



PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Breuer Marcell Doktori Iskola

TÉZISFÜZET

**IRODAÉPÜLET TERVEZŐ MÓDSZER FEJLESZTÉSE MODELLGENERÁLÓ ÉS OPTIMÁLÓ
ALGORITMUSSAL**

című Ph.D. értekezéshez

Androsics-Zetz Dóra Noémi

okleveles építészmérnök

Témavezető:

Prof. Dr. habil Kistelegdi István DLA, Ph.D.

Pécs, 2022



TARTALOMJEGYZÉK

1.	BEVEZETÉS	3
2.	A KUTATÁS MÓDSZERE ÉS CÉLJA	4
3.	A DOLGOZAT FELÉPÍTÉSE, ALKALMAZOTT MÓDSZEREK	5
3.1.	A KUTATÁS ELŐZMÉNYE	5
3.1.1.	Szakirodalmi áttekintés	5
3.1.2.	Probléma felvetés	6
3.1.3.	Előzetes tervezési módszertan	6
3.1.4.	A kutatást megalapozó valós projektfeladatok	7
1.	Tézis	7
3.2.	EDOPT: IRODAÉPÜLET PEREMFELTÉTELEK ÉS ÉPÜLETKONFIGURÁCIÓ GENERÁLÁSI SZABÁLYOK MEGHATÁROZÁSA	8
2.	Tézis	9
3.3.	EDOPT: DINAMIKUS-TERMÍKUS ÉPÜLETSZIMULÁCIÓS VIZSGÁLAT	10
3.	Tézis	11
3.4.	EDOPT: SÚLYOZOTT SORREND FELÁLLÍTÁSA, OPTIMÁLIS MODELL KIVÁLASZTÁSA	12
3.4.1.	Súlyozott sorrend meghatározása	12
3.4.2.	Optimális modell kiválasztása	13
4.	Tézis	14
4.	VÉGSŐ EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK	15
5.	KITEKINTÉS	16
6.	SAJÁT PUBLIKÁCIÓK	17
	FELHASZNÁLT IRODALOM	18

1. BEVEZETÉS

A világ energiafogyasztásának kb. 40%-át az építőipari szektor teszi ki [1], [2], [3] ez a szám jelentős mértékű napjaink energiaválságos időszakában. A bizonytalan energiaellátottság, az alacsony komfortteljesítmény, valamint az építőipar okozta negatív környezeti hatások miatt az épületoptimalizáció és tervezési módszerek fejlesztése a leginkább kutatott területté vált.

Az épületállomány jelentős részét irodaházak alkotják, ahol a legmagasabb szintű szellemi munkavégzés zajlik, így elengedhetetlen az optimális komfort szint biztosítása és a változó igényekhez való alkalmazkodó képesség. Az irodaházak magas energiaigénnyel rendelkeznek, főleg hűtési igény tekintetében, mivel a használatból eredő magas belső hőterhelés mellett a jellemzően nagymértékű üvegezett homlokzatok magas szoláris terhelést okoznak. Az iroda- és lakóépületek teljes energiafogyasztásának kb. 50%-át fűtésre, hűtésre és szellőztetésre fordítják [4], [5]. Ez a statisztika az előrejelzések szerint a jövőben további 28%-kal növekedni fog 2035-ig. Az épületek energiahatékonyságának javulása 2010 óta kb. 50%-kal lelassult az átlagos ütemhez képest [5]. Éppen ezért fontos szerepe van az energiahatékony épülettervezésnek. Ezalatt értem az átgondolt anyaghasználatot, ahol figyelembe van véve az ökológiai lábnyom az előállítástól kezdve a várható élettartamon át, az újrahasznosíthatóságig. Mindemellett fontos szempont az üzemeltetés, energia fogyasztás csökkentése oly módon, hogy a belső hő- és vizuális komfortszint minél magasabban tartható legyen. Ezt többnyire korszerű gépészeti berendezésekkel érhető el, megújuló energia használatával és passzív építészeti tervezési módszerekkel: tömegformálással, belső funkciók megfelelő elhelyezésével, épületszerkezetekkel.

Doktori tanulmányaim során ezen építészeti tervezési módszerek kutatásával foglalkoztam a Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai kar, Breuer Marcell Doktori Iskola, Energia Design kutatócsoportban. Kutatásom témája az irodaházakkal foglalkozik. Magyarországon egyre több, új irodaház létesítése figyelhető meg, főleg Budapesten, de már a vidéki városokban is jellemző. Ezek az épületek olyan beruházásokat jelentenek, melyek nagy energiaigénnyel rendelkeznek üzemeltetésben, sok embert foglalkoztatnak, huzamos tartózkodási igényűek, mindemellett multifunkciósak és megjelenésük reprezentatív. Kutatásom célja, irodaépületek tervezésének optimalizálása, a jövő irodáját megtalálni, építészeti és épületkomfort, valamint energetikai szempontrendszer alapján.

2. A KUTATÁS MÓDSZERE ÉS CÉLJA

A kutatás komplex irodaépület tervezési módszer fejlesztéséről szól. Alapvetően az épületgeometriából indultam ki, ahol azt vizsgáltam, milyen hatással bír a forma az energiafogyasztásra és üzemeltetésre, valamint hő- és vizuális komfortra. Majd ezt tovább gondolva a belső térszervezést is elemeztem, ahol a mai trendeknek és használatnak megfelelő hasznos terek elrendezésének lehetőségét tanulmányoztam. A cél, hogy a fő energetikai problémákat az épület oldja meg, a gépészet pedig kiegészítő szerepet kapjon. Jelen kutatás arra fókuszált, hogyan lehet az építészeti tervezés „DNS-kódjával” a térszervezés és tömegforma alakításával az irodaépületeket a hő- és vizuális komfort, illetve az energiafogyasztás tekintetében optimálni. Az kutatás során első lépésben egy modellgeneráló algoritmus kidolgozását végeztem, ahol backtracking elvű eljárás segítségével matematikai kombinatorikus algoritmust alkalmaztam az építészeti tervezés során. Építészeti szabályok kidolgozására volt szükség, majd ezek lefordítása modellgeneráló algoritmus nyelvezetre, hogy a keresési tér megfelelően szűk legyen és létrejöhessen az összes lehetséges, optimális megoldás. Amint rendelkezésemre állt az összes eset, csoportokba rendszereztem energetikai osztály szerint. Ezt követően a modellek passzív építészeti elemekkel egészültek ki, különböző üvegezési arány és tájolás tekintetében. Majd dinamikus-termikus épületszimulációs vizsgálatokat végeztem, ahol az épületek megfelelő üzemeltetést kaptak. A szimulációs eseteket sorrendbe helyeztem energiafogyasztás és komfort eredmények szerint, melyekből az optimális épületmodellt kiválasztottam egy felhasználói igényeknek megfelelő súlyozási rendszer kidolgozásának segítségével.

A kutatásom célja, egy olyan tervezési módszertan fejlesztése, mely döntéstámogatásként meghatározza a peremfeltételeknek megfelelő összes lehetséges eset közül a legoptimálisabb verziót nagyléptékű épülettervezés során, figyelembe véve az energetikai és a komfort paramétereket. Emellett a leglényegesebb passzív építészeti performanciát keresem, hogy következtetéseket lehessen levonni az épületgeometria és térszervezés szerepéről az épületfizikai tényezőkre vonatkozóan. Értekezésben egy alkalmazott kutatást mutatok be, ahol alátámasztom és fejlesztem a kapcsolódó elméleti kutatást [6], melyben javaslatot teszek a módszer alkalmazhatóságára. Az általam végzett alkalmazott kutatási téma az optimális irodaépület fejlesztés, mint komplex épület. Céloom, a tervezési módszer alkalmazhatóságának bizonyítása nagyléptékű épületek esetében és ezáltal a jövő irodaépületeinek tervezési

metódusára javaslatot tenni, építészeti, energetikai és épületkomfort szempontrendszerek alapján. Valamint a megfelelő építészeti szabályok meghatározásával, a keresési tér szűkítés alkalmazásával irodaépület tervezési optimalizációt véghez vinni.

3. A DOLGOZAT FELÉPÍTÉSE, ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

A kutatómunka egy tervezési módszerfejlesztésről szól épület optimalizálás céljából. Ez egy átfogó, komplex, több részterületből álló kutatási feladat, melynek én egy részterületével foglalkozok a dolgozatban, ahol irodaépület tervezési optimalizálásra teszek javaslatot. Első lépésben szakirodalmi áttekintéssel kezdtem meg a téma előkészítését, hogy feltérképezhessem, milyen kutatások és tervezési optimalizációk folynak jelenleg, valamint az általam végzett munka miben tér el ezektől. Majd egy létező módszertant mutatok be, amelynek a továbbfejlesztéséről szól az értekezés, azonban fontosnak tartottam, hogy bemutassam miről szól a kiinduló alapként szolgáló előzetes tervezési stratégia, milyen feladatokra alkalmas és miért tartottam szükségesnek a továbbfejlesztését. Ezt követően az alkalmazott módszereket és célokat részleteztem. A kutatási munka három fő területre oszlik, először egy modellgeneráló algoritmus kidolgozása volt feladat, megfelelő építészeti szabályok megalkotásával. Ezt követően a kiválasztott modellek összehasonlító szimulációs vizsgálatát végeztem, ahol a geometria és egyéb passzív építészeti megoldások szerepének kimutatása történt komfort- és energiafogyasztás értékekre. Végül, preferenciáknak megfelelő súlyozott sorrend felállítására alkalmas eljárást ismertetek, melynek segítségével meghatároztam az optimális épületverziót komfort és energiaigény szempontjából.

3.1. A KUTATÁS ELŐZMÉNYE

3.1.1. Szakirodalmi áttekintés

A komfort és energia teljesítmények optimalizálása céljából számos tanulmány foglalkozik az irodaépületek egyes részeinek fejlesztésével, optimalizálásával. Első sorban gépészeti és energetikai hatások kapcsán találhatóak kutatások, mint például a HVAC rendszerek fejlesztése: gépi szellőztetés [7], [8], [9], a különböző hűtés és fűtési megoldások [10], és üzemeltetés [11], [12], [13], [14], [15] hatásai a belső hőkomfortra, légminőségre, természetes fényminőségre,

energiafogyasztásra melyek számos passzív tervezési stratégiával egészülnek ki [16], [17], [18], [19], [20], [21]. Passzív építészeti elemekkel akár 80%-ban lehet javítani egy épület energetikai és komfort jellemzőit [22]. Sok szakirodalomban a homlokzat optimalizációval foglalkoznak, mint például az üvegezési arány (WWR) [23], [24], [25], [26], [27], árnyékolás [28], [29], [30], [31], [32], [33], különböző épületszerkezetek, és anyagok energetikai [34], [35], [36], [37] hatásait és életciklusát (LCA) [38],[39] vizsgálják.

Azonban jóval kevesebb olyan kutatás található, mely irodaépület térszervezéssel [40], [41], [42], [43] vagy tömegformálásával, geometriájával [44], [45] foglalkozna annak érdekében, hogy optimális komfort és energia performanciát lehessen elérni. A kutatások jelentős többségét valamilyen szimulációs szoftverrel [46], [47] végzik döntéstámogatás céljából. Ezenkívül már megfigyelhetőek különböző optimaló algoritmusok alkalmazásai is [48], [49] a tervezéstámogatás során.

3.1.2. Probléma felvetés

Kevés olyan kutatás található, ahol komplexen, a fent említett területek mindegyikét érintve foglalkozna irodaépület optimalizációval, inkább egy-egy részterületek vizsgálata figyelhető meg. Valamint hiányos ismeret áll rendelkezésre az épületgeometria és térszervezés hatásáról és szerepéről az épületfizikai paraméterekre vonatkozóan. Ebből kifolyólag ígéretes kutatási területnek mondható a geometria szerepe az épületoptimalizálási lehetőségek között, ahol további vizsgálatok elvégzése szükséges.

3.1.3. Előzetes tervezési módszertan

Értekezésem egy már létező tervezési módszer továbbfejlesztéséről szól, nagyléptékű épületek, azon belül pedig, irodaépületek esetében. A kutatás alapjaként szolgáló Energia Design (ED) módszertant témavezetőm, Prof. Dr. Kistelegdi István fejlesztette ki [50]. Az előzetes ED eljárás során épületfizikai termikus-dinamikus szimulációs vizsgálatok egészítik ki az épülettervezést, és nyújt döntéstámogatást különböző koncepció verziók közül, a legoptimálisabb épület verzió kiválasztása érdekében. Az általam fejlesztett Energia Design Optimalizáció (EDOPT) fejlesztése abban tér el a korábbi módszertantól, hogy a megfelelő építészeti szabályok meghozatalával egy modellgeneráló algoritmust alkalmazok a tervezés során. Ezáltal az összes, potenciálisan lehetséges megoldás rendelkezésünkre áll. Majd a szimulációs vizsgálatok által kapott

eredményeket preferencia szerint súlyozva sorrendbe állítom, így a feltételeknek megfelelő legoptimálisabb eset kiválasztható.

3.1.4. A kutatást megalapozó valós projektfeladatok

A doktori tanulmányaim alatt részt vettem különböző projekt épületek optimalizálásában, ahol komfortmodellezéssel és szimuláció vizsgálatok elemzésével a legmegfelelőbb épület verziót kerestem az ED módszer segítségével. Ezek az elemzéseket IDA ICE szoftverrel végeztem. A program segítségével komfort modellezéseket, termikus-dinamikus szimulációkat, benapozás vizsgálatokat készítettem, ahol a kapott eredményeket energiaigény, vizuális- és termikus komfort szinten vizsgáltam. Ezen projektek során nyert tapasztalatokra építve dolgoztam ki a kutatásom témáját, az EDOPT módszert irodaépületek tervezéséhez.

1. Tézis: Az Energia Design (ED) módszerben alkalmazott épületfizikai szimulációs vizsgálatok kiegészítő szerepe az építészeti tervezés korai szakaszában energetikai adatokkal képes alátámasztani és kiválasztani több eset közül a peremfeltételeknek megfelelő épületkombinációt. A módszer döntés támogatásként működik, azonban nem képes javaslatot tenni az összes lehetséges optimális esetre, ezért továbbfejlesztése szükséges.

- Megállapítottam, hogy az ED szakmai tapasztalatokon alapul, 1-2 optimális esetet kínál, melyek nem feltétlenül tartalmazzák garantáltan az összes optimális megoldást, mivel korlátozott idő- és munkaráfordítás mellett, erre a módszer nem alkalmas.
- Általánosságban az volt tapasztalható, hogy már az épületgeometria és a térszervezés meglévő fix peremfeltételként jelentkezett, ezért csak kiegészítő passzív építészeti megoldások kombinálásával lehetett jobb eredményeket elérni. A módszer továbbfejlesztése vált szükségessé ahhoz, hogy az abszolút optimális esetet megkaphassuk.
- Megállapítottam, hogy a passzív tervezési stratégiák - geometria, a WWR, az árnyékolás, valamint a hőtároló tömeg - szerepe kulcsfontosságú egy épület komfort és energia mutatóiban. Az eredményül kapott adatokból kiértékelhető, mekkora mértékű bekerülési és üzemeltetési költséget, illetve energiafogyasztást lehet megtakarítani.

- Azonban nincs elég ismeret és további kutatások szükségesek az épületgeometria és a térszervezés szerepéről az energia-komfort paraméterekben.

3.2. EDOPT: IRODAÉPÜLET PEREMFELTÉTELEK ÉS ÉPÜLETKONFIGURÁCIÓ GENERÁLÁSI SZABÁLYOK MEGHATÁROZÁSA

Példamodell segítségével mutatom be az EDOPT módszert alaprajz konfigurációk generálására és irodaépület tervezés fejlesztésére. A kutatás lényegében klímazóna alapú irodai térszervezésről szól, ahol moduláris alapegységeket és azokból összeállított alapcsoportokat alkalmaztam, melyekből 2 dimenziós alaprajz konfigurációkat hoztam létre. Első lépésben meghatároztam az alapvető építészeti szabályokat méretezésre, valamint az alapcsoportok egymáshoz való illesztésére. Miután megkaptam az összes lehetséges alaprajzi geometriát, következő lépésben az alapcsoportokat felosztottam két funkcióra, zárt irodatér és nyitott multifunkciós aula-átrium részekre. A továbbiakban a különböző belső funkció arányú alapegységek egymáshoz való illesztésének szabályait ismertettem, melyek már belső térszervezés változatok generálási szabályait képezték. Ezt követően a szabályok átvitele történt a modellgeneráló algoritmus számára, mely a feltételeknek megfelelően az összes potenciálisan lehetséges esetet létrehozta. A továbbiakban ellenőriztem az eredményül kapott modelleket, hogy valóban megfelelnek-e, a meghatározott peremfeltételeknek, majd energiacsoportokba rendeztem az eseteket, ahol az átviteli hőveszteség felület és padlóterület hányados (A_{tot}/S_{tot}) számításával a hőveszteséget okozó, illetve a hőterhelésnek kitett burokfelületek következtében kialakuló épületenergetikai mérőszámot mutattam ki. Minél kisebb az A/S arányszám, annál nagyobb az épület energiahatékonysága. A felületszámításba (A_{tot}) minden olyan szerkezet felülete bele lett véve, amelyek két oldalán eltérő hőmérséklet alakulhat ki. Ide lett véve az irodateretek és az átrium külső homlokzati falai, a tetőfelületek, a talajjal érintkező felületek és az átrium-iroda közti falazat felülete. A területszámításnál (S_{tot}) minden szint járható, földémezett területét beleszámoltam, amibe beletartozik az irodatér, az átrium teljes földszinti területe, valamint az emeleti szinteken lévő galériák, melyek egy légteret alkotnak az átriummal, azonban azért kellett belevenni a számításba, mert a későbbi folyamatok során, úgynevezett semi-office terek létrehozását terveztem. A semi-office olyan rugalmasan variálható tér, mely könnyűszerkezetes és alkalmas időszakos projekt munkák, rendezvények, meetingek, kávézó, büfé vagy egyéb funkciók ellátására, tehát egyfajta „tér a

térben” elv szerint képzeltem el ezt a koncepciót. Ezek a terek állhatnak több kisebb helyiségből is, de akár egy összefüggő térből is, ha éppen az az igény. Tehát a galériákon további komforthelyiségek jönnek létre.

Az A/S számítások elvégzése után az egyes épület-konfigurációkat az értékeknek megfelelően csoportosítottam 3 kategóriába: MIN. érték, MAX. érték és egy közbenső, AVE. érték. A felület - terület hányados egy gyors energetikai értéket adott, ahol megnéztem az egyes csoportokon belül, mennyi épületmodellt és eltérő épületgeometriát tartalmaznak.

A szabályoknak köszönhetően, összesen 17 modell felelt meg a peremfeltételeknek. A MIN csoport A/S=1,01 eredménnyel 2 modellt tartalmazott, melyek azonos geometriával rendelkeztek, azonban eltérő iroda-átrium felosztással. A MAX csoport A/S= 1.13 értékkel, 4 db esetet tartalmazott 4 különböző geometriával, az AVE csoport A/S=1.06 értékkel 11 modellt és 7 különböző geometriát alkotott. A létrejött esetek további épületszimulációs vizsgálatok számára készültek, ahol az esetszám megnövekszik, a 4 féle fal-ablak arány és a 8 tájolási verzió kialakítása miatt.

2. Tézis: Az EDOPT módszer alkalmazása során, irodaépületekre fogalmazott peremfeltételeknek megfelelő építészeti szabályrendszer meghatározásával, modellgeneráló algoritmus alkalmazásával garantáltan létrehozható az összes potenciálisan optimális épületeset.

- Megállapítottam, mint minden épülettervezés kezdetén bizonyos peremfeltételeknek meg kell felelni. Mivel jelen tervezési feladatban ilyen peremfeltételek nem álltak rendelkezésre, így szükséges volt meghozni jól megfogalmazott építészeti szabályokat. Ezen szabályok meghozatalával jelentősen tudtam csökkenteni a keresési teret. A szabályokat úgy határoztam meg, hogy alkalmazhatóságuk reális legyen és a modellgeneráló algoritmus a figyelembe vehető keresési teret garantáltan bejárja.
- Bizonyítottam, hogy az általam megfogalmazott építészeti szabályokat le lehet fordítani modell generáló algoritmus számára, miáltal garantáltan az összes lehetséges eset megkapható.
- Az így létrejött modellek száma 17 db esetet és 7 féle alaprajzi geometriát eredményezett a további épületszimulációs vizsgálatok számára.

3.3. EDOPT: DINAMIKUS-TERMIKUS ÉPÜLETSZIMULÁCIÓS VIZSGÁLAT

Az EDOPT módszer további vizsgálatait során, az egyes energiacsoportba tartozó esetek termikus-dinamikus épületszimulációs vizsgálatait végeztem el.

A szimulációk során négy szintes, szintenként egyforma alaprajzú koncepció épületek modellezése történt. A modellezés klímazóna alapon, egybefüggő belső terekkel zajlott a kutatás jelen fázisában. Részletesebb modellezés bonyolult optimalizálási folyamatok időigényes szimulációk lefuttatásához vezet, melyeket kutatás későbbi feladatai során kell majd figyelembe venni. A kutatás első fázisában már az egyszerűsített modellek eredményeiből is lehet következtetéseket levonni és a már kiválasztott optimális modelle(ke)n javasolt csak a részletesebb kidolgozás. A cél egy alapkoncepció kifejlesztése volt, ahol elfogadható energetikai és komfort eredmények születtek órás bontásban egy évre nézve, figyelembe véve a helyi (Magyarország, Pécs) éghajlati és időjárás viszonyokat. Mindegyik épület ugyanazon szerkezeteket, üvegezést, gépészeti beállításokat és üzemeltetést kapták, az eredmények összehasonlíthatósága miatt. Miután a modellezés, és szimulációs beállítások elkészültek, következő lépésben az irodaszekciók homlokzati falazat-üvegezés arányának változtatása következett 30%, 50%, 70% és 90%-os arányban. Következő lépésben a modellek különböző tájolási beállításokat kaptak, a 8 fő égtáj felé (észak, észak-kelet, kelet, dél-kelet, dél, dél-nyugat, nyugat és észak-nyugat). A fő tájolás meghatározásánál az irodaszekció leghosszabb homlokzatának tájolása vettem. A WWR és tájolás változatoknak köszönhetően megnövekedtek az esetszámok, azaz $17 \times 4 \times 8 = 544$ db szimuláció elvégzésére került sor. A modellek termikus, dinamikus szimulációit az IDA ICE szoftverrel végeztem. Miután az 544 modell szimulációit lefutottak az eredmények kiértékelése következett. Az adatok eredményeinél egész épületre vonatkozóan néztem a hűtési, a fűtési, valamint az megvilágítási energiafogyasztás mértékét. Majd ezt követően egy általános igénybevételű, huzamosabb tartózkodású zónát választottam ki a komfortelemzések szempontjából, ami a 3. emeleti irodahelyiség lett. Az itt kapott operatív hőmérséklet, termikus komfortos órák számát és az általános természetes megvilágítottsági tényező (DF) padlófelületre vetített eloszlásának arányát (melynek értéke magasabb 1,7%-nál) elemeztem.

Az eredmények azt mutatták, hogy a geometria hat a leginkább fűtési energia teljesítményre, mely a legmeghatározóbb a teljes energiafogyasztás tekintetében jelen példa esetében. A hűtési és világítási energiafogyasztást pedig az iroda klímazónák WWR aránya befolyásolta leginkább. A tájolás jelen épületkoncepció esetében nem mutatott jelentős különbségeket, mely abból adódott, hogy minden homlokzat nagy mértékben üvegezett. A vizuális és termikus komfort tényezőkre leginkább a fal-ablak arány hatott, ezt követően kisebb mértékben a tájolás. A geometria szerepe nem befolyásolta a tényezőket, azonban a vizuális komfort eredményeinél volt szerepe a belső térszervezésnek.

3. Tézis: EDOPT módszer alkalmazásával létrejött épület esetek termikus-dinamikus épületszimulációiból kapott komfort és energetikai paraméterek alapján kiválasztható a legoptimálisabb eset. Ezenkívül az eredményekből következtetni lehet az épületgeometria és a térszervezés hatásáról irodaépület tervezés során, ahol kijelenthető, hogy a fűtési energiafogyasztást befolyásolja legnagyobb mértékben.

- Elvégeztem az algoritmus által generált modellek épületté alakítását és szimulációs beállítások optimalizálását. Ezt követően 544 szimulációt futtattam le.
- A kapott eredményekből megállapítottam, hogy az úgynevezett multifunkciós átrium koncepció irodaépületnél, általam alkalmazott beállítások mellett a geometria és térszervezés a fűtési energiamutatókra hatott legnagyobb mértékben és jól elkülönültek a különböző A/S hányados szerinti csoportok is.
- A hűtési, világítási energiafogyasztás és komfort mutatókat a tájolás, de legjelentősebb mértékben az üvegezési arány befolyásolta, a geometriának jelentős hatása nem volt rájuk.
- Mindazonáltal a térszervezés kis mértékben, de hatást gyakorolt a természetes megvilágítás mértékére, mely főleg olyan eseteknél volt tapasztalható, melyek a MAX A/S csoportba tartoztak. Azaz minél kisebb az energiahatékonyság, annál nagyobb szerepe van a térszervezésnek a vizuális komfort értékekre.
- A természetes megvilágítás értékei az 50 százalékos üvegaránynál nagyobbak voltak, mint a 70%-os esetben, ez a magasabban levő szemöldöknek volt köszönhető, ami a z 50%-os esetben 240 cm-en, a 70%-os verzióban pedig 210 cm-en volt.

3.4. EDOPT: SÚLYOZOTT SORREND FELÁLLÍTÁSA, OPTIMÁLIS MODELL KIVÁLASZTÁSA

3.4.1. Súlyozott sorrend meghatározása

A vizsgált energetikai igények és komfort paraméterek külön kiértékelését követően, egy súlyozásos módszert alkalmaztam, ahol az eredmények együttesen szerepeltek és határozták meg az optimális modellt. Ehhez először közös mértékegységre kellett hoznom az eredményeket. Az energiafogyasztás szempontjából egyszerű volt a feladat, mert ott minden eredmény kWh volt. A komfort eredményeknél azonban a komfortos órák száma órában volt meghatározva, míg a természetes megvilágítás mértéke %-ban. Ezért a komfortos órákat is át kellett alakítanom %-os mértékegységre, amit úgy hoztam létre, hogy összeadtam az operatív hőmérséklet III. kategóriát tartalmazó (elfogadható) komfort órák számát, és a IV. kategória (elfogadhatatlan) komfort órák számával. Ezáltal megkaptam az összes komfortóra számot, mivel a III. kategória tartalmazza az összehasonlításban vizsgált II. kategóriát (jó) és I. kategóriát (legjobb) is. Ezt követően kiértékeltem a II. kategória százalékos arányát az összes komfort órákhoz képest, így a hőkomfort értékeket is megkaptam százalékban.

Következő lépésben meghatároztam a súlyozási százalék mértékét az energiafogyasztásban és a komfort paraméterekben. Az energiaigény esetében összeadtam az összes modell világítási, hűtési és fűtési eredményeit, majd külön-külön átlagértéket számoltam. A világítási-, hűtési- és fűtési átlagot összeadtam, így megkaptam egy összátlag értéket. Ezt követően egyszerűen kiszámoltam, hány százalékát teszi ki az összátlagnak a világítási-, a hűtési és fűtési átlag érték. Így megkaptam az egyes energiafogyasztások súlyozásának mértékét, ami a fűtés esetében 67,5%, a hűtésben 22.2% és a világítási energiában 10.2% lett. Ezután növekvő sorrendbe állítottam a világítási-, hűtési- és fűtési fogyasztások eredményeit, ahol 1-es pontszámot kapott a legkevesebb fogyasztás és 544-et a legtöbb fogyasztás. Ezeket a pontszámokat megszoroztam a megfelelő súlyozás mértékével, majd összeadtam a súlyozott energia pontszámokat.

Az eredmények alapján megszületett a legtöbb és legkevesebb energiaszükségletű modell, melyek között csaknem 200.000 kWh különbség volt megfigyelhető, ami 24%-os különbséget jelentett.

Ugyanezzel a módszerrel meghatároztam a komfort értékek súlyozásos értékét is, ahol az összes II. kategóriát tartalmazó komfortos óra százalékát és a természetesen megvilágított terület arányának százalékát ($DF > 1,7$) átlagoltam, az átlagolt értékeket összeadtam és

meghatároztam a hőkomfort és vizuális komfort súlyozásos értékét. A hőkomfort 64,4%-os, míg a vizuális komfort 35,5%-os súlyt ért el. A komfort paramétereknél csökkenő sorrendet alkalmaztam, így a legmagasabb hő- és vizuális komfort érték kapta az 1-es pontszámot, míg a legalacsonyabb az 544-es pontszámot, majd ezen sorszámokat a súllyal való szorzást követően összeadtam. Ami a legkevesebb pontot kapta az lett a legmagasabb vizuális és termikus komfort értékekkel rendelkező modell.

3.4.2. Optimális modell kiválasztása

Végül már csak az energiafogyasztás és a komfort értékek összefésülése maradt hátra, melyek súlyozási értékét 50-50%-ban határoztam meg, ami azt jelenti, hogy sem az energetikai-, sem pedig a komfort paramétereket nem tartom fontosabb tényezőnek a másikkal, így logikus lépésként egyenlő mértékben súlyoztam őket. A súlyozás mértékén felhasználói preferenciák szerint lehet változtatni. Az összefésülés egyszerűen zajlott, minden egyes modell már rendelkezett súlyozott energetikai és komfort pontszámmal, ezeket a pontszámokat megszoroztam 50-50%-kal, majd összeadtam az így kapott pontokat. Az a modell, amelyik a legkevesebb pontot érte el, az lett az optimális megoldás alacsony energiafogyasztás és magas komfortszint teljesítménnyel. Az eredményül kapott optimális épületkonfiguráció az AVE csoport, 9.38 (9. geometria, 38. térszervezés) számú modellje lett, 50%-os üvegezési aránnyal északi tájolással. Éves összenergia fogyasztása 650.220 kWh, komfortos órák száma 2209 óra, 97%-kal és a vizuális komfort mértéke 53,6% volt. Ezzel szemben a legrosszabbul teljesítő modell az AVE csoport 3.2. (3. geometria, 2. térszervezés) számú konfigurációja lett, 90%-os fal-ablak aránnyal, délnyugati tájolással, ahol az éves energiafogyasztás 795.039,4 kWh, a komfortos órák száma 1815 óra, 79,71%-kal és a vizuális komfort értéke 58,5% volt.

Energiafogyasztásban a legjobb és legrosszabb épület között közel 18% különbség (150.000 kWh) volt tapasztalható, ami kb. 6.000.000.- Ft (kb. 15.000.- €) energiamegtakarítást jelent üzemeltetésben az optimális eset választása esetén éves szinten. Az optimálisnak választott modell termikus komfort órák tekintetében 17,8%-kal ért el kedvezőbb eredményt, azonban vizuális komfort szinten 9%-kal kevesebb értéket adott az utolsó helyen lévő épületmodellhez képest. Személyes preferenciák szerint mérlegelhető, hogy melyik tényező a fontosabb, az általam végzett vizsgálat során objektív súlyozásra törekedve állapítottam meg, melyik épületverzió szolgáltatja összességében a legjobb eredményt. A vizuális komfort különbség

mértékétől a termikus komfort kétszer jobb teljesítményt tudott nyújtani, jóval alacsonyabb energiafogyasztás mellett, így emiatt kijelenthető, hogy a 9.38-as épületverzió az optimális megoldás.

4. Tézis: Egy objektív súlyozási sorrend módszerének alkalmazásával a termikus-dinamikus szimulációk eredményeit, felhasználói igényeknek megfelelő komfort és energiafogyasztás együttes szempontjából képes az optimális épületeset kiválasztására és ezen túlmenően az n-legjobb eset sorrendjének meghatározására.

- Meghatároztam, melyek azok az épület geometriák, melyek energiafogyasztás és komfort szempontból is szélsőséges eredményeket adtak. Azonban a jelen kutatásban folytatott optimalizáció nem csak a legjobb és legrosszabb eredményű esetet kereste, hanem képes volt úgy sorrendet felállítani, hogy egy 2%-os eltérésen belül lehetőséget adott más épületek kiválasztására is, ha éppen adott modell összesített eredményei kedvezőbbek voltak.
- Továbbá meghatároztam, egyes épületfizikai paraméterek százalékos súlyát az épületet meghatározó összenergetikai mutatókban. Megállapítottam, hogy a fűtés 67,5%-ban a legmeghatározóbb értékű paraméter, majd ezt követi a hőkomfort, a vizuális komfort, a hűtési- és a világítási energiaigény.
- Ezt követően létrehoztam egy pontozásos rendszert, ahol sorrendbe állítottam az eredményeket komfort és összes energiafogyasztás szempontjából, ahol az értékeket a megfelelő súlyozásos százalékkal megszoroztam. Ezáltal egy objektív sorrendet állítottam fel, ahol az energia és komfort értékeket már össze lehetett fésülni.
- Megállapítottam, hogy jelent tervezési feladatban a fűtési energiaigény és a hőkomfort súlyozásos értéke volt a legmagasabb, ebből következtetve ezek eredményei hatottak legjelentősebb mértékben az épület összenergetikai sorrendjére.
- Miáltal a fűtési energiaigényre a geometria és a térszervezés hatott a legnagyobb mértékben, a hőkomfortra pedig az üvegezési arány, ezáltal megállapítható, hogy ezek a passzív tervezési stratégiák a legjelentősebbek a példafeladat esetében.

- Megállapítottam, hogy az optimális épület-modell geometriája meggyezett az algoritmus által generált legnagyobb számú épületgeometriával, ami a legkompaktabbnak mondható, a többi esethez képest.
- Megállapítottam, hogy az EDOPT módszer alkalmazásával, objektíven kiválasztható az abszolút optimális eset, ahol komfort-energia szerint meghatároztam a legkevesebb energiaigényű, legmagasabb komfortszinttel rendelkező épületverziót, ami azt bizonyította, hogy más felhasználói szempontrendszer szerint is elvégezhető az optimum kiválasztása.

4. VÉGSŐ EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Az EDOPT irodaépület tervezés optimalizációs fejlesztését, optimális épületverzió meghatározása céljából dolgoztam ki energiafogyasztás és komfort paraméterek alapján. Az összes lehetséges épületgeometria előállítható alaposan átgondolt és meghatározott építészeti szabályok szerint, modellgeneráló algoritmus alkalmazásának segítségével. Ezáltal a módszer további épülettervezések esetén is alkalmazható. A módszer kidolgozása nagyléptékű irodaépület esetén más módon történt, mint a kisléptékű, lakóház tervezés során, bár az elv és a cél hasonló volt: energetikailag és komfort szempontjából az összes lehetséges eset előállítása és az optimális verzió kiválasztása. A kutatás során teljesen más építészeti szabályokat kellett meghatározni, mint a kisléptékes fejlesztés során. A geometria generálást végző algoritmus 2 dimenziós, alaprajz szerű kombinációkat hozott létre, ahol nem csak a geometria, de a belső térszervezés is vizsgálva volt. Ehhez a megfelelő szabályok meghozatalára volt szükség, amivel oly módon szűkíteni tudtam a keresési teret, hogy mindössze 17 modellt eredményezett a további vizsgálatok számára. Ahhoz, hogy ezek az alaprajzok 3 dimenziós épületkonceptiókká válhassanak, meg kellett modellezni komplex energetikai- és komfort szimulációs vizsgálatok szempontjából, ahol passzív építészeti módszerek alkalmazásával (árnyékolás, WWR, tájolás) további épületverziókat hoztam létre. Összesen 544 esetre nőtt a vizsgált modellek és az elvégzett szimulációk száma, ahol hiteles energetikai teljesítményeket kaptam. Az optimális eset kiválasztását egy objektív súlyozásos módszer alkalmazásával végeztem el komfort és energiafogyasztási paraméterek alapján. A peremfeltételeket legjobban teljesítő eset a 9.38. számú épületmodell lett, 9. számú épületgeometriával, 50%-os fal-ablak aránnyal rendelkező

irodahelyiségekkel, északi tájolással, 428.128 kWh fűtési-, 139.620 kWh hűtési- és 82.472 kWh világítási energiaigénnyel, 2.209 óra „jó” minősítésű (II. kategória) komfortos órák számával és 53,6%-os természetes megvilágítási eredménnyel.

Jelen vizsgálat passzív épülettervezési stratégiák hatásaira összpontosított, mely aktív épületgépészeti rendszerek alkalmazásával egészült ki. Az eredmények alapján az épület forma hatott a legnagyobb mértékben a fűtési energiamutatókra, ami jelen tervezési feladat legmeghatározóbb teljesítménye volt. A belső térszervezés hatásai szintén a fűtési paraméterekre hatottak legnagyobb mértékben, valamint kisebb mértékben a vizuális komfort értékekre is befolyásossal bírt. A WWR legnagyobb mértékben a hő- és vizuális komfort eredményeket, valamint a hűtési és világítási energia mutatókat jellemezte. A tájolás leginkább a hő- és vizuális komfortra hatott, majd a fűtési paramétereket és attól kisebb léptékben a hűtési eredményeket is befolyásolta. A különböző értékű A/S csoportok a leginkább a fűtési-, hűtési- és komfort eredményekben különültek el.

Összességében megállapítható, hogy modellgeneráló algoritmus alkalmazása az építészeti tervezés során képes volt az összes potenciális esetet előállítani, melyekből az abszolút optimális modell kiválasztható. Ezenkívül a vizsgálat eredményeképpen meg lehetett határozni az épületgeometria és térszervezés hatásait és azok mértékét. Kijelenthető, hogy kulcsfontosságú szerepük van az energiafogyasztás és vizuális komfort mértékére. Az általam vizsgált további passzív építészeti stratégiák alátámasztották az eddigi kutatások eredményeit, melyek összességét alkalmazva jelentős optimalizálás végezhető az épülettervezés során.

5. KITEKINTÉS

Az értekezésben elemzett módszer kifejlesztésének első, kezdetleges fázisa lett bemutatva, ahol az 544 szimulációs vizsgálat manuálisan, egyenként volt elvégezve és kiértékelve. Ez igen időigényes feladat volt. Annak érdekében, hogy a módszert széleskörűen alkalmazni lehessen, a folyamatok gyorsítása szükséges, amit szimulációk elvégzését helyettesítő adatbázis kidolgozásával lehetne elérni. Ezen kívül egy automatizált módszer kifejlesztésével meg lehet oldani nagyszámú adatkezelési problémákat, amennyiben több modell felel meg a meghatározott peremfeltételeknek. E feladatra egy mesterséges neurális háló kifejlesztése jelenthet megoldást, mely képes volna további épületfizikai teljesítményeket befolyásoló

tényezők feltérképezésére, hogy ellenőrizni lehessen a modellgenerálás érvényességét. Az automatizálás során valószínűsíthető, hogy az eddig meghatározott építészeti szabályrendszer módosítása, illetve felülbíráltása szükséges. Továbbiakban a módszer által tervezett épület validációját el kell végezni, és mért valós adatokkal alátámasztani az eredményeket. Mindezek után egy tervezési segédlet kidolgozását lehet megtenni, mely szerepet vállal az építész képzésben és útmutatóként képes szolgálni az épülettervezésben.

6. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

FOLYÓIRATCIKKEK ANGOL NYELVEN:

- 2020. Comfort simulation supported sketch plan optimization of the University of Pécs, Medical school extension
POLLACK PERIODICA: AN INTERNATIONAL JOURNAL FOR ENGINEERING AND INFORMATION SCIENCES 15: 2 pp. 166-177. , 12 p. (2020)
- 2020. Energy simulation supported sketch plan optimization of the University of Pécs, Medical school extension
POLLACK PERIODICA: AN INTERNATIONAL JOURNAL FOR ENGINEERING AND INFORMATION SCIENCES 15 : 2 pp. 178-186. , 9 p. (2020)
- 2022. Algorithmic generation of building typology for office building design
BUILDINGS - Jelenleg elbírálás alatt (under review) (várható megjelenés 2022)
- 2022. EDOPT – Optimal office building design methodology for comfort and energy consumption
ENERGIES - Jelenleg elbírálás alatt (under review) (várható megjelenés 2022)

KONFERENCIA ELŐADÁSOK ANGOL NYELVEN:

- 2018. Optimization of sketch plan's building envelope and thermal mass with dynamic thermal and light building simulations – Modern Cities Program - 14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium

- 2019. Optimal office building design method elaboration using the Energy Design Synthesis method
15th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium
- 2020. Office Building Optimization Using the Energy Design Synthesis Method
InnoRenew CoE International Conference 2020, Izola, Szlovénia

OKTATÁSI SEGÉDANYAG ANGOL NYELVEN:

- 2015. High Performance Building (HPB) Design Approach, Master of Science in High Performance Buildings: Module 1, MCAST-Malta College of Arts, Science & Technology
- 2015. Building Climatology, Master of Science in High Performance Buildings: Module 2, MCAST-Malta College of Arts, Science & Technology

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] M. Norouzi, M. Chàfer, L. F. Cabeza, L. Jiménez, and D. Boer, "Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis," *J. Build. Eng.*, vol. 44, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102704.
- [2] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information," *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [3] A. Allouhi *et al.*, "Energy consumption and efficiency in buildings: Current status and future trends," *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 1–48, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [4] X. Cao, X. Dai, and J. Liu, "Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade," *Energy Build.*, vol. 128, pp. 198–213, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.089.
- [5] IEA (International Energy Agency), *2019 Global Status Report for Buildings and construction*. 2019.
- [6] Horváth Kristóf Roland, "Energia Design Szintézis – Az Energia Design módszertan

- kiterjesztése algoritmikus geometria generáló és predikciós modellek felhasználásával,” Pécsi Tudományegyetem, Breuer Marcell Doktori Iskola, doktori disszertáció, 2022.
- [7] S. Szekeres, A. Kostyák, F. Szodrai, and I. Csáky, “Investigation of Ventilation Systems to Improve Air Quality in,” *Build. Artic.*, vol. 12, no. 493, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/buildings12040493>.
- [8] R. Guo, P. Heiselberg, Y. Hu, C. Zhang, and S. Vasilevskis, “Optimization of night ventilation performance in office buildings in a cold climate,” *Energy Build.*, vol. 225, p. 110319, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110319.
- [9] R. Guo *et al.*, “Optimization of cool roof and night ventilation in office buildings: A case study in Xiamen, China,” *Renew. Energy*, vol. 147, pp. 2279–2294, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.032.
- [10] T. Lim, W. S. Yim, and D. D. Kim, “Analysis of the Thermal and Cooling Energy Performance of the Perimeter Zones in an Office Building,” *Buildings*, vol. 12, no. 2, pp. 1–15, 2022, doi: 10.3390/buildings12020141.
- [11] D. F. Espejel-Blanco *et al.*, “HVAC Control System Using Predicted Mean Vote Index for Energy Savings in Buildings,” *Buildings*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/buildings12010038.
- [12] X. Shan, N. Luo, K. Sun, T. Hong, Y. K. Lee, and W. Z. Lu, “Coupling CFD and building energy modelling to optimize the operation of a large open office space for occupant comfort,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 60, no. September 2019, p. 102257, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102257.
- [13] J. Kang, S. Weng, Y. Li, and T. Ma, “Study of Building Demand Response Method Based on Indoor Temperature Setpoint Control of VRV Air Conditioning,” *Buildings*, vol. 12, no. 4, p. 415, 2022, doi: 10.3390/buildings12040415.
- [14] Y. Wang, Z. Quan, H. Jing, L. Wang, and Y. Zhao, “Performance and operation strategy optimization of a new dual-source building energy supply system with heat pumps and energy storage,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 239, p. 114204, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114204.
- [15] M. Wang, L. Li, C. Hou, X. Guo, and H. Fu, “Building and Health: Mapping the

- Knowledge Development of Sick Building Syndrome,” *Buildings*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/buildings12030287.
- [16] X. Chen, H. Yang, and W. Zhang, “Simulation-based approach to optimize passively designed buildings: A case study on a typical architectural form in hot and humid climates,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. June 2017, pp. 1712–1725, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.018.
- [17] S. Stevanović, “Optimization of passive solar design strategies: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 25, pp. 177–196, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.04.028.
- [18] Z. Tian, X. Zhang, X. Jin, X. Zhou, B. Si, and X. Shi, “Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review,” *Energy Build.*, vol. 158, pp. 1306–1316, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.022.
- [19] S. Alghamdi, W. Tang, S. Kanjanabootra, and D. Alterman, “Effect of Architectural Building Design Parameters on Thermal Comfort and Energy Consumption in Higher Education Buildings,” *Buildings*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/buildings12030329.
- [20] F. Bano and V. Sehgal, “Finding the gaps and methodology of passive features of building envelope optimization and its requirement for office buildings in India,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 9, no. November 2018, pp. 66–93, 2019, doi: 10.1016/j.tsep.2018.11.004.
- [21] D. Maučec, M. Premrov, and V. Ž. Leskovar, “Use of sensitivity analysis for a determination of dominant design parameters affecting energy efficiency of timber buildings in different climates,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 63, pp. 86–102, 2021, doi: 10.1016/j.esd.2021.06.003.
- [22] G. S. Hausladen Michael; Liedl, Petra; Sager, Christina, *Climate Design*. 2005.
- [23] F. Cappelletti, A. Prada, P. Romagnoni, and A. Gasparella, “Passive performance of glazed components in heating and cooling of an open-space office under controlled indoor thermal comfort,” *Build. Environ.*, vol. 72, pp. 131–144, 2014, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.10.022.
- [24] E. D. Giouri, M. Tenpierik, and M. Turrin, “Zero energy potential of a high-rise office building in a Mediterranean climate: Using multi-objective optimization to understand

- the impact of design decisions towards zero-energy high-rise buildings,” *Energy Build.*, vol. 209, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109666.
- [25] T. Méndez Echenagucia, A. Capozzoli, Y. Cascone, and M. Sassone, “The early design stage of a building envelope: Multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis,” *Appl. Energy*, vol. 154, pp. 577–591, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.090.
- [26] A. R. Amaral, E. Rodrigues, A. R. Gaspar, and Á. Gomes, “A thermal performance parametric study of window type, orientation, size and shadowing effect,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 26, pp. 456–465, 2016, doi: 10.1016/j.scs.2016.05.014.
- [27] F. Feng, N. Kunwar, K. Cetin, and Z. O’Neill, “A critical review of fenestration/window system design methods for high performance buildings,” *Energy Build.*, vol. 248, p. 111184, 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.111184.
- [28] J. Zhao and Y. Du, “Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China,” *Sol. Energy*, vol. 206, no. September 2019, pp. 997–1017, 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.05.090.
- [29] M. David, M. Donn, F. Garde, and A. Lenoir, “Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 7, pp. 1489–1496, 2011, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.01.022.
- [30] A. I. Palmero-Marrero and A. C. Oliveira, “Effect of louver shading devices on building energy requirements,” *Appl. Energy*, vol. 87, no. 6, pp. 2040–2049, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.11.020.
- [31] S. . Magri Elouadjeri and H. Boussoulim, A.; Ait Haddou, “Evaluating the Effect of External Horizontal Fixed Shading Devices’ Geometry on Internal Air Temperature, Daylighting and Energy Demand in Hot Dry Climate. Case Study of Ghardaïa, Algeria,” *Buildings*, vol. 11, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/buildings11080348>.
- [32] J. González and F. Fiorito, “Daylight design of office buildings: Optimisation of external solar shadings by using combined simulation methods,” *Buildings*, vol. 5, no. 2, pp.

- 560–580, 2015, doi: 10.3390/buildings5020560.
- [33] R. A. Mangkuto *et al.*, “Design Optimisation of Fixed and Adaptive Shading Devices on Four Façade Orientations of a High-Rise Office Building in the Tropics,” *Buildings*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/buildings12010025.
- [34] Y. H. Lin, K. T. Tsai, M. Der Lin, and M. Der Yang, “Design optimization of office building envelope configurations for energy conservation,” *Appl. Energy*, vol. 171, pp. 336–346, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.03.018.
- [35] V. Granadeiro, J. R. Correia, V. M. S. Leal, and J. P. Duarte, “Envelope-related energy demand: A design indicator of energy performance for residential buildings in early design stages,” *Energy Build.*, vol. 61, pp. 215–223, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.02.018.
- [36] X. Chen, H. Yang, and J. Peng, “Energy optimization of high-rise commercial buildings integrated with photovoltaic facades in urban context,” *Energy*, vol. 172, pp. 1–17, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.01.112.
- [37] I. L. Vasileva, D. V. Nemova, N. I. Vatin, R. S. Fediuk, and M. I. Karelina, “Climate-Adaptive Façades with an Air Chamber,” *Buildings*, vol. 12, no. 3, p. 366, 2022, doi: 10.3390/buildings12030366.
- [38] C. Skaar, C. Lausset, H. Bergsdal, and H. Brattebø, “Towards a LCA Database for the Planning and Design of Zero-Emissions Neighborhoods,” *Buildings*, vol. 12, no. 5, p. 512, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/buildings12050512>.
- [39] Jani Mikkavaara and F. Shadram, “Improving Life Cycle Sustainability and Profitability of Buildings through Optimization: A Case Study,” *Buildings*, vol. 12, no. 4, p. 497, 2022.
- [40] T. Du, S. Jansen, M. Turrin, and A. van den Dobbelsteen, “Effect of space layouts on the energy performance of office buildings in three climates,” *J. Build. Eng.*, vol. 39, no. December 2020, p. 102198, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102198.
- [41] A. AlOmani and K. El-Rayes, “Automated generation of optimal thematic architectural layouts using image processing,” *Autom. Constr.*, vol. 117, no. April 2019, p. 103255, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103255.

- [42] T. Du, M. Turrin, S. Jansen, A. van den Dobbelsteen, and J. Fang, "Gaps and requirements for automatic generation of space layouts with optimised energy performance," *Autom. Constr.*, vol. 116, no. June 2019, p. 103132, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103132.
- [43] M. Almashaqbeh and K. El-Rayes, "Optimizing the modularization of floor plans in modular construction projects," *J. Build. Eng.*, vol. 39, no. November 2020, p. 102316, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102316.
- [44] L. Zhang, L. Zhang, and Y. Wang, "Shape optimization of free-form buildings based on solar radiation gain and space efficiency using a multi-objective genetic algorithm in the severe cold zones of China," *Sol. Energy*, vol. 132, pp. 38–50, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.02.053.
- [45] M. Kolokotsa, D.; Lilli, K.; Gobakis, K.; Mavrigiannaki, A.; Haddad, S.; Garshasbi, S.; Mohajer, H.R.H.; Paolini, R.; Vasilakopoulou, K.; Bartesaghi, C.; Prasad, D.; Santamouris, "Analyzing the Impact of Urban Planning and Building Typologies in Urban Heat Island Mitigation," *Buildings*, vol. 12, no. 5, 2022.
- [46] A. T. Nguyen, S. Reiter, and P. Rigo, "A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1043–1058, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- [47] S. Norouziasl, A. Jafari, and Y. Zhu, "Modeling and simulation of energy-related human-building interaction: A systematic review," *J. Build. Eng.*, vol. 44, no. February, p. 102928, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102928.
- [48] V. Machairas, A. Tsangrassoulis, and K. Axarli, "Algorithms for optimization of building design: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, no. 1364, pp. 101–112, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.11.036.
- [49] G. Laignel, N. Pozin, X. Geffrier, L. Delevaux, F. Brun, and B. Dolla, "Floor plan generation through a mixed constraint programming-genetic optimization approach," *Autom. Constr.*, vol. 123, no. November 2020, p. 103491, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103491.

- [50] B. Baranyai, B. Póth, and I. Kistelegdi, “Planning and research of smart buildings and constructions with the ‘energydesign roadmap’ method,” *Pollack Period.*, vol. 8, no. 3, pp. 15–26, 2013, doi: 10.1556/Pollack.8.2013.3.2.