

HOMLOKZATKÉPZÉSEK PARAMETRIKUS TERVEZÉSE ÉS MODELLEZÉSE BIM ALAPOKON

BIM based parametric modelling of building enclosures

Fürtös Balázs¹ – Dr. Bakonyi Dániel² – Dr. Nagy Balázs¹

¹BME, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

²BME, Épületszerkezet-tani Tanszék

KULCSSZAVAK / Keywords

BIM, parametrikus tervezés, BEM / *BIM, parametric design, BEM*

ÖSSZEFOGLALÁS

Az épületek termikus burkának megtervezése az egyik legösszetettebb tervezői feladat, esztétikai és energetikai szempontok finom mérlegelésének eredményeként jöhet létre egy jól működő, szép, karbantartható homlokzat. A tervezés során figyelembe veendő paraméterek száma nagy, megváltoztatásuk jelentősen megváltoztathatja egy épületrészben a tapasztalt felhasználói komfortot. Annak elemzése, hogy az egyes épületfizikai tulajdonságok változtatása milyen hatással van a használókra, kézi módszerekkel nehezen elvégezhető feladat. Az építési termékek, építőanyagok szintjén definiált bemeneti adatok rögzítésére elterjedt módszer azok épületinformációs modellben (BIM) tárolása. A tervezésben egyre nagyobb teret nyerő parametrikus, vagy algoritmikus tervezés nem csak formai szabadságot adhat, de a homlokzattervezéshez hasonlóan komplex műszaki feladatok megoldásterének feltérképezésére is kitűnő eszköznek bizonyult. Elemzésünk parametrizált egyszónás energetikai modellben vizsgálta egy déli tájolású könyvtártérben a belső komfortparaméterek és azok biztosításához szükséges energiafelhasználás alakulását.

SUMMARY

Designing building enclosures is one of the most complex tasks that a designer could face: a beautiful, easy to maintain facade is a result of the fine balance between aesthetics- and energy-related aspects. The huge number of parameters that need to be tamed can easily influence the thermal- and visual comfort experienced by the users of the building. Exploring these effects is hard to do with manual methods. BIM is a conventional method to store this much information related to buildings. Using parametric tools cannot only offer formal freedom, but they are useful to solve complicated, multidimensional engineering tasks such as facade design. Our research explored the thermal-, visual comfort-, and energy-related metrics in a parametric single-zone energy model of a south facing library.

BEVEZETÉS

Tervezőként gyakran kerülünk olyan helyzetbe, amikor objektív és szubjektív szempontok szerint is kell mérlegelnünk a lehetséges megoldásokat. Az esztétikát firtató kérdésekre nehezen tudunk megnyugtatóan objektív válaszokkal szolgálni. Viszont a környezethez való illeszkedést képesek vagyunk realiztikusan bemutatni, és az életciklus során felmerülő energetikai kérdésekre is tudunk válaszolni, erősen a digitálisan megtervezett épített környezetre támaszkodva. A digitális tervezés mára mindennapos, a technológiai lehetőségek adottak a WYSIWYG („What You See Is What You Get” – „azt kapod, amit láatsz”) tervezéshez. Az épületmodellek fotorealisztikusan ábrázolhatóak valós időben is, megfelelő paraméterezéssel pedig a teljes életciklusra vonatkozó költség-, energetikai- és ökológiai szempontú elemzéseket végezhetünk. A „hogyan építjük meg” kérdéskörével az építményinformációs modellezés és menedzsment (Building Information Modelling - BIM), a „hogyan fog viselkedni” kérdéseivel pedig részben az épületenergetikai modellezés (Building Energy Modelling - BEM) foglalkozik. A BIM és BEM modellek között elméletileg nem kellene, hogy fogalmi vagy gyakorlati különbség legyen, azaz elvi síkon minden adatot tárol(hat)unk egy adott épületre vonatkozóan ugyanazon modellben. Ehhez a közös megegyezésen alapuló adattárolás kiemelt fontosságú, azonban az értelmezési keretek pontos szemantikai kijelölése lassan történik: a BIM és az épületszerkezettani zsargon még túlságosan eltérő. A közös nyelv hiányában a digitális épületek szerkezetileg helyes modellezése és az épületmodellek felhasználása az informált döntéshozatalban még nem kifejezetten elterjedt.

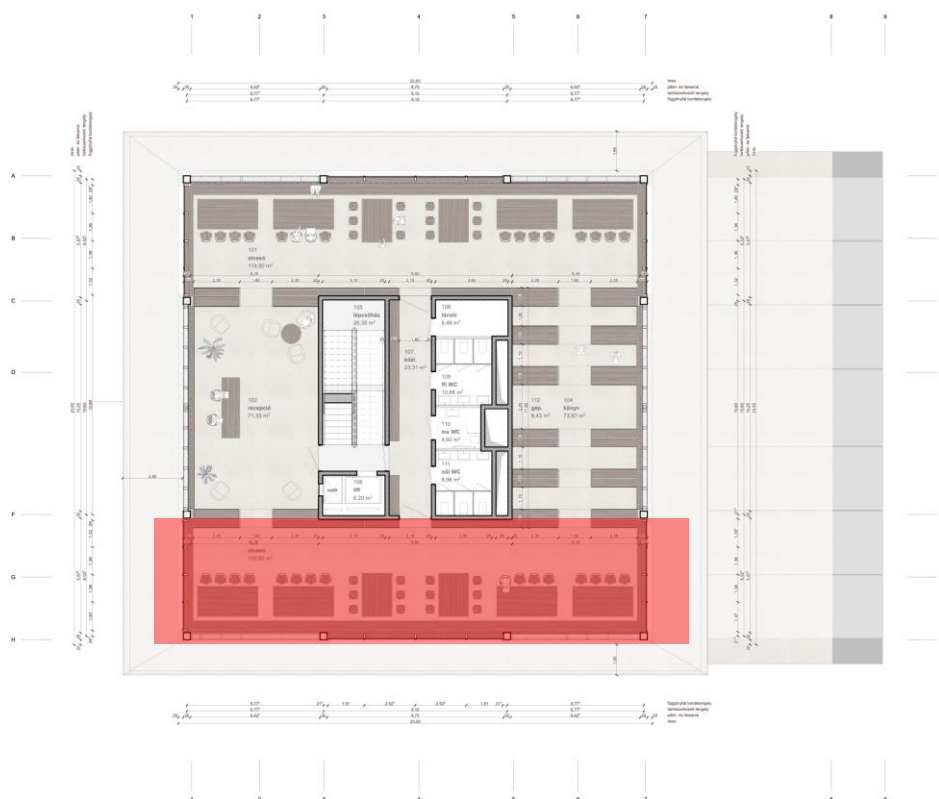
A digitális épületmodellek felvetik a lehetőséget, hogy a statikus, előírt értékek helyett mérnöki módszerekkel, dinamikus épületenergetikai szimuláció(k) eredményeinek felhasználásával határozzunk meg épületfizikai paramétereket. A tájolásból, valamint a használatból eredő követelmények számszerűsítéséhez szükséges a vizuális komfort és az energetikai működés vizsgálata is. Az ezt lehetővé tevő számítógépes tervezésnek több válfaja létezik: a manuális munkát igénylő kézi bevitel mellett dolgozhatunk parametrizált modellekkel is. Ezekben a geometria, az adatfelvitel, illetve a modell struktúrája nem kizárólag direkt bevitellel történik, hanem a létrehozás logikai lépéseinek, tehát az algoritmus leírásán van a hangsúly. Emiatt ezt a modellezési paradigmát algoritmikus tervezésnek is nevezik, lényegi különbség nemigen van az elnevezést leszámítva. Az algoritmus leírására lehetőség van hagyományos programozási nyelvek használatával is, azonban az építészeti és mérnöki tervezésben a közelmúltban már túlnyomórészt a vizuális scriptnyelvek (visual scripting) nyertek teret, mivel ezek a fejlesztők által biztosított kész komponenseket (node-okat) tartalmazznak, melyek saját, tetszőleges nyelven megírtakkal is vegyíthetőek. Egy-egy node reprezentálhat egy épületszerkezeti elemet, egy skalárt, vektort, gyakorlatilag bármilyen adattípust. A mérnöki tervezés algoritmizálhatósága [1] azonban jelenleg még számos kérdéssel határolt terület.

Az épületszerkezeti és épületfizikai tervezésre jellemző hatékony, a rendszer-szintű problémákra figyelmet irányító tervezésmódszertan egy BIM modell felépítése esetében is alapvető fontosságú. Szerkezetileg helyes modellt felépíteni nem triviális feladat: a tapasztalat azt mutatja, hogy a két terület összekapcsolódása lassan halad, aminek oka az, hogy a műszaki tudást hosszú évek tapasztalati munkájával lehet biztos alapokon elsajátítani, a digitális modellezés pedig jellemzően a frissen végzettek területe. Kulcsfontosságú annak a megértése és követése, hogy a tervezés során műszaki leírásokon, részletrajzokon, rétegrendeken feltűnő adathalmaznak a modellben milyen adatstruktúra jelenti a forrását, az milyen részletezettséggel bír: mi a modell „részletezettségi szintje”. Az angol szakirodalomban ezt általában LOD-nak (Level of Development) hívják [2]. A BIM modellekből kinyerhető adatokat különféle analízisekre, modellezésre és szimulációkra használhatjuk, melyek eredményei segíthetnek a döntéshozatalban. A vizsgálatokat végezhetjük állandósult állapotot feltételező modellezés (stationary modelling) alapján, amikor a peremfeltételek és anyagtulajdonságok, valamint a geometria térbeli és időbeli változását elhanyagoljuk. Dinamikus szimuláció (dynamic simulation) esetén azonban a peremfeltételek és anyagtulajdonságok, valamint akár a geometria térben és időben is változhatnak. A dinamikus szimulációk időlépése az épület léptékében általában 15 perc és 1 óra között felvéve már hasznos, használható eredményeket ad a számítási idő észszerű keretek között tartása mellett, de például a talajban lejátszódó hő és nedvességtranszport folyamatok sokszor hónapok vagy évek során követhető folyamatok, ezért a dinamikus szimulációkat gyakran az órai felbontás megtartása mellett több hónapot vagy éveket futtatva szimuláljuk. A releváns mennyiségek vizsgálhatóak abszolút skálán, mint például a fajlagos energiafelhasználás (Energy Use Intensity - EUI), vagy a hő-, valamint vizuális komfortra gyakorolt hatásuk szempontjából egymáshoz képest relatív összevetésben is.

A BIM és BEM kapcsolatának, valamint a parametrikus modellezési lehetőségek mélyebb megismeréséhez az alábbi feladatot választottuk: egy könyvtárépület térszervezés- és funkcionális értelemben állandó tervállapotát figyelembe véve a nyílászáró-paramétereit dinamikus épületenergetikai szimuláció segítségével igyekeztünk hatályos szabványok figyelembevételével meghatározni.

A VIZSGÁLT ÉPÜLET

A vizsgálat tárgyát képező épület fiktív, diplomaterv során elkészített munka. A teljes épületenergetikai modell 42 zónából épül fel, ennek szimulációja és kezelése a feladat keretein túlmutat. A kiválasztott, vizsgált tér a 103. olvasó (lásd 1. ábra), délre tájolt első emeleti könyvtárhelyiség. A keleti, déli, nyugati tájolású ablakai jó vizsgálati alannyá teszik. A funkciót az *ASHRAE 90.1* szabványban [3] leírt *SecondarySchool::Library* működési programmal modelleztük, a nyitvatartási idő (occupancy schedule) módosított, 07:00-19:00 órára.



1. ábra: A vizsgált épület alaprajza, kiemelve a vizsgált a tér

SZERKEZETEK, PEREMFELTÉTELEK

A numerikus szimulációkhoz és modellezéshez Energyplus [4] valamint Radiance [5] számítógépet alkalmaztunk. A helyiséget alul-felül és belső fala mentén adiabatikus, a külső falak mentén pedig „Outdoors” peremfeltétellel modelleztük. A vizsgálat során a kialakítás a paraméterek számának és értékeinek függvényében exponenciálisan nő, pl. egyetlen nyílászáró egyetlen réteg modellezése 3 lépcsőben, fix üvegezés vastagságot feltételezve $3^6 = 729$ lehetséges kombinációt jelentene. Ezek közül azonban nem mindegyik valós lehetőség. Célszerűbb ezért, ha konkrét termékként vagy jogszabályi előírásoknak megfelelően kerülnek ki a lehetőségek, vagy az optimalizációt segítő mesterséges intelligencián alapuló, genetikus algoritmusokat is alkalmazhatunk. Jelen kutatásunkban a nyílászárókra háromféle opciót modelleztünk meg: 1) kiemelkedő hőszigetelésű ($U_w = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$, SHGC = 0,2), 2) a hatályos 7/2006. TNM rendelet szerint kialakított ($U_w = 1,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, SHGC = 0,6), 3) elavult ($U_w = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$, SHGC = 0,8) ablakot vizsgáltunk.

VIZSGÁLATOK

Energiafelhasználás (EUI)

Az anyag és szerkezetválasztás egyik fontos kritériuma, hogy az üzemeltetési energiát minimalizáljuk. Ez összeadódik a hűtés-fűtés, a szellőztetés, a használati melegvíz-előállítás, vizek keringtetésére, illetve a világítás- és eszközök

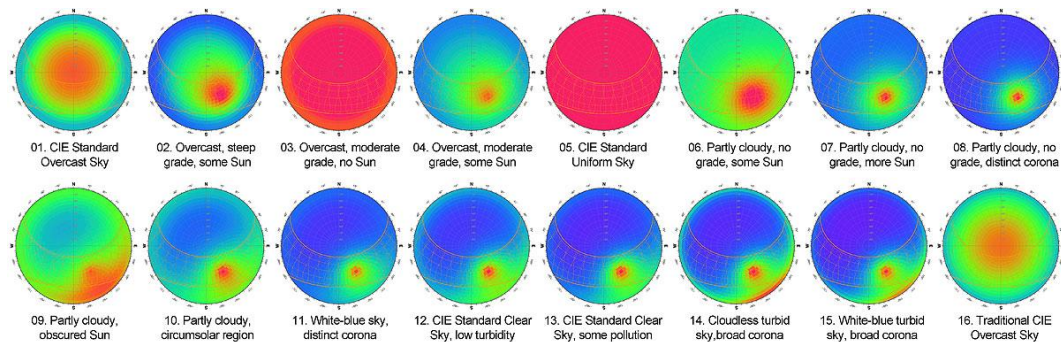
üzemeltetésére fordított energiából. Ez egyszerűen is számítható a hűtési-fűtési hőfokhidak ismeretében, vagy részletesen, időlépésenkénti bontásban. Utóbbi esetében is van lehetőség a részletezésre, dolgozhatunk egyszerűsített leírásokkal és idealizált rendszerekkel is az utolsó paraméterig történő egzakt leírást időben széthúzva a tervezési folyamaton. Például a felállított energetikai modell a légtechnikai rendszerekre első közelítésként „Ideal Air Load” egyszerűsítést alkalmazott, ami a hőegyensúlyhoz szükséges „hiányzó” energiát pótolja, vagy a többletet vonja ki a rendszerből. Ez a vizsgált könyvtárban jó közelítést feltételez a parapet-fancoil használata miatt, de a későbbiekben a rendszerre vonatkozó energiaigényt megadó sablonok használata tűnt célravezetőbbnek.

Hőkomfort (PMV)

Povl Ole Fanger volt, aki leírta az emberi test első, könnyen programozható hőegyensúlyi modelljét [6]. A nevét viselő Fanger-egyenlet alapján számítható az egyik legelterjedtebb index, a „Predicted Mean Vote” (jóérzés-index). A belső, gépészeti rendszerekkel temperált helyiségek egyik széles körben alkalmazott mérőszáma lett a PMV. Későbbi tanulmányok bemutatták, hogy a Fanger-féle egyenlet mesterséges szellőztetésű épületek esetében ad a használók körében tett felmérésekkel korreláló becslést. A passzív működésű épületek esetében a PMV modell helyett az adaptív modell használata a célravezető, a nyáron passzív, télen aktív stratégiákkal operáló épületek esetében (amilyen a diplomatervem is), a két modell közötti váltás szükséges. Az átmeneti időszakok kérdéses, e tekintetben jelenleg is folynak a kutatások. A PMV modell a légáram szempontjából 0,1 m/s légsebesség feletti értékekre ad jó eredményt teljes testet érő hőkomfort szempontjából, a boka körüli huzat a 0,8 clo alatti ruházat (a hölgyek esetében nyári lengébb öltözet) lényegesen szűkebb tartományban ad valódi komfortot. A nagy üvegfelületek jelenléte a helyiségben az átlagos felületi sugárzási hőmérsékletet rontja, az EnergyPlus esetében a helyiség középpontjára számolt PMV érték a bútorozás kitakaró hatásait, valamint a térbeli eloszlást nem veszi figyelembe. Ezek vizsgálatához mikroklimatikus térképek generálására van szükség.

Természetes világítási tényező (daylight factor - DF)

A természetes világítási tényező a belső megvilágítás értékének és egy külső takaratlan síkon mért megvilágítás mértékének hányadosa százalékban kifejezve. Az égbolt takaratlan, zavartalan képe egy belső pontból (pl. nyitott ablak) 100% értéket jelentene, az alkalmazott égboltmodellt lásd a 2. ábrán. A természetes világítási tényező mind a belső, mind a külső reflektált fényt is figyelembe veszi [7]. A fentiekből fakadóan gyorsan számítható, de helyszíntől független mennyiség. A minősítési rendszerek az eloszlására, valamint az átlagos értékére is írnak elő követelményeket.



2. ábra: Az ISO 15469 [8] szerinti tökéletesen borult égbolt modell

Daylight Autonomy (DA)

Ez a mennyiség az éves benapozottságot jellemző mennyiségek sorában az elsőként jelent meg 1989-ben, Christoph Reinhart finomította a számítási módszert 2001 és 2004 között [9]. Azon használati órák száma, melyekben a megvilágítás értéke egy bizonyos küszöbérték feletti: általában 300 lux felett szokták vizsgálni a DA értékét. Míg a DF helyszíntől független, addig a DA figyelembe veszi a helyszín-specifikus nappályákat és sugárzás-intenzitást is. A vizsgálat síkja jellemzően 720 mm magasan történik (olvasófelület). Historikusan a megvilágítás szükségessége magasabb volt, az alábbi okok miatt: kevésbé volt fontos a természetes világítás megléte, az Egyesült Államokban iskolák is működtek ablak nélkül, ez a tanulók mentális állapotára és tanulmányi eredményeire is hatással volt [10-11], az analóg munkafelület vízszintesen helyezkedett el, valamint nem volt saját világítóképesége a munkafelületeknek.

Useful Daylight Illuminance (UDI)

Azon használati órák száma, melyekben a megvilágítás értéke egy bizonyos tartományban található, általában 100-2000 lux között szokták vizsgálni. Amely diszkrét területértékeken az UDI a tartományból felfelé szór, ott káprázási probléma lehet. A kutatások által a 2000 lux felső értékére vonatkozóan kevés adat áll rendelkezésre, ezért annak érvényessége viták tárgyát képezi. Ez a vizsgált épület esetében az első és második emelet déli oldalát érinti a legérzékenyebben, főképpen a téli időszakban: a könyvtár és az irodák ablakain is besüt a nap, de a szoláris nyereséget a használhatóság miatt csökkenteni kell.

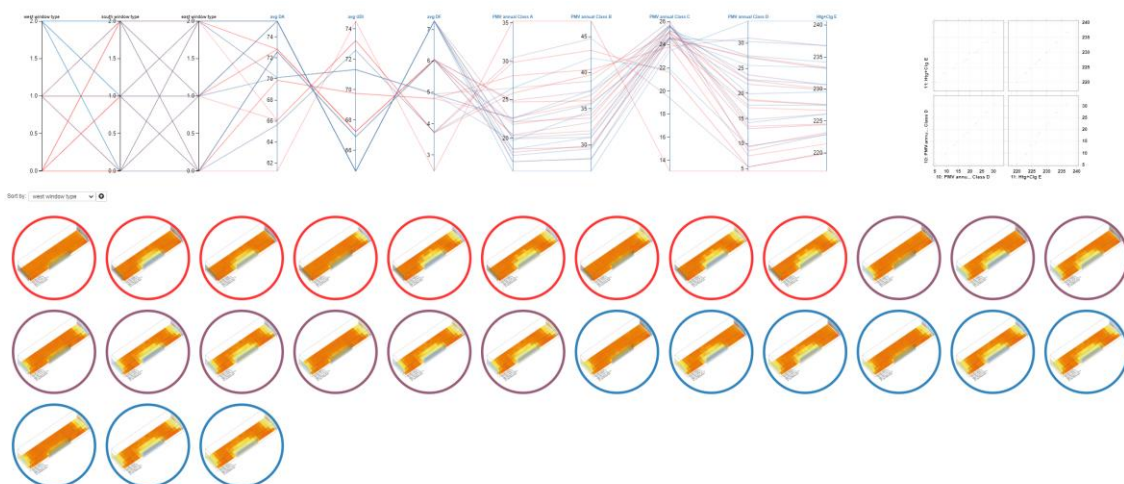
Káprázás vizsgálata (Glare analysis)

A kézi eszközökkel történő megvilágítás-alapú káprázás-vizsgálat sok hibát és bizonytalanságot rejtett magában: az eszközök (fotométer) drágák, valamint a belső világítási viszonyok változékonysága is kihatott az eredmények értékelésére. A 32 bit színmélységű HDR (High Dynamic Range – nagy dinamikatartományú) fényképészet elterjedésével a költségét csökkent, számítási módszerek kidolgozásával pedig a 32 bites képek (.EXR formátumban) elemezhetővé váltak [12]. A káprázás egy szubjektív érzet, a látótérben lévő fényforrások

okozzák. Mértéke szerint beszélhetünk zavaró káprázásról (mesterséges világítás mellett ez jellemző), illetve vakító káprázásról is. Utóbbi esetében a látótér egy része, vagy egésze érzékelhetetlenné válik a fényviszonyok miatt, a szem adaptációs képességének korlátjai miatt. A természetes világítás esetében a nyílászáróra elhelyezett külső-, vagy belső oldali árnyékolóval segíthetünk a káprázás ellen. A káprázás vizsgálatára használt mérőszám a „daylight glare probability” (DGP). Értéke 0-1 között változik, mely megadja, hogy a káprázás mekkora valószínűséggel következik be adott pozícióból, adott napállás mellett, adott irányba nézve.

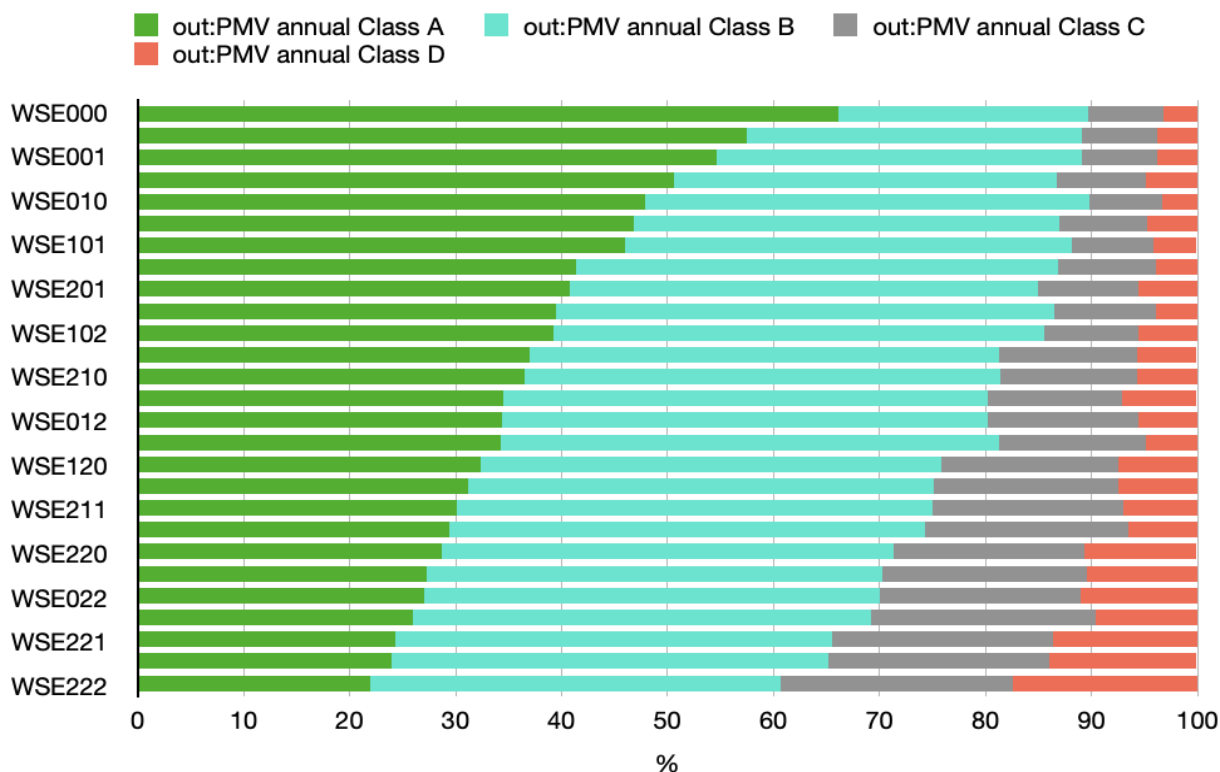
EREDMÉNYEK

Az egyes szimulációs eredmények azonosításához 6 karakterből álló kódot vettünk be: pl. WSE121, ahol az első 3 karakter a változtatható nyílászárókat jelöli égtáj szerint (nyugat-dél-kelet), a második 3 karakter pedig az alkalmazott ablakok típusát jelöli, az eredményeket a 3. ábrán foglaltuk össze, a vizualizációhoz a Thornton Tomasetti Design Explorerét használtuk [13]. A legalacsonyabb energiafelhasználás a déli napvédő, és kelet-nyugati irányban jobb transzmissziós képességű üvegezések esetén alakult. A legalacsonyabb energiafogyasztást a legalacsonyabb U-értékű ablakok felhasználása jelentette - ebben közrejátszik, hogy csak a hűtés-fűtés energiáját vettük figyelembe. Az energetikailag legalacsonyabb megoldásnál a DF és DA értékei elmaradnak a kelet-nyugati tengelyen benapozás szempontjából nyitottabb lehetőségektől (DFWSE000 = 2,49%, DFWSE100 = 3,73%, DFWSE001 = 3,73%), de a fényvédő jelleg miatt az UDI értéke itt a legmagasabb. Egyéb esetben a DGP magas. A káprázás vizsgálatára az éves vizsgálatot kiegészítendő, konkrét időpontra vonatkozó vizsgálatokat végeztük. Ezek azt mutatják, hogy a napvédő üvegek a kelet-nyugati tengely miatt az alacsony napállás miatt kevésbé hatékony megoldást jelentenek, az árnyékolók használata az olvasás és szellemi munka miatti koncentráció zavartalan biztosítása miatt szükségesek.



3. ábra: Az összes lehetséges ablakkombináció a háromféle ablaktípussal

A PMV meghatározó tényezője a felületek közepes sugárzási hőmérséklete (mean radiant temperature). A nagy ablakfelületek miatt az opciókat a nyílászárók alapján rendezhetjük sorba, a legtöbb komfort a legmagasabb felületi hőmérsékletek mellett észlelt. Érdekes, hogy a hőkomfort szempontjából a helyiség nem mozdul feljebb az "A" osztályt vizsgálva az éves használati időtartam kb. 35%-ánál, lásd 4. ábra.



4. ábra: Az összes vizsgált opció teljesítménye hőkomfort szempontjából

ÖSSZEGZÉS

A nagy üvegezett felületek mellett a direkt szoláris nyereségek modellezése létfontosságú, ezért mikroklimatikus térképek számítását tartjuk célszerűnek az egyszerűsített hőkomfort-számításokkal szemben. A vizuális komfortot leíró vizsgálati mérőszámok lényegesen előrébb tartanak értelmezhetőségben és (számítógépes) alkalmazások terén, mint az energetikai mutatók. A „Daylight Autonomy” mintájára „Thermal Autonomy” [14] vizsgálata is szükséges. Ehhez a széles körben alkalmazott, térbeli viszonyokat elhanyagoló mérőszámok helyett mikroklimatikus térképek létrehozása lehet megoldás. Ezek számításigényes, a PMV vagy adaptív modell mérőszámainál bonyolultabban számítható térbeli jellemzők. A hőkomfort jellemzésére használt mérőszámaink talán elavultak: a PMV az 1970-es években jött létre, az aktív gépészettel működtetett épületek jellemzésére. A 0.1 m/s alatti légáram mellett már nem ad jó közelítést, az adaptív hőkomfort-modell használata célszerű a passzív ház-közeli működésű épületek esetében. Az épületinformációs modellezéssel segített mérnöki tervezés hatalmas terület, melynek egy szegletét igyekeztünk feltérképezni. Demonstráltuk, hogy az épületfizikai paraméterek meghatározása, mely

jelenleg sokszor a gyártói termékadatlapokról történik, mérnöki módszerekkel is elérhető, habár munkás feladat. Az eljárás, amivel épületfizikai paraméterek szintjén dolgozva fel tudjuk térképezni a lehetséges megoldási teret, rengeteg lehetőséget rejt magában és definíció szerint teljesítményelvű tervezést követel. A változtatások hatásait érzékenység-vizsgálaton keresztül vizsgálhatjuk, illetve számítási kapacitás rendelkezésre állása esetén rengeteg opciót vizsgálhatunk meg, ami alapján a tervezők és a megrendelő is iránymutatást kap arra, hogy mibe érdemes fektetni. A termékfüggetlen vizsgálathoz diszkrét értékészlet szükséges, ám ennek a gondolatnak a számítástechnikai teljesítmény részben gátat jelent (azonban a közeljövő várható áttörései, pl. a kvantumszámítógépek áthidalhatják ezeket a gátakat). A megoldási tér árazása (anyag- és ökológiai szempontból) egy érdekes felvetés lehet a problémakör tovább gondolására. Építőipari normaadatokkal és költségekkel ugyanúgy összeköthető a modell, mint egy energetikai adatbázissal, az üzemeltetés energetikai költségvonzatával összesítve a bekerülés is árazható.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönjük Szabó Árpád DLA és Dr. Dobszay Gergely segítségét, valamint és Vörös Tamás DLA iránymutatását a vizsgált épület tervezésében. Ez a kutatás kapcsolódik az „Épületek és épületszerkezetek életciklus- és épületfizikai szemléletű optimalizációja komplex numerikus modellezéssel” című FK 128663 számú kutatási projekthez, mely a Nemzeti Kutatásfejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, az FK_18 pályázati program finanszírozásában valósult meg. Jelen cikk az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-4-II kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Dobszay, G., Bakonyi, D., Kapovits, G., Egy lépés a számítógéppel segített épületszerkezeti tervezés felé. METSZET: ÉPÍTÉSZET ÚJDONSÁGOK SZERKEZETEK RÉSZLETEK, 2018(6), 40–49.

[2] BIMForum: Level of Development (LOD) Specification Part I & Commentary, For Building Information Models and Data, 2019. Web: [https://bimforum.org/resources/Documents/BIMForum LOD 2019 reprint.pdf](https://bimforum.org/resources/Documents/BIMForum_LOD_2019_reprint.pdf) Megtekintve: 2021.07.21.

[3] ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1-2019 - Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Georgia, US, 2019.

- [4] Energy Plus, WEB: <https://energyplus.net/> Megtekintve: 2021.07.22.
- [5] Radiance, WEB: <https://radiance-online.org/> Megtekintve: 2021.07.22.
- [6] Fanger, P. O., Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering, Danish Technical Press, Copenhagen, Denmark, 1970.
- [7] Marsh, A.J., Performance Analysis and Conceptual Design, Part B, 1997, p. 57. Web: http://companyshed.com/downloads/documents/Thesis_AJ-Marsh.pdf Megtekintve: 2021.07.21.
- [8] ISO 15469:2004 Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2019.
- [9] Daylighting Pattern Guide: Daylight Autonomy. Web: <https://patternguide.advancedbuildings.net/using-this-guide/analysis-methods/daylight-autonomy> Megtekintve: 2021.08.15.
- [10] Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., Rogers, Z., Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design, Leukos, 3(1), 2006, pp. 7-31.
- [11] Reinhart, C. F., Walkenhorst, O., Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. Energy and Buildings, 33(7), 2001, pp. 683-697.
- [12] Bleicher, T., A wxPython GUI for the Radiance falsecolor2 tool, Web: <http://tbleicher.github.io/wxfalsecolor/index.html> Megtekintve: 2021.08.21.
- [13] Szimulációs eredmények Design Explorer felületen: <https://bit.ly/2VuaA9q>
- [14] Levitt, B., Ubbelohde, M., Loisos, G., Brown, N., Thermal Autonomy as Metric and Design Process. Loisos + Ubbelohde, Alameda, California, California College of the Arts, San Francisco, 2013.