

**RISK MANAGEMENT IN CASE OF  
MONOCRYSTALLINE SOLAR POWER  
PLANT USING RISK ASSESSMENT MATRIX****KOCKÁZATKEZELÉS MONOKRISTÁLYOS  
NAPELEMES ERŐMŰ ESETÉN KOCKÁZATI  
MÁTRIX ALKALMAZÁSÁVAL**RÁCZ Ervin<sup>1</sup>**Abstract**

Solar panels and solar power plants are quite widespread and play an important role in renewable electricity generation. Examining the global solar cell market, the monocrystalline solar cells occur for the most part. It is important to consider the upcoming risks involved before strating installation work and during operation. The basic purpose of risk management is to protect the condition of assets and reduce the likelihood of loss, thereby increasing the efficiency of the system. After identifying the risks, the areas that require more attention to maintain safe operation are identified. Nevertheless, it makes it easier to develop a risk mitigation strategy after realizing the risks. Taking into consideration that the monocrytalline solar cell has high dominance in the domestic and international solar market, it is important to examine the possible risks of a monocrystalline solar power plant in general and the possible motogation strategy for high risks are considered.

**Keywords**

Solar cell, monocrystalline solar cell, risk management, risk assessment matrix, mitigation strategies

**Absztrakt**

A napelemek és a napelem erőművek elég széles körben elterjedtek, valamint fontos szerepet játszanak a megújuló villamosenergia-termelés területén. A globális napelem piacot vizsgálva a legnagyobb részt a monokristályos napelemek alkotják. A telepítési munkálatok megkezdése előtt és az üzemelés során fontos figyelembe venni a fellépő kockázatokat. A kockázatkezelés alapvető célja, hogy az eszközök állapotát megóvja és csökkentse a kiesés valószínűségét, ezzel növelve a rendszer hatékonyságát. A kockázatok feltárását követően meghatározom, hogy melyek azok a területek, melyek a biztonságos üzemelés fenntartása érdekében nagyobb odafigyelést igényelnek. Mindazonáltal, a kockázat realizálását követve könnyebb kidolgozni egy kockázatsökkentési stratégiát. Tekintettel arra, hogy a monokristályos napelemek nagy dominanciát mutatnak a hazai és nemzetközi napelem piacon, fontosnak tartom megvizsgálni, hogy a monokristályos napelem erőmű esetén általánosságban milyen kockázatok léphetnek fel, illetve a magas kockázatok esetén milyen lehetséges enyhítő stratégiát lehet alkalmazni.

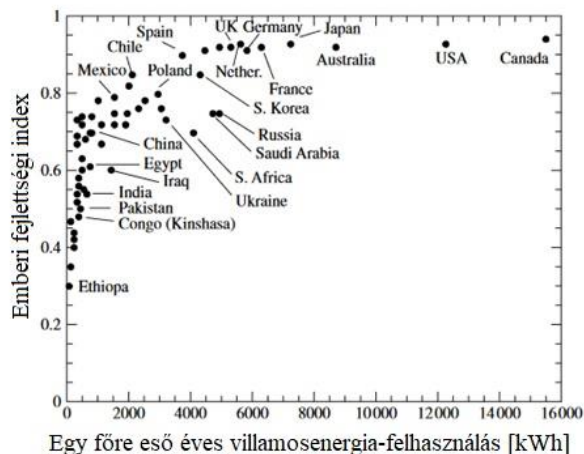
**Kulcsszavak**

Napelem, monokristályos napelem, kockázatkezelés, kockázati mátrix, enyhítő stratégia

<sup>1</sup> racz@uni-obuda.hu | ORCID: 0000-0002-7692-1397 | associate professor, Óbuda University | egyetemi docens, Óbudai Egyetem

## BEVEZETŐ

Az emberiség energiafogyasztásának igénye az utóbbi időben drámaian megnőtt. Az egy főre eső éves villamosenergia-fogyasztást a kutatók évente mérik és összehasonlítják, szembe állítják ezen értékeket országosan az emberi fejlettségi indexszel (angolul: Human Development Index, rövidítve: HDI). Ezáltal egy átfogó képet kaphatunk a villamosenergia-fogyasztás és az emberiség kapcsolatáról. Az 1. ábra egy 2000-es években készült HDI felmérést szemléltet, amelyet 60 országot, a Föld népességének 90%-át foglalja magába. Az emberi fejlettségi index három összetevőből – úgy, mint a születéskor várható élettartam, oktatásban megszerzett tudás és egy főre jutó vásárlóerő paritáson számított bruttó hazai termék (GDP) – kalkulált érték, amely 0 és 1 közötti értéket vehet fel [1]. Annak érdekében, hogy az életszínvonalat fejleszteni lehessen sok országban szükséges, hogy az éves energiafogyasztás százról néhány ezer kilowattóra megnövekedjen [1]. Többször felmerül a kérdés, hogyan lehet ezen igényt teljesíteni?



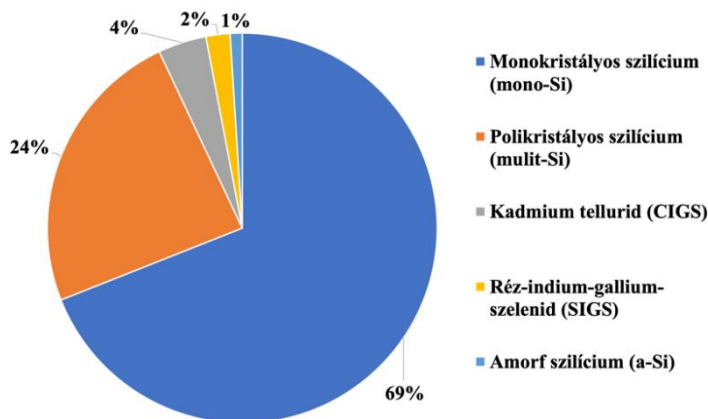
1. Ábra: Emberi fejlettségi index (angolul: Human Development Index, rövidítve: HDI) és egy főre eső éves villamosenergia-felhasználás kapcsolata országokra lebontva egy 2000-években készült felmérés alapján [1].

A korábbi évtizedekben domináns szerepet betöltő fosszilis energiahordozók égetésén alapuló villamosenergia-rendszerek a mai szempontból környezetkárosítónak minősülnek. A fosszilis energiahordozók elégetése üvegházhatású gázok (többek között széndioxid (CO<sub>2</sub>)) kibocsátásával jár, mely a környezetre és az emberre káros hatással van. Figyelembe véve Magyarország 2018-as CO<sub>2</sub> kibocsátást elmondható, hogy 46,16% földgáz, 38,05% olaj és 19,93% szénégetésből származott. Bizonyos felmérések szerint a mai napig vezető szén-dioxid termelők hazánkban az energiaszektor, ami 72% a teljes kibocsátásunknak [2].

Számos más energiahordozó alternatíva létezik, amelyek tiszta, folyamatos és megújuló energiát jelentenek úgy, mint a nap-, szél-, víz-, biomassza és geotermikus energia. A megújuló energiaforrások világviszonylatban nagy figyelmet kapnak, azon belül is érdemes kiemelni a napeleket, amely a beeső fényt villamos energiává alakítja. A megújuló energiaforrásokat villamos energiává alakító eszközök működésük közben nem, vagy minimális károsanyag kibocsátással járnak, amely például a felület tisztán tartása során merülhet fel

[3]. Egyes adatok szerint 2014-ben a szén, mint energiaforrás volt a legmeghatározóbb villamosenergia-termelés tekintetében (39%), majd ezt követte a megújuló energiák (23%-al). Egyes prognózisok szerint a megújuló energiák várhatóan 2030 körül megelőzik a szenet, ezzel a legnagyobb energiaforrássá válnak, és 2040-re elérik a teljes energiatermelés 34%-át. A napenergia különösen azért, hogy költségei szempontjából versenyképesebb szintet ér el más energiaforrásokkal, a fejlődő országok hátrányos helyzetű emberek millióinak életét tudná fenntartani. Néhány piaci elemző szerint 2050-re a napelem használata 25%-ot is elérheti a villamosenergia-termelésben. Ezen meglátásmódot alátámasztja, hogy a napelemes rendszerek ára az elmúlt öt évben 50%-ot csökkent [4].

A 2. ábra szemlélteti, hogy 2015-ben melyek voltak azon napelem típusok, amelyek a világpiacon a leginkább megtalálhatók voltak. Jól látszik az ábráról, hogy a monokristályos napelem 69%-al, a polikristályos napelem 24%-al vett részt a világpiacon [4] [5].



2. Ábra: Globális napelem piacon található napelemek típusok eloszlása 2015-ös adatok alapján [4].

A napelemek üzemelése során számos kockázat léphet fel, melyeket még a telepítési munkálatok előtt célszerű felmérni és realizálni. A kockázatkezelés alapvető célja, hogy az eszközök állapotát megóvja és csökkentse a kiesés valószínűségét, ezzel növelve a rendszer hatékonyságát. A kockázatok feltárását követően meghatározzák, hogy melyek azok a területek, melyek a biztonságos üzemelés fenntartása érdekében nagyobb odafigyelést igényelnek. Mindazonáltal, a kockázat realizálását követve könnyebb kidolgozni egy kockázatsökkentési stratégiát. *Tekintettel arra, hogy a monokristályos napelemek nagy dominianciát mutatnak a hazai és nemzetközi napelem piacon, fontosnak tartom megvizsgálni, hogy a monokristályos naperőmű esetén, általánosságban milyen kockázatok léphetnek fel, illetve a magas kockázatok esetén milyen lehetséges enyhítő stratégiát lehet alkalmazni.*

A témában már számos publikáció született, melyek során hasonló eredmények találhatók. Mindazonáltal ezen publikációk közül néhányat kiemelek. Sreenath és társai egy kockázati mátrix tanulmányt mutattak be, mely a reptéren telepített napelem rendszer lehetséges kockázatait térképezték fel, majd a magas kockázatok esetén enyhítő stratégiát javasoltak. Munkájukból kiderül, hogy 7 típusú veszély lép fel a reptér területére telepített napelemek esetén. A legmagasabb kockázatok a káprázás előfordulása, a madarak becsapódása és a kommunikációs technológiával való interferencia okozta. A magas kockázatokra olyan enyhítő stratégiákat javasoltak, mint az előzetes káprázás-értékelés felmérése a hely-

színen, madarak jelenlétének monitorozása monitoring program segítségével és a napelemek megfelelő távolságra helyezése a kommunikációs eszközöktől [6]. Zhang és társai munkája tárgyalja a kínai megújuló energiafejlesztés főbb kockázatait és néhány szakpolitikai intézkedést javasolnak a kockázatkezelésre. Munkájukban pénzügyi kockázatokat, piacra lépés kockázatokat és technológiai kockázatok mutatnak be [7]. Kwak és társai a fotovoltaiikus technológiák környezeti kockázatait vizsgálták. A munkájukban a napelemek felületéről lecsorgó víz környezeti hatásaira összepontosítottak kifejezetten a perovszkit napelemek esetén [8].

## KOCKÁZATOK AZONOSÍTÁSA

A kockázati mátrix (angolul: Risk Assessment Matrix, rövidítve: RAM) egy kvalitatív kockázatértékelési eszköz, melynek nagy előnye, hogy áttekinthetővé válik a kockázathoz tartozó következmény súlyossága, és így a nem elfogadható kockázatok megfelelően azonosíthatók. Ezzel szemben a RAM hátránya, hogy egy szubjektív módszer, és az esemény bekövetkezésének valószínűségéhez megfelelő kategóriákat kell rendelni úgy, mint a bizonyos, valószínű, lehetséges, valószínűtlen és kivételes - fogalmak. Ugyancsak, a függőlegesen tengelyen lévő következmény súlyosságának mértéke is szubjektív következményi skálát alkot, melyek a katasztrofális, kritikus, jelentős, jelentéktelen és elhanyagolható súlyosságok. A kockázatok azonosítását követően a felmerülő kockázatokat a fentebb említett táblázatba, mátrixba helyezük el annak alapján, hogy milyen kockázati súlyosságot és kockázati valószínűséget rendelünk az adott kockázathoz.

Kockázat súlyossága	Kockázat valószínűsége				
	Kivételes (1)	Valószínűtlen (2)	Lehetséges (3)	Valószínű (4)	Bizonyos (5)
Katasztrofális (A)	A1	A2	A3	A4	A5
Kritikus (B)	B1	B2	B3	B4	B5
Jelentős (C)	C1	C2	C3	C4	C5
Jelentéktelen (D)	D1	D2	D3	D4	D5
Elhanyagolható (E)	E1	E2	E3	E4	E5

1. Táblázat: Kockázati mátrix szín zónákkal való jelölése, ahol a zöld szín az elfogadható tartományt, a sárga szín az elfogadható egy bizonyos ideig tartomány és a piros szín a nem elfogadható tartományt jelöli.

Az így kapott táblázatot színkódolással látjuk el, amelyek a zöld, a sárga és a piros. A zöld színek esetében a kockázat elfogadható tartományban van és nincs szükség beavatkozásra vagy enyhítő javaslatokra. A zöld színű tartományba eső kockázati indexek a C1, D2, D3, E1, E2, E3, E4. A sárga színek felülvizsgálat után és/vagy korlátozott ideig elfogadható, a kockázati indexek az A1, A2, B1, B2, B3, C2, C3, C4, D3, D4, D5, E5.

A vörös tartományban (A3, A4, A5, B4, B5, C5) a nem elfogadható kockázatokat jelenti, ebben az esetben feltétlenül szükséges enyhítő stratégiát javasolni.

### Lehetséges kockázatok azonosítása

Ebben az alfejezetben a lehetséges kockázatok kerülnek azonosításra, amelyek a nem fizikai kockázatok, mechanikai kockázatok, környezeti kockázatok és elektromos kockázatok.

#### *Nem fizikai kockázat*

- Napelem modulok felületeinek ragyogása: A napelemek felületét egy reflexió csökkentő réteggel vonják be, de még így is előfordulhat, hogy a napelemek felületét ért beeső fény hatására a napelemek csillognak, ragyognak, amely kellemetlen hatást kelthet az emberek, madarak számára. Kifejezetten akkor érdemes számolni ezzel a kockázattal, ha a napelemerőművet lakott területek közelébe telepítették. Tekintettel arra, hogy a ragyogás, csillogás jelensége nem csak napelemek esetén fordulhat elő, hanem háztetőknél, ablakoknál is, e jelenség emberre gyakorolt hatása nem szignifikáns, elhanyagolható. A napelem üvegének reflexiója 2 – 4%. A korábbi kutatási eredmények szerint a legtöbb napelem lényegesen kevesebb fényt ver vissza, mint a lapos víz [9].
- Kommunikációs rendszerrel való interferencia: Egyes irodalmakban megemlítik az interferencia jelenséget a napelemek esetén, de ezzel akkor érdemes számolni, ha rendkívül érzékeny helyre telepítik a napelemeket, például a repülőtér közvetlen környezetébe. Sreenath és társai ebben az esetben magas kockázati indexet realizáltak és enyhítő stratégiaként a kommunikációs rendszerektől való nagyobb telepítési távolságot javasolták [6].

#### *Fizikai (mechanikai) kockázat*

- Komponensek öregedése: Az újonnan megvásárolt napelemek esetén a telepítést követve a gyártói garancia általában 20-25 év közé esik a tapasztalati értékek alapján. A hazánkat is erősen érintő klimatikus változások (pl.: gyakoribbá váló forró napok) a napelemek nagyobb mértékű, a korábbi évtizedekhez képest nagyobb intenzitású öregedéséhez vezethet. A telepítés során szükséges kiválasztani a napelem telepítésének lokációját, tájolását. A háztetőre szerelt napelem esetén a panel hőmérséklete meghaladhatja a 60 °C-ot, míg a szabadon álló napelem panelok panel hőmérséklete nem haladja meg az 50 °C-ot [10].
- Napelem panelek rögzítésről való leválása: A korábban említett különböző időjárási környezetnek kitett napelemek esetén a napelemek az alumínium szerkezetről leválhatnak, betörhetnek. A fizikai kockázatok nagyobb valószínűséggel történnek meg, ha a napelemek külső tényezőknek jobban kitéttek. Ilyen külső tényezők a korábban említett szélsőséges időjárási viszonyok, illetve behatolás. Ezért is az esetek legnagyobb részében külső kerítéssel látják el a napelem farmokat, hogy illetéktelen behatolás minél kisebb valószínűséggel tudjon megtörténni.

#### *Környezeti kockázat*

- Madár csapások: A madarak előfordulási valószínűsége kellően magas lehet a napelemek körül. A madarak jelenléte akkor jelentős, ha van pihenőhely, például fák

árnyéka, és élelmiszerek állnak rendelkezésre, például rovarok, élelmiszer-hulladék. A madarak egyre több helyen fordulnak elő pl.: parkolóházakban, épületek körül, utcákon, amely egy nem kívánatos jelenség több szempontból is. A napelemek védelmére már fejlesztettek olyan megoldásokat, amelyek a madaraktól való megóvást erősítik úgy, hogy a napelem felületét ne sértse meg. Ilyen megoldás látható az alsó 3. ábrán, de ilyen megoldás a madártüske (madarak elleni túske) is.



3. Ábra: Napelem panel madárcsapásoktól való megóvására egy lehetséges megoldás, ahol a napelem alumínium keretére erősített drótszerű anyaggal körbekerítik a napelemet, ezzel meggátolva, hogy madarak (pl.: galamb) rakjon fészket a napelem alá [forrás: <https://www.easypestsupplies.com.au/solar-panel-bird-mesh-kit>].

- Területi elhelyezkedés: A heves széllekedésekkel járó viharok gyakorisága megnövekedett az elmúlt időszakban és különösen a széllekedésekkel járó fák kidőlése egyre többször fordul elő. Ezen jelenség a napelem felületének betörését, a tartószerkezeti egységek tönkretételét és más súlyos problémákat eredményezhet. Megfelelő védekezési lehetőséget biztosíthat az időszakos karbantartás.



4. Ábra: Napelem panelek tűzkitörés utáni leégett állapotban [6].

#### Elektromos kockázat

- Elektromos tüzeset: A napelem panelek túlterhelése és rövidzárata tüzkidőrést eredményezhet, de ez ritkán fordul elő, mivel a szabványok ezen pontokat jól kezelik.

## EREDMÉNYEK ELEMZÉSE

A kockázatok azonosítását követve a kockázatok kockázati valószínűségének és kockázati súlyosságának meghatározása a következő lépés. A 2. táblázat tartalmazza az egyes azonosított kockázatokhoz rendelt kockázat valószínűséget és kockázat súlyosságot.

Azonosított kockázat	Kockázat valószínűsége	Kockázat súlyossága	Kockázati index
Napelem felületének ragyogása	Valószínű	Jelentéktelen	D3
Kommunikációs rendszerrel való interferencia	Valószínűtlen	Jelentéktelen	D2
Komponensek öregedése	Valószínűtlen	Jelentéktelen	D2
Napelem panelek rögzítésről való leválása	Valószínűtlen	Jelentős	C2
Madárcsapások	Lehetséges	Jelentős	C3
Területi elhelyezkedés	Valószínűtlen	Jelentős	C2
Elektromos tüzeset	Valószínűtlen	Kritikus	B2

2. Táblázat: Az egyes azonosított kockázatokhoz rendelt kockázati valószínűséget és kockázati súlyosságot összefoglaló táblázat kockázati indexel ellátva.

A 2. táblázat utolsó oszlopában a kockázati indexek szerepelnek, amely alapján a végleges kockázati mátrix elkészült. A 3. táblázat a 2. táblázat alapján kapott kockázati indexeket tartalmazza.

Kockázat súlyossága	Kockázat valószínűsége				
	Kivételes (1)	Valószínűtlen (2)	Lehetséges (3)	Valószínű (4)	Bizonyos (5)
Katasztrofális (A)					
Kritikus (B)		B2			
Jelentős (C)		C2	C3		
Jelentéktelen (D)		D2	D3		
Elhanyagolható (E)					

3. Táblázat: A 2. táblázat alapján elkészített kockázati mátrix, feltüntetve az azonosított kockázatokhoz rendelt kockázati indexet.

A 2. és 3. táblázatokból kiderül, hogy piros mezőbe, pontosabban, elfogadhatatlan tartományba eső kockázat nem került azonosításra. Ezáltal azonnali enyhítő stratégiát nem szükséges javasolni. Mindezek mellett szükséges megnézni a B2, C2, C3 és D3 indexel ellátott kockázatokot, melyek a sárga zónába kerültek. Ezen sárga zónába eső azonosított kockázatok esetén az alábbi enyhítő javaslatokat lehet alkalmazni:



- A napelem felület ragyogásának mérését követően, a mérésből származó eredményektől függően válhat szükségessé a plusz antireflexiós réteg felvitele, de érdemes kihangsúlyozni, hogy a napelem felület ragyogásának kockázat súlyossága nem jelentős.
- A heves széllekedésekkel járó viharok, fák kidöntése kockázatot jelenthet a napelem panelek rögzítésére. A kidőlt fák a területi elhelyezkedés hiányosságából fakadhat. Az egyre többször előforduló szélsőséges időjárási viszonyok szükségessé teszik a terület időszakos karbantartását.
- Madár csapások ellen a fentebb bemutatott 3. ábrán látható elrendezés (madárháló) adhat sikeres védekezést a madár csapásokkal szemben. Itt is érdemes elsőnek felmérni, hogy a madár csapások mennyire gyakoriak, mennyi a madarak számára rendelkezésre álló pihenőhely mennyisége, illetve milyen mértékben fordulnak elő élelmiszer-hulladékok, valamint rovarok. Amennyiben ezt a kockázatot a felhasználó magasnak ítéli, a 3. ábrán bemutatott elrendezés szükségessé válik. Továbbá, érdemes lehet a madártüskék alumínium keretre való applikálása is.
- Elektromos tüzeset súlyossága kritikus, de nagyon alacsony az előfordulási valószínűsége, ha a telepítés minden egyes lépése szabályosan, a szabványokat betartva végződik. Az időszakos karbantartás megnövelheti a rendszer teljes életciklusának a szén-dioxid kibocsátását (pl.: traktorral való felület lemosás), de a nagyobb károk és üzemzavarok elkerülése érdekében szükségessé válhat. Továbbá, az időszakos karbantartás során a hőkamerával felszerelt drónnal való napelemek végig pásztázása segíti a hibadetektálást, amely megelőzheti a tüzesetet.

## ÖSSZEFOGLALÁS

E cikkben a monokristályos naperőmű esetén, általánosságban fellépő kockázatokat vizsgáltam meg, azonosítottam be. Ezt követően az azonosított kockázatokhoz rendelt kockázat súlyosság és kockázat valószínűség alapján a kockázatok kockázati mátrixba kerültek beillesztésre. Összesen négy nagyobb kockázat került azonosításra, amelyek a nem fizikai-, fizikai-, környezeti- és elektromos kockázatok, melyek további felbontásra kerültek. Ezáltal hét darab kockázat – úgy, mint a napelem felületének ragyogása, kommunikációs rendszerrel való interferencia, komponensek öregedése, napelem panelek rögzítésről való leválása, madár csapások, területi elhelyezkedés, elektromos tüzeset – részletes kifejtésre került. Az azonosítást követően a korábban felsorolt kockázatok kockázati mátrixba való beillesztése történt meg. A piros, elfogadhatatlan mezőbe nem került azonosításra kockázat. A sárga zónába eső azonosított kockázatok esetén enyhítő javaslatok kerültek kidolgozásra. A munkából látható, hogy az alkalmazott szubjektív módszer jónak bizonyul a kockázatkezelésre. A kockázatkezelés alapvető célját megfelelően kielégítő, vagyis az eszközök állapotának megóvását, és a kiesés valószínűségének csökkentését segíti elő. Mindazonáltal a módszer multidiszciplináris, vagyis elég széles területen is alkalmazható.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] A. Luque and S. Hegedus, Eds., *Handbook of photovoltaic science and engineering*. Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [2] R. B. Jackson *et al.*, 'Global energy growth is outpacing decarbonization', *Environ.*



- Res. Lett.*, vol. 13, no. 12, p. 120401, Dec. 2018, doi: 10.1088/1748-9326/aaf303.
- [3] A. K. Pandey, V. V. Tyagi, J. A. Selvaraj, N. A. Rahim, and S. K. Tyagi, ‘Recent advances in solar photovoltaic systems for emerging trends and advanced applications’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 859–884, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.09.043.
- [4] 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.
- [5] E. Martinot, A. Chaurey, D. Lew, J. R. Moreira, and N. Wamukonya, ‘Renewable Energy Markets in Developing Countries’, *Annu. Rev. Energy. Environ.*, vol. 27, no. 1, pp. 309–348, Nov. 2002, doi: 10.1146/annurev.energy.27.122001.083444.
- [6] S. Sreenath, K. Sudhakar, and A. F. Yusop, ‘Solar photovoltaics in airport: Risk assessment and mitigation strategies’, *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 84, p. 106418, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.eiar.2020.106418.
- [7] X. Zhang, W. Ruoshui, H. Molin, and E. Martinot, ‘A study of the role played by renewable energies in China’s sustainable energy supply’, *Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 4392–4399, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.05.030.
- [8] J. I. Kwak, S.-H. Nam, L. Kim, and Y.-J. An, ‘Potential environmental risk of solar cells: Current knowledge and future challenges’, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 392, p. 122297, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122297.
- [9] Y. B. Zhu, ‘The Potential Hazard Analysis Method of Glare for Photovoltaic near airports or within’, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 392, p. 062148, Aug. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/392/6/062148.
- [10] V. Poulek, T. Matuška, M. Libra, E. Kachalowski, and J. Sedláček, ‘Influence of increased temperature on energy production of roof integrated PV panels’, *Energy and Buildings*, vol. 166, pp. 418–425, May 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.01.063.