.1 melléklet további ábrákat tartalmaz.

## 2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 2.1 Általános ismeretek

#### 2.1.1 Az ember és környezete közötti általános kapcsolat

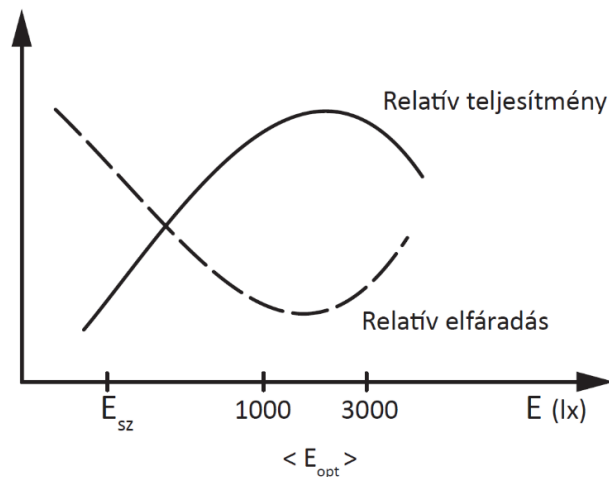
A fejlettebb országok lakosságának jelentős része életük 70-80 %-át (újabb kutatások szerint 85-90 %-át) zárt terekben töltik, ezért alapvető fontossággal bír, hogy az őket körülvevő épített környezet biztosítsa számukra a fizikai és szellemi munkavégzés optimális körülményeit, valamint a szórakozás, pihenés és alvás, tehát a megfelelő kikapcsolódás, regenerálódás lehetőségét [Wang 2008].

A zárt terek megfelelő kialakítása nagyon komplex műszaki, tervezési feladat, amelynél minden esetben figyelembe kell venni az energiagazdálkodási törekvéseket, a gazdasági adottságokat, hiszen ezek jelentősen visszahatnak az ember köz- és komfortérzetére, az egyes paraméterek optimális, vagy éppen megengedhető értékeire. Ez a visszahatás legtöbbször kedvezőtlen, a gazdasági törekvések és az ember komfortigénye akár egymással szembe is kerülhetnek. A minket körülvevő épített környezetben gyakran találkozhatunk olyan megoldásokkal, amelyekben az embert kiszolgáló alapkövetelmények háttérbe szorulnak a formai, esztétikai elvárások következtében. Emellett napjainkra az is nagyon jellemző, hogy az energiagazdálkodási célkitűzéseket kiemelt fontossággal kezeljük, amelynek elérése érdekében a legtöbb esetben csak a technikailag mérhető energiamegtakarítást vesszük figyelembe, de az emberre gyakorolt hatását kevésbé, vagy egyáltalán nem. Csak ritkán kerül mérlegelésre, hogy az elért energia-megtakarítás ténylegesen milyen hatással van az emberek munkavégzésének teljesítményére és minőségére.

Arra vonatkozóan, hogy a gyakorlatban milyen kapcsolatrendszerrel kell, vagy kellene számolnunk, a korábban megalkotott általános modellsémák (12.2 melléklet) adnak útmutatást.

Az emberi szervezet környezethez való alkalmazkodása komplex folyamat, amely során az egyes tényezők együttesen, valamint kölcsönhatásban jelentkeznek, és a szervezet ezek együttes hatására reagál. A zárt térben tartózkodó ember (szubjektív) közérzetének kifejezésére a komfortérzet kifejezést is használhatjuk, amelyet elsődlegesen a hőmérséklet, a légnedvesség, a légmozgás, a zaj és a megvilágítás befolyásolnak.

A fentiek folytatásaként ide sorolhatók még a napsugárzás, az ionizáció és a rezgések, azonban ezek ritkábban, illetve csak időszakosan előforduló tényezők és hatásuk általában mérsékeltebb a komfortérzetre. Megjegyzendő azonban, hogy a helyiségben dolgozók teljesítményére jelentős hatással lehet a megvilágítás mértéke, ugyanis megfelelő minőségű (természetes és/vagy mesterséges) világítás esetén (a 3. ábra szerinti jelleggel) csökkenthető az elfáradás mértéke [Bánhidi 2000, Kajtár et al. 2000].



3. ábra. Megvilágítás hatása az emberi teljesítményre és elfáradásra [Forrás: Bánhidi 2000]

Az irodalomkutatás alapján megállapítható, hogy egy adott belső tér hőérzeti követelményei speciális üvegezéssű homlokzati szerkezetekkel legtöbbször optimálisan kielégíthetők. Egy belső tér kívánt hőkomfort követelményét szelektíven alacsony emisszivitású üvegezésekkel kedvezően befolyásolhatjuk és gazdaságosan biztosíthatjuk. A speciális hőtechnikai jellemzőknek köszönhetően, a hagyományos üvegezéssű felületekhez képest, a beérkező sugárzás jelentősen csökkenthető, ezáltal a diszkomfortot leginkább befolyásoló, az embert érő (aszimmetrikus) sugárzás minimalizálható, így az ott tartózkodó személyeknek nem lesznek hőkomfort panaszai [Várfalvi 2006, Hessinger 2010, Magyar és Ambrus 2011].

### 2.1.2 Az ablak kialakulása, fejlődése

Az ablak kialakulásának, történetének rövid áttekintésével (megismerésével) reális képet alkothatunk, hogy a történelem során mikor, milyen célzattal és milyen szerkezeti megoldásokkal, kialakításokkal kerültek elhelyezésre az adott korra jellemző falnyílásokban. Mivel napjainkban az ablakok nagyon sokféle kivitelben és többféle alapanyagból készülnek, jelen dolgozatban csak a fából készült és a fához kiegészítésként kívülről társított alumínium (ún. fa-alumínium) ablakok vizsgálatára térek ki.

A jelenlegi ismeretek szerint az épületek külső falain az első ablakszerű nyílások i.e. 4000 körül, Perzopolisz lakóházainál jelentek meg. Ezeknek a többnyire kő- és téglafalakban kialakított „lyukaknak” a korai időszakban elsősorban a füstelvezetés, a légcseré és a szellőzés volt az elsődleges funkciója, a nappali világítás szempontjából csak később lett jelentősége. Ezeket az egyszerű nyílásokat úgy alakították ki, hogy a házat kívülről nézve az emberi szem alakjára emlékeztetett. Valószínűleg ez lehet a magyarázata annak, hogy az ablak fogalmát több nyelvben is az emberi szemmel hozzák kapcsolatba. A 19. század közepéig bármilyen építési anyagból is készítettek lakóházakat, az ablaknyílások jellemzően kisméretűek voltak, amelyeket kezdetben hólyaggal, olajjal átitatott lantornapapírossal, valamint pergamennel fedtek le, majd később már tolóablakokat (*tolitu*) is alkalmaztak. Ezek csak kevés fényt engedtek be, inkább szellőzési szerepük volt. A Kréta szigetén található minoszi palotákban alkalmaztak először szárnyakat és kereteket. Kr.u. 100-ban, a rómaiak

már kisebb üvegbetéteket is felhasználtak, azonban a nagyobb üvegtáblák magánházakban való megjelenésére csak az 1200-as évek után került sor. Az ablakok beüvegezésével először Franciaországban és Angliában foglalkoztak, majd innen terjedt tovább. Ez az újítás Magyarországon még európai viszonylatban is későn honosodott meg. A 19. század utolsó harmadáig a szimpla ablakok voltak jellemzőek, azonban nagy hőveszteségük arra készítette a lakások használóit, hogy az ablakokat körültapasszák, besározzák, vagy akár teljesen lezárják, lefedjék a hideg évszakban.

A technika fejlődésével és az üvegezés elterjedésével már nem a szellőztetés (friss levegő bebocsátás), hanem a fényáteresztés lett az ablakok elsődleges funkciója. A nyitható ablakokkal szemben már az 1900-as évek környékén is komoly, a maihoz nagyban hasonló elvárásokat támasztottak. A falszerkezethez való hézag nélküli csatlakoztathatóságuk mellett, maguk a szerkezetek úgy legyenek zárhatóak, hogy a külső levegő hirtelen hőmérsékletváltozása, valamint az eső és szél ellen olyan védelmet nyújtsanak, mint maguk a falak [Freckay 1883, Sobó 1899, Lósy és Barát 1928, Horváth 1951, Bálint 1954].

Gyorsan felismerték, hogy az egyrétegű ablak nem tudja megóvni a lakóhelyiség hőmérsékletét és komoly hőveszteséget eredményez, ezért úgynevezett dupla (kettős) ablakokat kell alkalmazni, amelyeket úgy kell kialakítani, hogy az illeszkedési hézagok minél kisebbek, ezáltal a záródások minél szorosabbak legyenek. A közrezárt rossz hővezetésű légréteggel megakadályozható, hogy a helyiség hőmérséklete gyorsan kicserélődjék a külső hőmérséklettel [Freckay 1883]. Ezt felismerve a későbbiekben már a dupla ablakok váltak általánossá. Ezeknél a szerkezeteknél nagymértékben fokozódott a légzárás és csökkent a hőátbocsátás. A hagyományosan vastag falazatokba az 1920-30-as évekig pallótokos, majd ezt követően az 1980-as évekig kapcsolt gerébtokos ablakokat építettek be. Utóbbi továbbfejlesztéseként jelent meg az egyesített szárnyú szerkezet, amely két egymáshoz rögzített gerébtokból állt. Ez a változat nagyszerűen igazodott az akkori szerkezetváltási és tömegtermelési igényekhez, de teljesítményét illetően nem érte el a várt és tervezett színvonalat [Pásztor 2001, Lőrinczi 2005].

A folyamatosan változó, növekvő felhasználói igények már túlmutattak a lakóhelyiségek megfelelő megvilágításán, szellőztethetőségén, valamint a külvilággal való vizuális kapcsolat fenntarthatóságán. Azon túl, hogy az ablakoknak alapvető szerepük volt az épület külső és belső megjelenésének formálásában, fontos kritérium lett, hogy a fal vagy tető szerves részeként, meg kell felelniük a téli és nyári hőtechnikai, valamint az időjárás elleni védelemmel kapcsolatos elvárásoknak, az akusztikai követelményeknek, továbbá szavatolniuk kellett a betörés elleni biztonságot is. A fejlesztések eredményeként az egyesített szárnyú ablakokat kettős üvegezésű hőszigetelt ablakok váltották fel. A nyílászárók használati jellemzőivel kapcsolatos elvárások a vonatkozó szabványokban épületfizikai és szilárdsági követelményekként fogalmazódtak meg. Mint határoló szerkezettől megfelelő légzárást, vízzárást, hőszigetelést és léghanggátlást várunk el. Emellett a mechanikai igénybevételekkel szemben, a különféle használati erőhatások,

valamint szélteher kapcsán megfelelő ellenállást, tartósságot követelünk meg, a légállapot változása esetén pedig alakállóságot [Kovács 2002].

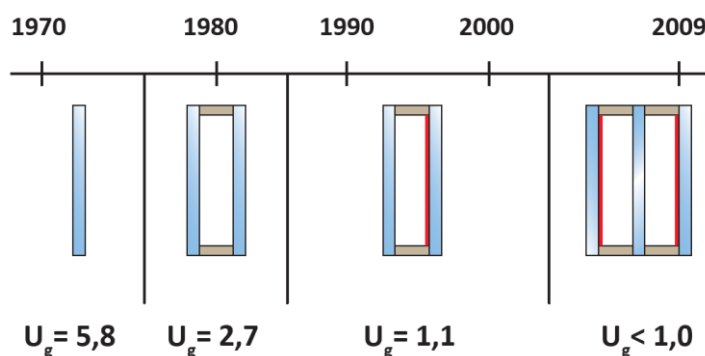
Hazánkban viszonylag lassan, de elterjedőben van a passzívházak építése, amelyek jelenleg a legszigorúbb követelményeket támasztják magával az épülettel, ezáltal az ablakokkal szemben is. Ezek az épületek gyakorlatilag tökéletes légzárással rendelkeznek, ezért csak külön szellőztetőrendszer mellett üzemeltethetőek, de erről a 2.8 fejezetben részletesebben is írok.

### 2.1.3 Az üveg, üvegszerkezet kialakulása, fejlődése

A napjainkban ismert és széles körben alkalmazott üveg története, hosszú múltra nyúlik vissza. Úgy ismeretes, hogy az üveget i.e. 5000 körül, véletlenül fedezte fel néhány föníciai kereskedő, amikor is Szíriában a Belo folyó mentén tábortüzet gyújtottak és a tűz melegétől megolvadt salétromtömbök összekeveredtek a part homokjával, amely egy új átlátszó, folyékony anyagot eredményezett.

A síküveg gyártása a franciáknak köszönhetően terjedt el. Ők fejlesztették tovább az évtizedekig titkolt velencei technikát. Az egyik legnagyobb, napjainkban is működő üvegyár (Saint Gobain) 1665-ben jött létre. A húzott üveg előállítására csak több száz évvel később, 1913-tól, míg a ma is ismert és alkalmazott úsztatott üveg (float) gyártására csak 1950-től nyílt lehetőség [web 6].

Azt követően, hogy az ablakok elsődleges funkciója a fényáteresztés lett, az üvegezés egyre hangsúlyosabb alkotóelemmé vált. A külső-belső légtér elkülönítése mellett ez tette/teszi lehetővé a fény bejutását és az átlátást. A korai ablakok esetében a szerkezethez képest még az (egyrétegű) üvegezés rendelkezett gyengébb hőtechnikai tulajdonságokkal, azonban az üvegezés fejlődésének (4. ábra, ahol  $U_g$  az üvegezés hőátbocsátási tényezője), az üveglapokkal közrezárt légrétegek, nemesgáztöltéseknek és az alacsony emisszivitású (Low-E) bevonatoknak köszönhetően ez olyan mértékben megváltozott, hogy az üvegezés, már jelentős feladatot vállalt az ablakok, és ezáltal az épületek hőszigetelő képességének javításában [Kószó 1988].



4. ábra. Az ablak üvegezésének hőtechnikai fejlődése

A mai, korszerű hőszigetelésű ablakok a legtöbb esetben kettős (egy darab Low-E bevonattal), ritkábban hármassal (két darab Low-E bevonattal) készülnek. Az üvegezési mód kiválasztásakor az alábbi szempontokat célszerű figyelembe venni:

- hőszigetelési igény,
- hangszigetelési igény,
- fény- és sugárzásátbocsátási követelmények,
- betörésállósági előírások.

A hagyományos hőszigetelt ablakok esetében alkalmazott kétrétegű üvegszerkezet ( $U_g=1,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) hőszigetelő képessége jelentősen meghaladhatja a keretét. Ez az arány még a jelenleg elérhető legmagasabb minőségnek megfelelő passzívház ablakok esetében is másfélszeres.

Amennyiben ki szeretnénk használni a Low-E bevonatos, korszerű hőszigetelő üvegezésekben rejlő energia-megtakarítási lehetőségeket, fokozott figyelmet kell fordítanunk az ablakkeret tulajdonságaira, az üvegtáblák minőségi kivitelére és a szárnyszerkezettel való hőhidmentes összekapcsolására, de legalább ugyanilyen fontossággal bír az ablak beépítése, hiszen a tok és a fal csatlakozása mentén jelentős hőhid alakulhat ki. Ennek mérséklésére szolgál, hogy a homlokzati szigetelést néhány centiméterre ráfordítják, ráengedik a tok peremére, azonban a beépítését követően, a passzívházaktól eltekintve nem történik meg a minőségi kivitelezés ellenőrzése [Debreczy 2010].

Természetesen az üvegezés fejlődése nem állt meg az alacsony emisszivitású üvegeknél, ezt követően jelentek meg a vákuum, a hőtükörfóliás („Heat Mirror”), az elektro-, termo-, foto- és gázkromikus, valamint a fűthető üvegezések, azonban ezek részletes ismertetésére nem térek ki az értekezésben. Az üvegezéssel szemben támasztott, olykor egymásnak ellentmondó követelményeknek köszönhetően, a fejlesztésre irányuló törekvések – és magas előállítási költségük miatt – még jó ideig a jövőbeni kutatások feladatait képezik.

#### 2.1.4 Az ablak teljesítőképességi jellemzői

Életvitelünk jelentős megváltozásának és a növekvő igényeknek köszönhetően az elmúlt néhány évtizedben óriási fejlődés ment végbe a lakásépítés területén. Egyre jellemzőbb lett az az igény, hogy a nagy üvegfelületeknek köszönhetően a lakás belseje a külvilág részévé váljon. A kilencvenes évek közepén megállapították, hogy az ablakfelületek növelésével az épületkülső általában harmonikusabb és esztétikusabb lesz, azonban a helyiségek klímája szempontjából ennek ára a megnövekedett hőveszteség. Gazdasági szempontból az ablakfelületek növelése kedvezőtlen hatásúnak tekinthető, így az ablakok minősége komoly jelentőséggel bír az épületek üzemeltetését tekintve [Kószó 1995]. Az építési célú termékek forgalomba hozatalának általános szabályait az Európai Unióban a 89/1006 EGK Építési Termék Irányelv, Magyarországon pedig, az 1997. évi Építési Törvény és végrehajtási rendelete szabályozza. A nyílászárókra vonatkozó előírásokat magyar és nemzetközi követelményszabvány tartalmazza. A külső homlokzati nyílászárók forgalomba hozatalához a termékeket CE- jelöléssel kell ellátni, amihez a gyártónak megfelelőségi nyilatkozatot is mellékelnie kell. A hatályos MSZ EN 14351:1-2006-os hazai és nemzetközi termékszabvány a homlokzati szerkezeteket érő hatások alapján 23 teljesítőképességi jellemzőt sorol fel,



amelyek közül az alábbi hat jellemző, adott ablaknál elért szintjét a CE tanúsítvánnyal közölni is kell:

1. légáteresztés,
2. hőszigetelés,
3. vízzárás,
4. szélállóság,
5. léghanggátlás,
6. biztonsági tartozékok terhelhetősége.

Sok esetben az említett jellemzők vizsgálata, illetve azok egymásra gyakorolt hatása nehezen szétválasztható. Például egy rossz légzárással rendelkező ablak nagy valószínűséggel rossz hőszigeteléssel fog rendelkezni. A tapasztalati megfigyelések arra utalnak, hogy az ablakok teljesítőképességi jellemzői (elsősorban a tömítettséggel kapcsolatos jellemzők) az ablak élettartama során a változó körülmények között ingadoznak, illetve azok hatására degradálódnak. Az ingadozást és degradálódást egyrészt környezeti hatások (időjárási tényezők), másrészt a használat, működtetéssel járó behatások váltják ki. Ez a tény, termék konstrukciós szempontból is érdekes, hiszen a teljesítményjellemzők nem kellő megbízhatóságú teljesülése az üzemeltetés során jelentős többlet-energia igényel, valamint a komfortérzet romlásával jár. A működési jellemzők romlása célirányos karbantartással, állagmegóvással bizonyos határok között tartható.

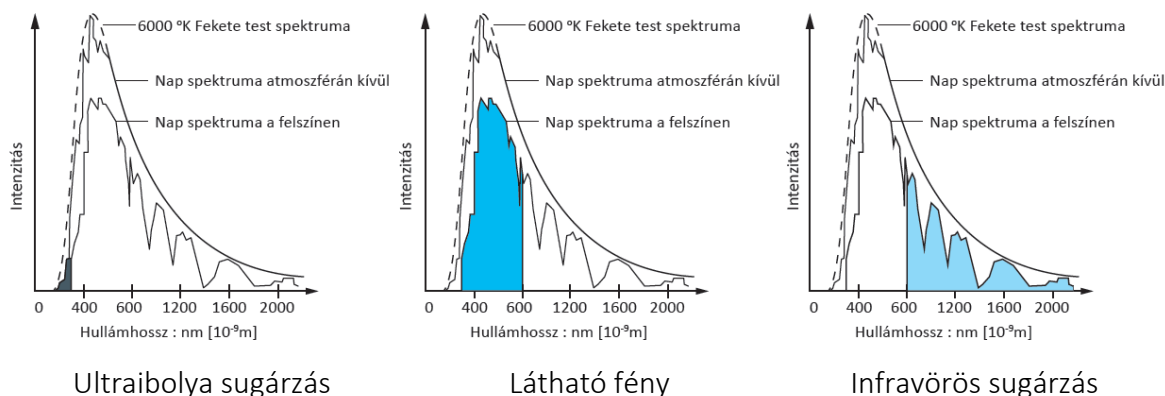
A kiemelt teljesítőképességi jellemzők elvárt szintjét a földrajzi régió, a beépítési magasság és az épület sarkától való távolság függvényében Magyarországon az MSZ 9333:2011 szabvány írja elő, míg a hatodik jellemzőhöz csupán minimum követelményértéket rendel.

### 2.1.5 Helyiségek természetes megvilágítása, fény és energia kapcsolata

Életünk során szoros kapcsolatban vagyunk a vizuális vagy látható környezetünkkel, hiszen az érzéki információink jelentős részéhez (kb. 90 %) látás útján jutunk, de tevékenységünk is legtöbbször látáshoz kötött. A belsőtéri vizuális környezet úgy alakul ki, hogy egy felületekkel, anyaggal határolt teret megvilágítunk, amelyet az ember egy meglehetősen bonyolult látási folyamat eredményeként érzékel [Bánhidi 2000].

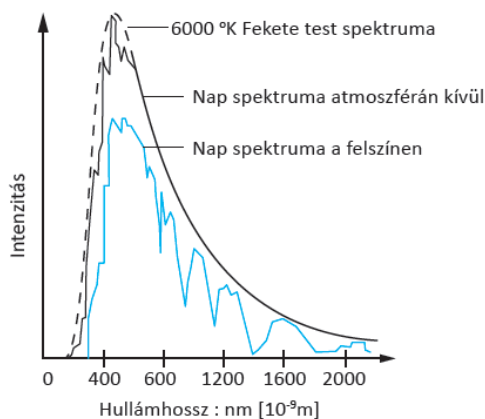
A helyiségek természetes megvilágításával szemben támasztott követelmények, a belső tér vizuális környezettel szemben támasztott általános igényei alapján fogalmazhatóak meg. A hasznosítható természetes fény nagysága naponként és az év folyamán nagyon széles határok között sztochasztikusan változik, amellyel összhangban a belső tér természetes megvilágítása is állandóan változik. A szükséges természetes világítás nagyságát a helyiségben végzett tevékenység jellege határozza meg. A helyiség természetes megvilágítását a belső tér határolófelületei és a berendezési tárgyak felülete által befolyásolják, hogy a beérkező természetes fényáram rajtuk többszörösen reflektál. A felületek reflexiós képességén túl nagy szerep jut a felületszórásnak is, illetve annak, hogy a reflexió mennyiben hullámhosszfüggő [Fekete 1985].

A napból érkező direkt sugárzás a légkörbe érve átalakul. A sugárzás egyik részét a gáz és a szilárd részecskék molekulái elnyelik, másik részét visszaverik, illetve szétszórják. Az eredeti sugárzás a légkörön áthaladva direkt és diffúz (szórt) sugárzásként, már csökkentett intenzitással érkezik le a talaj felszínére. A földfelszínre elérő napsugárzás spektrális eloszlása az 5. ábrán látható. A spektrumban 3 intervallumot különböztetünk meg: az ultraibolya sugárzást, a látható fényt, illetve a rövid hullámhosszú infravörös sugárzást.



5. ábra. A napsugárzás spektrális eloszlása [Forrás: Szikra 2008]

A sugárzási energiának a látható fény intervallumában majdnem a fele, míg a rövid hullámhosszú infravörös sugárzás esetében több mint a fele érkezik. Ezek a fűtőhatás szempontjából egyaránt fontosak, azonban a természetes világításban csupán a látható fénynek van jelentősége. A 6. ábrán a kék burkológörbe lokális minimum értékeinek az oka, hogy a levegőben lévő vízgőz, a felhőzet, a szilárd szennyezőanyagok a sugárzás egy részét (az egyes hullámhossztartományokban különböző mértékben) elnyelik, továbbá maguk is bocsátanak ki sugárzást. Ennek köszönhetően a levegő pillanatnyi nedvességtartalmának és szennyezettségének függvényében a görbe alakja is változhat.



6. ábra. A napsugárzás spektrális eloszlása [Forrás: Szikra 2008]

### 2.1.6 Energiatudatos építészet

Az alacsony energiaigényű épület továbbfejlesztéseként alakult ki a passzívház, amelynek prototípusa 1991 óta Darmstadt-Kranichstein-ben áll. A Lakás és Környezet Intézet (Institut Wohnen und Umwelt, IWU) projektje egy új, kiemelkedően ökológikus, technológiai építési szabványt alapozott meg, amely bizonyos feltételek teljesülése mellett optimális energia-

megtakarítást eredményez. Ennek megfelelően egy ilyen épületet nem egy adott szerkezet, hanem az ún. passzívház szabvány alapján határozzuk meg. A szabvány célja a hőveszteség csökkentése, és az energiaszükséglet majdnem nullára történő csökkentése, amellett, hogy a beltérben nagyfokú kényelemérzetet nyújtson.

A passzívház hagyományos aktív fűtési rendszer nélkül képes üzemelni. Ehhez az épületburokkal szemben különleges követelményeket támaszt. Így ahhoz, hogy a belső falfelület hőmérséklete a belső levegőhőmérséklet közelében legyen, a külső határoló szerkezet hőátbocsátási értéke nem léphet túl egy adott hőátbocsátási értéket. A hővisszanyerő rendszerrel működő mechanikus szellőztető rendszer hatékonyan, jelentős mértékben csökkenti a fűtési hőszükségletet. A kismértékű rásegítő fűtést egy talaj-hőcserélőre csatlakozó hővisszanyerő berendezéssel meg lehet oldani.

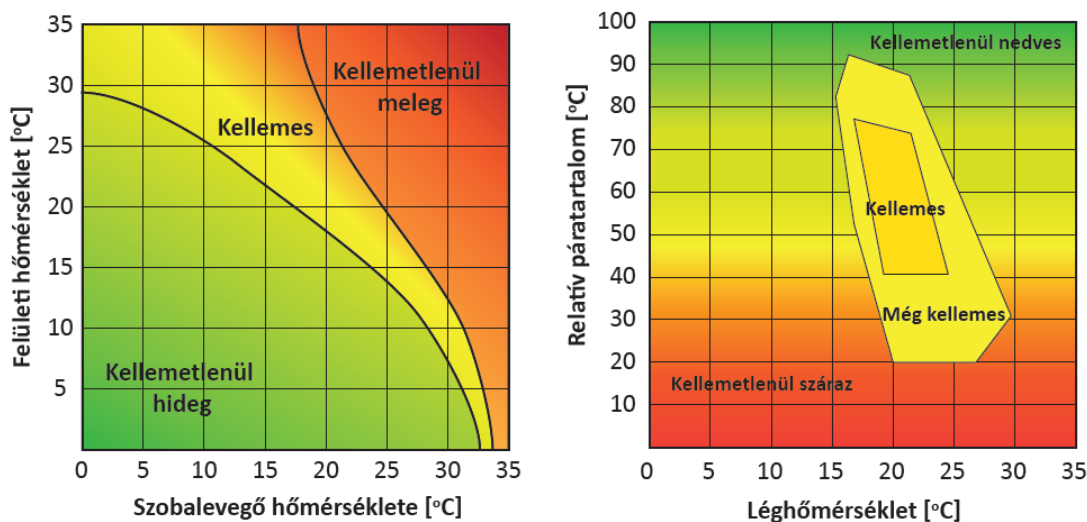
Manapság az épület energetikai hatékonyságának növelésére számos alternatíva áll rendelkezésre. A passzívház-ablak, az ún. melegablak a hagyományos hőszigetelt üvegezéshez képest a hőveszteség 70 %-át képes kiküszöbölni, ezért jelentősen hozzájárul az energia-megtakarításhoz. Ha emellett hővisszanyerő berendezéssel felszerelt szellőztető berendezést integrálnak a rendszerbe, akkor az energiafogyasztás a szellőzésből eredő hőveszteség csökkenése miatt a hagyományos szellőztető berendezésekhez képest 75-90 %-kal csökkenthető.

A hagyományos építési módokhoz képest a passzívház a 12.3 melléklet szerinti előnyöket kínálja, de ezek mellett számos kritika is megfogalmazódik. Az optimális energiahatékonyság mellett a passzívházban magas lakókomfort érhető el. Ahhoz, hogy a passzívház elveit optimálisan be tudjuk tartani, bizonyos szerkezeti feltételeknek teljesülniük kell. Ilyen például a légtömörség, a hőhídmentesség, a kompakt épülettömeg, illetve a tájolás.

A hőátbocsátásból eredő hőveszteség minimalizálásához a vastagon hőszigetelt épületburok elengedhetetlen, mivel ez teszi lehetővé az energiatárolást. A hőszigetelés télen megakadályozza, hogy az energia az épületből kijusson, míg nyáron nem engedi, hogy a hőség behatoljon. Ehhez a nem fényáteresztő szerkezeti elemek, pl. a fal-, a tető- és a padló szerkezet hőátbocsátási tényező ( $U$ -érték) esetében a téli hőveszteség minimalizálásához törekedni kell az  $U \leq 0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  értékre. A belső felületek hőmérséklete így kb. a léghőmérséklettel azonos, ami a lakótér nagyfokú kényelemérzetéhez járul hozzá, és kiküszöböli a pára okozta épületkárosodást.

Az ablakok hőátbocsátási tényezőjének  $U \leq 0,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  körül ajánlott lennie, míg az ablakok összesített sugárzásátbocsátó képességének ( $g$ -érték) célszerűen 50-60 % körül kell lennie. A követelményeket az ún. meleg-ablakok teljesítik, amelyek  $U_w$  értéke  $\leq 0,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , míg a sugárzásátbocsátási tényezője,  $g \geq 50$  %. Nyáron a benapozást árnyékolókkal szabályozhatóvá kell tenni az épület túlmelegedésének elkerülése érdekében. Az üvegezett nyílászáró szerkezetek (keretszerkezetek és üvegezések) folyamatos fejlődésének eredményeként lehetőség van a külső falak hőszigetelő mértékéhez közelítő, jó hő- és hangszigetelésű, illetve lég- és vízzáró képességű szerkezetek beépítésére.

A kényelemérzet a test szubjektív érzete, amely több tényezőbből tevődik össze. Az ember komfortérzete javarészt a levegő és a környező szerkezetek, mint például a falak és a padló felületi hőmérsékletétől függ, valamint a relatív páratartalomtól (7. ábra), a szellőzés jellegétől és időtartamától és az épületszerkezetek hőtároló képességétől, mivel az ember a környezetével folyamatosan hőt közöl. Ennek során a levegő és az épületszerkezetek hőmérséklete kölcsönösen kiegészíti egymást.



7. ábra. A komfortérzet a felületi hőmérséklet függvényében (bal oldal), valamint a relatív páratartalom függvényében (jobb oldal) [Forrás: Sommer 2010]

Ha a falak felületi hőmérséklete 10 °C, a magas szobahőmérséklet ellenére sem feltétlenül érhetünk el magas kényelemérzetet. A környezet, különösen a falak közelében, túl sok hőt von el az emberi testtől. Ha azonban a teret körülvevő felületek hőmérsékletét 20 °C-ra emeljük, és ezzel egyidejűleg 17 °C-ra csökkentjük a szobahőmérsékletet, akkor kellemes lakóklimát kapunk, miközben fűtési energiát takarítunk meg (lásd a 7. ábrát).

Az ember közérzete 40-70 %-os relatív páratartalom között, és kb. 20 °C-os szobahőmérséklet mellett a legjobb. Ez is mutatja a relatív páratartalomtól és a szobahőmérséklettől való függést. A hőmérséklet csökkentése a relatív páratartalmat növeli, és fordítva.

A passzív ház épületek mellett találkozhatunk olyan könnyűszerkezetes faházakkal kapcsolatos kutatással is, amelynek keretében a légréteg vastagságának megosztásával a nyugvó levegő hővezetését sikerült megközelíteni. A megoldás egyúttal a sugárzásos hőátvitelt is minimalizálja. Ezt a falszerkezetben a homlokzat síkjával párhuzamosan kifeszített tükörpanelek (hőtükör-fóliák) segítségével Pásztorinak (2007) sikerült elérni.

## 2.2 Tudományos előzmények

### 2.2.1 A hőterjedés folyamata

A műszaki gyakorlatban nagy fontossága van a hőközlés különböző formáinak. A hőközlés, vagyis a hő transzportja mindig hőmérsékletkülönbség hatására alakul ki és az eddigi tapasztalatok szerint mindig a magasabb hőmérsékletű helyről áramlik az alacsonyabb hőmérsékletű hely felé. A hőközlés folyamatát hőterjedésnek hívjuk, amelynek 3 különböző

formáját különböztetjük meg: a hőáramlást (konvekció), a hővezetést és a hősugárzást. A gyakorlati életben ezek általában egy időben jelentkeznek, de a három közül jellemzően az egyik dominánsabb szerepet játszik.

Konvekció esetében a hőszállítás, a test anyagi részeinek elmozdulásával, helyváltoztatásával kapcsolatos, ezért csak folyékony és gáznemű közegeknél fordulhat elő. Ennél a folyamatnál az áramló közeg nagyságrendekkel nagyobb a molekuláris méretekhez képest és entalpiájának megfelelő energiát képes szállítani. Mivel az áramló közegben is vannak hőmérsékletkülönbségek ez a típus mindig hővezetéssel kapcsolatos. Az energiát szállító közeg rendszerint egy szilárd testnek adja át (vagy attól veszi fel) a hőt. A hőátadási folyamat során a szilárd anyag mellett a folyadékrészek folytonosan áramlanak és váltják egymást.

Hővezetés során a hőcsere a test egymással közvetlenül érintkező részecskéi között megy végbe, tehát a hő részecskékről részecskékre vándorol. A hővezetési folyamat molekuláris méretekben zajlik és az anyag halmazállapotától függően különböző sebességű molekulák ütközése révén, vagy longitudinális rezgések, esetleg elektronmozgás formájában megy végbe.

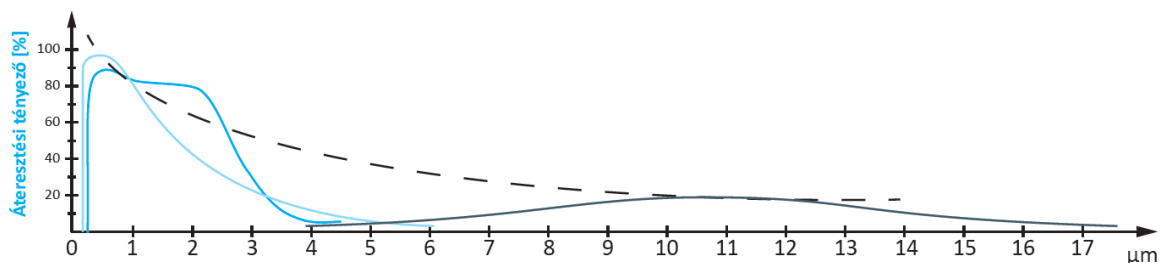
Hősugárzás esetében az energiát kibocsátó testről a hő, sugárzó energia (elektromágneses hullám) formájában terjed a térben és amikor egy másik felülethez érkezik, ott az energia elnyelődő hányada ismét hővé alakul. Ehhez a típusú energiaközléshez nem szükséges, hogy a teret valamiféle anyag töltsse ki, az vákuumban is végbemegy.

### 2.2.2 Transzparens test energiamérlege

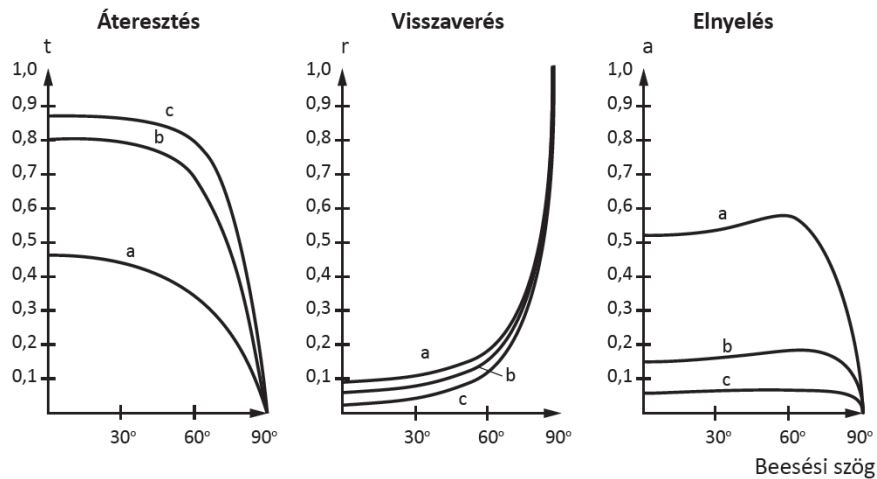
Ha egy test felületét sugárzás éri, a felületre jutó energiával három dolog történhet:

- a felület az energia egy részét elnyeli (abszorpció),
- a felület a sugárzás egy részét visszaveri (reflexió),
- a felület és a mögöttes anyag a sugárzás egy részét változatlan hullámhosszúságú sugárzás formájában a belső térbe átereszt (transzmisszió).

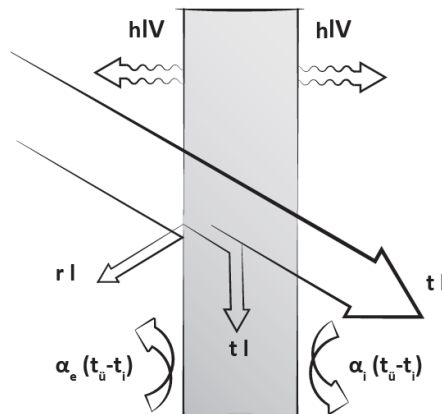
Az elnyelt, visszavert és áteresztett energia összege megegyezik a felületre jutó energia nagyságával. Az üveg visszaverési és áteresztési tényezője a hullámhossz függvényében, míg az áteresztési tényező a beesési szög függvényében is változik, de a hosszuhullámú infrásugárzás (8. ábra) az üvegen már nem tud áthatolni (9-10. ábra) [Fekete 1985, Bánhidi 2000].



8. ábra. Az üveg áteresztési tényezője a hullámhossz függvényében [Forrás: Szikra 2008]



9. ábra. Az üveg áteresztési tényezője a beesési szög függvényében, ahol a: elnyelőüvegre, b: 6 mm vastag normálüvegre, c: 3 mm vastag normálüvegre vonatkozik [Forrás: Fekete 1985]



10. ábra. Transzparens test energiámérlege [Forrás: Fekete 1985]

A külső felület az elnyelt sugárzás következtében felmelegszik és miután többnyire kis tömegű és igen vékony rétegről van szó, a felmelegedés gyors és gyakorlatilag a teljes keresztmetszetben (vastagságban) egyenletes. A felmelegedett szerkezet mindkét oldaláról konvektív hőátadással hőt juttat a külső, illetve a belső közegbe, valamint ugyanezen felületek hosszuhullámú infrásugárzást is bocsátanak ki a környezet, illetve a belső tér felé. Így a belső térbe nemcsak az áteresztett sugárzás révén jut be energia, az elnyelt hő egy része is a helyiségbe jut a szerkezet belső felületéről, hőátadás és saját sugárzás formájában. Az üvegezés belső felülete és a helyiség levegője közötti konvektív hőátadás a kisebb légmozgás miatt kevésbé intenzív, mint a külső oldalon. Az üvegezésre a helyiség felől hosszuhullámú infravörös sugárzás jut, amelyet az üveg nem enged át, tehát ez részben elnyelődik, részben visszaverődik. A szokványos üvegezés a helyiség felől érkező hosszuhullámú infravörös sugárzás mintegy 80 %-át elnyeli, ezáltal jelentősen felmelegszik és a nagyobb hőmérsékletkülönbség következtében a környezetbe távozó hőveszteség is nagyobb lesz, tehát ha a belső felület kevesebb hosszuhullámú infravörös sugárzást nyel el, akkor az üvegezés kevésbé tud felmelegedni, így a hőveszteség is kisebb lesz.

Az üvegezésen átjutó napsugárzás a belső felületeken elnyelődve azok felmelegedését okozza. Megnövekedett intenzitású saját sugárzásuk a távoli infra tartományba esik, ami a helyiség felmelegedését eredményezi. Ez az ún. üvegházhatás a téli és nyári időszakban is

jelentős szerepet játszik. Télen az üvegházhatás révén "csapdába esett" sugárzási energia a hőveszteség jelentős hányadát, akár 15-30 %-át is fedezheti. Ebből a szempontból az a transzparens szerkezet előnyös, amely a napsugárzás nagy részét áttereszti, de hőátbocsátási tényezője minél kisebb, mert így a környezetbe távozó hőáram is kicsi. Nyáron ezzel ellentétes igény fogalmazható meg, hiszen a belső térben kialakuló hőmérséklet, avagy klimatizálás esetén a hűtés energiaigénye döntően az üvegezésen keresztül bejutó sugárzási hőáramtól függ.

Az üvegezett nyílászáró szerkezeten keresztül (téli és nyári időszakban is) a külső-belső tér között létrejövő hőmérsékletkülönbség hatására kialakuló transzmissziós hőáramot az alábbi összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$Q_r = A \cdot U_w \cdot (t_i - t_e) \quad (1)$$

ahol:

$Q_r$  a hőáram [W]

$A$  az ablak felület [m<sup>2</sup>]

$U_w$  az ablak eredő hőátbocsátási tényezője [W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>]

$t_i$  a belső levegő hőmérséklete [°C]

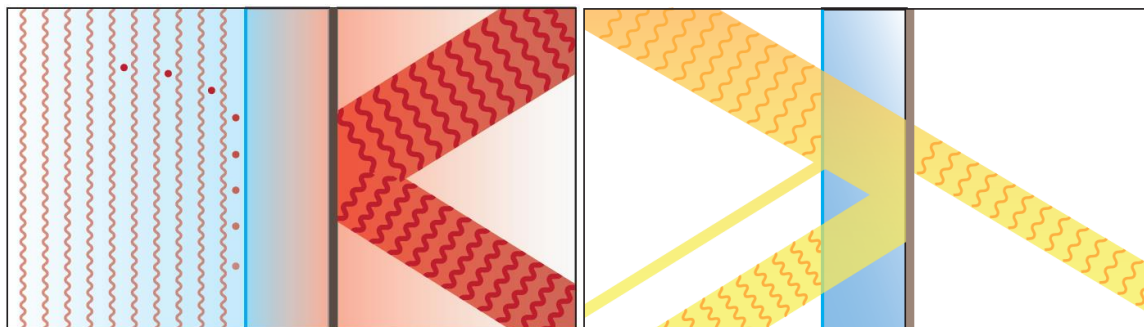
$t_e$  a külső levegő hőmérséklete [°C]

Az 1. táblázatban a float üveg vastagságának függvényében látható az üveg által visszavert látható fénysugárzás aránya (LR), a látható fény át bocsátott hányada (mennyisége) (LT), valamint a napenergia közvetlenül visszavert (ER), elnyelt (EA) és át bocsátott (ET) hányada. Az SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) angol indexelés a napsugárzásos hőnyereség tényezőt jelöli.

1. táblázat. A float üveg fizikai jellemzői a vastagság függvényében [Forrás: EAG 2008]

Típus	LT [%]	LR [%]	SHGC [%]	ET [%]	ER [%]	EA [%]
Float 4 mm	90	8	85	83	8	9
Float 5 mm	89	8	84	81	7	12
Float 6 mm	89	8	82	79	7	14
Float 8 mm	87	8	80	75	7	18
Float 10 mm	86	8	78	72	7	21

Az üveg hőtechnikai viselkedése jelentős mértékben javítható alacsony emissziós (Low-E) bevonat alkalmazásával, amely a helyiség felől érkező hosszuhullámú infravörös sugárzás nagy részét (70-75 %) visszaveri (11. ábra), így az üvegezés kevesebb energiát nyel el, hőmérséklete alacsonyabb lesz és ennek eredményeként kisebb lesz a környezet felé távozó hőáram. Az a fólia, amely a külső tér felől érkező napsugárzás jelentős részét vissza tudja verni a környezet felé, jelentősen csökkentheti a belső tér nyári túlmelegedésének kockázatát (11. ábra). Már léteznek olyan bevonatok, amelyek a téli és nyári, egymásnak ellentmondó körülmények ellenére mindkét irányú hőáramlást hatékonyan mérséklék.



11. ábra. Low-E fóliával ellátott üvegezés téli (bal oldal) és nyári (jobb oldal) hővédelme [Forrás: Szikra 2008]

A valódi transzparens szerkezetek általában több rétegből állnak (két-három üvegtábla). Energiámérlegük sémája a most bemutatotthoz hasonló, de az egyes felületek között lejátszódó többszörös visszaverődés, illetve a légrétegekben lejátszódó összetett vezetési, átadási és sugárzási folyamatok nagyon bonyolulttá teszik.

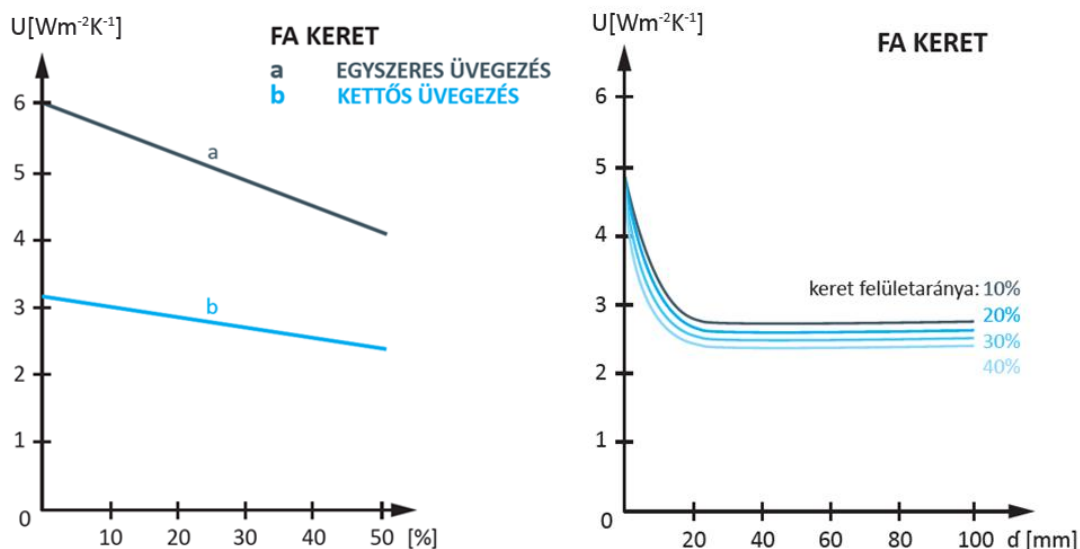
Az áteresztő szerkezetek energiámérlegének pontos számítása meglehetősen bonyolult és hosszadalmas lenne, ezért a tervezés megkönnyítésére egy egyszerűsített eljárást dolgoztak ki. Ennek eredményeként egy viszonyszám jött létre, a naptényező ( $N$ ), amelynek ismeretében az áteresztő szerkezet egységnyi felületén át a helyiségbe jutó energiaáram ( $q$ ) a 2. képlet alapján határozható meg. Értéke mindig nulla és egy között van. A képletben szereplő  $I_{SRG}$  az etalonszerkezeten át (3 mm vastag síküveg) a belső térbe jutó energiaáram [Fekete 1985].

$$q = I_{SRG} \cdot N \quad (2)$$

Szabó (1982) szerint a belső térbe sugárzással bejutó energiaáram nagyobb része azonnal, míg kisebb hányada gyakorlatilag csak néhány visszaverődés után nyelődik el. Az elnyelt energiától felmelegedett felületek hőátadással, illetve saját hőmérsékletüknek megfelelő hullámhosszon való sugárzással melegítik környezetüket [Bánhidi 2000].

A helyiségbe jutó fény (energia) mennyiségét az ablakok méretével hatékonyan befolyásolhatjuk, de önmagában még nem jelent garanciát a nagyobb névleges ablakméret, hiszen nem elhanyagolható a keret (tok és szárny) és üvegezés egymáshoz viszonyított aránya sem. Korszerű ablakszerkezetek esetében már nem elfogadható Fekete (1985) megállapítása, miszerint a tömörfa ablakok keret arányának növelésével az ablakszerkezet hőátbocsátási tényezője csökken. A tömörfa ablakok hőátbocsátási tényezőjét a keretszerkezet aránya a 12. ábra szerint, míg vastagsága a 2. táblázat szerint befolyásolja. Megjegyzendő, hogy az idézett forrás általánosságban jellemzi a tömörfa ablakokat, hiszen sok más jellemző mellett pl. a ténylegesen alkalmazot fafaj milyensége sem elhanyagolható. Feltehető, hogy a szerző a széleskörűen elterjedt erdeifenyő (*Pinus sylvestris*) kertetet veszi alapul.





12. ábra. Hőátbocsátási tényező az ablakkeret arányának (bal oldal), valamint a keret felület-arányának és a légréteg vastagságának (jobb oldal) függvényében [Forrás: Gábor és Zöld 1981]

2. táblázat. Hőátbocsátási tényező az ablakkeret vastagságának függvényében [Forrás: Zöld 2006]

Vastagság [mm]	Hőátbocsátási tényező [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
56	1,6 - 1,8
62	1,4 - 1,5
68	1,2 - 1,3
80	1,0 - 1,1

A két és háromrétegű üvegszerkezetek átlagos, gáztöltéstől függő hőátbocsátási tényezőit a 12.4 melléklet tartalmazza.

Az eddigiek szerint megállapítható, hogy az épületek energetikai viselkedését az alkalmazott üvegszerkezetek mérete, szerkezete (és teljesítőképessége) egyaránt befolyásolja. Ebből következik, hogy hangsúlyozottan foglalkozni kell az üvegezett homlokzati nyílászárók:

- hőátbocsátási tényezőjének javításával,
- az üveg-keret arányának optimális meghatározásával,
- megfelelő teljesítőképességű üvegezések tervezésével, létrehozásával és
- társított szerkezeteinek helyes megválasztásával.

A fenti jellemzők kellően átgondolt alkalmazásával csökkenthetjük a fűtési hőszükségletet, így a fűtési időszakban energia takarítható meg, ugyanakkor a nyári túlmelegedés is hatékonyan mérsékelhető, amellyel a hűtési energiaigény csökkenthető.

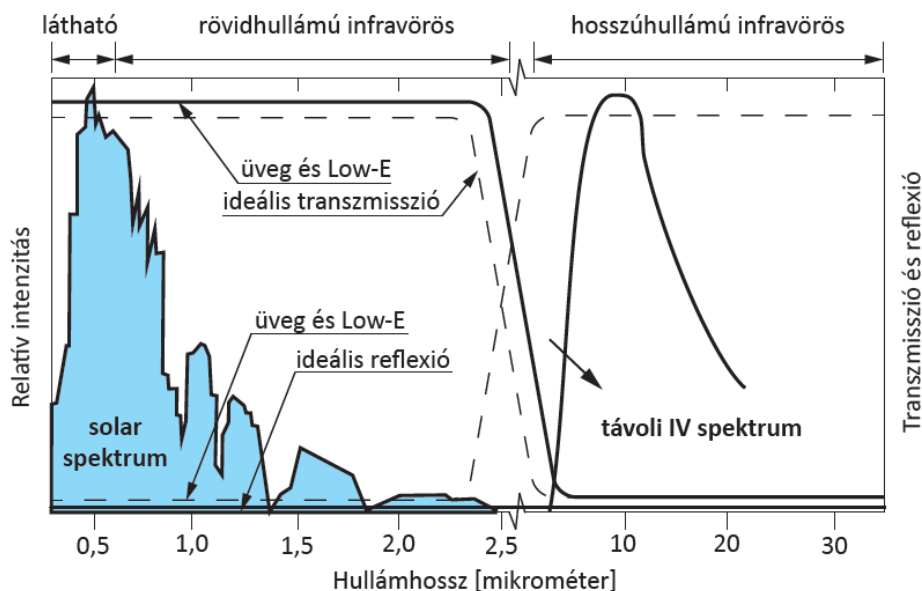
Az ablakok felületének nagyságát és hőtechnikai paramétereit össze kell hangolni a belső tér hőtároló képességével, ugyanis a nagy üvegfelület csak abban az esetben jelent szoláris nyereséget, ha a helyiség megfelelő hőtárolóképességgel rendelkezik, hogy azt hasznosítani tudja. A jelenleg érvényben lévő magyar Építésügyi Ágazati Szabvány (MSZ-04-120-2:1991) szerint 1 m<sup>2</sup> tökéletesen áteresztő nyílás mögött minimum 2000 kg aktív hőtároló tömegre van szükség. E nélkül a belső térbe jutó sugárzási energia túlmelegedést okoz [Zöld 1999].

Az említett szabvány tartalmának felülvizsgálta indokolt lehet, hiszen bizonyos értékek, paraméterek csak a szabvány kibocsátásakor elérhető anyagokra és jellemző technikai színvonalra vonatkoznak, azok nem feltétlenül harmonizálnak a napjainkban elérhető anyagokkal, megoldásokkal.

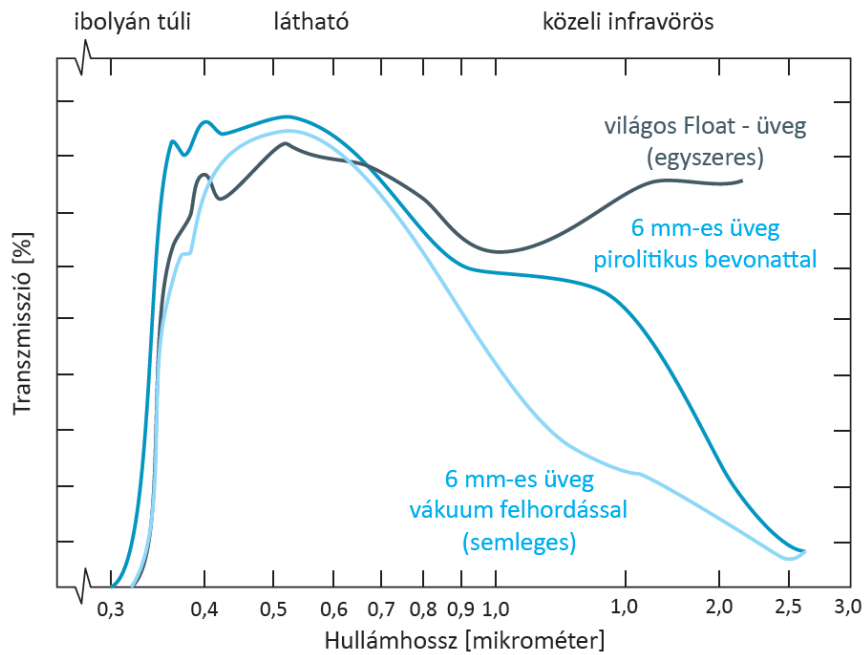
Az eddigiek összegzésekképpen megállapíthatjuk, hogy épületeink külső határoló felületeinek hőszigetelése nem csak gazdaságossági, hanem környezetvédelmi szempontból is különösen fontos feladat, hiszen épületeink hőveszteségének jelentős része ezeken a felületeken keresztül realizálódik.

### 2.2.3 Üvegezések fontosabb jellemzői

Az alacsony emissziós (Low-E) bevonatot úgy alakítják ki, hogy a felületre egy nagyon vékony, de tartós ezüst-bevonatot visznek fel, amely jó hő- (infravörös-) visszaverő tulajdonságot biztosít. A jelenlegi ismeretek szerint ennek van a legjobb szoláris transzmissziója. Antireflexiós bevonatnak titán-, vagy indium-oxidot, esetleg cink-oxidot alkalmaznak ugyanis ezek jól ellenállnak az ultraibolya hatásnak, és emellett keményebbek is. A rétegek felhordásra többféle technológia (szórás, vákuum-porlasztás, pirolitikus) ismert az üvegyiparban, amelyek részletes ismertetésére nem térek ki. Nagyfokú átlátszósága miatt építészeti szempontból előnyösen alkalmazható. Ide sorolhatjuk azokat az üvegeket, amelyeknek emisszivitása a 0,2-es értéknél alacsonyabb (ez kis epsilon ( $\epsilon$ ),  $\epsilon \leq 0,2$ ). Spektrális tulajdonságuknak köszönhetően jelentősen csökkenthetik az üvegszerkezetek hőátbocsátását, ugyanis a transzmissziós hőátbocsátás közel 60 %-át az üvegfelületek között létrejövő sugárzásos hőátvitel teszi ki [Széll 2001]. A hagyományos és a Low-E üvegek jellemzőinek összehasonlítása a 13. és 14. ábrán látható.



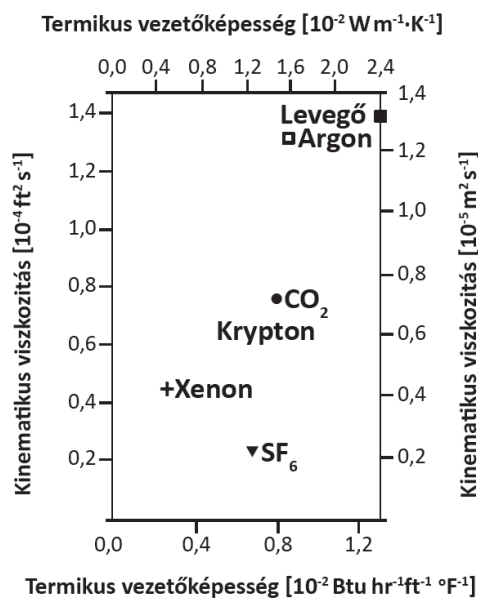
13. ábra. A hagyományos és Low-E üveg jellemzőinek összehasonlítása [Forrás: Johnson 1991]



14. ábra. Egy hagyományos és két Low-E üveg transzmissziós görbéi [Forrás: Johnson 1991]

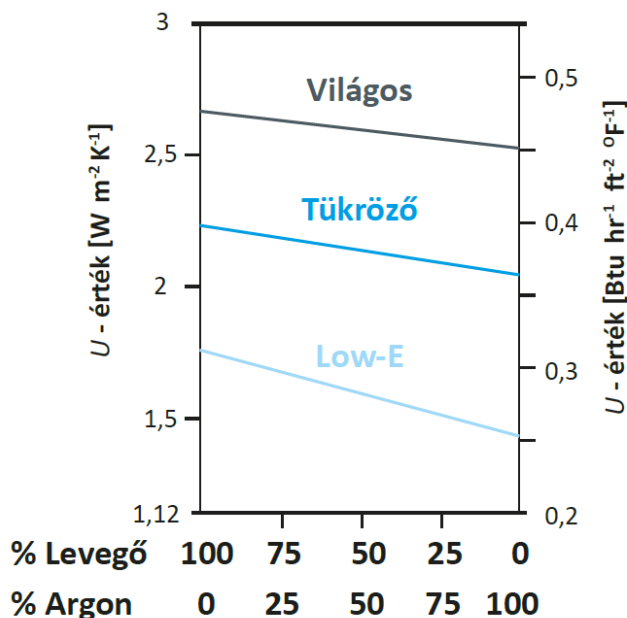
Az üvegfelület emisszivitásának jelentős csökkentésével minimalizálható a sugárzásos hőcseré az infravörös tartományban, de a hővesztések további csökkentésére kézenfekvő megoldásnak tűnik az üvegek közé bezárt levegő helyettesítése egy viszkozusabb, szigetelő gázzal. Ez azonban csak bevonatos üvegek esetén működik hatékonyan [Pintér 2009].

A hőszigetelő üvegezéseknél az üvegtáblák közti teret legtöbbször nem száraz levegővel, hanem argon, kripton, esetleg xenon gázzal töltik ki, mivel hővezető képességük sokkal kisebb, ezáltal hőtechnikailag kedvezőbbek. Erre vonatkozóan a 15. ábrán láthatunk egy összehasonlítást. A két változó közül a vezetőképesség a fontosabb, de azt is figyelembe kell venni, hogy a viszkozitásnak egy minimális értéknél nagyobbnek kell lennie, különben a konvektív hőátadás növekedése rontja a teljesítményt.



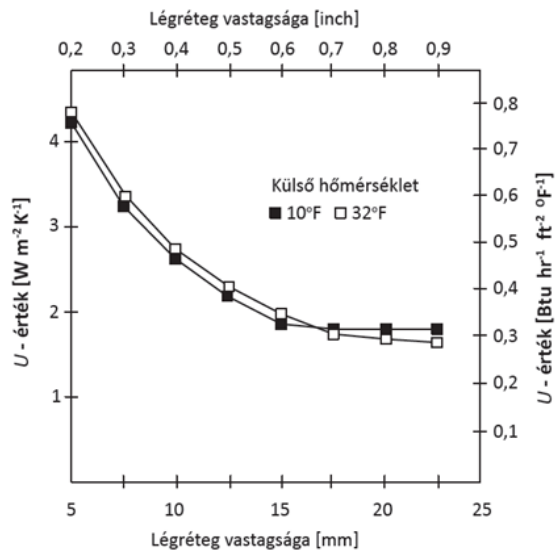
15. ábra. Gáztöltés jellemzői [Forrás: Johnson 1991]

Annak ellenére, hogy a grafikonon a levegő viszkozitása a legnagyobb, nem ez lesz az ideális gáztöltés, ugyanis vezetőképessége is nagyon nagy, ami miatt a levegő, a legkevésbé ideális a hőtranszport minimalizálására. A feltüntetett gáztípusok közül relatív alacsony ára és tehetetlensége miatt az argont alkalmazzák leginkább. Az argon töltés nagyságrendileg 1/3-ával növeli egy kettős Low-E üvegezés  $R$ -értékét és a 16. ábra szerint hatékonyan csökkenti az üvegezés  $U$ -értékét.



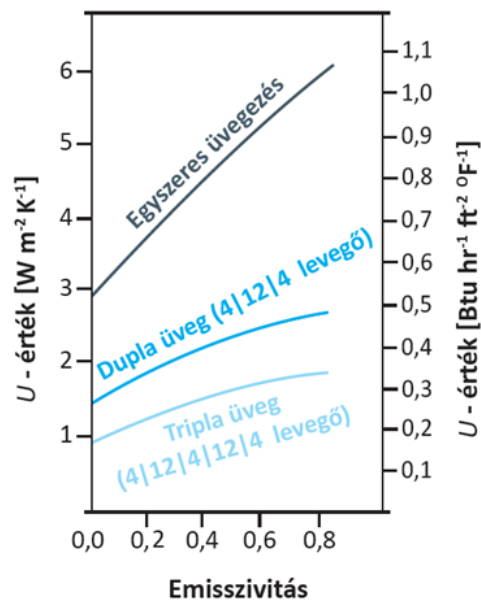
16. ábra. Levegő és argon arányának hatása az üvegezés  $U$ -értékekre [Forrás: Johnson 1991]

Amennyiben az üvegezés és így az ablak vastagsági mérete nem lenne „korlátos”, azt lehetne mondani, hogy mivel a gáztöltés (levegő vagy argon) egy szigetelő anyag, minél vastagabb annál jobb a szigetelőképesége. Azonban ez a megállapítás ebben a formában nem helytálló. A 9 mm-nél vékonyabb rések esetében, a súrlódás következtében a helyén marad a kitöltő gáz, amelynek szigetelőértéke abból adódik, hogy a konvektív hőáramlást visszatartja. A szigetelés javul ahogy a rések vastagszik, egészen addig a pontig, amíg konvekció nem jön létre, akkor ugyanis a gáz a meleg oldalon szabadon fel tud emelkedni, mivel a szemben lévő üveg-oldal már olyan messze van, hogy súrlódással nem képes megtartani. Miután a feláramló gáz eléri a rések tetejét, a szemben lévő oldal lehűti azt, aminek köszönhetően egy áramlási kör (konvekció) jön létre. Ennek eredményeként a hő a meleg oldalról a hideg felé szállítja. A 17. ábrán látható, hogy adott esetben létezik egy optimális választóvonal, amely alatt még nem jön létre konvekció.



17. ábra. Dupla üvegezés U-értéke a légréteg vastagságának függvényében [Forrás: Johnson 1991]

Az alacsony emissziós bevonat a 18. ábrán látható görbék szerint befolyásolja az egyszeres, a dupla, illetve a tripla üvegezések hőátbocsátását.

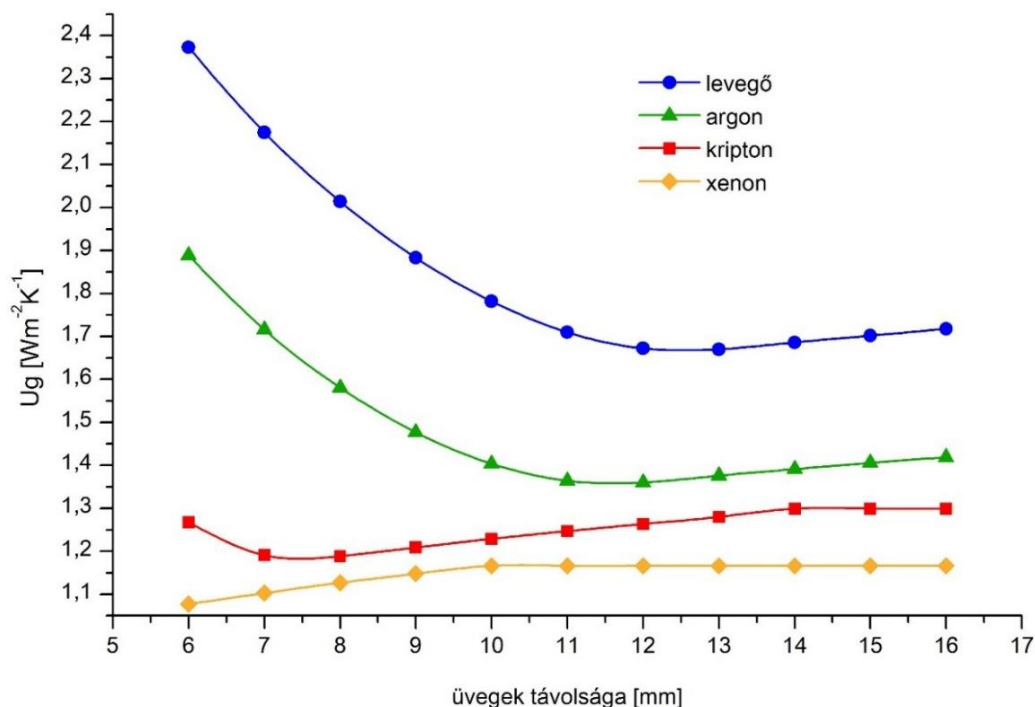


18. ábra. U-érték változás az emisszivitás függvényében különböző üvegszerkezetek esetén [Forrás: Johnson 1991]

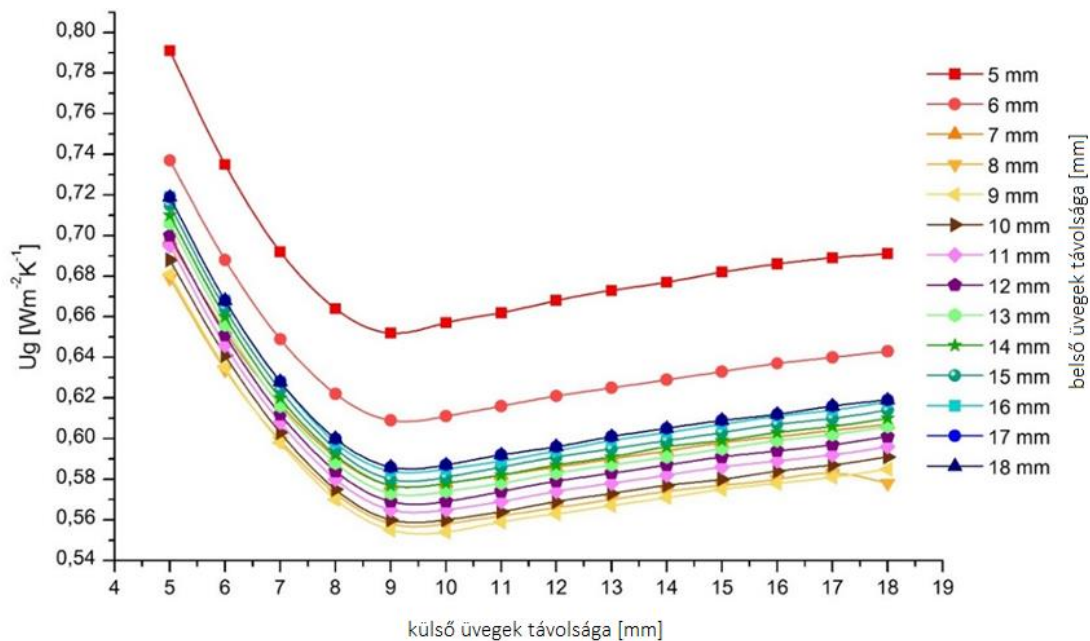
A szakirodalomban fellelhető korábbi, gáztöltésű üvegezések esetében végzett kutatások eredményei ellenére, az EN ISO 10077-es szabványcsomag útmutatásai alapján, az ott szereplő peremfeltételekkel mi is végeztünk vizsgálatokat konkrét üvegezés és gáztöltésre vonatkozóan, amelyet az ablak keretszerkezettel történő kombinált vizsgálata, illetve az eredmények későbbi összehasonlíthatósága indokolt.

Számítógépes elemzéssel meghatároztuk, mely „üvegtávolság-gáztípus” párosítás eredményez kedvezőbb hőátbocsátást. Az alkalmazott gázrétegek vastagságától függően a Low-E bevonatos kétrétegű üvegezés hőátbocsátási tényezője a 19. ábrán, míg egy kriptonos töltéssel rendelkező háromrétegű üvegezésé a 20. ábrán látható karakterisztikák szerint

változik. Több üvegréteg alkalmazása több zárt légteret eredményez további szigetelőhatás érdekében, de a fénytanszmisszió kárára.



19. ábra. Kettős üvegezés hőátbocsátási tényezője az üvegtávolság-gáztöltés függvényében [Forrás: Elek et al. 2010]



20. ábra. Az  $U_g$ -érték változása 3 üvegréteg és kripton gáztöltés esetén az üvegek távolságának függvényében [Forrás: Elek et al. 2010]

A 19. és 20. ábráról leolvasható minimum értékek alapján azt mondhatjuk, hogy számítógépes vizsgálataink eredményei nem támasztották alá Pintér (2009) megállapítását, miszerint a kriptonnal való töltés esetén az optimális résszélesség kisebb 6 mm-nél. Természetesen azt is szem előtt kell tartanunk, hogy az üveg átlagos hőmérsékletének

változása hatással lehet erre, így olyan résméretet kell választani, amely a gyártást nem nehezíti, és jól működik hőmérsékletváltozások mellett is.

Az üvegszerkezetek hőátbocsátási értékét nem csak alacsony emissziós bevonattal, nemesgáz töltéssel és több üvegréteggel (illetve közrezárt légtérrel) befolyásolhatjuk, hiszen az ablak hőteljesítményét a „szélek” geometriája, keretbe foglalása is jelentősen befolyásolja. A legtöbb hőszigetelő üvegnél még napjainkban is fém távtartót alkalmaznak, amelynek kiváló hővezető képessége miatt, üveggel való találkozása mentén jelentős hőmérsékletkülönbség alakulhat ki az üvegezés központi részéhez képest, ami elősegítheti a páralecsapódást. Erre megoldásként született meg az ún. meleg-peremes távtartó, amely jelentősen csökkenti a fém-üveg kapcsolat mentén kialakuló hőhidat. Azonban a magas hővezető-képességű fém-távtartón keresztüli hőveszteség mennyisége nem jelentős, a hagyományos dupla üvegezés középrészén keresztül létrejövő hőveszteség mennyiségéhez viszonyítva [Pintér 2009].

Mindent összevetve azt mondhatjuk, hogy a különféle nemesgáz töltések kedvezően befolyásolják az üvegszerkezetek hőátbocsátását, azonban hosszú távú hőátbocsátásra gyakorolt kedvező hatásuk, hatékonyságuk meglehetősen kérdéses. Egyrésről a gyártási technológia pontatlanságából fakadóan előfordulhat, hogy nem a megfelelő mennyiségű töltőgáz kerül az üveglapok által közrezárt mezőbe, illetve kérdéses az üveglap-távtartó kapcsolat hosszú távú szigetelő (gáztartó) képessége is. A gyártást és beépítést követően a vásárló nem tudja ellenőrizni, hogy ténylegesen milyen az üveglapok közötti tér gáztöltöttségi szintje. Ennek pontos megállapítására roncsolásos laboratóriumi vizsgálattal, közelítő meghatározására pedig a *TESTO* cég által erre a célra kifejlesztett speciális mérőműszerrel van lehetőség, amelyről a 4.3 fejezetben részletesebben írok. Mindenesetre erre vonatkozóan rendszeres időközönként megismételt hosszú távú helyszíni vizsgálatokat tartok szükségesnek, ugyanis ezek a helyszíni mérések jellemzik a legpontosabban az ablak valós körülmények közötti viselkedését, teljesítőképességét.

Az alacsony emissziós bevonat teljesítménye (emisszivitás tekintetében) elérte az elméleti és gyakorlati határt, így további csökkentése már nem javítana szignifikánsan az üvegezés hőellenállásán.

A leírtakból az következik, hogy az üvegezés minősége, kialakítása nem elhanyagolható, sőt döntően befolyásolja az épület, ablakszerkezeten keresztüli hőveszteségét (és természetesen hőnyereségét is). Az üvegezés minőségét energia takarékosági szempontból az  $U$ -érték jelöli, amely a hőátbocsátás mértékét határozza meg. Mivel ez az érték nem a szigetelést mutatja, minél kisebb, annál jobb hőszigeteléssel rendelkezik az adott üvegezés. Összességében azt mondhatjuk, hogy ablakok esetében nem érdemes a minőség rovására választani, hiszen az energiatakarékosság pontosan olyan mértékű lesz, mint amilyen a beépítésre kerülő ablak minősége.

## 2.3 Nanotechnológiás rétegeképítés és annak modellezési lehetősége

Általánosságban a nagy üvegfelületek nagy hőveszteséget jelentenek a hideg, téli hónapokban és nagy hőtöbblet beáramlását jelenthetik a forró, nyári napsütéses napokon. Ez utóbbi a téli fűtésigénnyel azonos nagyságrendű problémát jelent. A nagy üvegfelületekről az arany vékonyréteg hatékonyan veri vissza a hőt adó infravörös sugárzást, azonban a fémes bevonat és az arany magas ára nem teszi lehetővé a széleskörű alkalmazást [Fang et al. 2013]. Szélesebb körben alkalmazott az ultravékony ezüst bevonat, amely tartós hő- (infravörös) visszaverő, de a látható tartományon áteresztő [Pintér 2006]. Kutatásokkal igazolták, hogy bizonyos félvezető, fénoxid anyagokból felépülő vékony rétegek szintén megfelelőek erre a célra. Ha ezeknek az anyagoknak a gerjesztési küszöbenergiája elég nagy ( $\sim 3\text{eV}$ ), akkor a látható tartományon áteresztők, illetve, ha a szabad elektron koncentrációjuk is nagy, az ezekből készült filmek nagymértékű reflexiót mutatnak az infravörös tartományon [Fang et al. 2013].

### 2.3.1 Az elektrosztatikus önrendeződés rétegeképítés technológiája

A vékony, nanoszerkezetű réteg/rétegek kialakításához használatos eljárások között szerepel például az atomi rétegleválasztás (ADL), az impulzus leválasztás (PLD), a vákuumpárologtatás (PVD, CVD), a porlasztás, a szol-gél, a centrifugális erő segítségével történő (spin coating), a Langmuir-Blodgett eljárások és nem utolsósorban az elektrosztatikus önrendeződéses rétegeképítés.

Az elektrosztatikus önrendeződés rétegeképítés technológiája, melyet úgy is neveznek, hogy Layer-by-Layer vagy rövidítve LbL eljárás, egy széles körben alkalmazható, környezetbarát, gazdaságos és gyors bevonó eljárás. Az LbL eljárással lehetőség van ultravékony, nanostruktúrált bevonatok kialakítására különböző minőségű és megjelenésű (akár háromdimenziós, speciális formájú) felületeken [Lvov et al. 1996, Lvov et al. 1997, Ai et al. 2003]. Az eljárást először Decher és Hong (1999) mutatta be, azóta számtalan szakirodalom számol be a különböző területeken való alkalmazhatóságáról [Han et al. 2005, Ghosh 2006, Shchukin et al. 2006, Zhou et al. 2009, Carosio et al. 2011, Csóka et al. 2012, Laufer et al. 2012].

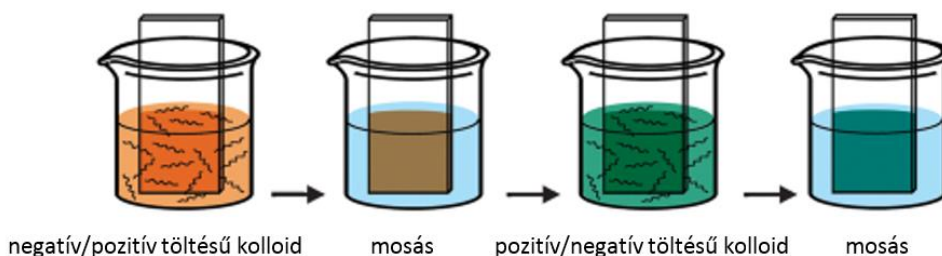
Az eljárás egyik nagy előnye, hogy vizes közegben is elvégezhető, így nincs szükség a természetre, egészségre káros oldószerek alkalmazására. Az LbL eljárás további előnye, hogy kivitelezéséhez használható anyagok spektruma meglehetősen széles.

Az eljárás alapja az eltérő töltésű alkotók között kialakuló elektrosztatikus vonzás. Az elektrosztatikus önrendeződéses rétegeképítéshez különféle, vizes közegben pozitív vagy negatív töltéssel rendelkező nanorészecskék, illetve polielektrolitok is alkalmazhatók. Az összetételtől függően állíthatók be a bevonat, végső soron a felület tulajdonságai. Az LbL bevonatok kialakításához alkalmazott nanorészecskék között szerepelnek fém és fénoxid nanorészecskék (úgy mint Ag, Au,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , ZnO,  $\text{ZrO}_2$ ), agyagásványok (montmorillonit, szaponit, hektorit), grafén nanolemezek, szénnanocsövek, valamint



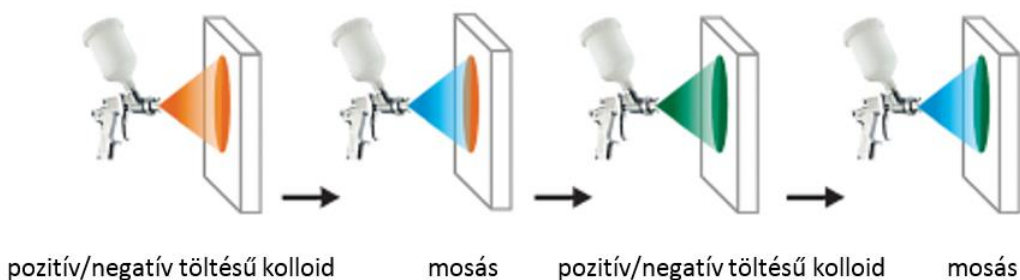
különböző szerves nanorészecskék, mint például a cellulóz nanokristály vagy a globuláris fehérje.

Az LbL eljárás különböző módokon, az alkalmazásnak és a felületnek megfelelően bemeztéssel, szórással és centrifugális erő segítségével végezhető. A bemeztéssel történő eljárás során elsőként a bevonandó felület töltésével ellentétes töltésű nanorészecske vagy polielektrolit oldatba mártjuk a bevonni kívánt hordozót, így létrejön az első réteg, melyet monorétegnek is szokás nevezni. A következő réteg, a biréteg, kialakítása hasonló módon történik, a felvitt réteg töltésével ellentétes töltésű nanorészecske vagy polielektrolit koloidba mártjuk a bevonandó anyagot. A nanométer vastagságú rétegek felépítése, a nanostrukturált, multiréteg kialakítása a bemeztések váltakoztatásával és számának növelésével jön létre. Az egyes bemeztések között fontos technológiai lépés a mosás (emellett gyakran a szárítás), amely során a felületen meg nem kötődött anyagok távolíthatók el. A bemeztéssel történő eljárás a 21. ábrán látható.



21. ábra. A bemeztéssel történő LbL eljárás lépései [Li et al. 2012]

A szórásos LbL eljárás hasonló alapokon nyugszik, itt azonban a felvitelt szórópisztoly segítségével végezzük, ahogy azt a 22. ábra szemlélteti. Az eljárás előnye, hogy a rétegek adszorpciója gyorsabban végbemegy, mint a bemeztéssel történő eljárás esetén. A szórással való LbL rétegeképítés további előnye, hogy gazdaságosabb, kevesebb anyag is elegendő, valamint hogy a koloid rendszerek koncentrációja nem változik a bevonási eljárás alatt.



22. ábra. A szórásos LbL eljárás lépései [Li et al. 2012]

A bevonási mód mellett a végső bevonat tulajdonságaira nagy hatással van az alkalmazott koloidok koncentrációja, pH-ja és ionerőssége, illetve a bemeztés/szórás időtartama. Alacsony ionerősségnél például a polimer gomolyag nagymértékben ki tud egyenesedni – így az abszorbeált anyag mennyisége kevesebb, a kialakult réteg vastagsága kisebb. Ennek ellenkezője figyelhető meg nagy ionerősségnél. Az izoelektromos pontok ismeretében pH-val beállítható a nanorészecskék töltése, így növelhető az adszorpció, a határfelületi interakciók erőssége.

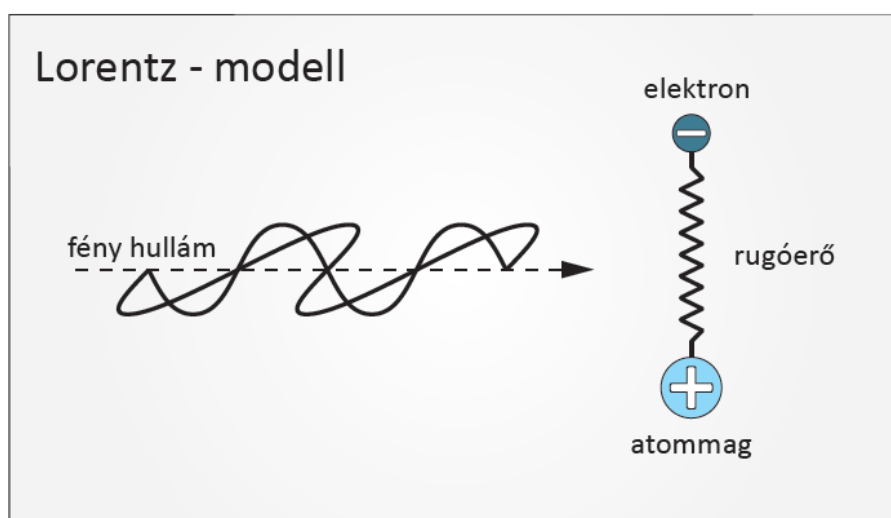
### 2.3.2 A nanobevonat modellezési lehetőségei

A fénytörés fogalma az elektromágneses hullámoknál, mint például a fény esetében, azt az eltérítést vagy kitérítést jelenti, annak egyenes vonalú haladásából, amikor a fény az egyik közegből kilépve egy másikban halad tovább.

A modellezési fejezet lényege, hogy ismert fizikai jelenségekbe helyezve az általam használt 3 félvezető anyag tulajdonságait, egy olyan modellteret hozzon létre, amely a gyakorlati megvalósulása révén lehetőséget biztosít további anyagok kipróbálására, a nanorétegek felépítés nélküli vizsgálatához.

Max Planck (1900-ban) megállapította, hogy az elektromágneses hullámok energiája megegyezik valamilyen kisebb energia egységek összegével és bevezette a kvantum elméletet. A kvantum elnevezés (a latin „kvantus” szóból ered és) jelentése: mennyiség. Planck ezt az elnevezést az egységnyi energia értékek számolására használta. Az elméletet Einstein 1905-ben továbbfejlesztette és megállapította, hogy az elektromágneses hullámokat diszkrét energia értékek összegének kell tekinteni, amelyek a hullám frekvenciájától függő mennyiségek. Az 1900-as évek elején a kvantum mechanika forradalma előtt Hendrik Lorentz a Maxwell egyenletek alapján leírta a fény és anyag kölcsönhatását. Maxwell egyenletében a fényt transzverzális elektromágneses hullámként definiálja. Az  $E$  elektromos és a  $H$  mágneses térerősség a fény haladási irányára – és ugyanakkor egymásra is – merőleges síkban harmonikus rezgést végeznek. Annak ellenére, hogy Lorentz tisztán elméleti leírást adott, össze tudták kapcsolni a kvantum mechanikával és a Lorentz féle modell mind a mai napig jól használható.

Lorentz a modellben az elenyészően kicsi tömegű elektront ( $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg) egy rugón keresztül kapcsolta össze a sokkal nagyobb tömegű (de nyugalmi állapotú) atommaggal, amely rugó a Hook féle törvénynek engedelmeskedik. Az elektron töltése kapcsolatba lép az adott elektromos térrel és a rugó megnyúlik, vagy összemegy a tér változásának függvényében, tehát oszcilláló mozgást végez. Ezt nevezzük Lorentz-féle oszcillációs modellnek (23. ábra).



23. ábra. Lorentz-féle oszcillációs modell

## 2.4 Végeselemes modellezés

Matematikai értelemben a végeselem módszer (VEM) egy numerikus eljárás, parciális differenciálegyenletekkel leírható problémák megoldására. Ez a legtöbb mérnöki területen általánosan előforduló probléma megoldására alkalmas, azonban nem ez az egyetlen eszköz a numerikus elemzésekre. A mérnöki gyakorlatban használatos további numerikus módszerek közé tartozik a véges differencia módszer, a határelem módszer és a véges térfogat módszer is. Ugyanakkor, sokoldalúságának és nagy numerikus hatékonyságának köszönhetően uralkodóvá vált a szoftverpiacon, míg az egyéb módszerek csak jelentéktelenebb alkalmazásokban nyertek teret.

A végeselem geometriai alkalmazása már 2000 évvel ezelőtt, az ókorban megjelent. Az akkori ismeretekkel és lehetőségekkel a kör kerületének számításánál alkalmazták. Ebből adódóan a diszkretizáció, mint a modellalkotás eszköze nem tekinthető korunk eredményének. Annak ellenére, hogy a VEM kezdetleges formájában már a második világháborút megelőzően kidolgozásra került, gyakorlati alkalmazása csak az '50-es évek után, a nagyteljesítményű számítógépek megjelenésével terjedt el a civil mérnöki területeken és mára már valamennyi mérnöki szakma nem nélkülözheti ezt az eljárást [Martin és Carey 1976].

A VEM használatával bármilyen formájú objektumot elemezhetünk, különböző módokon idealizálhatjuk a geometriát és az eredményeket a kívánt pontossággal állíthatjuk elő. A kereskedelemben kapható szoftverek implementációit, a VEM elmélete, azaz a numerikus probléma megfogalmazása és a megoldási módszerek átláthatóvá teszik a használó számára. A VEM, mint a mérnöki elemzések hatékony eszköze a nagyon egyszerű problémáktól a nagyon összetettekig alkalmazható. A tervezőmérnökök a termék kifejlesztési folyamatában, a terv előrehaladása során az egyes jellemzők viselkedésének, a különféle anyagok tulajdonságainak vizsgálatára, ellenőrzésére használják. Az időbeli megkötések és a termékadatok korlátozott rendelkezésre állása az elemzési modell sokrétű egyszerűsítését teheti szükségessé. A probléma komplexitásától vagy az alkalmazási területtől függetlenül bármilyen VEM projekt ugyanazokból az alapvető lépésekből áll.

Bármely elemzéshez kiinduló pont a geometriai modell létrehozása. Ehhez a modellhez társítunk anyagi jellemzőket, definiáljuk a peremfeltételeket, majd diszkretizáljuk az elemzésre szánt modellt. A diszkretizálási (hálózási) eljárás a geometriát viszonylag kicsi, és egyszerű alakú, végeselemnek nevezett entitásokra osztja fel. Az elemeket annak hangsúlyozására nevezzük „véges”-eknek, hogy nem végtelenül kicsik, csupán elegendően kicsik a modell befoglaló méreteihez viszonyítva. A VEM tehát olyan módszer, ami a megoldást az egyes elemeken értelmezett approximációs függvények - polinomok segítségével állítja elő.

A végeelem analízis (VEA) három lépést tesz szükségessé:

- előfeldolgozás (a feladattípusnak megfelelő jellemzők megadásával a matematikai modell felépítése, hálózás),
- megoldás (a kívánt eredmények számítása),
- utófeldolgozás (az eredmények elemzése).

A geometriai modell feloszthatósága (behálózhatósága) komoly vonzatokkal járó követelmény. Gyakran, de nem minden esetben, a behálózás támasztotta igények a CAD geometrián módosításokat tesznek szükségessé. A szükséges módosítás lehet részletek elvétele, idealizálás és/vagy tisztítás. Alkalmanként egy korrektül behálózható modellt is egyszerűsítünk, mert az eredményül adódó hálózat túl nagy elemszámú lenne, következésképpen az elemzés túl lassan futna le. A geometria módosításai egyszerűbb elemhálózatot és rövidebb számítási időt eredményezhetnek. A sikeres hálózás éppannyira függ a hálózásra bocsátott geometria minőségétől, mint a VEA szoftverben implementált hálózó algoritmusok kifinomultságától.

A végeelem modell megoldását követően gyakran az eredmények elemzése a legnehezebb lépés, hiszen a megoldás nagyon részletes adatokat szolgáltat, amik sokféleképpen megjeleníthetőek. Az eredmények helyes értelmezése megkívánja, hogy értékeljük a feltételezéseinket, az egyszerűsítéseket és az első három lépés során bevitt hibákat: a matematikai modell létrehozásában, a végeelem modell létrehozásában, valamint a végeelem modell megoldásában előforduló hibákat.

A matematikai modell létrehozásának folyamata és végeelem modullé váló diszkretizálása elkerülhetetlen hibákat visz bele az elemzésbe. A matematikai modell kialakítása modellezési hibákkal jár, amiket idealizálási hibáknak is nevezünk. A matematikai modell diszkretizálása diszkretizálási hibákkal, a megoldás pedig numerikus hibákkal jár. Ezen három hibatípus közül csak a diszkretizálási hiba tipikusan a VEA hibája, ezért csak ezeket a típusú hibákat tudjuk a VEA eszközeivel kézben tartani. A matematikai modellt befolyásoló modellezési hibák még azelőtt lépnek fel, mielőtt a VEA módszere alkalmazásra kerülne, és csak korrekt modellezési eszközökkel kontrolálhatók. A megoldás hibáját a megoldó program által felhalmozott kerekítési hibák jelentik, amelyeknek kontrolálása nehéz, de szerencsére ezek ritkán okoznak jelentős problémát.

Hőtani feladat esetében (ami hőmérsékletek, hőmérséklet-gradiensek és hőáramok meghatározását jelenti), az elsődleges ismeretlenek a csomóponti hőmérsékletek. Minthogy a hőmérséklet skalármennyiség, nem pedig vektor, mint a csomóponti elmozdulás, függetlenül attól, hogy milyen típusú elemeket használunk, minden csomópontra csak egy ismeretlen mennyiség (szabadságfok) létezik, aminek az értékét meg kell határozni. A hőtani feladatban szereplő minden további ismeretlen mennyiség a csomóponti hőmérsékletekből lesz meghatározva. Abból a tényből, hogy csomópontonként csak egy ismeretlenre kell a feladatot megoldani, nem pedig háromra, vagy hatra, mint a szerkezetelemzési feladatokban, az következik, hogy a hőtani feladatoknak jóval kisebb a számításigénye, mint a szerkezetelemzési feladatoknak [Fodor et al. 2005, Kovács 2012].

A gyakorlati életben a hőtechnikai problémák általában háromdimenziósak, amelyeknek differenciálegyenlete a 3. összefüggés szerint írható fel:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Ritkábban kétdimenziós problémákkal is találkozhatunk, amelyeknél ha időben állandósult (stacioner) állapotot feltételezünk, a 3. egyenlet  $\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t}$  tagjának idő szerinti parciális differenciálhányadosa nulla lesz, amelynek eredményeként a 4., egyszerűsített összefüggéshez jutunk:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

A hővezetés differenciálegyenlete néhány esetben analitikus módon is megoldható, tehát sikerülhet matematikailag egzakt kifejezésre jutni, azonban az esetek többségénél meg kell elégednünk a numerikus megoldással, amely képes a hőmérsékletek alakulásának számszerűsített értékét egy elfogadhatóan kismértékű hibával megadni. Ilyen megoldást kínálnak a véges differenciák módszer alapján működő számítógépes programok is, amelyek a vizsgált szerkezetet nagyszámú cellára osztják fel, majd a megadott peremfeltételek figyelembevételével iterációs számítást indítanak el. A feltételezett stacioner állapotnak megfelelően a számítás addig tart, amíg a szerkezetbe belépő, majd onnan kilépő hőenergia egy meghatározott hibahatáron belül azonos nem lesz.

Az említett végeselem módszeren alapul Hantos (2008) könnyűszerkezetes épület hőtechnikai optimalizálásával kapcsolatos kutatása is, amelyet a *THERM* programmal készített. Esetében a nyílászárók egy átlagos hőátbocsátási tényezővel lettek figyelembe véve, azok részletes vizsgálatára nem került sor.

Az ablakszerkezetek részletes vizsgálatáról, azok összetettsége miatt a VEM gyakorlati alkalmazásához képest csak közel 30 évvel később jelentek meg publikációk. Az üvegezett térelhatároló szerkezeteken keresztül kialakuló nettó energiaáram általános számítási módszerét a '80-as években dolgozták ki [Rubin 1982]. A modell figyelembe vette a gáztöltésben fellépő természetes konvenciót, és eredményként a kibocsátott energiaáramot adta. A függőleges légüregek kétdimenziós, véges térfogaton értelmezett módszerét Wright és Sullivan dolgozta ki [Wright és Sullivan 1994], amely alkalmasnak tűnt a légnemű anyag és a hő áramlásának együttes figyelembe vételére. A módszer használatával számos üvegezési rendszerre készülhettek el hőáramtérképek és izoterma ábrák [Wright és Sullivan 1995]. A számítási módszer eredményei egyezést mutattak a fűtőlemezes mérések eredményeivel. Wright későbbi publikációjában ismertette a kétdimenziós módszer továbbfejlesztését, ami immár alkalmas volt a gáztöltés áramlásának (konvekció) numerikus analízisére is. A módszer alapja a CFD (numerikus folyadékdinamika) számítás. Az eredmények alapján megállapítható, hogy az üvegperem hőátbocsátása, a Low-e bevonat mentén kialakuló gázáramlás, az argongáz töltés egyaránt erősen befolyásolja a belső oldali

üveg hőmérsékletet [Wright 1998]. A háromdimenziós CFD vizsgálatokat Gustavsen és munkatársai alkalmazták először üvegezett szerkezetek analízisére [Gustavsen et al. 2001], ekkor Wright és McGowan elérte, hogy az USA és Kanada területén immár a hagyományos módszerek helyett az újonnan kidolgozott eljárásokkal számítsák az üvegezett szerkezetek  $U$ -értékét [Wright és McGowan 2003]. A változások után immár a gáztöltés belső áramlását, és belső oldali hőátadási tényező pontról pontra változó értékét is figyelembe kell venni a számításokban. A fokozottan hőszigetelt üvegezett szerkezetek fejlődésével lépést tartandó, Fang és munkatársai a tok szerkezetek fejlesztésén dolgoztak. A kétdimenziós véges elemes modelljeik alapján a többféle anyag kombinálásával, hőszigetelt üvegekkel készült tokprofilokkal készült ablakok akár 20 %-kal kevesebb hővesztéssel is rendelkezhetnek, mint a hagyományos, tömörfa elődjük [Fang et al. 2005].

### 3. CÉLKITŰZÉSEK

Az egyre szigorodó energetikai direktíváknak, rendeleteknek köszönhetően az utóbbi évtizedekben jelentősen nőtt az épületek energetikai tulajdonságának javítására, és a megtakarítási lehetőségek jobb kihasználására irányuló törekvések. Ezen elvárásoknak, és az új technológiák megjelenésének köszönhetően felgyorsult a nyílászárók fejlődése, fejlesztése. Az utóbbi tíz év kutatásaiból az derült ki, hogy az újonnan beépített korszerű és jól záródó nyílászárókon keresztül, a transzmissziós hőveszteség többszöröse is lehet az alacsony külső-belső oldali nyomáskülönbség hatására létrejövő filtrációs energiaveszteségnek, illetve az épület egyéb résein keresztül bekövetkező energiaveszteségnek [Emery és Kippenhan 2006]. Ennek megfelelően a kutatások leginkább a szerkezetek hőátbocsátásának csökkentésére irányultak és irányulnak, hiszen a folyamat nem állt le, jellemzően még ma is a kutatások középpontjában helyezkedik el. Ez a bevezetőben leírt tényekkel is magyarázható, miszerint még a legkorszerűbb nyílászárók sem képesek megközelíteni az épülethatároló falazat hőátbocsátásának értékét. Függetlenül attól, hogy a nyílászárók energetikailag kedvezőtlenül hatnak az épület egészét tekintve, mégsem hagyhatóak el, mert a megfelelő közérzet, komfortérzet kialakításában, a frisslevegő biztosításában és legfőképpen a környezettel való vizuális kapcsolattartás vonatkozásában lakóépületeinket nem tudjuk, illetve nem szeretnénk elképzelni ablakok nélkül, amelyből egyértelműen következik ezen épületszerkezeti elemek kitüntetett jelentősége.

Annak ellenére, hogy több nyílászáróra és üvegezésre vonatkozó vizsgálattal is találkozhatunk, nem eléggé feltárt és megoldott az ablak helyzete, ezért kutatásom fő célja a terület áttekintésével tisztázni, hogy a jelenleg elterjedten alkalmazott ablakszerkezetekkel, anyagokkal, megoldásokkal hőtechnikailag milyen szint érhető el, továbbá egy hatékony megoldást ajánlani az ablakok hőszigetelésének további fokozására.

Az ablak tervezésében, gyártásában és az építészeti tervezésben az ablak hőtechnikai viselkedését az ablak, mint termék hőtechnikai jellemzőjével (eredő hőátbocsátási tényező stb.) jellemezzük. A beépített ablak hőtechnikai teljesítményére azonban visszahat a befogadó szerkezet és az ablak egymáshoz való viszonya. A hazai és nemzetközi irodalomban nem található erre vonatkozó vizsgálatok, elemzések.

A beépített ablakok tényleges hőátbocsátási értéke az élettartam során feltételezhetően kedvezőtlenül változik, így a tervezés során figyelembe vett értékénél nagyobb hőveszteséggel kell számolni. A jelenlegi gyakorlat ezt a hatást nem veszi figyelembe.

Részletes célkitűzéseim ezért a következők.

1. A jelenleg használatos korszerű ablakszerkezetekre meghatározni a jellemző hőtechnikai teljesítőképességet és az azt befolyásoló szerkezeti és anyagi jellemzőket.

2. A magyarországi épületállományban fellelhető korszerű ablakszerkezetek és tipikus befogadó épületszerkezetek kölcsönhatásának vizsgálata hőátbocsátási szempontból.
3. Beépített ablakok üvegezésén keresztüli hőátbocsátás helyszíni mérésére és értékelésére alkalmas módszer meghatározása.
4. Új irány keresése az üvegezés hőszigetelési teljesítőképességének további fokozására az optikai jellemzőkkel kapcsolatos elvárások figyelembevételével.

Dolgozatom során gazdasági számításokra nem térek ki, pusztán a mérnöki, műszaki lehetőségeim keretein belül a jelenleg általánosan használt korszerű hőszigetelésű ablakok teljesítőképességének javítására törekszem.



## 4. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK ÉS ANYAGOK

### 4.1 Ablakszerkezetek végeeselemes hőtechnikai számítógépes modellezése

#### 4.1.1 A vizsgált szerkezetek bemutatása

Vizsgálataimat három különböző típusú és gyártmányú fa, illetve fa-alumínium ablakon végeztem el. A pontosabb eredmény érdekében nem katalógusban fellelhető ablakmetszeteket vettem alapul, hanem közvetlenül a Hofstadter és Holzteam ablakgyártók által rendelkezésemre bocsátott – a dolgozat készítésekor aktuális – metszeti rajzok alapján dolgoztam. A vizsgálni kívánt típusokat úgy határoztam meg, hogy legyen köztük egyrészt a jelenlegi hazai épületállományban jellemzően fellelhető szerkezet, illetve a passzívház szigorú követelményeit kielégítő megoldás is. A kiválasztott típusok, a gyártók kínálatában jelenleg is megtalálhatóak, rendelhetőek, ezért a vizsgálataim szempontjából relevánsnak tekinthetőek.

A végeeselemes vizsgálatokat az alábbi ablakszerkezeteken végeztem el:

- 68 mm-es profilvastagságú tömörfa,
- 90 mm-es profilvastagságú tömörfa, illetve egy
- 104,5 mm-es összvastagságú fa-alumínium társított szerkezeten.

Mindhárom esetben 1180 × 1480 mm-es tok külméretű erdei fenyőből (*Pinus sylvestris*) készült bukó nyíló ablakot vettem alapul. A hazai épületállományban jelenleg is nagy számban megtalálható 68 mm-es tömörfa szerkezetet, alacsony emissziós (Low-E) bevonattal rendelkező kétrétegű hőszigetelt üvegezéssel, valamint kettős (egy közép és egy perem) tömítéssel vettem számításba.

A 90 mm-es profilvastagságú tömörfa ablakszerkezetet szintén kettős (egy közép és egy perem) tömítéssel vettem figyelembe, de ebben már háromrétegű 2 db Low-E bevonattal rendelkező hőszigetelt üvegezés kapott helyet. A 104,5 mm-es fa-alumínium társított szerkezetű ablak a gyártó szerint megfelel a passzívház követelményeknek is. Kedvező tulajdonságait a külső alumínium profil, a szigetelő habréteg és a hármas hőszigetelő üvegezés biztosítja, amelyeknek köszönhetően fokozott hővédelmet és időjárás állóságot biztosít. Az egyes ablakszerkezetek részletes műszaki paramétereit, jellemzőit a 12.5 melléklet tartalmazza.

Mindhárom esetben eltekintettem a szerkezetek működtetését biztosító vasalatrendszer részletes figyelembevételétől, modellezésétől, hiszen annak nagyon változó keresztmetszete miatt egy 2 dimenziós vizsgálat nem jellemezné kellő pontossággal a vizsgált metszeten kívüli részek hatását, azok pontos figyelembevételére csak háromdimenziós elemzés során van lehetőség. Az ablakgyártó cégek vizsgálataihoz hasonlóan, a vasalat többlethatását úgy vettem számításba, hogy a szárnyprofilban kialakított árok az alumíniuméval megegyező,  $237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  hővezetésű panellal került lezárásra.

#### 4.1.2 Az alkalmazott hőtechnikai számítási eljárás ismertetése

Az EN ISO 10077-1:2000 és EN ISO 10077-2:2004 szabványok (európai módszer) útmutatásai alapján mindhárom ablaktípus esetében meghatároztam az ablakszerkezet eredő hőátbocsátási tényezőjét ( $U_w$ ). Az ablaknak, mint transzparens épülethatároló szerkezeti elemnek a hőátbocsátása az 5. képlet szerint határozható meg.

$$U_w = \frac{\sum A_g \cdot U_g + \sum A_f \cdot U_f + \sum l_g \cdot \psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad (5)$$

ahol:

$U_w$  az ablak eredő hőátbocsátási tényezője [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$A_g$  az üvegezett felület nagysága [ $m^2$ ]

$U_g$  az üvegezés hőátbocsátási tényezője [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$A_f$  a tok és szárnykeret vetületi felülete [ $m^2$ ]

$U_f$  a tok és szárnykeret átlagos hőátbocsátási tényezője [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$l_g$  az üvegezett keretkitöltés szegélyének hossza [m]

$\psi_g$  az üvegezett keretkitöltés vonalmenti hőátbocsátási tényezője [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

A részletes számítási mód azt írja elő, hogy az üvegezést helyettesítve egy adott eredő hővezetéssel rendelkező hővezetési tényezőjű panellel, a 6. képlet szerint határozzuk meg a keretre vonatkozó hőátbocsátási értéket.

$$U_f = \frac{L_f^{2D} - U_p \cdot b_p}{b_f} \quad (6)$$

ahol:

$U_f$  a keret hőátbocsátási tényezője [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$L_f^{2D}$  a szelvény egységnyi hosszának hőátbocsátása [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$U_p$  a panel hőátbocsátási tényezője [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$b_f$  a keret vetületi szélessége [m]

$b_p$  a panel látható szélessége [m]

A vizsgált modellnek tartalmaznia kell minden felhasznált anyagot, kivéve az üvegezést, amelynek helyébe a szabvány által meghatározott panelt kell illeszteni. A keretre vonatkozó  $U_f$  érték meghatározáshoz először a 7. képlet alapján ki kell számolnunk a helyettesítő panelre vonatkozó hőátbocsátási értéket ( $U_p$ ).

$$U_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + R + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (7)$$

ahol:

$\alpha_e$  a külső ablakfelület hőátadási tényezője [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$\alpha_i$  a belső ablakfelület hőátadási tényezője [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

$R$  a hővezetési ellenállás [ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ]

A 7. képletből látható, hogy minél nagyobb a szerkezet hővezetési ellenállása, valamint minél kisebb a hőátadási tényezője, annál kisebb lesz a panel hőátbocsátási tényezője, ami így kisebb energiaáramot eredményez.

A vonalmenti hőátbocsátási tényező meghatározásához a tényleges üvegezést és keretszerkezetet kell alapul venni (8. képlet).

$$\psi = L_{\psi}^{2D} - U_f \cdot b_f - U_g \cdot b_g \quad (8)$$

ahol:

$\psi$  vonalmenti hőátbocsátási tényező [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$L_{\psi}^{2D}$  a szelvény egységnyi hosszának hőátbocsátása [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$U_f$  a keret hőátbocsátási tényezője [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$U_g$  az üvegezés központi részének hőátbocsátási tényezője [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$b_f$  a keret vetületi szélessége [m]

$b_g$  az üvegezés látható szélessége [m]

Az európai módszer lényege, hogy a csomóponti metszet elemzéséből a keretre meghatározott egyenértékű hőátbocsátási érték ( $U_f$ ) az üvegezéstől és osztástól független. Ebben a megközelítésben a numerikus eljárással meghatározott vonalmenti hőátbocsátási tényező foglalja magába az üvegezés, a távtartó és a keret kölcsönhatásai miatti többlet hőáramokat. Ezt nevezzük hőhídhatásnak, amely ebben az esetben egy helyre koncentrálna jelenik meg. Ebből következik, hogy egy adott típusú keret esetében a keret hőátbocsátási tényezője mindig ugyanaz az érték lesz függetlenül attól, hogy milyen üvegezéssel rendelkezik. Az üvegezés teljes látható felületére az üvegtábla központi részére érvényes hőátbocsátási tényezőt vesszük figyelembe [Elek 2012].

A szerkezet két végén adiabatikus feltételt, míg a hőáramlás irányában a szerkezet két oldalán a szabvány által előírt peremfeltételeket kell definiálni.

A számítógépes modellezés során az említett európai szabványokat, illetve azok számítási módszerét a *THERM 6* végeselemes programmal együtt alkalmaztam, amely az ISO 15099-es szabvány útmutatását, metódusát követi. Ebben a nemzetközi szabványban a szegélyszáv hőátbocsátási értéke a keretkontúrok vetületi hőáramainak összegzésével határozható meg. Ennek következtében az üvegezés, a távtartó és a keret közötti kölcsönhatások miatti többlethőáramok más formában számszerűsíthetők. Mivel ebben az esetben a keretre számított hőátbocsátási érték nem lesz független az üvegezés típusától, a többlethőáramok egy, az üvegezés típusától és a távtartótól függő része a keret hőátbocsátási tényezőjében foglaltatik benne. Az üvegezés szegélyszávjának hőátbocsátási értéke természetesen nagyobb, mint az üveg központi részének hőátbocsátási értéke, a különbség az elmondottak miatt az üvegezés távtartójának és a keretnek a hatását nem teljes mértékben foglalja magában.

Az ISO 15099-es szabvány útmutatása szerint az ablak eredő hőátbocsátása a 9-13. képletek alapján határozható meg.

$$U_t = \frac{\sum A_{gv} \cdot U_{gv} + \sum A_f \cdot U_f + \sum l_\psi \cdot \psi}{A_t} \quad (9)$$

$$\psi = L^{2D} - U_f \cdot l_f - U_{gv} \cdot l_{gv} \quad (10)$$

$$U_f = \frac{L^{2D} - U_p \cdot l_p}{l_f} \quad (11)$$

Vagy a nemzetközi számítási módszer szerint:

$$U_t = \frac{\sum U_f \cdot A_f + \sum U_d \cdot A_d + \sum U_e \cdot A_e + \sum U_{de} \cdot A_{de} + \sum U_c \cdot A_c}{A_{pf}} \quad (12)$$

$$U_t = \frac{\sum U_f \cdot A_f + \sum U_e \cdot A_e + \sum U_c \cdot A_c}{A_{pf}} \quad (13)$$

ahol az indexek jelentése:

- f* keret
- d* keretosztó
- e* üvegperem keretnél
- de* üvegperem osztónál
- c* üveg központi része

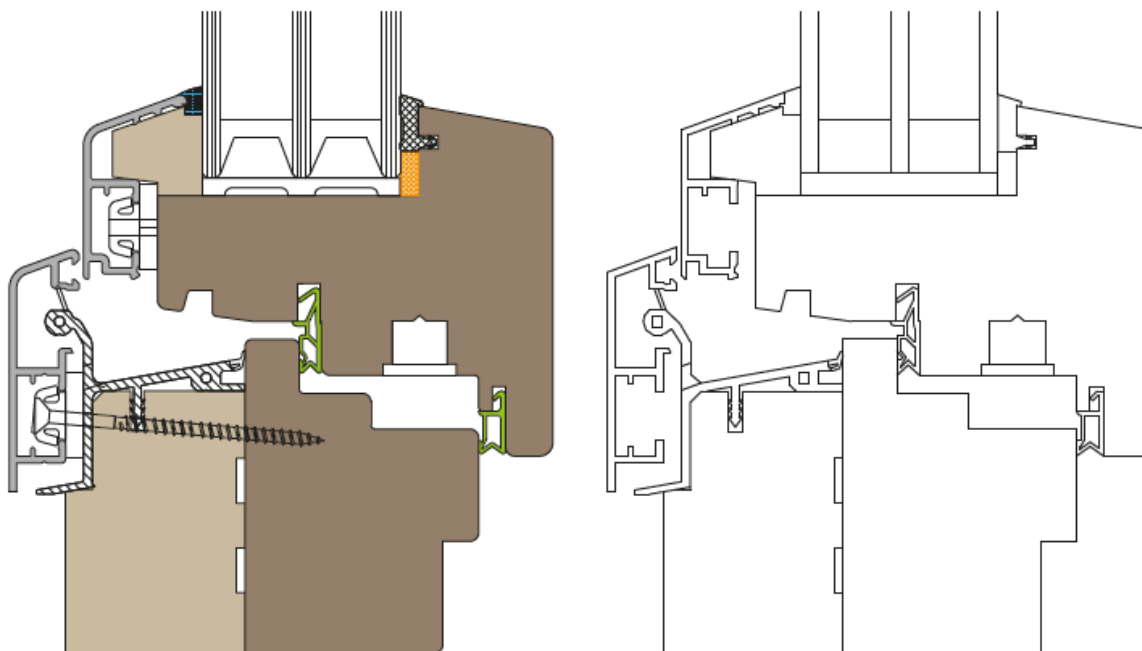
Az lenne az ideális, ha a távtartó valamint a keret és üveg találkozásából adódó többlethatást teljesen szét tudnánk választani, de ez sem a nemzetközi, sem pedig az európai megközelítésben nem megoldott. Az ablak eredő hőátbocsátására vonatkozóan korábbi kutatások eredményei alapján azt mondhatjuk, hogy ugyanazon szerkezetet megvizsgálva és a két számítási módszer végeredményeit összevetve, azok jó egyezést mutatnak, közöttük nincs szignifikáns különbség (a legnagyobb eltérés is 1%-kon belüli). Ez valószínűleg annak tudható be, hogy az európai módszer a nemzetközi szabványban leírtak gyakorlati implementálására ír le egy lehetséges eljárást. Ugyanakkor az is megállapítható, hogy az európai számítási módszer sokkal érzékenyebb a keret és az üvegezés kontrasztjára [Elek és Kovács 2012].

Fontos megjegyezni, hogy az ablak így meghatározott eredő hőátbocsátási tényezője egy termékjellemző, és nem foglalja magába a beépítés hatását.

#### 4.1.3 A hőtechnikai elemzés grafikus előkészítése

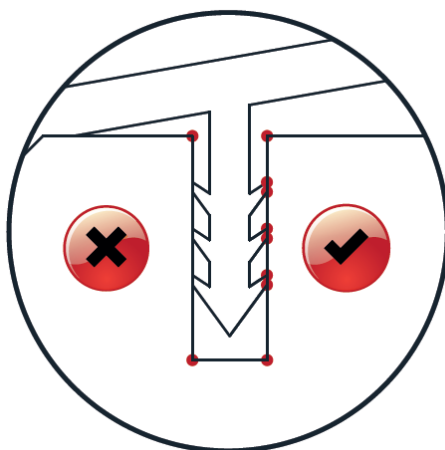
A hőtechnikai vizsgálatokat a kaliforniai Berkeley Kutatóintézet által kifejlesztett, az üvegezést és a keretszerkezetet együtt elemző végeselem alapú kétdimenziós hőtechnikai modellező szoftverrel (*THERM 6*) készítettem. Az ingyenesen elérhető program hiányossága, hogy a pontszerű hőhidakat nem tudja figyelembe venni, továbbá csak az időben állandósult folyamatok vizsgálatát teszi lehetővé, de ez utóbbi esetben nem bírt jelentőséggel. A Hofstadter és HolzTeam Kft-k által rendelkezésemre bocsátott ablakokról AutoCad programmal készítettem el a vizsgálni kívánt, célirányosan egyszerűsített, átalakított metszeteket (24. ábra és 12.5 melléklet). A szabványos vizsgálathoz kapcsolódóan arra is figyelni kell, hogy a vízszintes ablakmetszeteket függőleges állásban, felül elhelyezett

keretrésszel kell modellezni, úgy hogy a külső peremfeltétel a szerkezet bal oldalán legyen megadható. Az elemzésekhez minden csomópont esetében az ablak középvonaláig terjedtek a metszetek. A részeredmények összegzését az 5. összefüggéssel végeztem el.



24. ábra. A vizsgált passzívház ablak gyártótól kapott (bal oldal) és végeelemes elemzésre előkészített (jobb oldal) alsó metszete

Az egyszerűsítés azzal indokolható, hogy az elemzéshez használt *THERM 6* szoftver nem tudja kezelni az íves vonalakat, továbbá ügyelni kellett arra is, hogy minden vonal szakaszolva legyen és a becsatlakozó köztes csomópontok is megadásra kerüljenek (25. ábra).



25. ábra. Csatlakozó csomópontok helytelen (bal oldali) és helyes (jobb oldali) megadása

Az AutoCad programban egyszerűsített rajzokat \*.dxf kiterjesztéssel mentettem el, hogy a *THERM 6* programban alátétfoliaként felhasználhatóak legyenek. Az importált alátétrétegen grafikus módon történt a modellalkotás. Minden poligont körbe kellett rajzolni, amely folyamat során az összes határoló és becsatlakozó csomópontot is meg kellett adni. A poligonok bezárását követően nyílik lehetőség az anyagtulajdonság definiálására, amelyet megtehetünk a program anyagtárából, de a hővezetési, emissziós és egyéb tényezők

segítségével új anyagokat is definiálhatunk. Első lépésként a transzparens szerkezetek „felépítésére” a *THERM 6* programhoz kapcsolható *WINDOW 6* programban került sor (26. ábra és 12.6 melléklet), amely rendkívül nagy anyagválasztékkal, kifejezetten az üvegezési rendszerek összeállítását, vizsgálatát segíti.

Glazing System Library

ID #: 201 Name: 4\_16Ar\_4\_16Ar\_4LowE

# Layers: 3 Tilt: 90 ° IG Height: 1000.00 mm

Environmental Conditions: NFRC 100-2010 IG Width: 1000.00 mm

Comment:

Overall thickness: 44.000 mm Mode: #

	ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	E1	E2	Cond
▼ Glass 1 ▶▶	7110	ip_ip14E.ipe	#	4.0	<input checked="" type="checkbox"/>	0.588	0.246	0.312	0.889	0.055	0.048	0.000	0.837	0.037	1.000
Gap 1 ▶▶	2	Argon		16.0	<input type="checkbox"/>										
▼ Glass 2 ▶▶	7197	ip_fl_4.ipe	#	4.0	<input type="checkbox"/>	0.842	0.076	0.076	0.900	0.082	0.082	0.000	0.837	0.837	1.000
Gap 2 ▶▶	2	Argon		16.0	<input type="checkbox"/>										
▼ Glass 3 ▶▶	7110	ip_ip14E.ipe	#	4.0	<input type="checkbox"/>	0.588	0.312	0.246	0.889	0.048	0.055	0.000	0.037	0.837	1.000

Center of Glass Results | Temperature Data | Optical Data | Angular Data | Color Properties

Ufactor	SC	SHGC	Rel. Ht. Gain	Tvis	Keff	Gap 1 Keff	Gap 2 Keff
W/m <sup>2</sup> ·K			W/m <sup>2</sup>		W/m·K	W/m·K	W/m·K
0.681	0.544	0.473	348	0.718	0.0282	0.0255	0.0248

26. ábra. WINDOW 6-ban összeállított 3 rétegű üvegszerkezet a 90 mm-es profilvastagságú tömörfa és passzívház ablakhoz

A *WINDOW 6* -ban összeállított üvegszerkezetet egyszerűen importálhatjuk a *THERM 6* programba, ami azért nagyon fontos, mert a szerkezet minden, a kiválasztott üvegre, gázra gyárilag megadott jellemzővel, tényezővel az importálást követően is rendelkezik, így az áramlási folyamatokat is hűen tükrözi. Ez jelentősen megkönnyíti a munkát, de a legfontosabb, hogy így a szerkezet sokkal valóságosabban modellezhető. Megjegyzendő, hogy a *WINDOW 6*-ban meghatározott két és háromrétegű üvegszerkezet esetében a program által meghatározott eredő hőátbocsátási értékek ( $U_g$ ) eltérnek az egyes gyártók által hasonló rétegrendű üvegezés reklámozására felhasznált értékektől. A kettős üvegezés esetében a reklámozott  $1,1-1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  helyett  $1,419 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , míg a tripla üvegezésnél  $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  helyett  $0,681 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  értéket kaptam eredményül [Elek 2011, WINDOW 6 / THERM 6].

Az anyagi jellemzők megadása után a szerkezet külső és belső oldalán jellemző peremfeltételek definiálása következett, amelyek az említett európai szabványok alapján kerültek megadásra. A programban van lehetőség a hőátadást egyben megadni, de a konvektív és sugárzásos részt akár külön-külön is definiálhatjuk. A vízvetők esetében a (vonatkozó szabvány útmutatásának megfelelően a teljesen nyitott zónáknál a külső peremfeltétel egészen a középtömítésig terjedt, míg a kifolyónyílásokkal rendelkező elem esetében (a programban beépített opcióként elérhető) gyengén szellőzött beállítással lett figyelembe véve a középtömítés és a vízvető által közrezárt térrész hővezetése. A vizsgálatok során alkalmazott értékeket a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. Peremfeltételek az EN ISO 10077:1 és EN ISO 10077:2 szerint

Belső léghőmérséklet: $\Theta_i$	20 [°C]
Külső léghőmérséklet: $\Theta_e$	0 [°C]
Belső hőátadási ellenállás: $R_{si}$	0,13 [m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> ]
Külső hőátadási ellenállás: $R_{se}$	0,04 [m <sup>2</sup> ·K·W <sup>-1</sup> ]
Vonalmenti hőhídveszteségi tényező: $\psi_g$	0,06 [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]












Miután az ablak minden felületszakaszán beállításra kerültek a vonatkozó szabványok által előírt peremértéke, elvégeztem a szerkezetek hőtani elemzését.

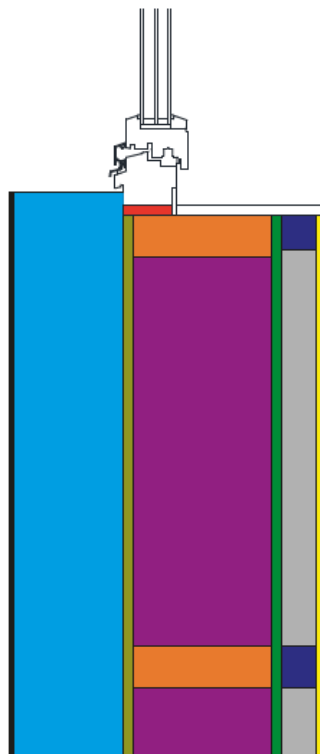
## 4.2 Falazatba illesztett ablakszerkezetek vége-selemes hőtechnikai szimulációja

A 4.1-es fejezetben ismertettem három ablaktípusnak, mint terméknek a vége-selemes szimulációval történő eredő hőátbocsátás meghatározását. Ehhez kapcsolódón mindhárom vizsgált ablaktípust beillesztettem három különböző falszerkezetbe és vizsgáltam azok együttes hőátbocsátását is. A vizsgálni kívánt falazatokat úgy választottam meg, hogy legyen köztük könnyűszerkezetes megoldás és hagyományos téglafalazat is. Utóbbival a bevezetőben leírt, energetikailag korszerűtlen épületállományra utalva, nagyságrendileg egy 10-15 évvel ezelőtti konstrukciót határoztam meg.

Az Építéstani Intézet munkatársával történt egyeztetésnek megfelelően két különböző vastagságú könnyűszerkezetes, és egy porotherm S téglából készített falazatot állítottam össze, amelyekbe aztán beillesztettem az ablakszerkezeteket. A modellépítés során az ablak pozícióját úgy határoztam meg, hogy annak külső síkja a dryvit réteg belső síkjával essen egybe, illetve a külső szigetelés olyan mértékben takarja az ablakokra, hogy még legyen hely, igény szerinti külső párkány elhelyezésére. Minden faltípus esetében a belső oldalon tömörfa borítást alkalmaztam könnyöklőnek. Az ablakok minden esetben poliuretán rögzítőhabbal kerültek rögzítésre a tok és fal közötti hézag mentén. A pontos rétegrendi kialakítások, valamint az alkalmazott anyagok, vastagságaikkal és azok hővezetési tényezőikkel a 27. ábrán, valamint a 12.7, 12.8 és 12.9 mellékletekben láthatóak. A rétegrendekben csak a hőtechnikailag fontos elemeket szerepeltettem, így a festést, glettsimítást és párazáró fóliát elhanyagoltam.

**RÉTEGREND / VASTAG KÖNNYŰSZERKEZETES FAL**

	nemesvakolat rendszer - 5 mm - $0,9900 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	polisztirol hőszigetelő tábla - 160 mm - $0,0340 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	gipszrost lemez - 15 mm - $0,3000 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	ásványgyapot szigetelés - 200 mm - $0,0420 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	KVH bordaváz - 60/200 mm - $0,1100 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	OSB-3 lemez - 15 mm - $0,1500 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	légrés - 50 mm - $0,2668 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	szerelő lécváz - 50/50 mm - $0,1100 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	gipszkarton lemez - 18 mm - $0,3000 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Egyéb anyagok	
	tömörfa (ablak) - $0,1100 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
	rögzítő hab - $0,0240 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$



27. ábra. Vastag könnyűszerkezetes fal rétegrendje és az alkalmazott anyagok hővezetési értékei

Munkám során nagyobb hangsúlyt helyeztem a könnyűszerkezetes megoldások vizsgálatára. Azért is készítettem ebből több változatot, mert a környező fejlettebb országokhoz hasonlóan, várható hogy a jövőben hazánkban is jelentősen nőhet az igény könnyűszerkezetes épületek iránt. A két különböző könnyűszerkezetes falvastagságot és kialakításukat úgy határoztam meg, hogy azok minőségileg és a felhasznált anyagok tekintetében is más igény- és komfortszintet képviselnek.

Az ablakok és falazatok együttes elemzését is a *THERM* programmal végeztem. Ennél az összetett vizsgálatnál az ablakok legkritikusabb részének számító alsó csomópontokat illesztettem a különféle falazatokba. Az eredmények összehasonlíthatósága miatt a modellezéshez mindhárom falazatnál azonos, 1015 mm hosszúságú falszakaszt vettem fel. Ez a vizsgált ablakmetszetek hosszának (ami 740 mm volt) közel másfélszeresével egyezik meg, ami elegendő az eltérő szerkezeti részek kapcsolódása miatt kialakuló többlethatások lecsengéséhez.

Az elemzés során több anyag esetében is lehetőség volt a program anyagkönyvtárában megtalálható típusokat használni, de új anyagokat is definiálnom kellett a hővezetési értékük megadásával, amelyeket katalógusok alapján vettem fel. Az elemzés a 4.1 fejezetben leírtaknak megfelelően történt, a peremfeltételek a 3. táblázat értékeinek megfelelően kerültek megadásra.



### 4.3 Beépített ablak üvegezésének helyszíni vizsgálata

Az ablakszerkezetek hőátbocsátásának meghatározására a szabványokban rögzített útmutatások, a számítógépes szimulációk és a laboratóriumi vizsgálatok mellett, további lehetőség a már beépített szerkezetek helyszíni mérése. Felmerülhet a kérdés, hogy az említett vizsgálati módszerek mellett, miért van erre szükség, hiszen az ablakot is, mint valamennyi egyéb terméket forgalomba hozatal előtt mindenképpen be kell vizsgáltatni és tanúsítványt kell rá szerezni.

Hétköznapi értelemben az ablak jellemzői konstansként vannak kezelve, azonban könnyen beláthatjuk, sőt az évek múlásával tapasztalhatjuk is, hogy az ablak valamely jellemzője megváltozik, rosszabbul működik. Például a használatból vagy degradációból fakadóan, esetleg a rendszeres karbantartás hiánya miatt legtöbbször az ablak valamely teljesítőképességi jellemzője nem olyan, mint az elején. Ezt legkönnyebben a tok-szárny kapcsolati réseken létrejövő filtrációnak köszönhetően tapasztalhatjuk, aminek okát könnyen el is tudjuk képzelni, hiszen egy „nyitott”, nyitható kapcsolatról van szó [Bencsik et al. 2011]. Ezzel ellentétben az üvegezés egy olyan zárt rendszernek tekintendő, ahol nincs ilyen jellegű kapcsolat. Ennek ellenére mégis végbemennek olyan folyamatok, amik kedvezőtlenül hatnak az üvegezés jellemzőjére, leginkább annak hőátbocsátására. Ennek oka, hogy az üvegrétegek közötti térrészbe bezárt nemesgáz – amely hatékonyan javítja a hőszigetelő hatást – az idő múlásával és a környezeti hatások következtében az üvegezés mentén „megnyíló” réseknek köszönhetően ki tud jutni a zártnak hitt térrészből és helyére a sokkal rosszabb hőszigetelő tulajdonságú levegő áramlik. Az üvegezés helyszíni vizsgálatára a TESTO által kifejlesztett speciális mérőműszer biztosított lehetőséget.

A DIN 4108 épületek hőszigetelésére vonatkozó szabványban több elv létezik a hőátbocsátási tényező és hőáram számítására, amelyek kombinációjából levezethető a hőmérsékletkülönbségek mérésén alapuló  $U$ -érték meghatározás. Ezt a módszert Fekete 1985-ben úgy írta le, hogy „a hőátbocsátási tényező a szerkezet felületén elhelyezett sok termoelem segítségével, a felületi és a környezeti hőmérséklet különbségből meghatározható”. A vizsgálat a hőátadás és hőátbocsátás fizikai törvényszerűségein alapul. Állandósult állapotban ugyanaz a hőmennyiség adódik át a belső levegőtől a felületnek (falnak vagy üvegnek), mint amennyi azon keresztül távozik (28. ábra), így a 14. és 15. egyenletek egyenlővé tehető, amelyet egyszerűsítve és rendezve a 16. összefüggést kapjuk eredményül.

$$Q = A \cdot \alpha \cdot (t_b - t_f) \quad (14)$$

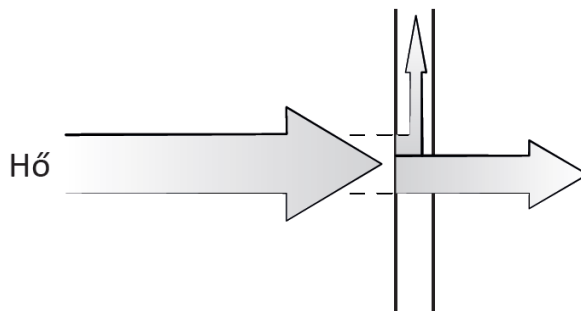
$$Q = A \cdot U \cdot (t_b - t_k) \quad (15)$$

ahol:

- $Q$  hőáram [ $\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $A$  felület [ $\text{m}^2$ ]
- $\alpha$  hőátadási tényező [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- $U$  hőátbocsátási tényező [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$t_b$  belső léghőmérséklet [°C]  
 $t_f$  belső felületi hőmérséklet [°C]  
 $t_k$  külső léghőmérséklet [°C]

$$U = \frac{\alpha \cdot (t_b - t_f)}{(t_b - t_k)} \quad (16)$$



28. ábra. Hőátbocsátás és hővezetés kapcsolata üveglappal

Ebből adódik, hogy az  $U$ -érték meghatározásához a belső hőátadási tényező ( $\alpha$ ) megadása mellett elegendő a belső ( $t_b$ ) és külső ( $t_k$ ) léghőmérsékletet, valamint a belső felület felületi hőmérsékletét ( $t_f$ ) mérni, azonban bizonyos feltételeknek még teljesülniük kell.

A belső és külső léghőmérséklet között jelentős különbségnek kell lennie, amely ideális esetben 15 °C. A hőmérsékleteket egyidejűleg kell mérni és konstans körülményeket kell biztosítani (műszer és érzékelők stacionárius állapota). Körültekintően kell eljárni a műszer elhelyezését illetően is, ugyanis az érzékelőket sugárzó hidegtől és hőtől (pl. fűtőtestek) védeni kell, mert ezek befolyásolják a mért hőmérsékleteket és ezáltal az  $U$ -értéket. A külső és belső levegő hőmérséklet érzékelőket a faltól lehetőleg kb. 30 cm távolságban, közel egyező magasságban kell elhelyezni. A hőátadási tényezőt ( $\alpha$ -érték, az EN ISO 10077-1-ből következően 7,69 W·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>), a mérés intervallumát és a mintavételezési időközöket a felhasználónak manuálisan kell beállítani a műszer menüjében.

A helyszíni méréseket egy soproni társasházi lakás 2004-ben beépített hőszigetelt ablakán végeztem. A lakás az első emeleten helyezkedik el, az ablak északi tájolású.

A mérések során használt *TESTO 435-4* típusú multifunkcionális mérőműszerhez a külső léghőmérséklet mérésére rádiófrekvenciás érzékelőt (rendelési szám: 0554 0189) használtam, amely -20... +70 °C hőmérsékletig ±0,3 °C pontossággal képes mérni. A mérés során a rádiós szonda végig stabil vezeték nélküli kapcsolatot biztosított, így nem volt szükség vezetékes kapcsolat kialakítására. A felületi hőmérséklet mérésére a háromágú termoelem érzékelőket gyurmával rögzítettem a vizsgálni kívánt felületre. Ezek pozícióját úgy választottam meg, hogy az üvegezés keretbe illesztésének peremétől olyan távolságra kerüljenek, hogy az üvegezés távtartó okozta hideg zónájától kívülre essenek, tehát az üvegezés központi részére jellemző értéket mérhessem. A belső léghőmérsékletet maga a *TESTO* műszer csatlakozójában elhelyezett szenzor mérte (29. ábra), de ugyanez az egység rögzített minden mért értéket is.

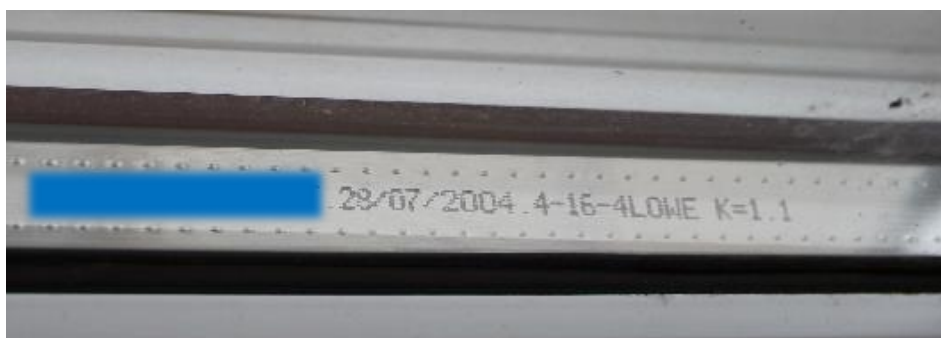
A módszer további előnye, hogy nincs szükség kalibrációra, és manuális számolásra, mert a mérést követően a műszer által az  $U$ -érték gyorsan, megbízhatóan és automatikusan meghatározásra kerül. Az aktuális érték folyamatosan látható a kijelzőn, amelyeket a műszer, előre betáplált időközönként memóriába ment. A módszer tehát alkalmas pillanatnyi mérésre is, azonban a mérés megbízhatósága jelentősen növelhető egy hosszabb vizsgálati periódussal.



29. ábra. TESTO mérőeszközök elhelyezése a helyszíni mérés során

A helyszíni mérés során a 30. ábrán látható gyártói megjelöléssel rendelkező kétrétegű üvegszerkezetet mértem, amelynél az üvegezés távtartóján látható  $k$  tényező, a ma használatos  $U$  tényezőnek felel meg.

Három egymást követő napon mértem az egyes jellemzőket. A mérés minden alkalommal legalább 10 órán keresztül tartott, amelyek során 10 percenként történt mintavételezés és adatrögzítés. Az egymást követő méréseknél a szenzorok pozícióját nem változtattam meg.



30. ábra. A vizsgált üvegszerkezet gyártó által megadott jellemzői

### 4.3.1 Hurst kitevő

A Hurst kitevő meghatározását leíró módszer az alkalmazott matematikában jól ismert tudományterülettel, a fraktálokkal van közvetlen kapcsolatban, amit ott durvasági (roughness) kitevőnek is neveznek [Parmar és Bhardwaj 2013, Yannis és Demetris 2013, Lana et al. 2014].

Hurst (angol hidrológus, 1900-1978) munkásságát a Nílus folyó vizsgálatának és víztárolási problémáinak szentelte. Bevezetett egy új statisztikai módszert, *rescaled range (R/S)* elemzés néven [Hurst et al. 1965].

Az elemzés lényege, hogy hosszú időn keresztül gyűjtött mérési értékek függő vagy független voltát statisztikai módszerrel megállapíthassuk. Ahhoz, hogy megfelelő biztonsággal kijelenthessük, hogy a mérőműszerünk által hosszú időn keresztül mért  $U$ -értékek összefüggő, diszkrét mérési pontok, a 17. egyenlet transzformációt végeztem el.

A Hurst kitevő matematikai megfogalmazása:

$$\frac{R}{S} = (c \cdot \tau)^H \quad (17)$$

ahol:

$\tau$  az idősor

$c$  együttható értéke 0,5 (Hurst szerint)

$H$  Hurst kitevő

Az  $R$  és  $S$  meghatározása:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (18)$$

és

$$S = \left( \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \{ \xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau} \}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

ahol:

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (20)$$

normál, kumulatív adatsort jelent és

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{ \xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau} \} \quad (21)$$

A  $H$  értéke 0 és 1 között változhat és annál ideálisabb minél közelebb van az 1-es értékhez. Ha az adott idősorunknak a  $H$  értéke 0,5 és 1 közé esik, akkor az a függvény úgy jellemezhető, hogy tartalmaz hosszútávú-memória elemeket, tehát esetünkben az  $U$  értékek változása hasonlít önmagára a kezdetekben és végében egyaránt, habár a két pont között látszólag változatos pályát fut be.

### 4.3.2 Wavelet transzformáció

Olyan jelenségek vizsgálatánál, amelyeknél a frekvencia időben változik – mint pl. az ablakok esetében a hőtranszport folyamatok is – időfüggő frekvencia-analízist is alkalmazhatunk [Alessio et al. 2014, Liu et al. 2014, Suryanarayana et al. 2014]. Ilyen például a wavelet transzformáció, ami egy lineáris operátor. A wavelet transzformáció továbbfejlesztett Fourier transzformáció, amely nem csak a jel frekvencia tartalmát mutatja meg, hanem azok időbeni elhelyezkedését is. Egy egyváltozós függvényt, a mi esetünkben az  $U$ -érték váltakozását, egy kétváltozós függvénnyé alakít, amely a függvény komponenseit adja meg, különböző felbontásban. Tehát megmutatja, hogy az egyes komponensek mikor fordulnak elő a jelben. A korrelációs függvény a mért  $U$ -értékek és a külső hőmérséklet értékek között 0,4-0,8 értéket adott eredményül, amely alapján az idősorozatban nincsenek összetartozó fizikai mennyiségek. Ezzel szemben a wavelet transzformáció dekódolta az idősor elemeit kialakító fizikai mennyiségeket. Egy diszkrét hőmérséklet változási szekvencia  $x(s)$  folyamatos wavelet transzformáltja a következőképpen definiálható:

$$W_n(s) = FFT^{-1} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} \hat{x}_k \left( \sqrt{\frac{2\pi s}{\delta t}} \hat{\psi}_0 * (s\omega_k) e^{i\omega_k n \delta t} \right) \right] \quad (22)$$

ahol:

$N$  a diszkrét értékek száma

$s$  wavelet skála érték (esetünkben: 6)

$\delta t$  távolság a diszkrét értékek között (10 perc minden esetben)

$\hat{x}_k$  diszkrét Fourier transzformáció

$\hat{\psi}_0(s\omega_k)$  (alaphullám) kernel függvény, jelen esetben Paul és Morlet típusú (módosított Gauss-görbe), melyeket a következő alakban írhatunk fel:

Paul kernel függvény esetén:

$$\frac{2^m}{\sqrt{m(2m-1)!}} H(\omega) (s\omega)^m e^{-s\omega} \quad (23)$$

Morlet kernel függvény esetén:

$$\pi^{1/4} H(\omega) e^{-(s\omega-m)^2/2} \quad (24)$$

ahol:

$m$  hullámszám

$H(\omega)$  Heaviside lépcsőfüggvény,  $H(\omega) = 1$  ha  $\omega > 0$ ,  $H(\omega) = 0$  egyébként.

A wavelet skála 6-ra felvett értéke a „Morlet ablakfüggvény” minimálisan megadható szélességét jelöli, amelyet a fizikai paraméterek változása és a jobb szemléltethetőség miatt alkalmaztam. A wavelet transzformáció a sűrűségfüggvény karakterisztikáit egyértelműen meghatározza a választott alaphullám és a skálaparaméter értéke mellett.

A módszer segítségével vizsgáltam, milyen új lehetőségeket nyújt a wavelet transzformáció az  $U$ -értékek lokális változásai egy adott, hosszú, több órás mérés együttes ábrázolása esetén. A gyakorlatban a magas frekvenciás hatások nem homogén módon jelentkeznek. Az egyes komponensek pedig csak ott lesznek magas értékűek, ahol az azonos hatások koncentrálódnak. Az eredmények fejezetben bemutatott wavelet spektrumokból a szélhatás (cone of influence) jelenség ki lett zárva.

A wavelet transzformációkat AutoSignal programmal készítettem, ami képes teljesen automatizálni a jelelemzés folyamatát. A program segítségével a mérési eredmények azonnal láthatók a 2, illetve 3 dimenziós ábrákon, kiegészítve számszerűsített értékekkel, de az összetett jelek komponensei is gyorsan megtalálhatóak. A program lehetőséget nyújt a jel-adatok finomítására is a különböző beépített zajcsökkentő eljárásokkal.

Az AutoSignal program által nyújtott fontosabb spektrumelemzési lehetőségek:

- gyors Fourier transzformáció (FFT),
- mozgóátlag,
- komplex exponenciális modellezés,
- minimum variancia módszerek.

## 4.4 Nano felületbevonás normál ablaküvegen

### 4.4.1 Alkalmazott anyagok

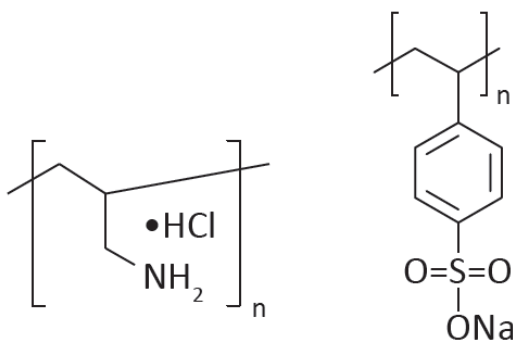
A kutatás során különböző fénoxid nanorészecskéket használtam fel (por formában), úgymint ZnO, TiO<sub>2</sub> és SiO<sub>2</sub>. A nanorészecskék a Sigma Aldrich-től származtak, tulajdonságaikat a 4. táblázat tartalmazza. A polielektrolitot is tartalmazó multirétegek esetén az alkalmazott polianion a PSS, a polikation a PAH volt (tulajdonságaik az 5. táblázatban, míg kémiai szerkezetük a 31. ábrán láthatóak).

4. táblázat. Alkalmazott nanorészecskék és tulajdonságaik

	méret	izoelektromos pont
ZnO – cinkoxid	20 nm	pH 9,3
TiO <sub>2</sub> – titán-dioxid	70 nm	pH 6,7
SiO <sub>2</sub> – szilícium-dioxid	20 nm	pH 1,8-2,5

5. táblázat. Alkalmazott polielektrolitok és tulajdonságaik

	átlagos molekulatömeg (Mw)	megjelenés
PAH: poli(allilamin-hidroklorid) polikation	15 000 g·mol <sup>-1</sup>	szilárd, por
PSS: nátrium-poli(sztiroil-szulfonát) polianion	70 000 g·mol <sup>-1</sup>	szilárd, por



31. ábra. PAH (balra) és PSS (jobbra)

#### 4.4.1.1 Kolloidok előállítása

A nanorészecskéket tartalmazó kolloidok előállítása során a nanorészecskékből és desztillált vízből 0,01 t%-os kolloidot képeztem, amelyhez a nanorészecskék tömegének grammban való bemérését analitikai mérleg segítségével, 3 tizedesjegy pontossággal végeztem. Az esetlegesen jelenlévő aggregátumok, illetve agglomerátumok felbontása érdekében a kolloidokat *Tesla* márkájú rudas ultrahangos berendezéssel 20 percig kezeltem maximális amplitúdón, majd az ultrahangos kezelést *Tesla* márkájú ultrahangos kádban folytattam, további 20 percig (32. ábra). A ZnO kolloid esetén a pH-t HCl segítségével 4-re állítottam be. A polielektrolitok esetén a koncentráció  $1 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$  volt. A polielektrolitok desztillált vizes oldatának pH-ja semleges maradt.



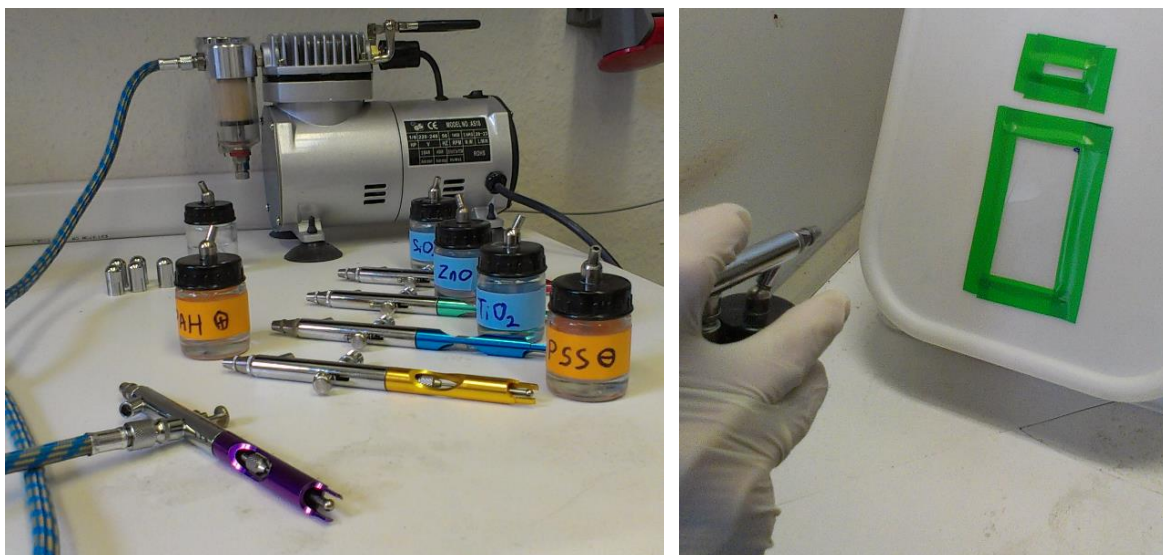
32. ábra. Tesla ultrahangos berendezések: rudas (bal oldal) és ultrahangos kád (jobb oldal)

A rudas ultrahangos berendezés által előállított frekvencia 20 kHz (az ettől való eltérés nem lehetséges), a teljesítmény  $35 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , míg a választott amplitúdó 30 mikrométer volt. Az alkalmazott edény (főzőpohár) 60 mm átmérőjű, 250 ml-es és 120 mm magasságú volt. A

berendezés rúdja 18 mm-es átmérővel rendelkezik, amelynek vége az edény aljától 75 mm-es távolságra volt beállítva. A kádas ultrahangos berendezés 25 és 75 kHz-es duál frekvencia egységgel és  $56 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  teljesítménnyel rendelkezik.

#### 4.4.1.2 LbL-rétegek létrehozása, hőkezelése

A nanobevonatokat  $9\times 30$  mm-es, valamint  $50\times 100$  mm-es méretekre levágott, 3 mm vastag normál (float) üveglapokra párban készítettem el. Az üveglapokat a Szalai üvegipari vállalkozástól szereztem be. Az elektrosztatikus rétegeképzést a bevonandó üvegfelületek alkoholos tisztítását, desztillált vizes lemosását, majd egy hordozófelületre való felragasztását követően szórással valósítottam meg. A szórást egy Airbrush mini studio bd 818 típusú cserélhető fejes (pisztolyos) kompresszor segítségével végeztem, így a különböző rétegek felvitele között nem volt szükséges kimosni a pisztolyokat (33. ábra). A szórópisztolyok dűznije  $0,35$  mm átmérőjű volt, amikhez  $22 \text{ cm}^3$ -es tartályt csatlakoztattam. A nanorétegek felhordását egy folyamatos elszívású elszívófülkében végeztem.



33. ábra. A felhordáshoz használt kompresszor és anyagok (bal oldal), szórás művelete (jobb oldal)

A rétegek felvitele során a helyiségben  $22\pm 3$  °C hőmérséklet, normál légköri nyomás és  $52\pm 5$  %-os relatív páratartalom volt. A nanorétegek felhordását  $20$  cm távolságról fentről lefelé, majd lentől felfelé egyenletesen haladva  $30$  másodpercig végeztem, majd a felületre szórt anyagot  $20$  másodpercig hagytam a felületen. Az egyes rétegek felvitele között desztillált vízzel való szórással távolítottam el a felesleges, nem adszorbeálódott vegyületeket. A mosást követően a felület leszárítása sűrített levegővel történt. Az üvegfelület töltéssűrűségének egyenletessé tétele, illetve a töltés erősségének növelése érdekében az üvegfelület polielektrolitos előzetes elektrosztatikus adszorpcióját is elvégeztem. A kutatás e része során kilencféle bevonatú minta készült, kettős, kvadrát, illetve hepta rétegek felvitelével. Az üveghordozóra felvitt multirétegek összetételei a 6. táblázatban láthatóak (a zárójelek melletti szám a kettős, kvadrát, illetve hepta rétegek számát jelöli).



6. táblázat. Az LbL multirétegek összetételei

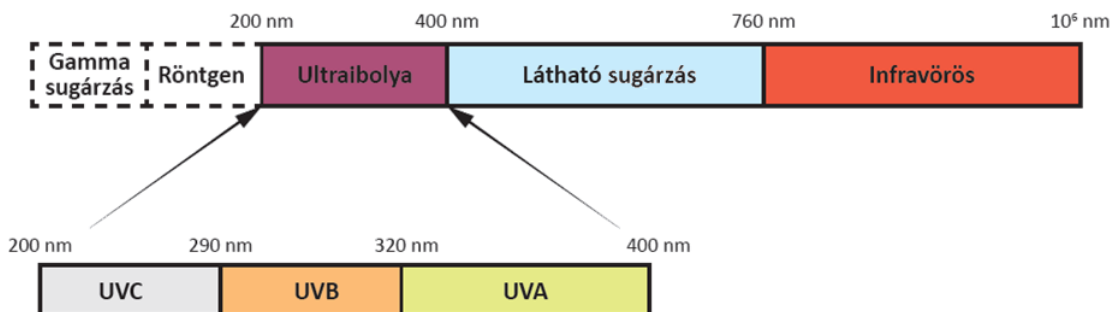
	multiréteg összetétel	előrétegek
1	(PSS/ZnO)×20	(PAH)*1
2	(PAH/SiO <sub>2</sub> )×20	(PAH-PSS)*1
3	(PAH/TiO <sub>2</sub> )×20	(PAH-PSS)*1
4	(ZnO/SiO <sub>2</sub> )×20	(PAH-PSS)*1
5	(ZnO/TiO <sub>2</sub> )×20	(PAH-PSS)*1
6	(ZnO/SiO <sub>2</sub> /ZnO/TiO <sub>2</sub> )×10	(PAH-PSS)*1
7	(PAH/SiO <sub>2</sub> /PAH/TiO <sub>2</sub> )×10	(PAH-PSS)*1
8	(PAH/SiO <sub>2</sub> /PAH/TiO <sub>2</sub> /PAH/PSS/ZnO)×5	(PAH-PSS)*1
9	(PAH-PSS)×20	-

A bevont üvegmintákat termikus kezelésnek vetettem alá, annak érdekében, hogy a nanobevonat stabilabb legyen, illetve, hogy szervesetlen bevonatokat kapjak. Az első hőkezelés 180 °C-on (az eredmények fejezetben található diagramokon, ábrákon „(I)” jelöléssel), míg a második hőkezelés 500 °C-on történt (az eredmények fejezetben található diagramokon, ábrákon „(II)” jelöléssel), de mindkét hőkezelés 5 órán át zajlott.

#### 4.4.2 Alkalmazott vizsgálati módszerek

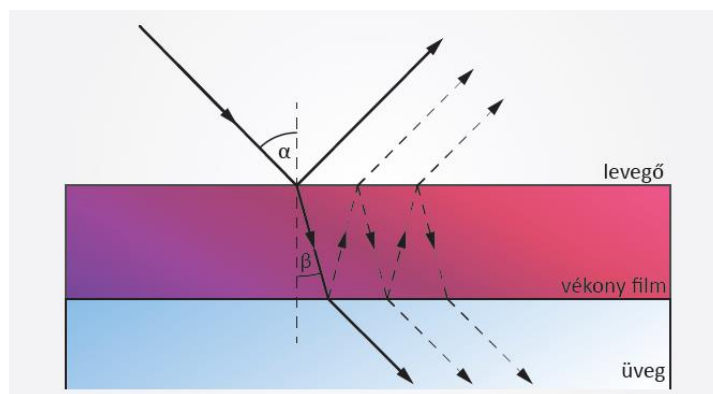
##### 4.4.2.1 UV-VIS-NIR spektrofotometria

A nyílászárók üvegeinél fontos kritérium a látható tartományban (~400-760 nm) való sugárzás nagymértékű átteresztése, vagyis az átlátszóság, illetve a NIR (közeli infratartomány) tartomány visszaverése. Az átlátszóság vizsgálatára UV-VIS (ultraibolya-látható) spektrofotometriát használtam. A transzmittancia mérését az UVB és az UVA, illetve a NIR tartományokon is elvégeztem (mintánként 3-3 mérést), majd az ezeken a tartományokon (34. ábra) kapott értékeket átlagoltam.



34. ábra. Az UV, VIS és az IR sugárzások hullámhossz tartományai

A 35. ábra szemlélteti a beeső fény útját egy nanobevonattal ellátott üveglap esetében.



35. ábra. Beeső fény útja a vékonyfilmen és az üvegen keresztül

#### 4.4.2.2 Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia

A Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR) segítségével határoztam meg a minták által reflektált infravörös sugárzás mértékét az 1500 - 20000 nm hullámhosszúságú tartományon. Ennél az analitikai módszernél a spektrális információkat nem monokromatikus fényvel, hanem egyidejűleg nagyon sok frekvenciát tartalmazó fénysugárral kapjuk meg, amelyeket úgy módosítunk, hogy másféle frekvenciakombinációkból álljon, ami által egy második adatpontot kapunk. A számítógépes program az adatok alapján meghatározza, hogy mekkora az egyes hullámhosszaknál jelentkező elnyelés. A nyers adatok feldolgozása Fourier-transzformációs algoritmussal végezhető el. A mérést spektrofotométerrel végeztem, a pontossága érdekében ATR feltétet használtam (36. ábra). A szkennelési sebesség  $2 \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$ , a felbontás pedig  $4 \text{ cm}^{-1}$  volt.



36. ábra. Spektrofotométer (bal oldal), ATR PRO450-S feltét (jobb oldal) [Forrás: web 7]

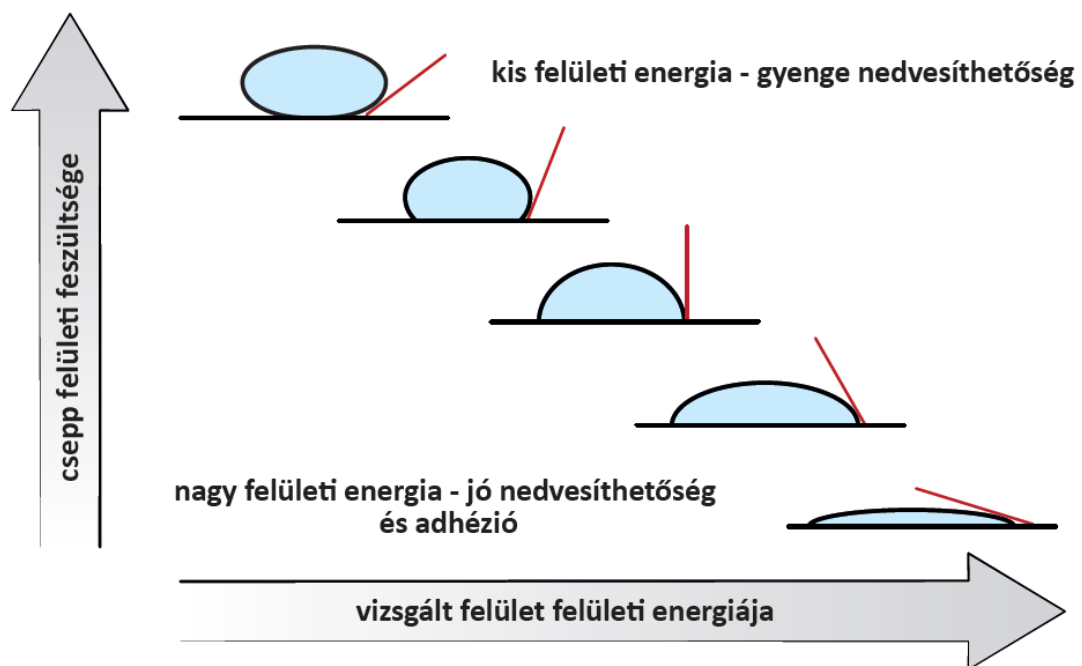
#### 4.4.2.3 Felületi energia, peremszög mérés

Az LbL technológiával bevont felületek tulajdonságainak (hidrofobitás-hidrofilitás, felületi energia) változásait peremszög méréssel, PGX goniométer (37. ábra) segítségével határoztam meg. A mérés során az eszköz  $5 \mu\text{l}$ -nyi desztillált víz cseppet cseppent a felületre és egy kamera segítségével rögzíti a csepp képét. Az eszköz szoftverének segítségével meghatározhatók a jobb és bal oldali peremszögek, a felület nedvesíthetősége, a felületi feszültségek, energiák egyaránt. A vizsgálat során a készülékkel statikus módban (azaz a

cseppentés utáni mérési időpontokat objektív módon meghatározva és nem a szoftver által automatikusan meghatározott időközökben) végeztem méréseket, minden minta esetén 3 különböző helyen vizsgálva a tulajdonságokat, rögtön a csepp felületre érkezését követően 10-10 mérést végezve. A nedvesítés és a felület felületi energiájának összefüggéseit mutatja be a 38. ábra.



37. ábra. PGX goniométer adhézió és nedvesíthetőség mérésére [Forrás: web 8]



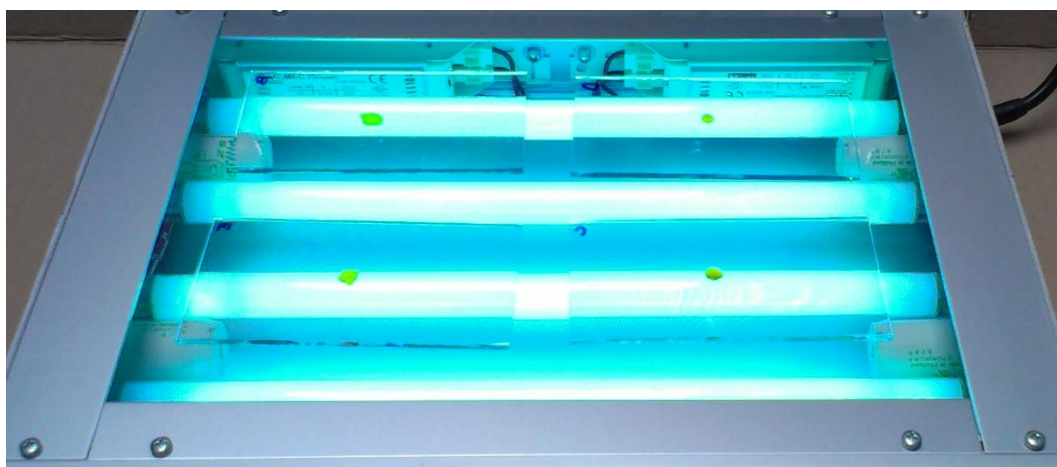
38. ábra. A nedvesítés és a felület felületi energiájának összefüggése [Forrás: Connolly 2010]

#### 4.4.2.4 A bevonatok felülettisztító hatásának vizsgálata

A bevonatok felülettisztító, szerves anyag lebontó hatásának vizsgálatát, a szakirodalomban erre a célra gyakorta alkalmazott metilnarancs oldattal ( $2,4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) vizsgáltam [Yu és Zhao 2000, Chen et al. 2006, Qian 2008, Tang 2013]. A szerves anyag degradációját a metilnarancs ( $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$ ) csepp elszíntelenedése mutatja. A minták felületére Pasteur pipettával  $10 \text{ }\mu\text{l}$ -nyi metilnarancsot cseppentettem (39. ábra) és UV-A nagy hullámhosszúságú (315-400 nm) sugárzásnak tettem ki (40. ábra).



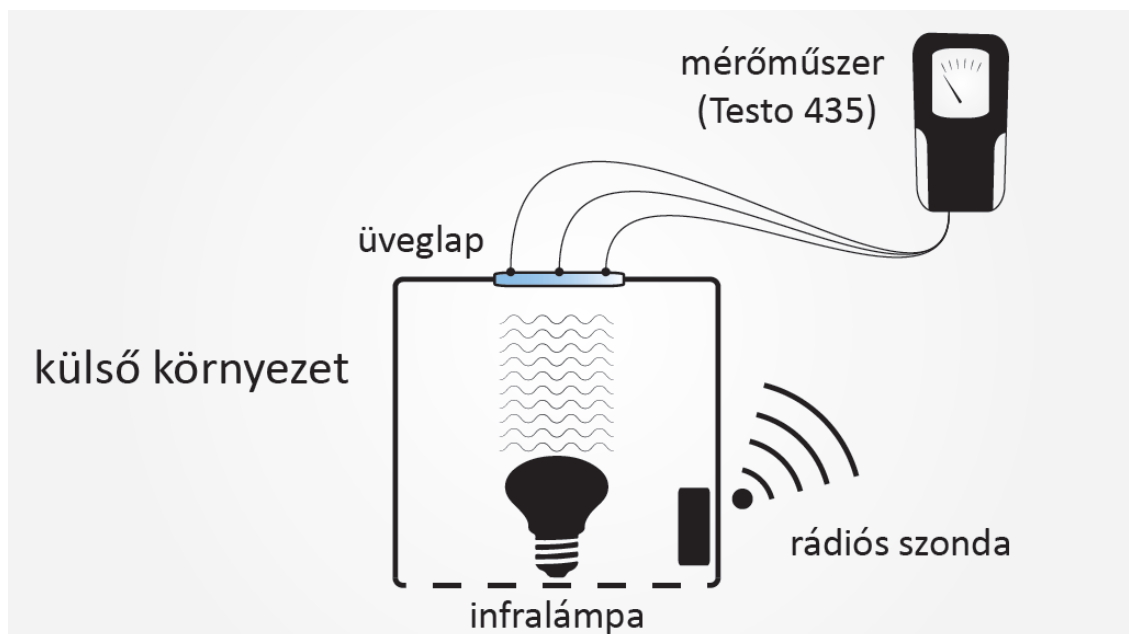
39. ábra. Metilnarancs oldat felvitele az üveglapokra



40. ábra. Üveglapra felvitt metilnarancs oldat UV sugárzásnak kitéve

#### 4.4.2.5 Hőátbocsátási tényező meghatározása

A mérés kivitelezéséhez infravörös sugárzást kibocsátó sugárforrást (Philips R40, 250 W, tartomány:  $\sim 700\text{-}3000\text{ nm}$ ) alkalmaztam. A mérés kivitelezéséhez állványos, hőszigeteléssel ellátott eszközt készítettem, amelynek tetején kimetszéssel egy rést alakítottam ki (41. ábra). Erre a kis kimetszett nyílásra az üvegmintákat a bevont felülettel lefelé helyeztem el. Az IR forrás a szigetelt házban foglalt helyet. A hőátbocsátási tényezőt mérő berendezés rádiós szondája a szigetelt házban lévő hőmérsékletet, az összekapcsolt termoelemek az üvegfelületek külső hőmérsékletét, míg a külső levegő hőmérsékletét, maga az értékeket rögzítő egység detektálta.



41. ábra. A hőátbocsátási tényező meghatározása infravörös sugárzóval az LbL bevonatos üveglapok esetén

#### 4.4.2.6 A vékony film modellezésének előkészítése

A fénytörési mutató egy adott közeg optikai tulajdonságát jelenti. Ha a közeg teljesen átlátszó, a fénytörési mutató ( $n$ ) tisztán valós mennyiség. Ha a közeg elnyel, abszorbeál bizonyos tartományú fényt, a fénytörési mutató komplexszé válik ( $\bar{n}$ ).

Üveglapok felületére számos eljárással lehet vékonyfilm réteget felvinni és modellezni azokat. Ilyen eljárás például a vákuum és a mágneses porlasztás [Hassan et al. 2010, Kars et al. 2010], a szol-gél technika [Haimi et al. 2011] vagy a bemeztetés. Lineáris modellezési eljárások pedig az Arago-Biot, Gladstone-Dale vagy a nem-lineáris módszer a Drude, Lorentz modell [Hostetler et al. 1998, Viitala et al. 2000]. A vékony film rétegek anyagaira a szakirodalom áttekintése során a következőkre találtam példát: bemeztetési technikával etanolban diszpergált  $\text{TiO}_2$  szol film és hőkezeléses rögzítéssel [Mathias et al. 2014], indium-ón átlátszó, vezető oxid filmréteg kémiai párologtatással, hőkezeléssel [D'Elia et al. 2009], valamint arany-ón és réz-ón filmek vákuum, hő porlasztással [Wronkowska et al. 2013]. Ezekben a példákban az említett modellezések valamelyikével elméleti számításokat is végeztek, amelyekkel összehasonlították a kísérletek eredményeit. A kapcsolódó irodalom áttekintése után megállapítottam, hogy bár a modellek ismertek és több különböző anyag kombinációkra kipróbálták, egyrészt Low-E üveg készítéshez, másrészt a fénytörés tanulmányozása céljából, az általam választott félvezetőkre még nem alkalmazták a bemutatni kívánt modellt és LbL technikával sem vittek fel ilyen típusú rétegeket. A következőkben a Drude-Lorentz féle modelről írok, mert a választott félvezető anyagokból készült filmeket ezzel lehet jól jellemezni [Almog et al. 2011, Yang et al. 2009]. Vizsgálataim során a nanofilmek több rétegben kerültek felhordásra, így feltételezhetjük a homogén bevonat kialakulását és optimális esetben a következő egyenletekkel jellemezhetjük azokat.

Lineáris, izotróp anyagok esetén a hullám egyenlet elektromos tér esetén Maxwell szerint a következő alakban írható fel:

$$\nabla^2 E - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (25)$$

ahol:

- $E$  elektromos tér
- $\mu, \varepsilon$  komplex mennyiségek
- $\mu$  mágneses permeabilitás
- $\varepsilon$  elektromos permittivitás
- $t$  idő.

A 25. egyenlet megoldása:

$$E(r, t) = E_0 e^{j(\omega t - k \cdot r + \varphi)} \quad (26)$$

ahol  $r$  és  $t$  polárkoordinátákat jelölnek.

Ha a 26. egyenletet behelyettesítjük a 25. egyenletbe, akkor a következőt kapjuk:

$$k^2 = \mu \cdot \varepsilon \cdot \omega^2 \quad (27)$$

ahol:

- $k$  a hullámszám
- $\omega$  a fény frekvenciája.

Ezek alapján a fénytörés komplex indexet a következők szerint írhatjuk fel:

$$\bar{n}^2 \triangleq (n - jK)^2 \triangleq \mu\varepsilon c^2 = \frac{\mu\varepsilon}{\mu_0\varepsilon_0} \quad (28)$$

Ehhez hasonlóan a diszperzió kapcsolata a közeggel:

$$k = \bar{n} \frac{\omega}{c} \quad (29)$$

ahol:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} \quad (30)$$

A 28. egyenlethez hasonlóan a fénytörés komplex indexét a következő alakban is felírhatjuk:

$$\bar{n} \triangleq (n - jK)^2 = n(1 - j\kappa) \quad (31)$$

ahol  $\kappa$  az abszorpciós indexet jelenti.

Hosszú időn keresztül a komplex fénytörési mutatót egyetlen konstans értékkel jellemezték, ami nagyon elnagyolja ennek valódi értékét, mivel frekvenciafüggő. Ez a frekvenciafüggés pedig a permittivitással hozható összefüggésbe. A következőkben erre szeretnék rámutatni. Amikor egy elektromos mező hat egy lineáris, idő-invariáns dielektrikumra, a szabad töltések elektromos átrendeződése ( $D$ ) és az elektromos mező ( $E$ ) a konvolúciós elmélettel hozható kapcsolatba:

$$D(r, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty R(r, t) E(r, t - \tau) d\tau \quad (32)$$

Ebből jól látszik, hogy a  $D$  és  $E$  mezők a permittivitáson keresztül hozhatók kapcsolatba. Ha a  $D$  késik az  $E$ -hez képest egy adott időpillanatban, akkor nem csak az az adott időpillanat számít, hanem minden korábbi érték is hozzájárul a késéshez. Tehát a permittivitás frekvenciafüggő mennyiség.

$$D(\omega) = \bar{\epsilon}(\omega)\epsilon_0 E(\omega) \quad (33)$$

ahol  $\bar{\epsilon}(\omega)$  jelenti a komplex, dimenzió nélküli dielektromos együtthatót és ez a dielektromos együttható a törésmutatóval a következő kapcsolatot mutatja:

$$\bar{\epsilon}(\omega) = (\bar{n}(\omega))^2 \quad (34)$$

ahol

$$\bar{\epsilon}(\omega) = \epsilon_{re}(\omega) + i\epsilon_{im}(\omega) \quad (35)$$

Ezen az egyenleten keresztül érthető meg, hogy a komplex törésmutató milyen kapcsolatban van az elektronokkal a vizsgálandó anyagban, ami nem más, mint az anyag elektromos viselkedése. Ebből kiindulva szeretném bemutatni a korábban már említett Drude-Lorentz-féle modellt, amely a 20. század elején formálódott, így az elektronokat klasszikusan részecskének tekinti. A modell alapja, hogy egy anyagon belül az atomokat és molekulákat harmonikusan kötött elektronokként modellezzük, amelyeknek van valamilyen saját frekvenciája  $\omega_0$ . Az elektronokat csillapítottan modellezzük, tehát hat rájuk valamilyen csillapítási erő. A molekuláris mezőt  $E_m(t)$  pedig az elektronok határozzák meg, valamilyen gerjesztő erők összegeként  $eE_m(t)$ . Ez a rendszer így egy csillapított, harmonikus oszcillátorként modellezi az elektronok mozgását.

Newton második törvénye szerint a csillapított, harmonikus oszcillátort egy másodfokú lineáris differenciálegyenlettel lehet jellemezni:

$$F_{res} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (36)$$

$$-Cx(t) - G \frac{dx}{dt} + eE_m(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (37)$$

ahol:

$x(t)$  az elektron kimozdulását jellemzi az egyensúlyi állapotból

$m$  az elektron tömege

$-Cx(t)$  a rugóállandó

$-G \frac{dx}{dt}$  a csillapító erő

$E_m(t)$  az elektromos tér, és az általa gerjesztett

$eE_m(t)$  mozgató erő.

Ha bevezetjük a csillapítási konstans fogalmát  $\gamma = \frac{G}{m}$  alakban és a csillapítatlan oszcillátor saját frekvencia négyzetét, mint  $\omega_0^2 = \frac{C}{m}$ , akkor a következő differenciálegyenlethez jutunk:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{eE_m(t)}{m} \quad (38)$$

Szabad elektronok esetén a visszatartó erő nincs jelen, így  $\omega_0 = 0$ . Statikus állapot esetén az  $x(t)$  deriváltja 0 és a saját frekvenciáját a csillapítatlan oszcillátornak a következőkkel lehet jellemezni:

$$\omega_0^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m R_0^3} \quad (39)$$

ahol  $R_0$  az atommag sugarát jelenti. Két helyettesítéssel a mechanikus mozgást  $x(t)$  és a molekuláris mezőt  $E_m(t)$  el lehet különíteni az egyenletből. Először számoljunk a polarizációval, ami a töltött részecskék számával  $N$  és a dipólus momentummal  $ex(t)$  arányos:

$$P(t) = Nex(t) \quad (40)$$

Másodsorban számoljuk ki a molekuláris erőteret  $E_m(t)$ , amit egy külső elektromos tér  $E(t)$  hoz létre polarizálva a molekulákat az adott anyagban. Izotrópikus anyagok esetén:

$$E_m(t) = E(t) + \frac{\nu}{\epsilon_0} P(t) \quad (41)$$

ahol  $\nu$  a sugárzási frekvenciát jelöli.

Ezt a két utóbbi egyenletet visszahelyettesítve a 38. egyenletbe kapjuk:

$$\frac{d^2P}{dt^2} + \gamma \frac{dP}{dt} + \omega_0^2 - \nu\omega_p^2 = \epsilon_0\omega_p^2 E(t) \quad (42)$$

ahol  $\omega_p$  a plazma frekvencia:

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m} \quad (43)$$

ahol:

- $N$  az elektronok száma köbméterenként
- $e$  az elektron abszolút töltése ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C)
- $\epsilon_0$  a vákuum permittivitása ( $8,854 \cdot 10^{-12}$ )
- $m$  az elektron tömege ( $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg)

A plazma állapot elektromosan vezető, ionizált állapotú, töltéssel rendelkező gáz részecskék halmazállapota, amelyet nagyon magas hőmérséklettel vagy nagyon alacsony részecske sűrűséggel lehet előidézni. Egyensúlyi állapotban az elektronok elektromos tere és az ionizált atommag kiegyenlítik egymást, de ezt az állapotot nehéz fenntartani. Az elektronok és atommag térbeli valószínűségi helyei (kaotikus mozgás) helyett vegyük a tömegközéppontjukat és távolságukat. Egyensúlyi állapotban ezek egybeesnek. Azonban ha az elektronok megpróbálnak elmozdulni a Coulomb erő aktiválódik és megpróbálja visszaállítani őket az eredeti pozícióba, tehát az oszcillációs mozgás beindul. Azt a frekvenciát, amelyen ezek az oszcillációs mozgások rezonálnak, plazma frekvenciának nevezzük.



A következőkben az üveg makroszkópikus optikai állandóinak és a mikroszkópikus elektromos-dipól gerjesztéseknek a kapcsolatával foglalkozom. Ez a kapcsolat leginkább a Drude-Lorentz-féle harmonikus oszcillátorral jellemezhető, amelyet a 20. század elején írtak le és ebből következően az elektronokat klasszikus részecskéként jellemezték még, ahogy ezt már korábban is leírtam. A modell alapja, hogy az adott anyagban az atomok és molekulák helyett harmonikusan kötött elektronokat használunk, amelyeknek a rezonancia frekvenciája:  $\omega_0$ . A harmonikusan kötött elektronok kifejezés egyensúlyi állapotban lévő elektronokat jelöl, lineáris visszatartó erővel, mint a rugók esetében. Az elektronokat a csillapító erők függvényében jellemzik. Továbbá az elektronokra ható elektromos erőteret az előbbieket alapján  $E_m(t)$ -vel és a létrehozott erőt  $eE_m(t)$ -vel jelöljük. Ennek eredményeképpen jön létre a csillapított harmonikus oszcillátor elmélet, amellyel már leírhatóak az elektronok mozgásai. Mivel a modellbe kvantum mechanikai elemeket nem építettek be, jól használható hővezetési esetekben, de hő kapacitásnál már nem.

Az elektromos érzékenységet is figyelembe véve az általános összefüggés az adott anyag dielektromos együtthatója (fénytörési mutatója) és a mikroszkópikus tulajdonságai között a 44. egyenlettel jellemezhető, amelyből látható, hogy  $\bar{\epsilon}(\omega)$  komplex kifejezés és frekvencia függő.

$$\frac{\bar{\epsilon}(\omega)-1}{1+\vartheta(\bar{\epsilon}(\omega)-1)} = \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2-\omega^2-j\gamma\omega} \quad (44)$$

A megoldáshoz hozzátartozik, hogy különböző részecskék, különböző távolságban az egyensúlyi állapotukban különböző természetes frekvenciával és csillapítással rendelkeznek. Mivel a részecskék elektronok, az anyagban nincsenek ionok, ezáltal a tömeg és töltés állandó. A modell egyszerűsítéséhez vegyük figyelembe csak a vegyérték elektronokat, így a távolságok az egyensúlyi állapothoz tartozóan állandóak lesznek. Végül, mivel az elektromos érzékenység ( $\vartheta$ ) nullához tart:

$$\bar{\epsilon}(\omega) - 1 = \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2-\omega^2-j\gamma\omega} \quad (45)$$

amely már alkalmas fémek, fém részecskék modellezésére.

A 45. egyenlet valós és képzetes része a következők szerint választható szét:

$$\epsilon_{re}(\omega) = 1 + \frac{\omega_p^2(\omega_0^2-\omega^2)}{(\omega_0^2-\omega^2)^2+(\gamma\omega)^2} \quad (46)$$

$$\epsilon_{im}(\omega) = \frac{\omega_p^2\gamma\omega}{(\omega_0^2-\omega^2)^2+(\gamma\omega)^2} \quad (47)$$

Tudván, hogy a négyzete a komplex törésmutató indexnek  $\bar{n}(\omega)$  a komplex dielektromos együtthatóval  $\bar{\epsilon}(\omega)$  egyezik meg, a valós  $n$  és képzetes  $K$  részei a 48. és 49. összefüggések szerint írható fel. Ezeket az egyes félvezetők függvényében az eredmények fejezetben mutatom be.

$$n(\omega) = Re \left( \sqrt{1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2-\omega^2-j\gamma\omega}} \right) \quad (48)$$

$$K(\omega) = \text{Im} \left( \sqrt{1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - j\gamma\omega}} \right) \quad (49)$$

Ez a modell fém részecskék esetén egyszerűsíthető, ahol a vegyérték elektronok szabadon mozoghatnak és részt vesznek a *direct current* (egyenáram) vezetésben. Ez a része a modellnek a Drude-féle szabad elektron modell. A vegyérték elektronok szabad mozgása azt jelenti, hogy nem hat rájuk semmilyen visszahúzó erő. Ha feltételezzük, hogy  $C = 0$  és  $\omega_0 = 0$ , akkor a 45. egyenlet az 50. egyenlet alakjában írható fel:

$$\bar{\varepsilon}(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + j\gamma)} \quad (50)$$

és ebben az esetben már csak a plazma frekvenciát kell kiszámolni és a csillapítási tényezőt. Ezek a paraméterek anyagjellemzőkből számíthatóak.

## 5. VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

### 5.1 Ablakszerkezetek vége-selemes hőtechnikai számítógépes modellezése

Az eredő hőátbocsátási tényező ( $U_w$ ) meghatározásához az EN ISO 10077-1:2000 és EN ISO 10077-2:2004 szabványok útmutatásai alapján a számításokat minden jellemző metszetre szükséges volt elvégezni, ennek megfelelően a számítógépes elemzéseim kiterjedtek a vízszintes, valamint a függőleges alsó és felső metszetekre. A hőtani elemzés során kapott eredményfájlok közül ebben a fejezetben csupán a függőleges alsó metszetekre vonatkozókat mutatom be, mert a vízvető jelenléte miatt hőtanilag ezek a szerkezetek leggyengébb részei.

A vizsgált ablakok hőmérséklet szintértékpei (a függőleges alsó metszetet esetében) a 42-44. ábrákon láthatóak. Ezek alapján pontos információt kaptam arról, hogy a szabvány szerint beállított peremfeltételek teljesülése esetén a szerkezet egyes rétegeiben milyen hőmérsékletértékek alakultak ki, de az is megfigyelhető hogy az eltérő hővezetésű szerkezeti részek következményeként az egyes hőmérsékleti zónák miként hajolnak, illetve tolódnak el. A fluxus szintértékek segítségével a szerkezet azon területeit tudtam azonosítani, ahol a környező területekhez képest jelentősebb az átáramló hőenergia mennyisége. Ezeken a kritikus helyeken nagyobb hővesztés jön létre, így a felületek és a szerkezetek jobban át tudnak húlni. Az ilyen helyeket nevezzük hőhidaknak. Az ablakvizsgálatok során legnagyobb mértékben az üvegezés keretbe illesztésénél jelentkezett ez a többlethatás, amely számunkra a belső felület mentén a legkritikusabb, hiszen ezek a páralecsapódás tipikus helyei.

A vizsgált ablaktípusok esetében a hőmérséklet szintértékeket megvizsgálva, megállapítható, hogy a 68 mm-es profilvastagságú tömörfa, valamint a passzívház ablak tok-szárny kapcsolata, közel a szerkezeti vastagság feléig jelentősen át tud húlni. Ezzel szemben a 90 mm-es profilvastagságú tömörfa ablak esetében, még a vízvető zónájában is sokkal kiegyenlítettebb hőmérséklet eloszlást láthatunk, amely valószínűleg az alkalmazott vízvetőnek (illetve pozíciójának) köszönhető. Az ábrákon látható aszimmetrikus hőterhelés kedvezőtlenül hat a szerkezetre, csökkentheti az egyes részek (pl. tömítés) tartósságát, élettartamát. A 42-44. ábrákon – függetlenül az ablak típusától – az is megfigyelhető, hogy a keresztmetszetek arányaikban kívülről sokkal jobban át tudnak húlni, mintsem belülről felmelegedni.

Az üvegezések keretbe illesztésénél mindhárom esetben a függőlegeshez képest jelentősen elhajlanak a hőmérsékletvonalak. Ez a távtartó hatás a fluxus szintértékeken is egyértelműen kivehető. A szimulációs eredmények szerint a kettős üvegezés közel  $400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  hőáram veszteségéhez képest a hármas üvegezések esetében ez az érték nagyságrendileg ennek a fele, mindössze  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Ezeket, a jelentős hőáram veszteségnek kitett helyeket (ha nincs lehetőségünk a szimulációs eredményfájlban ezt pontosan megnézni), érdemes a hőmérsékleti ábráról közelítően leolvasható értékekkel párosítva

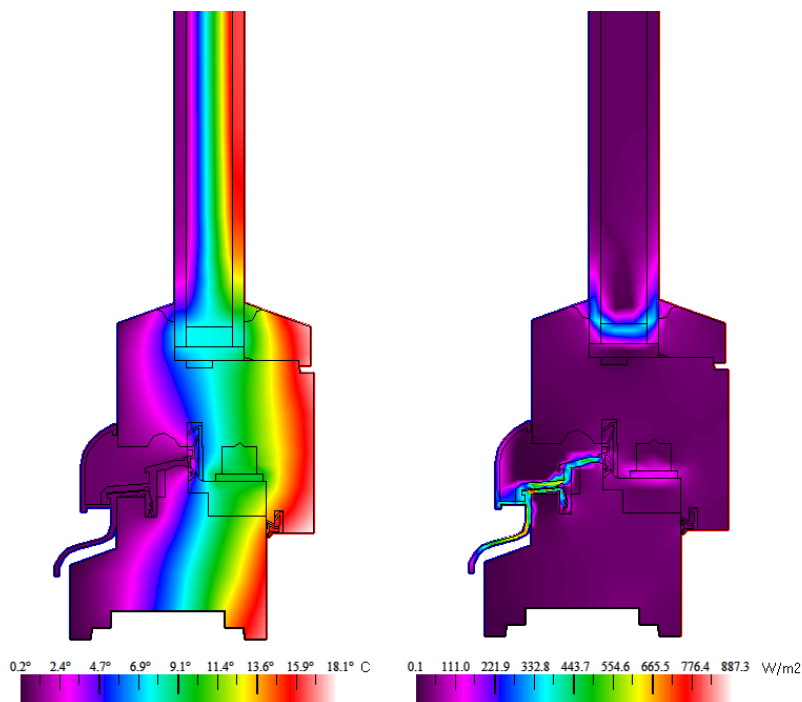
(kettős üvegezésnél 11 °C, míg a tripla üvegezésnél 13 °C) figyelembe venni, ugyanis ezek a helyek alacsony hőmérsékletük miatt páralecsapódáshoz vezethetnek. A 7. táblázatban láthatjuk, hogy a vizsgált ablakszerkezetek belső üvegfelületén a szárny peremétől milyen távolságra helyezkedik el a 13 °C-os és 14 °C-os izoterma.

7. táblázat. A belső üvegfelületen mért 13 °C-os és 14 °C-os izotermák szárnyperemtől mért távolsága

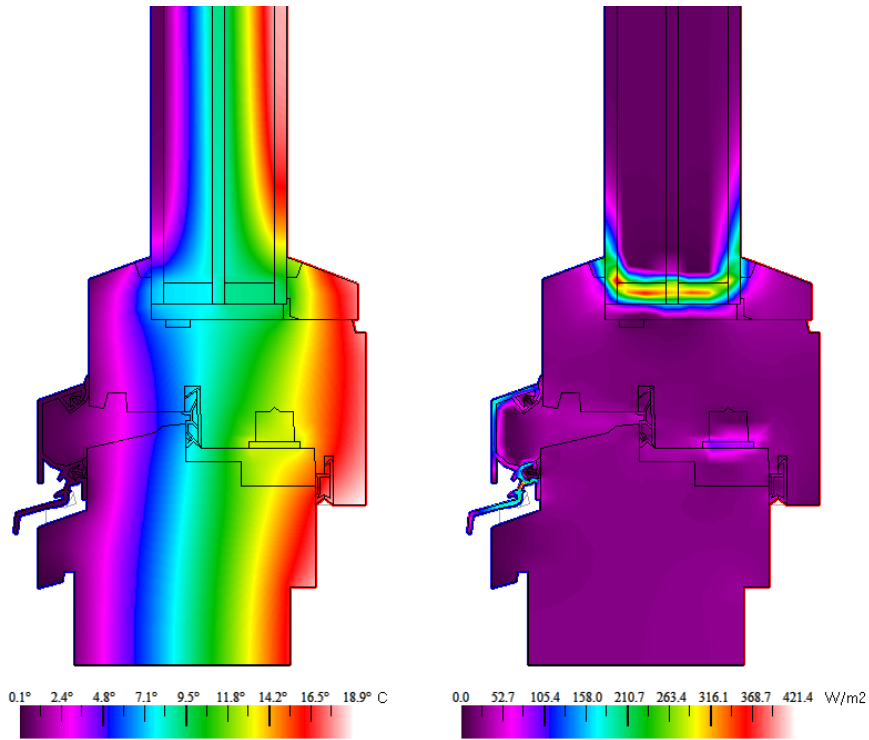
távolság [mm]	68 mm-es tömörfa ablak		90 mm-es tömörfa ablak		passzívház ablak	
	13 °C	14 °C	13 °C	14 °C	13 °C	14 °C
	7,5	13,5	4,4	7,8	2,1	6,8

Az üvegezéseket mélyebben beengedve a szárnyprofilba mérsékelhető az üveg távtartó hatása és csökkenthető a hőáramveszteség.

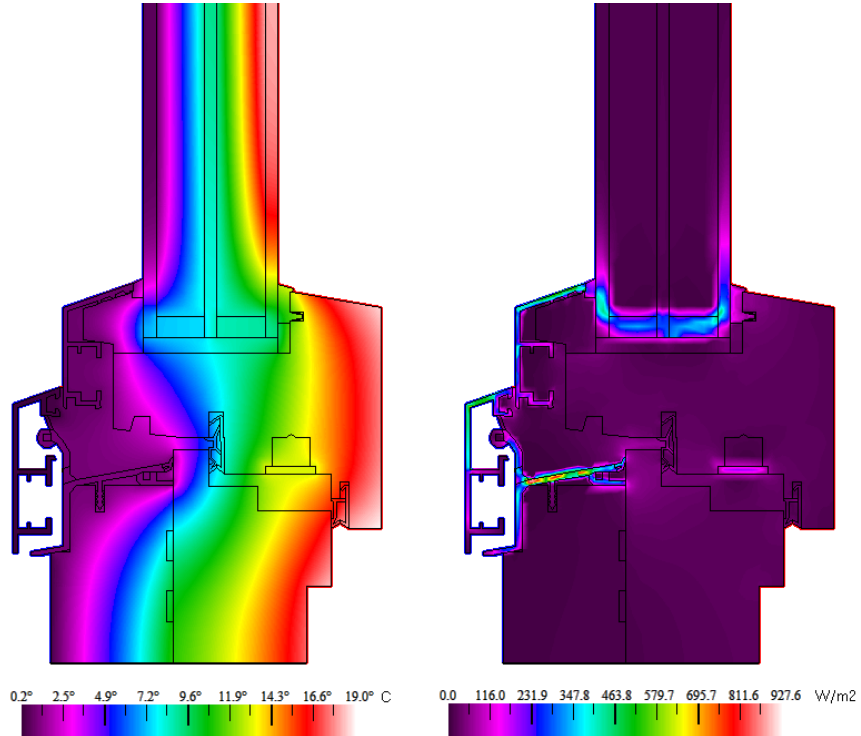
A vizsgált ablakszerkezetek szempontjából a vízvetők okozta hőáram veszteség nem mondható jelentősnek, hiszen azok kedvezőtlen hatását a külső síkban való elhelyezésük és a keretrész vastagsága hatékonyan gátolja, ugyanakkor a 90 mm-es profilvastagságú tömörfa ablaktól (illetve vízvetőjétől) eltekintve, az ábrákon az is látható, hogy a szerkezet külső felében a hőmérséklet eloszlás alakulására és a középtömítés áthűlésére komoly hatással vannak. A 68 mm vastag tömörfa szerkezetnél az tapasztalható, hogy 0 °C külső hőmérséklet esetén a középtömítés külső felületén 1-2,5 °C alakul ki. A 90 mm-es tömörfa ablaknál ugyanezen külső hőmérséklet esetén 6,7-7 °C, míg a passzívházas ablak esetén kicsit kisebb, 5,8-6,2 °C hőmérséklet mérhető a középtömítés külső felületén. A külső peremfeltételnél jóval alacsonyabb hőmérséklet kialakulása és fennállása esetén a középtömítés jelentősen át tud hűlni, ami annak idő előtti tönkremenetelét okozhatja.



42. ábra. A 68 mm-es profilvastagságú tömörfa ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet szintértéke (bal oldal) és fluxus (jobb oldal) szintértéke



43. ábra. A 90 mm-es profilvastagságú tömörfa ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet szintértéke (bal oldal) és fluxus (jobb oldal) szintértéke



44. ábra. A passívház ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet szintértéke (bal oldal) és fluxus (jobb oldal) szintértéke

Az egyes metszetek esetében meghatároztam a keretekre érvényes hőátbocsátási értékeket és a vonalmenti hőátbocsátási tényezőket is, végül a kapott eredmények összegezését mindhárom ablak esetében ugyanazon módszer (9-11. képletek) szerint végeztem el. A THERM-es szimuláció során kapott eredményeket a 8. táblázatban foglaltam össze.

8. táblázat. Ablakok THERM szimulációs vizsgálatának eredményei

	68 mm-es tömörfa ablak			90 mm-es tömörfa ablak			passzívház ablak		
	vízsz. metszet	függ. felső metszet	függ. alsó metszet	vízsz. metszet	függ. felső metszet	függ. alsó metszet	vízsz. metszet	függ. felső metszet	függ. alsó metszet
$L_f^{2D}$ [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	0,6952	0,8780	0,9186	0,4469	0,5519	0,5836	0,4594	0,5649	0,5708
$U_f$ [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]	1,2177	1,2820	1,6293	0,9867	0,9860	1,1936	1,0655	1,0690	1,1154
$L_\psi^{2D}$ [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	0,9019	1,1370	1,1622	0,5327	0,6380	0,6698	0,5364	0,6400	0,6488
$\psi$ [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	0,0883	0,1030	0,0875	0,0952	0,0984	0,0983	0,0861	0,0872	0,0901
<b><math>U_w</math> [<math>W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}</math>]</b>	<b>1,6166</b>			<b>1,0401</b>			<b>1,0340</b>		

Az eredmények összesítését követően azt mondhatjuk, hogy a 68 mm-es profilvastagságú tömörfa ablak kétrétegű, Low-E bevonatos hőszigetelő üvegezéssel és argon gáztöltéssel jó közelítéssel még éppen megfelel a jelenleg érvényben lévő ( $U_w < 1,6 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) hőtechnikai követelménynek, azonban az épületfizikai jellemzők várható szigorításának ezek a szerkezetek már nem lesznek képesek megfelelni.

A 90 mm-es profilvastagságú tömörfa ablak és a passzívház ablak is ugyanazzal a háromrétegű (2 Low-E bevonattal és argon gáztöltéssel rendelkező) üvegszerkezettel lett vizsgálva. Az eredményül kapott eredő hőátbocsátási értékek ( $U_w$ ) között nem adódott jelentős eltérés, sőt az eltérő keretszerkezetek ellenére hőtani teljesítőképesség tekintetében nagyon jó egyezést mutatnak. Ez lehetőséget biztosíthat arra, hogy amennyiben az egyéb jellemzőkben is kimutatható a hasonló mértékű egyezés, az esztétikusabb, vagy éppen az olcsóbb ablaktípust válasszuk. Természetesen a vizsgált ablakszerkezetektől elérő méretű, osztású és üvegezésű ablakok esetében, ez az eltérés függvényében változhat.

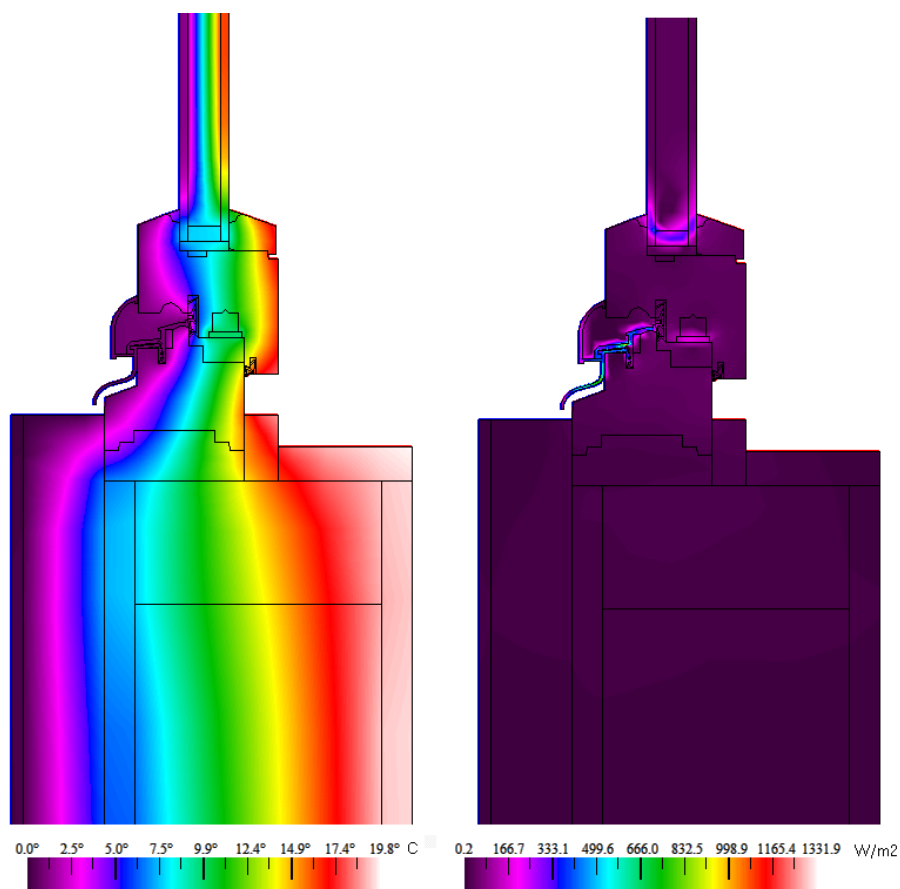
## 5.2 Falazatba illesztett ablakszerkezetek végeeselemes hőtechnikai szimulációja

A szimulációs eredmények közül ebben a fejezetben a három vizsgált ablaktípusra vonatkozóan a vékony könnyűszerkezetes falazatba illesztés példáit mutatom be (45-47. ábrák), a másik két falazatban való elhelyezést, illetve az azokhoz tartozó eredményeket a 12.9, 12.10 és 12.11 mellékletek tartalmazzák.

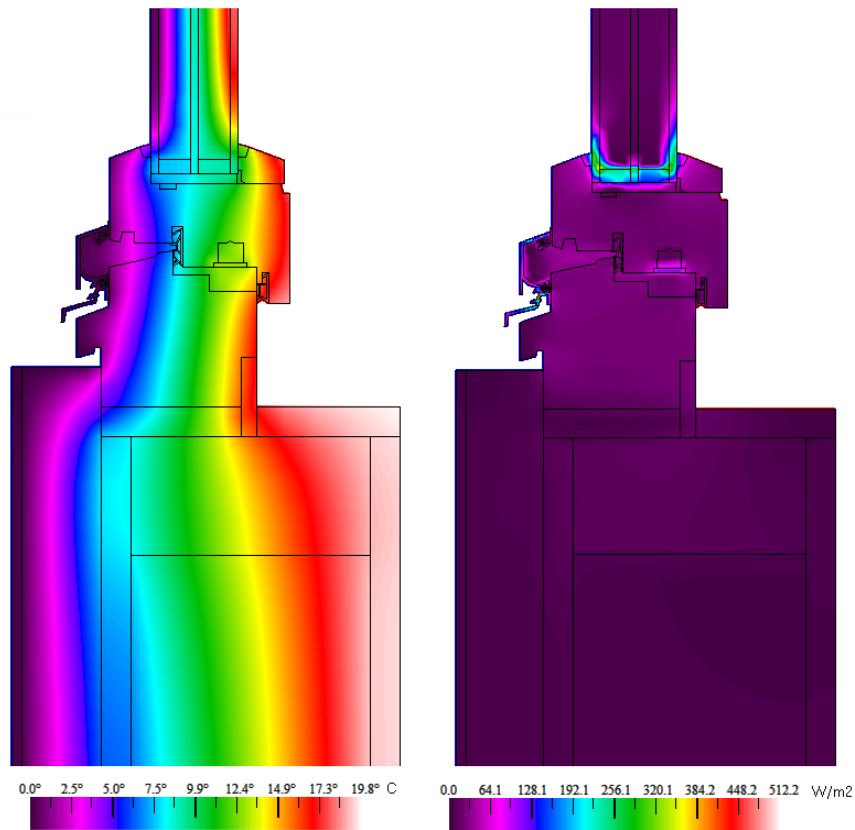
A várakozásoknak megfelelően a vizsgált ablakok falazatba illesztését kövően is a 68 mm-es profilvastagságú ablak bizonyult a leggyengébbnek, amit többnyire szerkezeti vastagságával, kialakításával indokolhatunk. A szerkezetek falazatba illesztését követően egyik ablak esetében sem változott számottevően a hőmérsékletmezők alakulása. Ugyanez

mondható el a hőáramok alakulásáról is, hiszen a vizsgált falazatok mindegyike jobb hőszigeteléssel rendelkezik, mint a beépített ablakok. Az ablak-fal viszonyról azt állapíthatjuk meg, hogy a vizsgált vastagabb könnyűszerkezetes falazatot alapul véve, még a háromrétegű üvegezéssel rendelkező megoldásokhoz képest is közel kétszer jobb hőszigeteléssel rendelkezik.

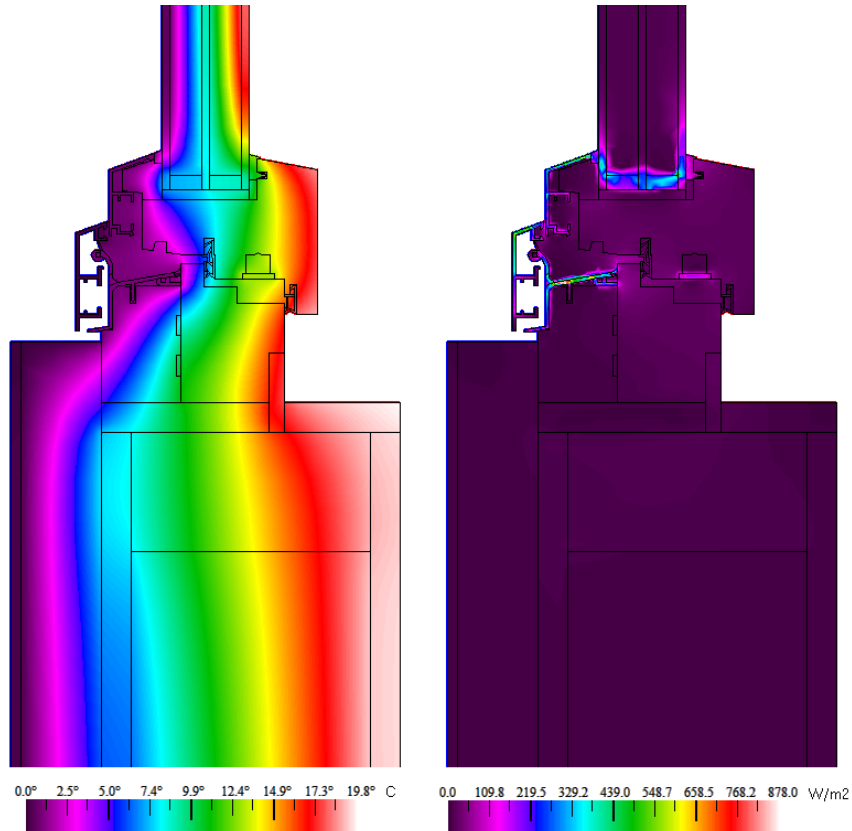
A beépített ablaktól függetlenül a porotherm S téglafal esetében tapasztalhatjuk a legjelentősebb áthűlést, míg arányaiban a legszámottevőbb átmelegedést a vastag könnyűszerkezetes falazat esetében tapasztalhatunk, amelyek a 45-47. ábrák (és a 12.9, 12.10 és 12.11 mellékletek) hőmérséklet szintértképein is kirajzolódnak. A vastag könnyűszerkezetes falazat fokozottabb átmelegedése valószínűleg a belső oldal felőli légrésnek köszönhető.



45. ábra. 68 mm-es profilvastagságú ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet (bal oldal) és fluxus szintértképe (jobb oldal) vékony könnyűszerkezetes fal esetén



46. ábra. 90 mm-es profilvastagságú ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet (bal oldal) és fluxus színtérképe (jobb oldal) vékony könnyűszerkezetes fal esetén



47. ábra. Passív ház ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet (bal oldal) és fluxus színtérképe (jobb oldal) vékony könnyűszerkezetes fal esetén



A bemutatott ábrákon túl a 12.9, 12.10 és 12.11 mellékletekben elhelyezett eredményfájlok alapján megállapítható, hogy ugyanazon ablaktípus különböző falszerkezetbe történő illesztésénél a fal vastagságának arányában, eltérő mértékben jelentkezik a lehűlt zóna. A homogénebb szerkezeti összetétel miatt leegyenletesebben a porotherm S téglafal esetében látható. A vizsgált falszerkezetek esetében a kialakuló hőáramok tekintetében nincs számottevő eltérés. A három különböző ablak- és falszerkezet kombinációs vizsgálatának számszerűsített eredményeit a 9. táblázatban összesítettem.

9. táblázat. THERM szimulációs vizsgálatok eredményei falazatba illesztés után

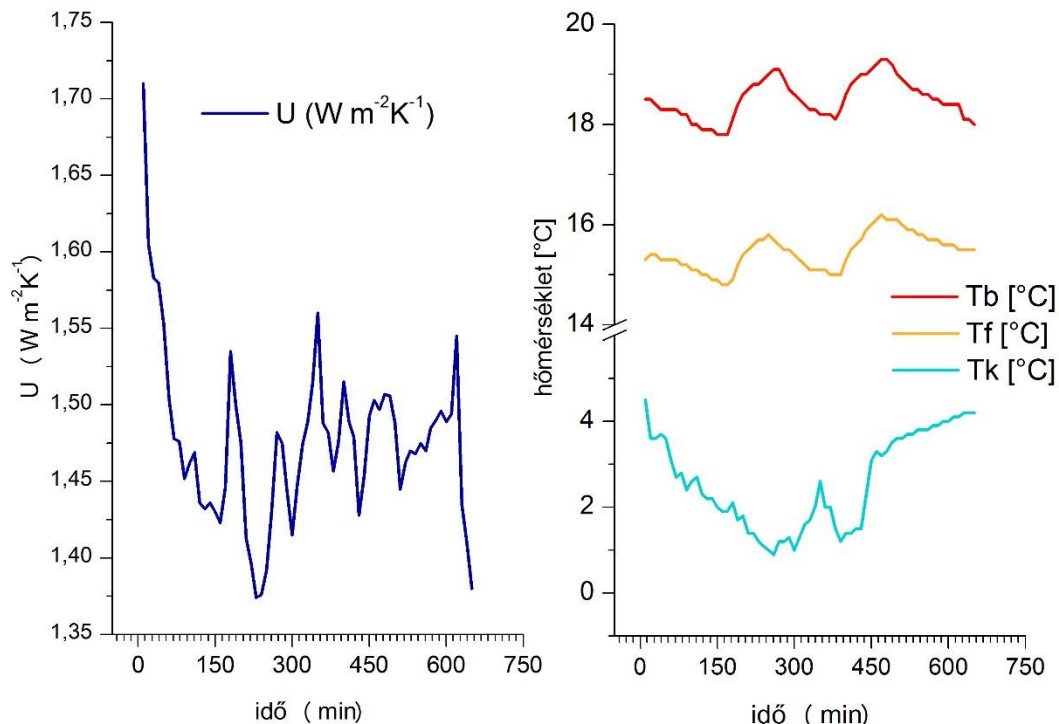
	Hőátbocsátási tényező [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]			
	csak fal, ablak nélkül	68 mm-es tömörfa ablakkal	90 mm-es tömörfa ablakkal	passzívház ablakkal
porotherm S téglafal	0,3963	0,9416	0,6522	0,6425
vékony könnyűszerkezetes fal	0,2533	0,8187	0,5293	0,5183
vastag könnyűszerkezetes fal	0,1057	0,7392	0,4480	0,4370

A szimulációk során beállított szabvány által előírt peremfeltételek teljesülésekor, a különböző falazatok esetében azt tapasztaljuk, hogy hőtechnikailag nem a falszerkezet teljes vastagsága a döntő, sokkal inkább mérvadó, hogy milyen rétegrenddel és anyagokkal lett kialakítva. A porotherm S téglafal szilárdságilag sokkal előnyösebbnek tűnhet, azonban, mint az elemzések is rávilágítottak egy közel fele olyan vastagságú könnyűszerkezetes rétegrenddel kialakított fal, amellet, hogy szilárdságilag is kielégíti az épületekkel szemben támasztott igényeket, hőtechnikailag (hőszigetelés szempontjából) sokkal jobb választás.

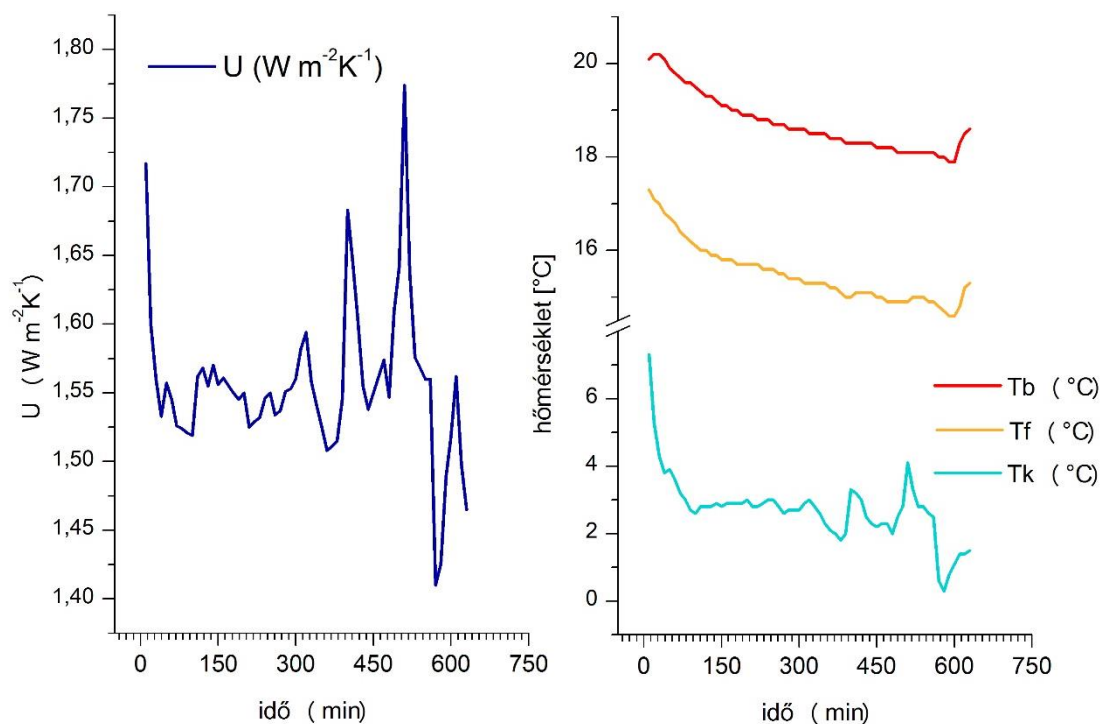
### 5.3 Beépített ablak üvegezésének helyszíni vizsgálata

A kétrétegű üvegezés mérésének eredményei.

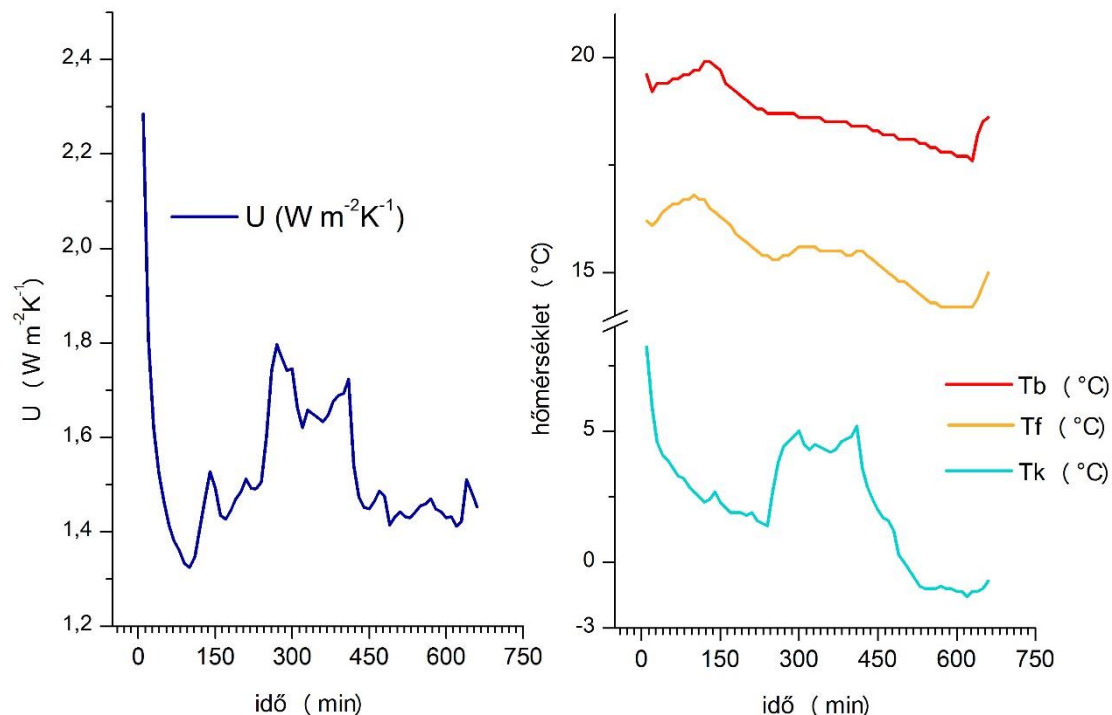
Az egyes mérések során mért és eredményül kapott fizikai mennyiségeket (hőmérsékleti és  $U$ -értékeket) az 48-50. ábrák tartalmazzák.



48. ábra. A kétrétegű üvegezésnél mért értékek az 1. nap esetén



49. ábra. A kétrétegű üvegezésnél mért értékek a 2. nap esetén



50. ábra. A kétrétegű üvegezésnél mért értékek a 3. nap esetén

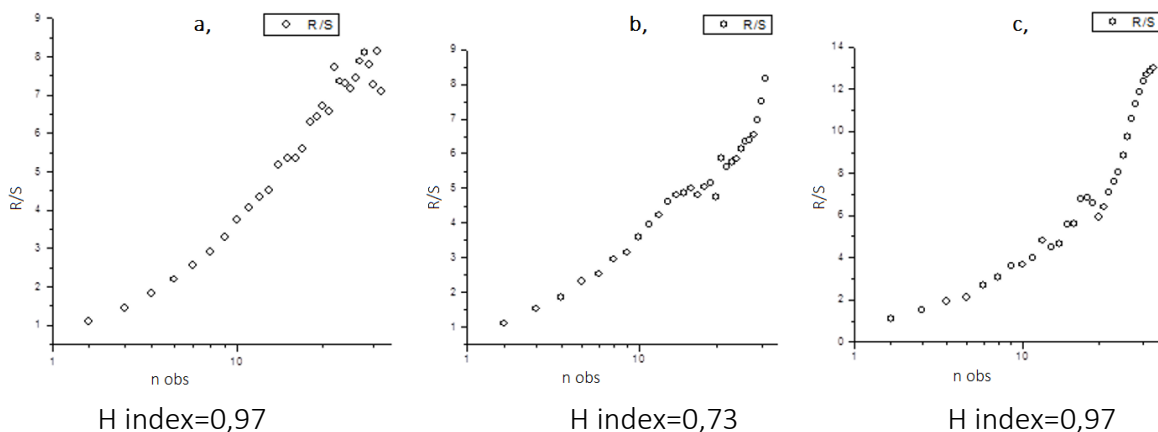
Első ránézésre a mérés bizonytalannak tűnik, mert az egyes értékek elég széles határok között változnak, de a hőátbocsátási tényezők és az egyes hőmérsékletek között is nehezen tudunk szabályszerűséget észrevenni vagy párhuzamot vonni. A mérések kezdetekor látható kiugróan magas értékek egyértelműen abból származnak, hogy a rögzítő gyurmák a mérés elindítását követően még egyszer megnyomásra kerültek, és ezáltal plusz hőt juttattunk a termoelemek környezetébe. Az így bevitt plusz hatást leválaszthatnánk a mérési eredmények közül, de ettől eltekinthetünk, hiszen a hétköznapi életben is előforduló jelenség, hogy hozzáérünk az üvegezéshez. Természetesen, ha nem az időben változó folyamatot szeretnénk vizsgálni, hanem a terméket minősíteni, akkor ezen értékek „szűrése” az összehasonlíthatóság miatt szükséges. Ettől függetlenül a grafikonok további részeiben is nagyon változatos és ugráló értékeket láthatunk, amelyek a rendszer valamely paraméterének megváltozásából adódik, azonban érdemes szem előtt tartani azt a tényt, hogy a laboratóriumi vizsgálatokkal ellentétben, valós körülmények között, időben folyamatosan változó rendszer vizsgálatról van szó, amely során rendkívül sok hatás éri mind az ablakot, mind pedig a mérőműszer érzékelőit. A rendszert érő hatások  $U$ -értékre gyakorolt hatásának egyértelmű kimutatása, illetve az összhatástól történő leválasztása további vizsgálatsorozatokat igényelnek.

A folyamatosan változó értékek ellenére (bár a mérés intervallumában úgy tűnik) az üvegezés teljesítőképessége nem változik, pusztán arról van szó, hogy a mérőrendszer, érzékenységből adódóan, még ha esetenként késleltetve is, de reagál a környezet valamely paraméterének változására. A vizsgált üvegszerkezetet az időben változó paraméterek következtében „ugráló” hőátbocsátási tényezők átlagértékével tudjuk jellemezni. Minden

mérési adatot figyelembe véve az első nap eredményeiből az átlagos  $U$ -érték  $1,47 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , a második nap során  $1,55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , míg a harmadik napon  $1,53 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  lett. Az átlagérték meghatározása előtt jogosan merülhet fel a kérdés, hogy a kiugró értékek „szűrésével” pontosíthatjuk-e a végeredményt. Megfelelő körültekintéssel valószínűleg igen, de ezzel a részével jelen disszertációban nem kívánok foglalkozni, inkább annak feltárásában látok több lehetőséget, hogy megvizsgáljam milyen hatások jelentkeznek és azok milyen mértékben befolyásolják az eredményt. A nagyon pontos és részletekbe menő eredményekhez, következtetésekhez ellenőrzött körülmények között történő vizsgálatsorozatra lenne szükség. Ennek hiányában matematikai úton vizsgálom meg a mért adathalmazokat és különböző transzformációk segítségével próbálok többet megtudni a mért értékek kapcsolatáról, illetve magáról a mérésről.

### 5.3.1 Hurst kitevő

Elsőként, az egyes mérési alkalmaknál kapott  $U$ -értékekre vonatkozóan határoztam meg a Hurst kitevőt (51. ábra), amely a mérési adatok egymáshoz való függését mutatja.



51. ábra. Hurst kitevők a kétrétegű üvegezés esetén (1-3. nap)

A grafikonokon a megfigyelési időtartam függvényében láthatjuk az újráskálázott tartományt. Az értékek ábrázolása logaritmikusan történt egyenessel illesztve. Az első és harmadik mérés (51. ábra a, és c, részlet) esetében kapott eredmények (0,97) jó egyezést mutatnak, és egyben arra utalnak, hogy a vizsgált folyamat perzisztens (trend tartó).

A 2. mérés (51. ábra b, részlet) esetében eredményül kapott 0,73-as érték még nem számít kritikusnak, de a másik kettőhöz képest megállapítható, hogy a vizsgálat során több váratlan tényező is hatással volt a rendszerre, amely befolyásolta az eredményeket. A Hurst kitevő meghatározása és a következtetések megállapítása körültekintést igényel, mert egy kis hiba esetén is egymással ellentétes következtetés vonható le a folyamat hosszútávú memóriájával kapcsolatban, vagy perzisztenciájára vonatkozóan. Amennyiben 0,5 alatti értéket kapunk, arra következtethetünk, hogy véletlenszerű hatások érték a rendszerünket.

### 5.3.2 Wavelet transzformáció

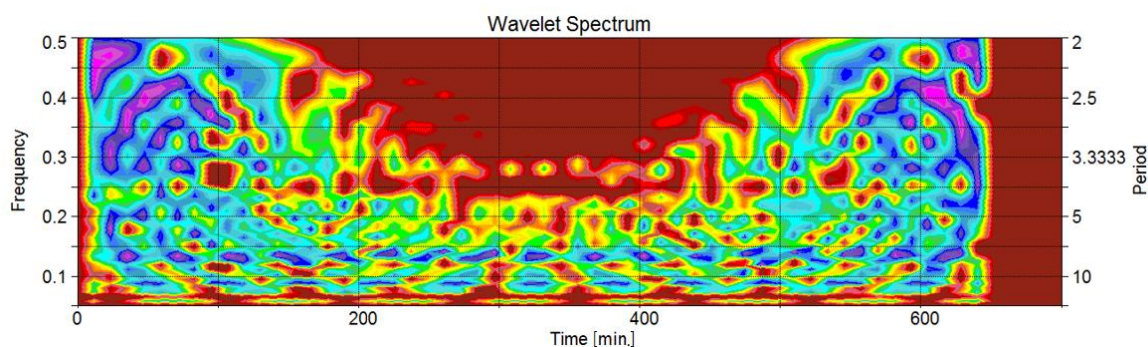
Az eredményeket egy másik matematikai transzformáció segítségével is megvizsgáltam, amelynek alapstruktúrája rekurzív szűrésekből és a páros-páratlan tagok szétválogatásából áll. A wavelet transzformáció, a Fourier transzformációhoz hasonlóan egy spektrális felbontás, azonban nem szinuszos harmonikusokra bontjuk fel a jelet, hanem különböző frekvenciájú négyzögjelekre. A wavelet eljárás nagy előnye, hogy megoldással szolgál a Fourier transzformáció egyetlen hiányosságára, miszerint az egyes hatások időbeli változásáról is információkat kapunk. A wavelet transzformáció segítségével a hatások (jelek) időbeli és frekvenciatartománybeli analízise egyszerre hajtható végre, így a frekvenciaspektrumban egy „éles” változás annak előfordulási idejével egyszerre meghatározható. A waveletek a legtöbb esetben kis számítási kapacitást igényelnek.

A diszkrét wavelet transzformáció (DWT) egy olyan gyors, lineáris szorzási művelet, amely a bemenő vektorokat (adatsort) egy ugyanilyen méretű kimeneti vektorba transzformál át. Ezért a Fourier transzformációhoz hasonlóan (FFT) a DWT egy forgatásnak fogható fel az amplitúdó-idő tartományból a frekvencia-idő térbe, amely egy mátrix segítségével is megadható.

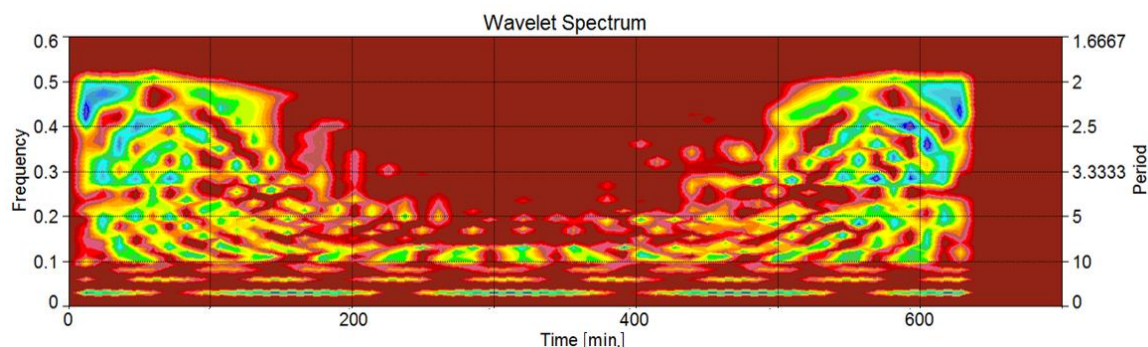
A kétrétegű üvegezés esetében a három egymást követő mérés adatainak transzformált alakjai az 52-54. ábrán láthatók.

A transzformált eredményekből létrehozott ábrák jól szemléltetik a mérési rendszert érő különböző hatások előfordulásának időpontját, intervallumát és gyakoriságát. A mérési folyamat elején és végén egyértelműen érzékelhető a lakók jelenlétéből, tevékenységéből származó hatások, amelyek a mérési intervallumok középső harmadában megszűntek, ezáltal a rendszerben kialakult egyfajta állandósult állapot, amely a jelenlévő frekvenciákat tekintve stabilnak nevezhető. A rendszert érő frekvenciák a színeknek köszönhetően jól elkülöníthetőek, a 95 %-os konfidencia intervallumba eső értékek lila színnel láthatóak. A mérési folyamatban bizonyos időintervallumokban ismétlődően megjelenő hatások (amikre mi igazából kíváncsiak vagyunk) „helyei” és gyakoriságuk szépen kirajzolódik. Ezek a frekvenciák az egyéb hatásoktól függetlenül végig jelen voltak a vizsgálat során.

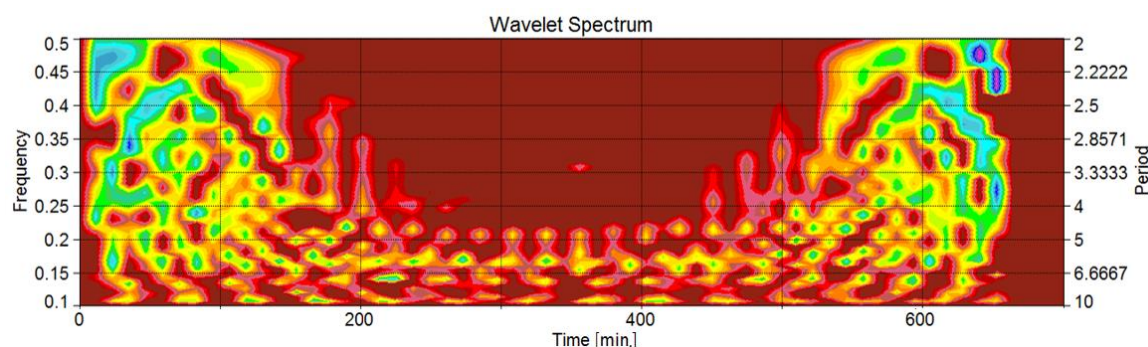
A Hurst kitevő meghatározásánál is látszódott, hogy a kétrétegű üvegezés 2. mérésénél zavaró hatások lehettek jelen, mert a transzformált eredmény jellege ebben az esetben is eltérést mutat a másik két nap mérési eredményeihez viszonyítva.



52. ábra. Wavelet transzformáció eredménye kétrétegű üvegezés esetén (1. nap)

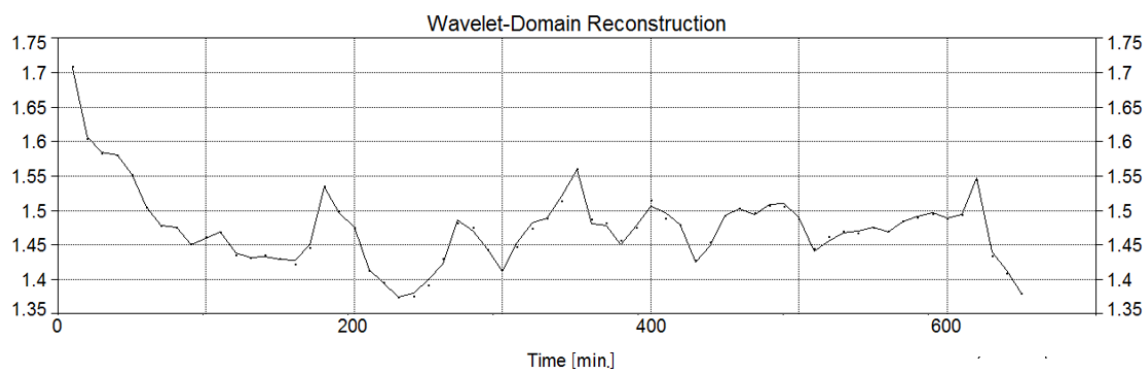


53. ábra. Wavelet transzformáció eredménye kétrétegű üvegezés esetén (2. nap)

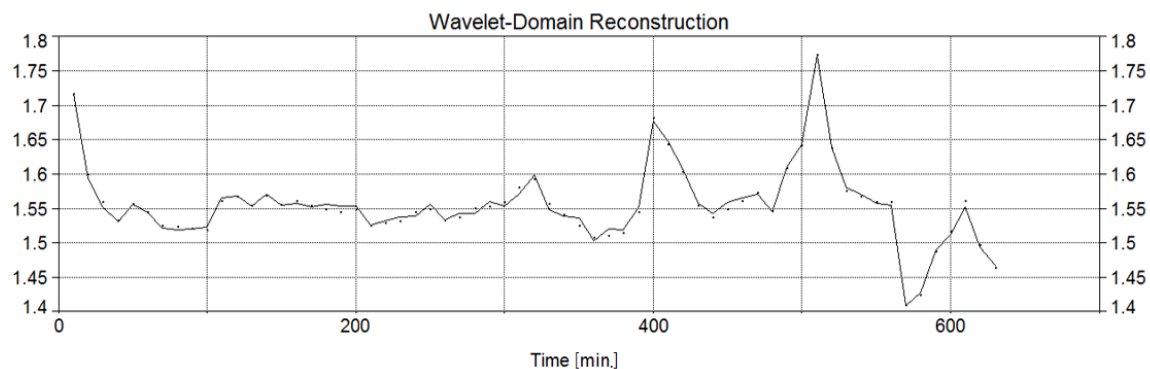


54. ábra. Wavelet transzformáció eredménye kétrétegű üvegezés esetén (3. nap)

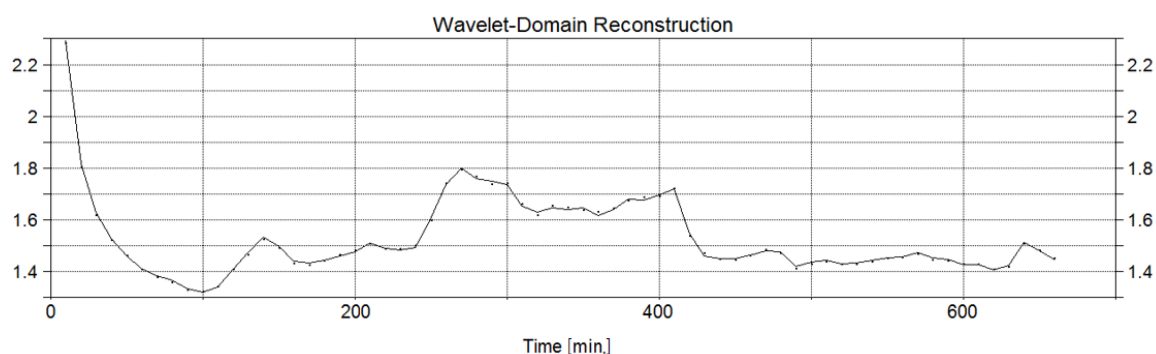
Az eddig bemutatott wavelet transzformáció eredményeinek rekonstrukciós vizsgálatát is elvégeztem. Ennek során az 55-57. ábrák jöttek létre, amelyeken a mérésorozat eredményeként kapott értékeket folytonos vonallal összekötve láthatjuk, míg a wavelet transzformáció során meghatározó konfidencia intervallumba eső jelek rekonstrukciójaként kapott eredmények, pontok formájában kerültek megjelenítésre. A transzformációs vizsgálat alapján megállapítható, hogy minden mérési pontnak jelentősége van, hiszen azok összessége jellemzi pontosan a valós környezeti hatást, ezért nem indokolt a kiugró értékek szűrése. A rekonstrukció során kapott „eredmény-pontok” jól illeszkednek a műszer által mért értékekhez.



55. ábra. Wavelet transzformáció rekonstrukciós eredménye kétrétegű üvegezés esetén (1. nap)



56. ábra. Wavelet transzformáció rekonstrukciós eredménye kétrétegű üvegezés esetén (2. nap)



57. ábra. Wavelet transzformáció rekonstrukciós eredménye kétrétegű üvegezés esetén (3. nap)

A műszeres mérés során kapott eredmények és azok matematikai transzformációja alapján megállapítható, hogy az első ránézésre széles határok között ugráló értékek ellenére a műszer kellő érzékenységgel rendelkezik a környezet valamely paraméterének meghatározására, megbízhatóan képes a vizsgált mennyiségeket mérni, valamint a mérések reprodukálhatóak.

A műszer és a vizsgálati eljárás alkalmas beépített ablakok időben változó folyamatok és hatások vizsgálatára.

## 5.4 Nano felületbevonás normál ablaküvegen

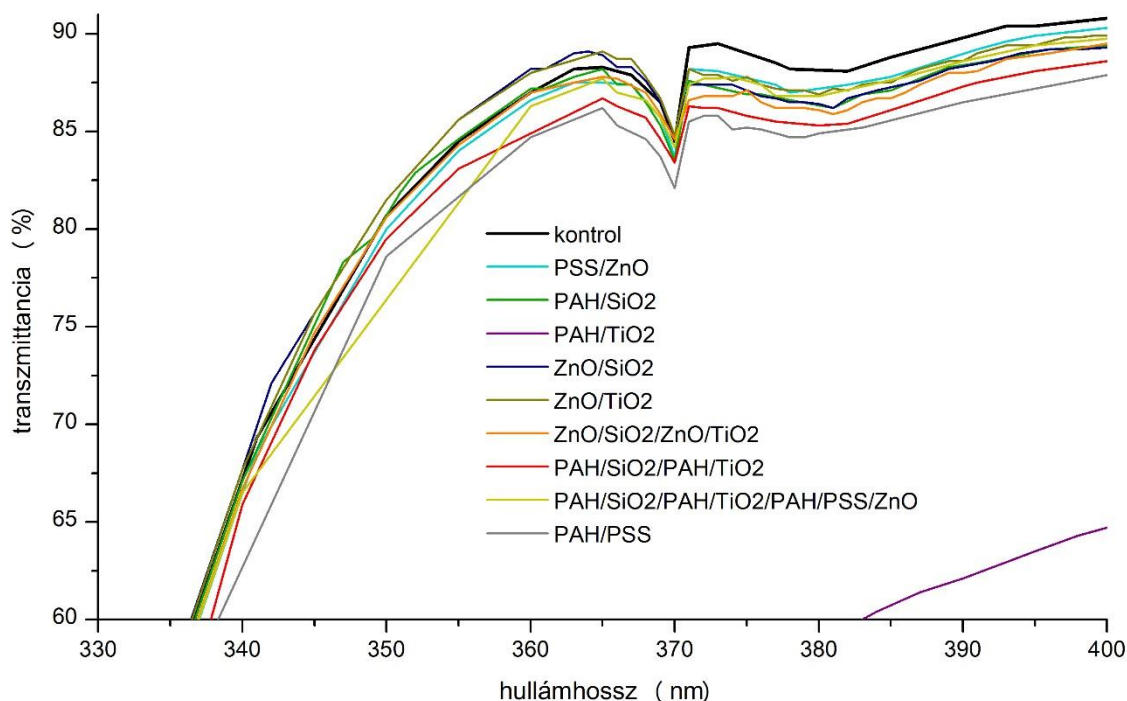
### 5.4.1 UV-VIS-NIR spektrofotometria

A napsugárzás spektrumából minden üveg abszorbeál, reflektál és transzmittál adott sugárzás intenzitást. Az üvegek spektrális transzmissziója függ a vegyi összetételtől, a színtől és a felületi tulajdonságoktól egyaránt. A Low-E üvegekre jellemző, hogy a napból érkező látható tartományban lévő sugárzást átengedik, míg a hőt adó infravörös sugárzás nagy részét visszaverik. Ezt a tulajdonságot elsősorban a fény és a szabadelektronok közötti interakciók okozzák, emellett a kötött elektronok, illetve fononok abszorpciója sem elhanyagolható az UV-VIS és az IR tartományokban [Huang et al. 2009]. Attól függően, hogy a Low-E üveget milyen klíma esetén használják, úgy változhat az ideális transzmittancia, reflexió, illetve abszorbanca értéke. Meleg klímájú helyeken a Low-E üvegtől elvárt, hogy a látható tartományban nagymértékben áteresztő legyen, míg az infravörös tartományban a

transzmittancia és az abszorbanca értéke is a lehető legalacsonyabb legyen. Hideg klímájú helyeken szintén elvárt a nagyfokú transzmittancia a 400-760 nm-ig terjedő tartományban, azonban ez esetben megengedett a nagyobb mennyiségű hő épületbe jutása az üvegfelületeken keresztül.

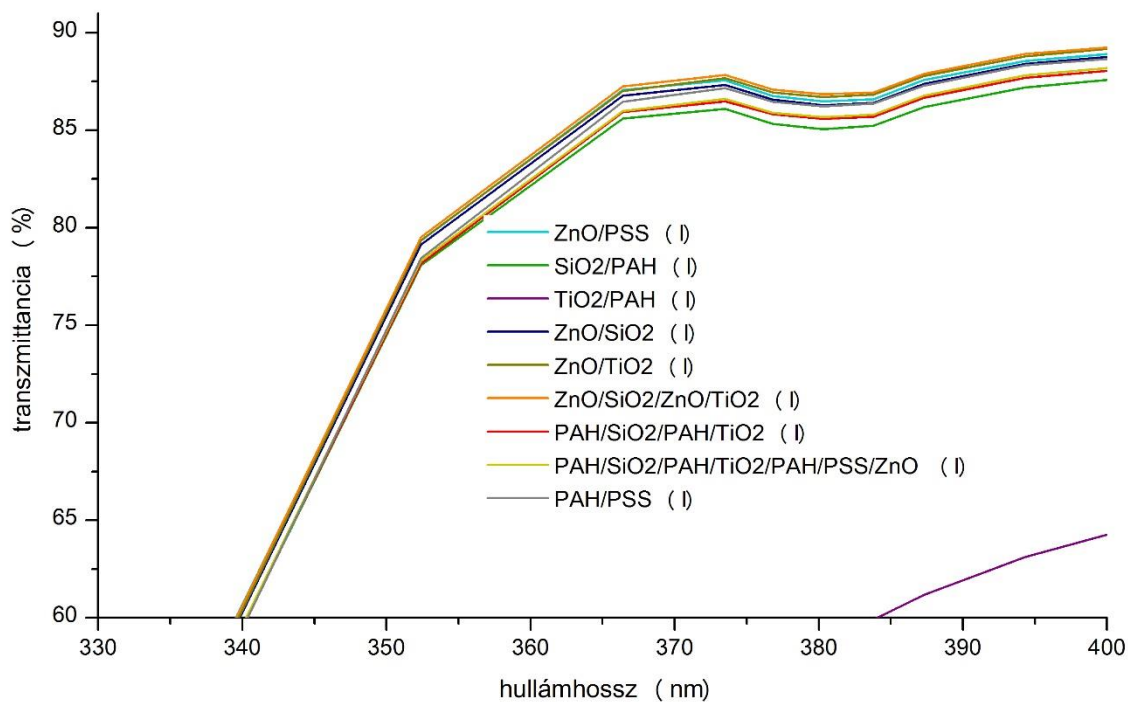
Az 58. ábrán a bevont, illetve a kontrolminta hőkezelést megelőző, illetve hőkezeléseket követő (59-60. ábrák) spektrumai láthatók 330-400 nm-es tartományban, UV, látható és NIR tartományokra bontva.

A hőkezelés hatására, már az első hőkezelést követően, a 370 nm-nél jelentkező völgy eltűnt, amelynek oka feltételezhetően az üvegben bekövetkező kémiai változások (oxidációs reakció), amelyek relatív alacsony hőmérsékleten is végbemennek. Az UV-tartományon (hőkezelést megelőzően, illetve azt követően is) a bevont üvegek közül a transzmittancia a legnagyobb mértékben a PAH/TiO<sub>2</sub> bevonatú minta esetén csökkent. A transzmittancia csökkenését a TiO<sub>2</sub> nanorészecskék agglomerációja okozhatta (a PAH/TiO<sub>2</sub> kettősrétegű mintáknál szabad szemmel is látható fehéredést figyeltem meg). A nanoméretű TiO<sub>2</sub> szuszpenzió transzparenciája a mérés során magas, ha agglomeráció történik fehér csapadék formájában kiülepedés tapasztalható, mivel a nanorészecskékre a gravitáció nem hat, ezért volt megfigyelhető sokkal alacsonyabb transzmittancia érték. A többi bevont minta UV sugárzás áteresztése (61. ábra) számottevően nem változott (a ZnO/SiO<sub>2</sub> minta esetén a transzmittancia csökkenése is mindössze 4,8 %).

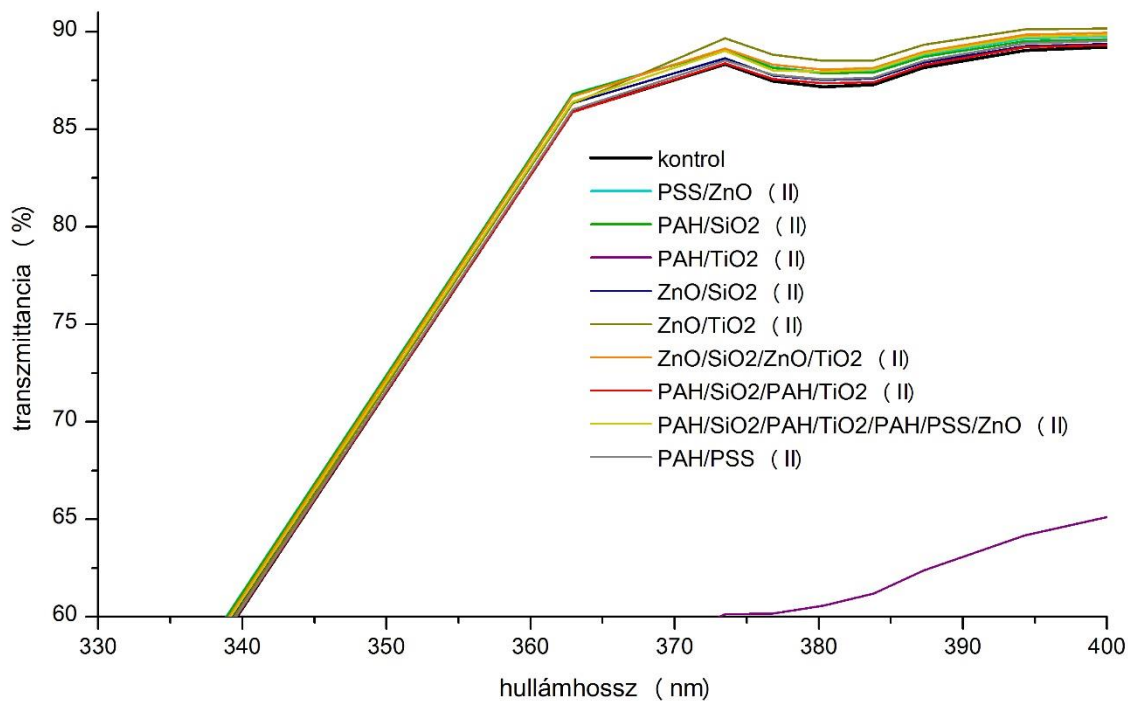


58. ábra. A hőkezelés nélkül kapott UV- tartomány spektruma

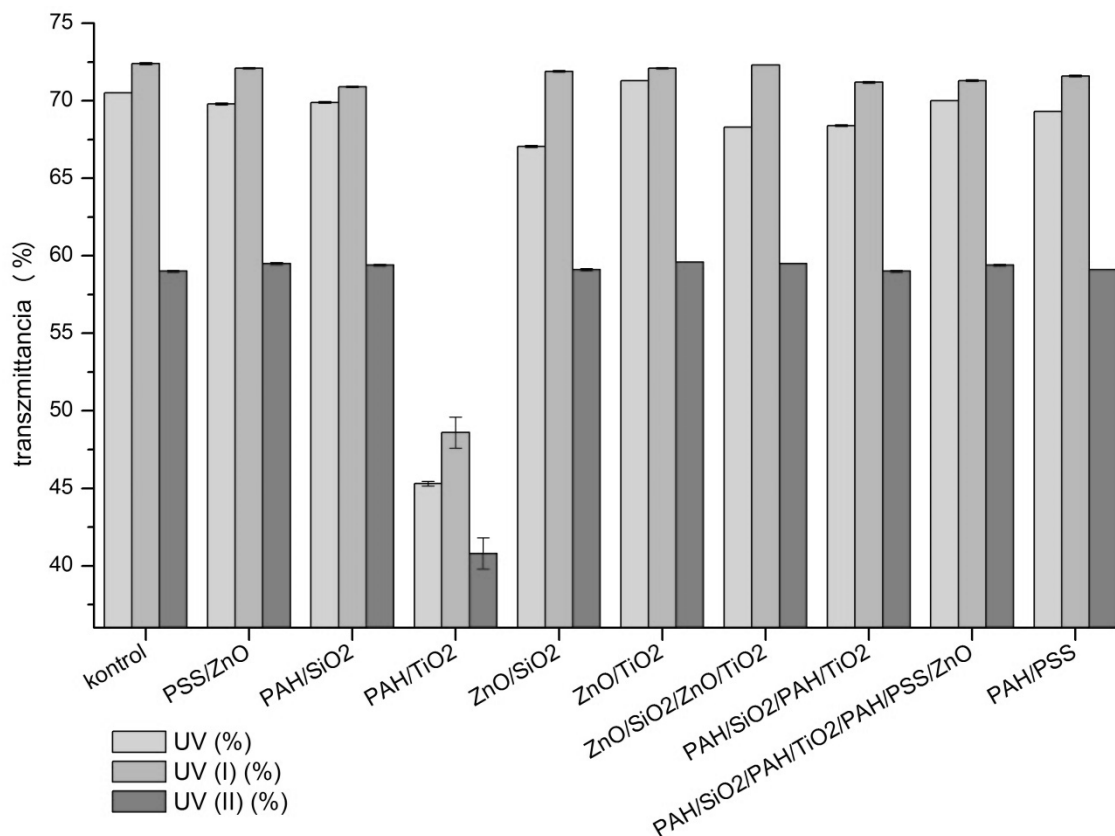




59. ábra. Az első hőkezelés után kapott UV- tartomány spektruma

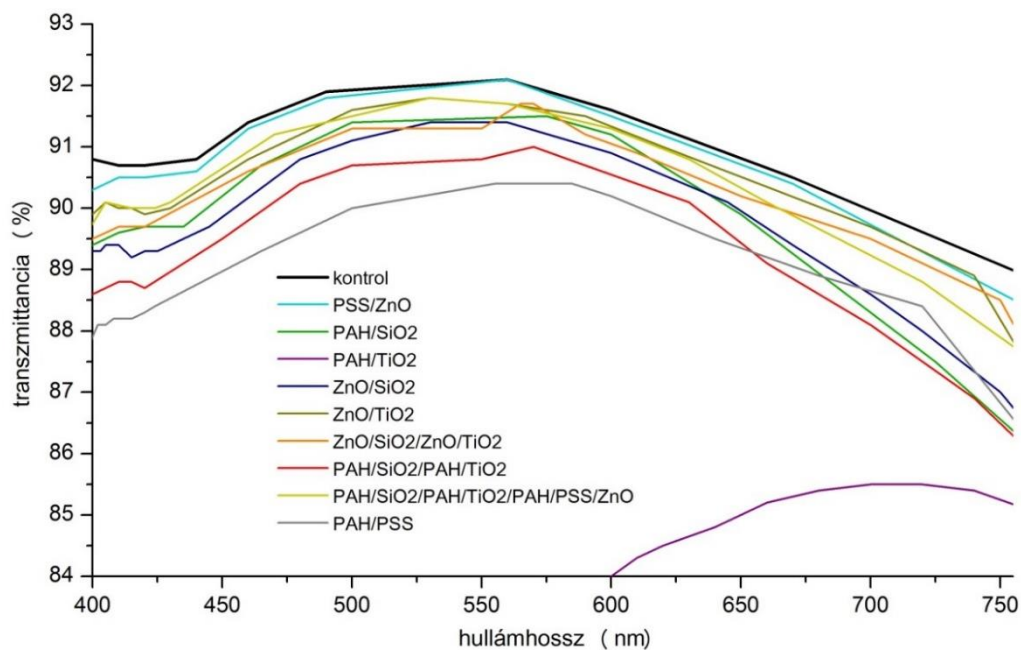


60. ábra. A második hőkezelés után kapott UV- tartomány spektruma

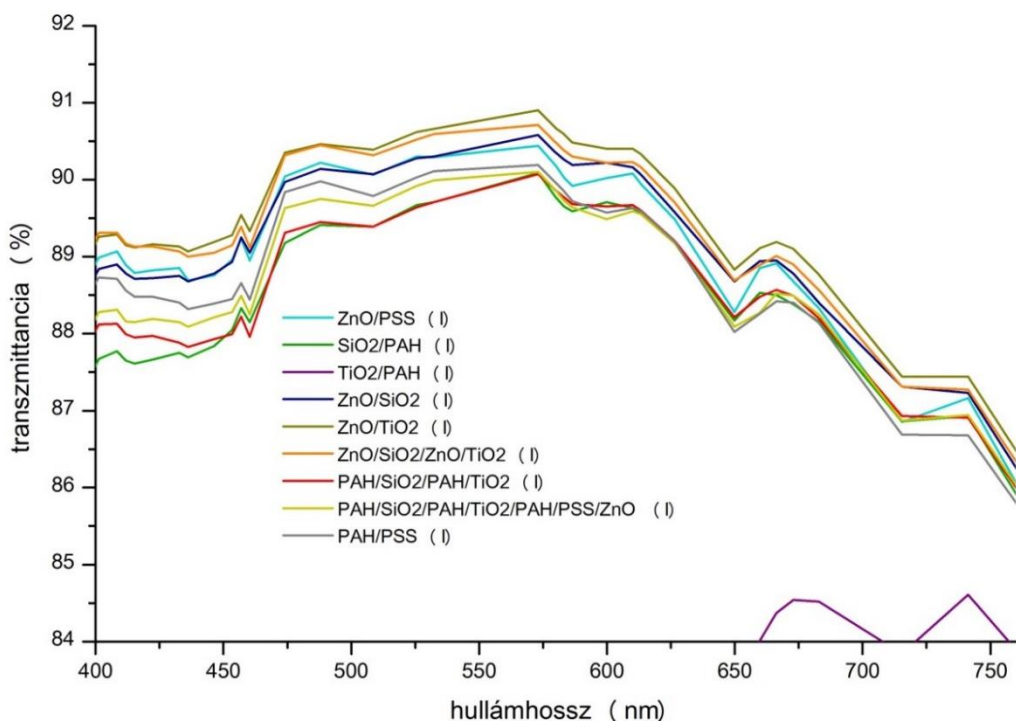


61. ábra. Átlagolt transzmittancia értékek az UV tartományon

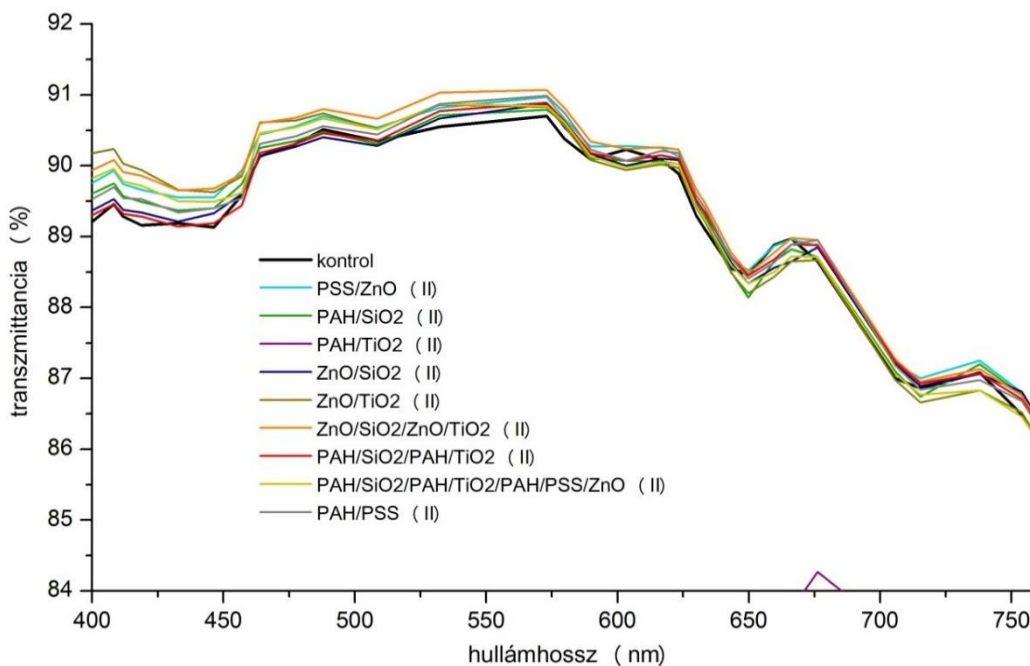
A VIS (400-760 nm) tartomány kinagyított felvételei a 62-64. ábrákon láthatóak. A hőkezelés hatására a spektrumokon csúcsok jelentek meg, azonban a mérés eredményeiből megállapítható, hogy a kontrol üveghez képest az LbL bevonatú üvegek átlátszósága nagyságrendileg nem változott, kivéve a PAH/TiO<sub>2</sub> kettősréteggel bevont üveg mintákat, ahol jelentősebb csökkenés tapasztalható, feltételezhetően a TiO<sub>2</sub> nanorészecskék agglomerációja miatt, mely felületi egyenetlenséget idézhetett elő, így a fény szórás nagyobb mértéket öltött. A PAH/TiO<sub>2</sub> bevonatú minták átlátszósága a látható tartományon 14,4 % -kal csökkent a kontrol mintához képest a hőkezelést megelőzően, a második hőkezelést követően a csökkenés 11,4 % (65. ábra).



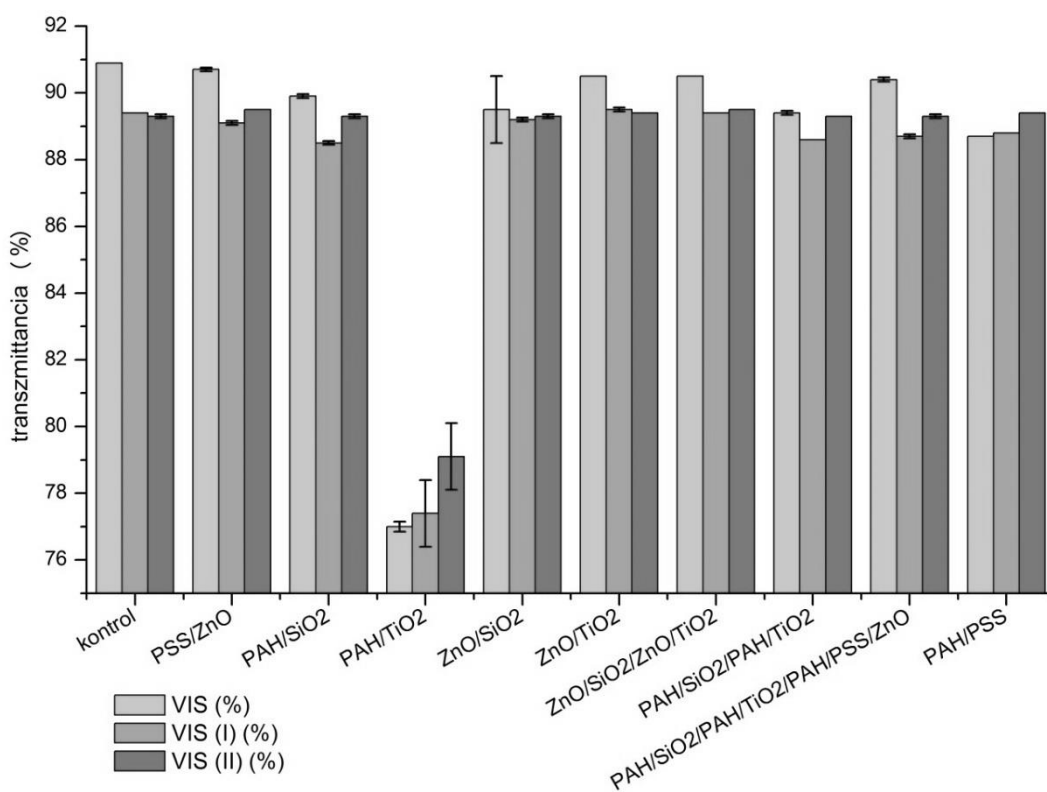
62. ábra. A hőkezelés nélkül kapott VIS tartomány kinagyított spektruma



63. ábra. Az első hőkezelés után kapott VIS tartomány kinagyított spektruma



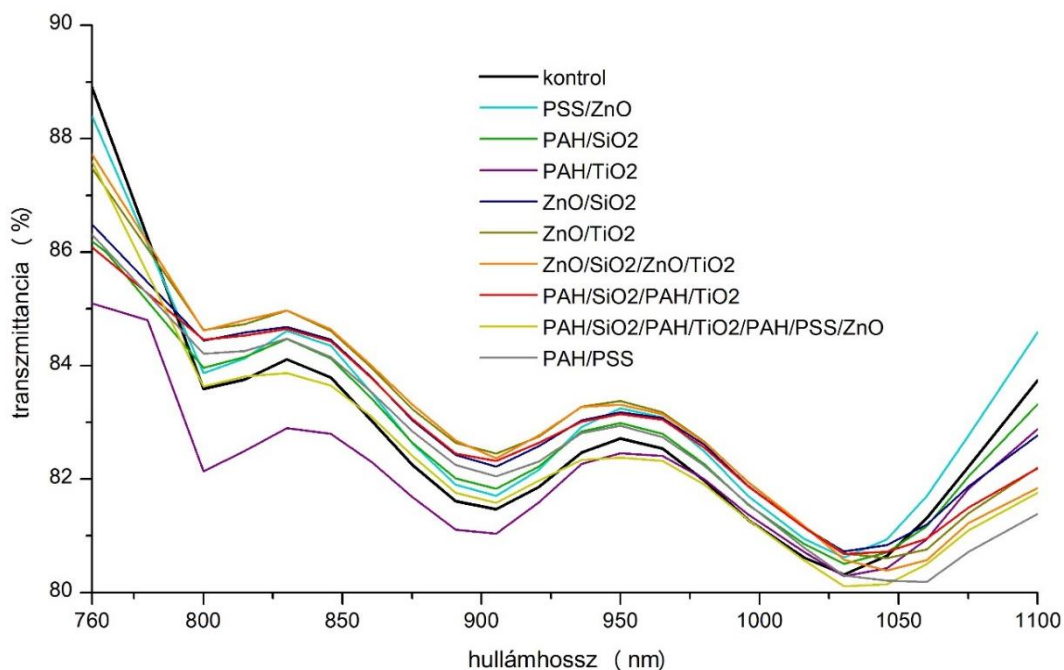
64. ábra. A második hőkezelés után kapott VIS tartomány kinagyított spektruma



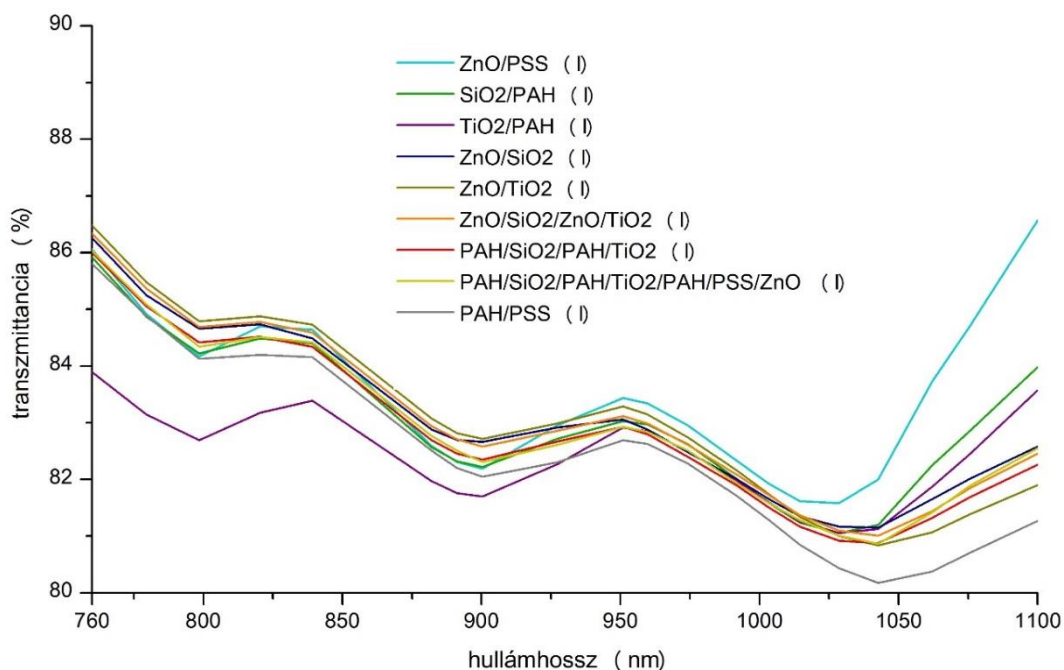
65. ábra. Átlagolt transzmittancia értékek a VIS tartományon

A NIR-tartományon a termikus kezeléseket megelőzően az áteresztett sugárzás sok esetben enyhén nőtt (66. ábra), míg az első, illetve második hőkezelést követően (67-68. ábra) a transzmittancia valamelyest nagyobb mértékben, minden minta esetén csökkent. A méréshez alkalmazott berendezés mindössze 1100 nm-ig képes adatokkal szolgálni a NIR

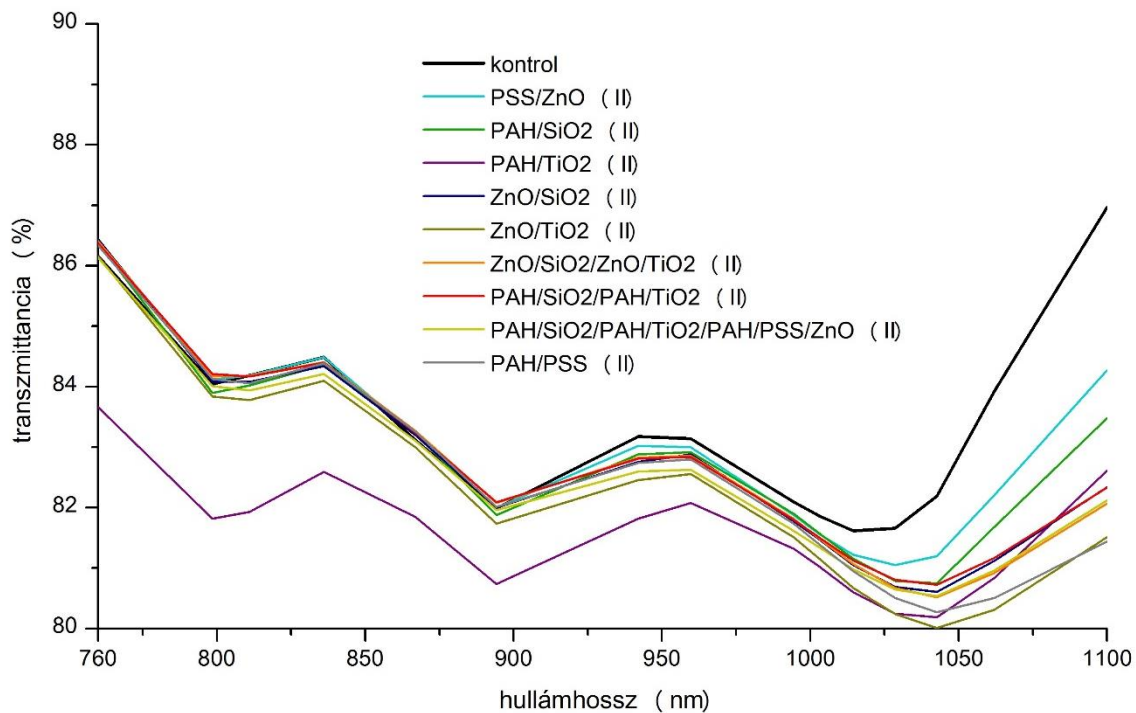
tartományról. A 68. ábrán jól látható, hogy a második hőkezelés hatására a kontrol minta NIR tartománybeli transzmittanciája 1050 nm-től erőteljes növekedést mutat, mely feltételezhetően a nagyobb hullámhosszokon is folytatódik. A bevont minták ellenben lényegesen kisebb mértékű növekedéssel rendelkeznek ezen – a berendezéssel még látható – NIR tartományon. A bevonatok eltérő mértékben, de képesek a NIR tartományon az áteresztett sugárzás csökkentésére. Mivel a nanokristályok krisztallitjainak mérete lényegesen kisebb, mint a mikrokristályoké, a nanorészecskék esetén több határfelület jön létre, amely a NIR tartomány sugárzásának szóródását okozhatja [Fang et al. 2013].



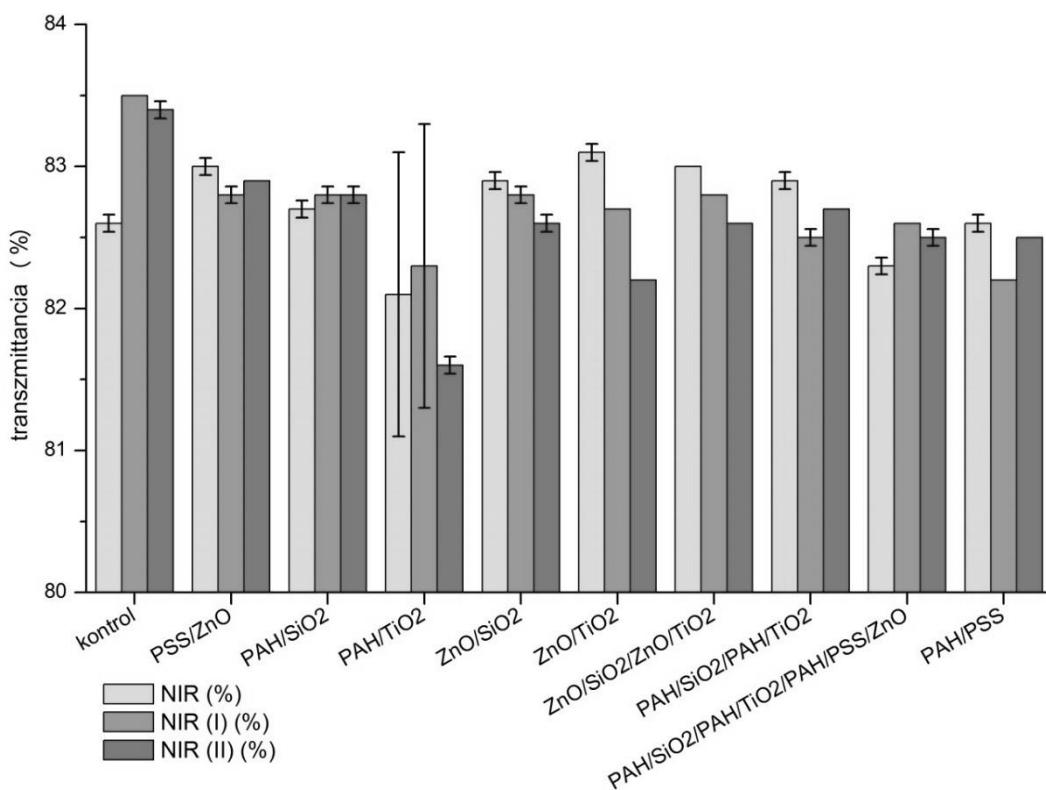
66. ábra. A hőkezelés nélkül kapott NIR tartomány kinagyított spektruma



67. ábra. Az első hőkezelés után kapott NIR tartomány kinagyított spektruma



68. ábra. A második hőkezelés után kapott NIR tartomány kinagyított spektruma

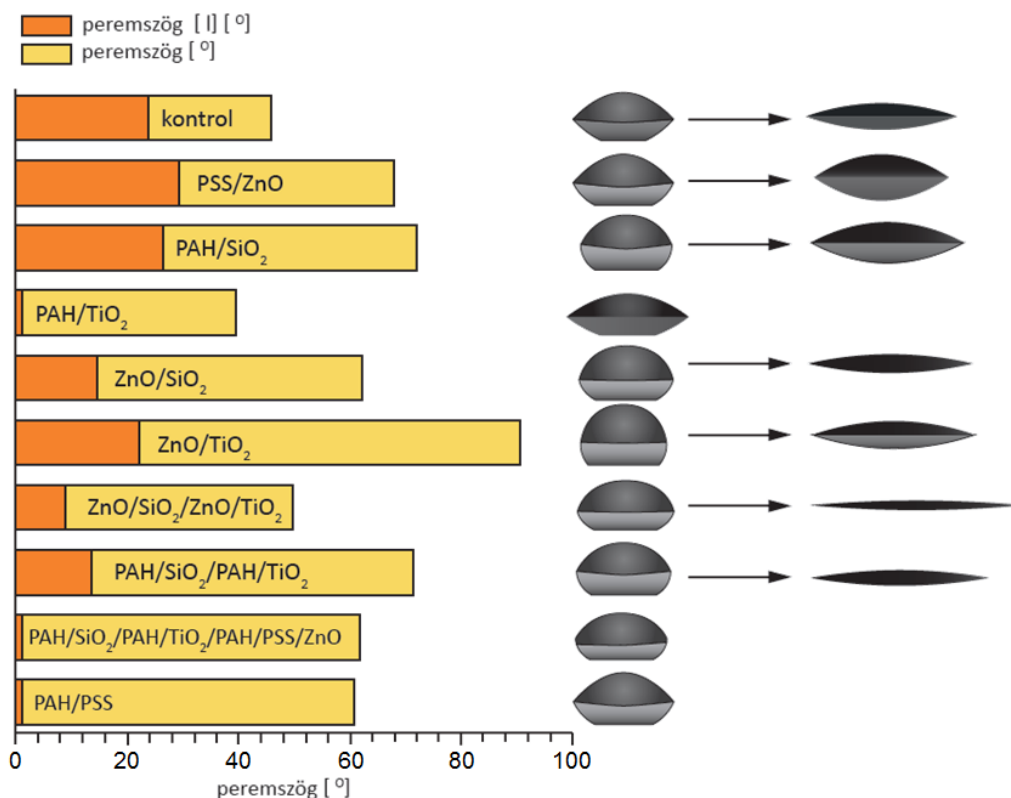


69. ábra. Átlagolt transzmittancia értékek a NIR tartományon

## 5.4.2 Felületi energia, peremszög mérés

A szilárd felület nedvesíthetőségét a legfelső atomi réteg összetétele, kémiai tulajdonságai, morfológiája befolyásolja. A nanostrukturált bevonatok jelentősen megváltoztathatják a felület tulajdonságait. Épületszerkezeti elemeknél a felületi jellemzők megváltoztatásának különösen nagy szerepe lehet a felületek tisztántartásában. Szuperhidrofóbbá tett felületek esetén az esőcseppek legördülnek a felületről (úgynevezett lótuszeffektus), miközben képesek magukkal ragadni a szennyeződések. Szuperhidrofillé alakított felületeknél az esővíz nem képez cseppeket a felületen, hanem vékony vízártyaként szétfut és lemossa a szennyeződést [Orbán 2003]. Ugyanez a mechanizmus teszi lehetővé az üveg felületekre felvitt szuperhidrofil bevonatok párasodás gátló hatását is [Patel et al. 2010, Eshaghi et al. 2013].

Az LbL rétegek kialakítását követően a felületre ejtett desztillált víz csepp peremszöge, kivéve a PAH/TiO<sub>2</sub> bevonatú minta esetén, nőtt, a felület a kontrol mintához képest hidrofóbbá vált (70. ábra). A peremszög növekedése a legnagyobb mértékben a ZnO/TiO<sub>2</sub> minta esetén figyelhető meg. Feltételezhetően a ZnO/TiO<sub>2</sub> kettősrétegből felépülő szervesetlen bevonat nanostrukturáltsága okozza a nagyobb peremszöget. A szakirodalmak [Kekkonen et al. 2010, Khranovsky et al. 2012, Yao et al. 2012] szerint ez a hidrofób tulajdonság „átkapcsolható” UV tartománybeli hullámhosszúságú besugárzással, amelynek következtében a hidrofób felület szuper hidrofillé válhat. Jelen kutatás során az első termikus kezelés hatására is bekövetkezett a hidrofilitás növekedése.



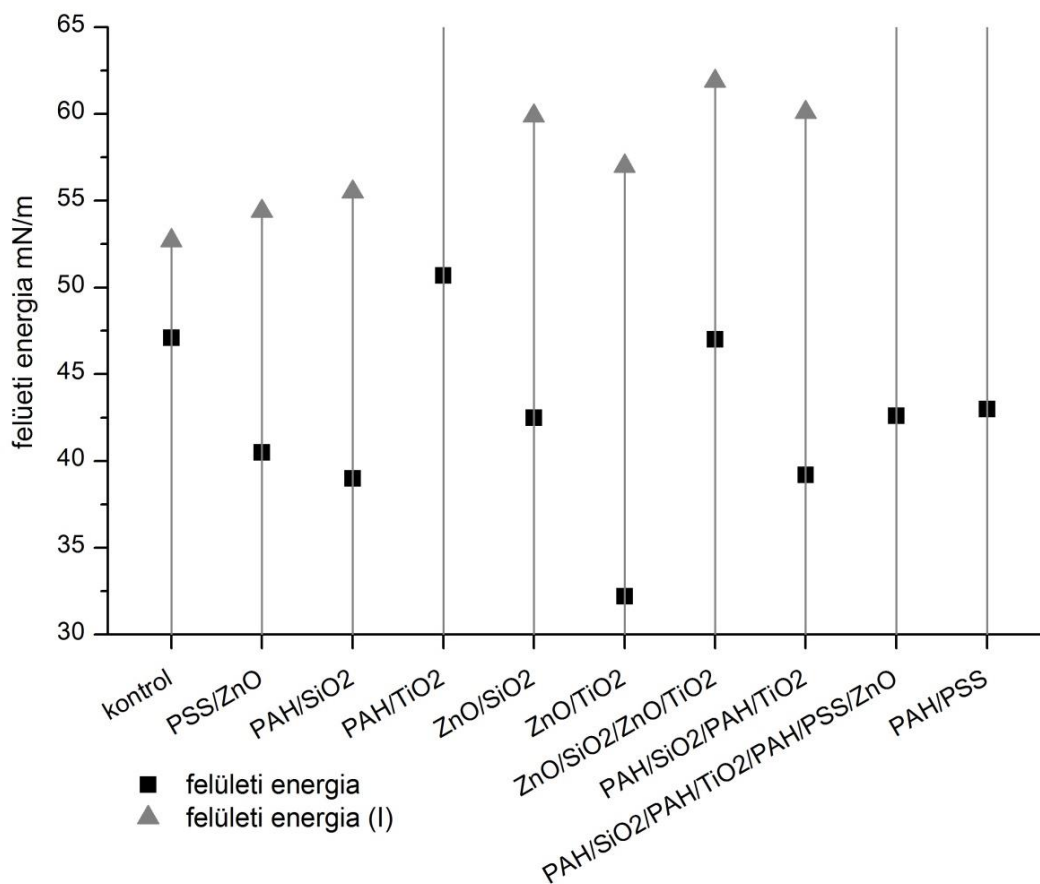
70. ábra. A peremszög változása a bevonatok, illetve az első hőkezelés hatására

A bevont minták mindegyikének, de a kontrol mintának is, nőtt a felületi energiája (71. ábra). A legkevésbé a PSS/ZnO, PAH/SiO<sub>2</sub> minta felületi energiája tolódott magasabb értékek felé, melyet az alkalmazott nanorészecskék hidrofób természetete okozott. A legnagyobb hidrofilitást a PAH/TiO<sub>2</sub>, a PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub>/PAH/PSS/ZnO és a PAH/PSS bevonatú minták mutatták. Ezekben az esetekben a felületi energia, illetve a peremszög meghatározása sem volt lehetséges, mivel a vízcsepp a bevonatokra érkezve azonnal vékony filmként elterült a felületen.

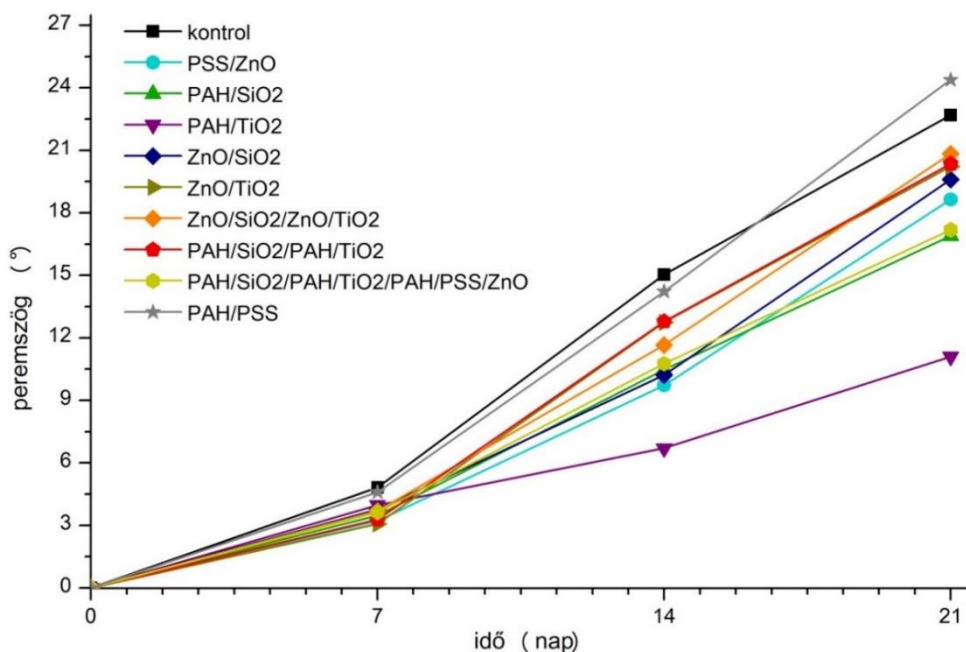
A TiO<sub>2</sub> bevonatot tartalmazó minta esetén a hidrofilitás ilyen mértékű növekedésének oka a TiO<sub>2</sub> fotokatalitikus tulajdonságából fakad. A félvezetők esetén adott energiájú sugárzás, illetve akár hőkezelés hatására a félvezető vegyértékelektronjai gerjesztődnek és a vegyértéksávból a vezetési sávba jutnak. A fotogerjesztés hatására létrejön egy negatív elektron (e<sup>-</sup>) és egy pozitív lyuk (h<sup>+</sup>) pár. Ez az elektron-lyuk pár redukciós és oxidációs folyamatok elindítója lehet, amennyiben a rekombináció nem következik be előbb [Kun 2006]. Ahogy Eshagi és Eshagi (2012) leírja a TiO<sub>2</sub> esetére: az e<sup>-</sup> a felületre migrál, a fotogenerált lyuk pedig reakcióba lép a TiO<sub>2</sub> rácsbeli oxigénjével. Az oxigén miután úgymond csapdába ejtette a lyukat (O<sup>-</sup>), ismét oxidálódhat egy másik lyuk által és oxigén gyök jön, vagy jöhet létre. A két oxigéngyök egymással reakcióba lépve O<sub>2</sub>-vé alakulhat, ez az oxigén molekula kiszabadulva a TiO<sub>2</sub> részecskéből oxigén hiányt (oxigén hibahelyet) hagy hátra. A vízmolekulák ráatalálhatnak ezekre a helyekre, amely a víz molekula felületen való disszociatív adszorpciójához vezet, ami megnöveli a TiO<sub>2</sub> felületén lévő OH-csoportok számát, ennek hatására válik a TiO<sub>2</sub>-dal bevont felület vízkedvelővé. Ha a TiO<sub>2</sub> vegyértékelektronjai nem gerjesztődnek tovább akkora energiával, hogy a tiltott sávon át a vezetési sávba jussanak (például, ha nem éri UV-sugárzás) ismét hidrofób állapotot vesz fel [Eshagi és Eshagi 2012, Fang et al. 2013].

A második, nagyobb hőmérsékletű hőkezelést követően a minták egyikén sem lehetett a mérést elvégezni, minden minta erőteljes hidrofilitást mutatott. Az idő előrehaladtával ez a hidrofilitás fokozatosan csökkent (72. ábra). A legnagyobb mértékben a PAH/TiO<sub>2</sub>, a PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub>/PAH/PSS/ZnO és a PAH/SiO<sub>2</sub> bevonatú minták őrizték meg hidrofilitásukat. A hidrofób felület regenerációjának oka egyrészt a szerves szennyezőanyagok adszorpciójában rejlik és/vagy a felületen disszociatív adszorpcióval megkötődött vízmolekulák leválásában, amelyet az oxigén molekulák adszorpciója okozhat [Eshagi és Eshagi 2012].





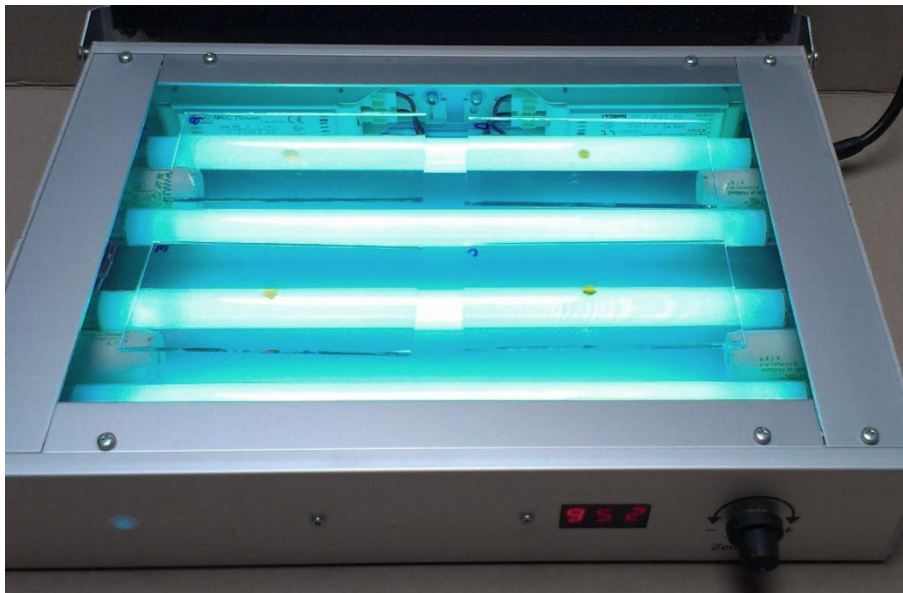
71. ábra. A felületi energia változása a hőkezelés hatására



72. ábra. A peremszög időbeli változása a második hőkezelést követően

### 5.4.3 A bevonatok felülettisztító hatásának vizsgálata

A metilnarancs oldattal végzett degradációs vizsgálat (73. ábra) kimutatta, hogy a kialakított LbL-bevonatok felülettisztító, szervesanyag lebontó hatással is rendelkeznek. Az egyes minták esetében a 10. táblázat mutatja az elszíntelenedés idejét. A \*-gal jelölt esetekben 1800 másodpercnyi besugárzást követően sem következett be a metilnarancs csepp elszíntelenedése.

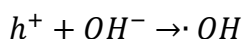
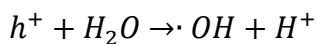


73. ábra. Elszíntelenedett metilnarancs oldat

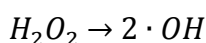
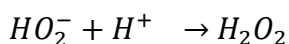
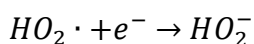
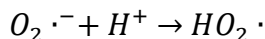
10. táblázat. A felületre cseppentett metilnarancs oldat elszíntelenedésének ideje

	felhordott nanorétegek	elszíntelenedés ideje
1.	kontrol	---*
2.	PSS/ZnO	240 s
3.	PAH/SiO <sub>2</sub>	421 s
4.	PAH/TiO <sub>2</sub>	241 s
5.	ZnO/SiO <sub>2</sub>	419 s
6.	ZnO/TiO <sub>2</sub>	248 s
7.	ZnO/SiO <sub>2</sub> /ZnO/TiO <sub>2</sub>	240 s
8.	PAH/SiO <sub>2</sub> /PAH/TiO <sub>2</sub>	342 s
9.	PAH/SiO <sub>2</sub> /PAH/TiO <sub>2</sub> /PAH/PSS/ZnO	360 s
10.	PAH/PSS	---*

A mechanizmus hasonló a felületek hidrofíllá válásának mechanizmusához. A gerjesztés hatására ez esetben is létrejön az e<sup>-</sup>-lyuk pár, amely a redukciós és oxidációs folyamatok elindításáért felelős. Amennyiben a felületen szerves anyag tapadt meg, majd a felületre víz érkezik, illetve UV-sugárzás éri, a lyukak jelenlétében a vizes közegben lejátszódhatnak a vízmolekulák, valamint a hidroxid-ionok elektronátmenettel járó reakciói [Kun 2006].



Ebben a reakcióban gyökök képződnek, amelyek képesek reakcióba lépni a szerves szennyezőanyaggal. A félvezető fotokatalizátor molekuláris oxigénnel reakcióba lépve szuperoxid-gyökionokat képez. Az így keletkezett szuperoxid-gyökionokból perhidroxil, és hidroxil-gyökök képződhetnek [Kun 2006].



A leírt folyamatokon keresztül képződött hidroxil-gyökök, szuperoxid-gyökök, illetve a  $H_2O_2$  oxidálhatják, degradálhatják a felületre adszorbeálódott szerves molekulákat. A fotokatalitikus degradáció során a szerves anyagból  $CO_2$  és víz keletkezik.

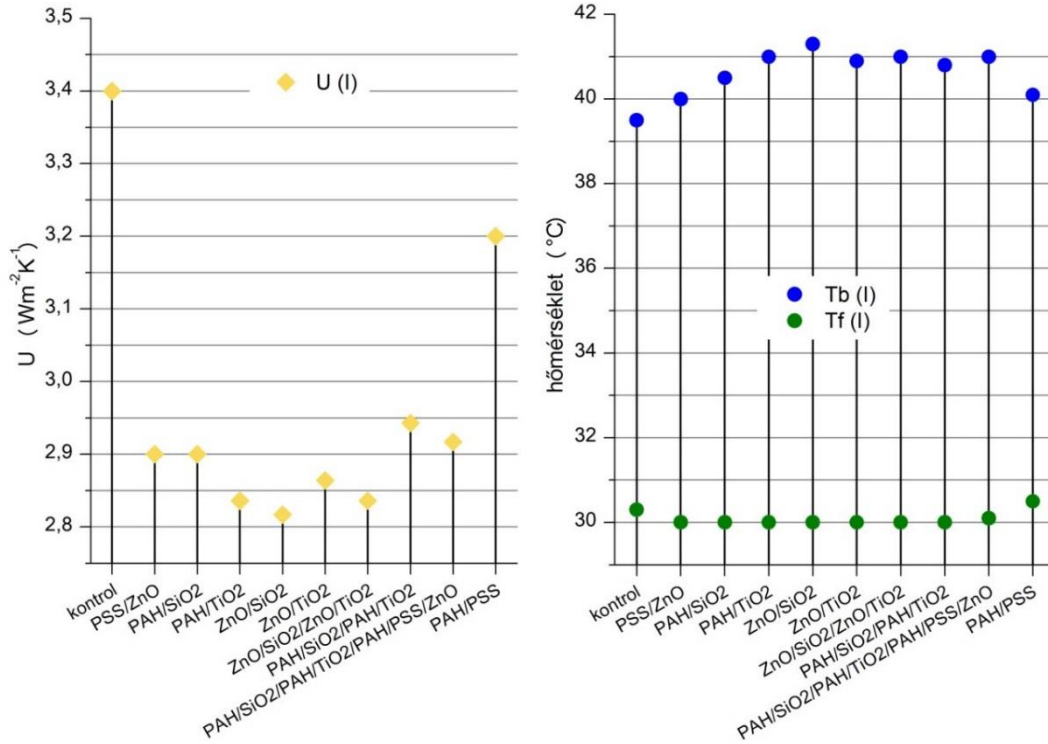
Noha a  $TiO_2$  a leggyakrabban alkalmazott fotokatalizátor a  $ZnO$  szintén jó tulajdonságokat mutat ezen a téren. A  $ZnO$  gerjesztéséhez ugyanakkora energia szükséges, mint a  $TiO_2$  gerjesztéséhez [Ali et al. 2010]. Bizonyos körülmények teljesülése mellett a  $ZnO$ -ról az is bebizonyosodott, hogy sokkal hatékonyabban működik, mint a  $TiO_2$  [Yamaguchi et al. 1997]. A  $ZnO$  fotokatalitikus hatása és élettartama fokozható, a  $ZnO$   $TiO_2$ -dal való kombinációjával [Yang és Swicher 1996, Wang et al. 2002].

A bevonat külső oldalon való alkalmazhatósága természetesen függ a bevonat mechanikai tulajdonságaitól. A hőkezelések hatására a bevonatok stabilitása feltételezhetően nőtt, ahogy erről több szakirodalom is beszámol [Liu et al. 1999, Rosidian et al. 1998, Han et al. 2005, Xu és Cui 2007, Zlotikov et al. 2008, Liu et al. 2010]. A nanobevonatok öntisztuló bevonatkénti alkalmazhatóságának megítélésére a mechanikai tulajdonságok vizsgálata is ajánlott. Jól lehet a nanobevonatokat már napjainkban is alkalmazzák olyan épületeknél (például üveg homlokzatú magasépületek), amelyeknél az üvegfelület folyamatos karbantartása és tisztítása nehéz feladat lenne a bevonat nélkül [Orbán 2013].

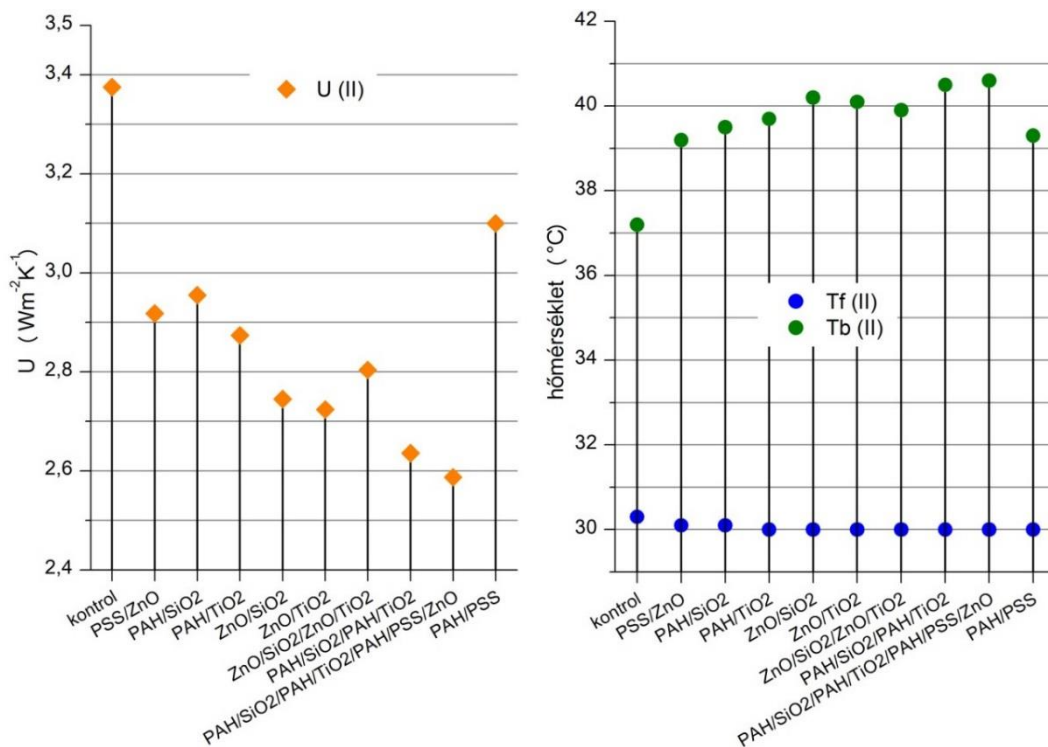
#### 5.4.4 Hőátbocsátási tényező

Noha a NIR tartomány kezdeti szakaszában a kontrol mintához képest a bevont minták csak enyhe csökkenést mutatnak az áteresztett infrasugárzás mennyiségében, a NIR görbéken látható, hogy 1000 nm-től a bevont minták NIR transzmittanciája erőteljesebben csökken, mint a kontrol mintáé, ezen érték felett (amely felett a berendezés nem képes adatot adni) feltételezhető a nagymértékű különbség a kontrol és egyes LbL technológiával bevont minták között. Az eredményül kapott hőátbocsátási tényezők (74-76. ábrák) ezt a feltételezést támasztják alá. Az  $U$ -érték a legjobban PAH/ $SiO_2$ /PAH/ $TiO_2$ /PAH/PSS/ $ZnO$  bevonatú mintánál csökkent a kontrol mintához képest (a mérés reprodukálhatóságát bizonyítja, hogy az egyrétegű üveg hőátbocsátási tényezője, az 1970-es években  $5,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ , míg Pintér (2009) szerint a hőszigetelt üveg esetén már csak  $3,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ),

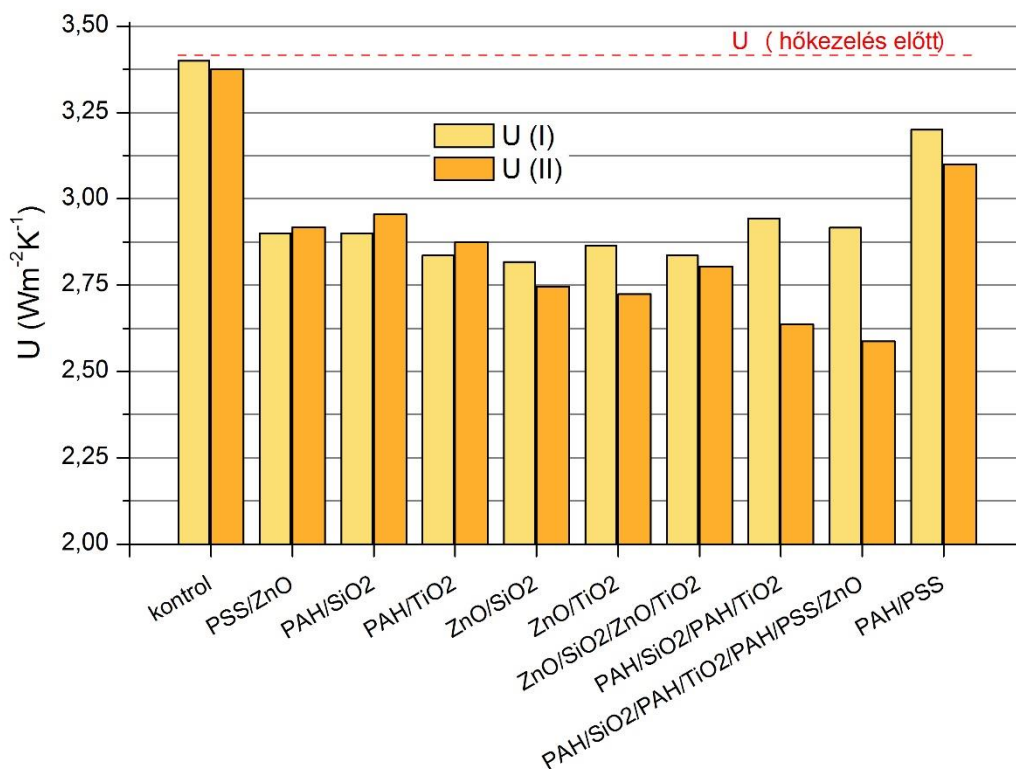
ahol a csökkenés a második hőkezelést követően elérte a 23 %-ot. Szintén jelentős, 22 %-os  $U$ -értékbeli csökkenést tapasztaltam a PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub> bevonatú mintánál.



74. ábra.  $U$ -értékek az első hőkezelést követően



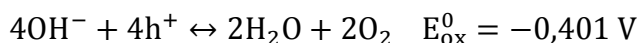
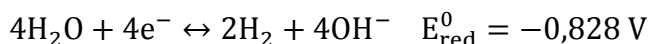
75. ábra.  $U$ -értékek a második hőkezelést követően



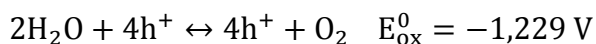
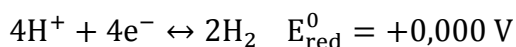
76. ábra. U-értékek az első, illetve második hőkezelést követően

#### 5.4.5 A nanobevonat modellezésének eredményei

A kísérlet során 3 félvezető anyag fényáteresztő, abszorbeáló és fényvisszaverő hatását mértem és modelleztem 0,2-15  $\mu\text{m}$  hullámhossz közötti tartományban. Ezek a  $\text{SiO}_2$ , a  $\text{TiO}_2$  és  $\text{ZnO}$  20-100 nm átmérőjű részecskék voltak. A rétegeket PAH és PSS nanopolimer rétegekkel ragasztottam össze, alakítottam ki mono-molekuláris (Lvov et al. 1997) rétegeket az üveg felületén. A félvezető anyagok a beeső fotonokat lyuk-elektron párrá alakítja át, tehát elnyelnek, abszorbeálnak különböző hullámhosszúságú fényt. A keletkező elektronok és lyukak a térben szétválasztódnak a félvezető belsejében kialakuló elektromos tér miatt. A fotogenerált gerjesztett elektronok a vezetési sávba kerülnek, ahol redukív reakciók játszódnak le. A lyukak a félvezető nanopolimer felületre kerülnek, ahol oxidációs reakciók alakulhatnak ki (pl. fotodegradációja a szerves anyagoknak). A következő egyenlet ezt szemlélteti víz jelenlétében:



Savas közegben a víz disszociációja (proton és hidroxil ion) révén a következő egyenletek alakulhatnak ki:



Fotogenerált szerves lebontás esetén a Gibbs szabad energia negatív értékű lesz. Ezt a metilnarancs lebontásánál vizsgáltam részletesebben.

$$\Delta G = -nF\Delta E$$

A dolgozatban a félvezető anyagokat oxid formában használtam fel, illetve készítettem el a szimulációt. Az oxigén atomnak magasabb elektron negativitása van, mint a fémeknek, így a vegyérték elektronok részben vagy teljesen átvándorolnak az oxigénről a fém ionokra. Ebből következően a fém-oxidok polárisak, vagy ionos állapotúak lesznek.

A félvezető anyagok optikai tulajdonságaiban a szabad elektronok száma dominál. A Si atom koncentrációja szobahőmérsékleten  $5,0 \cdot 10^{22}$  atom·cm<sup>-3</sup>, a TiO<sub>2</sub> atom koncentrációja  $10^{17}$ - $10^{21}$  atom·cm<sup>-3</sup>, a ZnO  $10^{20}$  atom·cm<sup>-3</sup> és a kapcsolódó elektronok száma Si esetén  $10^{10}$  elektron·cm<sup>-3</sup>, ami meglehetősen alacsony érték az atomok számához képest. Ebből következően a plazma frekvencia ( $\omega_p$  értéke  $8,98 \cdot 10^8$  Hz) komponens Si esetén a Drude-Lorentz-féle modellben el lehet hanyagolni.

A másik fontos sajátossága ennek a film rétegnek, illetve ennek az atomszerkezetnek, hogy a SiO<sub>2</sub>-nak két gerjesztési küszöb energiája van, 3,38 eV és 4,27 eV. Ezzel szemben a TiO<sub>2</sub>-nak 3,2 eV, míg a ZnO-nak 3,38 eV. Ez az energia a vegyértékelektron sáv és a vezetési elektron sáv szintjének a különbsége. A rezonancia frekvencia a 3,38 eV-hoz tartozik, a másik a spektrumon kívül helyezkedik el, ezért nincs hatása a modellre [Edward 1997].

Azt a frekvenciát, ami a gerjesztési küszöb energiára hatással van, a következők alapján számíthatjuk:

$$\omega_0 = \frac{E_g}{\hbar} \quad (51)$$

ahol,  $\hbar$  a Planck-féle állandó osztva  $2\pi$ -vel ( $6,58211828 \cdot 10^{-16}$ ),  $\omega_0$  a csillapítatlan oszcillátor saját frekvenciája, ami a gerjesztési küszöb energiával van kapcsolatban.  $\omega_0$  értéke a fenti összefüggés alapján  $5,13 \cdot 10^{15}$  s<sup>-1</sup>.

A kapcsolat, bármely frekvencia és hullámhossz között a következők alapján számolható:

$$\omega = \frac{2\pi c}{\lambda} \quad (52)$$

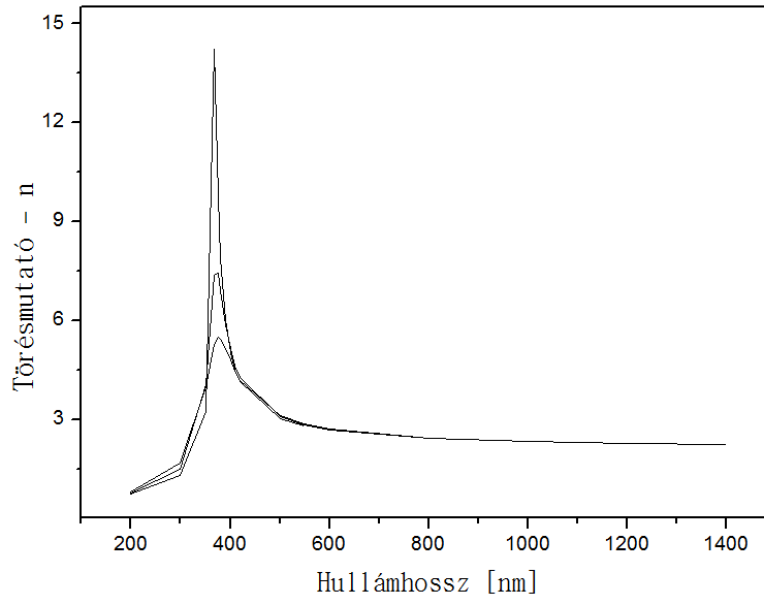
ahol,  $c$  a fény sebessége vákuumban ( $299792458$  m·s<sup>-1</sup>). Ebből az összefüggésből számolhatjuk a rezonancia csúcs hullámhosszát, ami 366,82 nm.

Így a 48. egyenletet módosítva és az egyszerűsítéseket elvégezve az 53. egyenletet kapjuk:

$$\bar{n} = \left( \sqrt{1 + \frac{A}{\omega_0^2 - \omega^2 - j\gamma\omega}} \right) \quad (53)$$

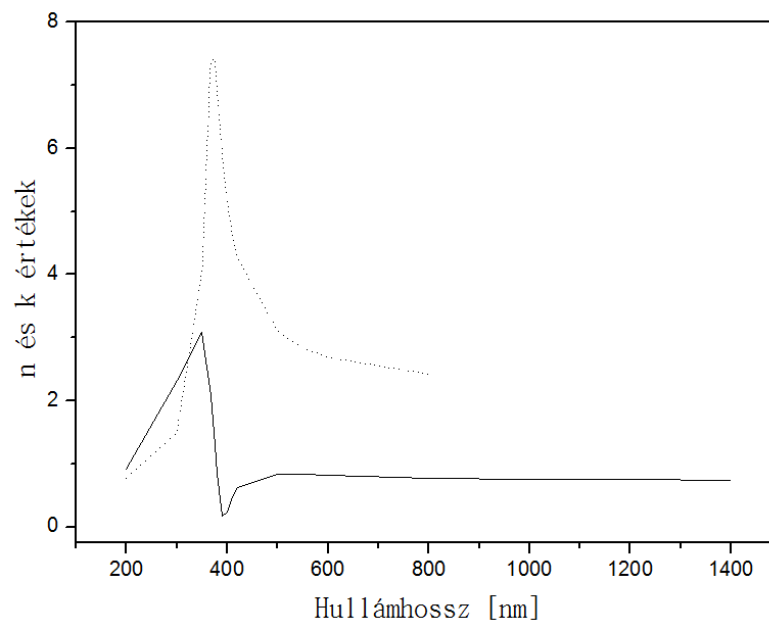
amelyből számolhatjuk a csillapítási tényezőt  $\gamma$  ( $7,5 \cdot 10^{14}$  s<sup>-1</sup>). A csillapítási tényező értéke a rezonancia csúcs magasságával és szélességével van kapcsolatban. Az 53. egyenletben viszont az  $A$  ( $1,2 \cdot 10^{32} \cdot e^{-j44,8}$ ) tényező a rezonancia csúcs amplitúdójának az elméleti értékekkel való illesztéssel van kapcsolatban.

A 77. ábrán a csillapítási tényező  $\gamma$  változtatásának hatását figyelhetjük meg az elméleti görbével való illesztéskor.



77. ábra. A csillapítási tényező változása

A szimuláció  $n$ -valós (fénytörési mutató) és  $k$ -képzetes (abszorpciós mutató) értékei az 53. egyenlet alapján. A 78. ábrán megfigyelhető a félvezető gerjesztési energia sávjának a hatása a rezonancia frekvenciánál.

78. ábra. A fénytörési és abszorpciós mutató változásai  
(szaggatott vonal: fénytörési mutató; folytonos vonal: abszorpciós mutató)

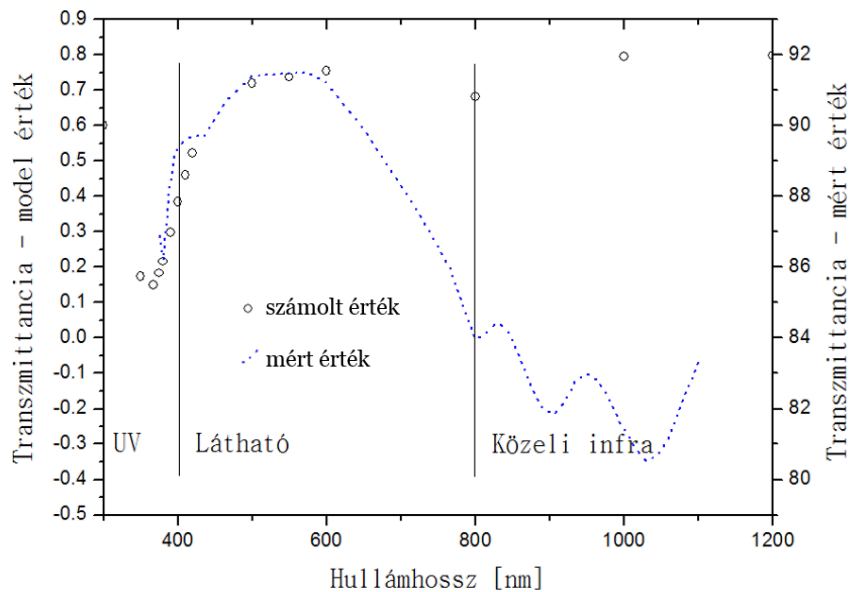
A szimuláció során az üveglapra felvitt félvezető réteg és polimerreteg együttes hatását a következő két egyenlet alapján jellemezhetjük (a 46. és 47. egyenletek módosított alakja):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - i\varepsilon_2 = \varepsilon_\infty \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\gamma\omega} \right) + \frac{f\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i\Gamma\omega} \quad (54)$$

Az 54. egyenlet első fele a Drude egyenlet, amely a szabad elektronokat modellezi, tehát a vezető sávban található elektronokat, a másik fele pedig a Lorentz-féle egyenlet, amely pedig a kötött elektronokat modellezi a rezonancia frekvencia felhasználásával. A szimuláció

alapján a látható tartományon belül a fénytörési mutató 1,8 és 1,9 között változott, ami magasabb, mint a mikro méretű SiO<sub>2</sub>, de jelen kutatásban az oxid PAH polimerbe lett ágyazva. Az abszorpciók együttható (az 54. egyenlet képzetes része) pedig 0,003-0,7 között változik.

A modellezett érték a látható tartomány első felében nagyon jó közelítést ad a mérési eredményekkel, de ezt követően a szubsztrát üveg átengedő képessége miatt lecsökkent az elméleti értékhez képest. Mivel az alkalmazott nanobevonat félvezető anyag volt (SiO<sub>2</sub>), abszorbeáló hatása továbbra is megmarad úgy, ahogyan a modellezett függvény változik. Az UV tartományban mind az üveglapra adszorbeált nanoréteg, mind pedig a modellezett érték nagyon hasonlóan fut. A 79. ábrán a hullámhossz függvényében a modellezett transzmittancia és reflexió értékek lettek ábrázolva.



79. ábra. A Drude-Lorentz-féle komplex modell értékek és mért transzmittancia értékek változása a különböző hullámhossz tartományokban

A szimulációhoz az 55-59. egyenleteket használtam:

$$R_0 = R_s \left( 1 + \frac{(1-R_s)^2 e^{-2\alpha d}}{1-R_s^2 e^{-2\alpha d}} \right) \quad (55)$$

$$T_0 = \frac{(1-R_s)^2 e^{-2\alpha d}}{1-R_s^2 e^{-2\alpha d}} \quad (56)$$

ahol  $d$  az üveg vastagságát jelenti.

$$T_s = 1 - R_s \quad (57)$$

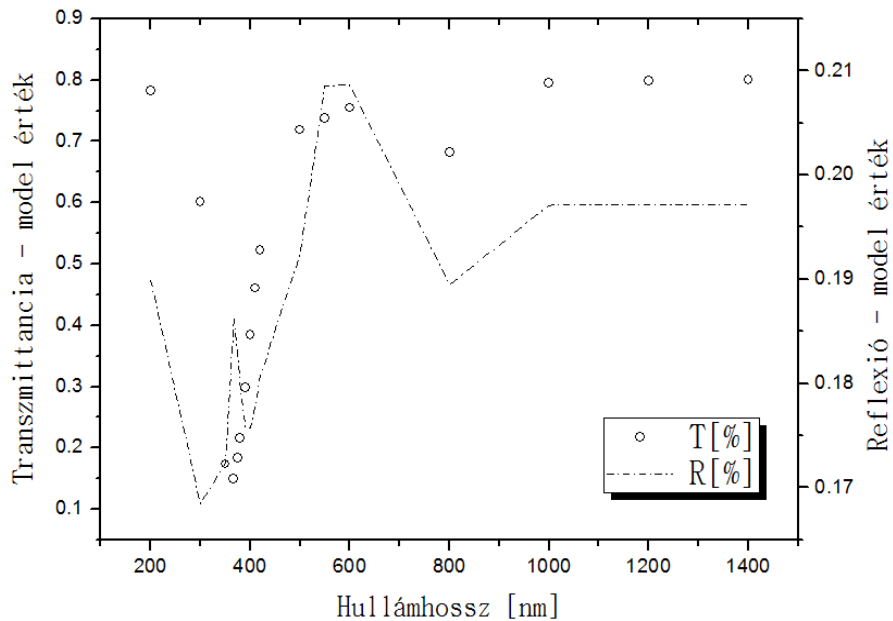
$$\alpha = \frac{4\pi k_s}{\lambda} \quad (58)$$

$$R_s = \frac{(n_s-1)^2 + k_s^2}{(n_s+1)^2 + k_s^2} \quad (59)$$

A 80. ábrán jól látható, hogy a közeli infra tartományban a nanobevonat alacsony transzmittanciája mellett a reflexió, azaz visszaverődés is mérsékelt, következésképpen

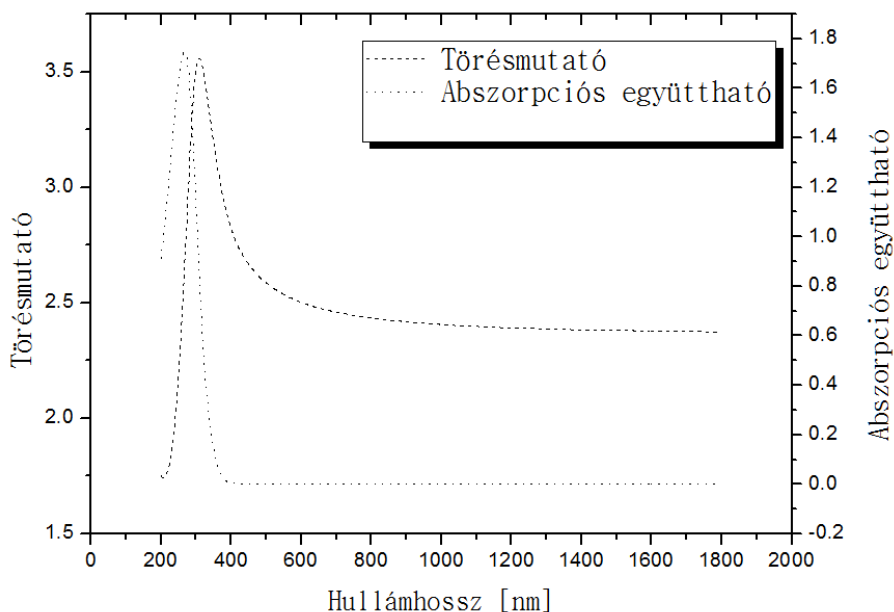


abszorpciós képessége megnövekszik. A Low-E üvegek esetén a visszaverődés jelentős ebben a hullámhossz tartományban, de a jelen fejlesztés az abszorpciós képesség növelésére irányult, tehát a különböző hullámhossz tartományokban a fény elnyelődik, és az elnyelt energia a félvezető tiltott sávjából a vezető sávjába történő elektron elmozdulásban emésztődik fel. A félvezető gerjesztett állapotban szerves anyag lebontó hatású, így a bevonat az ablak külső oldalán való elhelyezése öntisztuló felületet eredményezhet.



80. ábra. A modellezett transzmittancia és reflexió értékek  $\text{SiO}_2$  nanoréteg esetében

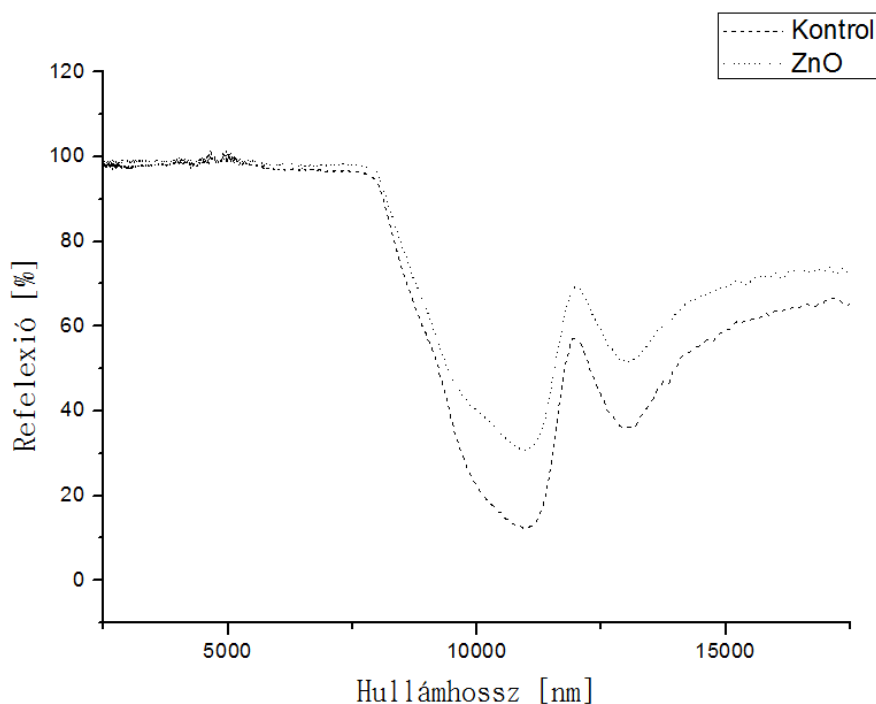
A Ti átmeneti fém, számos oxid formája létezik. A nem teljesen betöltött 3d héjon már alacsony optikai aktivitás mellett is gerjesztett állapotba kerülhetnek az elektronok. Ez azt jelenti, hogy a Drude-féle egyenlettel nehéz megbízhatóan jellemezni ezt az anyagot. A fénytörési és abszorpciós mutató változása a 81. ábrán láthatók.



81. ábra. A fénytörési és abszorpciós mutató változásai  $\text{TiO}_2$  esetében

A ZnO nanorészecskék méretükből fakadóan új optikai tulajdonságainak a feltárása az elmúlt években hangsúlyozottá vált. A ZnO vékony film törésmutatója 2,2-ről 1,9-ra csökken a látható tartomány alsó határától, és közel azonos marad 4000 nm-ig. Az abszorpciós együttható 0,2-ről 0,55-re folyamatosan növekszik a látható tartományon belül. A ZnO *n*-típusú félvezető, az elektronoknak nagyfokú a mozgása és 3,38 eV gerjesztési energiaküszöb jellemzi. Ez 368 nm-nek felel meg, tehát ez alatt is már képes abszorbeálni fényt. A ZnO kristályszerkezet felületi hibahelyeinek köszönhetően viszonylag egyszerű a részecskék felület módosítása vagy szennyezése, hogy optikai tulajdonságai megváltozzanak. A hibahelyek egyrészt az oxigén hiányából, másrészt a rácsközi cink atomok hiányából fakadnak. A kutatás során a ZnO felületét PSS-sel kezeltük, amely szennyezésnek is felfogható, mivel a ZnO részecskék mérete 20 nm körüli volt, illetve más félvezető rétegekbe építettem bele, pl. szilícium és titán-oxid részecskék közé. Az így kapott film hőkezelés utáni fényáteresztő képessége megnövekedett, felületi energiája pedig lecsökkent, tehát sikerült a film réteggel nano és mikro szinten strukturáltá tenni, szubmikroszkópos periodicitást adni és a hidrofóbítását növelni (lásd a peremszög és felületi energia méréseknél). Mivel a ZnO nanorészecskéknek van fluoreszcens hatása, amely a látható tartományra esik, nehéz a pontos átlátszóságot meghatározni.

A hibrid ZnO film (PSS/ZnO (II)) reflexiója (82. ábra) 11  $\mu\text{m}$ -tól 17,5  $\mu\text{m}$ -ig megnövekszik, 70 % körüli értékre, ami a távoli infratartomány reflexióját segíti elő, ezáltal a melegítő tartomány visszaverését.



82. ábra. A reflexió változása ZnO esetén a hullámhossz függvényében

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az utóbbi években, évtizedekben egyre nagyobb figyelem irányult a háztartások energiafelhasználásának és az épületek hőveszteségének csökkentésére, amely azon túl, hogy komoly gazdasági, gazdaságossági kérdés, a fenntarthatóság szempontjából is kiemelt fontossággal bír. Hőtechnikai szempontból az épületek szerves részét képező nyílászárók komoly problémát, tényleges gyenge pontokat jelentenek, mert a falazathoz képest jóval karcsúbb szerkezetükből és a velük szemben támasztott igényeknek való megfelelésből következően rosszabb hőszigeteléssel rendelkeznek, amelynek köszönhetően a belső térből (komforttérből) hőenergia távozik, ami egyrészt energiaveszteséghez, másrészt diszkomfort érzés kialakulásához vezethet.

A folyamatosan szigorodó elvárásoknak való megfelelés egyik lehetséges módja a megújuló energiaforrások és természetes anyagok alkalmazása, de komoly lehetőségek rejlenek az új anyagokkal, technológiákkal való kísérletezésekben, alapkutatásokban is, amelyekkel akár nagymértékben is csökkenthetőek a veszteségek, ami által energia takarítható meg.

Doktori kutatásom során célzott ablakvizsgálatokat végeztem, amelyeknek középpontjában végelemes modellezés, helyszíni mérés és laboratóriumi kísérletsorozat állt. A célkitűzéseknek megfelelően az üvegezés és az üveg felületi tulajdonságainak javítására fókuszáltam, azonban vizsgáltam az üvegezést, az azt befoglaló keretszerkezettel, falazattal együtt is.

A kutatómunka első szakaszában a hazánkban elterjedten alkalmazott ablakszerkezetek közül 3 típus esetében végeztem hőtechnikai végelemes modellezést, amelyek során az ablakot, mint terméket és mint beépített szerkezetet is megvizsgáltam. A szimulációs modellekkel sikerült jól alkalmazható, a valóságot jól leíró modelleket felépíteni és jellemezni a vizsgált ablakszerkezeteket. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a 90 mm vastag tömörfa ablak hőátbocsátása a kisebb szerkezeti vastagság ellenére elhanyagolhatóan kis mértékben gyengébb a vizsgált fa-alumínium passzívház ablakhoz képest. A hőmérséklet szintértékek többek között azt is megmutatták, hogy a passzívház ablak esetében a külső hideg levegő által okozott hideg zóna sokkal inkább „behatol”, lehűtve ezzel a középtömítést. A tömörfa ablakok esetében egyenletesebb a szerkezetben kialakuló hőeloszlás.

A kutatás második szakaszában a beépített nyílászáró üvegezésének helyszíni vizsgálataival rámutattam arra, hogy az élettartam során az üvegezés nemesgáztöltése csökkenhet, sőt akár teljes mértékben el is tűnhet, amelynek következtében idővel számítani kell a hőszigetelési teljesítmény csökkenésére. Eddig ennek megállapítására, csak a szerkezet kibontása után, roncsolásos laboratóriumi vizsgálatot követően volt lehetőség, de ennek költségvonzata és a szerkezet károsodása miatt nem terjedt el a gyakorlati életben. Bár jóllehet sokan nem is tudnak, illetve nem foglalkoznak ezzel a problémával, pedig a beépített jó minőségű üvegezés néhány év elteltével veszíthet korábbi jó hőszigetelő képességéből. Az  $U$ -értékek időváltozós helyszíni mérésével sikerült spektrális diagramokat készíteni, amelyekkel jellemeztem a hőtranszport folyamatot és annak hatását az ablakszerkezetre.

Kutatómunkám nagy eredményének tartom, hogy félvezető anyagok rétegeképzeses nanotechnológiai eljárásával sikerült kifejleszteni olyan ultravékony bevonatokat, amelyekkel lehetővé vált az ablaküveg  $U$ -értékének kedvező irányú befolyásolása.

A kilenc féle bevonat vizsgálata során kapott eredményekből kiderült, hogy a bevonatok nem rontották az üveg átlátszóságát, sőt néhány esetben a transzmittancia VIS tartománybeli növekedését is tapasztaltam. A közeli infravörös tartományban, amelyen a berendezés még eredményeket tudott adni (760-1100 nm), bár nem volt számottevő a transzmittancia csökkenése, a spektrumok mégis jól mutatják, hogy a kontrol mintához képest a második hőkezelést követően az 1025 nm-nél nagyobb hullámhosszokon a transzmittancia csökkent. Noha az alkalmazott üvegről a mérési eredményekből kiderült, hogy feltételezhetően már rendelkezett valamilyen bevonattal (UV-VIS-NIR által mutatott változások a tömbi anyagban), vagy adalékanyaggal, amely miatt a kontrol üvegnek is relatív alacsony  $U$ -értéke volt. Az LbL bevonatú minták a kontrol mintánál is alacsonyabb hőátbocsátási tényezőjűek lettek. A legkisebb  $U$ -értéket,  $2,817 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub>/PAH/PSS/ZnO bevonatú minta mutatta a második, magasabb hőmérsékletű hőkezelést követően. Ez a csökkenés, a kontrolmintához képest 22 %-os. Jelentős  $U$ -értékbeli javulást mutatott a PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub> bevonatú minta is.

A felületi energiát két minta, a PAH/TiO<sub>2</sub> és a PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub> bevonatú növelte a hőkezelést megelőzően, a többi bevonat a kontrol mintához képest hidrofóbbá tette az üveg felületét. A hőkezelések nagy hatást gyakoroltak a felület nedvesíthetőségében. A 180 °C-os kezelést követően minden minta felületi energiája nőtt, legnagyobb mértékben a PAH/TiO<sub>2</sub>, illetve a PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub>/PAH/PSS/ZnO bevonatú minták esetén. A második, 500 °C-os hőkezelés tovább növelte a minták felületi energiáját, olyannyira, hogy a hőkezelés első napján a mintákon a vízcseppek a cseppentést követően vékony filmréteggé terültek el. Ez a hidrofilitás az idő elteltével csökkent. A legkevésbé a PAH/TiO<sub>2</sub>, a PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub>/PAH/PSS/ZnO és a PAH/SiO<sub>2</sub> bevonatú minták veszítettek hidrofil természetükből. A nyílászárók esetén a hidrofil felületek külső rétegeként való alkalmazásának előnye, hogy az esőcseppek a felülettel érintkezve elterülnek, vékony filmréteggé alakulnak, így egyrészt lemosják a felületi szennyeződést, másrészt nem hagynak nyomot az ablakon. Az LbL eljárással létrehozott bevonat esetében a félvezető anyagok adszorpciója révén sikerült a kezelt üvegfelület öntisztító hatását elősegíteni.

A Lorenz-féle szimulációs modellek egyértelműen igazolták a félvezetők UV tartományban való aktivitását, illetve a bevonat átfogó hőtechnikai megjelenését. A metilnarancssal végzett vizsgálatok eredményeinek tanúsága szerint a kutatás során előállított fotokatalitikus félvezetőket is tartalmazó minták a felületre érkező szerves (szennyező) anyag bontására is képesek az UV-sugárzás és víz jelenlétében, így nemcsak a felület hidrofilitása okozhatja az alkalmazás során az öntisztuló képességet, hanem a szerves szennyezőanyagok fotokatalitikus lebontása is.

Összegzésképpen elmondható, hogy az idő előrehaladtával az ablak szerkezetében vélhetően az üveg hőtechnikai paraméterei fognak a legkevésbé változni.

## 7. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Végeselemes modellezés alapján megállapítható, hogy az ablak nagyobb tokvastagsága nem feltétlenül eredményez jobb hőszigetelést, továbbá bizonyos tokvastagság felett a szerkezeti kialakítás szerepe legalább olyan fontos, mint maga a tokvastagság.  
A szimulációs vizsgálatok eredményeiből megállapítható továbbá, hogy a külső hideg levegő által okozott hideg zóna hatása az ablakszerkezet középtömítéséig benyúlva, aszimmetrikus hőterhelést okozhat, ami alacsony (fagypon alatti) külső hőmérséklet esetén a tömítés gyorsabb, idő előtti elöregedéséhez vezethet.
2. Végeselem szimulációval és a helyszíni mérések alapján egyértelműen megállapítható roncsolásmentes módon az üvegezés hőátbocsátási értékének változása. Az  $U$ -értékek időváltozós helyszíni mérésével sikerült olyan spektrális diagramokat létrehozni, amelyekkel egyértelműen jellemezhetőek a hőtranszport folyamatok, illetve az antropogén hatások.
3. Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy LbL nanoméretű rétegeképzéses eljárással adszorbeálni lehet olyan félvezető anyagokat ultravékony bevonatként ablaküvegezésen, amelyek alkalmasak transzmittancia növekedésre VIS tartományon belül. Az elvégzett mérések szerint a nanobevonatoknak köszönhetően a közeli infravörös tartományban a transzmittancia csökkent, a távoli infravörös tartományban a reflexió növekedett.
4. A vizsgálatok eredményeivel igazolható, hogy a létrehozott LbL bevonatú minták (PSS/ZnO, PAH/SiO<sub>2</sub>, PAH/TiO<sub>2</sub>, ZnO/SiO<sub>2</sub>, ZnO/TiO<sub>2</sub>, PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub>/PAH/PSS/ZnO, ZnO/SiO<sub>2</sub>/ZnO/TiO<sub>2</sub>, PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub>,) a kontrol mintához képest (3 mm-es síküveg) alacsonyabb hőátbocsátásúak lettek.
5. Megállapítható, hogy a PAH/TiO<sub>2</sub> és a PAH/SiO<sub>2</sub>/PAH/TiO<sub>2</sub> bevonat növelte a felületi energiát a hőkezelést megelőzően, a többi bevonat a kontrol mintához képest hidrofóbbá tette az üveg felületét. A második hőkezelés tovább növelte a felületek energiáját és több hét eltelté után is csak alig veszítettek hidrofil természetükből. Az LbL eljárással létrehozott fotokatalitikus félvezető anyagokból készült bevonatok esetében a metilnarancs oldat elszíntelenedése, a szerves szennyeződések UV sugárzás során történő lebontását támasztja alá.
6. A Lorentz-Drude-féle modell alkalmas modell arra, hogy a félvezető nanoanyagok abszorbeáló tulajdonságait jellemezhesük. A modell értékek és mérési eredmények hasonlóságot mutatnak. Az üveg felületének az abszorbeáló képességét megváltoztatva az ablakok mögötti tér komfortjellemzőit, mint pl. a térrész felmelegedését, befolyásolni lehet. Az abszorpciós hatás domináns volt a szimulációs eredmények alapján a reflexióval szemben, úgy hogy az üvegek transzmittanciája nem változott meg.

## 8. TOVÁBBI KUTATÁSI FELADATOK

A vizsgált témakör kutatását nem tekintem lezártnak. Az eddig elvégzett vizsgálatok, és a kapott eredmények rámutattak olyan problémákra, feladatokra, amelyek megoldása további értékes eredményeket szolgáltathat az ablakszerkezetek valamely teljesítőképességi jellemzőjének javításában, megfelelően ezzel az egyre szigorodó energetikai direktíváknak, rendeleteknek, elvárásoknak.

Kiemelt fontosságú feladatnak tekintem az ablakok üvegezésének további helyszíni vizsgálatát, annak megállapítását, hogy a nemesgáztöltés „eltűnése” mikor következik be, és ezáltal mikor romlik le az üvegezés hőátbocsátása, jelentősen megnövelve ezzel az energiaveszteséget. Ennek megállapítására több éven át tartó vizsgálatsorozat szükséges, habár jóllehet, hogy az üvegszerkezetek öregítő eljárással történő kezelése valamelyest lerövidítheti ezt a folyamatot. Meglátásom szerint a mért adatokból olyan modell állítható fel, amely jó becsléssel jellemzi, illetve előre jelzi az üvegezés gáztartó-képességének élettartamát.

Az üvegezés helyszíni mérésének adatait arra is fel kívánom használni, hogy a disszertációban ismertetett matematikai transzformációk segítségével, még részletesebben megérthessem és jellemezhessem a valós környezetünk, komfortterünk üvegezésre gyakorolt hatását.

Az ablakok üvegszerkezetében meg kell határozni az LbL rétegeképéssel létrehozott nanobevonatokkal rendelkező üveglapok pozícióját, valamint a hőszigetelés további fokozása céljából vizsgálni kell a jelenleg elterjedten alkalmazott Low-E bevonatos üvegekkel egy szerkezetben való kialakítási lehetőségeit.

Természetesen az üveg(ezés) hőátbocsátása, transzmittanciája javítása céljából az alkalmazott nanotechnológiai rétegeképés még különféle továbblépési lehetőségeket tartogat más félvezető anyagok és rétegrendek megválasztásával.

## 9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton is szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik hozzásegítettek disszertációm elkészítéséhez.

Elsősorban köszönetemet szeretném kifejezni témavezetőmnek Prof. Dr. Kovács Zsoltnak, aki doktori kutatásom és a disszertáció megírása során értékes, hasznos tanácsaival segítette munkámat és szakmai fejlődésemet. Hálával tartozom Neki, hogy az irányítása alatt dolgozhattam és észrevételeivel, építő kritikáival még az utolsó pillanatokban is támogatta törekvéseimet.

Nagy köszönet illeti a munkahelyi vitára beadott anyag opponenseit, Prof. Dr. Bercsey Tibort és Dr. Bejó Lászlót, akik nagyon alapos bírálatukkal, kritikai észrevételeikkel és tanácsaikkal elősegítették a dolgozat jelenlegi formájának kialakulását.

Köszönetemet fejezem ki azon munkatársaimnak, barátaimnak, akik munkám során barátságukkal, hasznos elméleti és gyakorlati tanácsaikkal segítették munkámat. Továbbá hálával tartozom hallgatóimnak is, akik tanulmányaik ezen szakaszában tekintettel voltak fokozatszerzési törekvésemre. Megértésüknek köszönhetően több időt fordíthattam disszertációm elkészítésére.

Végül, de nem utolsó sorban, hálás köszönetemet fejezem ki Családomnak, Feleségemnek és legfőképpen Kisfiamnak végtelen türelmükért, megértésükért és támogatásukért.

## 10. IDÉZETT IRODALOM

- Ai, H. - Jones, S. A. - Lvov, M. Y. (2003): Biomedical applications of electrostatic layer-by-layer nano-assembly of polymers, enzymes, and nanoparticles, *Cell Biochemistry and Biophysics* 39. pp. 23-43.
- Alessio, S. - Taricco, C. - Rubineti, S. - Vivaldo, G. - Mancuso, S. (2014): Temperature and precipitation in Northeast China during the last 150 years: relationship to large-scale climatic variability, *Annales Geophysicae* 32. pp. 749-760.
- Almog, I.F. - Bradley, M.S. - Bulovic, V. (2011): The Lorentz oscillator and its applications, Massachusetts Institute of Technology
- Ali, R. - Bakar, W. A. W. A. - Tech, L.K. (2010): Zn/ZnO/TiO<sub>2</sub> and Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> photocatalysts for the degradation of cypermethrin, *Modern Applied Science* 4 (1): 59-67.
- ASHRAE (1967): Handbook of Fundamentals McGraw-Hill, New York
- ASHRAE (1972): Handbook of Fundamentals ASHRAE, New York
- Bálint, S. (1954): Épületek szakipari munkái pp. 10-43. Kiadó: Építésügyi kiadó, Budapest
- Bánhidi, L. - Kajtár, L. (2000): Komfortelmélet pp. 25-31; 353-388 Kiadó: BME szolgáltató Kft, Budapest
- Bencsik, B. - Kovacs, Zs. - Denes, L. (2011): Performance characteristics of windows in the course of their service life; 2nd International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies, 21 – 22 November 2011, Budapest, Hungary Obuda University
- 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. *Energy Buildings*, 36. pp. 543-555
- Carosio, F. - Laufer, G. - Alongi, J. - Camno, G. - Grunlan, J. C. (2011): Layer-by-layer assembly of silica-based flame retardant thin film on PET fabric, *Polymer Degradation and Stability* 96. pp. 745-750.
- Chen, J-Q. - Wang, D. - Zhu, M-X. - Gao, C-J. (2006): Study on degradation of methyl orange using pelagite as photocatalyst, *Journal of Hazardous Materials B138*: 182-186.
- Chen, W. - McCarthy, T. J. (1997): Layer-by-layer deposition: A tool fo polymer surface modification, *Macromolecules* 30. pp. 78-86.
- Connolly, M. (2010): Surface Energy - Its Relation to Contact Angle Analysis and Its Importance to your Business, <http://www.astp.com/archives/1138>
- Csóka, L. - Bozanic, D. - Nagy, V. - Dimitrijevic-Brankovic, S. - Luyt, A. S. - Grozdits, G. - Djokovic, V. (2012): Viscoelastic properties and antimicrobial activity of cellulose fiber sheets impregnated with Ag nanoparticles, *Carbohydrate Polymers* 90. pp. 1139-1146.
- D'Elia, S. - Scaramuzza, N. - Ciuchi, F. - Versace, C. - Strangi, G. – Bartolino, R. (2009): Ellipsometry investigation of the effects of annealing temperature on the optical properties of indium tin oxide thin films studied by Drude-Lorentz model. *Applied Surface Science* 255. pp. 7203-7211



- Debreczy, Z. (2010): Passzívházak tervezésének alapjai. Kiadó: Passzívház Akadémia Kft. Budapest. pp. 49-56.
- Decher, G. - Hong, J. D. (1991): Buildup of ultra-thin multilayer films by a selfassembly process: II. Consecutive Adsorption of Anionic and Cationic Bipolar Amphiphiles and Polyelectrolytes on Charged Surfaces. *Berichte Der Bunsengesellschaft Fur Physikalische Chemie*, 95. pp. 1430–1434.
- EAG Central Europe 2008 Termékismertető
- Edward D. P. (1997) Handbook of optical constants of solids. Academic Press 525 B Street, Suite 1900, San Diego, CA 92101-4495, USA 1300 Boylston Street, Chestnut Hill, MA 02167, USA
- Elek, L. - Kovács, Zs. - Dénes, L. (2010): Wood windows in the 21<sup>st</sup> 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
- Elek, L. - Kovács, Zs. (2012): Comparison of alternative calculation methods of thermal performance of windows; International Joint Conference on Environmental and Light Industry Technologies; 21 - 22 November 2012; Budapest, Hungary, Óbuda University
- Elek, L. 2011 Ablakszerkezetek hőátbocsátási tényezőjének meghatározása a hőhídatások figyelembevételével. *Faipar* 59(1). pp. 5-11. NymE-FMK, Sopron.
- Emery, A.F. - Kippenhan, C.J. (2006): A long term study of residential home heating consumption and the effect of occupant behavior on homes in the Pacific Northwest constructed according to improved thermal standards, *Energy*, pp. 677-693.
- Eshaghi, A. - Aghaei, A.A. - Zabolian, H. - Jannesari, M. - Firoozi Far, A. (2013): Transparent superhydrophilic SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> tri-layer nanostructured antifogging thin film, *Ceramics - Silikáty* 57(3). pp. 210-214.
- Eshagi, A. - Eshagi A. (2012): Investigation of superhydrophilic mechanism of titania nano layer thin film – silica and indium oxide dopant effect, *Bull. Mater. Sci.*, 35 (2). pp. 137-142.
- Fabi, V. - Andersen, R. V. - Corgnati, S. - Olesen, B. W. (2012): Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models, *Building and Environment*, December 2012, 58. pp. 188-198
- Fang, V. - Futter, J. - Kennedy, J. - Manning, J. (2013): A review of near infrared reflectance properties of metal oxide nanostructures, *GNS Science Report 2013/39*, Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited. pp. 1-26.
- Fang, Y. - Philip, C.E., - Trevor, J.H., - Norton, B. (2005): Complex multimaterial insulating frames for windows with evacuated glazing Received 5 December 2003; received in revised form 8 October 2004; accepted *Solar Energy* 79. pp. 245-261
- Fekete, I. (1985): *Épületfizika kézikönyv*. pp. 91-110, 394-447. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- Fodor, T. - Orbán, F. - Sajtos, I. - Bárczi, I. (2005): *Mechanika Végeselem-módszer Elmélet és alkalmazás Szaktudás Kiadó Ház Budapest*

- Frecskay, J. (1883): Épületasztalosság pp. 32-65. Kiadó: Athenaeum r. társulat könyvnyomdája, Budapest
- Gábor, L. - Zöld, A. (1981): Energiagazdálkodás az építészetben Akadémia Kiadó
- Ghosh, S. K. (2006): Functional coatings and microencapsulation: A general perspective, Chapter 1, Functional Coatings. Wiley-VCH V. GmbH&Co., Weinheim, 1-28.
- Gustavsen, A. - Brent T. G. - Dariush, A. (2001): Three-Dimensional Conjugate CFD Simulations of Internal Window Frame Cavities Validated Using IR Thermography Reprinted by permission from Ashrae Transactions Vol. 107, Part 2. pp. 538-549. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Haimi, E. - Lipsonen, H. - Larismaa, J. - Kapulainen, M. - Krzak-Ros, J. - Hannula S.P. (2011): Optical and structural properties of nanocrystalline anatase (TiO<sub>2</sub>) thin films prepared by non-aqueous sol-gel dip-coating Thin Solid Films 519. (18) pp. 5882-5886
- Han, J. T. - Zheng, Y. - Cho, J. H. - Xu, X. - Cho, K. (2005): Stable superhydrophobic organic-inorganic hybrid films by electrostatic self-assembly, J. Phys. Chem. B 109. pp. 20773-20778.
- Hankó, V. (1902): Házi kincstár, sok száz titkos szer pp. 1-2. Wodianer F. és Fiai könyvnyomdája Budapest
- Hantos, Z. (2008): Fa bordaváz, könnyűszerkezetes építési rendszer hő-és páratechnikai optimalizálása. NymE, Sopron.
- Hasan, M.M. - Haseeb, A.S.M.A. - Masjuki, H.H. - Saidur, R. (2010): Influence of Substrate Temperatures on Structural, Morphological and Optical Properties of RF-Sputtered anatase TiO<sub>2</sub> Films. The Arabian Journal for Science and Engineering 148 147. I.
- Hessinger, J. (2010): User comfort through sound insulation and adequate air quality. International Rosenheim Window & Facade Conference 2010. Rosenheim 7-8. October 2010, Németország.
- Horváth, J. (1951): Épületasztalosipari szakmai ismeretek pp. 257-291. Kiadó: Tankönyvkiadó, Budapest
- Hostetler, J.L. - Stewart, D. - Daitch, C.E. - Ashley, C.S. - Norris, P.M. (1998): Optical polarized reflectance characterization of thin aerogel and xerogel films. Journal of Non-Crystalline Solids 225. pp. 19-23.
- Huang, S. - Wang, Z. - Xu, J. - Wang, L. - Lu, D. - Yuan, T. (2009): Simulation of spectra and determination of the optical constants of nline low-emission glass visible to mid-infrared region, Thin Solid Films 517. pp. 2963-2967.
- Humm, O. (2000): Alacsony energiájú épületek tervezése és normái Dialog Campus Kiadó, Budapest
- Hurst, H. E. - Black, R.P. - Simaika, Y.M. (1965): Long-Term Storage: An Experimental Study. Constable, London
- Informationdienst Holz (2000): Holzbau und die Energieeinsparverordnung 2000 December
- Johnson, T. E. (1991): Low-E Glazing Design Guide, Butterworth Architecture. USA p. 26. pp. 30-59

- Jung, J. - Bork, J. - Holmgaard, T. - Kortbek, N.A. (2004): Ellipsometry. Aalborg University, Institute of Physics and Nanotechnology, pp. 1-138.
- 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 Polytechnica Ser. Mech. Eng.* Vol. 44, No.2, pp. 265-274
- Kars, S.S. - Cetin, B. - Kinaci, B. - Sarikavak, A. - Bengi, H. - Altuntas, M.K. - Öztürk, S. *Özcelik, Surface and Interface Analysis* 42 (2010): Influence of thermal annealing on structure and optical properties of d.c. magnetron sputtered titanium dioxide thin films, *Surface and Interface Analysis* 42. (6-7) pp. 1247-1251.
- Kekkonen, V. - Hakola, A. - Kajava, T. - Shramo, E. - Malm, J. - Karppinen, M. - Ras, R. - H. A. (2010): Self-erasing and rewritable wettability patterns of ZnO thin films, *Applied Physical Letters* 97.
- Khranovsky, V. - Ekbal, T. - Yakimova, R. - Hultman, L. (2013): Surface morphology effects on the light-controlled wettability of ZnO nanostructures, *Applied Surface Science* 258 (20). pp. 8146-8152.
- Kószó, J. (1988): *Ablakok Műszaki Könyvkiadó Budapest*
- Kószó, J. (1995): *Ablak a házon. Dunakanyar 2000 Kiadó Budapest*
- Kovács, Zs. (2002): *Faipari kézikönyv II.* pp. 245-290. Kiadó: Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron.
- Kovács, Zs. (2003): A nyílászárók épületfizikai és szilárdsági jellemzőiről. *Magyar Építéstechnika, Az Építési Vállalkozók Országos Szövetségének lapja* 2003/11-12
- Kovács, Zs. (2012): *Numerikus módszerek a terméktervezésben, végeselem módszer, előadásanyag, Sopron*
- Kun, R. (2006): *Reaktív nanorészecskéket tartalmazó réteges szerkezetek és ultravékony filmek fotokatalitikus tulajdonságai, doktori értekezés, Szegedi Tudományegyetem, Kolloidkémiai Tanszék.*
- Lana, X. - Burgueño, A. - Serra, C. - Martínez, M. D. (2014): Fractal structure and predictive strategy of the daily extreme temperature residuals at Fabra Observatory (NE Spain, years 1917–2005), *Theoretical and Applied Climatology*
- Laufer, G. - Kirkland, C. - Morgan, A.B. - Grunlan, J. C. (2012b): Intumescent multilayer nanocoating, made with renewable polyelectrolytes, for flame-retardant cotton, *Biomacromolecules* 13. pp. 2843-2848.
- Li, Y. - Wang, X. - Sun, J. (2012): Layer-by-layer assembly for rapid fabrication of thick polymeric films, *Chem. Soc. Rev.* 41. pp. 5998-6009.
- Liu, D. - Niu, D. - Wang, H. - Fan, L. (2013): Short-term wind speed forecasting using wavelet transform and support vector machines optimized by genetic algorithm, *Renewable Energy* 62. pp. 592-597.
- Liu, X. - Zhou, L. - Liu, F. - Ji, M. - Tang, W. - Pang, M. - Sun, J. (2010): Exponential growth of layer-by-layer assembled coatings with well-dispersed ultrafine nanofillers: a facile route to scratch-resistant and transparent hybrid coatings, *Journ. Mater. Chem.* 20. pp. 7721-7727.

- Liu, Y. - Claus R. O. - Rosidian, A. - Zeng, T. (1999): A new route to prepare hard and anti-scratching coatings at room temperatures, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 576: 213-219.
- Lósy-Schmidt, E. - Baráth, B. (1928): *Technikai lexikon* pp. 1-4. oldal Kiadó: Győző Andor, Budapest
- Lőrinczi, Zs. (2005): *Ablakok* pp. 7-52. 6Bt Könyvkiadó, Budapest
- Lvov, Y. - Ariga, K. - Ichinose, I. - Kunitake, T. (1996): Molecular film assembly via layer-by-layer adsorption of oppositely charged molecules (linear polymer, protein and clay) and concanavalin A and glycogene, *Thin Solid Films* pp. 284-285: 797-801.
- Lvov, Y. - Ariga, K. - Onda, M. - Ichinose, I. - Kunitake, T. (1997): Alternate Assembly of Ordered Multilayers of SiO<sub>2</sub> and Other Nanoparticles and Polyions, *Langmuir* 13(23). pp. 6195-6203.
- Magyar, Z. - Ambrus, Cs. (2011): Sugárzási hőmérséklet aszimmetria vizsgálata termikus műemberrel. *Magyar Épületgépészet*, LX. évfolyam 6. szám
- Maier, T. - Krzaczek, M. - Tejchman, J. (2009): Comparison of physical performances of the ventilation systems in low-energy residential houses. *EnergBuild* 41:337e53
- Martin, H.C. - Carey, G.F. (1976): *Bevezetés a végeelem analízisbe*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- Matthias, A. - Raićević, N. - Tchana, R.D. - Kip, D. - Deubener J. (2014): Density dependence of refractive index of nanoparticle-derived titania films on glass. *Thin Solid Films* 558. pp. 86-92
- Myint, M. T. Z. - Kitsomboonloha, R. - Baruah, S. - Dutta, J. (2011): Superhydrophobic surfaces selected zink oxide microrod growth on ink-jetted patterns *Journal of Colloid and Interface Science* 354. pp. 810-815.
- Orbán, J. (2013): Műemléki épülethomlokzatok öntisztulása és hőszigetelés nanotechnológiás festékbevonatokkal, ÉTE Építésmenedzsment és Technológia Konferencia 2013.09.24
- Pásztor, E. (2001): *Nyílászáró szerkezetek* Kiadó: Szent István Egyetem - Ybl Miklós Műszaki Főiskolai Kar, Épített Környezet Tanszék
- Pásztory, Z. (2007): Hőszigetelés fejlesztési lehetőségek könnyűszerkezetes faházak számára. NymE, Sopron.
- Patel, P. - Coi, C. K. - Meng, D. D. (2010): Superhydrophobic surfaces for anti fogging and antifouling microfluidic devices, *Innovation Brief* 12. pp. 114-119.
- Paul, M. (1984): *Hőszigetelés és kondenzáció* Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- Parmar, K. S. - Bhardwaj, R. (2013): Water quality index and fractal dimension analysis of water parameters, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 10. pp. 151–164.
- Pintér, J. (2006): *Üveg külső térelhatárolók az épületenergetikában*, doktori értekezés, Szent István Egyetem
- Pintér, J. (2009): *Üveg külső térelhatárolók az épületenergetikában*, Doktori értekezés Gödöllő
- Prohászka, R. (2007): Az épületenergetika helyzete hazánkban. in: *Magyar Építéstechnika Az Építési Vállalkozók Országos Szövetségének lapja XLV/6 – 2007/6*

- Quan, H.C. (2008): Study of photo-catalytic enamels with TiO<sub>2</sub> film, XXI International Enamellers Congress, 18-22 May, Shanghai - China, Proceeding of Conferenc
- Rohles, F.H. (1983): New directions in comfort research ASHRAE Trans. p. 89, pp. 634-646
- Rosidian, A. - Lui, Y. - Claus, R.O. (1998): Ionic self-assembly of ultrathin ZrO<sub>2</sub>/polymer nanocomposite thin films, *Advanced Materials* 10(4). pp. 1087-1091.
- Rubin, M. (1982): Calculating heat transfer through windows *Energy Research*, Vol. 6. pp. 341-349
- Shchukin, D. G. - Zheludkevics, M. - Yasakau, K. - Lamaka, S. - Ferreira, M. G. S. - Möhwald, H. (2006): Layer-by-layer assembled nanoconationers for self-healing corrosion protection, *Adv. Mater.* 18. pp. 1672-1678.
- Sieberath, U. (2010): Green Windows - More Than Just Energy-Efficient, International Rosenheim Window & Facade Conference 2010. Rosenheim 7-8. October 2010, Németország
- Sobó, J. (1899): Erdészeti építéstan Kiadó: Joerges Ágost özv. és fia könyvnyomója pp. 80-102. oldal
- Sommer, A.-W. (2010): Passzívházak Alföldi Nyomda Zrt., Debrecen
- Specht, K. (2010): Where is energy optimisation heading? New designs, materials, provision in priEN 10077 and dispensations regarding documentary evidence. International Rosenheim Window & Facade Conference 2010. Rosenheim 7-8. October 2010, Németország.
- Suryanarayana, Ch. - Sudheerb, Ch. - Mahammoodc, V. - Panigrahid, B. K. (2014): An integrated wavelet-support vector machine for groundwater level prediction in Visakhapatnam, India, *Neurocomputing*, 145. pp. 324-335.
- Szabó, Gy. (1982): Ablakszerkezetek energetikai méretezése. Építésügyi Tájékoztatási Központ, Budapest.
- Szell, M. (2001): Transzparens épületszerkezetek. Szerényi és Gázsó Bt., Pécs.
- Szakra, Cs. (2008): Hőszugárzás, hővédő fóliák előadás anyag BME
- Tang, C.W. (2013): Study of photocatalytic degradation of methyl orange on different morphologies of ZnO catalyst, *Modern Research in Catalysis* 2. pp.19-24.
- Thomas, K. (2006): Az energiatakarékos építkezés kézikönyve Z-Press Kiadó Kft, Miskolc
- 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. pp. 687-695.
- Várfalvi, J. (2006): Kellemes hőérzet és energiamegtakarítás korszerű üvegszerkezetekkel *Magyar Épületgépészet*, LV. évfolyam, 2. szám
- Viitala, R.I. - Langlet, M. - Simola, J. - Linden, M. - Rosenholm J.B. (2000): Aerosol-gel deposition of doped titania thin films. *Thin Solid Films* 368. pp. 35-40.
- Wang, B. - Takigiwa, T. - Yamasaky, 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

- Wang, C. - Zhao, J. - Wang, X. - Mai, B. - Sheng, H. - Peng, P. - Fu, J. (2002): Preparation, characterization and photocatalytic activity of nano-sized ZnO/SnO<sub>2</sub> coupled photocatalysts, *App. Catal., B. Environ.* 39. pp. 247-255.
- WINDOW 6 / THERM 6, Research Version User Manual For Analyzing Window Thermal Performance, Windows & Daylighting Group, Building Technologies Program, Environmental Energy Technologies Department Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, CA 94720 USA, 2006.
- Wright, J.L. (1998): A Simplified Numerical Method for Assessing the Condensation Resistance of Windows *Ashrae Transactions*, Vol. 104. Pt. 1. pp. 1222-1229
- Wright, J.L. - McGowan, A.G. (2003): A Comparison of Calculated and Measured Indoor side Window Temperature Profiles *Ashrae Transactions*, Vol. 109. Pt. 2. pp. 857-870
- Wright, J.L. - Sullivan, H.F. (1994): A two-dimensional numerical model for natural convection in a vertical rectangular window cavity *Ashrae Transactions*, Vol. 100. Pt. 2. pp. 1193-1206
- Wright, J.L. - Sullivan H.F. (1995): A two-dimensional numerical model for glazing system thermal analysis *Ashrae Transactions: Symposia*, Vol 101. Pt. 1. pp. 819-831
- Wronkowska A.A. - Czerniak, G. - Wronkowski, A. - Skowron'ski, Ł. (2013): Optical and microstructural characterisation of Au-Sn and Cu-Sn diffusive layers. *Applied Surface Science* 281. pp. 30-37
- Xue, W. - Cui, T. (2007): Characterization of layer-by-layer self-assembled carbon nanotube multilayer thin films, *Nanotechnology* 18: 1-7.
- Yamaguchi, Y. - Yamazaki, M. - Yoshihara, S. - Shirakash, T. (1997): Photocatalytic ZnO films prepared by anodizing, *Journal of Electroanal. Chem.* 422. pp. 1-3.
- Yang, J. - Swisher, J. H. (1996): The phase separation of Zn<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, *Material Characterization*. 37. pp. 153-159.
- Yang, J. S. - Lee, S. G. - Park, Se-G. - Lee, El-H. - Beom-Hoan O. (2009): Drude Model for the Optical Properties of a Nano-Scale Thin Metal Film Revisited. *Journal of the Korean Physical Society*. 55. pp. 2552-2555.
- Yannis, M. - Demetris, K. (2013): Climatic Variability Over Time Scales Spanning Nine Orders of Magnitude: Connecting Milankovitch Cycles with Hurst-Kolmogorov Dynamics, *Surveys in Geophysics*, 34. pp. 181-207.
- Yao, L. - Zheng, M. - Li, C. - Ma, L. - Shen, W. (2012): Facile synthesis of superhydrophobic surface of ZnO nanoflakes: chemical coating and UV-induced wettability conversion, *Nanoscale Research Letters* 216(7). pp. 1-8.
- Yu, J-G. - Zhao, X-J. (2000): Hydrophilicity and photocatalytic activity of self-cleaning porous TiO<sub>2</sub> thin films on glass, *Gaodeng Xuexiao Huaxue Xuebao* 21(9) pp. 1437-40.
- Zhou, S. - Wu, L. - You, B. - Gu, G. (2009): Preparation, structure and properties of organic-inorganic nanocomposite coatings, *Chapet 10 Smart Coatings II*, ACS Symposium Series; American Chemical Society; Washington, DC

Zlotnikov, I. - Gotman, I. - Gutmanas, E.Y. (2008): Characterization and nanoindentation testing of thin ZrO<sub>2</sub> films synthesized using layer-by-layer (LbL) deposited organic templates, Applied Surface Science 235. pp. 3447-3453.

Zöld, A. (1999): Energiatudatos építészet Műszaki Könyvkiadó, Budapest

Zöld, A. (2006): Az új épületenergetikai szabályozás, Terc Kiadó Pécsvárad pp. 31, 48-49, 60, 185

### **Hivatkozott rendeletek, szabványok**

40/2012. (VIII.13.) BM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról. in: Magyar Közlöny 2012/107. Magyar Hivatalos Közlönykiadó, Budapest. 2012.

7/2006. (V.24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról. in: Magyar Közlöny 2006/62. Magyar Hivatalos Közlönykiadó, Budapest. 2006.

91/2002/EK Épületek energiateljesítményéről szóló irányelv várható hatása az épületállomány energetikai tulajdonságainak javítására, megtakarítási lehetőségek, Budapest. 2002. december 16.

DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau

ISO 15099 -2003. Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations

EN ISO 10077-1:2000: Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: Simplified method

EN ISO 10077-2:2004: Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames

MSZ 9333:2011 Ablakok és külső bejárati ajtók alkalmazási előírásai

MSZ EN 14351:1-2006 Ablakok és ajtók. Termékszabvány, teljesítőképességi jellemzők

### **Internetes hivatkozások**

A dolgozat benyújtásakor (2014. május) minden hivatkozott oldal elérhető volt.

web 1: [http://energiaklub.hu/sites/default/files/negajoule2020\\_pdf.pdf](http://energiaklub.hu/sites/default/files/negajoule2020_pdf.pdf)

web 2: <http://www.zeroenergiahaz.hu/index.php?link=zero>

web 3: <http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0073398128/835451/Chapter16.pdf>

web 4: [http://www.isover.com/var/isover\\_com/storage/original/application/2fadb402555e3067637caf4502b3ead2.pdf](http://www.isover.com/var/isover_com/storage/original/application/2fadb402555e3067637caf4502b3ead2.pdf)

web 5: [http://www.anico-keszhazak.hu/energetikai\\_tanusitvany](http://www.anico-keszhazak.hu/energetikai_tanusitvany)

web 6: [http://www.julichglas.hu/hirek/45/az\\_uveg\\_tortenete](http://www.julichglas.hu/hirek/45/az_uveg_tortenete)

web 7: <http://angol.jasco.hu/termek-kategoriak/spektroszkopia/ftir-spektrometerek>

web 8: [http://www.rycobel.de/produkte\\_de,,778,detail.html?kategorie=863&sprache\\_kuerzel=de](http://www.rycobel.de/produkte_de,,778,detail.html?kategorie=863&sprache_kuerzel=de)

## 11. ÁBRA- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. ábra. A magyar lakóépületek megoszlása az építés éve és fűtési energiafelhasználása szerint [Forrás: web 1].....	9
2. ábra. Magyarország (bal oldal) és az Egyesült Államok (jobb oldal) lakosságának energiafelhasználása [Forrás: web 2, web 3] .....	10
3. ábra. Megvilágítás hatása az emberi teljesítményre és elfáradásra [Forrás: Bánhidi 2000] .....	13
4. ábra. Az ablak üvegezésének hőtechnikai fejlődése .....	15
5. ábra. A napsugárzás spektrális eloszlása [Forrás: Szikra 2008] .....	18
6. ábra. A napsugárzás spektrális eloszlása [Forrás: Szikra 2008] .....	18
7. ábra. A komfortérzet a felületi hőmérséklet függvényében (bal oldal), valamint a relatív páratartalom függvényében (jobb oldal) [Forrás: Sommer 2010] .....	20
8. ábra. Az üveg áteresztési tényezője a hullámhossz függvényében [Forrás: Szikra 2008] .....	21
9. ábra. Az üveg áteresztési tényezője a beesési szög függvényében, ahol a: elnyelőüvegre, b: 6 mm vastag normálüvegre, c:3 mm vastag normálüvegre vonatkozik [Forrás: Fekete 1985] .....	22
10. ábra. Transzparens test energiamérlege [Forrás: Fekete 1985] .....	22
11. ábra. Low-E fóliával ellátott üvegezés téli (bal oldal) és nyári (jobb oldal) hővédelme [Forrás: Szikra 2008] .....	24
12. ábra. Hőátbocsátási tényező az ablakkeret arányának (bal oldal), valamint a keret felület-arányának és a légréteg vastagságának (jobb oldal) függvényében [Forrás: Gábor és Zöld 1981] ...	25
13. ábra. A hagyományos és Low-E üveg jellemzőinek összehasonlítása [Forrás: Johnson 1991] ....	26
14. ábra. Egy hagyományos és két Low-E üveg transzmissziós görbéi [Forrás: Johnson 1991] .....	27
15. ábra. Gáztöltés jellemzői [Forrás: Johnson 1991] .....	27
16. ábra. Levegő és argon arányának hatása az üvegezés U-értékre [Forrás: Johnson 1991] .....	28
17. ábra. Dupla üvegezés U-értéke a légréteg vastagságának függvényében [Forrás: Johnson 1991] .....	29
18. ábra. U-érték változás az emisszivitás függvényében különböző üvegszerkezetek esetén [Forrás: Johnson 1991] .....	29
19. ábra. Kettős üvegezés hőátbocsátási tényezője az üvegtávolság-gáztöltés függvényében [Forrás: Elek et al. 2010] .....	30
20. ábra. Az $U_g$ -érték változása 3 üvegréteg és kripton gáztöltés esetén az üvegek távolságának függvényében [Forrás: Elek et al. 2010].....	30
21. ábra. A bemártásos LbL eljárás lépései [Li et al. 2012] .....	33
22. ábra. A szórásos LbL eljárás lépései [Li et al. 2012].....	33
23. ábra. Lorentz-féle oszcillációs modell .....	34
24. ábra. A vizsgált passzív ház ablak gyártótól kapott (bal oldal) és végeelemes elemzésre előkészített (jobb oldal) alsó metszete .....	45
25. ábra. Csatlakozó csomópontok helytelen (bal oldali) és helyes (jobb oldali) megadása.....	45
26. ábra. WINDOW 6-ban összeállított 3 rétegű üvegszerkezet a 90 mm-es profilvastagságú tömörfa és passzív ház ablakhoz .....	46
27. ábra. Vastag könnyűszerkezetes fal rétegrendje és az alkalmazott anyagok hővezetési értékei	48
28. ábra. Hőátbocsátás és hővezetés kapcsolata üveglappal .....	50
29. ábra. TESTO mérőeszközök elhelyezése a helyszíni mérés során .....	51
30. ábra. A vizsgált üvegszerkezet gyártó által megadott jellemzői.....	51
31. ábra. PAH (balra) és PSS (jobbra) .....	55
32. ábra. Tesla ultrahangos berendezések: rudas (bal oldal) és ultrahangos kád (jobb oldal).....	55
33. ábra. A felhordáshoz használt kompresszor és anyagok (bal oldal), szórás művelete (jobb oldal) .....	56



34. ábra. Az UV, VIS és az IR sugárzások hullámhossz tartományai .....	57
35. ábra. Beeső fény útja a vékonyfilmen és az üvegen keresztül .....	58
36. ábra. Spektrofotométer (bal oldal), ATR PRO450-S feltét (jobb oldal) [Forrás: web 7].....	58
37. ábra. PGX goniométer adhézió és nedvesíthetőség mérésére [Forrás: web 8] .....	59
38. ábra. A nedvesítés és a felület felületi energiájának összefüggése [Forrás: Connolly 2010] .....	59
39. ábra. Metilnarancs oldat felvitele az üveglapokra .....	60
40. ábra. Üveglapra felvitt metilnarancs oldat UV sugárzásnak kitéve .....	60
41. ábra. A hőátbocsátási tényező meghatározása infravörös sugárzóval az LbL bevonatos üveglapok esetén.....	61
42. ábra. A 68 mm-es profilvastagságú tömörfa ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet színtérképe (bal oldal) és fluxus (jobb oldal) színtérképe .....	68
43. ábra. A 90 mm-es profilvastagságú tömörfa ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet színtérképe (bal oldal) és fluxus (jobb oldal) színtérképe .....	69
44. ábra. A passzív ház ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet színtérképe (bal oldal) és fluxus (jobb oldal) színtérképe.....	69
45. ábra. 68 mm-es profilvastagságú ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet (bal oldal) és fluxus színtérképe (jobb oldal) vékony könnyűszerkezetes fal esetén.....	71
46. ábra. 90 mm-es profilvastagságú ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet (bal oldal) és fluxus színtérképe (jobb oldal) vékony könnyűszerkezetes fal esetén.....	72
47. ábra. Passzív ház ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet (bal oldal) és fluxus színtérképe (jobb oldal) vékony könnyűszerkezetes fal esetén .....	72
48. ábra. A kétrétegű üvegezésnél mért értékek az 1. nap esetén .....	74
49. ábra. A kétrétegű üvegezésnél mért értékek a 2. nap esetén .....	74
50. ábra. A kétrétegű üvegezésnél mért értékek a 3. nap esetén .....	75
51. ábra. Hurst kitevők a kétrétegű üvegezés esetén (1-3. nap) .....	76
52. ábra. Wavelet transzformáció eredménye kétrétegű üvegezés esetén (1. nap) .....	77
53. ábra. Wavelet transzformáció eredménye kétrétegű üvegezés esetén (2. nap) .....	78
54. ábra. Wavelet transzformáció eredménye kétrétegű üvegezés esetén (3. nap) .....	78
55. ábra. Wavelet transzformáció rekonstrukciós eredménye kétrétegű üvegezés esetén (1. nap) .....	78
56. ábra. Wavelet transzformáció rekonstrukciós eredménye kétrétegű üvegezés esetén (2. nap) .....	79
57. ábra. Wavelet transzformáció rekonstrukciós eredménye kétrétegű üvegezés esetén (3. nap) .....	79
58. ábra. A hőkezelés nélkül kapott UV- tartomány spektruma .....	80
59. ábra. Az első hőkezelés után kapott UV- tartomány spektruma.....	81
60. ábra. A második hőkezelés után kapott UV- tartomány spektruma .....	81
61. ábra. Átlagolt transzmittancia értékek az UV tartományon.....	82
62. ábra. A hőkezelés nélkül kapott VIS tartomány kinagyított spektruma .....	83
63. ábra. Az első hőkezelés után kapott VIS tartomány kinagyított spektruma.....	83
64. ábra. A második hőkezelés után kapott VIS tartomány kinagyított spektruma .....	84
65. ábra. Átlagolt transzmittancia értékek a VIS tartományon .....	84
66. ábra. A hőkezelés nélkül kapott NIR tartomány kinagyított spektruma.....	85
67. ábra. Az első hőkezelés után kapott NIR tartomány kinagyított spektruma .....	85
68. ábra. A második hőkezelés után kapott NIR tartomány kinagyított spektruma.....	86
69. ábra. Átlagolt transzmittancia értékek a NIR tartományon .....	86
70. ábra. A peremszög változása a bevonatok, illetve az első hőkezelés hatására .....	87
71. ábra. A felületi energia változása a hőkezelés hatására.....	89
72. ábra. A peremszög időbeli változása a második hőkezelést követően.....	89
73. ábra. Elszintelenedett metilnarancs oldat .....	90
74. ábra. U-értékek az első hőkezelést követően .....	92

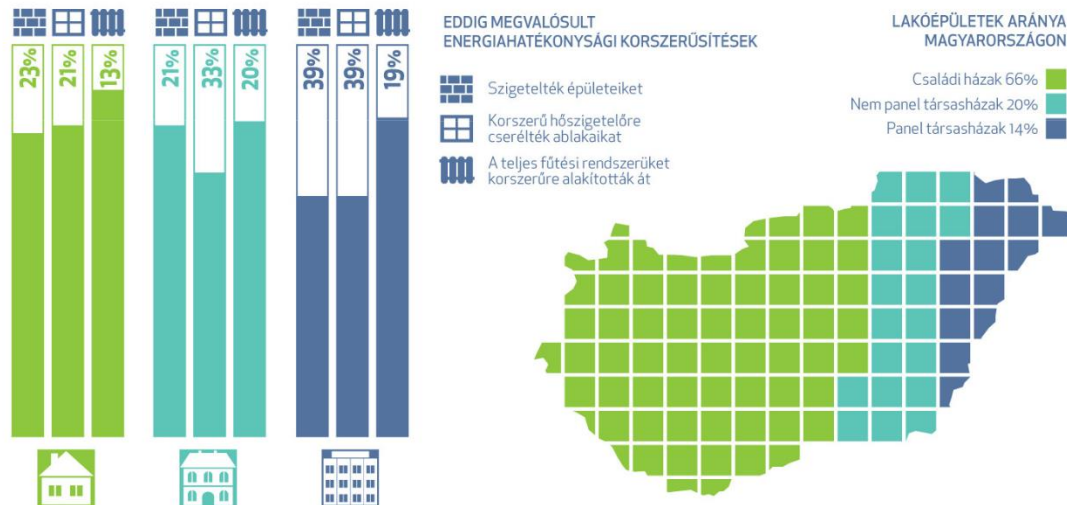
75. ábra. U-értékek a második hőkezelést követően .....	92
76. ábra. U-értékek az első, illetve második hőkezelést követően.....	93
77. ábra. A csillapítási tényező változása .....	95
78. ábra. A fénytörési és abszorpciós mutató változásai (szaggatott vonal: fénytörési mutató; folytonos vonal: abszorpciós mutató).....	95
79. ábra. A Drude-Lorentz-féle komplex modell értékek és mért transzmittancia értékek változása a különböző hullámhossz tartományokban .....	96
80. ábra. A modellezett transzmittancia és reflexió értékek SiO <sub>2</sub> nanoréteg esetében.....	97
81. ábra. A fénytörési és abszorpciós mutató változásai TiO <sub>2</sub> esetében.....	97
82. ábra. A reflexió változása ZnO esetén a hullámhossz függvényében .....	98
1. táblázat. A float üveg fizikai jellemzői a vastagság függvényében [Forrás: EAG 2008] .....	23
2. táblázat. Hőátbocsátási tényező az ablakkeret vastagságának függvényében [Forrás: Zöld 2006] .....	25
3. táblázat. Peremfeltételek az EN ISO 10077:1 és EN ISO 10077:2 szerint.....	47
4. táblázat. Alkalmazott nanorészecskék és tulajdonságaik.....	54
5. táblázat. Alkalmazott polielektrolitok és tulajdonságaik.....	54
6. táblázat. Az LbL multirétegek összetételei .....	57
7. táblázat. A belső üvegfelületen mért 13 °C-os és 14 °C-os izotermák szárnyperemtől mért távolsága.....	68
8. táblázat. Ablakok THERM szimulációs vizsgálatinak eredményei.....	70
9. táblázat. THERM szimulációs vizsgálatok eredményei falazatba illesztés után .....	73
10. táblázat. A felületre cseppentett metilnarancs oldat elszíntelenedésének ideje .....	90

## 12. MELLÉKLETEK

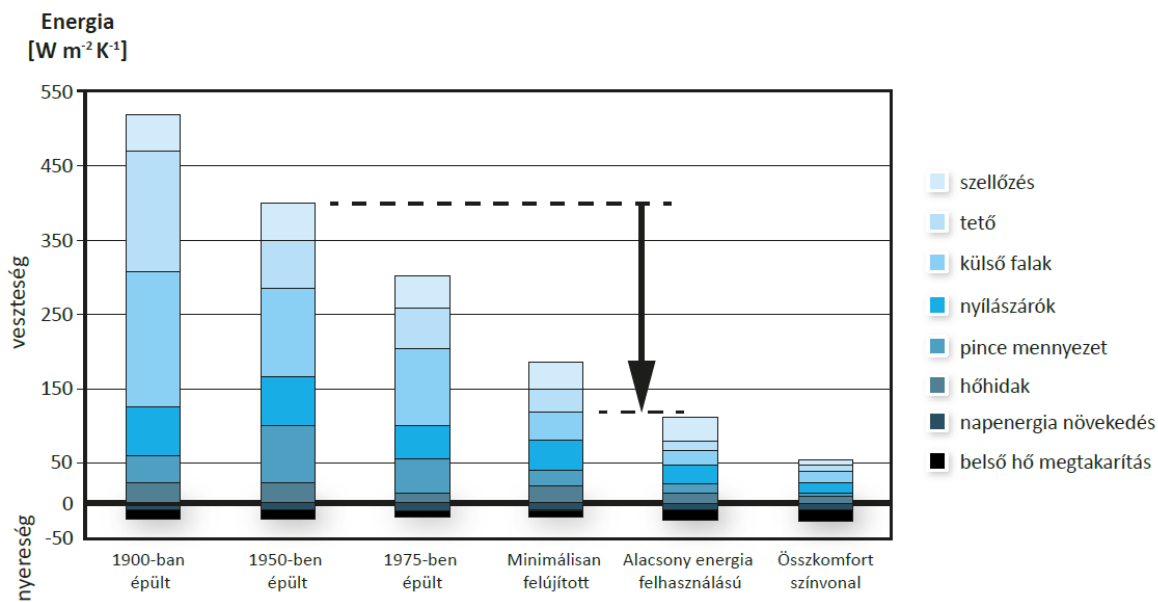
## 12.1 Melléklet: Kiegészítő ábrák a bevezetőben leírtakhoz



Magyarország energiamegtakarítási potenciálja épülettípusonként és primerenergia felhasználásának szektoronkénti megoszlása [Forrás: web 1]



Energiahatékonysági korszerűsítések; épülettípusok aránya [Forrás: web 1]

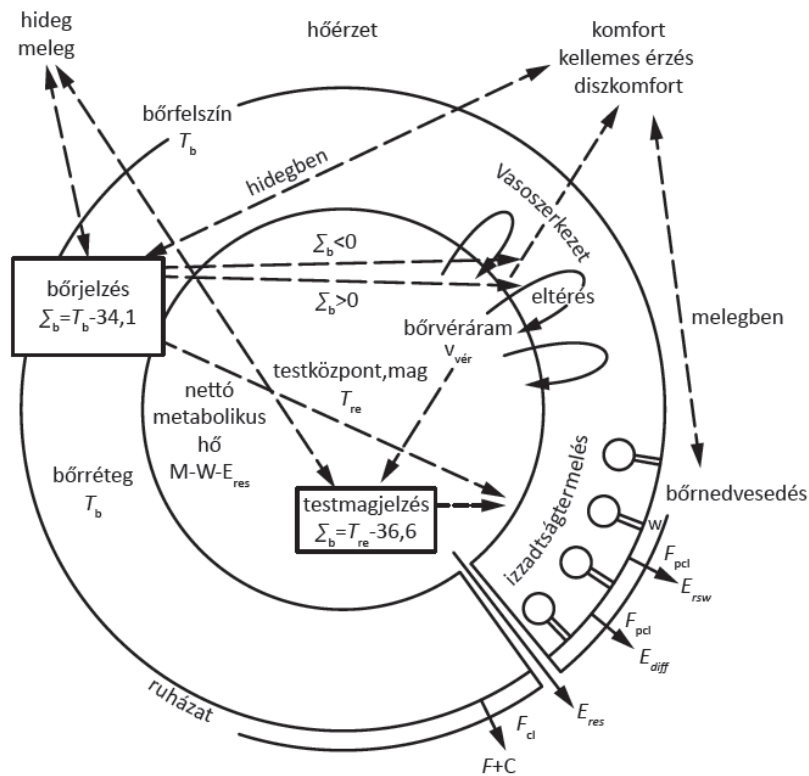


Energiahatékonysági korszerűsítések; épülettípusok aránya [Forrás: web 4]

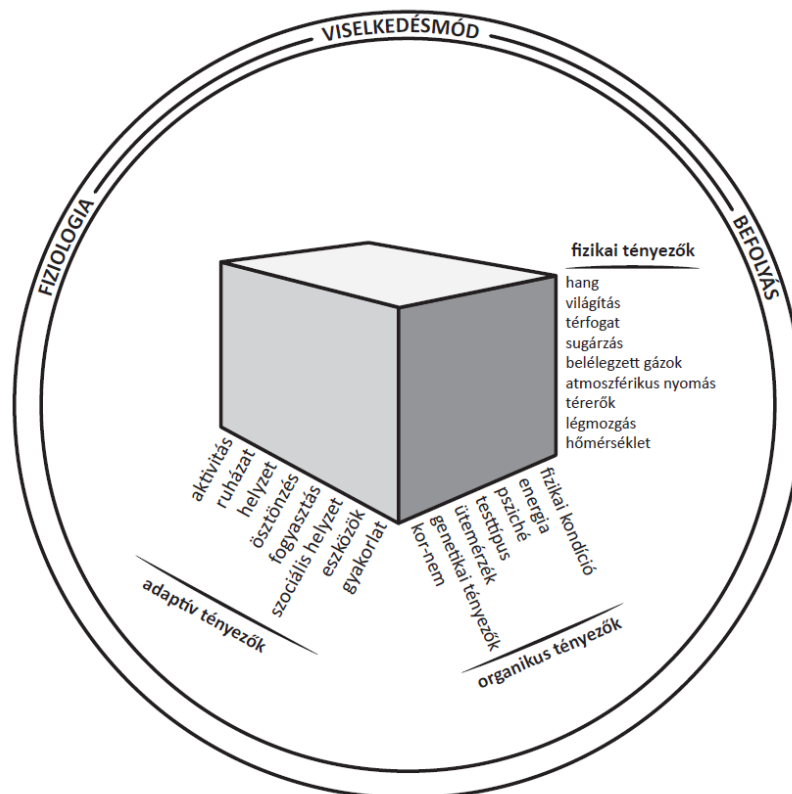


Épületek minősítése energetikai jellemző alapján [Forrás: web 5, Zöld 2006]

## 12.2 Melléklet: Általános modellsémák



„Héj” modell az ember és környezete között [Forrás: ASHRAE 1967, 1972]



Paramétermutatók háromdimenziós bemutatása [Forrás: Rohles 1983]

### 12.3 Melléklet: A passzívház előnyei a hagyományos építési módokhoz képest

- a fosszilis energiaforrásoktól való függetlenség,
- magasabb lakáskomfort a következők vonatkozásában
  - kismértékű hőmérséklet-ingadozás az épület belsejében,
  - a jó hőszigetelési szabványnak köszönhetően a nyári túlhevülés elleni védelem,
  - a nagyarányú déli üvegfelületek révén nagyfokú benapozás,
  - a szellőző rendszer miatt zárt ablakok révén nincs zajterhelés,
  - jobb egészség az alacsonyabb szobahőmérséklet miatt,
  - jobb komfortérzet a magasabb felületi hőmérséklet miatt,
  - nincsenek zavaró kazánok,
- nagyon jó levegőminőség, mivel
  - radiátorok hiányában nincs felkavaródó por,
  - a légszűrők miatt az allergiások nem küzdenek problémákkal,
  - a CO<sub>2</sub>- és a páratartalom vezérelhető,
  - nincs nyitott ablak okozta huzat,
  - a páratartalom szabályozása révén nem keletkezhet párakicsapódás vagy penész okozta kár,
- mind a tervezés, mind a kivitelezés kiváló minőségű, valamint
- az ingatlan értéke, amely az éghajlati helyzet miatt folyamatosan nő.





## 12.4 Melléklet: Kettős és hármás üvegezés ( $U_g$ ) hőátbocsátási tényezői, az EN ISO 10077-1: 2000 alapján

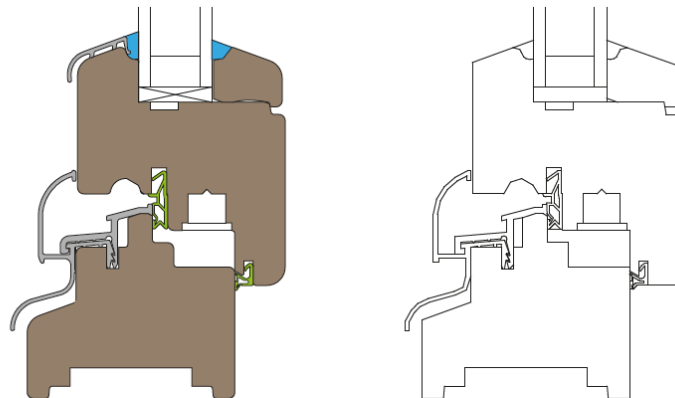
Típus	Üvegezés		Méretek	Gáztöltés (Gázkoncentráció $\geq 90\%$ )		
	Üveg	Emisszió		Levegő	Argon	Kripton
Kétrétegű üvegezés	Bevonat nélküli (normál üveg)	0,89	4-6-4	3,3	3,0	2,8
			4-9-4	3,0	2,8	2,6
			4-12-4	2,9	2,7	2,6
			4-15-4	2,7	2,6	2,6
			4-20-4	2,7	2,6	2,6
	Egy üveg bevont	$\leq 0,4$	4-6-4	2,9	2,6	2,2
			4-9-4	2,6	2,3	2,0
			4-12-4	2,4	2,1	2,0
			4-15-4	2,2	2,0	2,0
			4-20-4	2,2	2,0	2,0
	Egy üveg bevont	$\leq 0,2$	4-6-4	2,7	2,3	1,9
			4-9-4	2,3	2,0	1,6
			4-12-4	1,9	1,7	1,5
			4-15-4	1,8	1,6	1,6
			4-20-4	1,8	1,7	1,6
	Egy üveg bevont	$\leq 0,1$	4-6-4	2,6	2,2	1,7
			4-9-4	2,1	1,7	1,3
			4-12-4	1,8	1,5	1,3
			4-15-4	1,6	1,4	1,3
			4-20-4	1,6	1,4	1,3
Egy üveg bevont	$\leq 0,05$	4-6-4	2,5	2,1	1,5	
		4-9-4	2,0	1,6	1,3	
		4-12-4	1,7	1,3	1,1	
		4-15-4	1,5	1,2	1,1	
		4-20-4	1,5	1,2	1,2	
Háromrétegű üvegezés	Bevonat nélküli üveg	0,89	4-6-4-6-4	2,3	2,1	1,8
			4-9-4-9-4	2,0	1,9	1,7
			4-12-4-12-4	1,9	1,8	1,6
	2 üveg bevont	$\leq 0,4$	4-6-4-6-4	2,0	1,7	1,4
			4-9-4-9-4	1,7	1,5	1,2
			4-12-4-12-4	1,5	1,3	1,1
	2 üveg bevont	$\leq 0,2$	4-6-4-6-4	1,8	1,5	1,1
			4-9-4-9-4	1,4	1,2	0,9
			4-12-4-12-4	1,2	1,0	0,8
	2 üveg bevont	$\leq 0,1$	4-6-4-6-4	1,7	1,3	1,0
			4-9-4-9-4	1,3	1,0	0,8
			4-12-4-12-4	1,1	0,9	0,6
	2 üveg bevont	$\leq 0,4$	4-6-4-6-4	1,6	1,3	0,9
			4-9-4-9-4	1,2	0,9	0,7
			4-12-4-12-4	1,0	0,8	0,5







**12.5 Melléklet:** A vizsgált ablakok esetében a gyártótól kapott (bal oldal) és elemzésre előkészített (jobb oldal) metszetek, anyagjelölések

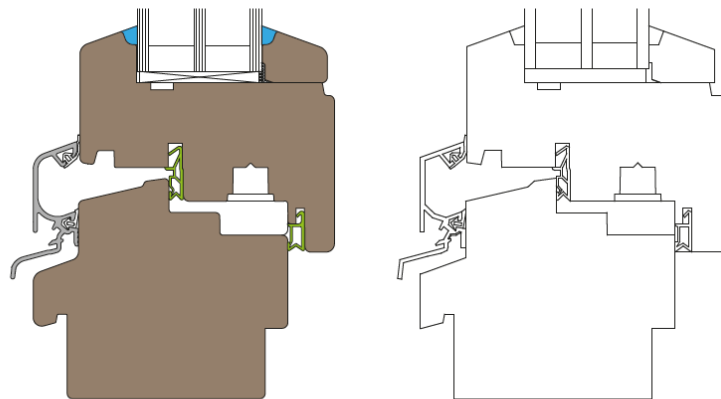
ANYAGOK ÉS HŐVEZETÉSI ÉRTÉKÜK

-  tömörfa - 0,1100 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  alumínium vízvető - 237 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  szilikon - 0,3500 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  tömítés - 0,1700 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>



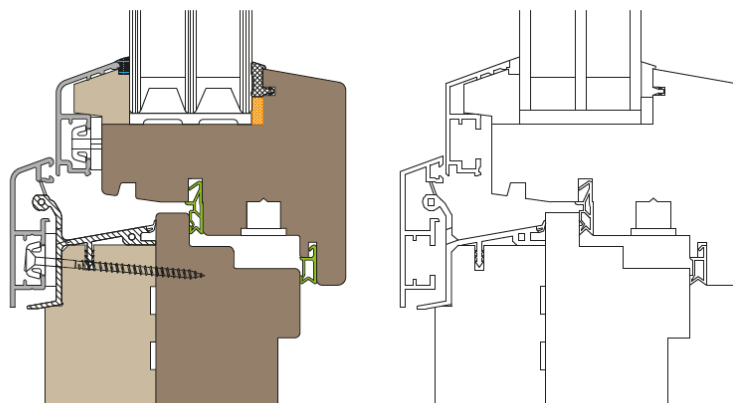
ANYAGOK ÉS HŐVEZETÉSI ÉRTÉKÜK

-  tömörfa - 0,1100 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  alumínium vízvető - 237 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  szilikon - 0,3500 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  tömítés - 0,1700 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>



ANYAGOK ÉS HŐVEZETÉSI ÉRTÉKÜK

-  tömörfa - 0,1100 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  EPS hab - 0,0300 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  alumínium vízvető - 237 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  szilikon - 0,3500 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  filc - 0,0500 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>
-  tömítés - 0,1700 W m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>



## 12.6 Melléklet: A WINDOW 6 programban összeállított 2 rétegű üvegszerkezet a 68 mm-es profilvastagságú tömörfa ablakhoz

Glazing System Library

ID #: 200 Name: 4\_16Ar\_4

# Layers: 2 Tilt: 90 ° IG Height: 1000.00 mm

Environmental Conditions: NFRC 100-2010 IG Width: 1000.00 mm

Comment:

Overall thickness: 24.000 mm Mode: #






	ID	Name	Mode	Thick	Flip	Tsol	Rsol1	Rsol2	Tvis	Rvis1	Rvis2	Tir	E1	E2	Cond
▼ Glass 1 ▶▶	7197	ip_fl_4.ipe	#	4.0	<input type="checkbox"/>	0.842	0.076	0.076	0.900	0.082	0.082	0.000	0.837	0.837	1.000
Gap 1 ▶▶	2	Argon		16.0	<input type="checkbox"/>										
▼ Glass 2 ▶▶	7110	ip_ip14E.ipe	#	4.0	<input type="checkbox"/>	0.588	0.312	0.246	0.889	0.048	0.055	0.000	0.037	0.837	1.000

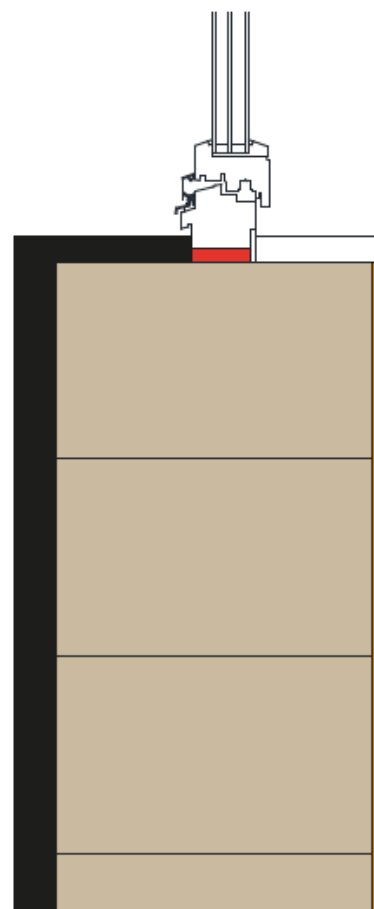
Center of Glass Results | Temperature Data | Optical Data | Angular Data | Color Properties

Ufactor	SC	SHGC	Rel. Ht. Gain	Tvis	Keff	Gap 1 Keff
W/m2-K			W/m2		W/m-K	W/m-K
1.419	0.679	0.591	437	0.803	0.0307	0.0307

## 12.7 Melléklet: Porotherm S téglafal rétegrendje és az alkalmazott anyagok hővezetési értékei

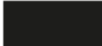





### RÉTEGREND / POROTHERM S TÉGLAFAL

-  perlitvakolat - 50 mm -  $0,1740 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
  -  porotherm 38 S téglafal - 380 mm -  $0,2070 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
  -  mészvakolat - 15 mm -  $0,8500 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Egyéb anyagok
-  tömörfa (ablak) -  $0,1100 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
  -  rögzítő hab -  $0,0240 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$





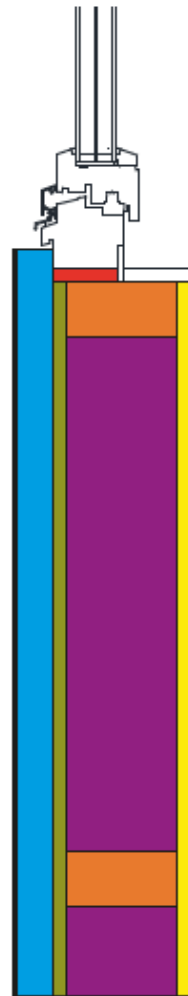
## 12.8 Melléklet: Vékony könnyűszerkezetes fal rétegrendje és az alkalmazott anyagok hővezetési értékei

### RÉTEGREND / VÉKONY KÖNNYŰSZERKEZETES FAL

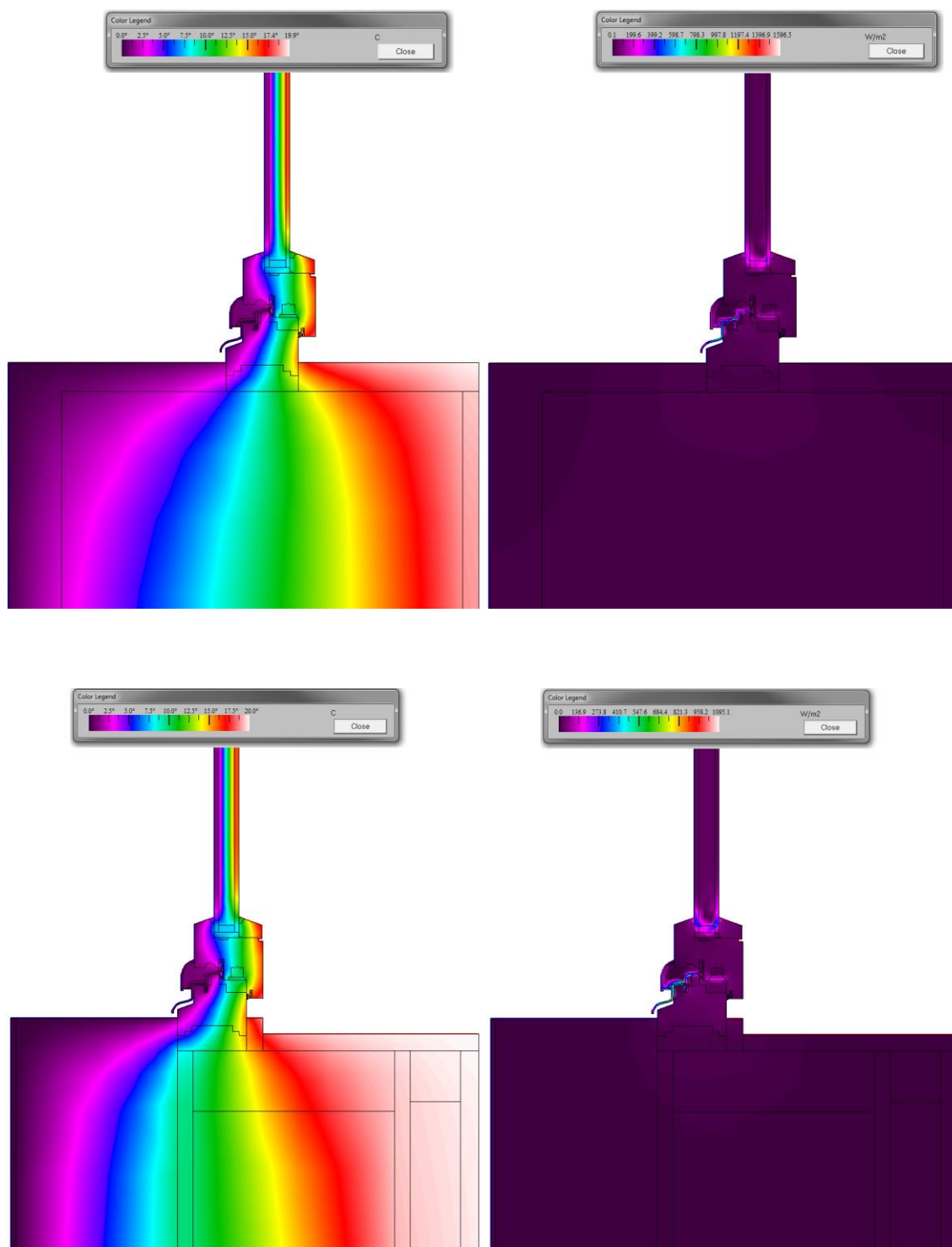
-  nemesvakolat rendszer - 5 mm -  $0,9900 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
-  polisztirol hőszigetelő tábla - 40 mm -  $0,0340 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
-  gipszrost lemez - 15 mm -  $0,3000 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
-  ásványgyapot szigetelés - 120 mm -  $0,0420 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
-  KVH bordaváz - 60/200 mm -  $0,1100 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
-  gipszkarton lemez - 18 mm -  $0,3000 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$

#### Egyéb anyagok

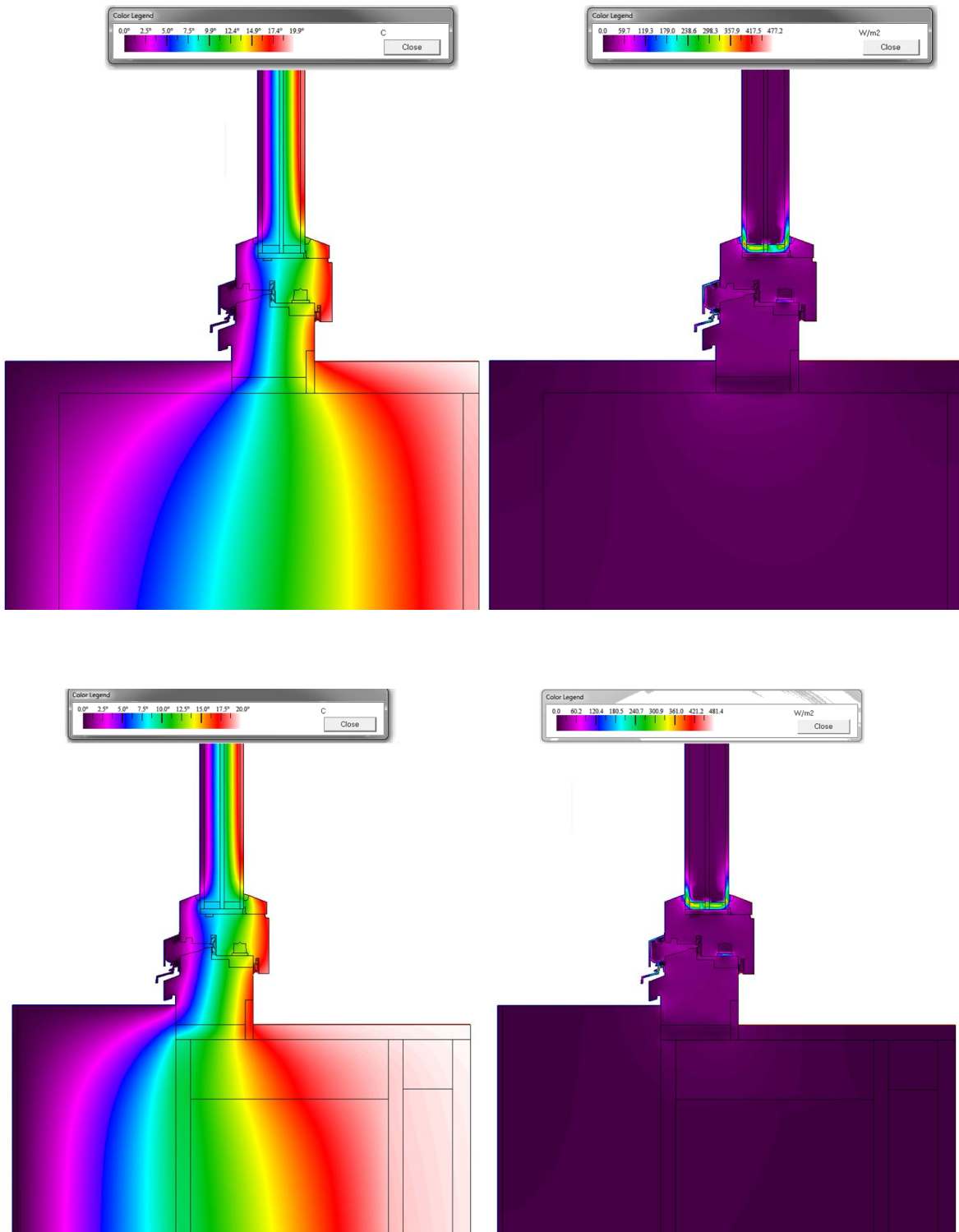
-  tömörfa (ablak) -  $0,1100 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
-  rögzítő hab -  $0,0240 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$



**12.9 Melléklet:** A 68 mm-es profilvastagságú ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet szintértképe (bal oldal) és fluxus szintértképe (jobb oldal) porotherm S téglafal, valamint vastag könnyűszerkezetes fal esetén



**12.10 Melléklet:** A 90 mm-es profilvastagságú ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet szintértképe (bal oldal) és fluxus szintértképe (jobb oldal) porotherm S téglafal, valamint vastag könnyűszerkezetes fal esetén



**12.11 Melléklet:** A passzív ház ablak függőleges alsó metszetének hőmérséklet szintértképe (bal oldal) és fluxus szintértképe (jobb oldal) porotherm S téglafal, valamint vastag könnyűszerkezetes fal esetén

