



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**Festékérzékenyített napelem rendszer
használatának modellezése valós városi
környezetben**

Szerző: **Varga Zoltán**
Alkalmazott Matematika MSc. szak,
I. évfolyam

Konzulens: **Dr. habil. Rácz Ervin PhD**
egyetemi docens

Budapest, 2023.

Tartalom

1	Bevezetés.....	1
2	Szakmai bevezetés.....	3
2.1	Festékérzékenyített napelem cella.....	4
2.2	Festékérzékenyített napelemek építészetben való alkalmazhatósága	8
2.3	Festékérzékenyített napelem cellával kapcsolatos szimulációs munkák	10
3	Alkalmazott kutatás módszertan	12
3.1	Kutatásmódszertan	12
3.2	A tudományos munka gazdasági és társadalmi haszna	13
4	Elemzési módszerek és szimulációs eljárások	14
4.1	Tudományos munka szűkítése	14
4.2	Szimulációs megközelítés	15
4.2.1	Épületbe integrált DSSC által termelt villamos energia szimulációja	16
4.2.2	Épület villamos energia fogyasztásának szimulációja	18
4.2.3	Adatok kombinációinak analízise optimalizációs szempontból.....	20
4.3	DSSC hőleadó képességének szimulációja	22
4.3.1	Geometriák és anyag	22
4.3.2	Hővezetés	23
4.3.3	Turbulens áramlás	24
5	Eredmények.....	25
5.1	(i) és (iii) tudományos kérdésfelvetések megválaszolása	27
5.2	(ii) tudományos kérdésfeltevés megválaszolása	30
5.3	Végeselem szimuláció eredményei	32
5.4	Tudományos munkám elválasztása más tudományos eredményektől	33
6	Kitekintés	35
7	Eredmények összehasonlítása és saját hozzájárulás megkülönböztetése.....	36
7.1	Irodalmi áttekintés és újdonságok megállapítása	36

7.2	Saját kutatás eredményeinek bemutatása	36
8	Összefoglaló	38
9	Köszönetnyilvánítás	40
10	Irodalomjegyzék.....	41
11	Ábrajegyzék	48
12	Táblázatjegyzék.....	50

1 Bevezetés

A globális klímaváltozás során sok szó esik a megújuló villamosenergia-termelés kiaknázhatóságának lehetőségéről. A környezeti problémák további nyomást jelentenek (pl.: megnövekedett szén-dioxid kibocsátás) a mai társadalom energiafogyasztásának kielégítésében. A megújuló energiaforrások közül a legnagyobb figyelmet a napenergia, azon belül is a napelem kapta 2016-ban [1]. Néhány piaci elemző szerint 2050-re a napelem használata a 25%-ot is elérheti a villamosenergia-termelésben [2]. Jelenleg a szilícium alapú napelemek uralják (94%) a világ napelem piacát, de ezen dominanciát a vékonyréteg, köztük a festékérzékenyített napelem (angolul: Dye Sensitized Solar Cell, rövidítve: DSSC) megtörheti. Az említett napelemeknek nagy előnyük, hogy az építészetben kellően jól integrálhatók, használatuk egyes szerkezeti egység kiváltásával, befedésével is járhat. Ezáltal az épületek bizonyos szerkezeti egységei teljes egészében vagy részlegesen energiatermelő felületként működhetnek [3].

A festékérzékenyített napelem cellával kapcsolatban az első áttörő jellegű publikáció 1991-ben született O'Brian és M. Greatzel nevéhez fűződve, akik 7,1%-os hatásfokkal rendelkező cellát készítettek [4]. Érdemes megjegyezni, hogy a festékérzékenyített napelem cellával kapcsolatos kutatás azóta is jelentős mértékű. Számos olyan publikáció jelent meg, ahol a napelem cella villamos paramétereinek optimalizálását vizsgálták különböző módszerekkel. A DSSC téma területén tudományos eredményeimet az Intézményi Tudományos Diákköri Konferenciákon (TDK) és Országos TDK-n, valamint témavezetőmmel, Dr. habil. Rácz Ervinnel írt konferencia [5], [6] és folyóirat publikációkban [7], [8] szemléltettem. Korábbi tudományos munkáimban az alábbi tevékenységi köröket végeztem: kísérletek tervezése és elvégzése, statisztikai vizsgálatok, végelem szimulációk, gépi tanulási algoritmusok alkalmazása.

Az Óbudai Egyetem által elnyert Climate Action Connecting Europe (EUKI) pályázat keretében részt vettem egy kutatásban, mely során predikciókat készítettem a Budapestre telepíthető napelemekkel kapcsolatban. A pályázat lezárulta után a még felmerült kérdéseket és a korábban nem vizsgált területeket tanulmányozom tovább. A napelemek potenciális lehetőséget jelentenek a városi alkalmazhatóságban, mert hozzájárulnak a zöld villamosenergia-termeléshez, csökkentve a hálózati veszteséget és a szén-dioxid kibocsátást [9]. Az épületek szerkezeti egységei teljes vagy részleges módon energiatermelő felületként működhetnek. A festékérzékenyített napelem cella további nagy előnye, hogy transzparens,

ezáltal biztosítja a beltéri fényt és a bejutó elektromágneses sugárzásnak köszönhetően a belső tér természetes melegítését is. Rangos folyóiratokban jelentek meg publikációk vizsgálva az épületekbe integrált napelem rendszer technológiát (pl.: kinyerhető villamos teljesítmény) elemzését kísérleti és szimulációs módszerek alkalmazásával. Az áttanulmányozott irodalmak alapján még nem vizsgálták a festékérzékenyített napelem cella egy egész városi kerületen való használatának modellezését.

Ezúton céloomul tűztem ki, hogy szimulációs módszerek alkalmazásával megvizsgálom azokat a tudományos kérdésfeltevéseket, amelyek Budapest valamely olyan kerületének egy részére vonatkoznak, ahol a legtöbb irodaház található: (i) mennyi a kinyerhető villamos energia abban az esetben, ha az irodaépületek oldalfalait festékérzékenyített napelem modullal vonjuk be figyelembe véve a környezeti körülményeket (pl.: árnyékeffektus); (ii) mely oldalfalak bevonása a legoptimálisabb az egyes irodaépületek esetén az adott kerületben; (iii) az optimálisnak vélt oldalfalak hány százalékát biztosítják az épület villamosenergia-fogyasztásának.

Továbbá, céloomul tűztem ki, hogy az oldalfalakra integrált DSSC termikus hatását megvizsgáljam a napelem hátoldalára hővezető bordák integrálásával, ezzel növelve a napelem hőleadó képességét.

A jelen kutatási munkám egy komplex szemléletű, multidiszciplináris tevékenység. A tudományos kérdések megválaszolása nem csak a hazai és nemzetközi tudományos közegnek nyújt új tudományos eredményeket, hanem a valós piaci igényeket is kielégíti a festékérzékenyített napelem cella alkalmazhatóságának tekintetében.

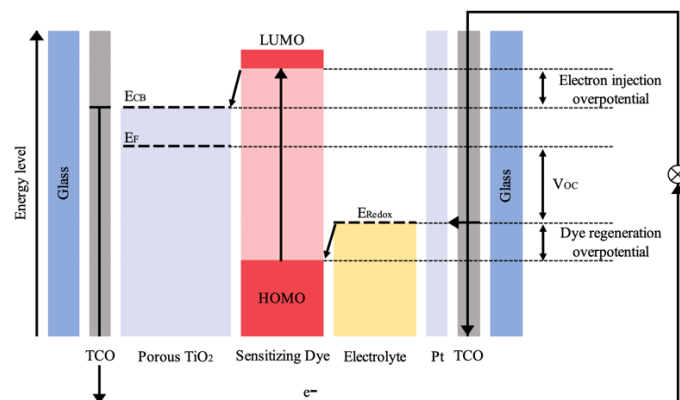
Személyes motivációm között szerepel, hogy hozzájáruljak a fenntartható és megújuló villamos energiatermeléshez és a környezetre gyakorolt káros hatások csökkentéséhez. Munkámmal törekszem, hogy globális referenciapont legyen a megújuló energiával kapcsolatos kutatásokban és innovációkban. A hosszú távú célom, hogy elősegítsem az energiaátmenetet a tiszta és fenntartható jövő felé, és hozzájáruljak a klímaváltozás elleni küzdelemhez.

2 Szakmai bevezetés

Az energiaellátásban egyre nagyobb teret nyernek az alternatív energiaforrások, hiszen a fosszilis energiahordozók kiaknázzható készletei végesek és égetésük során jelentős mértékben növelik az üvegházhatású gázok légkörben megjelenő koncentrációját [10]. Az egyik legjelentősebb üvegházhatású gáz, amit érdemes megemlíteni, a szén-dioxid, amely komoly klimatikai problémákat okoz úgy, mint átlagos hőmérséklet emelkedés, szélsőséges időjárások [11]. A technológia ugrásszerű fejlődésének köszönhetően számos alternatív energiaforrás hasznosítása létezik, köztük a napenergia. A napenergia az egyik legfontosabb megújuló energiaforrás, melyet hőenergia és villamos energia formájában tudunk kinyerni [12]. A napból érkező elektromágneses sugárzást közvetlenül villamosenergiává alakító eszköz a napelem (angolul photovoltaic, rövidítve: PV), mely nagyon vonzó mind hazai, mind nemzetközi szinten, hiszen gyártástechnológiától függően az élettartama 20-25 évre becsült, és más eszközökhöz képest elhanyagolhatóan kevés karbantartást igényel [13]. A napelemek egyik legszélesebb körben használt csoportosítási formája az alapanyag szerinti felosztás, mely esetén négy nagy csoportot definiálhatunk [14]: (i) a kristályos szilícium alapú napelemek csoportja, mely a hétköznapi felhasználás tekintetében az egyik legelterjedtebb (pl.: egykristályos, többkristályos, heteroátmenetes); (ii) a különböző típusú vékonyréteg napelemek, melyek közül az egyik legelterjedtebb a amorf szilícium alapú napelemek; (iii) speciális alkalmazási területeken (pl.: űrkutatás) előforduló napelemek (pl.: gallium-arzenid), melyek legnagyobb előnye, hogy a korábban említett napelemekhez képest magasabb a hatásfokuk, de ezzel szemben előállításuk drágább; (iv) kutatási-fejlesztési fázisban lévő napelemek (pl.: festékérzékenyített napelemek, perovszkit napelemek) [15]. Malinoswki és munkatársai tudományos publikációjukban vizsgálták a napelem típusok világpiacon eladott arányát. Kutatásukból kitűnik, hogy a világpiacot a monokristályos napelemek uralják 69%-kal, majd ezt követi a polikristályos napelemek 24%-kal, majd kadmium-tellurid, amorf-szilícium és egyéb napelemek a korábbiakhoz képest jóval alacsonyabb részesedéssel [2]. Egyes tudományos publikációk alapján a festékérzékenyített napelem cellák megtörhetik a szilícium alapú napelemek dominanciáját. A DSSC nagy előnye, hogy a transzparenciájának köszönhetően az építészetben kellőképpen jól integrálható. Ugyanis az épületek bizonyos szerkezeti egységei teljes egészében vagy részlegesen energiatermelő felületként működhetnek [16].

2.1 Festékkérzékenyített napelem cella

A festékkérzékenyített napelem cellával kapcsolatos első áttörő kutatás 1991-ben jelent meg, amely O'Brian és M. Greatzel nevéhez kötődik, akik publikációjukban 7,1%-os hatásfokot értek el [4]. Az említett hatásfok értéket 1993-ban bemutatott publikációjukban megdöntötték (9,6 %) [17] majd Sharma et al. 1997-ben 10%-ot értek el [18]. Az áttanulmányozott irodalmak alapján az eddig elért világ rekord 14%, melyet Greatzel mutatott be a Hybrid and Organic Photovoltaic konferencián [19]. A hagyományos szilícium alapú napelem cella 5 fő alkotóelemet tartalmaz, amelyek (i) a vezetőképessé üveghordozó (TCO: transparent conductive oxide); (ii) a TCO-ra felvitt n-típusú félvezetőréteg, jellemzően titán-dioxid (TiO_2); (iii) a TiO_2 rétegre abszorbeált festékanyag (Sensitizing Dye), jellemzően ruténium alapú festékanyag; (iv) jodid-trijodid (I^-/I_3^-) elektrolit oldat; (v) ellen elektród platina (Pt) réteggel [5]. Az 1. ábra szemlélteti a festékkérzékenyített napelem cellát fő alkotóelemeivel és energia diagramjával. Az elektromágneses hullám hatására a DSSC festékmolekuláinak belső energiája megnő, majd ennek következtében a festékmolekula elektront ad át a titán-dioxidnak. Az elektrontranszfert követően a festékmolekula oxidált állapotba kerül. Az átadott elektron a titán-dioxid struktúrájában diffundál az elektródáig, ahonnan kilép az áramkörbe. Az oxidálódott festékmolekula regenerálódik az elektrolitból felvett elektron által. Az elektrolit oldatban lévő ionok szerepe, hogy a cella működési ciklusa folyamatosan ismétlődhessen. Ideális esetben az üresjárási feszültség (V_{OC}) a félvezető réteg elektronjainak Fermi- szintje és az elektrolit redox-potenciálja közötti potenciálkülönbség határozza meg (ábra alapján $E_{\text{F}} - E_{\text{redox}}$) [20].



1. ábra. Festékkérzékenyített napelem cella energia diagramja az elektronáramlás irányával, ahol a világoskék az üvegnak felel meg, a szürke részek az átlátszó vezető oxidnak (TCO), a világoslila a titán-dioxidnak (TiO_2) és a platinának (Pt), a vörös rész képviseli a festékanyagot, ahol HOMO a legmagasabban foglalt molekula orbitalt (HOMO: Highest Occupied Molecular Orbital) és a LUMO a legalacsonyabban nem foglalt molekula orbitalt (LUMO: Lowest Unoccupied Molecular Orbital) jelenti, és a világossárga az elektrolit oldatot jelenti [8].

Az elmúlt évtizedben intenzív kutatási tevékenység folyt a DSSC hatásfokának optimalizálása érdekében, különös tekintettel a különböző komponensek módosítására. A titán-dioxid félvezető anyag tiltott-sávszélességével (3,2 eV) megegyező anyagok használatával kísérleteztek úgy, mint cink-oxid (ZnO) [21], kén-oxid (SnO₂) [22], nióbbium-pentoxid (Nb₂O₅) [23]. Mindezen anyagok mellett más fajta elektród struktúra kialakításán is végeztek kísérleteket csak úgy, mint nano cső [24], nano rudak [25], nano vezetékek [26] annak érdekében, hogy növeljék az elektron transzportot az anyagban. Mindezek mellett további olyan tanulmány is született, mely során lítium és guanidínium kationok adalékanyagot kötöttek a titán-dioxid felületéhez annak érdekében, hogy pozitívan mozdítsák el a vezetési sáv szélét nagyobb elektroninjekciót és magasabb áramsűrűséget eredményezve [27]. A fényérzékenyített festékanyag megfelelő kiválasztásával szemben számos követelmény támasztottak a kutatók, melyek közül hármat emelnék ki: (i) széles fényabszorpciós képesség a ultraviola (UV) és közeli infravörös (NIR) hullámhossz tartományon; (ii) a gerjesztett állapotban lévő festékanyag energiaszintjének magasabbnak kell lennie, mint az n-típusú félvezető oxid vezetési sávjának széle az elektron injektálás (átadás) érdekében (iii) a napelem működési körülmények közötti stabilitás [28]. A polibipiridil ruténium (Ru) komplexek, amelyekből nagy stabilitással és észrevehető hatásfokkal lehet DSSC napelemet készíteni [29]. A jól ismert N3 és N719 festékek alapfontosságú (standard) festékanyagokká váltak, melyekből más ruténium festékkérzékenyítők fejlesztésre kerültek a ligandumok újra tervezésével [30]. Például az N749 festék kicseréli az N3 és N719 festékek két bipiridiljét és két tiocianát csoportját egy terpiridinnel és három tiocianát csoporttal, ami a fény elnyelési képesség vörös irányba történő eltolódásához vezet [31]. A természetes festékanyagokat felhasználó napelemek készítése és fejlesztése ugyancsak a napelem cella kutatások fókuszában áll. A témában írt publikációkból kiderül, hogy e típusú napelemek villamosenergia-termelési hatásfoka még alacsonyabb a ruténium alapú festékanyagokból készült DSSC-k hatásfokánál. Az elérhető hatásfok természetes alapanyagú festékanyagból készített DSSC-vel 1-2% [32]. Hasonlóan a festékanyaghoz, meghatározó kutatás folyik az elektrolit oldat fejlesztésén, hiszen fontos szerepet tölt be az oxidált állapotú festékanyag regenerálásban. Greatzel és munkatársa által 1991-ben bemutatott festékkérzékenyített napelem cellában használt jodid/trijodid (I^-/I_3^-) elektrolit oldószer még mindig széleskörben népszerű tervezési választás, tekintettel a gyors regenerációra az oxidálódott festék és az iodid között [33]. A jodid/trijodid alapú elektrolit rendszereket alternatívával próbálnak helyettesíteni úgy, mint ferrocén/ferrocénium ($Fe^{0/I}$) [34], $Ni^{III/IV}$ [35], de az általuk eredményül kapott cellák hatásfoka alacsonyabb a hagyományos DSSC-hez

képest, a gyors rekombinációs kinetika miatt [36]. A szilárd és gél elektrolit szerkezet kutatási is intenzíven folyik a cellák mechanikai stabilitásának növelése érdekében.

Továbbá, a tudományos publikációk között fellelhető egyéb optimalizálási vizsgálat is a DSSC-vel kapcsolatban. A beeső elektromágneses sugárzásnak nem csak fotoelektromos hatása, hanem hőhatási is van, mely rontja a napelem villamos teljesítményét. A hőhatást a cella hátoldaláról elvezetve, a hőt hasznosítva, Seebeck-effektussal villamos energiát lehet termelni. A hő hasznosítása termoelektromos generátor segítségével lehetséges. Ilyen fajta vizsgálatot korábbi ÚNKP munkám keretén belül végeztem. A laboratóriumi kísérleteimre alapozva kültéri, valós nyári körülmények közötti kísérleteket terveztem meg és hajtottam végre. A kísérletekből származó adatokat begyűjtöttem, feldolgoztam és négy gépi tanulási algoritmust alkalmazva – Decision Tree Regression, Random Forest Regression, K-Nearest Neighbors Regression, Artificial Neural Network – adataimat elemeztem, ahol a bemenő paraméterek a DSSC napelem cella hőmérséklete, a beeső fény intenzitása, és a termoelektromos generátor két oldala között mért hőmérséklet-különbség. A vizsgálatom során a kimenő paraméter a teljesítménysűrűség volt. Az alkalmazott gépi tanulási algoritmusokat öt mutató alapján hasonlítottam össze. Eredményül azt kaptam, hogy a döntési fa regresszió (Decision Tree Regression) a legpontosabb jóslás a teljesítménysűrűsége. Munkámmal bebizonyítottam, hogy 2,8%-os növekedés is elérhető a villamos teljesítmény esetén [7].

A festékkérzékenyített napelem cella működésének mélyebb megértése érdekében elengedhetetlen a hozzájuk kapcsolódó fizikai egyenletek megismerése. Az alább bemutatásra kerülő egyenletek segítenek megérteni, milyen szerepet játszik a beeső fény tulajdonsága, mint az intenzitás és a foton beütésszám, valamint a hőmérséklet a napelem működési mechanizmusában. A festék-félvezető-elektrolit szerkezetet homogén közegként tekinthetjük egyenletes abszorpciós hullámhossz-spektrummal vagy abszorpciós együtthatóval, $(\alpha(\lambda))$, mivel a félvezető és az elektrolit $\alpha(\lambda)$ elhanyagolható [8]. A Beer-Lambert törvény leírja a fény abszorpciójának arányosságát az anyag koncentrációjával és az áthaladó fény útjának hosszával [37]. Az n-típusú félvezető rétegre adszorbeált festékanyag optikai paraméterei (pl.: abszorpció-hullámhossz spektrum), fotogenerációs ráta G_e , erősen befolyásolják a napelem villamos áram-feszültség karakterisztikáját.

Az (1) egyenlet írja le a fotogenerációs rátát az anyag mélységének függvényében, ahol a $\phi(\lambda)$ a foton beütésszám-hullámhossz függvény, a x az anyag mélysége.

$$G_e(x) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} d\lambda \quad (1)$$

Az abszorpció-hullámhossz spektrum meghatározható úgy, mint $\alpha(\lambda) = \frac{A_{abs}(\lambda)}{d}$, ahol az $A_{abs}(\lambda)$ tovább kifejezhető, mint $A_{abs}(\lambda) = -\ln \left[\frac{T(\lambda)}{I(\lambda) - R(\lambda)} \right]$, ahol $T(\lambda)$ a transzmisszió-hullámhossz spektrum, a $I(\lambda)$ az intenzitás-hullámhossz spektrum és $R(\lambda)$ a reflexió-hullámhossz spektrum. Sven Södergren et al. és társai elméleti úton vizsgálták a fotoelektrokémiai viselkedést a DSSC elektródák nanoszerkezetében [38]. Az eredményül kapott egyenlet az elektron transzportra, az elektron rekombinációra és az elektron fotogenerációra vonatkozik a vékonyrétegben, melyet a (2) egyenlet szemléltet.

$$D \frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2} + G_e(x) - \frac{n(x) - n_0}{\tau} = \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2)$$

ahol $n(x)$ az elektron koncentráció száma az anyag mélységének függvényében, az n_0 az elektron koncentráció a sötétben, a D a diffúziós együttható, a τ az elektron élettartam és t az idő. A kontinuitási egyenletet stacionárius állapotba felírva, illetve $n(0) = 0$ és $\left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=d} = 0$ peremfeltételeket tekintve a kapott egyenlet az alábbi:

$$V = \frac{k T}{q} m \ln \left[\frac{L (J_{sc} - J)}{q d n_0 \tanh\left(\frac{d}{L}\right)} \right] \quad [39] \quad (3)$$

ahol q az elektron töltés, d a vékonyréteg vastagsága, m az idealizált faktor, T az abszolút hőmérséklet, k a Boltzmann-állandó és L a diffúziós úthossz. Az (1) és a (3) egyenletek alapján megállapítható, hogy a napelem teljesítményét nemcsak az anyag minősége határozza meg, hanem a hőmérséklet (T) és a beeső elektromágneses sugárzás jellemzői ($T(\lambda)$), ($R(\lambda)$), ($I(\lambda)$). Ezen külső paraméterekkel kapcsolatos vizsgálatokat már korábbi munkásságom során megvizsgáltam kísérletek elvégzésével, adatok begyűjtésével, majd azok feldolgozásával. Pilot kutatás keretein belül megvizsgáltam a festékérzékenyített napelem cella villamos paramétereit úgy, mint az üresjárási feszültség (U_0), rövidzárási áram (I_0), maximális teljesítmény (MPP) a napelem cella hőmérséklet-függvényében, majd a beeső fény intenzitásának függvényében. Eredményül azt kaptam, hogy az U_0 és MPP villamos paraméterek növekedő tendenciát mutatnak a hőmérséklet csökkenésére. Továbbá, a I_0 paraméterek növekedő tendenciát mutatnak a hőmérséklet csökkenése esetén [40], [6]. A beeső fény intenzitás vizsgálata során kapott eredményeim: minél nagyobb a beeső fény foton beütésszám numerikus integrálja, annál magasabb a várható villamos teljesítmény értéke [6]. Továbbá, statisztikai vizsgálatokkal korrelációs stratégiát alkalmazva megvizsgáltam az $U_0(T)$ függést, mely eredményeképpen azt kaptam, hogy az U_0 és T közötti kapcsolat közepes erősségű a vizsgált hőmérsékleti tartományon belül ($\tau_B = -0,528$). Továbbá, más kutatók tudományos publikációból kiderül,

hogy a DSSC hatásfoka diffúz megvilágítás esetén kevésbé csökken a közvetlen besugárzáshoz képest. Lepikko és munkatársai festékérzékenyített napelemek viselkedését tanulmányozták valós, északi környezeti feltételek között. A cellák 6 hetes kinti tesztelési időszakában több időjárási változó befolyásolta a cellák működését és az eredményeikből kimutatták, hogy a melegebb, csapadékos (esős) körülmények között, különösen a magas páratartalom során figyelhető meg intenzív romlás, degradáció. A tanulmány rámutatott, hogy a páratartalom kritikus faktor a cellák degradációjában. Továbbá bebizonyították, hogy a cellák valós körülmények között alacsony fényintenzitás mellett jobban teljesítenek, mint a szabványos tesztelési körülmények között [41]. Az említett tulajdonságot a napelemek építészeti integrációjának szempontjából kiemeleten előnyösen hasznosítják.

2.2 Festékérzékenyített napelemek építészetben való alkalmazhatósága

A DSSC nemcsak a diffúz megvilágításra adott kellően magas hatásfokának, de a transzparenciájának köszönhetően az építészeti kialakításokban is egyre nagyobb teret nyer. A DSSC építészetbe való integrálhatósága új dimenziót nyer a fenntarthatóság esetén. Tripathy és munkatársa alapján az épületbe integrált fotovoltaiikus piac szerint a globális telepítési kapacitás jelentősen növekedni fog [42]. A 2. ábra szemlélteti a festékérzékenyített napelem építészetben való integrálhatósági lehetőségeit, ahol a bal oldali ábra egy kísérleti elrendezést mutat teszt közben, a jobb oldali pedig egy működő rendszert szemléltet. Martín-Chivelet és munkatársai rámutattak arra, hogy a DSSC épületbe való integrálhatósága következtében az épület villamos energiaigénye csökkenhet és normalizálódhat, különösen nyáron, amikor az épület felületi hőmérséklete elérheti a 40 °C-ot [43]. Továbbá, a rendszer időjárás elleni védelmet és hőszigetelést is biztosít [44]. Számos kutató foglalkozik a napelemek épületekbe való integrálhatóságával. Érdeemes megjegyezni Hagar és munkatársai publikációját, ahol az integrált fotovoltaiikus rendszer elektromos és hő tulajdonságait vizsgálták. Az általuk javasolt numerikus szimulációban a rendszer dinamikus hőviselkedését értékelték. Eredményeik szerint a havi fűtési energiaigény 20-30%-kal csökkent [3]. Lee és munkatársai empirikus úton vizsgáltak a Climate Change Research Building of National Environment Research Institute épületbe integrált (BIPV: Building Integrated Photovoltaic) napelem rendszert. Az épületbe több típusú napelem rendszer került rögzítésre, de jellemzően polikristályos és amorfszilícium napelemek. Az elemzésükből kiderül, hogy 2449 m² területnyi kutatóintézet 1668 m² terület napelemekkel való bevonása zéró-emissziójú épületet eredményezett [45]. Hyo Mun Lee és munkatársa két évig tartó vizsgálatból származó mérési eredményeket elemezték

festékrézékenyített napelem épületbe integrált ablakairól (2. ábra bal oldali ábrája). Elemzésükből azt kapták, hogy a függőleges ablakok teljesítményhatékonysága általában magasabb, mint a ferde ablakoké, kivéve a magas napsütéses körülmények között. Az elemzésből az is kiderül, hogy a függőleges ablakok a ferde ablakoknál jobb teljesítmény nyújtanak alacsony fényintenzitás mellett [46].



2. ábra: Festékrézékenyített napelem cella építészetbe való integrálhatósága, ahol a bal oldali ábra egy kísérleti elrendezést szemléltet, a jobb oldali ábra egy működő rendszert ábrázol, ahol az ablakok előtt elhelyezkedő színes ablak üvegek a festékrézékenyített napelem cellák [46].

Mindezek mellett, más kutatók is empirikus vizsgálatokat végezve vizsgálták a festékrézékenyített napelem épületbe integrálhatóságát [47], [48]. Yuan és munkatársai kültéri körülmények között tesztelték a napelemeket különös figyelmet fordítva a napelem öregedésére. A vizsgálatot több, mint négy évig végezték, ami az egyik leghosszabb ilyen jellegű teszt az áttanulmányozott irodalmak alapján. A Z991 és a Z907 festékekkel készült festékrézékenyített napelem cellákkal végezték a vizsgálatot. Az elemzésekből megállapításra kerültek, hogy az első két évben évente körülbelül 15%-kal több villamosenergiát termeltek a Z991-es festékanyaggal készült napelemek, mint a Z907-es festékanyaggal készült DSSC-k. Majd az említett különbség megnövekedett a vizsgálat során és a négyéves kültéri teszt végére a Z907-es festékekkel készült festékrézékenyített napelem cella használhatatlanná vált. Továbbá, kutatásuk rámutatott arra, hogy a festékrézékenyített napelem cella villamos teljesítményének növekedése nem lineáris a besugárzás növekedésével [49].

A Palermo Egyetem kutatói szimulációs technikával megvizsgálták az üvegbe (ablaküvegbe) integrált DSSC optikai teljesítményelemzését, melyhez OptiCAD szoftvert numerikus szimulációk elvégzéséhez alkalmazták. Tanulmányukban az általuk megalkotott Hyp.4 üveg a mutatta a legjobb eredményt fotovillamos és szigetelési szempontokból [50]. Más kutatók ugyancsak az üvegfelület elé helyezett napelemet vizsgálták annak épület belső fűtési

és hűtési igényeinek szempontjából. A tanulmány egy ausztráliai irodai épület északi homlokzatára integrált napelemeket (amorf-szilícium alapú, DSSC és Perovszkit napelemek) vizsgál. A lefuttatott szimulációkból kiderül, hogy a homlokzat ilyen napelemekkel történő bevonása jelentősen hozzájárul a irodaépület teljes energiafogyasztásának csökkentéséhez [51]. Hyun és munkatársai vizsgálták a festékérzékenyített napelem technológiával készült épületbe integrált fotovoltaiikus ablakok villamos energia fogyasztását különböző éghajlati zónákban (Phoenix, Miami, San Francisco, Ann Arbor). A tanulmány figyelembe veszi a fűtési, hűtési és világítási energiaigények eltérőek az egyes éghajlatok esetén. Továbbá, a tanulmány a különböző világítás-szabályozási módszerekkel éghajlati zónákkal összefüggő energiafogyasztást értékeli. Az eredmények hangsúlyozzák a DSSC napelem fejlesztésének szükségességét a napelem hatásfokára nézve [52]. Mindezek mellett a napelem kutatás az utóbbi évtizedben a mesterséges intelligencia felé is elmozdult. Rangos folyóiratokban jelentek meg publikációk különböző légyszámítási módszerek alkalmazásával kapcsolatban [7]. Pereira és munkatársa az irodaépület homlokzatába integrált napelem rendszer hatékony optimalizálását genetikus algoritmusok alkalmazásával elemzik [53]. Az áttanulmányozott irodalomból jól látszódik, hogy a napelemek épületekbe való integrálhatósága kellően nagy teret nyert az elmúlt időben. Meglévő rendszerek tesztelése és új rendszerek megalkotása a hazai és nemzetközi kutatások előterében áll. Korábban említésre került, hogy a DSSC hatásfoka diffúz megvilágítás esetén kevésbé csökken a közvetlen besugárzáshoz képest, amely tovább növeli a városi alkalmazhatóságát a DSSC napelemnek. Mindezek mellett, az eredmények arra is rámutatnak, hogy az épületbe integrált DSSC-k esetén nagyobb beépített területre van szükség, hogy azonos beépített kapacitást érjenek el, mint a hagyományos kristályos szilícium alapú napelemekkel.

Továbbá, az átfogó irodalomkutatást követően megállapítottam, hogy a DSSC BIPV tématerületen számos empirikus tanulmány készült. Ugyanakkor a meglévő szimulációs vizsgálatok még nem elemzik a festékérzékenyített napelem cella városi környezetben való alkalmazásának specifikációját.

2.3 Festékérzékenyített napelem cellával kapcsolatos szimulációs munkák

A napelemek terén végzett széleskörű szimulációs kutatás született. E kutatási területen elvégzett legújabb tanulmányom egy impakt faktorra nem rendelkező, de nemzetközileg elismert folyóiratban került publikálásra, ahol a festékérzékenyített napelem cella optikai egyenleteire alapozva vizsgáltam az üresjárási feszültséget végelem szimulációkkal [8]. Gagliardi és munkatársai végelem szimulációkkal kezdetben egy dimenzióban [54], majd

több dimenzióban (kettő és három) vizsgálták a festékérzékenyített napelem cella villamos paraméterei [55]. Guo és munkatársai COMSOL szimulációs környezetben végeztek optikai és elektromos szimulációkat a DSSC villamos paramétereit vizsgálva [56]. Chen és munkatársai által készített munka a festékérzékenyített napelem cella hőteljesítmény analízisről szól, melyet numerikus modellezéssel oldottak meg. A tanulmány arra fókuszál, hogy megvizsgálja a hőmérséklet befolyását a DSSC hatékonyságára vonatkozólag. A szimulációkból származó eredményeket összevetették kísérleti adatokkal [57]. Arifin és munkatársai hagyományos kristályos alapú napelemek hátoldalára integrált passzív hűtőborda rendszer termikus viselkedését vizsgálták. A passzív hűtési technika esetén 15 bordás, rézbázisú hőelvezetőt alkalmaztak. A hűtőrendszert a Navier-Stokes egyenlet alkalmazásával vizsgálták szimulációs környezetben, majd eredményeiket összehasonlították kinti körülmények között elvégzett kísérleti eredményekkel. Eredményeikből megállapították, hogy a napelem hőmérséklete 10,2 °C-kal csökkent, amely 2,74%-os hatásfok emelkedést eredményezett. Ezzel bebizonyították, hogy a bordás hőelvezetők használata potenciális megoldást kínálhat a fotovoltaiikus panelek hatásfokának növelésére [58]. Tekintettel arra, hogy a korábban említett folyóirat publikáció fókuszpontjába nem a festékérzékenyített napelem cella állt, hasznos információkat biztosít a DSSC hőelvezetésének szimuláció során. Muhammad és munkatársai a festékérzékenyített napelem cella optikai egyenleteire alapozva meghatározták a napelem villamos áram-feszültség karakterisztikáját, majd szimulációs technikákkal vizsgálták a karakterisztikát a cella hőmérsékletének függvényében [59].

Az irodalmi áttekintés elemzéseiből arra a következtetésre jutottam, hogy a DSSC termikus analízisével kapcsolatos szakirodalmak számossága kiemelten magas. Ennek ellenére a DSSC hátoldalára integrált hőelvezető bordák alkalmazásával végzett szimulációkat nem végeztek. Ez a megállapítás egy új kutatási hiányosságot tárt fel.

3 Alkalmazott kutatás módszertan

Az alkalmazott kutatás módszertani részben bemutatom célkitűzésem, a kutatómódszertant, valamint tudományos munkám gazdasági és társadalmi hasznosulásának lehetőségeit.

Tekintettel arra, hogy az áttanulmányozott irodalmakban a festékérzékenyített napelem cella városi környezetben való alkalmazásának specifikációját nem vizsgálták *célomul tűztem ki, hogy szimulációs módszerek alkalmazásával megvizsgálom Budapest valamely olyan területének egy részére vonatkozólag, hol a legtöbb irodaház található az alábbi tudományos kérdésfelvetéseket:*

- (i) *mennyi a kinyerhető villamos energia abban az esetben, ha az irodaépületek oldalfalait festékérzékenyített napelem modullal vonjuk be figyelembe véve a környezeti körülményeket (pl.: árnyékeffektus);*
- (ii) *mely oldalfalak bevonása a legoptimálisabb az egyes irodaépületek esetén az adott területben;*
- (iii) *az optimálisnak vélt oldalfalak hány százalékát biztosítják az épület villamosenergia-fogyasztásának.*

Továbbá, célomul tűztem ki, hogy az oldalfalakra integrált DSSC termikus hatását megvizsgáljam a napelem hátoldalára hővezető bordák integrálásával, ezzel növelve a napelem hőleadó képességét.

3.1 Kutatómódszertan

A jelen TDK munkám a korábbi TDK munkámhoz képest –, ahol kísérleteket, próbaméréseket, majd a kívánt kísérleteket elvégeztem, az adatokat begyűjtöttem és feldolgoztam– merőben eltér. Az említett fő célkitűzés megvalósításához szimulációk végzését végeztem, majd a szimulációkból származó adatokat begyűjtöttem és további alkalmazott informatikai módszerekkel adataimat feldolgoztam. Szimulációkat végeztem az épületek egyes oldalfalaira telepíthető festékérzékenyített napelemek villamos energia meghatározására az idő függvényében, melyhez a PV*SOL szimulációs környezetet alkalmaztam. A szimulációk elvégzése során figyelembe vettem az árnyékeffektust és egyéb veszteségi tényezőket. Mindezekkel párhuzamosan az épületek villamosenergia-fogyasztásának szimulációját is elvégeztem, melyhez az OpenStudio szoftvert alkalmaztam. Végül python scriptet

fejlesztettem, amely a szimulációkból származó adatokat kiértékeli és a célkitűzésben megfogalmazott tudományos kérdésfelvetéseket megvizsgálja.

Munkám második szimulációs vizsgálata során, a modell elkészítéséhez és szimulációk lefuttatásához COMSOL-t Multiphysics szoftvert használtam. A COMSOL-t gyakran használják különféle eszközök hőelemzéséhez. A szimuláció 3D sémában történt, numerikusan megoldott csatolt modelleken keresztül. Másrészt a szimulációban stacionárius feltételek alkalmaztam, ami azt jelenti, hogy a hőátadás során a hőmérséklet nem változik az idő múlásával; a folyadékdinamika szempontjából a folyadék áramlása nem változik az idő múlásával. Számos áttanulmányozott irodalomban a stacionárius állapot kedvez a szimulációkban [58], [60].

3.2 A tudományos munka gazdasági és társadalmi haszna

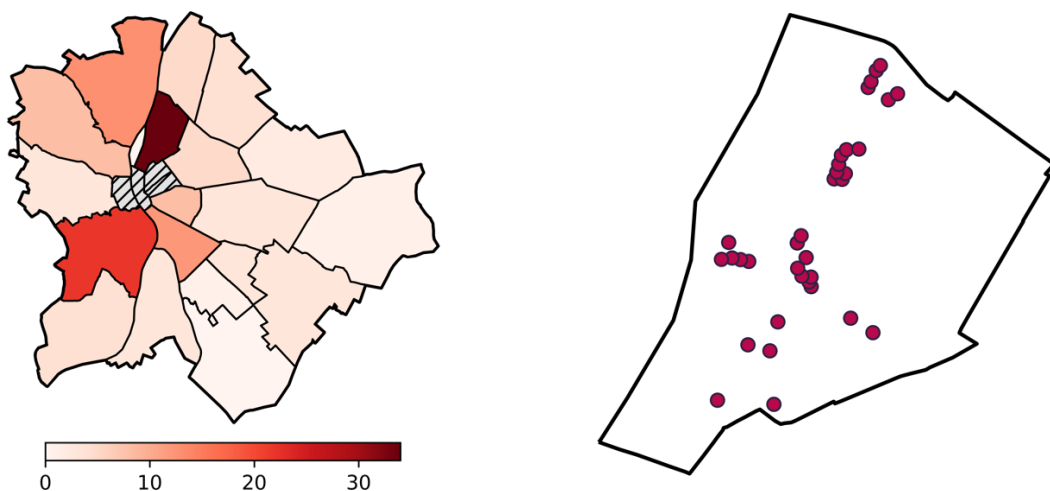
A kutatási munkám egy komplex szemléletű, multidiszciplináris tevékenység. a tudományos kérdések megválaszolása nem csak a hazai és nemzetközi tudományos közegnek nyújt új tudományos eredményeket, hanem a valós piaci igényeket is kielégíti a festékérzékenyített napelem cella területén. Továbbá, a kutató munkám az Óbudai Egyetem BSc, MSc, szakmérnöki és szakember képzésekben résztvevő diákok számára is hasznos és támogatott mind a megújuló energiaforrások, mint az alkalmazott informatikai tématerületen.

4 Elemzési módszerek és szimulációs eljárások

A tudományos munkám célkitűzésében megfogalmazott kérdésfeltevések vizsgálatához a témakör pontosítása, szűkítése elengedhetetlen. A következőkben kitérek a tudományos munkám szűkítésére, amelyhez szükségzerű, hogy bemutassam Budapest klimatikai viszonyait, majd a szimulációs megközelítésben részletezem a szimulációs környezet kiválasztását és a szimulációs paraméterek beállítását.

4.1 Tudományos munka szűkítése

A budapesti 23 kerület közül részletes elemzéssel azonosítottam az irodaépületek számát. A 3. ábra szemlélteti a Budapest 23 kerületében található irodaépületek számosságát, ahol a bal oldali ábra hőtérkép alapon szemlélteti az eredményeket, a jobb oldali ábra pedig a legtöbb irodaházat tartalmazó kerületet, 13. kerületet, ábrázolja megjelölve a 34 db azonosított irodaházat. A bal oldali ábrán szembetűnik, hogy bizonyos kerületek sraffozott reprezentációval jelennek meg, amely annak a következménye, hogy bizonyos épületek építészetiileg napelemmel nem fedhetők be, valamint a városi hősziget-jelenség érvényesül.



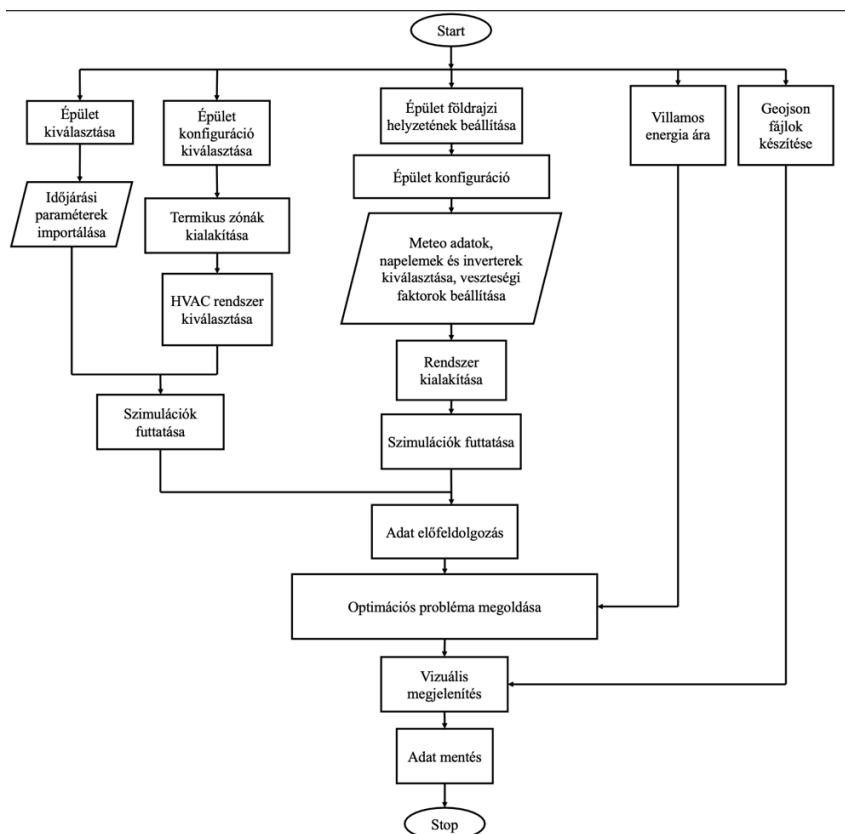
3. ábra: Budapest 23 kerületében található irodaépületek számossága, ahol a bal oldali ábra a 23 kerületben lévő irodaépületek számosságát szemlélteti hőtérkép szerűen, a jobb oldali a legtöbb irodaházat tartalmazó (13.) kerületet mutatja jelölve a 34 darab irodaházat. Az ábrán lévő sraffozott rész a hőszigeteffektus és a korlátozott telepítési lehetőséget reprezentálja.

A városklíma szempontjából érdemes figyelmet fordítani a hősziget-jelenségre. A hősziget hatás a zöld területek hiánya, a kibocsájtott hő és levegőszennyezés által előforduló nem kívánatos jelenség, amely a városi infrastruktúra úgy, mint az épületek (különösképpen a sötétebb épületek), aszfalt hőtárolásában és a tárolt hőenergia visszasugárzásában mutatkozik meg [61]. A hőhatás a napelemek villamos paramétereit nagy mértékben befolyásolja. A

panelban felhalmozódott hőhatás nem csak az egyes villamos paraméterek úgy, mint hatásfok, villamos teljesítmény csökkenését, de napelem degradálását is fokozzák. Ezen témával kapcsolatban számos kutatás folyik [41]. A városi hősziget jelenség fontos szerepet játszik a napelemek villamos paramétereinek alakulásában. A bevezetőben említett EUKI projektben egy tanulmány keretein belül meghatároztuk, hogy az 5., 6. és 7. kerületekben a hősziget hatás elég erősen vesz részt. Ezen okok miatt az 1., 5., 6., és 7. kerületekben található irodaházak nem kerültek megvizsgálásra. Figyelembe véve, hogy a 13. kerületben található a legtöbb irodaház, ennek okán a tudományos vizsgálatok során a megfogalmazott kérdésfeltevéseimet ezen kerület kontextusában vizsgálom.

4.2 Szimulációs megközelítés

A tudományos munka szűkítését követően bemutatom munkám flow chart diagramját, amely részletezi a szimulációs folyamat lépéseit. A flow chart diagram, mint vizuális eszköz segíti logikai folyamatot és a lépések közötti összefüggéseket reprezentálni, amely a vizsgált jelenségek mélyebb megértéséhez vezet. Munkám flow chart diagramját a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra: Tudományos munkám flow chart diagramja, ahol a HVAC a fűtési, szellőztetési és légkondicionáló rendszer (angolul: Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)), a Geojson pedig geoadatok tárolását jelenti JSON formátumban.

Az egyes lépéseket a 4.2.1, a 4.2.2 és a 4.2.3 alfejezetekben részletesen kifejtem, valamint indoklással meghatározom a bemeneti adatokat. A 4. ábrán szereplő HVAC a fűtési, szellőztetési és légkondicionáló rendszer jelenti (angolul: Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)) és a Geojson pedig a geoadatok tárolását JSON (JavaScript Object Notation) formátumban. Az adatok vizuális megjelenítése érdekében a geojson fájlok használata előnyös volt, mert könnyen olvasható és írható. A 13. kerületben a 34 darab azonosított irodaépület területeit geojson fájlformátumban elkészítettem. A villamos energia árának meghatározása komplex feladat irodaépületek esetén. A munkám során az eladási és vásárlási árakat az időben konstans paraméterekként rögzítettem. Vagyis az eladási árat 10 Ft/kWh, míg a vásárlási árat 90 Ft/kWh értéknek határoztam meg. A meghatározás során a különböző energiaszolgáltatók interneten feltüntetett árait vettem figyelembe. Prediktív modellezési elemzés lehetővé tenné, hogy ezen tényezők még pontosabban kerüljenek meghatározásra. Tekintettel arra, hogy az általam felhasznált villamos energia árak teljes mértékben nem tükrözik az egyes irodaépületek valós piaci körülményeit, a szimulációs munkám egy becslést ad a tudományos kérdésfeltevések megválaszolására.

4.2.1 Épületbe integrált DSSC által termelt villamos energia szimulációja

A BIPV DSSC villamosenergiájának szimulációihoz a fentebb említett PV*SOL szimulációs környezetet alkalmaztam, amely lehetővé teszi a napelem rendszerek villamos energia termelésének szimulációit különböző környezeti és földrajzi feltételek mellett. A szimulációs szoftver számos paraméter testre szabását teszi lehetővé úgy, mint a PV modulok típusát, elrendezését, az invertereket és az árnyékolás hatását. Mindezek mellett, támogatott a 3D modellezés, amely segítséget nyújt a vizualizálásban és a bizonyos akadályok úgy, mint a fák vagy szomszédos épületek figyelembevételében. Tekintettel arra, hogy a festékérzékenyített napelem cella a PV*SOL adatbázisban nem található, az épületbe integrált festékérzékenyített napelem cella villamos energia szimulációk elvégzése céljából irodalmi áttekintést végeztem, hogy azonosítsam a DSSC elektromos paramétereit, melyek a szimulációk során bemeneti paraméterként szolgáltak. Az 1. táblázat tartalmazza a PV*SOL szimulációs szoftverben megadásra került technikai paramétereket. A táblázatban a csillaggal (*) jelölt részek a szoftver által kalkulált értékeket jelölik.

1. táblázat: DSSC technikai paraméterei, melyek a PV*SOL szoftverben megadásra kerültek szimulációk elvégzése érdekében

Paraméter	Érték	Dimenzió	Hivatkozás
Maximum teljesítményhez tartozó villamos feszültség	3,405	V	[62]
Maximum teljesítményhez tartozó villamos áram	0,707	A	[62]
Villamos üresjárási feszültség (V_{OC})	4,55	V	[62]
Villamos rövidzárási áram (I_{SC})	0,945	A	[62]
Maximális teljesítmény (P_{MPP})	2,41	W	[62]
Kitöltési tényező	56	%	[62]
Hatásfok	4,6	%	[62]
Besugárzás intenzitása (alacsony besugárzás esetén)	300	W/m ²	*
Maximum teljesítményhez tartozó villamos feszültség (alacsony besugárzás esetén)	3,11	V	*
Maximum teljesítményhez tartozó villamos áram (alacsony besugárzás esetén)	0,21	A	*
Villamos üresjárási feszültség (alacsony besugárzás esetén)	3,96	V	*
Villamos rövidzárási áram (alacsony besugárzás esetén)	0,28	A	*
Kitöltési tényező (alacsony besugárzás esetén)	58,9	%	*
Hatásfok (alacsony besugárzás esetén)	90,43	%	*
V_{OC} hőmérsékleti együtthatója	-0,4	%/K	[63]
I_{SC} hőmérsékleti együtthatója	-0,2	%/K	[64]
P_{MPP} hőmérsékleti együtthatója	1	%/K	[64]
Felületi terület	900	cm ²	[62]
Szélesség	300	mm	[62]
Magasság	300	mm	[62]
Mélység	5	mm	Megmért
Keret szélessége	5	mm	Megmért
Tömeg	1,5	kg	Megmért

* PV*SOL által kalkulált értékek

A szimulációk elvégzése érdekében elsőként földrajzi helyzet került beállításra, az épület konfiguráció, majd a meteorológiai adatok, napelemek, inverterek és veszteségi faktorok kerültek kiválasztásra és beállításra. A rendszer kialakítását követően a szimulációkat elvégeztem és a szimulált adatokat begyűjtöttem. A meteorológiai adatokat a szimulációs környezet adatbázisából választottam ki. Ezen adatok tartalmazzák a hőmérsékletet, a napsütéses órák számát és egyéb sugárzási adatokat. A szimulációkat háromdimenziós térbeli környezetben hajtottam végre annak érdekében, hogy a szimulációból származó eredmények pontosak legyenek. A 3D szimuláció lehetővé tette az építészeti elemek és az irodaépület

környezetének alaposabb vizsgálatát. A modellszámítások során az éves talajvisszaverődési tényezőt (albedót), más szavakkal a földfelszínről reflektálódott (visszavert) napfény arányát éves szinten, 20%-nak rögzítettem. Mindezek mellett a szennyeződésből, pontosabban az akkumulált szennyeződések okozta éves teljesítménycsökkenést 3%-nak határoztam meg az áttanulmányozott irodalmak alapján [65]. Az akkumulált szennyeződések a DSSC napelem modulok felületére ráakadó por és egyéb anyagok miatt következnek be. A rendszer kialakítása során a festékérzékenyített napelemeket az irodaépületek oldalfalaira helyeztem fel. Korábban említésre került, hogy a DSSC hatásfoka diffúz megvilágítás esetén kevésbé csökken a közvetlen besugárzáshoz képest, amely tovább növeli a városi alkalmazhatóságát a DSSC napelemnek. Mindezek mellett, az áttanulmányozott irodalmak arra is rámutatnak, hogy az épületbe integrált DSSC-k esetén nagyobb beépített területre van szükség, hogy azonos beépített kapacitást érjenek el, mint a hagyományos kristályos szilícium alapú napelemekkel. Az irodaépületek vertikális felületeinek bevonását követően az invertereket választottam ki. Tudományos munkám ezen szakaszában az szoftverben az example nevű, előre definiált inverter konfiguráció került alkalmazásra. Az example inverter konfiguráció alkalmazásának oka a következőben adható meg: nem korlátozódik egy adott gyártó specifikus termékére, így a szimulációk általánosabb alkalmazhatóságot nyernek. A napelemes rendszer tervezése on-grid kialakításban került elkészítésre. A szimulációs környezet alkalmas gazdasági mutatók analízisére (pl.: megtérülési idő) figyelembe véve a gazdasági és finanszírozási feltételeket, de tekintettel arra, hogy a festékérzékenyített napelem cella még intenzív kutatási és fejlesztési fázisban van és a piaci elérhetősége korlátozott, a jelen tanulmányban részletes gazdasági elemzés nem készült. A szimulációk elvégzését követően a szimulációkból származó eredményeket begyűjtöttem.

4.2.2 Épület villamos energia fogyasztásának szimulációja

Az épület energiaanalízisek elvégzésére az OpenStudio integrált eszközcsoportot használtam, amely az EnergyPlus szimulációs motorra épül. Az OpenStudio széles körben használt szimulációs szoftver az épületek energiahatékonyságának tervezéséhez és elemzéséhez. Az épület energiaanalízisek során számos bemeneti adatot adtam meg, többek között az épület geometriáját, az épületre vonatkozó anyagokat és szerkezetet, az épület lokációját és éghajlatot, Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) rendszert (magyarul Fűtési, szellőztetési és légkondicionáló rendszer) és működési mintákat. Az épület geometriája esetén az épület alaprajza, nyílászárók helyzete, mérete és az épület szintjeinek száma meghatározásra került.

Az alaprajz koncepciójának kidolgozása során öt belsőtér típust definiáltam a [65] publikációra támaszkodva, melyek a nyitott irodater (73%), a folyosó (16%), a lépcsőház (3%), a konyha (4%) valamint a mosdó (4%). A belső tér típusok mellett a zárójelben feltüntetett százalékos adatok azt reprezentálják, hogy az adott funkciójú területek milyen arányban vesznek részt az irodaépület összterületének kialakításában. Az irodaépületek belső tereinek elhelyezkedését a [65] szakirodalom alapján végeztem. Megvizsgáltam, hogy a különböző belső terek elhelyezkedésétől függően a szimulált eredmények között milyen változás lép fel. Vagyis arra a kérdésre kerestem a választ, hogy hány százalékos változást okoz a különböző belső tér elrendezés az épület villamos energia fogyasztásában. Az elvégzett szimulációkból kapott eredmények rámutatnak arra, hogy a fűtéshez használt villamos energia 8%-os, ventilátor működtetésére használt villamos energia esetén 2,5%-os ingadozás léphet fel, de az épület összes villamos energia fogyasztása esetén ez a százalékos érték kevesebb, mint 1%. Az összes irodaépület esetén a nyílászárók helyzetét Sorgato munkája alapján határoztam meg, mégpedig úgy, hogy a padlószinttől az ablak alsó széléig mért távolság 1 méter legyen, és az ablakfelület-hányadost (angolul: window-to-window ratio) 0,4-re állítottam [65]. Az épület szerkezeti elemeinek anyagai, hőszigetelési és egyéb termikus jellemzőkkel a szoftvercsomag adatbázisa rendelkezik. Az American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) 189.1-2009 szabványban megfogalmazásra került a fenntartható épületek tervezéséhez és építéséhez szükséges útmutatók és irányelvek klímazónákra lebontva [66]. Mindezen ASHRAE szabványokon alapuló adatbázissal az OpenStudio szoftverplatform rendelkezik, ezzel megkönnyítve egyes szimulációs lépéseket. Budapest a Köppen-Geiger éghajlati besorolás szerint mérsékelt éghajlati zónába esik, ami a ASHRAE szabványban a 4-es klímazónát jelöli [67], [68]. A területi korlátokból adódóan ezen adatok nem kerülnek ismertetésre. A szerkezeti elemek kiválasztása mellett nélkülözhetetlen az épület földrajzi helyzetének megfelelően a meteorológiai adatok megadása. Fontos megjegyezni, hogy az OpenStudio szoftverplatform csak EPW fájlokkal képes dolgozni, amelyen fájlok magukba foglalják a hőmérsékleti, sugárzási és egyéb meteorológiai adatokat. A hosszasan áttanulmányozott irodalmi források alapján Magyarország városai közül csak Szombathelyre áll rendelkezésre a korábban említett EPW meteorológiai fájl. A szimulációkat ezen EPW meteorológia fájlal végeztem. A működési minták alatt az épület időbeli használati mintázatát értem, ami magában foglalja az emberek mozgását, a világítás és a vízfogyasztást. Ezen paramétereket az OpenStudio szimulációs környezet tartalmazza klímazónákra lebontva. Terjedelmi okok miatt ezen paraméterek leírása sem része dolgozatomnak. Mindezen

paraméterek az OpenStudio dokumentációjában megtalálhatók. A HVAC rendszer kulcsfontosságú az irodaépületek belső környezetének szabályozására, mert biztosítják a beltéri hőmérsékletet, a megfelelő levegő minőséget, valamint hozzájárulnak az általános komforthoz a bent tartózkodók számára. A HVAC rendszer kiválasztása során az alábbi szempontokat vettem figyelembe: (i) a hőmérséklet szabályzására alkalmazott fűtési és hőelvonási (hűtési) folyamatos során a működési ciklus kizárólag villamos energia felhasználására hagyatkozik; (ii) minimalizálja a villamos energia fogyasztást a fűtési és hőelvonási folyamatok során. A kiválasztási szempont meghatározása során különösképpen vettem figyelembe a jelenlegi tendenciákat a földgáz-igény (földgáz-függés) csökkentése terén. Az korábban említett szempontok alapján a Packaged Rooftop Heat Pump (magyarul: „csomagolt” tetőtéri hőszivattyús rendszer) HVAC rendszer került kiválasztásra és a szimulációkat ezen HVAC rendszer felhasználásával végeztem el. A HVAC rendszerben megadott konstans paramétereket az áttanulmányozott irodalmak alapján állítottam be. Feltételezve, hogy felülről lefelé irányuló a légelosztás a hűtési módban használt légelosztás hatékonyság (angolul: Air Distribution Effectiveness in Cooling Mode) paraméter értéke 1-nek [69], a fűtési módban használt légelosztás hatékonyság (angolul: Air Distribution Effectiveness in Heating Mode) paraméter értékét ugyancsak 1-nek [69], és a zóna szellőzésének hatékonyság (angolul: Zone Ventilation Efficiency) értékét pedig 0,8-nak vettem [69]. Fontos megjegyezni, hogy az egyes épületek esetén az épület jellemzői és tervezési paraméterei befolyásolják. A munkámban minden egyes irodaépület esetén a fentebb meghatározott értékeket alkalmaztam szimulációim során. A szimulációk lefutását követően a szimulációkból előállított adatokat begyűjtöttem.

4.2.3 Adatok kombinációinak analízise optimalizációs szempontból

Az alábbi alfejezetben az épületbe integrált DSSC villamos energiájának szimulációjából és az épület villamos energia fogyasztásának szimulációjából származó adatok elemzési módszertanát és az eredmények interpretációját tárgyalom, amely a 4. ábrán az adatfeldolgozás résztől lévő folyamatokat ismertetését foglalja magába. Az általam készített script segít megválaszolni a tudományos célkitűzésben megfogalmazott tudományos kérdésfeltevéseket. Az épületbe integrált DSSC villamos energiájának szimulációja esetén összesen 366 darab szimulációt végeztem és az eredményül kapott egyes .csv fájlok több, mint 100 oszlopot és 8760 darab sort tartalmaznak.

Az adott feltételek melletti minimum érték megtalálása az optimalizáció matematikai diszciplínája, amely a mérnöki tudományos problémák során gyakran felmerül. A

következőkben a munkám során alkalmazott minimum érték számításának folyamatát fejtem ki. A minimum érték számításának folyamatát eljárást python programozási nyelven készítettem el script implementálásával. A kódom lényegi matematikai egyenleteit a következőképpen határoztam meg:

$$E_{ij}(t) = \{S_{ij}(t)\} \quad (4)$$

, ahol az $E_{ij}(t)$ az $S_{ij}(t)$ kombinációk halmazának az i -edik épület j -edik kombinációját jelöli, ahol a kombinációk halmaza összesen $\sum_{k=1}^y \binom{n}{k}$ elemet foglal magába, ahol n az adott irodaépület DSSC-vel integrált oldalainak száma és y reprezentálja a k maximális osztályszámát (maximális kombinációk méretét). Tekintettel arra, hogy a szimulációk elvégzése költséges folyamat, empirikus tapasztalatok alapján került kiválasztásra az y érték. A dolgozatomban a tartalmi korlátok betartása érdekében az n és k értékeket az egyes irodaépületek esetén nem részletezem.

$$P_{ij}(t) = E_{ij}(t) - F_i(t) \quad (5)$$

, ahol a $E_{ij}(t)$ az i -edik épület j -edik falkombinációjából származó villamosenergiát jelenti az idő függvényében és az $F_i(t)$ i -edik épület villamos energia fogyasztását szimbolizálja az idő függvényében. Amennyiben az egyes falkombinációkból származó villamos energia meghaladja az épület villamos energia igényének mennyiségét, a különbség a hálózatba történő visszatáplálással pozitív pénzügyi hozamként definiálható. Amennyiben az egyes falkombinációkból származó villamos energia nem meghaladja az épület villamos energia igényének számértékét, a különbséget a hálózathoz szükséges betáplálni. Ezen költség kiszámításával kapcsolatos egyenlet (6. egyenlet) látható:

$$K_{il}(t) = \begin{cases} P_{ij}(t) \cdot C_s, & \text{ha } P_{ij}(t) > 0 \\ P_{ij}(t) \cdot C_b, & \text{ha } P_{ij}(t) < 0 \\ P_{ij}(t) = 0 & \text{egyébként} \end{cases} \quad (6)$$

, ahol $K_{il}(t)$ a különbség költséget jelöli az idő függvényében, $C_s(t)$ az eladott villamos energia árát az idő függvényében és $C_b(t)$ a megvásárolt villamos energia árát az idő függvényében. Fontos megjegyezni, hogy a $K_{il}(t)$ előjele a $P_{ij}(t)$ előjelével egyezik meg. Végül, az optimálisnak ítélt oldalfal-konfiguráció kiválasztását egy minimum-keresési eljárás determinálja, melyet a 7. egyenlet ír le. Az egyenletben a $K_{il}(t)$ előjeles összegzése látható, valamint a cél a minimális pozitív való szám és ahhoz tartozó falkombinációk meghatározása.

$$Min_+ = \min\{\sum_{t=1}^N K_{il}(t) \mid \sum_{t=1}^N K_{il}(t) > 0\} \quad (7)$$

Az eredményül kapott falkombinációkat felhasználva az általam írt script ezen eredményeket vizuálisan is megjeleníti. A geojson fájlok létrehozása kulcsfontosságú lépés volt a kutatási

eredmények könnyen értelmezhető ábrázolása szempontjából, mivel a felhasználó számára a kinyert adatok, mint például a "calculated_wall_10_7_13_4_1_12" jelölés kevés információt hordoz, valamint nem biztosítanak közvetlen betekintést a fizikai elrendezésbe. A vizualizációk során a felhasználó gyorsan képes azonosítani a kiemelt falakat és a térképes megjelenítés hozzájárul az adatok jobb interpretációjához. Korábban említésre került, hogy a kód használata költséges folyamat, a nagy számítási igény okán. Jövőbeli célomnak tűztem ki olyan script megírását, amellyel a folyamat több processzor szálon hajtódik végre, ezzel csökkentve a számítási időt.

4.3 DSSC hőleadó képességének szimulációja

A szimulációk során a festékekkel érzékenyített napelem termikus analízisét vizsgáltam az üveghordozó módosításával. Első lépésként a geometria és az anyag kiválasztása, majd a fizika és a háló (mesh) hozzáadása. A szimulációk lefuttatását követően az adatok begyűjtöttem és az eredményeket értékeltem, következtetéseket vontam le. Másrészt a szimulációban stacionárius feltételeket alkalmaztam, ami azt jelenti, hogy a hőátadás során a hőmérséklet nem változik az idő múlásával; a folyadékdinamika szempontjából a folyadék áramlása nem változik az idő múlásával.

4.3.1 Geometriák és anyag

A szimulációk során néhány egyszerűsítés történt: A DSSC napelemet üveghordozóra cseréltem, mivel az üveghordozó a DSSC tömegének jelentős részét teszi ki. Megvizsgálva egy szilárdtest hőmennyiségét, amely a $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ képlet segítségével határozható meg megállapítható, hogy a két üveghordozó között elhelyezkedő festékérzékenyített napelem szendvics struktúra hője elhanyagolható az üveghordozó hőjéhez képest. A szimuláció során az üveghordozó méreteit $6\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ választottam, melyek a következő forma szerint vannak megadva Szélesség $\times$ Mélység $\times$ Magasság. Az üveghordozó alján 6 darab 1 mm átmérőjű hőleadó golyó található. Érdemes megjegyezni, hogy a felépített rendszer transzparenciáját megőrzi. Az üvegtömb közepén helyezkedik el és levegőtömb veszi körül, amely méretei: $18\text{ mm} \times 12\text{ mm} \times 8\text{ mm}$. A felépített rendszerről a következő fejezetben található ábra. A levegőt összenyomhatatlan közegként vettem figyelembe. Ugyanis a [58] és [70] publikációk alapján ez akkor tehető meg, ha az áramlási sebesség 100 m/s alatt van. A kiválasztott anyagok, mint például az üveg és a levegő, a COMSOL könyvtárból származnak. Ezek a beépített anyagok tartalmazzák a dinamikus viszkozitást, az állandó nyomáson vett

fajhőt, a hőkapacitást, a sűrűséget és a hővezető képességet. A háló (mesh) kiválasztása során a fizika-vezérelt (physics-controlled) mesh-t választottam ki, és az elem méretét normálra állítottam.

4.3.2 Hővezetés

Hővezetés szilárdtestben

A szilárd testek hővezetését a Fourier-egyenlet írja le, ahol a hő a magasabb hőmérsékleti pontról az alacsonyabb hőmérsékleti pontra áramlik. A rendszerben felhalmozódott hőt el kell szállítani, hogy a DSSC napelem cella hőmérsékletét csökkentsem. A (8)-egyenlet írja le a hővezetést szilárdtestekben.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_{trans} \nabla T \right) + \nabla(q + q_r) = -\alpha T: \frac{dS}{dt} + Q \quad (8)$$

ahol a ρ a sűrűség; C_p az állandó nyomáson vett fajhő; T a hőmérséklet; t az idő; u_{trans} a translációs mozgás sebessége; q a hőáram vezetés; q_r a hőáram sugárzása; α a hőtágulási együttható; S a második Piola-Kirchoff-féle feszültségi tenzor; és Q tartalmazza a további hőforrásokat. Figyelembe véve, hogy a szimuláció stacionárius, azaz időtől független, az idő függést tartalmazó fizikai mennyiségek nulláknak tekinthetők. A felületi-környezeti sugárzás (angolul: Surface-to-Ambient Radiation) peremfeltételt definiáltam a szilárd felület és a folyadék felületi érintkezése között. A felületi emisszivitás értékét 0,85-nek választottam a [71] publikáció alapján. Továbbá, hőáram határfeltételt definiáltam a szimulációban, és az általános belső hőáramot 1000 W/m^2 értéknek választottam.

Hővezetés folyadékban

Tekintettel arra, hogy a napelemet levegő veszi körül, fontos a folyadékokban történő hőátadás szimulációja. Megkülönböztetünk összenyomható és összenyomhatatlan folyadékokat. Ha a levegő áramlási sebessége 100 m/s alatt van, akkor a levegő összenyomhatatlan folyadéknak tekinthető, ami azt jelenti, hogy a sűrűsége állandó. Más szóval, a folyadék sűrűsége nem változik az időben és az áramlással. Az összenyomhatatlan folyadék háromdimenziós egyenletét a következő egyenlet szemlélteti.

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0; \frac{\partial \rho}{\partial y} = 0; \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

ahol ρ reprezentálja a sűrűséget, az x, y, z pedig a tér három koordinátája. A (10) egyenlet írja le a hőátadást egy folyadék vagy gáz áramlása során.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) + \nabla(q + q_r) = Q_p + Q_{vd} + Q \quad (10)$$

ahol C_p az állandó nyomáson vett fajhő, T a hőmérséklet; u az áramlási sebesség; ∇T hőmérsékleti gradiens; q a hőáram sűrűség, ami azt jelenti, hogy mennyi hőenergia áramlik át egységnyi felületen időegység alatt; a q_r a sugárzási hőáram sűrűség, ami a hősugárzás révén történő áramlást reprezentálja; Q_p a belső hőtermelés az anyagok belüli folyamatok következtében; Q_{vd} a disszipatív hőtermelés; és Q a külső hőforrások. Ezenkívül peremfeltételek kerültek meghatározásra a szimulációk elvégzése érdekében, melyek (i) hőáramlás peremfeltétele (angolul: heat flux boundary condition); (ii) konvektív hőáramot (convective heat flux) választottam, és a hőátadási tényezőt $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ értékre állítottam be, míg a külső hőmérséklet a környezeti hőmérséklethez igazítottam. Az időfüggő változók a (10) egyenletben nullák a stacionáris állapot miatt.

4.3.3 Turbulens áramlás

A turbulens áramlás során a COMSOL szimulációs környezet a Reynold-átlagolt Navier-Stokes egyenleteket oldja meg a sebességtérre, a nyomásra és a turbulens viszkozitásra vonatkozóan. A COMSOL CFD útmutatója alapján a $k - \varepsilon$ modell az egyik leggyakrabban használt turbulencia modell az ipari alkalmazásokban. Ebből kifolyólag szimulációim során a $k - \varepsilon$ modellt alkalmaztam. A modell két függő változót tartalmaz, amelyek a turbulens kinetikus energia (k) és a turbulens disszipációs ráta (ε), valamint további két transzport egyenletet, amelyek a (11) egyenlet, mint k transzportegyenlet és (12) egyenlet, mint ε transzportegyenlet.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla k = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (11)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

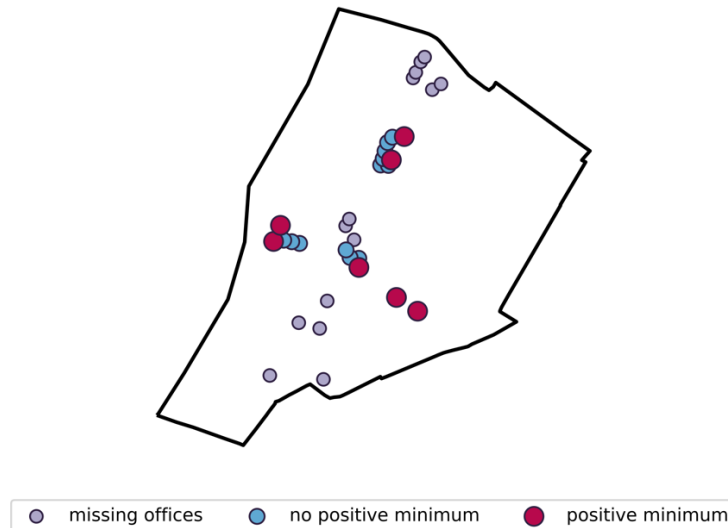
ahol P_k a termelődési tag (angolul: production term), ami a sebességtér deformációjának és a turbulens áramlásban lévő sebességfluktuációknak a következménye; μ_T a turbulens viszkozitás és az alábbi módon írható fel: $\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, ahol C_μ konstans és értéke 0,09. Mindezek mellett a modell az alábbi további konstansokkal végzi ez a $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,33$.

5 Eredmények

Az épületbe integrált festékérzékenyített napelem által termelt villamos energia szimulációkat teljes mértékben elvégeztem ezzel több, mint 360 szimulált eredményt generálva. Mindezek mellett, a feladat komplexitása miatt a 34 irodaépületből összesen 20 darab irodaépület villamos energia fogyasztásának szimulációját végeztem el. Egyes szimulációk akár több óráig is eltartottak. A további 14 irodaépületre vonatkozó analízis elvégzése a jövőbeli kutatási tervemet képezi. Az adatgyűjtést követően a szimulált eredményeket az általam készített kombinációk analízisére szolgáló optimalizációs kódba importáltam. Annak érdekében, hogy a szimulációimhoz szükséges számítási kapacitást biztosítani tudjam a Google Colab platformjának fejlett számítási erőforrásait vettem igénybe. Az eredményeim vizsgálata során a korábban tudományos kérdésfelvetésekben megfogalmazottakra keresem a válaszokat. Ezen tudományos kérdésfelvetések az alábbiak:

- (i) *mennyi a kinyerhető villamos energia abban az esetben, ha az irodaépületek oldalfalait festékérzékenyített napelem modullal vonjuk be figyelembe véve a környezeti körülményeket (pl.: árnyékeffektus);*
- (ii) *mely oldalfalak bevonása a legoptimálisabb az egyes irodaépületek esetén az adott területben;*
- (iii) *az optimálisnak vélt oldalfalak hány százalékát biztosítják az épület villamosenergia-fogyasztásának.*

Mielőtt a tudományos kérdésfeltevések vizsgálatára rátérnék, előzetes ellenőriztem, hogy létezik-e pozitív minimumérték a vizsgált paramétertartományban. Arra a megállapításra jutottam, hogy a 20 vizsgált irodaépület közül csak 7 irodaépületnek (koordinátái: (1) 47.526688 19.076696; (2) 47.528351 19.074142; (3) 47.531966 19.06918; (4) 47.535105 19.059332; (5) 47.537045 19.060158; (6) 47.544932 19.073540; (7) 47.547760 19.075078) létezik pozitív minimumértéke, vagyis kielégíti a (7). egyenletet. Az 5. ábra szemlélteti Budapest 13. kerületében lévő irodaházak három kategóriára lebontva, melyek a (i) szimulációk alatt álló irodaépületek (missing offices) élénk lila színnel jelölve; (ii) pozitív minimum értékkel nem rendelkező irodaépületek (no positive minimum), melyek kék színnel vannak reprezentálva; és (iii) létezik pozitív minimum értéke az irodaépületnek (positive minimum) jelölve a piros színnel. A piros színnel jelölt irodaépületekre vizsgálom meg a tudományos kérdésfeltevéseket.



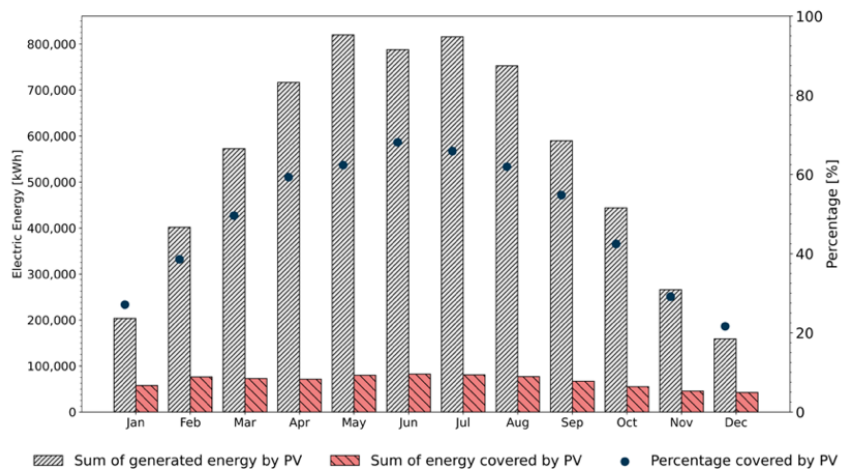
5. ábra: Budapest 13. kerületében lévő irodaházak három kategóriára lebontva, melyek a (i) szimulációk alatt álló irodaépületek (missing offices) élénk lila színnel jelölve; (ii) pozitív minimum értékkel nem rendelkező irodaépületek (no positive minimum), melyek kék színnel vannak reprezentálva; és (iii) létezik pozitív minimum értéke az irodaépületnek (positive minimum) jelölve a piros színnel. A piros színnel jelölt irodaépületekre vizsgálom meg a tudományos kérdésfeltevéseket.

A kutatás során azon épületek vizsgálata, melyeknek nem létezik pozitív minimuma a (7)-es egyenletet megoldva, rávilágítanak arra, hogy a környezeti tényezők úgy, mint az épület körüli árnyékolás jelentős mértékben csökkenti a festékérzékenyített napelem modullal integrált függőleges felületek szoláris energia felfogó képességét. Ezen irodaépületek energiahatékonyságát a tetőszerkezetre telepített hagyományos kristályos szilícium alapú napelemek – mint például monokristályos vagy polikristályos szilícium alapú napelemek – jelentős mértékben növelhetik. A jövőbeli kutatási tevékenységemet az említett rendszerek mélyrehatóbb vizsgálata felé kívánom fókuszálni. Mindezek mellett, a kutatásom során felhasznált villamos energia árak nem tükrözik az egyes irodaépületek való piaci körülményeit, de munkám egy becslést ad a tudományos kérdésfeltevések megválaszolására. Prediktív modellezési elemzési lehetővé tenné, hogy ezen tényezők még pontosabban kerüljenek meghatározásra. A pozitív minimummal rendelkező irodaépületek esetén megfigyelhető, hogy általában kevésbé sűrűn beépített környezetben helyezkednek el. Továbbá, 7 irodaépületből 3 irodaépület ((3) 47.531966 19.06918; (4) 47.535105 19.059332; és (5) 47.537045 19.060158) esetén előfordul, hogy a környező épületek és az említett három irodaépület között jelentős magasságbeli eltérés figyelhető meg. A környező irodaépületek alacsony sűrűsége kedvező feltételeket teremt a festékérzékenyített napelem cella épületbe való integrálhatóságára napenergia hasznosítás szempontjából.

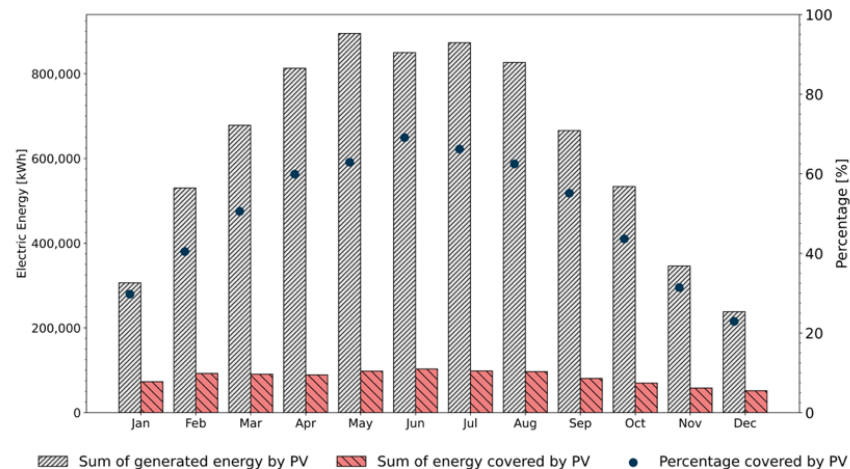
5.1 (i) és (iii) tudományos kérdésfelvetések megválaszolása

Az alábbi alfejezetben megválaszolom az (i) mennyi a kinyerhető villamos energia abban az esetben, ha az irodaépület oldalfalait DSSC modullal vonjuk be és (iii) az optimálisnak vélt oldalfalak hány százalékát biztosítják a villamosenergia-fogyasztásnak tudományos kérdésfelvetéseket azon irodaépületekre vonatkozólag, amelyek esetén létezi pozitív minimum érték. 6. ábra szemlélteti a festékérzékenyített napelem által termelt villamos energia (szürke oszlopok) és az épület villamos energia fogyasztásának (narancssárga oszlopok) oszlopos formában való megjelenítése havi bontásban kWh dimenzióban. A kék pontok a napelem által fedezett villamos energia százalékos arányát ábrázolja hónaponkénti lebontásban. Az y-tengely jobb oldalán látható skála szerint értelmezhető, ahol az értékek százalékban vannak megadva. Az ábrán lévő feliratok angolul vannak, a helytakarékosság szempontjából. Továbbá, 6. ábrán (a) reprezentálja az 1. épületet; (b) a 2. épületet; (c) 3. épületet; (d) 4. épületet; (e) 5. épületet; (f) 6. épületet és (g) 7. épületet. Az épületek koordinátáit fentebb ismertettem. A 6. (a) – (g) ábráiról az alábbi következtetések vonhatók le:

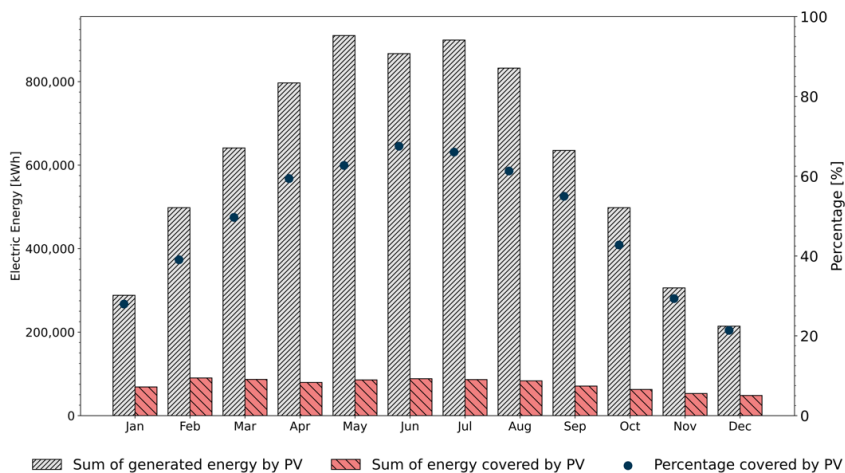
- Az épület villamos energia-fogyasztása változó dinamikát mutat, de az ábrázolás során alkalmazott skálázási módszer torzítható hatással bírhat.
- A téli periódus során mutathatók ki a legalacsonyabb értékek a DSSC által fedezett villamos energia arányára. Ezen belül is december hónapban figyelhető meg a minimális átlag, ami 22,4%-os értéket jelent és relatív szórása 2,8%. A relatív szórás a szórás és az átlag hányadosa százalékos formában meghatározva.
- Mindezek mellett átlagosan június hónapban figyelhető meg a maximális átlagos arány, mely 68,3%, relatív szórás értéke 1,3%.
- Értékes megfigyelés, hogy augusztushoz (61,8%) képest átlagosan májusban (62,5%) magasabb, de figyelembe véve a relatív szórásokat (0,6% és 0,5%) elmondható, hogy hibahatáron belül azonos a festékérzékenyített napelem által fedezett villamos energia arány. A kvázi Gaussos eloszlás figyelhető meg a százalékos értékeken minden egyes irodaépület esetén.
- Mindezekkel párhuzamosan elmondható a villamos energia termelést szignifikánsan meghatározza (látható az (1) egyenleten is) a napsütéses órák száma.



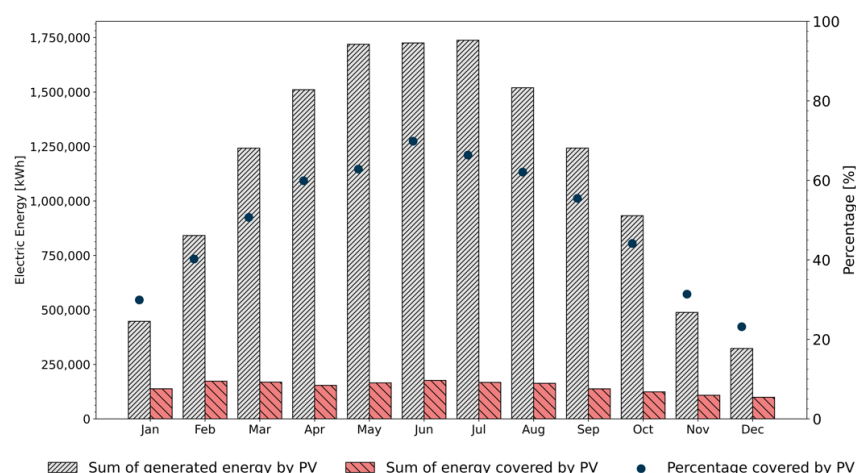
(a)



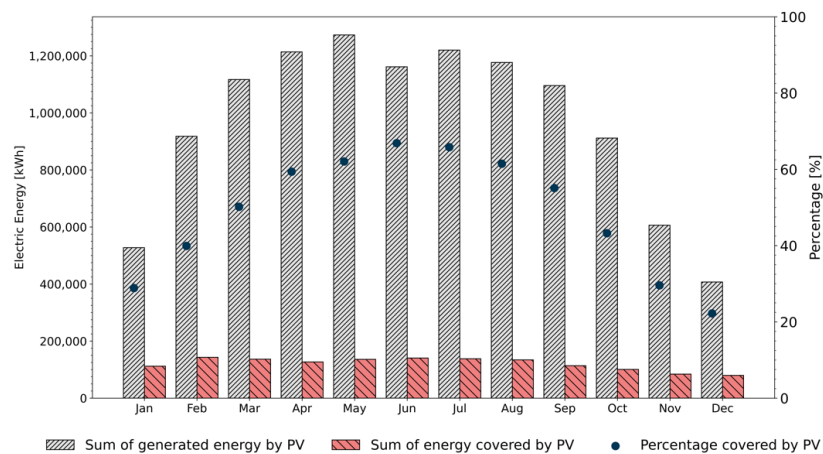
(b)



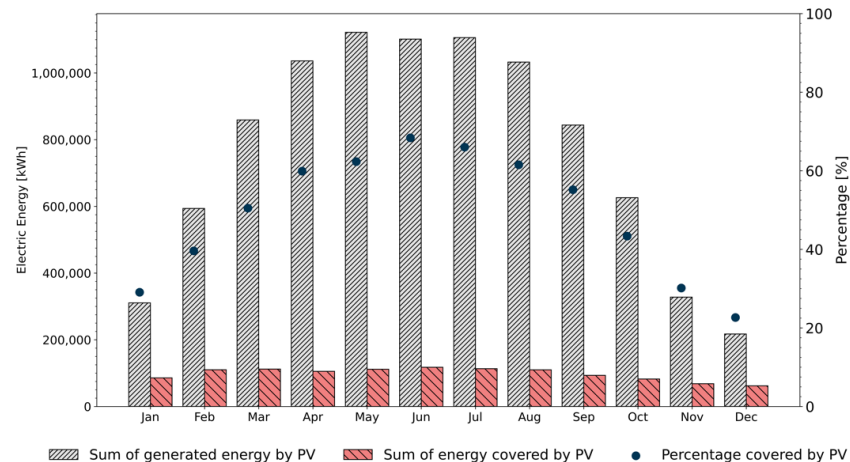
(c)



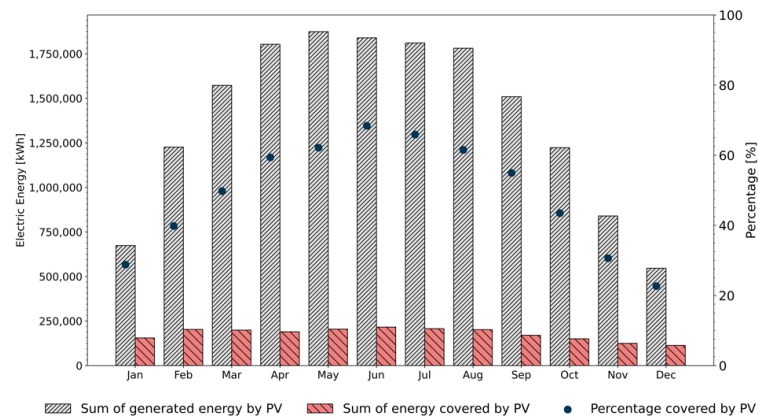
(d)



(e)



(f)



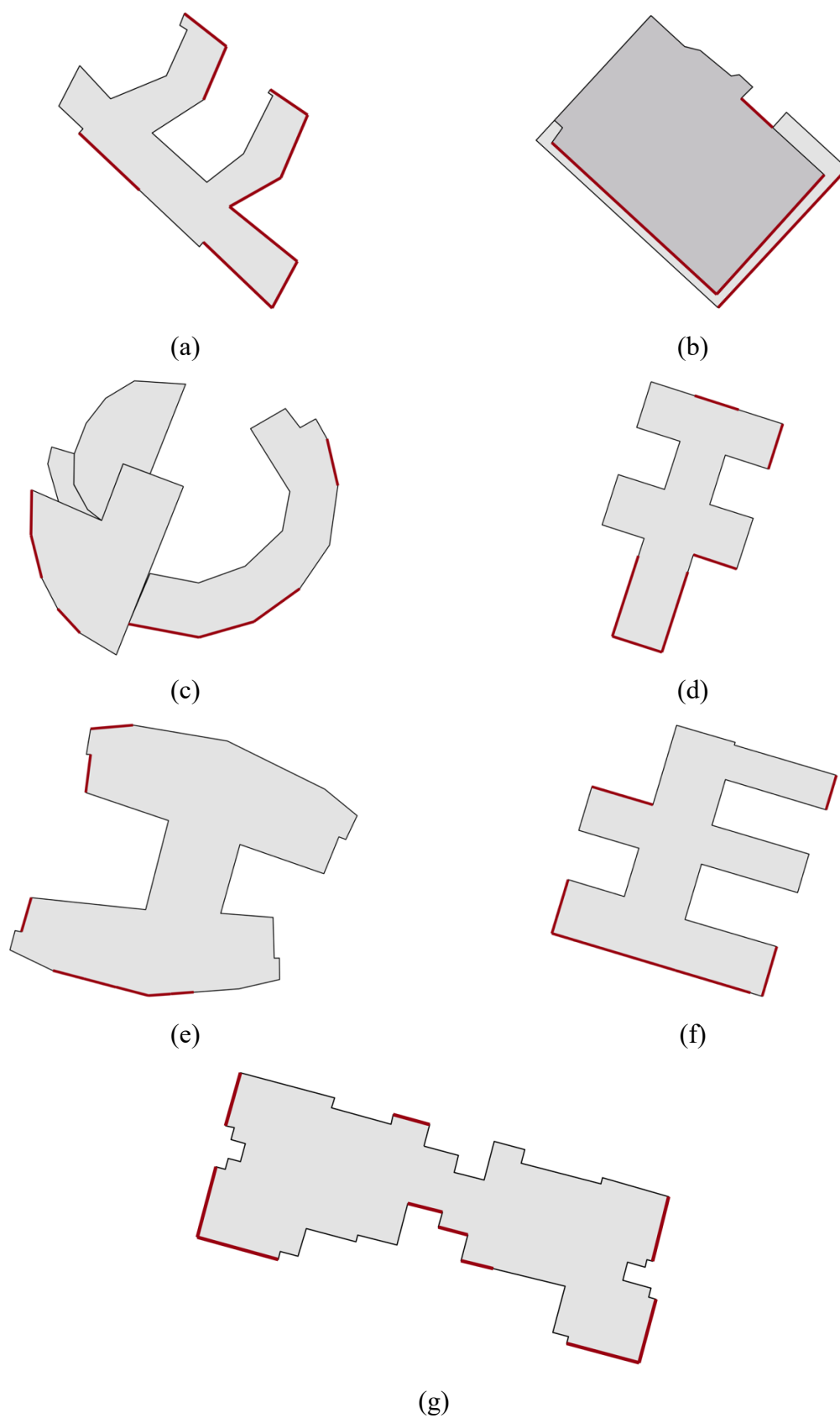
(g)

6. ábra: A festékérzékenyített napelem által termelt villamos energia (szürke) és az épület villamos energia fogyasztásának (narancssárga) oszlopos formában való megjelenítése havi bontásban kWh dimenzióban. A kék pontok a napelem által fedezett villamos energia százalékos arányát ábrázolja hónaponkénti lebontásban. Továbbá, (a) 1. épület (b) 2. épület (c) 3. épület (d) 4. épület (e) 5. épület (f) 6. épület (g) 7. épület

5.2 (ii) tudományos kérdésfeltevés megválaszolása

Az alábbi alfejezetben megválaszolom azt a tudományos kérdésfeltevést, miszerint mely oldalfalak bevonása optimális az egyes irodaépületek esetén a 13. kerületben. Munkám korábbi alfejezetében bemutattam, hogy a 20 irodaépület közül 7 darab irodaépület elégtí ki a (7)-es egyenletet, azaz van pozitív minimum értéke. Ezen épületek alapterületeit és a szimulációkból származó optimálisnak vélt oldalfalait (vörössel jelölve) az egyes irodaépületek esetén a 7. ábra szemlélteti. az adatábrázolás esetén különös figyelmet fordítottam az orientációnak. A 7. ábrán szemléltetett oldalfalokról – különösképpen a ((a), b) és (g) ábrákon – kiemelkedik, hogy a festékérzékenyített napelem modul azokon az oldalfelületeken is optimális, ahol az árnyékoltság fokozott, másszóval diffúz fény (csökkent napsugárzás) éri a felületet. Magyarázatot erre az áttanulmányozott irodalmakból kapunk, mely szerint a festékérzékenyített napelem technológia a napelem cella saját korlátjaihoz képest magas villamoshatásfokkal képes operálni diffúz megvilágítási (fényviszonyok) mellett. Továbbá, a szimuláció során kapott eredmények az alábbiak szerint foglalhatók össze:

- Az optimális oldalfal-konfiguráció preferáltan kevésbé sűrűn beépített környezetben lokalizálódik vagy olyan esetben, ahol a magasságbeli eltérés szignifikánsan megfigyelhető. Tekintettel arra, hogy a hősziget effektus a 13. kerületben nem kevésbé előforduló jelenség a belvárosi kerületekhez képest, nem elhanyagolható. A hősziget jelenség okozta villamos teljesítmény csökkenés előfordulhat az épületbe integrált DSSC rendszer esetén is.
- A DSSC napelem cella épületbe való integrálhatóságával járó potenciális kockázatokat egy kockázatértékelési mátrix segítségével azonosítottam, majd az azonosításokból kapott eredményeknek megfelelően, ahol szükségesnek ítéltam, ott enyhítő stratégiákat javasoltam. Mindezen eredményeimet IEEE nemzetközi konferencián előadtam és ismerttettem [72].
- A DSSC alkalmazhatósága szempontjából nem szükséges közvetlen napsütésnek kitettnek lenniük. Az elektromágneses sugárzás hatására a napelem felületének hőmérséklete jelentős mértékben megnövekedhet a benne felhalmozódott hő miatt, amely, mint nem kívánt jelenség lép fel. A DSSC oldalfalakra történő telepítése esetén a DSSC termikus hatása elsődlegesen a szélkonvekciótól függ. Amennyiben napelem hátoldalára hővezető bordák kerülnek integrálásra, a napelem hőleadó képessége növelhető.



7. ábra: 13. kerületben található pozitív minimummal rendelkező irodaépületek alapterületei és a szimulációkból származó optimális oldalfalak (vörös színnel jelölve az ábrán), ahol (a) 1. épület; (b) 2. épület; (c) 3. épület; (d) 4. épület; (e) 5. épület; (f) 6. épület és (g) 7. épület

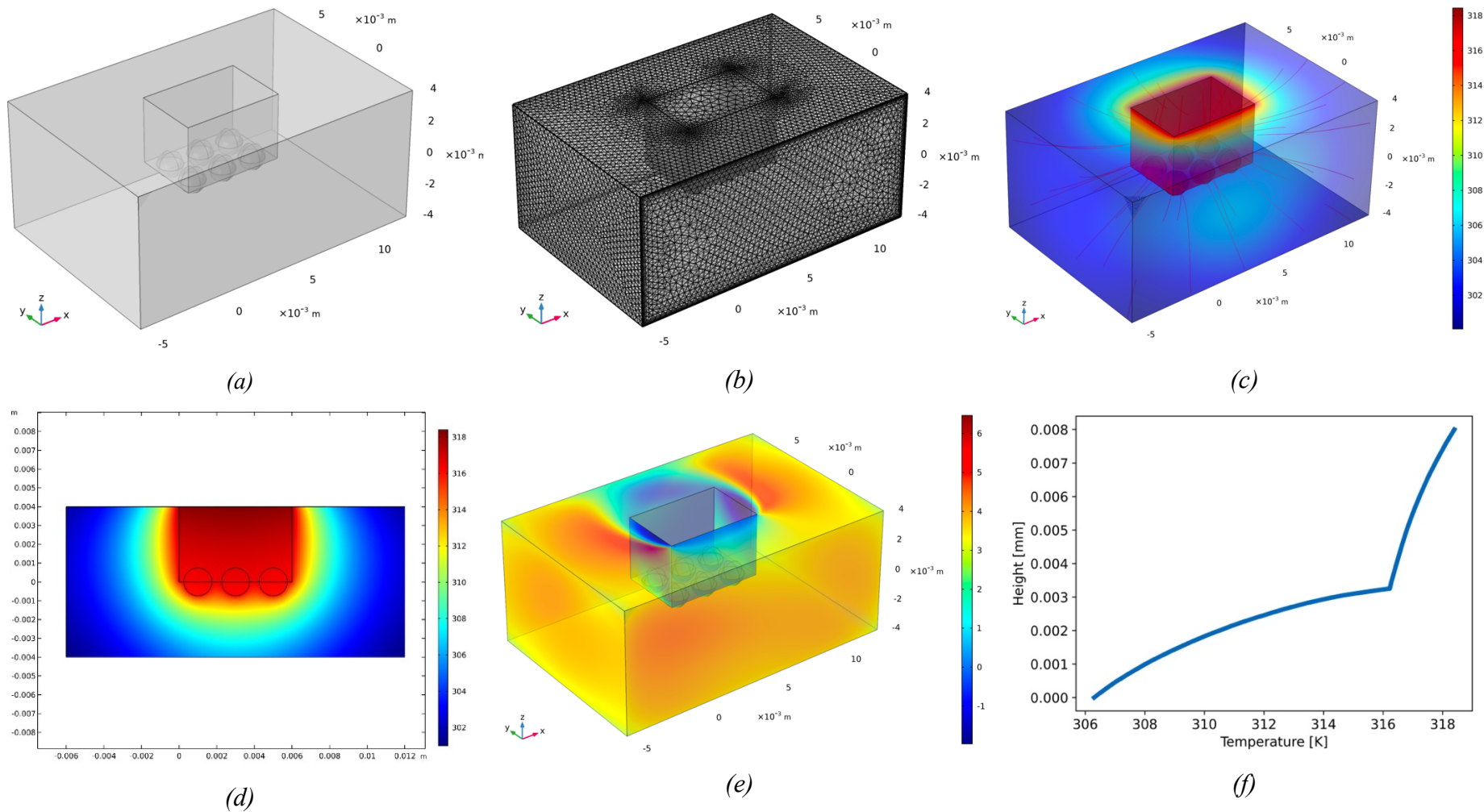
5.3 Végeelem szimuláció eredményei

A szimuláció célja az volt, hogy az oldalfalakra integrált festékérzékenyített napelem cella termikus hatását megvizsgáljam a napelem hátoldalára hővezető bordák integrálásával, ezzel növelve a napelem hőleadó képességét. Az alábbi alfejezetben bemutatásra kerülnek a hőmérséklet-eloszlás eredményei. *Első lépésként szimulációkat végeztem hővezető gömbök integrálása nélkül. Ezen szimulációról ábrát a tartalmi korlátok miatt nem illesztettem be dolgozatomba. Az eredmények összehasonlításával kijelenthető, hogy a disszipációs gömbök segítik a hőelvezetést, mivel a szilárdtest hőmérséklete alacsonyabbra csökkent, ~319 K-ről ~317 K-re.* A 8. ábra szemlélteti a DSSC termikus hatásának vizsgálatát a hátoldalára integrált hővezető bordák segítségével, ahol (a) 3D geometriai modell; (b) mesh ábra; (c) keresztmetszeti (XZ-síkot metsző) nézet a geometriáról, amely a jobb oldalon látható színskálán keresztül jelzi a hőmérsékleti értékeket; (d) hőmérséklet-eloszlás a háromdimenziós geometriában áramvonalakkal; (e) aturbulens áramlás sebesség vektorának y-komponense a geometrián keresztül; (f) hőmérséklet-eloszlás a metszeti síkon, ahol a vízszintes koordináták a hőmérsékletet jelzik kelvin dimenzióban, míg a függőleges koordináták a magasságot milliméter dimenzióban. A 8 (c) ábrán látható, hogy a központi rész melegíti az egész geometriát, és a hő magasabb hőmérsékletű pontokról az alacsonyabb hőmérsékletű pontok felé áramlik. Továbbá, a képen láthatóak az áramvonalak, amelyek a hő irányát szemléltetik. A kép jobb oldalán pedig a színmagyarát figyelhető meg. A színkódolás a 8 (c) és 8 (d) ábrákon segíti vizualizálni a hőmérséklet változó intenzitását, jelölve a melegebb és a hidegebb hőmérsékleti pontokat. Továbbá, a 8 (e) ábra szemlélteti a turbulens áramlás sebesség vektor y-komponensének változását a geometriában. Az ábra bemutatja, hogy a sebesség értéke bizonyos régiókban magasabb, míg más területeken alacsonyabb (az ábra jobb oldalán lévő színskálán keresztül figyelhetjük meg). A negatív értékek a sebesség vektor irányát jelölik. A hőmérséklet-eloszlás, valamint sebesség vektor y-komponensének eloszlás vizualizációi után, egy 2-dimenziós vágásvonalat adtam hozzá a metszeti sík adatkészletéből. A vonal x komponensének kiinduló pontja 3 mm, és a befejező pontja szintén 3 mm. Továbbá, az y-komponens kiinduló pontja 4 mm és befejező pontja 4 mm. A vágásvonal adatait .txt fájlba exportáltam annak érdekében, hogy adatvizualizációt végezzek python környezetben. Az így készült ábrát szemlélteti a 8 (f) ábra, amely betekintést nyújt abba, hogy változik a hőmérsékleti változó a távolsággal. Látható, hogy a felső rész, 0,008 mm magasságánál rendelkezik a legmagasabb hőmérséklettel. A hőmérsékleti gradiens azonosítható, valamint az ábrán az egyik kulcsfontosságú pont a 0,003 mm-nél található, ahol a két geometria (üveg és levegő)

találkozik. Mindezekből elmondható, hogy az üvegtest hőmérséklete $\sim 317\text{ K}$. A jövőbeli kutatások során ajánlott alaposabban elemezni a további értinkezési pontok hőmérséklet-eloszlását, valamint az időbeli változások (időfüggő vizsgálatok) figyelembe vételével a szimulációs eredmények pontossága növelhető.

5.4 Tudományos munkám elválasztása más tudományos eredményektől

Az átfogó irodalomkutatásból megállapítottam, hogy festékérzékenyített napelem cella irodaépületekbe való integrálásának tématerületén szimulációs vizsgálatok és azokból származó elemzéseket nem vizsgáltak. A tudományos munkákból megállapítható, hogy számos empirikus és modellezési tanulmány került publikálásra, azonban a DSSC specifikus, városi környezetében történő alkalmazásával kapcsolatos szimulációkat még nem tárgyaltak részletesen a szakirodalomban. Fontos megjegyezzem, hogy az említett területet az Egyetem általa elnyert pályázat nem fedte le, vagyis nem képezte részét, és jelen kutatásom e finanszírozási időszak lezárulta után került megvalósításra. Továbbá, a DSSC-k termikus hatásának vizsgálata a napelem hátoldalára integrált hővezető bordákkal szintén hiányzik a szakirodalomból. Ezáltal megállapíthatom, hogy tudomány eredményeim újak és nemcsak a hazai, valamint nemzetközi tudományos közegnek nyújt új tudományos eredményeket, hanem a valós piaci igényeket is kielégíti a festékérzékenyített napelem cella területén.



8. ábra: DSSC termikus hatásának vizsgálata a hátoldalára integrált hővezető bordák segítségével, ahol (a) 3D geometriai modell; (b) mesh ábra; (c) hőmérséklet-eloszlás a háromdimenziós geometriában áramvonalakkal; (d) keresztmetszeti (XZ-síkot metsző) nézet a geometriáról, amely a jobb oldalon látható színskálán keresztül jelzi a hőmérsékleti értékeket; (e) a turbulens áramlás sebesség vektorának y-komponense a geometrián keresztül; (f) hőmérséklet-eloszlás a metszeti síkon, ahol a vízszintes koordináták a hőmérsékletet jelzik kelvin dimenzióban, míg a függőleges koordináták a magasságot milliméter dimenzióban.

6 Kitekintés

Számos kutatási kérdés került megválaszolásra tudományos munkámban, de a festékérzékenyített napelem cella kutatási területén még sok a nyitott kérdés.

A napelem kutatás az utóbbi évtizedben a mesterséges intelligencia felé mozdult el. Egyre több rangos folyóiratban úgy, mint Nature, Solar Energy jelennek meg olyan tudományos publikációk, amelyek a neurális hálózatok, genetikai algoritmusok alkalmazásán alapszanak. A rangos folyóiratokban megjelent publikációk rámutatnak a különböző légyszámítási módszerek alkalmazásának fontosságára. A napelem városi alkalmazhatósága esetén is fontos szerepet játszanak a légyszámítási módszerek alkalmazása. Mindezekre alapozva céloml tűztem ki, hogy neurális hálózatokat alkalmazva predikciót készítek a festékérzékenyített napelem, rendszer városi telepítésére. Mindezek mellett, a jelen kutatásom során a marad irodaépületre vonatkozólag is megvizsgálom a tudományos kérdésfelvetéseket.

7 Eredmények összehasonlítása és saját hozzájárulás megkülönböztetése

Célkitűzés: *célomul tűztem ki, hogy szimulációs módszerek alkalmazásával megvizsgálom Budapest valamely olyan kerületének egy részére vonatkozólag, hol a legtöbb irodaház található az alábbi tudományos kérdésfelvetéseket:*

- (i) *mennyi a kinyerhető villamos energia abban az esetben, ha az irodaépületek oldalfalait festékérzékenyített napelem modullal vonjuk be figyelembe véve a környezeti körülményeket (pl.: árnyékeffektus);*
- (ii) *mely oldalfalak bevonása a leghatékonyabb az egyes irodaépületek esetén az adott kerületben;*
- (iii) *az optimálisnak vélt oldalfalak hány százalékát biztosítják az épület villamosenergia-fogyasztásának.*

Továbbá, célomul tűztem ki, hogy az oldalfalakra integrált DSSC termikus hatását megvizsgáljam a napelem hátoldalára hővezető bordák integrálásával, ezzel növelve a napelem hőleadó képességét.

7.1 Irodalmi áttekintés és újdonságok megállapítása

- Dolgozatomban számos helyen hivatkozom a szakirodalmi eredményeket, összehasonlítom a szisztematikus irodalomkutatásból kapott legfontosabb eredményeket és részletezem azokat.
- Az átfogó irodalomkutatásból kiderül, hogy a DSSC épületbe integrált napelem tématerületen ilyen szintű és mélységű elemzést még nem végeztek.
- Az átfogó irodalomkutatást követően megállapítottam, hogy a DSSC BIPV tématerületen számos empirikus tanulmány készült. Ugyanakkor a meglévő szimulációs vizsgálatok még nem elemzik a festékérzékenyített napelem cella városi környezetben való alkalmazásának specifikációját.

7.2 Saját kutatás eredményeinek bemutatása

- *Az eredményeim újak tekinthetők, mert az áttanulmányozott irodalmak alapján a DSSC specifikus, városi környezetben történő alkalmazásával kapcsolatos szimulációkat még nem tárgyalták.*
- A dolgozatomban részletesen tárgyalja a festékérzékenyített napelemek épületbe integrálásának energetikai szimulációit.

- Az 5.4. fejezetben („Tudományos munkám elválasztása más eredményektől”) kifejezetten kitérek a saját tudományos munkám más tudományos eredménytől való elválasztására.
- Tudományos munkám eredményeit az alábbiak alapján tudom összefoglalni:
 - (i) A 20 darab vizsgált irodaépület közül csak 7 irodaépületnek (koordinátái: (1) 47.526688 19.076696; (2) 47.528351 19.074142; (3) 47.531966 19.06918; (4) 47.535105 19.059332; (5) 47.537045 19.060158; (6) 47.544932 19.073540; (7) 47.547760 19.075078) létezik pozitív minimumértéke, vagyis kielégíti a (7). egyenletet. A téli periódus során mutathatók ki a legalacsonyabb értékek a DSSC által fedezett villamos energia arányára. Ezen belül is december hónapban figyelhető meg a minimális átlag, ami 22,4%-os értéket jelent és relatív szórása 2,8%. Mindezek mellett átlagosan június hónapban figyelhető meg a maximális átlagos arány, mely 68,3%, relatív szórás értéke 1,3%. Értékes megfigyelés, hogy augusztushoz (61,8%) képest átlagosan májusban (62,5%) magasabb, de figyelembe véve a relatív szórásokat (0,6% és 0,5%) elmondható, hogy hibahatáron belül azonos a festékérzékenyített napelem által fedezett villamos energia arány ezekben a hónapokban. A kvázi Gaussos eloszlás figyelhető meg a százalékos értékeken minden egyes irodaépület esetén.
 - (ii) Az optimális oldalfal-konfiguráció preferáltan a kevésbé sűrűn beépített környezetben lokalizálódik vagy olyan esetben, ahol a magasságbeli eltérés az épületek között szignifikánsan megfigyelhető.
 - (iii) A DSSC hátoldalára integrált hővezető bordák termikus hatását vizsgálva megállapítottam, hogy a disszipációs gömbök segítségével a napelem hőelvezetés javítható.
- A kutatás során alkalmazott szimulációs környezetek: PV*SOL, OpenStudio, COMSOL Multiphysics és python.

Fontos megjegyezni, hogy az Egyetem általa elnyert pályázat nem fedte le, vagyis nem képezte részét, és jelen kutatásom e finanszírozási időszak lezárulta után került megvalósításra.

8 Összefoglaló

Tudományos munkámban részletezem a bevezetőben meghatározott kutatási célokra (tudományos kérdésfeltevésekre) adott válaszokat. A szakmai bevezetés fejezetben részletesen elemeztem a festékérzékenyített napelemek működési mechanizmusát, kiemelve a DSSC optikai egyenletét és a villamos áram-feszültség karakterisztikát definiáló egyenleteket. A hőmérséklet és a beeső fény intenzitás paraméterek napelem villamos paramétereire gyakorolt hatását kifejtettem, figyelembe véve az említett matematikai formulákat. Mindezek mellett, átfogó irodalmi áttekintést nyújtottam a festékérzékenyített napelem technológia építészetben való integrálhatóságának jelenlegi állapotáról, hangsúlyozva, hogy munkám új tudományos eredményeket eredményez a hazai és nemzetközi tudományos közegben. Továbbá, az irodalomkutatás kiterjedt a festékérzékenyített napelem termikus hatását vizsgáló szimulációs tanulmányokra. Mindezekkel párhuzamosan megállapítottam, hogy DSSC-be integrált hőelvezető bordák alkalmazásával foglalkozó tudományok (az általam áttanulmányozott irodalmak alapján) hiányoznak a szakirodalomból. Kutatásommal a fent említett részeket vagyok hivatott betölteni.

Dolgozatomban részletesen ismertettem az alkalmazott kutatás módszertant, majd az elemzési módszerek és szimulációs eljárások esetén tudományos munkámat szűkítettem, és a szimulációs megközelítéseknél részletesen tárgyaltam az épületbe integrált DSSC által termelt villamos energia szimulációkat, majd az épület villamos energia fogyasztásának szimulációit. Mindezek mellett, részletesen kitértem a kombinációs analízisre, mely alkalmazásával a tudományos kérdésfeltevéseimet tudtam megválaszolni. Ismertettem a szilárdtestek és folyadékok hővezetését leíró parciális differenciálegyenleteket, valamint a folyadékok turbulens áramlását leíró parciális differenciálegyenleteket, melyek végelelem szimulációval oldottam meg. Tudományos munkám eredményeit az alábbiak alapján tudom összefoglalni:

- A 20 darab vizsgált irodaépület közül csak 7 irodaépületnek (koordinátái: (1) 47.526688 19.076696; (2) 47.528351 19.074142; (3) 47.531966 19.06918; (4) 47.535105 19.059332; (5) 47.537045 19.060158; (6) 47.544932 19.073540; (7) 47.547760 19.075078) létezik pozitív minimumértéke, vagyis kielégíti a (7). egyenletet. A téli periódus során mutathatók ki a legalacsonyabb értékek a DSSC által fedezett villamos energia arányára. Ezen belül is december hónapban figyelhető meg a minimális átlag, ami 22,4%-os értéket jelent és relatív szórása 2,8%. Mindezek mellett átlagosan június hónapban figyelhető meg a maximális átlagos arány, mely 68,3%, relatív szórás értéke 1,3%. Értékes megfigyelés, hogy augusztushoz (61,8%) képest átlagosan májusban

(62,5%) magasabb, de figyelembe véve a relatív szórásokat (0,6% és 0,5%) elmondható, hogy hibahatáron belül azonos a festékérzékenyített napelem által fedezett villamos energia arány ezekben a hónapokban. A kvázi Gaussos eloszlás figyelhető meg a százalékos értékeken minden egyes irodaépület esetén.

- Az optimális oldalfal-konfiguráció preferáltan a kevésbé sűrűn beépített környezetben lokalizálódik vagy olyan esetben, ahol a magasságbeli eltérés az épületek között szignifikánsan megfigyelhető.
- A DSSC hátoldalára integrált hővezető bordák termikus hatását vizsgálva megállapítottam, hogy a disszipációs gömbök segítségével a napelem hőelvezetés javítható.

Elmondható, hogy jelen kutatási munkám egy komplex szemléletű, multidiszciplináris tevékenység. A tudományos kérdések megválaszolása nem csak a hazai és nemzetközi tudományos közegnek nyújt új tudományos eredményeket, hanem a valós piaci igényeket is kielégíti a festékérzékenyített napelem cella alkalmazhatóságának tekintetében.

9 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. habil. Rácz Ervin tanár úrnak, hogy jelen TDK dolgozatom témavezetését elvállalta, segítette a munkámat. Köszönöm a Tanár Úrnak, hogy igazi mentorként áll mellettem. Köszönöm Hoffmann Bendegúznak a python script segítségét és javaslatait. A fentieken kívül köszönöm mindazoknak, akik tudományos munkámat támogatták, segítették, korrigálták.

10 Irodalomjegyzék

- [1] Z. Varga and E. Rácz, ‘A szilícium alapú napelem cella összehasonlítása a festékérzékenyített napelem cellával’, in *XXXVI. Kandó Konferencia 2020*, Budapest, pp. 54–65.
- [2] M. Malinowski, J. I. Leon, and H. Abu-Rub, ‘Solar Photovoltaic and Thermal Energy Systems: Current Technology and Future Trends’, vol. 105, no. 11, pp. 2132–2146, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2690343.
- [3] H. Elarga, F. Goia, A. Zarrella, A. Dal Monte, and E. Benini, ‘Thermal and electrical performance of an integrated PV-PCM system in double skin façades: A numerical study’, *Solar Energy*, vol. 136, pp. 112–124, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.06.074.
- [4] B. O’Regan and M. Grätzel, ‘A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films’, *Nature*, vol. 353, no. 6346, pp. 737–740, 0 1991, doi: 10.1038/353737a0.
- [5] Z. Varga and E. Racz, ‘A Numerical Model and a Code Development for Photogeneration Rate Calculation for a Dye Sensitized Solar Cell’, in *2022 IEEE 16th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, Timisoara, Romania: IEEE, May 2022, pp. 000341–000346. doi: 10.1109/SACI55618.2022.9919499.
- [6] Z. Varga and E. Racz, ‘Influence of the Cell Temperature on the Performance of a Dye Sensitized Solar Cell’, in *2021 IEEE 19th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)*, Herl’any, Slovakia: IEEE, Jan. 2021, pp. 000175–000180. doi: 10.1109/SAMI50585.2021.9378631.
- [7] Z. Varga and E. Racz, ‘Machine Learning Analysis on the Performance of Dye-Sensitized Solar Cell—Thermoelectric Generator Hybrid System’, *Energies*, vol. 15, no. 19, p. 7222, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15197222.
- [8] Z. Varga and E. Racz, ‘Application Development with Finite Element Method to Calculate Photogeneration Rate and Open-Circuit Voltage of Dye Sensitized Solar Cell’, *Syst. Theor. Control Comput. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 17–24, Dec. 2022, doi: 10.52846/stccj.2022.2.2.39.
- [9] P. K. Ng, N. Mithraratne, and H. W. Kua, ‘Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings’, *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 274–281, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.029.
- [10] A. M. Omer, ‘Energy, environment and sustainable development’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 9, pp. 2265–2300, Dec. 2008, doi:

10.1016/j.rser.2007.05.001.

[11] S. J. Davis and K. Caldeira, 'Consumption-based accounting of CO₂ emissions', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 107, no. 12, pp. 5687–5692, Mar. 2010, doi: 10.1073/pnas.0906974107.

[12] F.-T. Kong, S.-Y. Dai, and K.-J. Wang, 'Review of Recent Progress in Dye-Sensitized Solar Cells', *Advances in OptoElectronics*, vol. 2007, pp. 1–13, Aug. 2007, doi: 10.1155/2007/75384.

[13] M. Ghannam *et al.*, 'Trends in industrial silicon solar cell processes', *Solar Energy*, vol. 59, no. 1–3, pp. 101–110, Jan. 1997, doi: 10.1016/S0038-092X(96)00095-3.

[14] J. Gong, K. Sumathy, Q. Qiao, and Z. Zhou, 'Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 234–246, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.097.

[15] Md. K. Nazeeruddin, E. Baranoff, and M. Grätzel, 'Dye-sensitized solar cells: A brief overview', *Solar Energy*, vol. 85, no. 6, pp. 1172–1178, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.01.018.

[16] A. Reale, L. Cinà, A. Malatesta, R. De Marco, T. M. Brown, and A. Di Carlo, 'Estimation of Energy Production of Dye-Sensitized Solar Cell Modules for Building-Integrated Photovoltaic Applications', *Energy Technology*, vol. 2, no. 6, pp. 531–541, Jun. 2014, doi: 10.1002/ente.201402005.

[17] M. Grätzel, 'Dye-sensitized solar cells', *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 4, no. 2, pp. 145–153, Oct. 2003, doi: 10.1016/S1389-5567(03)00026-1.

[18] K. Sharma, V. Sharma, and S. S. Sharma, 'Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status', *Nanoscale Res Lett*, vol. 13, no. 1, p. 381, Dec. 2018, doi: 10.1186/s11671-018-2760-6.

[19] N. Tomar, A. Agrawal, V. S. Dhaka, and P. K. Surolia, 'Ruthenium complexes based dye sensitized solar cells: Fundamentals and research trends', *Solar Energy*, vol. 207, pp. 59–76, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.06.060.

[20] J. Gong, K. Sumathy, Q. Qiao, and Z. Zhou, 'Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 234–246, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.097.

[21] M. Saito and S. Fujihara, 'Large photocurrent generation in dye-sensitized ZnO solar cells', *Energy Environ. Sci.*, vol. 1, no. 2, p. 280, 2008, doi: 10.1039/b806096g.

- [22] B. Onwona-Agyeman *et al.*, ‘Sensitization of Nanocrystalline SnO₂ Films with Indoline Dyes’, *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 5L, p. L731, May 2005, doi: 10.1143/JJAP.44.L731.
- [23] P. Guo and M. A. Aegerter, ‘RU(II) sensitized Nb₂O₅ solar cell made by the sol-gel process’, *Thin Solid Films*, 1999.
- [24] Y. Ohsaki *et al.*, ‘Dye-sensitized TiO₂ nanotube solar cells: fabrication and electronic characterization’, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, vol. 7, no. 24, p. 4157, 2005, doi: 10.1039/b511016e.
- [25] J. Jiu, S. Isoda, F. Wang, and M. Adachi, ‘Dye-Sensitized Solar Cells Based on a Single-Crystalline TiO₂ Nanorod Film’, *J. Phys. Chem. B*, vol. 110, no. 5, pp. 2087–2092, Feb. 2006, doi: 10.1021/jp055824n.
- [26] M. Law, L. E. Greene, J. C. Johnson, R. Saykally, and P. Yang, ‘Nanowire dye-sensitized solar cells’, *Nature Mater*, vol. 4, no. 6, pp. 455–459, Jun. 2005, doi: 10.1038/nmat1387.
- [27] Y. Liu, A. Hagfeldt, X.-R. Xiao, and S.-E. Lindquist, ‘Investigation of influence of redox species on the interfacial energetics of a dye-sensitized nanoporous TiO₂ solar cell’, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 55, no. 3, pp. 267–281, Aug. 1998, doi: 10.1016/S0927-0248(98)00111-1.
- [28] J. Gong and S. Krishnan, ‘Mathematical Modeling of Dye-Sensitized Solar Cells’, in *Dye-Sensitized Solar Cells*, Elsevier, 2019, pp. 51–81. doi: 10.1016/B978-0-12-814541-8.00002-1.
- [29] M. Grätzel, ‘Photoelectrochemical cells’, *Nature*, vol. 414, no. 6861, pp. 338–344, 0 2001, doi: 10.1038/35104607.
- [30] N. Roslan, M. E. Ya’acob, M. A. M. Radzi, Y. Hashimoto, D. Jamaludin, and G. Chen, ‘Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) greenhouse shading: New insights for solar radiation manipulation’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 171–186, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.095.
- [31] Y. Jiao, F. Zhang, and S. Meng, ‘Dye Sensitized Solar Cells Principles and New Design’, in *Solar Cells - Dye-Sensitized Devices*, L. A. Kosyachenko, Ed., InTech, 2011. doi: 10.5772/21393.
- [32] G. J. C. Bartolome, J. A. C. Adoña, and A. E. L. Torres, ‘Performance of Dye-Sensitized Solar Cells with Natural Dye from Local Tropical Plants’, vol. 18, 2020.
- [33] S. Zhang, X. Yang, Y. Numata, and L. Han, ‘Highly efficient dye-sensitized solar cells: progress and future challenges’, *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 5, p. 1443, 2013, doi:

10.1039/c3ee24453a.

[34] B. A. Gregg, F. Pichot, S. Ferrere, and C. L. Fields, ‘Interfacial Recombination Processes in Dye-Sensitized Solar Cells and Methods To Passivate the Interfaces’, *J. Phys. Chem. B*, vol. 105, no. 7, pp. 1422–1429, Feb. 2001, doi: 10.1021/jp003000u.

[35] T. C. Li *et al.*, ‘Ni(III)/(IV) Bis(dicarbollide) as a Fast, Noncorrosive Redox Shuttle for Dye-Sensitized Solar Cells’, *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 132, no. 13, pp. 4580–4582, Apr. 2010, doi: 10.1021/ja100396n.

[36] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo, and H. Pettersson, ‘Dye-Sensitized Solar Cells’, *Chem. Rev.*, vol. 110, no. 11, pp. 6595–6663, Nov. 2010, doi: 10.1021/cr900356p.

[37] B. Maldon and N. Thamwattana, ‘Review of diffusion models for charge-carrier densities in dye-sensitized solar cells’, *J. Phys. Commun.*, vol. 4, no. 8, p. 082001, Aug. 2020, doi: 10.1088/2399-6528/abacd6.

[38] S. Soedergrén, A. Hagfeldt, J. Olsson, and S.-E. Lindquist, ‘Theoretical Models for the Action Spectrum and the Current-Voltage Characteristics of Microporous Semiconductor Films in Photoelectrochemical Cells’, *J. Phys. Chem.*, vol. 98, no. 21, pp. 5552–5556, May 1994, doi: 10.1021/j100072a023.

[39] A. Muhammad Habieb, M. Irwanto, I. Alkian, F. Khalimatus Sya’diyah, H. Widiyandari, and V. Gunawan, ‘Dye-sensitized solar cell simulation performance using MATLAB’, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1025, p. 012001, May 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1025/1/012001.

[40] E. Racz and Z. Varga, ‘Investigation of Electrical Parameters on a DSSC Solar Cell in Function of the Cell Temperature’, in *2019 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, Budapest, Hungary: IEEE, Nov. 2019, pp. 91–96. doi: 10.1109/CANDO-EPE47959.2019.9110998.

[41] S. Lepikko, K. Miettunen, A. Poskela, A. Tiihonen, and P. D. Lund, ‘Testing dye-sensitized solar cells in harsh northern outdoor conditions’, *Energy Sci Eng*, vol. 6, no. 3, pp. 187–200, Jun. 2018, doi: 10.1002/ese3.195.

[42] M. Tripathy, P. K. Sadhu, and S. K. Panda, ‘A critical review on building integrated photovoltaic products and their applications’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 451–465, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.04.008.

[43] N. Martín-Chivelet, J. Polo, C. Sanz-Saiz, L. T. Núñez Benítez, M. Alonso-Abella, and J. Cuenca, ‘Assessment of PV Module Temperature Models for Building-Integrated Photovoltaics (BIPV)’, *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1500, Jan. 2022, doi:

10.3390/su14031500.

[44] W. Celadyn and P. Filipek, 'Investigation of the Effective Use of Photovoltaic Modules in Architecture', *Buildings*, vol. 10, no. 9, p. 145, Aug. 2020, doi: 10.3390/buildings10090145.

[45] J. B. Lee, J. W. Park, J. H. Yoon, N. C. Baek, D. K. Kim, and U. C. Shin, 'An empirical study of performance characteristics of BIPV (Building Integrated Photovoltaic) system for the realization of zero energy building', *Energy*, vol. 66, pp. 25–34, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2013.08.012.

[46] H. M. Lee and J. H. Yoon, 'Power performance analysis of a transparent DSSC BIPV window based on 2 year measurement data in a full-scale mock-up', *Applied Energy*, vol. 225, pp. 1013–1021, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.086.

[47] F. Grifoni *et al.*, 'Toward Sustainable, Colorless, and Transparent Photovoltaics: State of the Art and Perspectives for the Development of Selective Near-Infrared Dye-Sensitized Solar Cells', *Adv. Energy Mater.*, vol. 11, no. 43, p. 2101598, Nov. 2021, doi: 10.1002/aenm.202101598.

[48] C. Cornaro, L. Renzi, M. Pierro, A. Di Carlo, and A. Guglielmotti, 'Thermal and Electrical Characterization of a Semi-Transparent Dye-Sensitized Photovoltaic Module under Real Operating Conditions', *Energies*, vol. 11, no. 1, p. 155, Jan. 2018, doi: 10.3390/en11010155.

[49] H. Yuan *et al.*, 'Outdoor testing and ageing of dye-sensitized solar cells for building integrated photovoltaics', *Solar Energy*, vol. 165, pp. 233–239, May 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.03.017.

[50] R. Corrao, D. D'Anna, M. Morini, and L. Pastore, 'DSSC-Integrated Glassblocks for the Construction of Sustainable Building Envelopes', *AMR*, vol. 875–877, pp. 629–634, Feb. 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.629.

[51] S. Yang, A. Cannavale, A. Di Carlo, D. Prasad, A. Sproul, and F. Fiorito, 'Performance assessment of BIPV/T double-skin façade for various climate zones in Australia: Effects on energy consumption', *Solar Energy*, vol. 199, pp. 377–399, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.02.044.

[52] J. Y. Hyun, B. R. Park, N. H. Kim, and J. W. Moon, 'Building energy performance of DSSC BIPV windows in accordance with the lighting control methods and climate zones', *Solar Energy*, vol. 244, pp. 279–288, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.08.039.

[53] R. Pereira and L. Aelenei, 'Optimization assessment of the energy performance of a BIPV/T-PCM system using Genetic Algorithms', *Renewable Energy*, vol. 137, pp. 157–166,

Jul. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.06.118.

[54] A. Gagliardi, M. Auf der Maur, D. Gentilini, and A. Di Carlo, ‘Modeling of Dye sensitized solar cells using a finite element method’, *J Comput Electron*, vol. 8, no. 3–4, pp. 398–409, Oct. 2009, doi: 10.1007/s10825-009-0298-7.

[55] A. Gagliardi, M. Auf der Maur, D. Gentilini, and A. Di Carlo, ‘Simulation of dye solar cells: through and beyond one dimension’, *J Comput Electron*, vol. 10, no. 4, pp. 424–436, Dec. 2011, doi: 10.1007/s10825-011-0377-4.

[56] P. Guo, S. Q. Li, N. Zhou, J. Zhang, and R. P. H. Chang, ‘Optical and Electrical Modeling of Three Dimensional Dye-Sensitized Solar Cells’.

[57] S. Chen *et al.*, ‘Numerical model analysis of thermal performance for a dye-sensitized solar cell module’, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 46, no. 48, p. 485106, Dec. 2013, doi: 10.1088/0022-3727/46/48/485106.

[58] Z. Arifin, S. Suyitno, D. D. D. P. Tjahjana, W. E. Juwana, M. R. A. Putra, and A. R. Prabowo, ‘The Effect of Heat Sink Properties on Solar Cell Cooling Systems’, *Applied Sciences*, vol. 10, no. 21, p. 7919, Nov. 2020, doi: 10.3390/app10217919.

[59] A. Muhammad Habieb, M. Irwanto, I. Alkian, F. Khalimatus Sya’diyah, H. Widiyandari, and V. Gunawan, ‘Dye-sensitized solar cell simulation performance using MATLAB’, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1025, p. 012001, May 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1025/1/012001.

[60] P. Saxena and N. E. Gorji, ‘COMSOL Simulation of Heat Distribution in Perovskite Solar Cells: Coupled Optical–Electrical–Thermal 3-D Analysis’, *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, pp. 1693–1698, Nov. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2940886.

[61] J. Göndöcs, H. Breuer, R. Pongrácz, and J. Bartholy, ‘Urban heat island mesoscale modelling study for the Budapest agglomeration area using the WRF model’, *Urban Climate*, vol. 21, pp. 66–86, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.uclim.2017.05.005.

[62] A. Hinsch *et al.*, ‘Dye solar modules for facade applications: Recent results from project ColorSol’, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 6–7, pp. 820–824, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.solmat.2008.09.049.

[63] A. Usami, S. Seki, Y. Mita, H. Kobayashi, H. Miyashiro, and N. Terada, ‘Temperature dependence of open-circuit voltage in dye-sensitized solar cells’, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 93, no. 6–7, pp. 840–842, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.solmat.2008.09.040.

[64] C.-C. Ting and W.-S. Chao, ‘Measuring temperature dependence of photoelectric conversion efficiency with dye-sensitized solar cells’, *Measurement*, vol. 43, no. 10, pp. 1623–

1627, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.measurement.2010.09.025.

[65] M. J. Sorgato, K. Schneider, and R. Rüther, ‘Technical and economic evaluation of thin-film CdTe building-integrated photovoltaics (BIPV) replacing façade and rooftop materials in office buildings in a warm and sunny climate’, *Renewable Energy*, vol. 118, pp. 84–98, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.10.091.

[66] N. Long, E. Bonnema, K. Field, and P. Torcellini, ‘Evaluation of ANSI/ASHRAE/USGBC/IES Standard 189.1-2009’, NREL/TP-550-47906, 984670, Jul. 2010. doi: 10.2172/984670.

[67] L. Al-Ghussain, O. Al-Oran, and F. Lezsovits, ‘Statistical estimation of hourly diffuse radiation intensity of Budapest City’, *Env Prog and Sustain Energy*, vol. 40, no. 1, p. e13464, Jan. 2021, doi: 10.1002/ep.13464.

[68] S. N. Gosling, G. R. McGregor, and J. A. Lowe, ‘Climate change and heat-related mortality in six cities Part 2: climate model evaluation and projected impacts from changes in the mean and variability of temperature with climate change’, *Int J Biometeorol*, vol. 53, no. 1, pp. 31–51, Jan. 2009, doi: 10.1007/s00484-008-0189-9.

[69] C. Q. Li, ‘Interpreting ASHRAE 62.1: ASHRAE Standard 62.1 is best known for its regulation of the amount of ventilation air delivered to each space in a commercial building by HVAC systems through various ventilation approaches to system design’, *Consulting Specifying Engineer*, vol. 56, no. 7, p. 35+, Aug. 2019.

[70] J.-H. Kim, S.-H. Park, and J.-T. Kim, ‘Experimental Performance of a Photovoltaic-thermal Air Collector’, *Energy Procedia*, vol. 48, pp. 888–894, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.02.102.

[71] R. Gardon, ‘The Emissivity of Transparent Materials’, *J American Ceramic Society*, vol. 39, no. 8, pp. 278–285, Aug. 1956, doi: 10.1111/j.1151-2916.1956.tb15833.x.

[72] Z. Varga and E. Racz, ‘Risk Assessment Matrix for a Small-Size Household Dye-Sensitized Solar Photovoltaic Power Plant System’, in *2021 IEEE 4th International Conference and Workshop Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)*, Budapest, Hungary: IEEE, Nov. 2021, pp. 71–76. doi: 10.1109/CANDO-EPE54223.2021.9667895.

11 Ábrajegyzék

1. ábra. Festékrézkényített napelem cella energia diagramja az elektronáramlás irányával, ahol a világoskék az üvegnek felel meg, a szürke részek az átlátszó vezető oxidnak (TCO), a világoslila a titán-dioxidnak (TiO_2) és a platinának (Pt), a vörös rész képviseli a festékanyagot, ahol HOMO a legmagasabban foglalt molekula orbitalt (HOMO: Highest Occupied Molecular Orbital) és a LUMO a legalacsonyabban nem foglalt molekula orbitalt (LUMO: Lowest Unoccupied Molecular Orbital) jelenti, és a világossárga az elektrolit oldatot jelenti [8]. 4
2. ábra: Festékrézkényített napelem cella építészeti való integrálhatósága, ahol a bal oldali ábra egy kísérleti elrendezést szemléltet, a jobb oldali ábra egy működő rendszert ábrázol, ahol az ablakok előtt elhelyezkedő színes ablak üvegek a festékrézkényített napelem cellák [46]. 9
3. ábra: Budapest 23 kerületében található irodaépületek számossága, ahol a bal oldali ábra a 23 kerületben lévő irodaépületek számosságát szemlélteti hőtérkép szerűen, a jobb oldali a legtöbb irodaházat tartalmazó (13.) kerületet mutatja jelölve a 34 darab irodaházat. Az ábrán lévő straffozott rész a hőszigeteffektus és a korlátozott telepítési lehetőséget reprezentálja. ... 14
4. ábra: Tudományos munkám flow chart diagramja, ahol a HVAC a fűtési, szellőztetési és légkondicionáló rendszer (angolul: Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)), a Geojson pedig geoadatok tárolását jelenti JSON formátumban..... 15
5. ábra: Budapest 13. kerületében lévő irodaházak három kategóriára lebontva, melyek a (i) szimulációk alatt álló irodaépületek (missing offices) élénk lila színnel jelölve; (ii) pozitív minimum értékkel nem rendelkező irodaépületek (no positive minimum), melyek kék színnel vannak reprezentálva; és (iii) létezik pozitív minimum értéke az irodaépületnek (positive minimum) jelölve a piros színnel. A piros színnel jelölt irodaépületekre vizsgálom meg a tudományos kérdésfeltevéseket..... 26
6. ábra: A festékrézkényített napelem által termelt villamos energia (szürke) és az épület villamos energia fogyasztásának (narancssárga) oszlopos formában való megjelenítése havi bontásban kWh dimenzióban. A kék pontok a napelem napelem által fedezett villamos energia százalékos arányát ábrázolja hónaponkénti lebontásban. Továbbá, (a) 1. épület (b) 2. épület (c) 3. épület (d) 4. épület (e) 5. épület (f) 6. épület (g) 7. épület 29
7. ábra: 13. kerületben található pozitív minimummal rendelkező irodaépületek alapterületei és a szimulációkból származó optimális oldalfalak (vörös színnel jelölve az ábrán), ahol (a) 1. épület; (b) 2. épület; (c) 3. épület; (d) 4. épület; (e) 5. épület; (f) 6. épület és (g) 7. épület..... 31

8. ábra: DSSC termikus hatásának vizsgálata a hátoldalára integrált hővezető bordák segítségével, ahol (a) 3D geometriai modell; (b) mesh ábra; (c) hőmérséklet-eloszlás a háromdimenziós geometriában áramvonalakkal; (d) keresztmetszeti (XZ-síkot metsző) nézet a geometriáról, amely a jobb oldalon látható színskálán keresztül jelzi a hőmérsékleti értékeket; (e) a turbulens áramlás sebesség vektorának y-komponense a geometrián keresztül; (f) hőmérséklet-eloszlás a metszeti síkon, ahol a vízszintes koordináták a hőmérsékletet jelzik kelvin dimenzióban, míg a függőleges koordináták a magasságot milliméter dimenzióban... 34

12 Táblázatjegyzék

1. táblázat: DSSC technikai paraméterei, melyek a PV*SOL szoftverben megadásra kerültek szimulációk elvégzése érdekében.....	17
---	----