

# Analiza životnog ciklusa fotonaponskih sustava

---

Ormuž, Jan Karl

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:879578>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Jan Karl Ormuž**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Jan Karl Ormuž

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem prije svega svojoj mentorici izv. prof. dr.sc. Ireni Žmak na izdvojenom vremenu, svesrdnoj pomoći i stručnim savjetima pruženim tijekom pisanja rada.

Posebno želim zahvaliti svojim roditeljima, baki, djedu i sestri koji su me podržavali i ohrabrivali tijekom cijelog mog akademskog putovanja.

Naposljetku, želim zahvaliti prijatelju Franu iz Soltech d.o.o. koji mi je omogućio pristup potrebnim podacima za provedbu praktičnog dijela rada.

*(Vlastoručni Potpis)*

Jan Karl Ormuž



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Jan Karl Ormuž** JMBAG: 0035206329

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza životnog ciklusa fotonaponskih sustava**


Naslov rada na engleskom jeziku: **Life cycle assessment of photovoltaic systems**


Opis zadatka:

Strategija Europske unije jasno je usmjerena prema smanjenju potrošnje energije, korištenju tzv. čiste energije, veće upotrebe obnovljivih izvora energije te smanjenju emisije CO<sub>2</sub>. Ekološki najprihvatljivije rješenje postalo je ključan i nezaobilazan zahtjev pri razvoju proizvoda. Europskim zelenim planom Europska komisija je 2020. povećala cilj smanjenja emisija stakleničkih plinova do 2030., s prethodnih 40 %, na najmanje 55 % u usporedbi s emisijama iz 1990. Druga dva ključna cilja za 2030. su postizanje najmanje 32 % udjela energije dobivene iz obnovljivih izvora i najmanje 32,5 % poboljšanja energetske učinkovitosti. Uredbom Europskog parlamenta i Vijeća iz 2018. o upravljanju energetskom unijom i djelovanjem u području klime, donesena su integrirana pravila kako bi se osiguralo planiranje, praćenje i izvješćivanje o napretku prema klimatskim i energetskim ciljevima do 2030. i međunarodnim obvezama prema Pariškom sporazumu. Na ovaj način, na temelju jasno definiranih načela, proces upravljanja uključuje konzultacije s građanima i dionicima. Jedan od instrumenata za poslovnu (B2B) i potrošačku (B2C) komunikaciju je Deklaracija proizvoda o okolišu (engl. *Environmental Product Declaration*, EPD). Takva deklaracija služi poduzećima da bolje planiraju svoju proizvodnju i konkuriraju s proizvodima i uslugama na tržištu te da jasnije komuniciraju s potrošačima o učincima proizvoda na okoliš.

U teorijskom dijelu diplomskog rada potrebno je dati pregled planova i strategija Europske unije kojima je cilj ugljična neutralnost, kružno gospodarstvo i energetska neovisnost. Potrebno je proučiti metodologiju analize životnog ciklusa proizvoda (engl. *Life Cycle Assessment*, LCA), koja je standardizirana serijom normi ISO 14040 i kojom se procjenjuje okolišni utjecaj proizvoda i usluga tijekom svih faza životnog ciklusa: vadenje sirovina i njihova prerada, proizvodnja materijala, proizvodnja dijelova, sklapanje, upotreba i zbrinjavanje. U praktičnom dijelu rada potrebno je upoznati se s konstrukcijom i tehnologijom izrade sastavnih dijelova fotonaponskog postrojenja i za njega kreirati model životnog vijeka u jednom od dostupnih softvera. Metodama procjene utjecaja životnog ciklusa (engl. *Life Cycle Impact Assessment*, LCIA) potrebno je izračunati kategorije utjecaja svake životne faze proizvoda na okoliš i izraditi Deklaraciju proizvoda o okolišu prema normi ISO 14025 i Izjavi o okolišu tipa III., prema Pravilu kategorije proizvoda (engl. *Product Category Rules*, PCR) za proizvodnju električne energije. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:  
4. svibnja 2023. 6. srpnja 2023. 17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:   
izv. prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
POPIS KRATICA .....	IX
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY .....	XII
1. UVOD.....	1
2. STRATEGIJE I ZAKONI EUROPSKE UNIJE VEZANI ZA KLIMU I ENERGIJU.....	3
2.1.  Europski zeleni plan.....	4
2.2.  Europski zakon o klimi .....	5
2.3.  Spremni za 55.....	6
2.4.  Energija iz obnovljivih izvora energije.....	7
2.5.  Energetska učinkovitost .....	8
2.6.  REPowerEU .....	10
2.7.  Strategija solarne energije EU.....	11
3. FOTONAPONSKI SUSTAV .....	14
3.1.  Fotonaponske ćelije.....	15
3.1.1.  Izrada silicijskih fotonaponskih ćelija.....	17
3.1.2.  Karakteristike fotonaponskih ćelija .....	20
3.1.3.  Spajanje fotonaponskih ćelija .....	21
3.2.  Fotonaponski moduli.....	22
3.3.  Pretvarač.....	24
3.4.  Fotonaponski sustavi.....	24
4. PROCJENA ŽIVOTNOG CIKLUSA .....	27
4.1.  Uvod.....	27
4.2.  Definicija opsega i cilja studije LCA .....	28
4.3.  Analiza inventara životnog ciklusa .....	30
4.4.  Procjena utjecaja životnog ciklusa .....	31
4.5.  Interpretacija procjene životnog ciklusa .....	32
4.6.  Prednosti i nedostaci LCA .....	33

4.7. Izjava o utjecaju proizvoda na okoliš (engl. <i>Environmental Product Declaration</i> , EPD).....	34
5. PROVEDBA LCA ANALIZE I IZRADA EPD-A ZA FOTONAPONSKI SUSTAV.....	35
5.1. Cilj analize životnog ciklusa FN sustava .....	36
5.2. Opseg analize .....	36
5.2.1. Opis proizvodnog sustava .....	36
5.2.1.1. Funkcija FN sustava.....	37
5.2.2. Funkcionalna jedinica sustava .....	38
5.2.3. Granice sustava .....	38
5.2.3.1. Uzvodna faza .....	39
5.2.3.2. Temeljna faza.....	39
5.2.3.3. Nizvodna faza .....	40
5.2.4. Inventar životnog ciklusa .....	40
5.2.5. Zahtjevi na kvalitetu podataka .....	40
5.2.6. Metodologija procjene utjecaja životnog ciklusa.....	41
5.2.6.1. Grupa 1. Kategorije utjecaja izvedene iz LCA .....	41
5.2.6.2. Grupa 2. Energetski indikatori .....	44
5.2.6.3. Grupa 3. Kategorije utjecaja materijala i otpada .....	45
5.2.6.4. Grupa 4. Tokovi koji izlaze iz granica proizvodnog sustava.....	46
5.2.6.5. Grupa 5. Dodatne utjecajne kategorije.....	47
5.3. Inventar životnog ciklusa proizvoda (LCI).....	48
5.3.1. Životni ciklus fotonaponskog modula .....	50
5.3.1.1. Transport pakiranog fotonaponskog modula iz Kine u Hrvatsku .....	54
5.3.1.2. Oporaba FN modula.....	54
5.3.2. Životni ciklus pretvarača.....	55
5.3.2.1. Transport pakiranog pretvarača iz Austrije u Hrvatsku .....	58
5.3.2.2. Oporaba pretvarača .....	58
5.3.3. Izrada inventara Energetskih kabela .....	58
5.3.3.1. Transport energetskih kabela iz Italije u Hrvatsku .....	60
5.3.3.2. Oporaba energetskih kabela.....	60
5.3.4. Izrada inventara aluminijski dijelovi.....	61
5.3.4.1. Transport aluminijskih dijelova unutar Hrvatske .....	62
5.3.4.2. Oporaba aluminijskih dijelova.....	62
5.3.5. Čelični dijelovi fotonaponskog sustava .....	63
5.3.5.1. Transport čeličnih dijelova .....	65
5.3.5.2. Oporaba čeličnih dijelova .....	65
5.3.6. Modeliranje životnog ciklusa FN sustava.....	66

---

5.3.6.1.	Faza proizvodnje temeljne infrastrukture .....	66
5.3.6.2.	Temeljni proces.....	68
5.3.6.3.	Faza proizvodnje nizvodne infrastrukture .....	69
5.3.6.4.	Nizvodni proces .....	70
5.3.6.5.	Model životnog ciklusa fotonaponskog sustava .....	70
5.4.	Procjena utjecaja životnog ciklusa .....	71
5.4.1.	Normalizacija i ponderiranje rezultata utjecaja na okoliša .....	74
5.5.	Interpretacija rezultata LCA.....	76
5.5.1.	Limitacije .....	84
5.5.2.	Preporuke .....	85
5.5.3.	Usporedba utjecaja na okoliš fotonaponskog sustava u odnosu na druge izvore električne energije .....	86
6.	ZAKLJUČAK.....	91
	LITERATURA.....	92
	PRILOZI.....	104



## POPIS SLIKA

Slika 1.	Europski zeleni plan [15] .....	4
Slika 2.	Udio energije iz obnovljivih izvora energije u 2021. godini [26] .....	8
Slika 3.	Promjena potrošnje primarne i krajnje energije u 2021. godini u odnosu na prosječnu potrošnju za razdoblje od 2017. do 2019. godine [34] .....	9
Slika 4.	Prognoza instalirane snage fotonaponskih sustava [45] .....	12
Slika 5.	Globalni udio proizvodnje kritičnih sirovina po zemljama [47] .....	13
Slika 6.	Dopirani silicij: a) <i>n</i> -tip poluvodiča, b) <i>p</i> -tip poluvodiča [55] .....	15
Slika 7.	Fotonaponski učinak jednoslojnih ćelija [57] .....	16
Slika 8.	Shematski prikaz MG – silicij reaktora [58] .....	17
Slika 9.	Czochralskijev postupak proizvodnje monokristalnog silicija [59] .....	18
Slika 10.	Monokristalna i polikristalna silicijska fotonaponska ćelija [60] .....	19
Slika 11.	Životni ciklus fotonaponskog modula [60] .....	19
Slika 12.	<i>I-U</i> karakteristika spojenih fotonaponskih ćelija u serijski i paralelni spoj [64]... ..	21
Slika 13.	Spoj fotonaponskih ćelija: a) bez premosne diode, b) s premosnom diodom [66]	22
Slika 14.	Slojevi konvencionalnog FN modula [69] .....	23
Slika 15.	Topologija pretvarača: a) centralni, b) pretvarač niza, c) mikropretvarač [71] ....	24
Slika 16.	Mrežni FN sustav [74] .....	25
Slika 17.	Autonomni fotonaponski sustav [74] .....	26
Slika 18.	Hibridni fotonaponski sustav [74] .....	26
Slika 19.	Prikaz izrade analize inventara životnog ciklusa [80] .....	30
Slika 20.	Koraci provođenja LCIA i kategorije utjecaja srednje i krajnje točke [87] .....	32
Slika 21.	Ilustracija PCR-a u odnosu na hijerarhiju normi i drugih dokumenata [82] .....	35
Slika 22.	Dijagram sustava prema PCR-u [82] .....	38
Slika 23.	GaBi proces proizvodnje Fotonaponskog modula .....	53
Slika 24.	Plan modela proizvodnje fotonaponskog modula u Kini .....	54
Slika 25.	Maseni udjeli pojedinih elementa pretvarača Fronius SymoGen 10,0 Plus [121]	56
Slika 26.	Plan modela proizvodnje pakiranog pretvarača u Austriji .....	57
Slika 27.	Modelirani plan proizvodnje Temeljne infrastrukture .....	67
Slika 28.	Modelirani plan proizvodnje Nizvodne infrastrukture .....	69
Slika 29.	Modelirani životni ciklus fotonaponskog sustava .....	70
Slika 30.	Relativni doprinosi pojedinih faza životnog ciklusa fotonaponskog sustava prema kategorijama utjecaja na okoliš .....	77
Slika 31.	Osiromašivanje prirodnih resursa (minerali i metali) po 1 kWh neto distribuirane električne energije: a) Proizvodnja fotonaponskog modula, b) Proizvodnja energetskog kabela FG16OR16 5 × 10 mm <sup>2</sup> .....	79
Slika 32.	Klimatske promjene po 1 kWh neto distribuirane električne energije: a) Proizvodnja monokristalne fotonaponske ćelija, b) Proizvodnja silicija Siemensovim procesom (99,9 %) .....	80
Slika 33.	Osiromašivanje prirodnih resursa (fosilna goriva) po 1 kWh neto distribuirane električne energije: a) Proizvodnja fotonaponskog modula, b) Proizvodnja silicija metalurške čistoće (MG-Si) .....	81
Slika 34.	Ionizirajuće zračenje po 1 kWh neto distribuirane električne energije: a) Proizvodnja temeljne infrastrukture, b) Proizvodnja nizvodne infrastrukture .....	82
Slika 35.	Upotreba vode po 1 kWh neto distribuirane električne energije: Proizvodnja monokristalnog silicijevog ingota Czochralskijevom metodom .....	83
Slika 36.	Izvori električne energije: Kina i Europska unija [137] .....	85

---

Slika 37.	Utjecaj na klimatske promjene po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije .....	88
Slika 38.	Utjecaj na ionizirajuće zračenje po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije .....	88
Slika 39.	Utjecaj na korištenje zemljišta po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije .....	89
Slika 40.	Utjecaj na osiromašivanje prirodnih resursa po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije .....	89
Slika 41.	Utjecaj na osiromašivanje ozona po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije .....	90

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Grupa 1. Kategorije utjecaja (HRN EN 15804+A2) [93] .....	42
Tablica 2. Grupa 2. Energetski indikatori (HRN EN 15804+A1 i HRN EN 15804+A2) [93] .....	44
Tablica 3. Grupa 3. Indikatori materijala i otpada (HRN EN 15804+A1 i HRN EN 15804+A2)[93].....	45
Tablica 4. Grupa 4. Tokovi koji izlaze iz proizvodnog sustava (HRN EN 15804+A1 i HRN EN 15804+A2) [93].....	46
Tablica 5. Grupa 5. Dodatne utjecajne kategorije (HRN EN 15804 + A2) [93].....	47
Tablica 6. Instalirane komponente fotonaponskog sustava.....	48
Tablica 7. Inventar proizvodnje fotonaponskog modula.....	51
Tablica 8. Inventar proizvodnje pakiranog pretvarača .....	56
Tablica 9. Inventari proizvodnje različitih tipova kabela.....	59
Tablica 10. Inventar proizvodnje dijelova izrađenih od aluminijske.....	61
Tablica 11. Inventar proizvodnje čeličnih dijelova .....	64
Tablica 12. Komponente temeljne infrastrukture .....	66
Tablica 13. Komponente niskonaponske infrastrukture .....	69
Tablica 14. Rezultati LCIA analize: kategorije utjecaja .....	72
Tablica 15. Rezultati LCIA analize: korištenje resursa.....	72
Tablica 16. Rezultati LCIA analize: otpad .....	73
Tablica 17. Rezultati analize: dodatne utjecajne kategorije .....	73
Tablica 18. Ocjena kategorije utjecaja prema važnosti u odnosu na ukupni rezultat utjecaja fotonaponskog sustava na okoliš.....	75
Tablica 19. Rezultati utjecaja na okoliš životnog vijeka fotonaponskog sustava i elektroenergetske mreže Europske unije (EU-28) po 1 kWh distribuirane električne energije .....	87

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
<i>ADPE</i>	kg Sb ekv.	Potencijal osiromašivanja prirodnih resursa-minerala i metala
<i>ADPF</i>	MJ, neto kalorična vrijednost	Potencijal osiromašivanja prirodnih resursa-fosilna goriva
<i>AP</i>	mol H <sup>+</sup> ekv.	Potencijal zakiseljavanja
<i>CRU</i>	kg	Komponente za prenamjenu
<i>deg</i>	/	Stopa degradacije fotonaponskog modula
<i>E</i>	W/m <sup>2</sup>	Intenzitet sunčevog zračenja
<i>E<sub>1</sub></i>	kWh	Proizvedena i pretvorena električna energija u izmjeničnu struju u prvoj godini rada
<i>EE</i>	MJ	Izvezena energija
<i>EP-F</i>	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ekv.	Potencijal eutrofikacije u slatkoj vodi
<i>EP-M</i>	kg N <sup>-</sup> ekv.	Potencijal eutrofikacije u morskoj vodi
<i>EP-T</i>	mol N ekv.	Potencijal eutrofikacije na kopnu
<i>ETP-fw</i>	CTUe	Eko toksičnost
<i>E<sub>žv</sub></i>	kWh	Proizvedena i pretvorena električna energija tijekom životnog vijeka fotonaponskog sustava
<i>FF</i>	/	Faktor ispunjenja
<i>FP</i>	/	Faktor ponderiranja
<i>FW</i>	m <sup>3</sup>	Neto korištenje pitke vode
<i>GWP</i>	kg CO <sub>2</sub> ekv.	Potencijal globalnog zatopljenja
<i>HTP-c</i>	CTUh	Toksičnost za ljude, kancerogeno
<i>HTP-nc</i>	CTUh	Toksičnost za ljude, nije kancerogeno
<i>HWD</i>	kg	Odlaganje opasnog otpada
<i>I</i>	A	Jakost električne struje
<i>IMPP</i>	A	Struja u točki maksimalne snage
<i>IRP</i>	kBq U235 ekv.	Ionizirajuće zračenje
<i>I<sub>sc</sub></i>	A	Jakost struje kratkog spoja
<i>MER</i>	kg	Materijali za energetske oporabu
<i>MFR</i>	kg	Materijali namijenjeni recikliranju
<i>n</i>	/	Životni vijek fotonaponskog sustava
<i>NF</i>	/	Normalizacijski faktor
<i>NHWD</i>	kg	Odlaganje neopasnog otpada
<i>NRSF</i>	MJ	Korištenje neobnovljivih sekundarnih goriva
<i>ODP</i>	kg CFC-11 ekv.	Potencijal osiromašivanja ozona
<i>PENRE</i>	MJ	Primarni neobnovljivi izvor energije kao nositelj energije
<i>PENRM</i>	MJ	Primarni neobnovljivi izvor energije kroz korištenje materijala

---

<i>PENRT</i>	MJ	Ukupno korišteni primarni neobnovljivi izvor energije
<i>PERE</i>	MJ	Primarni obnovljivi izvor energije kao nositelj energije
<i>PERM</i>	MJ	Primarni obnovljivi izvor energije kroz korištenje materijala
<i>PERT</i>	MJ	Ukupno korišteni primarni obnovljivi izvor energije
<i>PM</i>	učestalost bolesti	Emisija čestica
<i>P<sub>max</sub></i>	W	Maksimalna snaga ćelije
<i>PMPP</i>	W	Snaga u točki maksimalne snage
<i>POCP</i>	kg NMVOC ekv.	Potencijal nastajanja troposferskog ozona
<i>RSF</i>	MJ	Korištenje obnovljivih sekundarnih goriva
<i>RWD</i>	kg	Odlaganje radioaktivnog otpada
<i>SM</i>	kg	Korištenje sekundarnih sirovina
<i>SQP</i>	/	Utjecaji povezani s korištenjem zemljišta
<i>U</i>	V	Napon
<i>U<sub>MPP</sub></i>	V	Napon u točki maksimalne snage
<i>U<sub>OC</sub></i>	V	Napon otvorenog kruga
<i>WDP</i>	m <sup>3</sup>	Potencijal nedostatka vode
<i>η</i>	%	Učinkovitost fotonaponskih modula

## POPIS KRATICA

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
ABS	Akilonitril butadien stiren
BSF	<i>Back -surface p+ field</i> - pozitivno polje stražnje strane
CEN	<i>European Committee for standardization</i> – Europsko povjerenstvo za normizaciju
CH	Švicarska
CML-IA	<i>Center for Environmental Science, Leiden University</i> – metoda procijene utjecaja životnog ciklusa
CN	Kina
COP 21	Klimatska konferencija u Parizu
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> – kemijsko taloženje iz parne faze
DE	Njemačka
EK	<i>The European Commission</i> – Europska komisija
EoL	<i>End of Life</i> – kraj životnog ciklusa
EP	<i>The European Parliament</i> – Europski parlament
EPD	<i>Environmental Product Declaration</i> – Izjava o okolišu proizvoda
EPDM	Etilen-propilen-dien-monomer
EPM	<i>Ethylene propylene rubber</i> – elastomer etilen propilen
EU	<i>The European Union</i> – Europska unija
EU-28	Europska unija, uključujući Veliku Britaniju
EU ETS	<i>EU Emissions Trading System</i> – Europski sustav za trgovanje emisijama
EV	<i>The European Council</i> – Europsko vijeće
EVA	Etilen-vinil acetat
FN	Fotonaponski
GLO	Globalno
GRO	Glavni razvodni ormar
HEP	Hrvatska elektroprivreda
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> – Međuvladin panel o klimatskim promjenama
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i> – Međunarodna agencije za obnovljivu energiju
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za normizaciju
IT	Italija
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> – Procjena životnog ciklusa
LCI	<i>Life Cycle Inventory Analysis</i> – Analiza inventara životnog ciklusa
LCIA	<i>Life Cycle Impact Assessment</i> – Procjena utjecaja životnog ciklusa
LI	Lihtenštajn
LSZH	<i>Low Smoke Zero Halogen</i> – spojevi smanjene razine dima bez primjesa halogenih elemenata

---

LNG	<i>Liquefied Natural Gas</i> – ukapljeni zemni plin
LULUC	<i>Land Use and Land Use Change</i> – korištenje zemljišta i promjene u korištenju zemljišta
MG-Si	<i>Metallurgical grade silicon</i> – silicij metalurške čistoće
MPP	<i>Maximum Power Point</i> – točka maksimalne snage
MSR	<i>Market stability reserve</i> – rezerva za stabilnost tržišta
NEPCs	<i>National Energy and Climate Plans</i> – Nacionalni energetske i klimatski planovi
NRO	Nadgradni razvodni ormar
PA	Poliamid
PC	Polikarbonat
PCR	<i>Product Category Rules</i> – pravila kategorije proizvoda
PEF	<i>Product Environmental Footprint</i> – Ekološki otisak proizvoda
PERTPV	<i>Perovskite Thin-film Photovoltaic</i> – tankoslojni perovskitni fotonaponi
PET	Polietilen-tereftalat
PP	Polipropilen
PVC	Poli(vinil-klorid)
PVDF	Poli(viniliden-fluorid)
PVF	Poli(vinil-fluorid)
ReCiP	<i>Relevance and Characterization of International Life Cycle Impact Assessment Methods</i> – metoda procijene utjecaja životnog ciklusa
REPA	<i>Resource and Environmental Profile Analysis</i> – Analiza resursa i profila okoliša
RER	Europska regija
RNA	Sjevernoamerička regija
TC207	<i>ISO Technical Committee for Environmental management</i> – ISO Tehnički odbor za upravljanje okolišem
TRACI	<i>Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts</i> – metoda procijene utjecaja životnog ciklusa
UN	<i>United Nations</i> – Ujedinjeni narodi
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> – Program Ujedinjenih naroda za okoliš
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> – Okvirna konvencija UN-a o klimatskim promjenama
UV	Ultraljubičasto zračenje

## SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je procjena životnog vijeka fotonaponskog sustava. U teorijskom dijelu rada proučeni su planovi i strategije Europske unije kojima je cilj postizanje ugljične neutralnosti, tranzicije energetske sektora na obnovljive izvore energije i energetske neovisnosti. U svrhu procjene utjecaja fotonaponskog sustava na okoliš proučena je metodologija životnog ciklusa proizvoda (engl. *Life Cycle Assessment*, LCA), standardizirana serijom normi ISO 14040. U radu je opisana konstrukcija i tehnologija izrade sastavnih dijelova fotonaponskog sustava instaliranog na površinu od 50 m<sup>2</sup> krovništa stambenog objekta u Zagrebu predviđene vršne snage sustava od 9,72 kWp. Za taj sustav izrađen je model životnog vijeka u edukacijskoj verziji softvera GaBi. Metodom procjene životnog ciklusa izračunat je utjecaj svake životne faze fotonaponskog sustava na okoliš. Za fotonaponski sustav izrađen je i certifikat Izjava o utjecaju na okoliš (engl. *Environmental Product Declaration*, EPD). Cjelokupna provedena analiza u radu pokazala je kako fotonaponski sustav u manjoj mjeri utječe na okoliš od tradicionalnih izvora energije te da ima značajne prednosti u pogledu smanjenja emisija stakleničkih plinova.

Ključne riječi: fotonaponski sustav, fotonaponski modul, procjena životnog ciklusa, LCA, utjecaj proizvoda na okoliš, EPD



## **SUMMARY**

The aim of this master's thesis is to assess the life cycle of a photovoltaic system. The theoretical part of the thesis examines the plans and strategies of the European Union aimed at achieving carbon neutrality, transitioning to renewable energy sources in the energy sector, and achieving energy independence. To assess the environmental impact of the photovoltaic system, the methodology of life cycle assessment (LCA) standardized by the ISO 14040 series of norms, was studied. The thesis describes the construction and manufacturing technologies of the components of a photovoltaic system installed on a 50 m<sup>2</sup> roof surface of a residential building in Zagreb. A life cycle model for this system was developed using the educational version of the GaBi software. The impact of each life cycle phase of the photovoltaic system on the environment was calculated by applying the life cycle assessment method. An Environmental Product Declaration (EPD) was also created for this photovoltaic system. The comprehensive analysis conducted in the thesis showed that the photovoltaic system has lesser environmental impact than traditional energy sources and offers significant advantages in reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: photovoltaic system, photovoltaic module, Life Cycle Assessment, LCA, product environmental impact, EPD

## 1. UVOD

U 21. stoljeću energija više nije samo potreba, već je postala osnovno ljudsko pravo. Od prve industrijske revolucije do danas fosilna goriva bila su glavni izvor energije. Njihovim prekomjernim sagorijevanjem otpuštale su se velike količine stakleničkih plinova u atmosferu uslijed kojih je došlo do klimatskih promjena i devastacije okoliša. Taj proces najbolje je opisao američki oceanograf Roger Revelle 1957. godine riječima: „Ljudska bića sada provode geofizički eksperiment velikih razmjera takve vrste koji se nije mogao dogoditi u prošlosti niti će se moći reproducirati u budućnosti“ [1]. Od tada pa do danas kumulativne emisije ugljikovog dioksida (CO<sub>2</sub>) prema podacima [2] za 2020. godinu povećale su se gotovo osam puta (na 1,6 bilijuna tona) te su potrebne pravovremene i cjelovite mjere kako bi ljudska vrsta uspjela prebroditi ovu katastrofu u nastajanju. Europska unija (engl. *The European Union*, EU) predstavila se kao globalni predvodnik po pitanju borbe protiv klimatskih promjena od samog začetka globalnog angažmana te je svojim Europskim zelenim planom iz 2019. godine ponovno potvrdila svoju predanost rješavanju istih. U sklopu samog plana predstavljen je plan transformacije energetske sektora kojim bi se povećalo iskorištavanje energije iz obnovljivih izvora. Inicijalni fokus usmjeren je na povećanje europskih kapaciteta vjetroelektrana, ali uslijed geostrateških promjena na istoku Europe 2022. godine pokrenut je plan *REPowerEU* kojim je predviđeno ubrzano postavljanje fotonaponskih sustava s ciljem novoinstalirane ukupne snage od 320 GW do 2025. godine, odnosno 600 GW do 2030. godine [3]. EU s udjelom od 2,8 % svjetske proizvodnje fotonaponskih modula neće biti u stanju pokriti potražnju u ovome kratkom periodu te će biti primorana uvoziti fotonaponske module iz Kine i država azijsko-pacifičke regije koje globalno proizvode 74,7 %, odnosno 15,4 % fotonaponskih modula [4]. Jedan od načina putem kojeg se procjenjuju utjecaji na okoliš fotonaponskih sustava je metoda analize životnog ciklusa proizvoda (engl. *Life Cycle Assessment*, LCA).

U sklopu diplomskog rada u teorijskom dijelu pregledani su planovi i strategije EU kojima je cilj postizanje klimatske neutralnosti na temelju transformacije energetske sustava. Nadalje, opisani su glavni elementi fotonaponskog sustava. U svrhu procijene učinka takvih sustava na okoliš opisana je metoda LCA. U praktičnom dijelu rada za mali fotonaponski sustav provedena

je LCA analiza prema normama te je na temelju iste izrađena i Izjava o okolišu proizvoda (engl. *Environmental Product Declaration, EPD*).

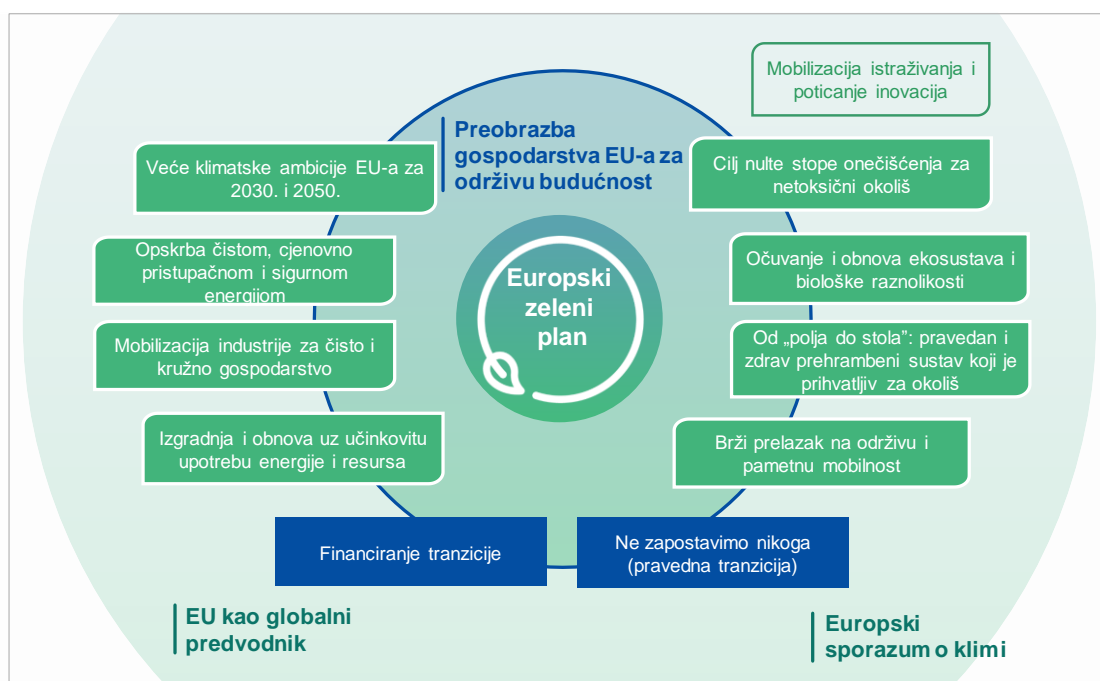
## 2. STRATEGIJE I ZAKONI EUROPSKE UNIJE VEZANI ZA KLIMU I ENERGIJU

Klimatske promjene predstavljaju jedan od najvećih izazova suvremenog doba, s potencijalom da ozbiljno ugroze našu planetu i budućnost generacija koje dolaze. Prve indicije o ljudskom utjecaju na okoliš, posebice kroz sagorijevanje fosilnih goriva i emisije ugljikovog dioksida, iznesene su u prvoj polovici 20. stoljeća od strane inženjera G. S. Callendera [5]. Geo-politička i socio-ekonomska situacija kao posljedica Drugoga svjetskog rata nije potaknula međunarodne aktere da pokrenu zajedničku strategiju rješavanja nastalih otvorenih pitanja onečišćenja okoliša, osim u kontekstu korištenja prirodnih resursa za potrebe održavanja učinkovite ekonomske aktivnosti [6]. Od uspostavljanja međunarodne organizacije Ujedinjenih naroda (UN), a uslijed neosporivih znanstvenih otkrića o sponi klimatskih promjena i emisija stakleničkih plinova [7,8], bilo je potrebno preko 20 godina kako bi se podigla svijest o ekološkim pitanjima i postavili okviri za zajedničko djelovanje [6]. Konferencijom o ljudskom okolišu održanom u Stockholmu 1972. godine postavljeni su temelji borbe protiv klimatskih promjena. Sudionici konferencije prihvatili su niz principa očuvanja okoliša, uspostavljeni su mehanizmi praćenja dugoročnih atmosferskih promjena te je formiran Program Ujedinjenih naroda za okoliš (engl. *United Nations Environment Programme*, UNEP) [9]. U sklopu UNEP-ovog programa Zemaljska straža (engl. *Earth Watch*) prihvaćen je prvi internacionalni klimatski dogovor na Konvenciji o prekograničnom onečišćenju zraka [6]. Slijedio ga je Montrealski protokol iz 1987. godine s ciljem zabrane štetnih kemikalija koje uništavaju ozon, a 1988. godine osnovan je Međuvladin panel o klimatskim promjenama (engl. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC). Temelji smanjenja emisija stakleničkih plinova postavljeni su 1992. godine na Okvirnoj konvenciji UN-a o klimatskim promjenama (engl. *United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC), navodeći da je smanjenje emisija nužno kako bi se izbjegla katastrofalna posljedica na okoliš [10]. Prvi pravno obvezujući globalni sporazum o klimatskim promjenama usvojen je na Klimatskoj konferenciji u Parizu (engl. *United Nations Climate Change Conference*, COP 21) u prosincu 2015. godine. Cilj Pariškog sporazuma jačanje je sposobnosti zemalja da se nose s utjecajem klimatskih promjena. Potpisalo ga je 196 država te je postavljen globalni pravni okvir za borbu protiv klimatskih promjena na način da se rast globalne prosječne temperature u ovom stoljeću zadrži ispod 2 °C, s time da se teži maksimalnom rastu do 1,5 °C [11].

## 2.1. Europski zeleni plan

2007. godine čelnici Europske unije (EU) donijeli su odluku da će EU do 2020. godine smanjiti svoje emisije stakleničkih plinova za 20 % u odnosu na razinu iz 1990. godine [12]. Godine 2014. čelnici EU podržali su smanjenje emisija stakleničkih plinova za najmanje 40 % do 2030. godine [13]. Zbog sve veće klimatske krize i potrebe zakonodavnih i obvezujućih smjernica, Europski parlament (engl. *The European Parliament*, EP) je u studenom 2019. godine proglasio izvanredno klimatsko stanje i tražio od Europske komisije (engl. *The European Commission*, EK) da prilagodi svoje prijedloge kako bi se globalno zagrijavanje ograničilo na 1,5 °C i osiguralo značajno smanjenje emisija stakleničkih plinova [14].

Europski zeleni plan (engl. *The European Green Deal*) predstavljen je od strane EK 2019. godine s ciljem postizanja klimatske neutralnosti EU do 2050. godine. Ovim planom ponovno je potvrđena predanost EU da se suoči s klimatskim pitanjima i izazovima modernog društva izazvanim klimatskim promjenama, a sve kako bi se osigurala prosperitetnija, pravednija i sigurnija budućnost narednih naraštaja, kako unutar same EU, tako i diljem svijeta. Na slici 1. prikazane su smjernice prema kojima će se „zeleno tranzicija“ provoditi obraćajući pozornost na regije, industrije i radnike koji će biti suočeni s najvećim izazovima [15].



Slika 1. Europski zeleni plan [15]

Europskim zelenim planom predviđena je revizija postojećih politika EU usmjerenih na opskrbu čistom energijom, promet, industriju, građevinarstvo, poljoprivredu, oporezivanje, socijalne naknade itd. Također, posebna se pažnja posvećuje povećanju svijesti o zaštiti okoliša, zaštiti ljudskog zdravlja i održivoj uporabi resursa. Jedna od temeljnih stavki koja proizlazi iz Europskog zelenog plana je pravni okvir o dopuštenim emisijama stakleničkih plinova u sklopu Europskog zakona o klimi [15].

## 2.2. Europski zakon o klimi

U ožujku 2020. godine EK je izložila prijedlog „Europskog zakona o klimi“, koji je stupio na snagu u srpnju 2021. godine. Predloženi pravni akt jest Uredba (EU) 2021/1119 EP i Europskog vijeća (EV) (engl. *The European Council, EC*) o uspostavi okvira za postizanje klimatske neutralnosti i o izmjeni uredaba br. 401/2009 i 2018/1999, te predstavlja važno sredstvo za razvijanje europskog klimatskog prava u kontekstu okoliša koje pripada u podijeljenu nadležnost EU i samih država članica [16].

EU zakonski se obvezala na smanjenje emisija stakleničkih plinova kako bi postigla klimatsku neutralnost (ugljična neutralnost) do 2050. godine, odnosno ravnotežu između količine emitiranog ugljikovog dioksida i njegove apsorpcije iz atmosfere u tzv. ponore ugljika.

Tlo, šume i oceani su prirodni ponori ugljika jer apsorbiraju više ugljikovog dioksida u odnosu na količinu koju emitiraju te prema procjenama na godišnjoj razini uklone između 9,5 Gt i 11 Gt CO<sub>2</sub>. Međutim, globalne godišnje emisije CO<sub>2</sub> već su dostigle 37,8 Gt u 2021. godini te je potrebno smanjiti emisije ugljikovog dioksida obzirom da ne postoje učinkoviti umjetni ponori ugljika [17].

Zakonom o klimi osnovan je Europski znanstveni savjetodavni odbor za klimatske promjene (dalje „Savjetodavni odbor“) sastavljen od neovisnih stručnjaka iz različitih država članica. Funkcija savjetodavnog odbora uključuje razmatranje najnovijih znanstvenih spoznaja i klimatskih podataka relevantnih za EU [18]. Na temelju istih, pruža znanstvene savjete i sastavlja izvješća o postojećim i predloženim mjerama EU uspostavljenih Uredbom 2018/1999 o upravljanju energetske unijom i djelovanju na području klime. Uredbom su mjere usmjerene ka smanjenju emisija stakleničkih plinova, prvenstveno CO<sub>2</sub> (dekarbonizaciji), energetske sigurnosti, energetske efikasnosti, unutarnjem energetske tržištu i istraživanju, inovacijama te konkurentnosti, a sve prema cilju zadržavanja rasta prosječne globalne temperature uspostavljenog Pariškim sporazumom [19].

Europski zakon o klimi predstavlja temeljni korak prema integriranijoj klimatskoj politici EU i osigurava veću sigurnost i stabilnost u europskom klimatsko-energetskom i pravnom okviru time što određuje pravno obvezujući prijelazni cilj smanjenja najmanje 55 % emisija stakleničkih plinova do 2030. godine u odnosu na referentno stanje iz 1990. godine, te konačni cilj klimatske neutralnosti do 2050. godine [18].

### 2.3. Spremni za 55

Kako bi se zakonodavni sustav EU ažurirao i bio podložan reviziji te kako bi se postiglo i osiguralo da politika Europske unije bude u skladu s klimatskim ciljevima do 2030. godine, EV i EP donijeli su paket mjera „Spremni za 55“ (engl. *Fit for 55*). Novi zakoni obuhvaćaju područja klime, energetike i goriva, prometa, građevinarstva, korištenje zemljišta i šumarstvo [20]. Osnovna načela prema kojima se paket „Spremni za 55“ provodi su [21]:

- poštena i društveno pravedna tranzicija
- održavanje i jačanje inovacija i konkurentnost industrije EU-a uz istodobno osiguravanje jednakih uvjeta u odnosu na gospodarske subjekte iz trećih zemalja
- podupiranje položaja EU-a kao predvodnika u globalnoj borbi protiv klimatskih promjena.

Jedna od mjera paketa „Spremni za 55“ je revizija Europskog sustava za trgovanje emisijama (engl. *EU Emissions Trading System*, EU ETS). EU ETS je tržišni sustav ugljikovog dioksida pokrenut 2005. godine kojim se određuje ukupna količina stakleničkih plinova koju neki od sudionika sustava smije ispustiti. Bazira se na principu „zagađivač plaća“ i obvezuje više od deset tisuća elektrana i tvornica na posjedovanje dozvola za svaku tonu emitiranog CO<sub>2</sub>. Tvrtke su ih dužne kupiti na aukcijama, a cijena ovisi o ponudi i potražnji. U suštini, radi se o financijskom poticaju za smanjenje zagađenja, koji se pokazao kao efikasan alat za redukciju emisija stakleničkih plinova. Novoinstalirani sustavi pokriveni u okviru EU ETS smanjili su emisije za 35 % od 2005. do 2021. godine [22].

Usljed gospodarske krize i pada potražnje na tržištu 2008. godine, dozvole za emisijske jedinice postale su povoljne gospodarskim subjektima. Kao posljedica niskih cijena, tvrtke su prestale s ulaganjem u zelene tehnologije što je utjecalo i na borbu protiv klimatskih promjena i EU ETS sustav za trgovanje emisijama. Slijedom toga, 2015. godine nametnulo se rješenje za stvaranjem rezervi za stabilnost tržišta (engl. *Market Stability Reserve*, MSR) kojima bi se

omjer ponude i potražnje emisijskih jedinica uskladio. U rezervu je stavljeno 24 % EU ETS emisijskih jedinica, koje se mogu osloboditi u slučaju nestašice. U ožujku 2023. godine rezerva za stabilnost tržišta produžena je do 2030. godine s ciljem da se EU zaštiti od pada cijena dozvola uslijed oscilacija na tržištu uzrokovanih pandemijom bolesti COVID-19, sve kako bi postojala daljnja tendencija smanjenja emisija stakleničkih plinova [23].

#### 2.4. Energija iz obnovljivih izvora energije

Uspostavljeni mehanizam EU ETS djelotvoran je pri smanjenju emisija stakleničkih plinova, ali samo transformacija gospodarstva EU na „čiste“, obnovljive izvore energije omogućit će postizanje klimatskih ciljeva predloženih Europskim zelenim planom i postavljenim europskim klimatskim zakonom. Direktivom (EU) 2018/2001 o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora iz 2021. godine postavljen je obvezujući cilj udjela obnovljivih izvora energije u energijskom sastavu EU na 32 % do 2030. godine [24]. Obnovljivi izvori energije su izvori sačuvani u prirodi i obnavljaju se u cijelosti ili djelomično, a prema hrvatskom Zakonu o energiji podijeljeni su na: „hidropotencijalnu, aerotermalnu, geotermalnu i hidrotermalnu energiju, energiju mora i vjetra, energiju iz plina dobivenog iz biomase, deponija otpada i obradom (pročišćavanjem) otpadnih voda, te sunčevu energiju“ [25].

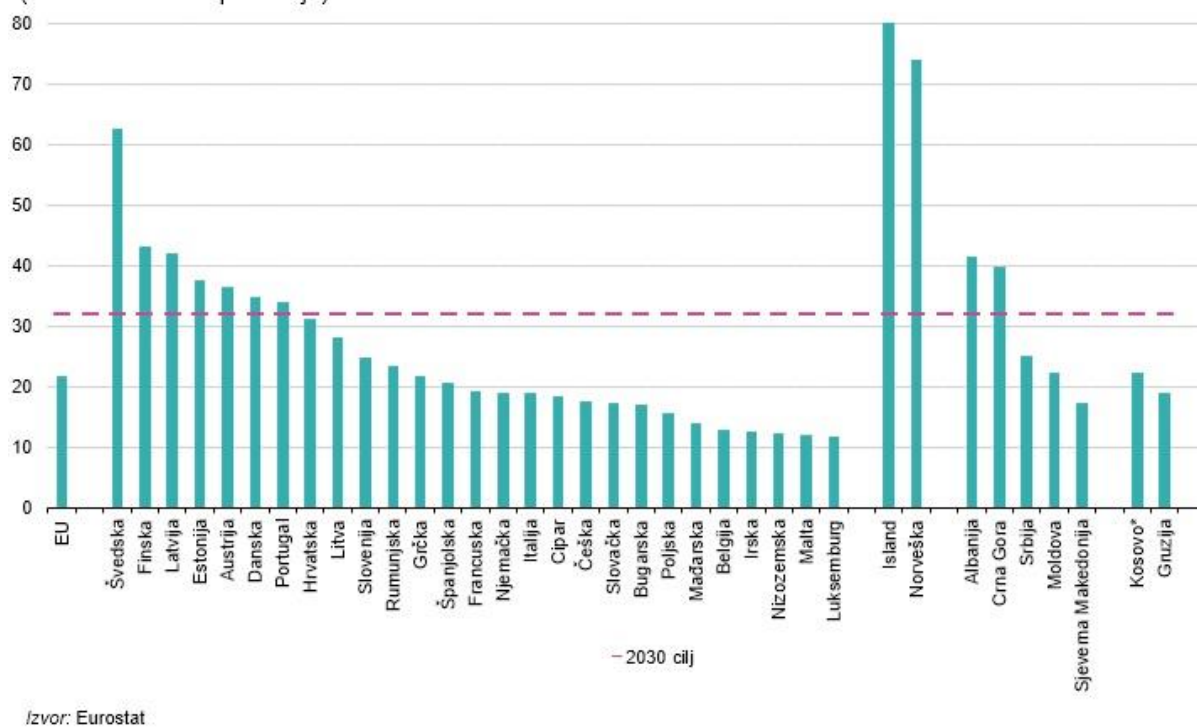
Udjeli energije iz obnovljivih izvora energije u 2021. godini zemlja članica i zemlja partnera EU prikazani su na slici 2. Prema službenim podacima Eurostata, u 2021. godini u Hrvatskoj je 31,3 % energije dobiveno iz obnovljivih izvora. Međutim, većina članica EU, pogotovo zemlje najveće gospodarske snage kao što su Njemačka, Francuska i Italija, daleko su od postizanja cilja uzevši u obzir da je za stanje u 2021. godini bio potreban 17-godišnji period ulaganja u obnovljive izvore energije [26].

Slijedom toga, a u skladu s većim ambicijama EU s postavljenim Zelenim planom u sklopu zakonodavnog paketa „Spremni za 55“ predložena je revizija prethodno navedene direktive. Privremeni dogovor o obvezujućem cilju za 2030. godinu postignut je dana 30. ožujka 2023. godine te je predviđeno minimalno 42,5 %, s težnjom prema 45 %, udjela obnovljivih izvora energije [27].

Kako bi se predviđeni ciljevi mogli postići, države članice EU dužne su povećati svoje doprinose utvrđene u Integriranim nacionalnim energetske i klimatskim planovima (engl. *National Energy and Climate Plans*, NECPs). NECPs potrebno je ažurirati tijekom 2023. i 2024. godine sukladno prijedlozima iz paketa [28].



### Udio energije iz obnovljivih izvora, 2021 (% bruto konačne potrošnje)



Slika 2. Udio energije iz obnovljivih izvora energije u 2021. godini [26]

## 2.5. Energetska učinkovitost

Najdjelotvorniji način postizanja ciljeva održivog razvoja je povećanje energetske učinkovitosti. Veća učinkovitost povećava industrijsku konkurentnost, otvara nova radna mjesta, osigurava sigurnost opskrbe energijom i doprinosi smanjenju emisija štetnih plinova [29]. EU je iz tog razloga 2007. godine izradila dugoročne projekcije o potrošnji energije, prema kojima se ciljevi o energetske učinkovitosti usklađuju [30].

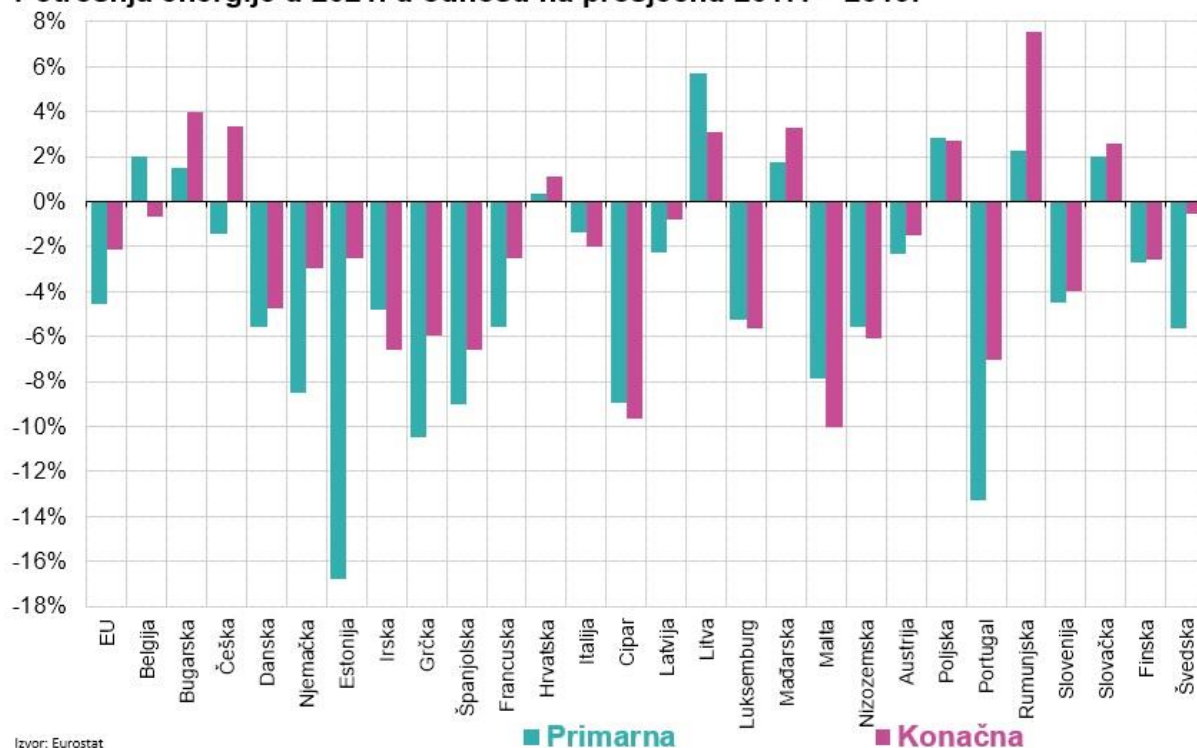
Direktivom (EU) 2012/27 o energetske učinkovitosti, na snazi od 2012. godine, države članice EU bile su obvezane postaviti nacionalne ciljeve kojima bi se potrošnja energije do 2020. godine smanjila za 20 %. Direktivom su uvedene obvezujuće mjere i pravila za krajnje korisnike i dobavljače energije, a države članice dužne su svake tri godine objaviti nove nacionalne akcijske planove za energetske učinkovitost [30].

Direktiva o energetske učinkovitosti revidirana je u sklopu paketa „Čista energija za sve Europljane“ 2018. godine te je energetske učinkovitost prepoznata kao ključni element i prioritet kojim se treba voditi prilikom ulaganja u energetske infrastrukturu EU. Postavljen je novi cilj o učinkovitosti za smanjenjem od 32,5 % primarne i konačne potrošnje energije do

2030. godine. Države članice EU također su uspostavile mjere za smanjenje potrošnje energije na godišnjoj razini po stopi od 4,4 % [31].

Na slici 3. prikazana je promjena potrošnje primarne i krajnje energije u 2021. godini u odnosu na prosječnu potrošnju za razdoblje od 2017. do 2019. godine. Potrošnja primarne energije odnosi se na ukupnu potražnju za energijom u nekoj zemlji. Obuhvaća potrošnju samog energetskog sektora, gubitke pretvorbe (npr. iz nafte ili plina u električnu energiju) i distribucije energije te potrošnju krajnjih korisnika [32]. Pad primarne potrošnje energije zabilježen je kod 19 država članica EU i to najviše u Estoniji, Portugalu i Grčkoj. S druge strane, povećanja su zabilježena u Litvi, Rumunjskoj i Poljskoj. Krajnja potrošnja energije ukupna je energija koju troše krajnji korisnici, kao što su kućanstva, industrija i poljoprivreda te ona isključuje energiju koju koristi sam energetski sektor [33]. Za konačnu potrošnju energije zabilježeni su slični trendovi. Na razini EU pad potrošnje primarne energije bio je u skladu s ciljem od 4,4 % smanjenja godišnje, ali pad potrošnje konačne energije na razini EU u 2021. godini nije postignut.

**Potrošnja energije u 2021. u odnosu na prosječnu 2017. - 2019.**



**Slika 3. Promjena potrošnje primarne i krajnje energije u 2021. godini u odnosu na prosječnu potrošnju za razdoblje od 2017. do 2019. godine [34]**

U srpnju 2021. godine EK je predložila prvu izmjenu Direktive o energetske učinkovitosti kao dio paketa „Spremi za 55“ kako bi se ciljevi energetske učinkovitosti uskladili s novim klimatskim ambicijama. Predloženo je povećanje obvezujućeg godišnjeg cilja energetske učinkovitost za potrošnju primarne i konačne energije na 39 %, odnosno 36 %, do 2030. godine. Također, predlaže se ublažavanje energetske siromaštva putem davanja prednosti ugroženim kupcima, dok se za velike potrošače energije uvode mjere povećanja tehničke stručnosti radnika i obveze revizije poslovanja [35].

Povećanje energetske učinkovitosti EU planira ostvariti izmjenama Direktive (EU) 2010/31 o energetske svojstvima zgrada, novom strategijom pod nazivom Val obnove, te izmijenjenim okvirom označivanja energetske učinkovitosti proizvoda koji koriste električnu energiju [36].

Dogovorom o prijedlogu revizije Direktive o energetske svojstvima zgrada EV se složilo da će sve nove zgrade u vlasništvu javnih tijela biti zgrade s nultim emisijama do 2028. godine, dok se za sve ostale to očekuje do 2030. godine. Države članice su zaključile da će utvrditi zahtjeve da se nove zgrade projektiraju i grade tako da maksimalno iskoriste svoj potencijal proizvodnje solarne energije. Planirano je da se do 31. prosinca 2029. godine na sve nove stambene zgrade uvedu solarni uređaji [37].

Potencijal za povećanje energetske učinkovitosti unutar EU postoji i u sklopu obnove starih zgrada. Dvije trećine zgrada u EU je energetske neučinkovito, pogotovo kuće obitelji s niskim prihodima. Slijedom toga, EU je pokrenuo Val obnove, strategiju smanjenja emisija stakleničkih plinova iz zgrada za 60 % do 2030. godine. Strategija je usmjerena na potporu ekološkom dizajnu i označavanju energetske učinkovitosti zgrada te promicanju korištenja građevinskih materijala proizvedenih na održiv način. Dekarbonizacija grijanja i hlađenja, odnosno prelazak na električne alternative ključni su koraci za uspješno provođenje te strategije [38].

## 2.6. REPowerEU

Usljed novonastale geopolitičke i energetske krize 2022. godine bilo je potrebno drastično ubrzanje zelene tranzicije, kao i smanjenje ovisnosti EU o fosilnim gorivima. Time su postavljeni novi izazovi politici EU, a posebice u području energetike. EK je u svibnju 2022. godine predstavila plan *REPowerEU* s ciljem diverzifikacije opskrbe energije i smanjenja potražnje prirodnog plina, uz prelazak na čistu energiju i povećanje otpornosti europskog energetske sustava na vanjske promjene tržišta energentima [39].

U sklopu Europske energetske platforme (engl. *EU Energy Platform*) EU je u suradnji s međunarodnim partnerima 2022. godine osigurala rekordne razine uvoznog ukapljenog zemnog plina (engl. *Liquefied Natural Gas*, LNG). Nadalje, uspostavljen je i mehanizam zajedničke kupnje plina *AggregateEU* s ciljem postizanja nižih cijena na globalnom tržištu i pravovremenog punjenja skladišta [40].

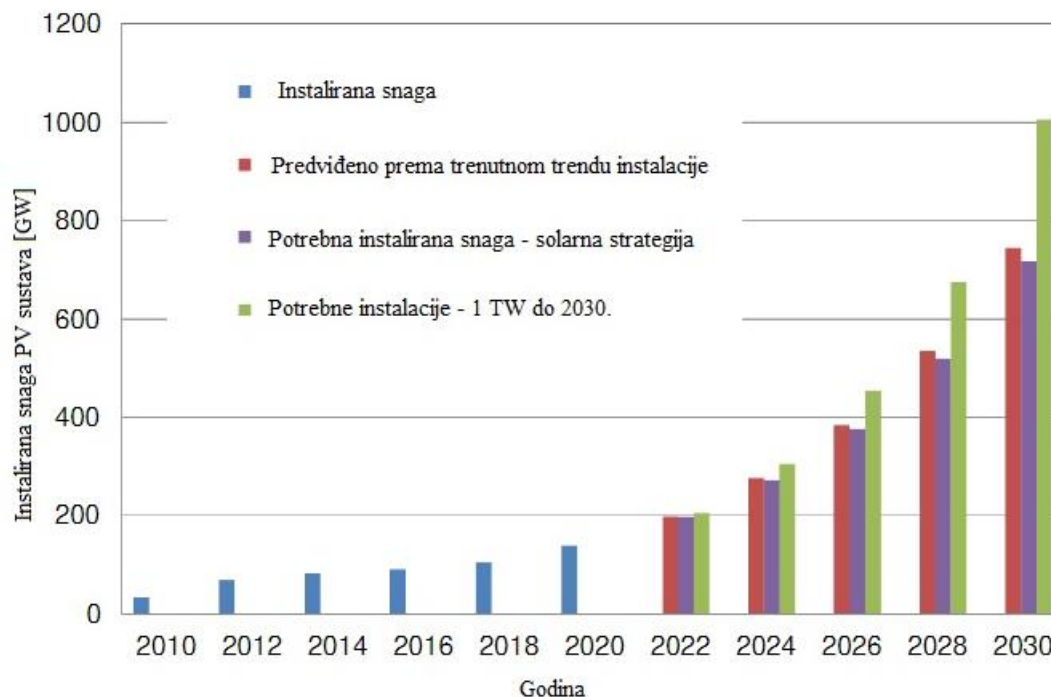
Ubrzana dekarbonizacija prometnog sektora planira se postići izgradnjom kapaciteta za proizvodnju 10 milijuna tona domaćeg obnovljivog vodika do 2030. godine. Također, planirano je osigurati uvoz iste količine vodika kako bi se mogle zadovoljiti predviđene potrebe. Projekti s ciljem uvođenja vodika kao alternative ugljenu, plinu i nafti financirat će se dodatnim fondom vrijednim 200 milijuna eura [41].

Obnovljivi izvori energije ključan su dio ubrzane diverzifikacije energetskog sektora te je predviđeno povećanje kapaciteta proizvodnje električne energije na 1236 GW u odnosu na 1067 GW predviđenih paketom mjera „Spremi za 55“. Planom *REPowerEU* poseban se fokus usmjerio na brže postavljanje fotonaponskih sustava, s ciljem od 320 GW novoinstalirane snage do 2025. godine, odnosno 600 GW do 2030. godine u sklopu planirane strategije o solarnoj energiji [42].

Svi planirani projekti zahtijevat će velika ulaganja od strane EU te je stoga uspostavljen Mehanizam za oporavak i otpornost kao temeljni alat financiranja. Na razini EU osigurano je gotovo 300 milijardi eura, od kojih 225 milijardi eura u zajmovima i 72 milijarde eura u obliku bespovratnih sredstva [43].

## 2.7. Strategija solarne energije EU

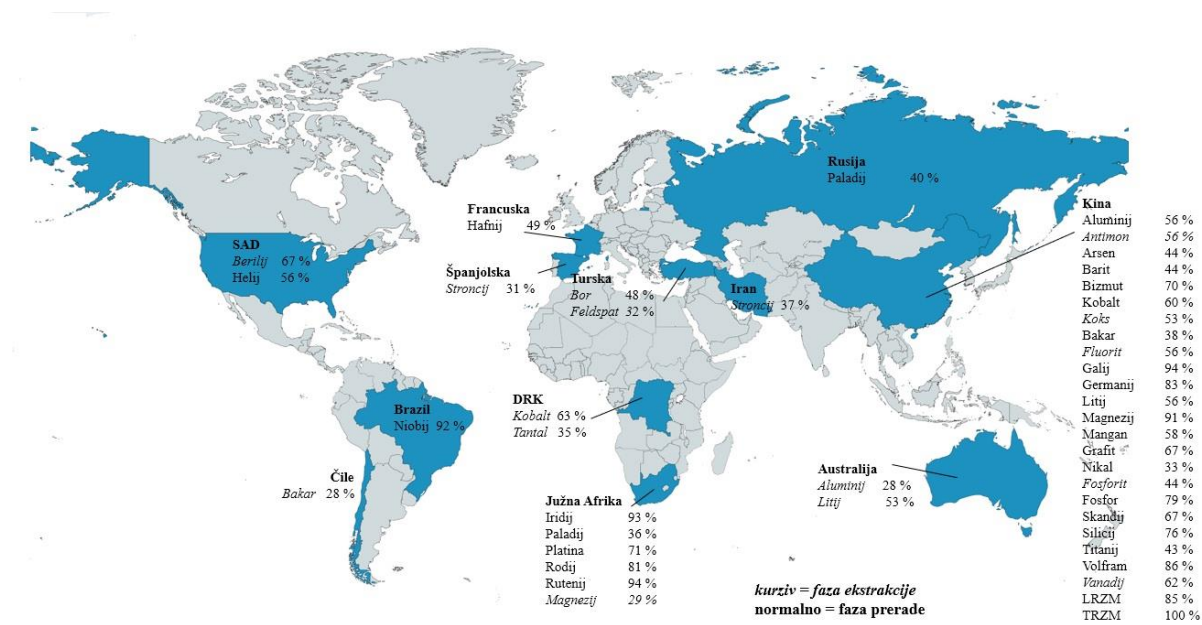
U okviru plana *REPowerEU*, EK je u svibnju 2022. donijela europsku Strategiju za solarnu energiju kako bi se uklonile prepreke i izazovi te ubrzalo uvođenje fotonaponskih tehnologija s ciljem napuštanja fosilnih goriva i ostvarenja zelene tranzicije. Solarna energija jedan je od najbrže rastućih obnovljivih izvora energije EU. Na slici 4. prikazan je prognozirani rast instalirane snage fotonaponskih sustava do 2030. godine te će se prema istome ranije spomenuti ciljevi ukupne instalirane snage, predloženi u sklopu plana *REPowerEU* i postavljeni europskom solarnom Strategijom, premašiti. Ovaj oblik energije je ključan za postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine s obzirom na to da je najpristupačniji kućanstvima i doprinosi zaštiti potrošača od oscilacija cijena energije [44]. U okviru Europske inicijative za solarne krovove promiče se brza instalacija fotonaponskih sustava na kućanske objekte.



**Slika 4. Prognoza instalirane snage fotonaponskih sustava [45]**

Kako bi se postupak izdavanja dozvola za fotonaponske sustave skratio i pojednostavio, potrebno je uskladiti zakonodavstvo. Također, uspostavljen je i Savez EU-a za solarnu fotonaponsku industriju, kako bi se industrijski lanac vrijednosti na području solarne energije i u sektoru proizvodnje fotonaponskih sustava učinio otpornijim na tržišne promjene. EU je ovisna o stranim dobavljačima, koncentriranim u nekoliko zemalja po pitanju materijala potrebnih za proizvodnju komponenta fotonaponskog sustava, pogotovo fotonaponskih modula zasnovanih na tehnologijama kristalnog silicija [44].

EU je u skladu s Akcijskim planom za kružno gospodarstvo iz 2020. godine predložila izradu Uredbe o kritičnim sirovinama, koja uspostavlja niz mjera prema kojim bi se domaći kapaciteti rudarenja povećali da zadovolje 10 % domaće potražnje. Nadalje, kako bi se postigao cilj da se uvoz iz pojedine treće zemlje ograniči na ne više od 65 % udjela kritičnih sirovina, potrebno je povećanje kapaciteta za prerađivanje i recikliranje na 40 %, odnosno 15 % [46]. Na slici 5. prikazan je udio proizvodnje kritičnih sirovina u pojedinim zemljama svijeta te je vidljivo da je Kina globalni predvodnik u proizvodnji, pogotovo metalnog silicija koji se koristi za izradu poluvodičkih uređaja.



Slika 5. Globalni udio proizvodnje kritičnih sirovina po zemljama [47]

Financiranjem različitih projekata razvoja novih tehnologija fotonaponskih ćelija, EU planira smanjiti svoju ovisnost o drugim državama. U sklopu projekta PERTPV (engl. *Perovskite Thin-Film Photovoltaic*) razvijaju se fotonaponske ćelije zasnovane na perovskitnim materijalima. Te nove fotonaponske ćelije bit će efikasnije i održivije te će pružati alternativu konvencionalnim fotonaponskim ćelijama na bazi silicija [48].

### 3. FOTONAPONSKI SUSTAV

Fotonaponski (FN) sustav, poznat i kao sunčana elektrana, sastoji se od slijeda međusobno povezanih komponenti s ciljem pretvorbe sunčeve energije u korisnu električnu energiju. U jeku borbe protiv klimatskih promjena i napuštanja fosilnih goriva kao primarnog energetskog izvora, FN sustavi zadnjih su godina dobili na važnosti jer se njima proizvodi čista i održiva energija iz obnovljivog izvora. Prema istraživanju Međunarodne agencije za obnovljivu energiju (engl. *International Renewable Energy Agency*, IRENA) u 2022. godini instalirano je 192 GW ukupne snage FN sustava, s udjelom od 65,1 % ukupnih instaliranih kapaciteta elektrana na obnovljive izvore energije [49]. U prilog tome ide i smanjenje troškova izrade glavnih komponenti, posebice fotonaponskih modula, čija se cijena prema instaliranoj snazi iskazanoj u vatima (W) višestruko smanjila u zadnjih pedeset godina, s ~ 105 €/W u 1975. godini na ~ 0,25 €/W u 2021. godine [50].

Začeci razvoja fotonaponskih tehnologija započeli su davne 1839. godine otkrićem fotonaponskog učinka od strane Alexandra Edmonda Becquerela. Fotoosjetilna svojstva selenija (Se) obilježila su rana istraživanja fotonaponskog učinka materijala te je prvu fotonaponsku ćeliju izumio Charles Fritts 1877. godine, izradivši uređaj od selenija na tankom sloju zlata, efikasnosti 1 %. Kvantnu osnovu fotonaponskog učinka postavio je Albert Einstein 1905. godine, čime su postavljeni znanstveni temelji daljnjeg razvoja. Otkrićem poluvodičkih svojstava materijala te potaknuti primjenom u elektroničkoj industriji, u sklopu laboratorija tvrtke Bell, Daryl Cahpin, Calvin Fuller i Gerald Pearson izumili su 1957. godine prvu fotonaponsku ćeliju temeljenu na siliciju. Metodu proizvodnje monokristalnog silicija nužnog za proizvodnju konvencionalnih ćelija danas, predložio je Jan Czochralski 1918. godine prema kojemu je i nazvana. Gordon Teal i John Little su 1948. godine prilagodili Czochralskijevu metodu i proizveli monokristalni germanij. Visoka cijena izrade fotonaponskih ćelija u ranim fazama razvoja ograničila je područje njihove primjene na svemirsku industriju [51].

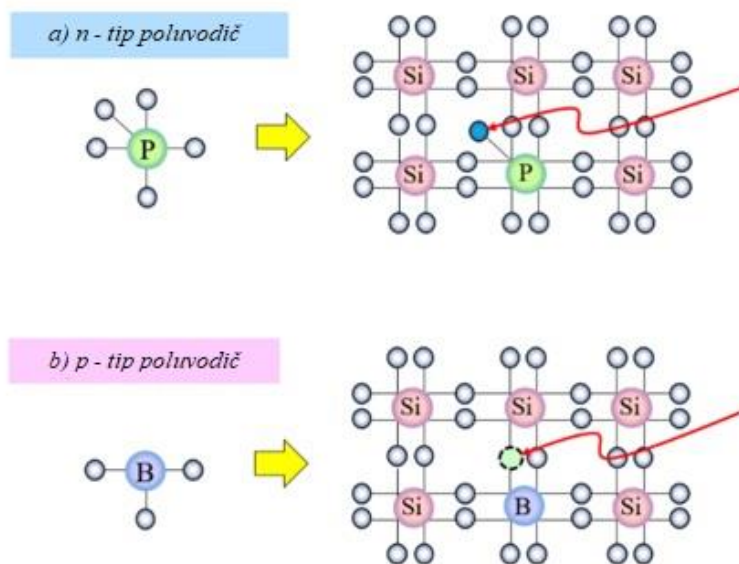
Napredcima u razvoju tehnologija fotonaponskih ćelija te nižim troškovima izrade uz veću efikasnost FN modula, početkom 21. stoljeća započela je njihova komercijalna primjena. FN ćelije neophodne su za proizvodnju električne energije, a korisna upotreba te energije, ovisno o tome je li riječ o mrežnom, autonomnom ili hibridnom FN sustavu, ovisi o integriranim komponentama sustava: FN ćelija kao osnova za izradu FN modula, električni kabeli i pribor, regulatori i pretvarači električne energije te sustav pohrane električne energije [52].

### 3.1. Fotonaponske ćelije

Fotonaponski učinak je temeljni princip rada fotonaponskih ćelija koje pretvaraju sunčevu energiju u električnu energiju. U svrhu sagledavanja ovoga procesa važno je razmotriti svojstva poluvodiča, poput silicija i germanija. Poluvodiči su materijali čija je električna vodljivost između izolatora, poput stakla, i vodiča, poput bakra ili aluminijsa. Električna vodljivost poluvodiča ovisi o broju elektrona u valentnoj vrpci i veličini energijskog procijepa, odnosno zabranjenoj zoni u kojoj elektroni ne smiju biti prisutni [53].

Dodavanjem elementa više ili niže valencije u poluvodički materijal postupkom dopiranja, odnosno difuzijom, povećava se vodljivost poluvodiča. U slučaju jednoslojnih silicijskih fotonaponskih ćelija prednja strana supstrata dopira se tankim slojem peterovalentnog elementa poput fosfora (P). Na atomskoj razini silicijev atom veže se s difundiranim fosforom u četiri kovalentne veze, prikazano na slici 6. a). Nepovezan ostaje jedan elektron fosfora prema kojem se sloj i naziva *n*-tip poluvodiča (elektron, negativno nabijena čestica) [53,54].

S druge strane, silicijev supstrat duboko je dopiran slojem trovalentnog elementa poput bora (B), prikazano na slici 6. b). Atomske veze bora s okolnim atomima silicija stvaraju pozitivno nabijene šupljine zbog nedostatka jednog elektrona pri formiranju kovalentnih veza. Formirani sloj naziva se *p*-tip poluvodiča (*p*, prema pozitivan) [53,54].

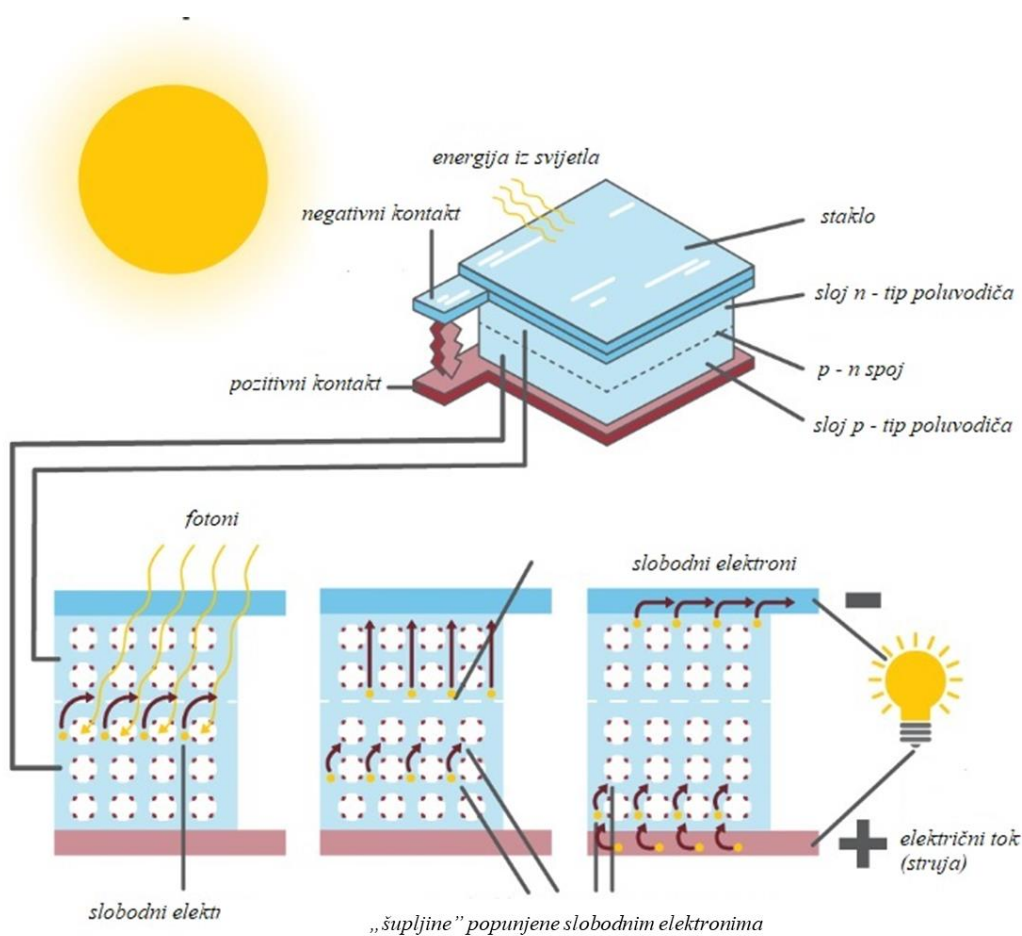


Slika 6. Dopirani silicij: a) *n*-tip poluvodiča, b) *p*-tip poluvodiča [55]



Kontakt između dva tipa poluvodiča naziva se  $p$ - $n$  spoj. Slobodni elektroni iz  $n$ -tipa poluvodiča u blizini  $p$ - $n$  spoja brzo se kreću kako bi popunili šupljine u  $p$ -tipu poluvodiča. Istovremeno, šupljine u blizini  $p$ - $n$  spoja kreću se prema  $n$ -tipu poluvodiča, formirajući parove elektron-šupljina. Ovaj proces rezultira stvaranjem osiromašene zone (engl. *depletion zone*) u kojoj nema mobilnih nositelja naboja [56].

Sunčeva svjetlost nužna je kako bi poluvodič mogao proizvoditi električnu struju. Fotoni svjetlosti upadaju na  $p$ - $n$  spoj poluvodiča i predaju elektronima potrebnu energiju da prijeđu u vodljivu vrpcu atoma, dok u valentnoj vrpci ostaju šupljine. Elektroni i šupljine kreću se u suprotnim smjerovima prema površinama  $p$  i  $n$ -tipa poluvodiča, stvarajući neravnotežu električnog naboja na prednjoj i stražnjoj strani poluvodiča. Ta neravnoteža rezultira stvaranjem električnog potencijala kod fotonaponskih ćelija, definira fotonaponski učinak i omogućuje protok struje kroz sustav, kako je prikazano na slici 7. [56].

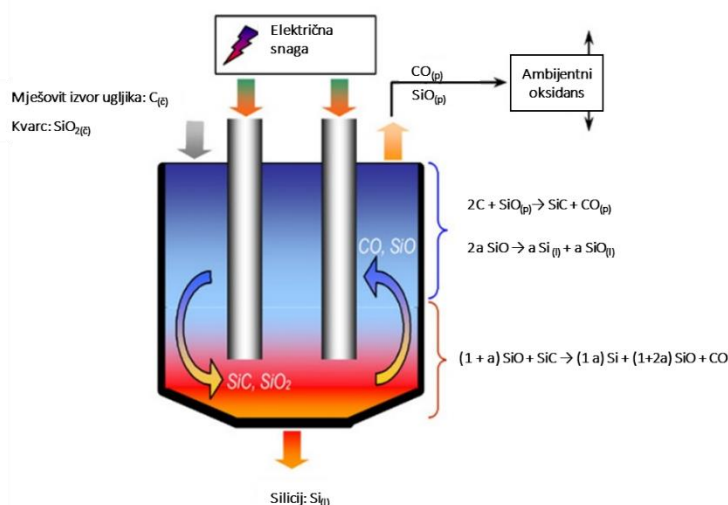


Slika 7. Fotonaponski učinak jednoslojnih ćelija [57]

FN ćelije dijele se prema materijalima od kojih su izrađene kroz tri generacije njihova razvoja. U prvu generaciju spadaju ćelije zasnovane na kristalnom siliciju i dijele se na monokristalne i polikristalne. Te tehnologije ćelija su najrazvijenije i čine 95 % ukupne komercijalne primjene. U drugu generaciju spadaju tankoslojne fotonaponske ćelije, koje sadrže ćelije kadmijevog telurida (CdTe), bakar-indij-galijevog di-selenida (CIGS), amornog silicija ili galijevog arsenida (GaAs). Takve ćelije čine preostalih 5 % ćelije iz komercijalne primjene. Razvojem znanosti o materijalima te s ciljem postizanja veće učinkovitosti uz niže troškove, u fazi su razvoja FN ćelije treće generacije: perovskitne, organske i fotonaponske ćelije osjetljive na boju [52].

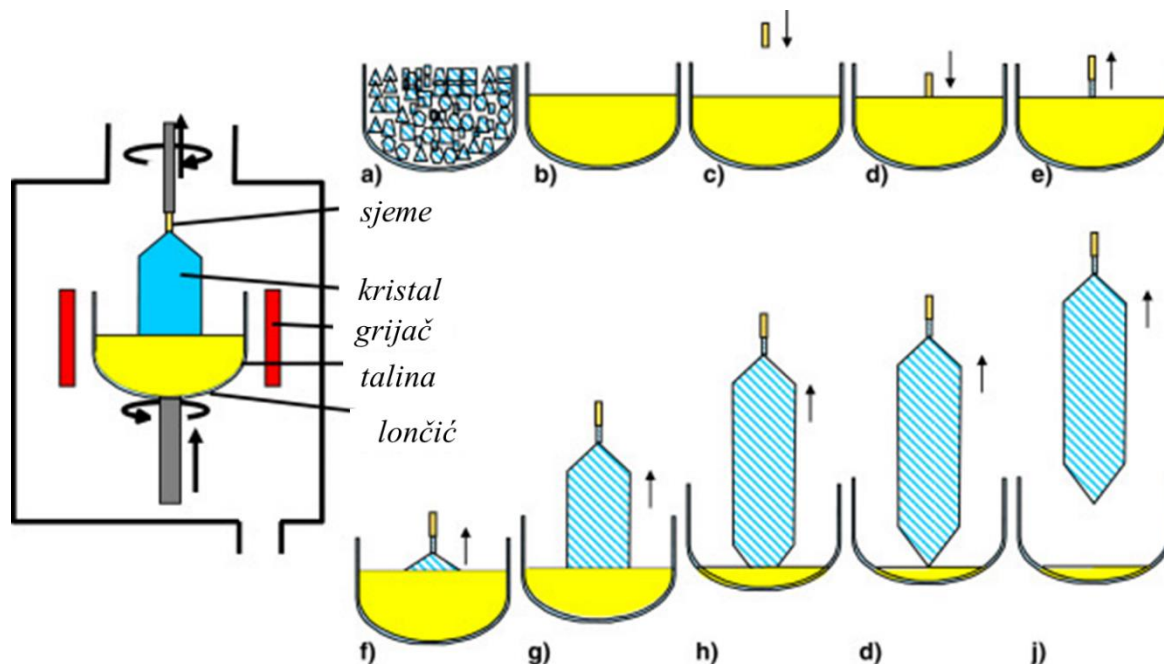
### 3.1.1. Izrada silicijskih fotonaponskih ćelija

Proizvodni postupak fotonaponskih ćelija izrađenih iz silicija, neovisno je li riječ o tehnologiji monokristalnog ili polikristalnog silicija, započinje redukcijom silicijevog dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) unutar elektrolyučne peći, prikazano na slici 8. Tim postupkom proizvodi se silicij metalurške čistoće (engl. *Metallurgical Grade Silicon*, MG-Si) od 98,5 %, što je nedovoljno za proizvodnju fotonaponskih ćelija. MG-Si pri reakciji s klorovodičnom kiselinom (HCl) tvori anorganski spoj triklorosilan (engl. *Trichlorosilane*). Raspadanjem triklorosilana uslijed pirolize na 1150 °C unutar Siemensovog reaktora, proizvodi se silicij čistoće preko 99,9 % na način sličan kemijskom taloženju iz parne faze (engl. *Chemical Vapour Deposition*, CVD). Silicijski monokristalni ingoti proizvode se Czochralskijevom metodom koja je prikazana na slici 9. [58].



Slika 8. Shematski prikaz MG – silicij reaktora [58]

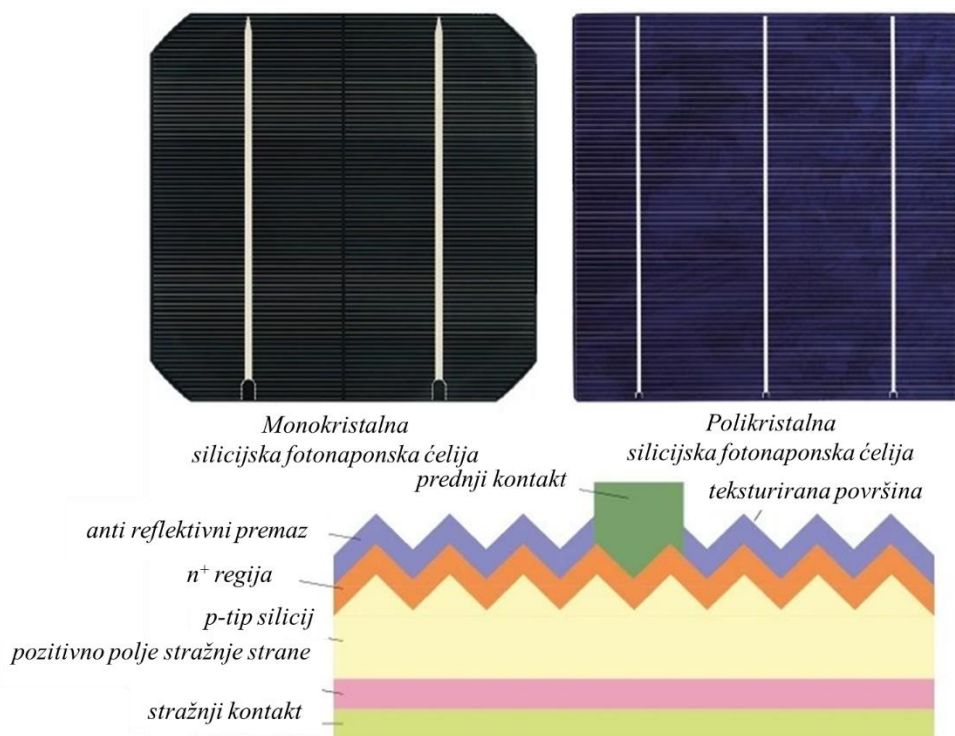
Czochralskijev postupak se provodi tako što se silicij postavlja u cilindrični lonac i tali se u elektrotopnoj peći (engl. *Resistance Heater*). Nakon što se silicij u potpunosti rastali, u talinu se dodaju tvari koje uzrokuju stvaranje kristala, tj. nukleaciju (engl. *Seed Crystal*) silicija. Oblik monokristalnog silicijskog ingota i njegov promjer ovisi o temperaturi peći, brzini izvlačenja te brzini rotacije kristala [59].



Slika 9. Czochralskijev postupak proizvodnje monokristalnog silicija [59]

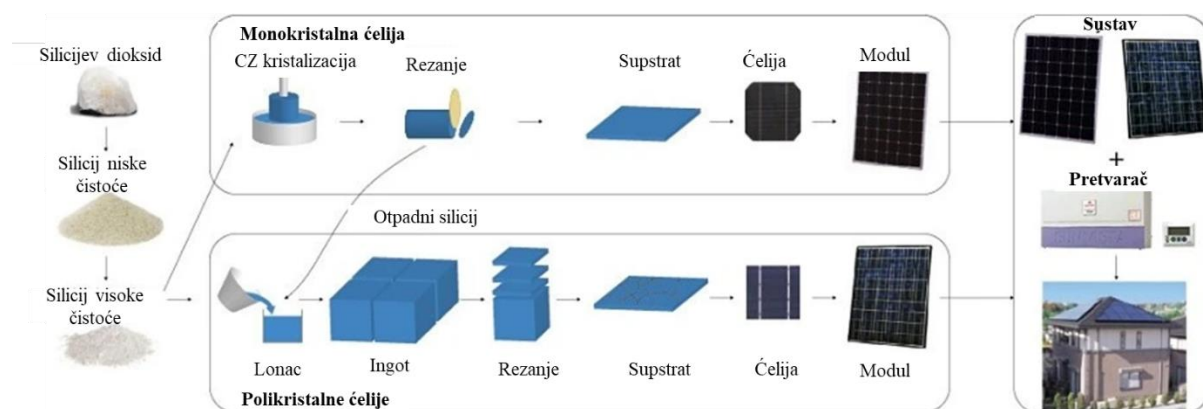
Proizvedeni monokristalni silicijski ingot je zadovoljavajuće kvalitete potrebne za izradu elektroničkih uređaja i fotonaponskih ćelija. Ingot se reže na tanke supstrate, koji se potom obrađuju kako bi zadovoljili određenu funkciju. S druge strane, polikristalni silicij proizvodi se u kvarcnim loncima iz otpadnog silicija, nastalog kao produkta rezanja monokristalnog ingota na željeni oblik. Supstrati monokristalnog i polikristalnog silicija na isti se način obrađuju kako bi se proizvela fotonaponska ćelija. U svrhu povećanja efikasnosti i umanjivanja reflektivnog svojstva samog silicija, supstrati istog se nagrizažu u svrhu postizanja mikrometerske piramidne strukture površine kakva je i prikazana na slici 10. Dodatno smanjenje refleksije postiže se prevlačenjem silicijeve prednje površine silicijevim nitridom ili titanijevim dioksidom. Silicijski supstrat potrebno je dopirati borom sa stražnje strane i tankim slojem fosfora s prednje kako bi se formirao  $p-n$  spoj. Da bi se spriječila rekombinacija nosača nižeg napona uslijed zagrijavanja ćelije, sa stražnje strane potrebno je formirati regiju  $p$ -tipa polja stražnje ploče (engl. *Back-Surface  $p^+$  Field*, BSF). BSF-regije uobičajeno se postižu paljenjem sitotiskane aluminijske paste u trakastoj peći. Istovremeno, paljenjem sitotiskanog srebra na ćelijama se

formira prednji i stražnji kontakt [60]. Na slici 10. prikazane su monokristalne (gore- lijevo) i polikristalne (gore-desno) silicijske fotonaponske ćelije te njihov presjek (dolje).



**Slika 10. Monokristalna i polikristalna silicijska fotonaponska ćelija [60]**

Životni ciklus monokristalnog i polikristalnog FN modula od ekstrakcije materijala, proizvodnje i upotrebe prikazan je na slici 11.



**Slika 11. Životni ciklus fotonaponskog modula [60]**

### 3.1.2. Karakteristike fotonaponskih ćelija

Učinkovitost FN ćelija ( $\eta$ ) ovisi o nizu parametara među kojima su jakost struje kratkog spoja ( $I_{SC}$ ), napon otvorenog kruga ( $U_{OC}$ ), napon u točki maksimalne snage ( $U_{MPP}$ ), jakost struje u točki maksimalne snage ( $I_{MPP}$ ) i faktor ispunjenja ( $FF$ ).

Točka maksimalne snage (engl. *Maximum Power Point*, MPP) odnosi se na točku maksimalne snage u FN sustavu. MPP je umnožak jakosti struje ( $I$ ) i napona ( $U$ ) unutar FN modula. Zbog različitih utjecajnih čimbenika, kao što su temperatura ili zasjenjenost modula, MPP se stalno mijenja. S jedne strane, jakost struje raste s povećanjem sunčevog zračenja, dok napon istovremeno opada zbog povećane temperature unutar solarne ćelije [61].

Faktor ispunjenja je kriterij kvalitete ćelije i teži se da bude što bliže 1. Računa se prema sljedećoj formuli (1) [62]:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{U_{OC} \times I_{SC}} = \frac{U_{MPP} \times I_{MPP}}{U_{OC} \times I_{SC}} \quad (1)$$

Gdje je:

$P_{MPP}$	W	snaga u točki maksimalne snage
$U_{OC}$	V	napon otvorenog kruga
$I_{SC}$	A	jakost struje kratkog spoja
$U_{MPP}$	V	napon u točki maksimalne snage
$I_{MPP}$	A	jakost struje u točki maksimalne snage

Učinkovitost FN ćelije je količina sunčeve energije koju je ćelija sposobna pretvoriti u električnu energiju i računa se prema sljedećoj formuli (2) [63]:

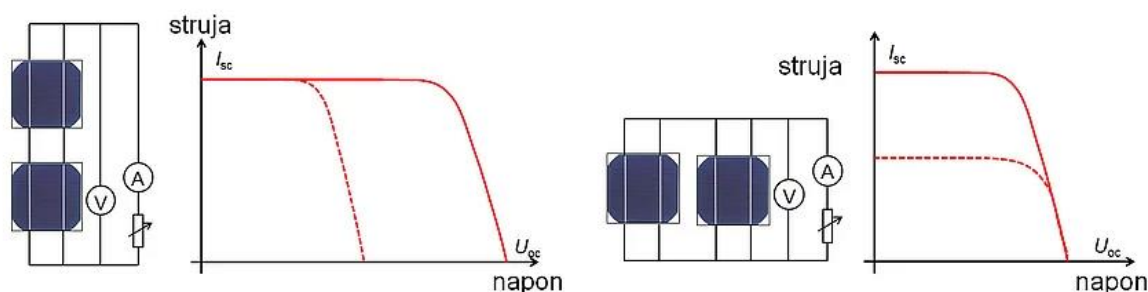
$$\eta = \frac{P_{max}}{E \times A} = \frac{U_{oc} \times I_{sc}}{E \times A} \quad (2)$$

Gdje je:

$P_{max}$	W	maksimalna snaga ćelije
$E$	W/m <sup>2</sup>	intenzitet sunčevog zračenja
$A$	m <sup>2</sup>	površina fotonaponske ćelije

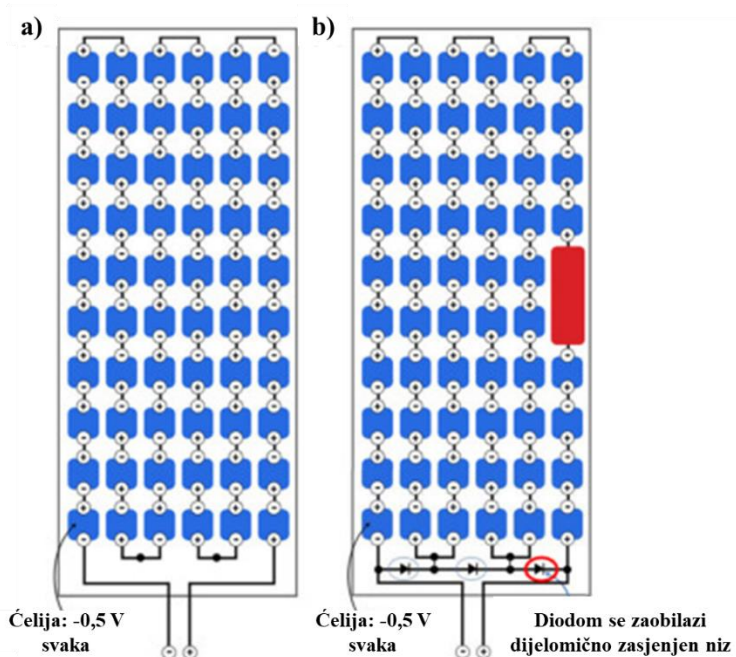
### 3.1.3. Spajanje fotonaponskih ćelija

FN ćelije moguće je spojiti u serijske i paralelne nizove kako bi se postigle različite električne karakteristike i poboljšala ukupna snaga sustava. Ćelije se spajaju u serijski spoj tako da se pozitivan kraj jedne ćelije spoji na negativan kraj druge. Jakost električne struje takvoga spoja ćelija iste kvalitete ostaje ista, dok se ukupni napon povećava kao zbroj pojedinih napona ćelije, vidi slici 12 lijevo. S druge strane, u paralelni spoj ćelije se povezuju tako da se kontakti istog polariteta međusobno spoje. Ukupni napon niza ostaje nepromijenjen, ali se zato ukupna jakost električne struje povećava zbrojem jakosti struja pojedinih ćelija, kako je prikazano na slici 12. desno [64].



Slika 12. I-U karakteristika spojenih fotonaponskih ćelija u serijski i paralelni spoj [64]

Izlazne karakteristike spoja niza FN ćelija ovise o uvjetima rada, posebice o tome kako su zasjenjene stablima, zgradama, snijegom ili prljavštinom. Djelomično zasjenjenje jedne od ćelija u nizu smanjit će struju cijeloga niza. U slučaju potpunog zasjenjenja, ukupna snaga proizvedena od strane nezasjenjenih ćelija će se potrošiti u obliku lokalnog zagrijavanja zasjenjene ćelije. Ta pojava naziva se „*hot-spot*“ i potencijalno može dovesti do kvara. Kako bi se ta negativna pojava izbjegla, serijski povezani niz FN ćelija dijeli se na nekoliko dijelova te se na svaki dio paralelno spoji premosna (engl. *bypass*) dioda. Premosnim diodama omogućuje se protok struje i osigurava se od pada jakosti električne struje niza [65]. Na slici 13. prikazane su serijski povezane ćelije: a) bez premosnih dioda i b) s premosnim diodama.

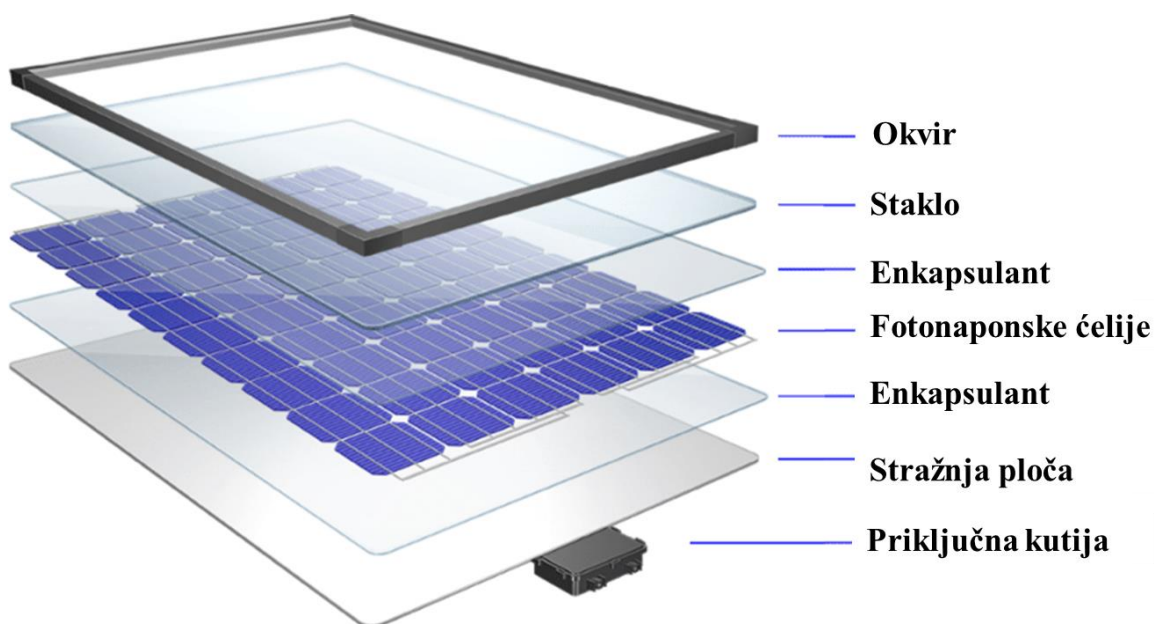


Slika 13. Spoj fotonaponskih ćelija: a) bez premosne diode, b) s premosnom diodom [66]

### 3.2. Fotonaponski moduli

FN moduli izrađuju se od međusobno povezanih ćelija u konfiguraciju nalik matrici. Ćelije su inkapsulirane s obje strane prozirnim etilen-vinil-acetatnim kopolimerom (EVA) kako bi se zaštitile od okolnih uvjeta, posebice vlage. S prednje strane na sloj EVA postavlja se kaljeno staklo, kojim se modul štiti od mehaničkih i atmosferskih oštećenja, dok se sa stražnje strane iz istih razloga postavlja ploča [67]. Stražnja ploča sačinjena je od više slojeva polimernih materijala poput poli(vinil-fluorida) (PVF), poli(viniliden-fluorida) (PVDF), poli(etilen-tereftalata) (PET), poliamida (PA) itd. [68]. Premosne diode su zajedno s priključnom kutijom postavljene na stražnju ploču te su sve komponente uokvirene aluminijevim anodiziranim

okvirom. Sveukupni postupak sklapanja modula odvija se u čistim proizvodnim pogonima kako ne bi došlo do onečišćenja te se na kraju provode sigurnosne kontrole [67]. Slojevi konvencionalnog FN modula prikazani su na slici 14.



**Slika 14.** Slojevi konvencionalnog FN modula [69]

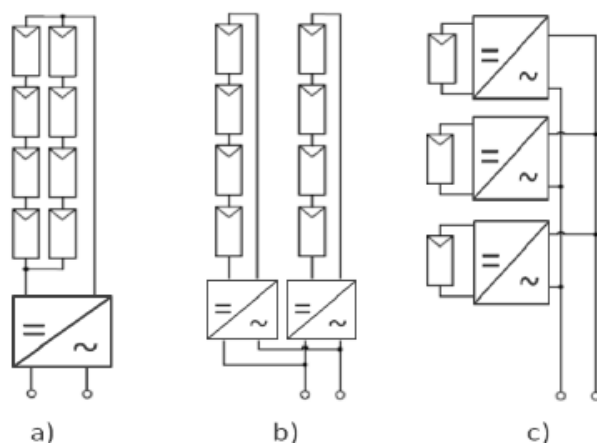
Tradicionalni monokristalni FN moduli obično imaju 60 do 72 FN ćelija. U svrhu povećanja učinkovitosti, tj. smanjenja energetske gubitaka FN modula, FN ćelije se laserom režu popola. Presijecanjem ovih ćelija na dvije polovine, struja unutar ćelija se također prepolovi, što u biti znači da se i otporni gubici smanje. Budući da su FN ćelije prepolovljene, a samim time manje veličine, u FN modul je moguće ugraditi veći broj ćelija. Sam FN modul je također podijeljen na dva dijela, svaki od njih zasebno pretvara sunčanu energiju u električnu, čime se postiže da FN modul proizvodi struju i kada je njegova jedna polovica zasjenjena [70].



### 3.3. Pretvarač

Pretvarač je električni uređaj kojim se istosmjerna struja proizvedena na FN modulima pretvara u izmjeničnu struju. Ulazni i izlazni napon, frekvencija i ukupna snaga pretvarača ovise o topologiji pretvarača. U sklopu FN sustava, pogotovo mrežnih, razlikuju se centralni, mikro i pretvarači niza, čije sheme su prikazane na slici 15. [71].

Centralni pretvarač je pretvarač kojim se povezuje više paralelnih nizova FN modula na isti ulaz, kako bi se postigao maksimalni istosmjerni napon. Električna struja se potom pretvara iz istosmjerne u izmjeničnu i distribuira elektroenergetskoj mreži. Ovaj tip pretvarača karakteriziran je velikom snagom, i preko 500 kW, te omogućava odličnu regulaciju uz nizak trošak same instalacije. Centralni pretvarač se pretežito primjenjuje za velike FN sustave na područjima ravnomjerne koncentracije sunčevog osvjetljenja [72].

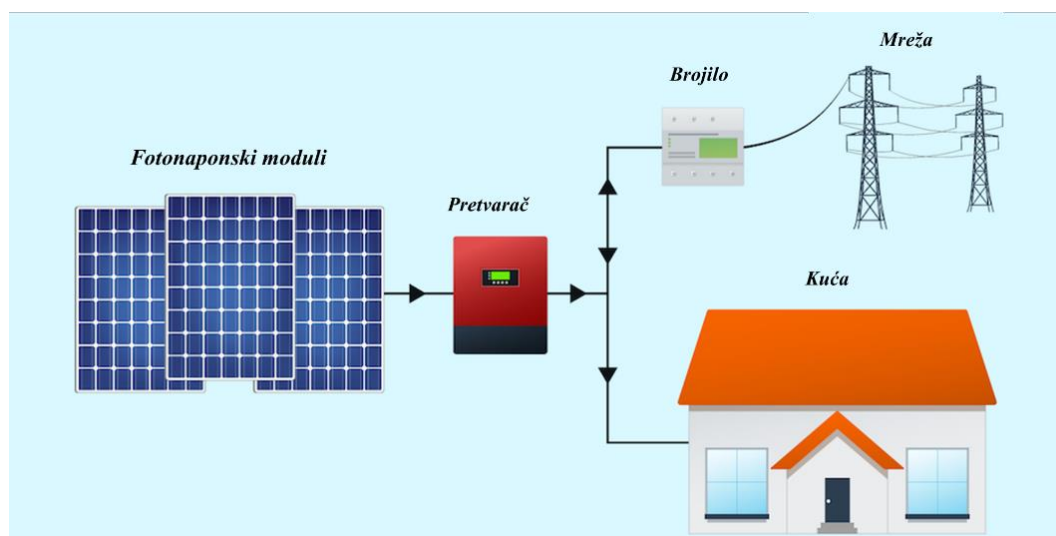


Slika 15. Topologija pretvarača: a) centralni, b) pretvarač niza, c) mikropretvarač [71]

### 3.4. Fotonaponski sustavi

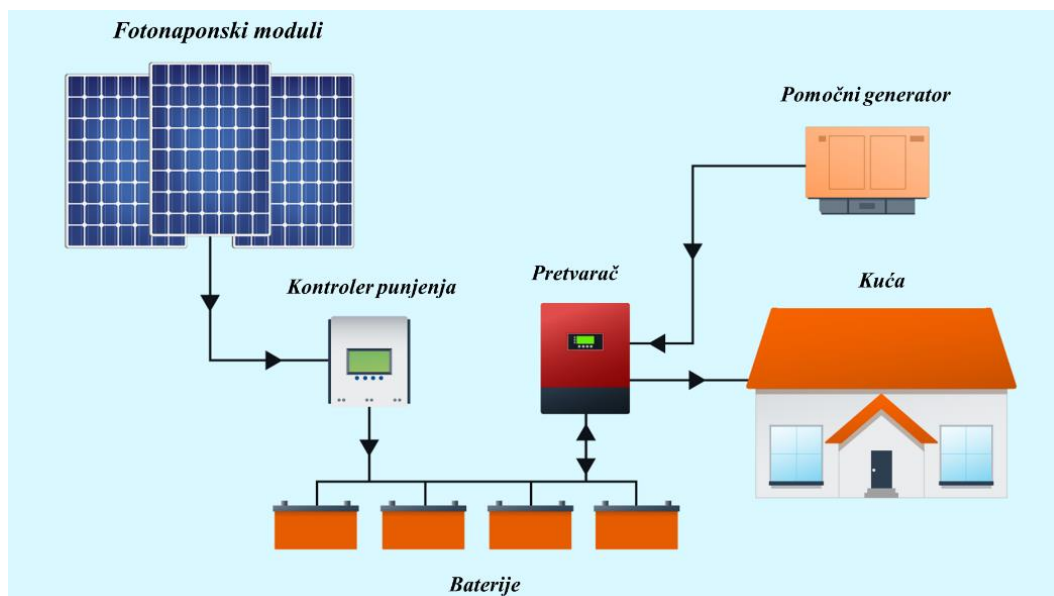
Mrežni fotonaponski sustavi (FN sustavi) su sustavi koji su projektirani da rade paralelno u odnosu na elektroenergetsku mrežu. Glavna komponenta sustava je pretvarač, kojim se istosmjerna električna energija proizvedena nizom međusobno spojenih FN modula pretvara u izmjeničnu. Izmjenična struja se potom troši bilo za vlastite potrebe ili se prepušta elektroenergetskoj mreži. Istovremeno, osigurana je i konstantna opskrba energije prema objektu u slučaju da FN sustav ne proizvode energiju bilo zbog kvara, nedostatnog sunčevog

zračenja ili drugih razloga [73]. Na slici 16. prikazan je mrežni FN sustav s glavnim komponentama.



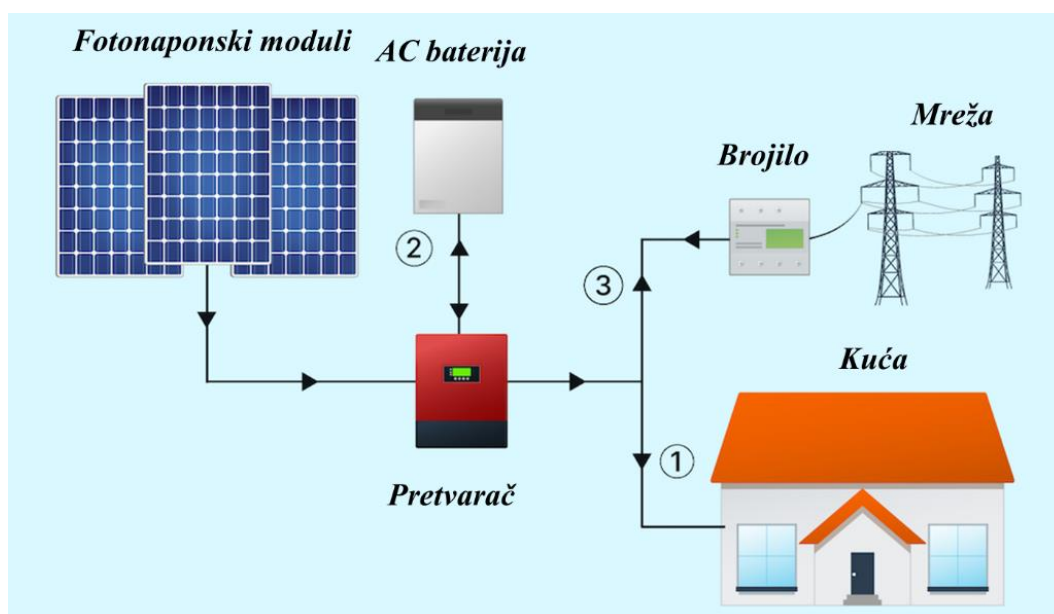
**Slika 16. Mrežni FN sustav [74]**

Autonomni FN sustavi koriste se na područjima koja nisu povezana s javnom elektroenergetskom mrežom te na kojima nema drugog izvora električne energije. Ovi sustavi omogućavaju korištenje električne energije tijekom dana i noći. Električna energija proizvedena, a neiskorištena tijekom dana pohranjuje se u sustave za skladištenje energije (baterijske sustave). Ova vrsta sustava je neovisna o drugim izvorima energije te je optimalno rješenje zbog kratkog roka izvedbe sustava uz minimalne troškove jer nema potrebe za postavljanjem visokonaponskih prijenosnih kabela i transformatora. Najčešće se primjenjuju u projektima ruralne elektrifikacije [75]. Na slici 17. prikazana je izvedba autonomnog fotonaponskog sustava.



Slika 17. Autonomni fotonaponski sustav [74]

Hibridni FN sustav prikazan na slici 18. kombinira najbolje principe rada mrežnog i autonomnog sustava. Hibridni FN sustavi su financijski isplativiji od autonomnih jer ne zahtijevaju instalaciju baterijskih sustava visokih kapaciteta i pomoćnog generatora. Također, ovisno o energetske potrebama osigurana je i opskrba električnom energijom iz elektroenergetske mreže [74].



Slika 18. Hibridni fotonaponski sustav [74]

## 4. PROCJENA ŽIVOTNOG CIKLUSA

### 4.1. Uvod

Procjena životnog ciklusa (LCA, engl. *Life Cycle Assessment*) je analiza kojom se procjenjuju utjecaji proizvoda i usluga na okoliš kroz sve faze njihovih životnih ciklusa. Ovaj pristup ima holistička obilježja, uzimajući u obzir utjecaje pri ekstrakciji sirovina, proizvodnji, distribuciji, korištenju i konačnoj uporabi proizvoda. LCA se kolokvijalno naziva i analizom proizvoda „od kolijevke do groba“ [76]

LCA je razvijana na temeljima metoda orijentiranih na životni ciklus iz 1960-ih godina od strane znanstvenika i ekologa s ciljem boljeg razumijevanja ekoloških implikacija čovjekova djelovanja. Najistaknutije od tih metoda su Analiza resursa i profila okoliša (engl. *Resource and Environmental Profile Analysis*, REPA) i Analiza ekobalansa (engl. *Ecobalances*). Ove analize su inspirirane računovodstvom materijalnih tokova s fokusom na popisivanje korištene energije i sirovina kao rezultat naftne krize tog vremena. Procjena utjecaja proizvodnih sustava na okoliš prema indikatorima utjecajnih kategorija (klimatske promjene, eutrofikacija i slično) u primjenu ulazi ranih 1990-ih godina uslijed sve veće kompleksnosti razmatranih komponenata sustava i potrebe za jednostavnijom kvantifikacijom utjecaja na okoliš [77].

Provedba LCA je skup i dugotrajan proces te se primarno koristi u marketinške svrhe. Tvrtke su u prošlosti pretežno provodile studije utjecaja na okoliš kako bi osigurale vjerodostojnost i konkurentnost svojih proizvoda. Šira primjena započela je 1990-ih godina paralelno s povećanim međunarodnim angažmanom u kontekstu zaštite okoliša i klimatskih promjena, kada je uveden značaj kojom ista može poslužiti pri kreaciji politika i optimizaciji proizvodnih procesa na ekološki prihvatljiv način. Slijedom toga, mnogobrojne države predvođene državama „zapadnog svijeta“ započele su s financiranjem projekata s ciljem izrade sveobuhvatnih baza podataka kako bi se provođenje LCA učinilo jednostavnim i ekonomski isplativim [78].

Informacije o procesima i njihovim emisijama sadržane u bazama podataka pružaju ograničen uvid o utjecaju nekog proizvoda ili usluge na okoliš. Vrijednost tih podataka očituje se u interaktivnom djelovanju niza procesa. Kako bi rezultati same procijene bili vjerodostojni, istu

je nužno provesti na metodičan način. Slijedom toga, sam postupak provođenja LCA je normiran od strane Međunarodne organizacije za normizaciju (engl. *International Organization for Standardization*, ISO) putem Tehničkog odbora ISO/TC 207 *Environmental management* 1993. godine u Parizu, uslijed prepoznate „prednosti LCA kao metodičkog alata za identifikaciju okolišnih aspekta unutar okvira sustava upravljanja okoliša prema ISO 14001“ [79].

Metodologija provedbe LCA u trenutku pisanja ovoga rada normirana je serijom normi ISO 14040, od koje su komplementarne norma ISO 14040 i ISO 14044 najrelevantnije i smatraju se svojevrsnim „ustavom“ LCA [78]. Norma ISO 14040 opisuje „načela i okvir“, a ISO 14044 „specificira zahtjeve i daje smjernice“ pri provođenju same LCA analize prema četiri temeljne faze [80,81].

1. Definicija cilja i opsega analize.
2. Analiza inventara životnog ciklusa (engl. *Life Cycle Inventory Analysis*, LCI).
3. Procjena utjecaja životnog ciklusa (engl. *Life Cycle Impact Assessment*, LCIA).
4. Interpretacija rezultata.

#### **4.2. Definicija opsega i cilja studije LCA**

U početnoj fazi provedbe LCA analize potrebno je postaviti cilj i odrediti opseg studije razmatranog proizvoda ili proizvodnog sustava. Cilj studije definira namijenjenu primjenu studije, razloge zbog koje se ona provodi, ciljanu publiku i način na koji će rezultati biti izneseni. Neki od razloga provedbe LCA analize su procjena utjecaja na okoliš novih tehničkih rješenja proizvoda, optimizacija proizvodnih procesa te informiranje prije donošenja odluka (političkih, društvenih, ekonomskih). Neovisno o odabranoj ciljanoj publici (akademska zajednica, industrija ili krajnji kupac), načinu na koji će rezultati studije biti izneseni (interno ili javno) te prethodno navedenim razlozima, dobro postavljen cilj neophodan je za postavljanje opsega i granica razmatranog sustava [81].

Opsegom analize, a prema opisu i funkciji samog proizvodnog sustava, postavlja se smjer u kojem se LCA analiza provodi. Opseg u svome okviru mora sadržavati informacije o funkcionalnoj jedinici, granicama sustava, odabranoj metodologiji utjecaja životnog ciklusa

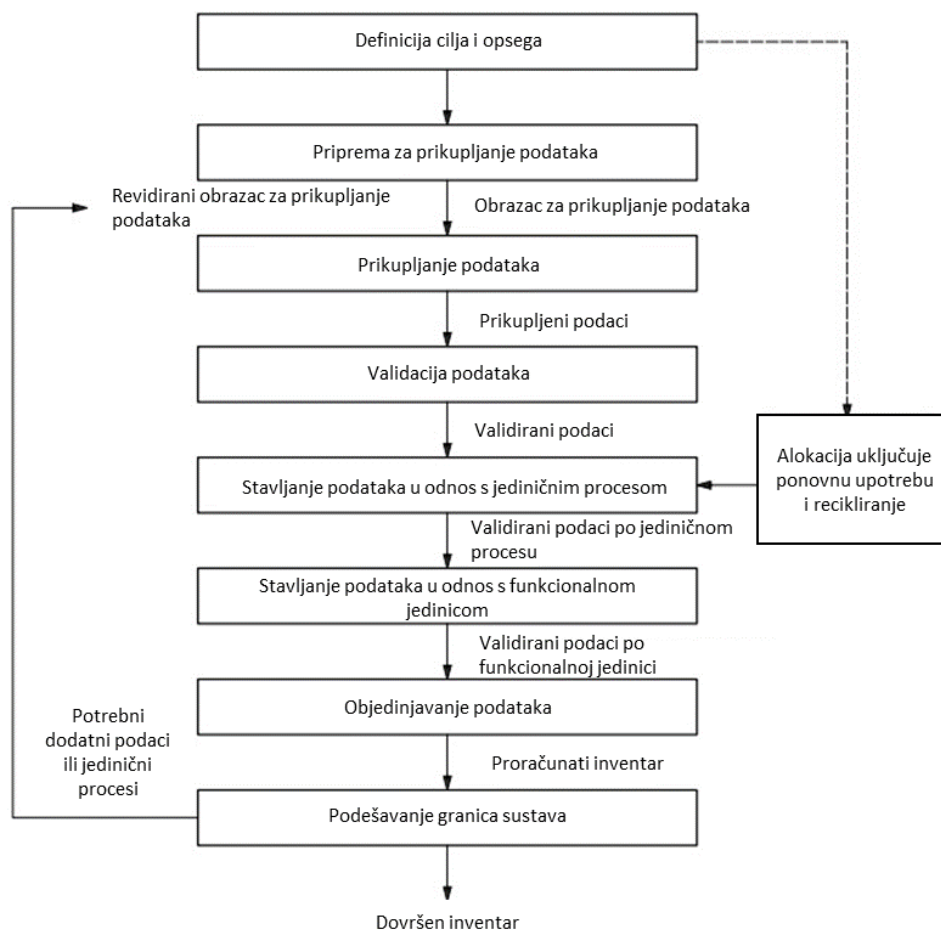
(LCIA), zahtjevima na podatke i njihovu kvalitetu, proceduri alokacije procesa, tipu i formatu u kojem će rezultati biti prezentirani, kritičkom osvrtu te nedostacima same studije [81].

Proizvodni sustav može imati više funkcija, npr. kogeneracijska elektrana koja proizvodi električnu i toplinsku energiju. Unutar LCA studije isključivo se odabire jedna funkcija na temelju koje se definira funkcionalna jedinica i referentni tok. Funkcionalna jedinica je referentna mjera koja točno opisuje analizirani sustav, odnosno to je kvantificirani opis funkcije sustava na temelju kojega se svi ulazni i izlazni tokovi normaliziraju te se računa utjecaj na okoliš svake faze životnog ciklusa proizvoda. Na primjer, za kogeneracijsku elektranu u funkciji proizvođača električne energije potrebno je postaviti funkcionalnu jedinicu kWh, odnosno referentni tok neto distribuirane električne energije. Dosljednost pri definiranju funkcionalne jedinice prema normama i pravilnicima unutar studije od velikog je značaja kako bi rezultati analize bile usporedivi te kako bi se na temelju istih mogli donijeti vjerodostojni zaključci [80,82].

Svi procesi, počevši od proizvodnje, transporta, korištenja i uporabe proizvoda, moraju biti postavljeni unutar granica sustava iznijetih u opsegu studije te trebaju biti konzistentni s postavljenim ciljem. Proces i njihovi ulazni i izlazni tokovi razmatrani u okviru granica sustava smiju se izostaviti samo ako značajno ne utječu na rezultate studije te je potrebno iznijeti razloge izostavljanja istih [80].

### 4.3. Analiza inventara životnog ciklusa

Analiza inventara životnog ciklusa (LCI) faza je LCA analize koja uključuje prikupljanje i sastavljanje podataka o elementarnim, ulaznim i izlaznim tokovima za sve procese analiziranog sustava. Ulazni i izlazni tokovi procesa odnose se na materijale, energiju i druge fizikalne veličine koje se koriste za odvijanje pojedinog procesa. Ova analiza također uključuje proizvode, emisije i otpad koji nastaju kao rezultat procesa. Podaci o tokovima prikupljaju se iz literature, anketa i upitnika, upoznavanjem s procesom na mjestima na kojima se isti odvijaju, internih podataka poduzeća te podataka temeljenih na laboratorijskim ispitivanjima prema postavljenom cilju i opsegu LCA studije. Zahtjeve na kvalitetu podataka poput relevantnosti, potpunosti, konzistentnosti, transparentnosti, točnosti i preciznosti nužno je zadovoljiti. U suštini, postupak provođenja LCI opsežan je, dugotrajan i skup proces te se s većim razumijevanjem promatranog sustava interaktivno mijenjaju cilj i opseg studije [83]. Prikaz analize inventara dan je na slici 19.



Slika 19. Prikaz izrade analize inventara životnog ciklusa [80]

Postoje dva pristupa izrade LCI analize: atribucijsko modeliranje (engl. *Attributional Modelling*) i posljedično modeliranje (engl. *Consequential Modelling*).

Atribucijsko modeliranje LCI provodi se za postojeće stanje proizvodnog sustava. Ulazni i izlazni tokovi procesa kvantificiraju se prema funkcionalnoj jedinici i referentnom toku kako bi se odredio utjecaj proizvoda na okoliš. Posljedično modeliranje primjenjuje se za određivanje utjecaja na okoliš na temelju promjena u elementarnim tokovima kao odgovor na moguće odluke kao što su promjena proizvodnog postupka, novi dobavni pravci itd. [84].

#### 4.4. Procjena utjecaja životnog ciklusa

Elementarne tokove iz LCI faze potrebno je postaviti u kontekst njihova doprinosa utjecajima na okoliš u trećoj fazi – procjeni utjecaja životnog ciklusa (LCIA, engl. *Life Cycle Impact Assessment*). Prema ISO 14044 LCIA se sastoji od pet koraka [85]:

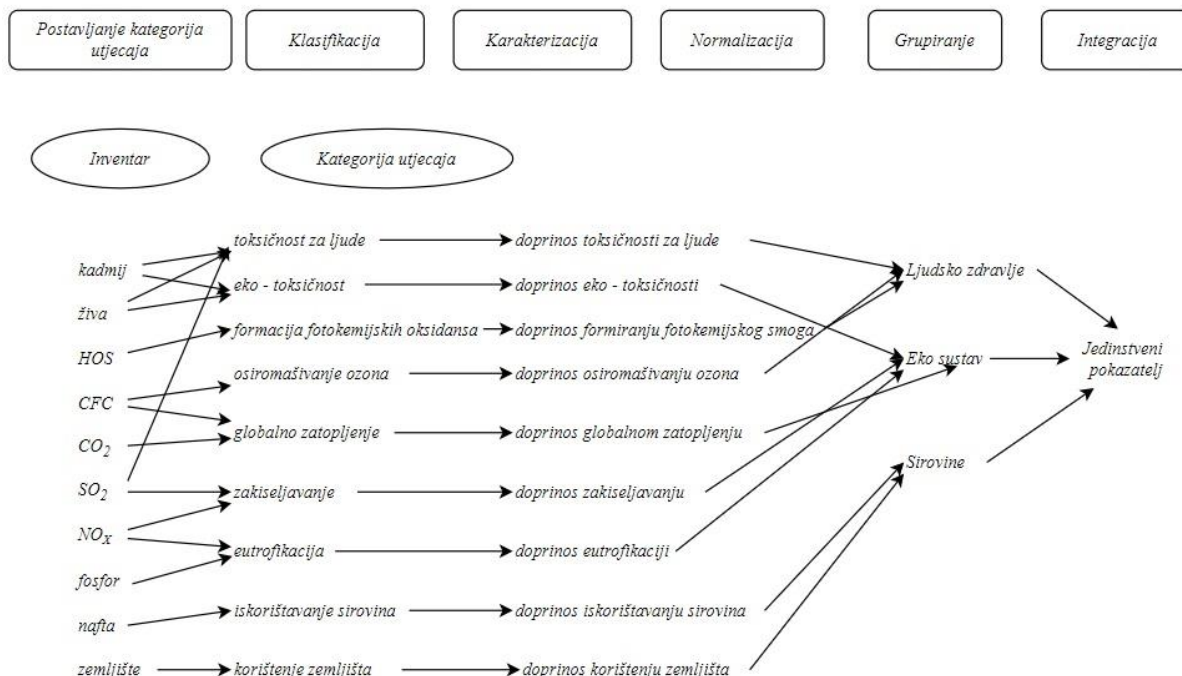
1. Odabir kategorija utjecaja, pokazatelja kategorija i karakterizacijskih modela.
2. Pripisivanje rezultata LCI analize odabranim pokazateljima kategorija.
3. Računanje rezultata pokazatelja kategorija (karakterizacija).
4. Normalizacija pokazatelja kategorija.
5. Grupiranje i ponderiranje normaliziranih pokazatelja kategorija.

Kategorije utjecaja odnose se na neke od problema okoliša kao što su klimatske promjene, osiromašivanje ozona, eutrofikacija, zakiseljavanje i ekotoksičnost, te čine središnje kategorije utjecaja ili središnje točke (engl. *Mid-Point*). Svaka kategorija utjecaja ima svoj pokazatelj utjecaja na temelju kojega se izrađuju karakterizacijski modeli. Najpoznatiji od tih modela su ReCiP (engl. *Relevance and Characterization of International Life Cycle Impact Assessment Methods*), IMPACT World, USEtox, CML-IA (engl. *Center for Environmental Science, Leiden University*) i TRACI (engl. *Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*) [85].

Karakterizacijski modeli uobičajeno su jednostavni, linearno definirani modeli kojima se računaju pokazatelji utjecaja pojedinog toka tako da se vrijednost toka pomnoži s karakterizacijskim faktorom za taj tok. Suma pokazatelja utjecaja različitih elementarnih tokova zove se rezultat kategorije utjecaja. Rezultati kategorije utjecaja potom se grupiraju i



ponderiraju u svrhu dobivanja rezultata kategorija krajnjih točaka (engl. *End-Point*) koje je lakše interpretirati [86]. Koraci pri provođenju LCIA te kategorije utjecaja središnje i krajnje točke prikazani su na slici 20. [85].



**Slika 20.** Koraci provođenja LCIA i kategorije utjecaja srednje i krajnje točke [87]

#### 4.5. Interpretacija procjene životnog ciklusa

Posljednja faza pri provođenju LCA analize prema ISO 14040 i ISO 14044 je interpretacija rezultata studije. Faza interpretacije sastoji se od identifikacije značajnih pitanja prema rezultatima LCI i LCIA te njihove procjene prema principima potpunosti, osjetljivosti i konzistentnosti. Na kraju analize se iznosi zaključak sa svim nedostacima provedene studije te potencijalnim preporukama.

#### 4.6. Prednosti i nedostatci LCA

LCA analiza je i dalje u fazi razvoja te ima svoje prednosti i nedostatke. Provođenjem ove vrste studije prednosti se očituju uglavnom u pogledu zaštite okoliša i u kontekstu borbe protiv klimatskih promjena. Najistaknutije prednosti LCA metode su [88]:

- Sistematični pristup procijeni okolišnih utjecaja proizvoda.
- Metodičnost pri provođenju, zasnovana na znanstvenim istraživanjima.
- Praćenje utjecaja na okoliš kroz različite faze životnog ciklusa proizvoda.
- Identifikacija kritičnih točaka u životnom ciklusu proizvoda te njihovo umanjivanje.
- Informiranje donositelja odluka (vladinih i nevladinih ustanova).
- Rezultati analize služe za procjenu utjecaja proizvoda na ekološkičnost i zdravlje ljudi na lokalnoj, regionalnoj i globalnoj razini.
- Planiranje investicija ka održivoj i ekološkoj proizvodnji i uporabi proizvoda.
- Usporedba utjecaja na okoliš sličnih proizvoda i donošenje kompetentnih odluka pri odabiru.

S druge strane, neki od nedostataka LCA su [88]:

- Rezultat studije neće nužno biti proizvod ili usluga koja je efikasnija i jeftinija.
- Priroda ponderiranja vrijednosti unutar LCIA faze: ne postoji znanstveni temelj prema kojemu se može dodijeliti jedinstvena ocjena o ekološkom utjecaju proizvoda.
- Kompleksna narav životnog ciklusa proizvoda onemogućuje pouzdano praćenje svih utjecajnih procesa.
- Provođenje LCA analize je dug i skup proces. Prikupljanje podataka i dobivanje pristupa informacijama jedna od najzahtjevnijih faza pri provođenju analize.
- Ne postoji jedinstvena metoda provedbe analize te je organizacijama ostavljena sloboda prilikom procijene prema normama i individualnom cilju.

#### 4.7. Izjava o utjecaju proizvoda na okoliš (engl. *Environmental Product Declaration, EPD*)

Izjava o utjecaju proizvoda na okoliš (engl. *Environmental Product Declaration, EPD*) je izjava o okolišu proizvoda tipa III temeljena na metodi procjene životnog ciklusa prema normi HRN EN ISO 14040 „Upravljanje okolišem – Procjena životnog ciklusa (LCA) – Načela i okvir rada“, HRN EN 14044 „Upravljanje okolišem – Procjena životnog ciklusa (LCA) – Zahtjevi i smjernice“ te HRN EN ISO 14025 „Oznake i izjave za područje okoliša – Izjave o okolišu tip III – Načela i postupci“ i HRN EN 15804 „Održivost građevina – Izjave o utjecaju proizvoda na okoliš – Osnovna pravila za kategorizaciju građevnih proizvoda“. Ova izjava pruža jedinstvenu informacijsku osnovu temeljenu na činjenicama za procjenu utjecaja proizvoda na okoliš, kako bi se omogućila usporedba proizvoda iste funkcije. Osnova EPD-a su neovisno verificirani podaci iz LCA (inventar životnog ciklusa ili informacijski moduli) prema normi EN ISO 14040:2006. Deklaracije proizvoda vezano za okoliš pružaju čvrstu osnovu za transparentno komuniciranje utjecaja na okoliš svim dionicima. EPD su posebno potrebni u građevinskoj industriji jer su sve češći preduvjet u javnim natjecajima u razvijenim državama Europe, a pružaju informacijsku osnovu za certifikaciju održivosti zgrada. Osim u građevinskoj industriji, EPD se koriste i u drugim sektorima. Kako bi se proizvodi mogli usporediti unutar jedne kategorije, postavljena su pravila kategorije proizvoda (engl. *Product Category Rules, PCR*) [89].

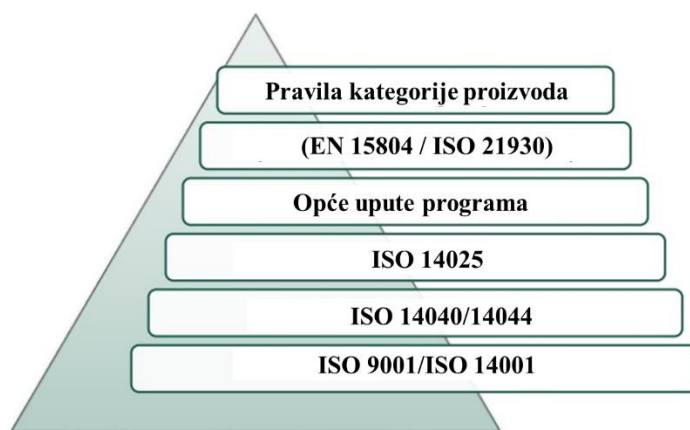
PCR također daje upute za provođenje LCA. PCR postavlja kriterije koje je potrebno uzeti u obzir, a to su [90]:

- Granice sustava, tj. koje procese i faze životnog ciklusa proizvoda treba uzeti u obzir.
- Deklariranu/funkcionalnu jedinicu: količina, masa i životni ciklus proizvoda koji se procjenjuje.
- Kako definirati npr. fazu uporabe i scenarij na kraju životnog ciklusa.
- Koje kategorije utjecaja treba dodatno procijeniti osim standardnog skupa.

## 5. PROVEDBA LCA ANALIZE I IZRADA EPD-A ZA FOTONAPONSKI SUSTAV

U 2021. godini u EU po glavi stanovnika godišnje se potrošilo 1596 kWh električne energije [91], dok je za proizvodnju i distribuciju 1 kWh električne energije prosječno emitirano stakleničkih plinova u iznosu ekvivalentnom 0,262 kg ugljikovog dioksida (kg CO<sub>2</sub> ekv.) [92]. Europska unija svojom Solarnom strategijom predviđela je postavljanje brojnih novih fotonaponskih sustava, kako bi energetska sektor učinila što učinkovitijim i održivijim. Fotonaponski sustavi postavljaju se na velikim površinama kako bi se sunčeva energija mogla iskoristiti za pretvorbu u električnu energiju. Krovništa stambenih objekata prepoznata su kao jedno od idealnih mjesta za postavljanje FN sustava, kako na dobrobit potrošača energije u objektu, tako i ostalih korisnika povezanih preko elektroenergetske mreže. U svrhu procjene takvog sustava na okoliš u sklopu diplomskoga rada provedena je LCA analiza FN sustava instaliranog na stambenom objektu u Zagrebu, Hrvatska.

LCA analiza provedena je prema pravilu kategorije proizvoda (PCR) za proizvodnju i distribuciju električne energije te proizvodnju energije iz pare, tople i hladne vode klasifikacijske oznake UN CPC 171, 173. PCR je izrađen u okviru Internacionalnog sustava EPD. Provedbom analize i izrade EPD-a proizvoda prema navedenom PCR-u osigurava se konzistentnost i usporedivost dobivenih rezultata prema svim normama i pravilnicima. Hijerarhijski odnos PCR-a u odnosu na norme i dokumente prikazan je na slici 21. [82].



Slika 21. Ilustracija PCR-a u odnosu na hijerarhiju normi i drugih dokumenata [82]

## 5.1. Cilj analize životnog ciklusa FN sustava

LCA analiza životnog ciklusa FN sustava provedena je u sklopu diplomskog rada s ciljem:

1. Procjene utjecaja na okoliš FN sustava kakav se postavlja na stambene objekte.
2. Uvida u utjecaj na okoliš različitih komponenata sustava u svrhu inteligentnog planiranja daljnjih projekata.
3. Upoznavanja s metodom analize životnog ciklusa FN sustava te izradom EPD-a prema ISO 14025 i Izjavi o okolišu tipa III.

Rezultati provedene analize su uz postavljene uvjete korištenja edukacijske inačice softvera GaBi, nepotpunosti svih potrebnih podataka i ograničeno poznavanje LCA metode namijenjeni isključivo akademskoj zajednici.

## 5.2. Opseg analize

### 5.2.1. Opis proizvodnog sustava

Analiza životnog ciklusa proizvoda provedena je za FN sustav instaliran na površinu od 50 m<sup>2</sup> krovišta stambenog objekta u gradu Zagrebu. Predviđena vršna snaga sustava iznosi 9,72 kWp (engl. *Kilowatt-Peak*) standardizirane fotonaponske snage s istosmjerne strane pri optimalnim uvjetima rada FN modula ugrađenih u sustav. FN ćelije, koje su ugrađene u osamnaest (18) instaliranih FN modula, izrađene su tehnologijom monokristalnog silicija. Proizvedena električna energija primarno se troši od strane energetske potrošača u objektu uz mogućnost predaje viška električne energije elektroenergetskoj mreži putem susretno-priključnog postrojenja HEP-a. Količine predane električne energije vanjskoj elektroenergetskoj mreži ili preuzete električne energije od vanjske elektroenergetske mreže utvrđuju se putem dvosmjernog brojila ugrađenog u glavnom razvodnom ormaru (GRO) stambenog objekta.

### 5.2.1.1. Funkcija FN sustava

Funkcija predmetnog FN sustava je proizvodnja i distribucija električne energije proizvedene pretvorbom sunčevog zračenja u električnu energiju na principu fotonaponskog učinka.

Funkcija FN sustava je:

1. Proizvodnja istosmjerne struje putem FN modula.
2. Pretvorba istosmjerne struje u izmjeničnu putem pretvarača.
3. Distribucija izmjenične struje od pretvarača do GRO i dalje do energetskih potrošača.

FN moduli glavna su komponenta FN sustava. Oni su učvršćeni na nosivu konstrukciju izrađenu od šest (6) aluminijskih profila učvršćenih na krovnište objekta. Učvršćenje profila izvedeno je samobušećim vijcima s pripadajućim podložnim pločicama prevučenim elastomerom EPDM (stiren/etilen/propilen/diensi kaučuk), otpornim na vremenske uvjete i UV-zračenja, u svrhu brtvljenja i sprečavanja vlaženja krovne konstrukcije.

Na aluminijske profile pričvršćene su aluminijske hvataljke (srednje i krajnje) za prihvat FN modula koje su putem zateznih vijaka  $M8 \times 40$  mm i pripadajućih kliznih matica ostvarile čvrstu vezu profila i FN modula.

FN moduli postavljeni su u 2 niza, prvi od 10 i drugi od 8 komada. FN moduli svakog od niza međusobno su povezani energetskim kabelom oznake H1Z2Z2-K-1  $\times 4$  mm<sup>2</sup> u serijski spoj, korištenjem muško-ženskih konektora oznake MC4.

Svaki od niza FN modula povezani su energetskim kabelom oznake H1Z2Z2-K-1  $\times 4$  mm<sup>2</sup> s pretvaračem FN sustava, kojemu je svrha pretvoriti proizvedenu istosmjernu struju u izmjeničnu struju. Za distribuciju izmjenične struje od pretvarača prema nadgradnom razvodnom ormaru (NRO) koristi se energetski kabel oznake FG16OR16 5  $\times 10$  mm<sup>2</sup>. U NRO nalazi se odgovarajuća zaštitna oprema. Električna struja se potom odvodi prema GRO objekta kabelom oznake FG16OR16-5  $\times 16$  mm<sup>2</sup>.

U svrhu zaštite od udara munje i izjednačavanja potencijala, metalne mase FN sustava povezane su zeleno-žutim kabelom oznake H07V-K-1  $\times 16$ mm<sup>2</sup> na sabirnicu temeljnog uzemljivača objekta.

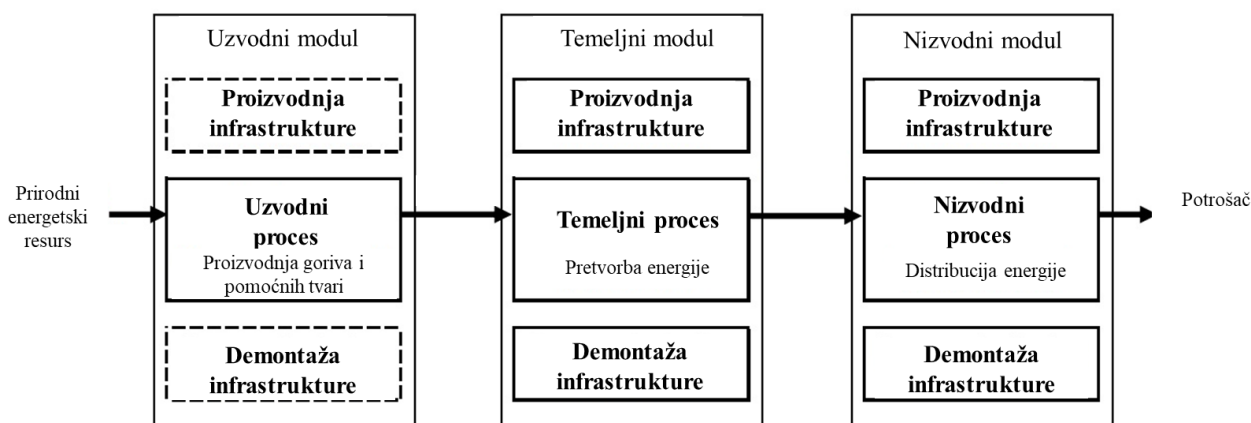
### 5.2.2. Funkcionalna jedinica sustava

Funkcionalna jedinica je referenta mjera koja točno određuje element koji se analizira i procjenjuje sa stajališta utjecaja na okoliš. Prema pravilima definiranim u PCR za FN sustav funkcionalna jedinica iznosi 1 kWh neto proizvedene i distribuirane električne energije krajnjem korisniku tijekom predviđenog 25 godišnjeg životnog ciklusa sustava [82].

### 5.2.3. Granice sustava

Analizu životnog ciklusa FN sustava prema PCR-u potrebno je provesti tako da se analiziraju sve faze životnog ciklusa proizvoda kako bi se osigurao minimalni gubitak informacija o razmatranom sustavu. Nadalje, faze životnog ciklusa, radi različitih zahtjeva na kvalitetu podataka i prezentacije dobivenih rezultata unutar Izjave o okolišu proizvoda (EPD) prema normi HRN EN ISO 14025, podijeljene su na 3 glavne faze i prikazane na slici 22., a iste su:

1. uzvodna faza
2. temeljna faza
3. nizvodna faza.



Slika 22. Dijagram sustava prema PCR-u [82]

### 5.2.3.1. Uzvodna faza

Uzvodna faza je sačinjena od ulaznih i izlaznih tokova te njihovog utjecaja na okoliš pri proizvodnji i transportu goriva i pomoćnih tvari neophodnih za energetska pretvorbu. Ova faza eliminirana je iz analize jer FN sustav energetska pretvorbu provodi iz obnovljivog izvora, sunčeve energije.

### 5.2.3.2. Temeljna faza

Temeljna faza dijeli se na temeljni proces i temeljnu infrastrukturu. Temeljni proces opisuje fazu FN sustava od trenutka pretvorbe sunčane energije u električnu pa sve do točke distribucije. Ova faza uključuje podatke o proizvedenoj električnoj energiji na FN modulima te njenoj distribuciji i pretvorbi u pretvaraču. S druge strane, faza temeljne infrastrukture sadrži sve ekološke podatke o proizvodnji, transportu, montaži, demontaži i naknadnom kraju života (engl. *End of Life*, EoL) glavnih komponenti sustava koje su potrebne za odvijanje temeljnog procesa.

U analizu su uključeni sljedeći elementi temeljne faze:

- Temeljni proces
  - proizvodnja električne energije na FN modulima: gubitci energije unutar kabela i pretvarača
  - održavanje FN modula u svrhu optimalnog uvjeta rada.
- Temeljna infrastruktura
  - proizvodnja i uporaba elektroničke opreme: FN moduli, energetska kabela, pretvarač
  - proizvodnja i uporaba nosive konstrukcije: aluminijski profili
  - proizvodnja i uporaba zaštitne kabela opreme: aluminijske kanalice s pripadajućim pokrovom
  - proizvodnja i uporaba hvataljka, vijaka, kliznih matica i drugo
  - transport.



### 5.2.3.3. Nizvodna faza

Nizvodna faza, kao i temeljna, podijeljena je na dvije podfaze, a to su nizvodna infrastruktura i nizvodni proces. Faza nizvodnog procesa započinje završetkom temeljnog procesa, odnosno započinje u točki distribucije energije iz pretvarača i završava predajom električne energije glavnom razvodnom ormaru objekta. Nizvodnu infrastrukturu čine svi ulazni i izlazni tokovi potrebni za odvijanje funkcije nizvodnog procesa.

U analizu su uključeni sljedeći elementi nizvodne faze:

- Nizvodni proces
  - gubitci energije unutar kabela.
- Nizvodna infrastruktura
  - proizvodnja i uporaba elektroničke opreme: kabele
  - proizvodnja i uporaba zaštitne kabelaške opreme: aluminijske kanalice s pripadajućim pokrovom
  - transport.

### 5.2.4. Inventar životnog ciklusa

Podaci o instaliranim komponentama FN sustava prikupljeni su od izvršitelja radova. Proizvodni postupak pojedinih komponentata i njihova uporaba pretpostavljeni su prema dostupnoj literaturi, bazi podataka u sklopu edukacijske verzije softvera GaBi, znanju autora i tehničkoj specifikaciji samih proizvoda. Proizvodnja električne energije za 25-godišnji životni ciklus FN sustava izračunata je na temelju jednogodišnje proizvodnje električne energije procijenjene probnom verzijom softvera PV\*SOL.

### 5.2.5. Zahtjevi na kvalitetu podataka

Prilikom provedbe procjene životnog ciklusa FN sustava nužno je osigurati kvalitetu korištenih podataka u skladu s PCR-om. Podaci o energetske i materijalnim tokovima instaliranih komponenti sustava kategoriziraju se na: specifične, generičke i zamjenske podatke [82]. Specifični podaci odnose se na točne i potpune podatke o instaliranim komponentama razmatranog sustava i isti su preuzeti od instalatera sustava. Generički podaci su podaci prikupljeni iz baza podataka (komercijalnih i besplatnih), a koji zadovoljavaju zahtjeve kvalitete preciznosti i potpunosti. Generički podaci korišteni su pri izradi inventara za

proizvodnju, uporabu i transport pojedinih komponenti. Zamjenski podaci uključuju sve one podatke koji ne zadovoljavaju zahtjevima kvalitete generičkih podataka.

### **5.2.6. Metodologija procjene utjecaja životnog ciklusa**

S obzirom na to da je PCR izrađen u skladu s europskom normom HRN EN 15804, korištene su sljedeće kategorije utjecaja na okoliš [93]:

1. kategorije utjecaja izvedene iz LCA analize
2. energetske indikatori
3. kategorije utjecaja materijala i otpada
4. tokovi koji izlaze iz granica proizvodnog sustava
5. dodatne utjecajne kategorije.

#### **5.2.6.1. Grupa 1. Kategorije utjecaja izvedene iz LCA**

Tijekom pilot projekta izrade Ekološkog otiska proizvoda (engl. *Product Environmental Footprint*, PEF), EK je ovlastila Europsko povjerenstvo za normizaciju (engl. *European Committee for Standardization*, CEN) da nadopuni normu HRN EN 15804 kako bi bila sukladna sa zahtjevima PEF analize [94]. Izmijenjena norma primjenjuje se od 2019. godine te je njome proširen skup kategorija utjecaja potrebnih pri provođenju LCA. U tablici 1. prikazana je 1. grupa kategorija utjecaja.

Tablica 1. Grupa 1. Kategorije utjecaja (HRN EN 15804+A2) [93]

Kategorija utjecaja	Indikator	Kratica	Mjerna Jedinica
Klimatske promjene – ukupno	Potencijal globalnog zatopljenja-ukupni	GWP-total	kg CO <sub>2</sub> ekv.
	GWP-total (engl. <i>Global Warming Potential – total</i> )		
Klimatske promjene – fosilne	Potencijal globalnog zatopljenja – fosilna goriva	GWP-fossile	kg CO <sub>2</sub> ekv.
	engl. <i>GWP – fossile</i>		
Klimatske promjene – biogeni	Potencijal globalnog zatopljenja – biogeni	GWP-biogenic	kg CO <sub>2</sub> ekv.
	engl. <i>GWP – biogenic</i>		
Klimatske promjene – LULUC	Potencijal globalnog zatopljenja – LULUC	GWP-LULUC	kg CO <sub>2</sub> ekv.
	engl. <i>Climate change (land use and land use change)</i>		
Osiromašivanje ozona	Potencijal osiromašivanja ozona	ODP	kg CFC-11 ekv.
	engl. <i>Ozone depletion potential</i>		
Zakiseljavanje	Potencijal zakiseljavanja	AP	mol H <sup>+</sup> ekv.
	engl. <i>Acidification potential</i>		
Eutrofikacija – slatka voda	Potencijal eutrofikacije slane vode	EP-F	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ekv.
	Eutrophication (aquatic freshwater)		

Tablica 1. - nastavak

Eutrofikacija – morska voda	Potencijal eutrofikacije morske vode	EP-M	kg N <sup>-</sup> ekv.
	engl. <i>Eutrophication (aquatic marine)</i>		
Eutrofikacija – kopno	Potencijal eutrofikacije na kopnu	EP-T	mol N ekv.
	engl. <i>Eutrophication (terrestrial)</i>		
Fotokemijski smog	Potencijal nastajanja troposferskog ozona	POCP	kg NMVOC ekv.
	engl. <i>Photochemical ozone creation potential</i>		
Osiromašivanje prirodnih resursa – minerali i metali	Potencijal osiromašivanja resursa – minerala i metala	ADPE	kg Sb ekv.
	engl. <i>Depletion of abiotic resources – elements, ultimate reserves</i>		
Osiromašivanje resursa – fosilna goriva	Potencijal osiromašivanja resursa-fosilna goriva	ADPF	MJ, neto kalorična vrijednost
	engl. <i>Depletion of abiotic resources – fossile fuels</i>		
Uporaba vode	Potencijal nedostatka vode	WDP	m <sup>3</sup>
	engl. <i>Water depletion potential</i>		

## 5.2.6.2. Grupa 2. Energetski indikatori

Energetski indikatori utjecaja potrebnih za provođenje LCA prema normi HRN EN 15804 prikazani su u tablici 2. s pripadajućim kraticama i mjernim jedinicama.

**Tablica 2. Grupa 2. Energetski indikatori (HRN EN 15804+A1 i HRN EN 15804+A2) [93]**

<b>Indikator</b>	<b>Izvorni naziv (engl.)</b>	<b>kratica</b>	<b>mjerna jedinica</b>
Upotreba obnovljivih izvora energije	<i>Renewable primary energy as energy carrier</i>	PERE	MJ
Upotreba obnovljivih izvora energije u pogledu iskorištenosti materijala	<i>Renewable primary energy resources as material utilisation</i>	PERM	MJ
Ukupna upotreba obnovljivih izvora energije	<i>Total renewable primary energy use</i>	PERT	MJ
Upotreba neobnovljivih izvora energije	<i>Non-renewable primary energy as energy carrier</i>	PENRE	MJ
Upotreba neobnovljivih izvora energije u pogledu iskorištenosti materijala	<i>Non-renewable primary energy resources as material utilisation</i>	PENRM	MJ
Ukupna upotreba neobnovljivih izvora energije	<i>Total non-renewable primary energy use</i>	PENRT	MJ

## 5.2.6.3. Grupa 3. Kategorije utjecaja materijala i otpada

U tablici 3. prikazane su indikatori materijala i otpada koji se koriste za provedbu LCA u skladu s normom HRN EN 15804.

**Tablica 3. Grupa 3. Indikatori materijala i otpada (HRN EN 15804+A1 i HRN EN 15804+A2)[93]**

<b>Indikator</b>	<b>Izvorni naziv (engl.)</b>	<b>Kratica</b>	<b>Mjerna jedinica</b>
Uporaba sekundarnih sirovina	<i>Use of secondary material</i>	SM	kg
Uporaba slatke vode	<i>Net use of fresh water</i>	FW	m <sup>3</sup>
Uporaba obnovljivih sekundarnih goriva	<i>Use of renewable secondary fuels</i>	RSF	MJ
Uporaba neobnovljivih sekundarnih goriva	<i>Use of non-renewable secondary fuels</i>	NRSF	MJ
Odložen opasan otpad	<i>Hazardous waste disposed</i>	HWD	kg
Odložen neopasni otpad	<i>Non-hazardous waste disposed</i>	NHWD	kg
Odložen radioaktivni otpad	<i>Radioactive waste disposed</i>	RWD	kg

#### 5.2.6.4. Grupa 4. Tokovi koji izlaze iz granica proizvodnog sustava

Indikatore iz grupe 4. potrebno je izračunati i iznijeti u izvješću za one stavke koje izlaze iz granica modeliranog sustava. To su primjerice, otpad namijenjen recikliranju, komponente za prenamjenu, materijali koji će se energetske oporabiti i izvezena energija [93]. Tokovi koji izlaze iz proizvodnog sustava dani su u tablici 4. te isti nisu bili dio ove analize zbog ograničenja karakterizacijskih modela potrebnih za izračun u edukacijskoj verziji softvera GaBi.

**Tablica 4. Grupa 4. Tokovi koji izlaze iz proizvodnog sustava (HRN EN 15804+A1 i HRN EN 15804+A2) [93]**

<b>Indikator</b>	<b>Izvorni naziv (engl.)</b>	<b>Kratica</b>	<b>Mjerna jedinica</b>
Komponente za prenamjenu	<i>Components for re-use</i>	CRU	kg
Materijali namijenjeni recikliranju	<i>Materials for recycling</i>	MFR	kg
Materijali za energetske oporabu	<i>Materials for energy recovery</i>	MER	kg
Izvezena energija	<i>Exported energy</i>	EE	MJ

## 5.2.6.5. Grupa 5. Dodatne utjecajne kategorije

Prema izmijenjenoj normi HRN EN 15804+A2, uz prethodno priložene kategorije utjecaja, potrebno je provesti procjenu životnog ciklusa FN sustava i za dodatne utjecajne kategorije. Dobivene vrijednosti nije nužno iskazati unutar EPD-a, ali ih je nužno prikazati u sklopu izvješća na temelju kojeg se EPD izrađuje [93]. Dodatne utjecajne kategorije prikazane su u tablici 5.

**Tablica 5. Grupa 5. Dodatne utjecajne kategorije (HRN EN 15804 + A2) [93]**

<b>Indikator</b>	<b>Izvorni naziv (engl.)</b>	<b>Kratica</b>	<b>Mjerna jedinica</b>
Emisija čestica	<i>Particulate matter emissions</i>	PM	učestalost bolesti
Ionizirajuće zračenje	<i>Ionising radiation</i>	IRP	kBq U235 ekv.
Eko toksičnost	<i>Ecotoxicity</i>	ETP-fw	CTUe
Toksičnost za ljude, kancerogeno	<i>Human toxicity, cancer effects</i>	HTP-c	CTUh
Toksičnost za ljude, nije kancerogeno	<i>Human toxicity, non – cancer effects</i>	HTP-nc	CTUh
Utjecaji povezani s korištenjem zemljišta	<i>Land use related impacts, soil quality</i>	SQP	bezdimenzijska veličina



### 5.3. Inventar životnog ciklusa proizvoda (LCI)

Inventar životnog ciklusa predmetnog fotonaponskog sustava izrađen je na temelju podataka o instaliranim količinama komponenta prikupljenih od strane instalatera sustava. U tablici 6. prikazane su sve komponente sustava. Prikazane su ukupne realne mase pojedinih komponenti te mase koje su popisane i uključene u analizu ovisno o mogućnostima odabira procesa u sklopu dostupne baze podataka. Zaštitni uređaji u sklopu NRO te muško-ženski priključci oznake MC4 nisu uključeni u analizu jer za iste nema komplementarnih procesa unutar dostupne baze podataka niti ih se zbog vremenskih ograničenja moglo pretpostaviti. U sklopu analize popisano je 92,43 % ukupne mase fotonaponskog sustava što ne zadovoljava postavljeni uvjet od minimalno 99 % prema PCR, ali je dostatno prema definiranom cilju analize i uvjetima u kojima je provedena. U narednim potpoglavljima opisana je metodologija prema kojoj su inventari za različite faze životnog ciklusa pojedinih komponenta FN sustava izrađeni.

**Tablica 6. Instalirane komponente fotonaponskog sustava**

Komponenta	Instalirano jedinica	Ukupna realna masa komponenta / kg	Ukupna popisana masa komponenta / kg	Zemlja podrijetla
Fotonaponski modul	18	514,80	471,17	Kina
Pretvarač	1	26,24	23,54	Austrija
Aluminijski profil	42 m	38,45	38,45	Hrvatska
Aluminijska kanalica	40 m	16,7	16,7	Hrvatska
Pokrov aluminijske kanalice	40 m	6,52	6,52	Hrvatska
Krajnja stezaljka modula	12	0,37	0,37	Hrvatska
Srednja stezaljka modula	30	0,68	0,68	Hrvatska
M8/40 mm vijak	42	1,04	1,04	Njemačka
M8 rebrasta podloška	42	0,08	0,08	Njemačka
M8 elastična podloška	42	0,68	0,68	Njemačka
M8 T klizna matica	42	0,72	0,68	Njemačka
Samobušeći vijak s EPDM podloškom	1640	9,13	9,13	Lihtenštajn
H1Z2Z2-K 1 × 4mm <sup>2</sup> - DC kabel	60 m	3,84	2,62	Italija
FG16OR16 5 × 10 mm <sup>2</sup> - AC kabel	20 m	5,49	5,49	Italija

Tablica 6. – nastavak

FG16OR16 5 × 16 mm <sup>2</sup> - AC kabel	5 m	15,46	15,46	Italija
H07V-K 1 × 16mm <sup>2</sup> - zeleno-žuti kabel	20 m	3,23	3,23	Italija
FID sklopka, 40-4- 003/AC, 10kA	1	0,37	0,00	Hrvatska
Signalna lampica-LED- 230V	1	0,02	0,00	Hrvatska
Zaštitni prekidač, 6A, 1- polni, 10kA	1	0,12	0,00	Hrvatska
Zaštitni prekidač AMPARO 10kA, C 40A, 3P+N	1	0,41	0,00	Hrvatska
Nužni isklop	1	0,035	0,00	Hrvatska
LS-FI(KZS), C/40A/30mA, 1P+N, Tip AC, 10kA	1	0,23	0,00	Hrvatska
MC4 konektor muški	2	0,02	0,00	Kina
MC4 konektor ženski	2	0,03	0,00	Kina
	Ukupno/kg	644,67	595,84	

### 5.3.1. Životni ciklus fotonaponskog modula

U sklopu FN sustava instalirano je 18 FN modula kineskog proizvođača Yingli Solar, tipa YLM-J 144 CELL (M10). FN moduli proizvedeni su monokristalnom tehnologijom silicija i sastoje se od: aluminijskog okvira, stražnje pozadinske ploče, 72 komada monokristalnih pločica prerezanih na dva dijela i inkapsuliranih u foliji EVA, sabirnica, priključne kutije, premosnih dioda, kabela oznake H1Z2Z2-K  $1 \times 4\text{mm}^2$  s pripadajućim muško-ženskim konektorima MC4 i kaljenog stakla. Masa svake komponente FN modula pretpostavljena je na temelju CAD modela [95] preuzetog s besplatne mrežne stranice GrabCAD, istovrsnih dimenzija  $2279 \times 1134 \times 35$  mm, deklariranih u brošuri proizvoda objavljenoj od strane proizvođača [96]. Podaci o ulaznim i izlaznim tokovima potrebnim u proizvodnji monokristalnih FN modula u Kini, kao što su pomoćne tvari, energija, transport i emisije preuzeti su iz izvješća [97] o inventarima životnog ciklusa FN sustava. Vrijednosti ulaznih i izlaznih tokova u izvješću su iskazane po  $\text{m}^2$  FN modula te su iste skalirane kako bi bile mjerodavne stvarnim dimenzijama instaliranih FN modula. U tablici 7. prikazan je izrađeni inventar proizvodnje FN modula sa svim ulaznim i izlaznim tokovima. Transport pojedinih dijelova do tvornice u kojoj se FN moduli proizvode iskazan je jedinicom tona  $\times$  kilometar (tkm) što je ustaljena praksa prilikom provođenja LCA analize. Ulazni i izlazni tokovi prilikom modeliranja povezuju se s odgovarajućim procesima, a koji su prosječni za neku lokaciju: Europska regija (RER), Kina (CN), Globalno (GLO), Švicarska (CH).

U prilogu 1. prikazan je GaBi model proizvodnje monokristalnih silicijskih ćelija u Kini kakve se ugrađuju u FN module. Model je izrađen na temelju inventara o ulaznim i izlaznim tokovima preuzetim iz izvješća [97].

Tablica 7. Inventar proizvodnje fotonaponskog modula

Ulazni tok	Izlazni tok	Lokacija	Mjerna jedinica	Količina	Izvor
EVA*		RER	kg	2,1335	[95,98,99]
Priključna kutija*		CN	kg	0,0662	[95,100,101]
Pozadinska ploča, PVDF/PET/PVDF		CN	kg	1,2034	[102–105]
Aluminijski okvir		RER	kg	2,7860	[95,106]
Kaljeno staklo		RER	kg	20,5025	[95,99,107]
Fotonaponska monokristalna ćelija		CN	kg	1,1209	[108]
Sabirnice, bakar		RER	kg	0,3726	[95,109]
Kositar		RER	kg	0,0333	[96,108]
Živa		RER	kg	0,0019	[96,108]
Silikon*		RER	kg	0,3153	[96,108]
Dioda*		GLO	kg	0,0073	[96,108]
MC4 konektor muški*		CN	kg	0,0118	[101,110,111 ]
MC4 konektor ženski*		CN	kg	0,0132	[101,110,112 ]
H1Z2Z2-K-1 × 4mm <sup>2</sup> – DC kabel		CN	kg	0,0448	[109,113–115]
Europaleta*		RER	kg	2,1400	[96,116]
Kartonska kutija*		RER	kg	0,0569	[96,117]
Voda iz pipe		CN	kg	5,0300	[96,108]
Fluorovodik*		GLO	kg	0,1613	[96,108]
Propanol*		RER	kg	0,0411	[96,108]
Izopropanol		RER	kg	0,0004	[96,108]
Kalijev hidroksid*		RER	kg	0,1328	[96,108]
Električna struja		CN	MJ	130,0000	[96,108]

Tablica 7. - nastavak

Dizel		CH	MJ	0,0226	[96,108]
Transport, kamion		RER	tkm	7,1587	[96,108]
Transport, vlak		RER	tkm	42,9008	[96,108]
	Fotonaponski modul	CN	/	1	/
	Otpadna toplina, emisije u zrak	-	MJ	129,9946	[96,108]
	NMVOC, emisije u zrak	-	kg	0,0208	[96,108]
	Ugljikov dioksid, emisije u zrak	-	kg	0,0563	[96,108]
	Voda, CN, emisije u zrak	-	kg	0,5030	[96,108]

\* tokovi nisu uključeni u analizu

Modeliranje proizvodnje FN modula provedeno je tako da se u softveru GaBi napravio zaseban proces Proizvodnja Fotonaponskog modula, u koji su popisani svi ulazni i izlazni tokovi inventara kako je prikazano na slici 23. Svi prateći tokovi, odnosno tokovi koji se mogu povezati s izlaznim tokovima procesa ranijih faza životnog ciklusa označavaju se masnim slovom X. Zvezdicom (\*) se označavaju tokovi koji predstavljaju emisije ili otpadne tvari koje se generiraju prilikom provođenja procesa. Svi neoznačeni tokovi nisu praćeni jer se nisu mogli povezati s odgovarajućim procesima. Neovisno o broju i količini pratećih tokova postavljeno je da se procesom proizvodi zapakirani fotonaponski modul kako bi se prilikom modeliranja izgradnje Temeljne infrastrukture mogao izračunati doprinos transporta prema ukupnom utjecaju sustava na okoliš.

Object Edit View Help

Name: CN Proizvodnja Fotonaponskog modul Source u-so - Unit process, single operat

Parameters

Parameter Formula Value Minimum Maximum Standar Commer

LCA LCC: 0 EUR LCWE Documentation

Completeness: No statement

Inputs

Flows	Quantities	Amount	Units	Trz	Standar	Origin	Comment
CH: diesel, burned in cogen 200k	Energy (net ca 0,0226		MJ	X	0 %	(No statement)	
Electricity [Electric power]	Energy (net ca 130		MJ	X	0 %	(No statement)	
Transporting capacity [Others]	kgkm	42,9	tkm	X	0 %	(No statement)	
Transport [Others]	kgkm	7,16	tkm	X	0 %	(No statement)	
RER: 1-propanol, at plant [organics]	Mass	0,0411	kg		0 %	(No statement)	
RER: tin, at regional storage [Bei	Mass	0,0333	kg	X	0 %	(No statement)	
Priključna kutija [photovoltaic]	Mass	0,0662	kg	X	0 %	(No statement)	
Corrugated board [Materials from ren	Mass	0,0569	kg		0 %	(No statement)	
H1Z2Z2-K - 1x4 mm <sup>2</sup> [Electronic	Mass	0,0512	kg	X	0 %	(No statement)	
RER: isopropanol, at plant [orga	Mass	0,00038	kg	X	0 %	(No statement)	
RER: lead, at regional storage [B	Mass	0,00187	kg	X	0 %	(No statement)	
GLO: diode, unspecified, at plant [Par	Mass	0,00281	kg		0 %	(No statement)	
MC4 konektor muški [Electronics]	Mass	0,0118	kg		0 %	(No statement)	
MC4 konektor ženski i pin [Electronics]	Mass	0,0132	kg		0 %	(No statement)	
EUR paleta [transport systems]	Mass	2,14	kg		0 %	(No statement)	
photovoltaic cell, single-Si, at pli	Mass	1,12	kg	X	0 %	(No statement)	
aluminijevo kućište [Constructic	Mass	2,79	kg	X	0 %	(No statement)	
CH: tap water, at user [Appropri	Mass	13	kg	X	0 %	(No statement)	
Kaljeno staklo [Construction ma	Mass	20,5	kg	X	0 %	(No statement)	

Outputs

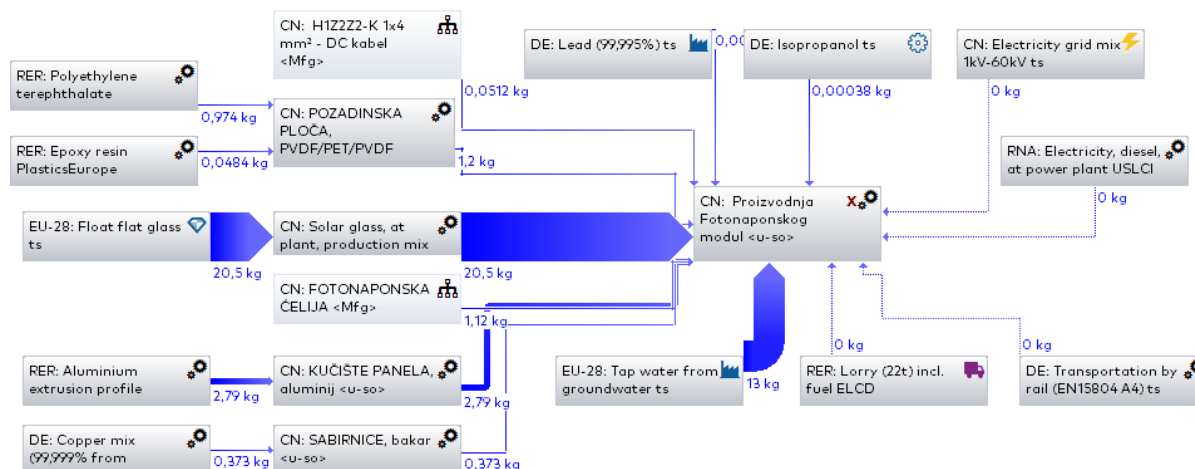
Flows	Quantities	Amount	Units	Trz	Standar	Origin	Comment
Fotonaponski modul zapakiran [	Mass	30,8	kg	X	0 %	(No statement)	
Carbon dioxide, fossil [ecoinvent long	Mass	0,0563	kg	*	0 %	(No statement)	
NM VOC, non-methane volatile organic	Mass	0,0208	kg	*	0 %	(No statement)	
Waste heat [ecoinvent long-term to a	Energy (net calor 130		MJ	*	0 %	(No statement)	

Slika 23. GaBi proces proizvodnje Fotonaponskog modula

Proces Proizvodnja Fotonaponskog modula potom je postavljen u plan Fotonaponski modul te su ulazni i izlazni tokovi povezani s odgovarajućim procesima kako je prikazano na slici 24. Prilikom povezivanja potrebno je voditi računa i o lokaciji na kojoj se pojedini procesi odvijaju kako bi što točnije opisali pojedinu fazu životnog ciklusa proizvoda. U izvješću na temelju kojega je inventar FN modula izrađen pretežno se navodi da je potrebno odabrati procese koji se odvijaju na području Europske regije (RER) te je tako i učinjeno. Korišten je i zamjenski proces proizvodnje električne energije iz dizelskog goriva prosječan za Sjevernoameričku regiju (RNA).

## FOTONAPONSKI MODUL

Process plan: Mass [kg]  
The names of the basic processes are shown.



Slika 24. Plan modela proizvodnje fotonaponskog modula u Kini

### 5.3.1.1. Transport pakiranog fotonaponskog modula iz Kine u Hrvatsku

Transport je zasebna faza u analizi inventara životnog ciklusa. Modelira se na temelju udaljenosti i mase tereta. FN modul prevoze se iz Kine u Hrvatsku. Transportne udaljenosti procijenjene su putem mrežnih stranica Google Karte [118] za kopneni, *Sea Distances* [119] za morski, te za željeznički dio puta *Train on Rails* [120]. Pretpostavljen je sljedeći dobavni pravac FN modula. Iz tvornice u Baodingu u Kini FN moduli se prevoze kamionom do luke Tianjin, koja je udaljena 241 km. Zatim se vrši utovar na kontejnerski brod te se FN moduli prevoze do luke Bakar u Hrvatskoj. Taj transportni put iznosi 16734,67 km. Željezničkom mrežom FN moduli se potom prevoze 150 km do Zagrebačkog glavnog kolodvora, otkuda se kamionom prevoze na lokaciju ugradnje udaljenu 14 km.

### 5.3.1.2. Oporaba FN modula

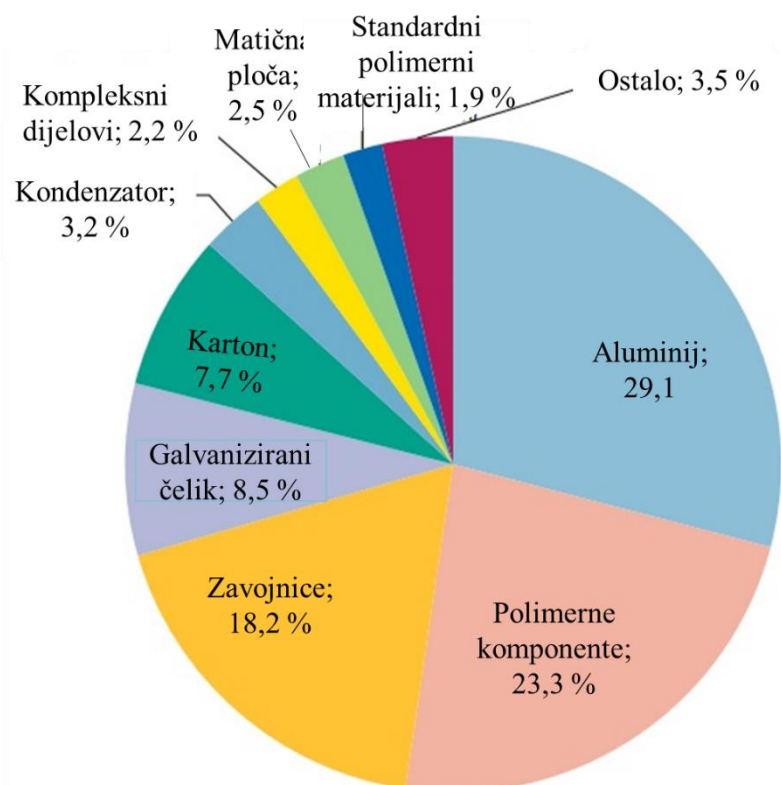
Na kraju životnog ciklusa FN sustava, FN module je potrebno oporabiti na odgovarajući način. FN moduli odvoze se 100 km do ovlaštenog oporabitelja električnog otpada, gdje se isti ručno rastavljaju. Aluminijsko kućište se u potpunosti reciklira pretaljivanjem u ingote. Stražnja ploča izrađena iz više polimernih slojeva energetske će se oporabiti, dok se kaljeno staklo mora odložiti na uređeno odlagalište otpada. Također, predviđeno je i da se energetske kabele u potpunosti energetske oporabe jer je ta opcija jedina dostupna za kabele u softveru GaBi. U stvarnosti, kabele se materijalno recikliraju kako bi se dobila vrijedna sirovina, bakar. Za FN

ćelije, sabirnice i ostale dijelovi nije predviđena uporaba jer za iste ne postoje relevantni podaci u bazi podataka i literaturi.

### 5.3.2. *Životni ciklus pretvarača*

Istosmjerna električna struja proizvedena FN modulima pretvara se u izmjeničnu pretvaračem tipa Fronius Symo Gen24 10,0 Plus, austrijskog proizvođača Fronius. Pretvarač je kompleksni elektronički uređaj čija efikasnost ovisi o komponentama od kojih je izrađen te iste proizvođači javno ne deklariraju. Mase pojedinih komponenta pretvarača izračunate su na temelju udjela masa prikazanih na slici 25., a preuzetih iz EPD-a navedenog pretvarača [121] i mase pakiranog pretvarača, 28,5 kg, preuzete iz tehničke dokumentacije [122]. Komponente, kao što su kompleksni dijelovi, matična ploča i kondenzatori izostavljeni su iz analize jer se isti nisu mogli odrediti. Za polimerne komponente pretpostavljeno je da su izrađene od akrilonitril/butadien/stirena (ABS), kopolimera kakav se uobičajeno koristi za izradu kućišta elektroničkih uređaja. Prema analizi životnog ciklusa prosječnog pretvarača proizvedenog u EU [123] uz ABS, polimerni dijelovi izrađuju se i od polikarbonata i polipropilena te je pretpostavljeno da upravo oni čine standardni polimerni materijal predmetnog pretvarača. Iz iste analize preuzeti su podaci o ulaznim i izlaznim tokovima potrebnim za izradu pretvarača snage 10 kW, sličnog instaliranom. Izrađeni inventar prikazan je u tablici 8. [123]. Ulazne i izlazne tokove naknadno se pri modeliranju povezuje s prosječnim procesima na lokaciji: Globalno (GLO), Njemačka (DE), Sjevernoamerička regija (RNA), Austrija (AT), Europska unija (EU-28).





Slika 25. Maseni udjeli pojedinih elementa pretvarača Fronius SymoGen 10,0 Plus [121]

Tablica 8. Inventar proizvodnje pakiranog pretvarača

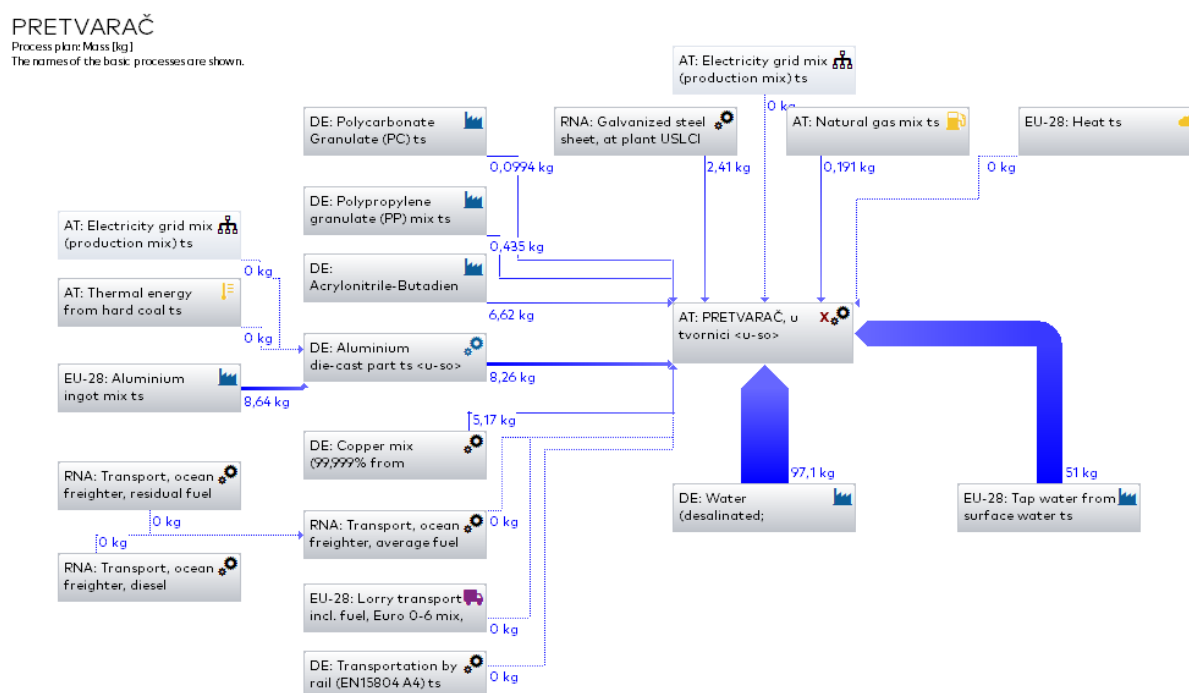
Ulazni tok	Izlazni tok	Lokacija	Mjerna jedinica	Količina
Kondenzator*		GLO	kg	0,9088
Bakar, zavojnica		DE	kg	5,1688
Aluminij, lijevani		DE	kg	8,2644
Polikarbonat (PC), granule		DE	kg	0,0994
Polipropilen (PP), granule		DE	kg	0,4346
Galvanizirani čelik, lim		RNA	kg	2,4140
Matična ploča*		GLO	kg	0,7100
Kompleksni dijelovi*		Nepoznato	kg	0,6248
Akilonitril/buta dien/ stiren (ABS)		DE	kg	6,6172

Tablica 8. - nastavak

Drugo*		Nepoznato	kg	0,9940
Električna energija		AT	MJ	97,1000
Grijanje, Termalna energija		EU-28	MJ	23,6000
Prirodni plin		AT	MJ	9,1700
Kartonska kutija*		RER	kg	2,1868
Transport, kamion		EU-28	tkm	1,7400
Transport, vlak		DE	tkm	5,7900
Transport, brod		RNA	tkm	52,1000
Voda, destilirana		DE	m <sup>3</sup>	0,0971
Voda iz pipe		EU-28	kg	51,000
	Pretvarač, pakiran u kutiji	AT	kom.	1

\* tokovi nisu uključeni u analizu

Na slici 26. prikazana je model Proizvodnja pakiranog pretvarača u Austriji kreiran na isti način kao i model Fotonaponski modul prethodno opisan.



Slika 26. Plan modela proizvodnje pakiranog pretvarača u Austriji

### 5.3.2.1. *Transport pakiranog pretvarača iz Austrije u Hrvatsku*

Pretpostavljeno je da se pretvarač proizvodi u Froniusovoj tvornici u Pettenbachu, Austrija. Iz tvornice se do lokacije u Zagrebu prevozi kamionom na udaljenosti od 361 km.

### 5.3.2.2. *Oporaba pretvarača*

Na kraju životnog ciklusa FN sustava pretvarač će se otpremiti u pogon namijenjen uporabi elektroničkog otpada koji je udaljen 100 km od lokacije. Pretvarač se u pogonu ručno rastavlja na sastavne dijelove. Čelično kućište pretvarača se u potpunosti reciklira u elektrolučnoj peći, dok će se dijelovi napravljeni od aluminijske legure reciklirati pretaljanjem. Predviđeno je da se pola dijelova izrađenih od polimernih materijala može energetske oporabiti, dok se druga polovica odlaže na odlagalište.

### 5.3.3. *Izrada inventara Energetskih kabela*

Povezivanje FN modula s pretvaračem vrši se energetskim kabelom oznake H1Z2Z2-K 1 × 4 mm<sup>2</sup>. Ovaj tip kabela je jednožilan, s presjekom bakrenog vodiča od 4 mm<sup>2</sup>. Kako u slučaju kratkog spoja ne bi došlo do požara, kabeli su izolirani plastomernim, elastoplastomernim ili duromernim spojevima smanjene razine dima bez primjesa halogenih elementa (engl. *Low Smoke Zero Halogen, LSZH*). U sklopu analize, mase pojedinih dijelova kabela izračunate su po metru dužine istoga iz dimenzija njegovog presjeka preuzetih iz tehničke dokumentacije [113]. S obzirom na to da unutar dostupne baze podataka nema procesa o proizvodnji materijala za izolacije i plašt vodiča, isti su i izostavljeni prilikom izrade inventara te je uključena isključivo proizvodnja bakrenog vodiča dobivenog elektrolitičkim rafiniranjem.

Pretvarač je unutar sustava povezan s NRO energetskim kabelom oznake FG16OR16 5 × 10 mm<sup>2</sup>, a NRO je povezan s GRO objekta energetskim kabelom oznake FG16OR16 5 × 16 mm<sup>2</sup>. Oba tipa kabela su peterožilni i služe za prijenos struje. Bakreni vodiči kabela izrađeni su istim proizvodnim postupkom kao i jednožilni kabel H1Z2Z2-K 1 × 4mm<sup>2</sup>. Vodiči su izolirani obojenim tvrdim etilen/propilenskim kaučukom EPM (engl. *Ethylene Propylene Rubber*) kako bi se mogli razlikovati prilikom spajanja. Nadalje, kabeli su ispunjeni poliuretanom u svrhu zaštita od sagorijevanja, a vanjski plašt kabela izrađen je od antiabrazivnog PVC-a, koji je i vodootporan. Mase pojedinih komponenta ovih tipova kabela izračunate su na temelju njihovih presjeka preuzetih od dobavljača [124].

U svrhu zaštite od udara munje FN moduli i nosiva konstrukcija povezana je energetskim kabelima oznake H07V-K  $1 \times 16\text{mm}^2$ , presjeka bakrenog vodiča od  $16\text{mm}^2$  izoliranog PVC izolacijom zeleno-žute boje. Za potrebe analize mase iste su proračunate na temelju presjeka kabela iz kataloga [125].

Svi energetski kabeli unutar FN sustava proizvedeni su u Italiji (IT) te je za iste inventar procesa proizvodnje prikazan u tablici 9. Podaci o proizvodnji u svezi energetskih potreba tvornice i pomoćnih tvari potrebnih za proizvodnju kabela nisu uključeni pri izradi inventara jer isti nisu bili nedostupni. Također, izolacija LSZH potrebna za izradu H1Z2Z2-K energetskih kabela nije uključena u analizu jer za istu nema komplementarnog procesa s kojim bi se mogla povezati u edukacijskoj verziji softvera GaBi.

**Tablica 9. Inventari proizvodnje različitih tipova kabela**

Plan	Ulazni tok	Izlazni tok	Lokacija	Mjerna jedinica	Količina
<b>Proizvodnja H1Z2Z2-K- 1 × 4 mm<sup>2</sup></b>					
	Bakar, 99,99% čistoće, elektrolitički		DE	kg	0,0439
	LSZH- izolacija*		-	kg	0,0203
		H1Z2Z2-K 1x4 mm <sup>2</sup>	IT	m	1
<b>Proizvodnja FG16OR16- 5 × 10 mm<sup>2</sup></b>					
	Bakar, 99,99% čistoće, elektrolitički		DE	kg	0,4450
	Poliuretanska (PU) čvrsta pjena		RER	kg	0,1965
	PVC		RNA	kg	0,0831
	PP		DE	kg	0,0482
		FG16OR16 5 × 10 mm <sup>2</sup>	IT	m	1

Tablica 9. - nastavak

<b>Proizvodnja FG16OR16- 5 × 16 mm<sup>2</sup></b>					
	Bakar, 99,99% čistoće, elektrolitički		DE	kg	0,4450
	Poliuretanska (PU) čvrsta pjena		RER	kg	0,1965
	PVC		RNA	kg	0,0831
	PP		DE	kg	0,0482
		FG16OR16 5 × 10 mm <sup>2</sup>	IT	m	1
<b>Proizvodnja H07V-K-1 × 16mm<sup>2</sup></b>					
	Bakar, 99,99% čistoće, elektrolitički		DE	kg	0,1424
	PVC		RNA	kg	0,0190
		H07V-K 1 × 16mm <sup>2</sup>	IT	m	1

\* tokovi nisu uključeni u analizu

### 5.3.3.1. Transport energetske kabele iz Italije u Hrvatsku

Instalater FN sustava sve energetske kabele nabavlja od istog proizvođača u Italiji. Predviđen je transport iz mjesta Brendola u Italiji do lokacije u Zagrebu na udaljenosti od 442 km.

### 5.3.3.2. Oporaba energetske kabele

Energetske kabele na kraju životnoga ciklusa potrebno je reciklirati (materijalno oporabiti) kako bi se vrijedni metali poput bakra mogli izvaditi i ponovno upotrijebiti za proizvodnju drugih dijelova. Polimerni omotač predstavlja otpad te se on ili energetski oporabi u svrhu proizvodnje korisne energije ili odlaže na odlagališta. U sklopu dostupne baze podataka iz softvera GaBi ne postoji proces kojim bi se mogla postaviti uobičajena praksa oporabe kabela te je jedini ponuđeni proces taj da se kabeli u potpunosti energetski oporabe, što je u konačnici i odabrano.

### 5.3.4. Izrada inventara aluminijski dijelovi

Aluminijski elementi korišteni pri instalaciji FN modula su: aluminijski profili na koje su FN moduli postavljeni te srednje i krajnje stezne hvataljke kojima su učvršćeni kako bi se FN moduli osigurali od mehaničkih oštećenja, odnosno kako bi se osigurala puna funkcionalnost samoga sustava. Nadalje, od aluminijske su izrađene i kanalice s pripadajućim pokrovom u koje se postavljaju kabeli kako bi se zaštitili od atmosferskih utjecaja. Za predmetni sustav pretpostavljeno je da su svi aluminijski dijelovi izrađeni u Hrvatskoj (HR) u istom proizvodnom pogonu. Aluminijski profili, srednje i krajnje hvataljke izrađene su postupkom ekstruzije aluminijske, dok su kanalice i pokrovi izrađeni presavijanjem aluminijskih limova. Pri izradi inventara, masa aluminijskog profila izračunata je iz tehničkog crteža prikupljenog od strane instalatera sustava. Masa krajnje stezne hvataljke proračunata je iz CAD modela dostupnog na mrežnoj stranici GrabCAD [126], a masa srednje stezne hvataljke izračunata je na temelju tehničkog crteža prikupljenog sa stranica distributera, a koja svojim dimenzijama odgovara instaliranoj hvataljki [127]. U tablici 10. prikazan je inventar proizvodnje dijelova izrađenih iz aluminijske.

**Tablica 10. Inventar proizvodnje dijelova izrađenih od aluminijske**

Plan	Ulazni tok	Izlazni	Lokacija	Mjerna jedinica	Količina
<b>Proizvodnja aluminijskog profila</b>					
	Aluminijski ekstrudirani profil		EU-28	kg	0,9154
		Aluminijski profil	HR	m	1
<b>Proizvodnja srednje stezne hvataljke</b>					
	Aluminijski ekstrudirani profil		EU-28	kg	0,0226
		Srednja stezna hvataljka	HR	kom.	1

Tablica 10. - nastavak

<b>Proizvodnja krajnje stezne hvataljke</b>					
	Aluminijski ekstrudirani profil		EU-28	kg	0,0307
		Krajnja stezna hvataljka	HR	kom.	1
<b>Proizvodnja aluminijske kanalice</b>					
	Aluminijski lim (EN 18504)		EU-28	kg	0,4180
		Aluminijska kanalica	HR	m	1
<b>Proizvodnja pokrova aluminijske kanalice</b>					
	Aluminijski lim (EN 18504)		EU-28	kg	0,1631
		Pokrov aluminijska kanalica	HR	m	1

#### 5.3.4.1. Transport aluminijskih dijelova unutar Hrvatske

Svi aluminijski dijelovi proizvedeni su u tvornici u Obrežu Zelenskom, Hrvatska. Do lokacije u Zagrebu prevoze se kamionom na udaljenosti od 44 km.

#### 5.3.4.2. Oporaba aluminijskih dijelova

Aluminijski dijelovi se na kraju životnog ciklusa ručno rastavljaju sa stambenog objekta i prevoze se na udaljenost od 100 km u pogon na materijalnu uporabu. Materijalna uporaba (recikliranje) provodi se tako da se svi dijelovi pretale u aluminijske ingote.

### 5.3.5. Čelični dijelovi fotonaponskog sustava

Čelični dijelovi kojima su pojedini dijelovi nosive konstrukcije povezani proizvedeni su na različitim lokacijama. U Lihtenštajnu (LI) se proizvode samobušajući vijci s pripadajućim EPDM podložnim pločicama. Masa samih vijaka i podložnih pločica izračunata je prema dimenzijama dostupnim na mrežnoj stranici dobavljača [128]. Za M8/40 mm vijke, M8 sigurnosne podloške, M8 elastične podloške i M8 klizne matice T-utora predviđena je proizvodnja u Njemačkoj. Masa M8/40 mm vijka preuzeta je s mrežne stranice [129], dok su mase M8 sigurnosne podloške [130] i M8 [131] elastične podloške izračunate na temelju njihova unutarnjeg i vanjskog promjera te visine. Masa klizne matice T-utora izvedena je iz CAD modela preuzetog sa stranice GrabCAD [126]. Pretpostavljeno je da su vijci i podložne pločice proizvedeni iz čeličnih žica te je proces urezivanja navoja izostavljen s obzirom na to da unutar edukacijske verzije softvera GaBi isti ne postoji. Klizna matica T-utora proizvodi se lijevanjem čelika. Inventar proizvodnje čeličnih dijelova prikazan je u tablici 11.



Tablica 11. Inventar proizvodnje čeličnih dijelova

Plan	Ulazni tok	Izlazni tok	Lokacija	Mjerna jedinica	Količina
<b>Proizvodnja samobušćih vijka s EPDM podložnom pločicom</b>					
	Čelična žica		DE	kg	0,5313
	EPDM, granulati		DE	kg	0,0256
		Samobušći vijak s EPDM pločicom	LI	kom.	100
<b>Proizvodnja M8/40 mm vijka</b>					
	Čelična žica		DE	kg	2,4700
		M8/40 mm vijak	DE	kom.	100
<b>Proizvodnja M8 sigurnosnih podloška</b>					
	Čelični lim		DE	kg	0,0774
		M8 sigurnosna podloška	DE	kom.	100
<b>Proizvodnja M8 elastičnih podloška</b>					
	Čelična žica		DE	kg	0,1891
		M8 elastična podloška	DE		100
<b>Proizvodnja M8 kliznih matica T-utora</b>					
	Čelik, lijevani		DE	kg	1,7150
		M8 klizna matica	DE	kom	100

#### *5.3.5.1. Transport čeličnih dijelova*

Samobušeci vijci s EPDM podložnim pločicama dostavljaju se iz Schaana, Lihtenštajn kamionom na udaljenosti od 760 km u Zagrebu. S druge strane, M8/40 mm vijci, M8 sigurnosne podloške, M8 elastične podloške i M8 klizne matice T-utora dostavljaju se iz tvornice u Wuppertalu, Njemačka na udaljenosti od 1140 km do lokacije u Zagrebu.

#### *5.3.5.2. Oporaba čeličnih dijelova*

U sklopu provedene analize pretpostavljeno je da se na kraju životnog ciklusa FN sustava svi čelični dijelovi ručno odvajaju i odvoze u pogon na materijalnu uporabu (recikliranje). Recikliranje se provodi tako da se čelični dijelovi pretale u elektrolyčnoj peći. EPDM podložne pločice će se u istom pogonu energetske oporabiti. Predviđena je udaljenost od 100 km između lokacije u Zagrebu i pogona.

### 5.3.6. Modeliranje životnog ciklusa FN sustava

Fotonaponski sustav prema PCR promatra se kroz 3 faze životnog ciklusa: uzvodnu, temeljnu i nizvodnu. Uzvodna faza je isključena jer FN sustav ne koristi goriva pri pretvorbi energije, pa su modelirane samo temeljna i nizvodna faza. Temeljna faza podijeljena je na temeljnu infrastrukturu i temeljni proces, kako je već ranije spomenuto. Faza temeljenje infrastrukture prilikom modeliranja podijeljena je na podfaze proizvodnje i uporabe kako bi se jasnije mogao ocijeniti utjecaj pojedinih faza na okoliš prilikom interpretacije rezultata. Isto je učinjeno i za fazu nizvodne infrastrukture.

Faze kraja životnog ciklusa (EoL) temeljne i nizvodne infrastrukture modelirane su prema pretpostavljenoj uporabi pojedinih komponenti te su kreirani modeli prikazani u prilogu 2 i 3.

#### 5.3.6.1. Faza proizvodnje temeljne infrastrukture

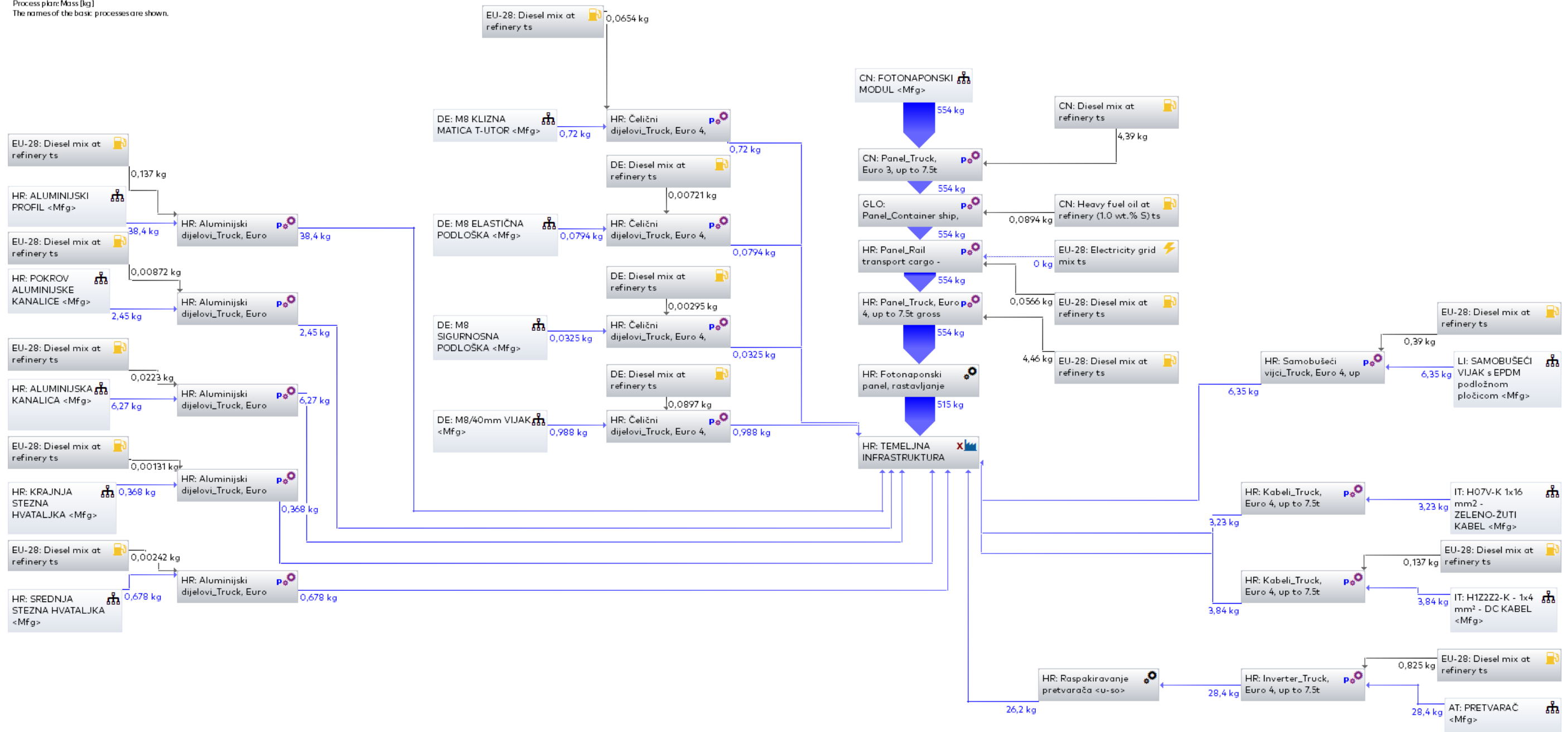
Faza proizvodnje temeljne infrastrukture uključuje sve faze proizvodnje pojedinačnih komponenti od kojih je sačinjena te transport istih do lokacije ugradnje u Zagrebu. U tablici 12. prikazane su količine komponenata prema kojima je izrađen model u GaBi softveru prikazan na slici 27.

**Tablica 12. Komponente temeljne infrastrukture**

Komponenta	Mjerna jedinica	Količina
FN modul	/	18
Pretvarač	/	1
H1Z2Z2-K $1 \times 4 \text{ mm}^2$	m	60
Aluminijski profil	m	42
Aluminijska kanalica	m	15
Pokrov aluminijske kanalice	m	15
Srednja stezna hvataljka	m	30
Krajnja stezna hvataljka	m	12
H07V-K $1 \times 16 \text{ mm}^2$	m	20
M8 klizna matica T-utora	/	42
M8/40 mm vijak	/	42
M8 sigurnosna podloška	/	42
M8 elastična podloška	/	42
Samobušeci vijak s EPDM podložnom pločicom	/	1040

TEMELJNA INFRASTRUKTURA

Process plan: Mass [kg]  
The names of the basic processes are shown.



Slika 27. Modelirani plan proizvodnje Temeljne infrastrukture

### 5.3.6.2. Temeljni proces

Temeljni proces uključuje proizvodnju električne energije putem FN modula te distribuciju iste do pretvarača. U probnoj verziji softvera PV\*SOL izračunata je jednogodišnja proizvodnja električne energije za instalirane fotonaponske module s proračunatim gubitcima u električnim kabelima i unutar samog pretvarača. Predmetni FN sustav u jednoj godini proizvede i pretvori 10174,28 kWh električne energije u izmjeničnu struju. Ukupna proizvedena i pretvorena električna energija u izmjeničnu struju FN sustava tijekom 25 godišnjeg životnog vijeka iznosi 238041,95 kWh. Prilikom izračuna u obzir je uzeta i godišnja stopa degradacije FN modula od 0,55 %, a izračun je proveden prema sljedećoj formuli (3) [132]:

$$E_{\text{žv}} = (E_1 \times (1 + \sum_{n=1}^{\text{žv}-1} (1 - \text{deg})^n)) \quad (3)$$

Gdje je:

$E_{\text{žv}}$	kWh	proizvedena i pretvorena električna energija tijekom životnog vijeka FN sustava
$E_1$	kWh	proizvedena i pretvorena električna energija u izmjeničnu struju u prvoj godini rada FN sustava
$\text{deg}$	/	stopa degradacije FN modula
$n$	/	životni vijek FN sustava

Fotonaponski moduli potrebno je održavati, čistiti vodom kako bi uvjeti rada bili optimalni. Na temelju ukupne predviđene proizvedene električne energije tijekom životnoga vijeka FN sustava izračuna je prosječna potrošnja vode, potrebne za čišćenje FN modula i iznosi 18 m<sup>3</sup> [133].

## 5.3.6.3. Faza proizvodnje nizvodne infrastrukture

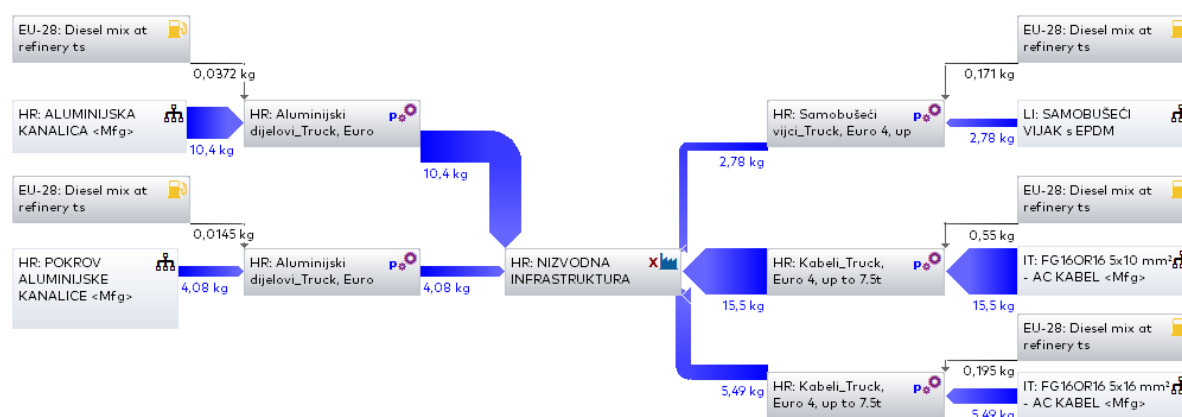
Plan proizvodnje nizvodne infrastrukture modeliran je na isti način kao i plan izgradnje temeljne infrastrukture. U tablici 13. prikazane su količine komponenti od koje se nizvodna infrastruktura sastoji, a na slici 28. prikazan je kreirani GaBi plan modela.

Tablica 13. Komponente nizvodne infrastrukture

Komponenta	Mjerna jedinica	Količina
FG16OR16 5 × 10 mm <sup>2</sup>	m	20
FG16OR16 5 × 16 mm <sup>2</sup>	m	5
Aluminijska kanalica	m	25
Pokrov aluminijske kanalice	m	25
Samobušeci vijak s EPDM podložnom pločicom	m	500

## NIZVODNA INFRASTRUKTURA

Process plan: Mass [kg]  
The names of the basic processes are shown.



Slika 28. Modelirani plan proizvodnje Nizvodne infrastrukture

#### 5.3.6.4. Nizvodni proces

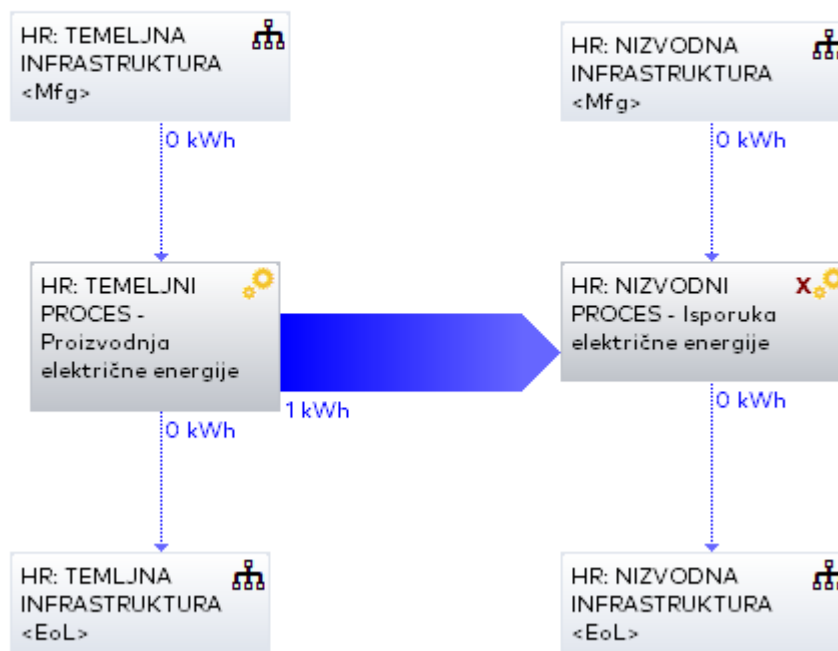
Nizvodni proces uključuje distribuciju električne energije od pretvarača do GRO objekta. Neto distribuirana električna energija izračunata je tako da se ukupna proizvedena i pretvorena energija umanjila za 0,09 %, koliki je udio gubitaka energije uslijed otpora u energetske kablama (FG16OR16  $5 \times 10 \text{ mm}^2$  i FG16OR16  $5 \times 16 \text{ mm}^2$ ). Količina neto distribuirane energije FN sustava iznosi 237827,71 kWh, dok su toplinski gubici 214,24 kWh za 25 godišnji životni vijek.

#### 5.3.6.5. Model životnog ciklusa fotonaponskog sustava

U zadnjem koraku LCI potrebno je sve planove i potplanove sustava postaviti u međusobni odnos prema definiranoj funkcionalnoj jedinici 1 kWh proizvedene neto električne energije, kako je i prikazano na slici 29. Ovaj korak je neophodan kako bi se svi agregirani ulazni i izlazni tokovi sustava skalirali te se na temelju njihovih vrijednosti procijenio utjecaj na okoliš cijelog sustava.

### ŽIVOTNI CIKLUS FOTONAPONSKOG SUSTAVA

Process plan: Energy (net calorific value) [kWh]  
The names of the basic processes are shown.



Slika 29. Modelirani životni ciklus fotonaponskog sustava

#### **5.4. Procjena utjecaja životnog ciklusa**

Po završetku LCI faze provedena je procjena utjecaja životnog ciklusa (LCIA). Korišteni su dostupni karakterizacijski modeli za pojedine kategorije utjecaja i indikatore, a koji su u skladu s normom HRN EN 15804. Rezultati su prikazani za faze proizvodnje, transporta i kraja životnog ciklusa temeljne i nizvodne infrastrukture te za temeljni i nizvodni proces. Procjena utjecaja na okoliš u potpunosti je provedena za kategorije utjecaja na okoliš koje su standardne prilikom provođenja LCA i rezultati su prikazani u tablici 14. Rezultati energetske i materijalne indikatora, a koji su dostupni u GaBi softveru zajedno su prikazani u tablici 15. pod nazivom korištenje resursa. Ukupno odloženo opasnog, neopasnog i radioaktivnog otpada prikazano je u tablici 16. Dodatne utjecajne kategorije prema kojima je životni ciklus proizvoda potrebno procijeniti u skladu s normom HRN EN 15804+A2 prikazane su u tablici 17. Tokove koji izlaze iz proizvodnog sustava, kao što su komponente za prenamjenu, materijale namijenjene recikliranju ili energetske oporabi te izvezenu energiju nije bilo moguće procijeniti jer odgovarajući karakterizacijski modeli nisu bili dostupni.



Tablica 14. Rezultati LCIA analize: kategorije utjecaja

INDIKATOR	MJERNA JEDINICA	UKUPNO	TEMELJNA (PRO.)	TEMELJNA (EoL)	TEMELJNA (TRAN.)	TEMELJNI PROCES	NIZVODNA (PRO.)	NIZVODNA (EoL)	NIZVODNI PROCES	NIZVODNA (TRAN.)
01 EN15804+A2 Klimatske promjene	kg CO2 ekv.	2,24E-02	2,04E-02	5,86E-04	2,39E-04	0,00E+00	8,91E-04	2,28E-04	0,00E+00	1,91E-05
02 EN15804+A2 Klimatske promjene (fosilne)	kg CO2 ekv.	2,22E-02	2,02E-02	5,88E-04	2,35E-04	0,00E+00	8,91E-04	2,28E-04	0,00E+00	1,90E-05
03 EN15804+A2 Klimatske promjene (biogene)	kg CO2 ekv.	-1,81E-05	-1,86E-05	-1,97E-06	2,71E-06	0,00E+00	-2,47E-07	4,21E-08	0,00E+00	-3,28E-08
04 EN15804+A2 Klimatske promjene (korištenje zemljišta)	kg CO2 ekv.	2,18E-04	2,15E-04	1,59E-07	1,34E-06	0,00E+00	8,36E-07	3,76E-08	0,00E+00	1,56E-07
05 EN15804+A2 Osiromašivanje ozona	kg CFC-11 ekv.	4,66E-11	4,63E-11	3,05E-13	8,30E-20	0,00E+00	3,22E-17	1,15E-16	0,00E+00	2,31E-21
06 EN15804+A2 Zakiseljavanje	mol H+ ekv.	9,25E-05	8,54E-05	7,00E-07	1,44E-06	0,00E+00	4,77E-06	1,12E-07	0,00E+00	9,95E-08
07 EN15804+A2 Eutrofikacija slatke vode	kg P ekv.	2,91E-08	1,76E-08	2,06E-09	5,19E-10	0,00E+00	8,78E-09	6,04E-11	0,00E+00	5,84E-11
08 EN15804+A2 Eutrofikacija morska voda	kg N ekv.	2,08E-05	1,92E-05	2,04E-07	6,82E-07	0,00E+00	6,63E-07	2,98E-08	0,00E+00	4,75E-08
09 EN15804+A2 Eutrofikacija kopna	mol N ekv.	2,55E-04	2,38E-04	2,33E-06	7,54E-06	0,00E+00	6,87E-06	3,92E-07	0,00E+00	5,28E-07
10 EN15804+A2 Fotokemijski smog	kg NMVOC ekv.	6,11E-05	5,71E-05	5,97E-07	1,32E-06	0,00E+00	1,97E-06	8,74E-08	0,00E+00	9,22E-08
11 EN15804+A2 Osiromašivanje prirodnih resursa (metali i minerali)	kg Sb ekv.	5,30E-07	3,14E-07	2,58E-11	1,49E-11	0,00E+00	2,16E-07	6,40E-12	0,00E+00	1,38E-12
12 EN15804+A2 Osiromašivanje prirodnih resursa (fosilna goriva)	MJ	2,47E-01	2,27E-01	3,15E-03	3,20E-03	0,00E+00	1,22E-02	5,47E-04	0,00E+00	2,56E-04
13 EN15804+A2 Upotreba vode	m <sup>3</sup> svjetski ekv.	3,52E-02	3,14E-02	4,56E-05	2,52E-06	3,25E-03	5,20E-04	2,16E-05	0,00E+00	1,72E-07

Tablica 15. Rezultati LCIA analize: korištenje resursa

INDIKATOR	MJERNA JEDINICA	UKUPNO	TEMELJNA (PRO.)	TEMELJNA (EoL)	TEMELJNA (TRAN.)	TEMELJNI PROCES	NIZVODNA (PRO.)	NIZVODNA (EoL)	NIZVODNI PROCES	NIZVODNA (TRAN.)
01 EN15804+A2 Upotreba obnovljivih izvora energije (PERE)	MJ	-3,55E+00	4,10E-02	3,57E-04	1,49E-04	-3,60E+00	3,48E-03	9,86E-05	3,24E-03	1,44E-05
03 EN15804+A2 Ukupna upotreba obnovljivih izvora energije (PERT)	MJ	-3,55E+00	4,10E-02	3,57E-04	1,49E-04	-3,60E+00	3,48E-03	9,86E-05	3,24E-03	1,44E-05
04 EN15804+A2 Upotreba neobnovljivih izvora energije (PENRE)	MJ	2,47E-01	2,28E-01	3,15E-03	3,20E-03	0,00E+00	1,23E-02	5,48E-04	0,00E+00	2,56E-04
06 EN15804+A2 Ukupna upotreba neobnovljivih izvora energije (PENRT)	MJ	2,47E-01	2,28E-01	3,15E-03	3,20E-03	0,00E+00	1,23E-02	5,48E-04	0,00E+00	2,56E-04
08 EN15804+A2 Upotreba obnovljivih sekundarnih goriva (RSF)	MJ	1,00E-25	5,90E-26	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,09E-26	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
09 EN15804+A2 Upotreba neobnovljivih sekundarnih goriva (NRSF)	MJ	1,17E-24	6,93E-25	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,81E-25	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
10 EN15804+A2 Upotreba slatke vode (FW)	m <sup>3</sup>	8,38E-04	7,43E-04	1,29E-06	1,79E-07	7,57E-05	1,73E-05	5,62E-07	0,00E+00	1,67E-08

Tablica 16. Rezultati LCIA analize: otpad

INDIKATOR	MJERNA JEDINICA	UKUPNO	TEMELJNA (PRO.)	TEMELJNA (EoL)	TEMELJNA (TRAN.)	TEMELJNI PROCES	NIZVODNA (PRO.)	NIZVODNA (EoL)	NIZVODNI PROCES	NIZVODNA (TRAN.)
01 EN15804+A2 Odložen opasan otpad (HWD)	kg	9,23E-10	7,82E-10	6,14E-12	1,03E-10	0,00E+00	1,91E-11	9,10E-13	0,00E+00	1,19E-11
02 EN15804+A2 Odložen neopasan otpad (NHWD)	kg	2,76E-03	7,36E-04	1,71E-03	4,06E-07	0,00E+00	2,63E-04	4,78E-05	0,00E+00	3,92E-08
03 EN15804+A2 Odložen radioaktivan otpad (RWD)	kg	5,58E-06	4,97E-06	1,20E-07	1,00E-08	0,00E+00	4,58E-07	2,31E-08	0,00E+00	3,17E-10

Tablica 17. Rezultati analize: dodatne utjecajne kategorije

INDIKATOR	MJERNA JEDINICA	UKUPNO	TEMELJNA (PRO.)	TEMELJNA (EoL)	TEMELJNA (TRAN.)	TEMELJNI PROCES	NIZVODNA (PRO.)	NIZVODNA (EoL)	NIZVODNI PROCES	NIZVODNA (TRAN.)
01 EN15804+A2 Emisija čestica	Učestalost bolesti	1,15E-09	1,08E-09	5,48E-12	7,05E-12	0,00E+00	5,21E-11	1,23E-12	0,00E+00	3,67E-13
02 EN15804+A2 Ionizirajuće zračenje	kBq U235 ekv.	5,39E-04	4,28E-04	1,74E-05	1,55E-06	0,00E+00	8,85E-05	3,00E-06	0,00E+00	4,59E-08
03 EN15804+A2 Eko toksičnost	CTUe	1,10E-01	9,67E-02	8,44E-04	2,77E-03	0,00E+00	9,26E-03	1,28E-04	0,00E+00	1,81E-04
04 EN15804+A2 Toksičnost za ljude, kancerogeno	CTUh	8,31E-12	7,60E-12	5,50E-14	5,23E-14	0,00E+00	5,93E-13	1,03E-14	0,00E+00	3,79E-15
05 EN15804+A2 Toksičnost za ljude, nije kancerogeno	CTUh	1,74E-10	1,44E-10	4,99E-12	2,42E-12	0,00E+00	2,13E-11	1,47E-12	0,00E+00	2,06E-13
06 EN15804+A2 Korištenje zemljišta	Pt	2,67E-02	2,31E-02	3,75E-04	7,93E-04	0,00E+00	2,24E-03	1,01E-04	0,00E+00	8,98E-05

#### **5.4.1. Normalizacija i ponderiranje rezultata utjecaja na okoliša**

Normalizacija je prema ISO 14044 zaseban korak prilikom provođenja LCA analize koji nije nužno provesti, ali se primjenjuje kako bi se rezultati LCIA analize mogli kvalitetnije interpretirati. Provodi se tako da se rezultati kategorija utjecaja određenog proizvoda usporede s referentnim vrijednostima kako bi se utjecaji mogli povezati s referentnim proizvodom ili određenim sustavom (regijom, zemljom ili cijelim svijetom) [134].

U sklopu analize u okviru diplomskog rada, rezultati kategorija utjecaja normalizirani su s normalizacijskim faktorima (NF) dostupnim unutar softvera GaBi, a isti su izvedeni prema normi HRN EN 15804. Nadalje, provedeno je i ponderiranje normaliziranih rezultata kategorija utjecaja, kako bi se iste mogle ocijeniti prema važnosti u odnosu na ukupan rezultat utjecaja na okoliš FN sustava. Ponderiranje je temeljeno na vrijednosnim izborima i nije znanstveno utemeljen korak provođenja LCA. Različite organizacije, društva i osobe imaju različita stajališta te se stoga ponderirani rezultati razlikuju za iste normalizirane vrijednosti kategorija utjecaja. Neovisno o nedostacima ovoga koraka, ponderiranje je provedeno u svrhu bolje interpretacije LCA. Faktori ponderiranja (FP) izvedeni su u skladu s normom HRN EN 15804, prema kojoj je PCR za FN sustave izrađen. U tablici 18. prikazane su izračunate ocjene pojedinih kategorija utjecaja izražene u  $\mu$ bod.

**Tablica 18. Ocjena kategorije utjecaja prema važnosti u odnosu na ukupni rezultat utjecaja fotonaponskog sustava na okoliš**

INDIKATOR	MJERNA JEDINICA	UKUPNO	NF	FP	OCJENA (μbod)
11 EN15804+A2 Osiriromašivanje prirodnih resursa (metali i minerali)	kg Sb ekv.	5,30E-07	1,57E+01	7,55	63
01 EN15804+A2 Klimatske promjene	kg CO2 ekv.	2,24E-02	1,24E-04	21,06	59
12 EN15804+A2 Osiriromašivanje prirodnih resursa (fosilna goriva)	MJ	2,47E-01	1,54E-05	8,32	32
13 EN15804+A2 Upotreba vode	m <sup>3</sup> svjetski ekv.	3,52E-02	8,70E-05	8,51	26
02 EN15804+A2 Ionizirajuće zračenje	kBq U235 ekv.	5,39E-04	7,25E-03	5,01	20
01 EN15804+A2 Emisija čestica	Učestalost bolesti	1,15E-09	1,68E+03	8,96	17
06 EN15804+A2 Zakiseljavanje	mol H+ ekv.	9,25E-05	1,80E-02	6,2	10
10 EN15804+A2 Fotokemijski smog	kg NMVOC ekv.	6,11E-05	2,46E-02	4,78	7
09 EN15804+A2 Eutrofikacija kopna	mol N ekv.	2,55E-04	5,65E-03	3,71	5
03 EN15804+A2 Eko toksičnost	CTUe	1,10E-01	2,34E-05	1,92	5
08 EN15804+A2 Eutrofikacija morska voda	kg N ekv.	2,08E-05	5,13E-02	2,96	3
05 EN15804+A2 Toksičnost za ljude, nije kancerogeno	CTUh	1,74E-10	4,35E+03	1,84	1
04 EN15804+A2 Toksičnost za ljude, kancerogeno	CTUh	8,31E-12	5,38E+04	2,13	1
06 EN15804+A2 Korištenje zemljišta	Pt	2,67E-02	4,48E-07	7,94	0
07 EN15804+A2 Eutrofikacija slatke vode	kg P ekv.	2,91E-08	6,21E-01	2,8	0
05 EN15804+A2 Osiriromašivanje ozona	kg CFC-11 ekv.	4,66E-11	2,07E+01	6,31	0

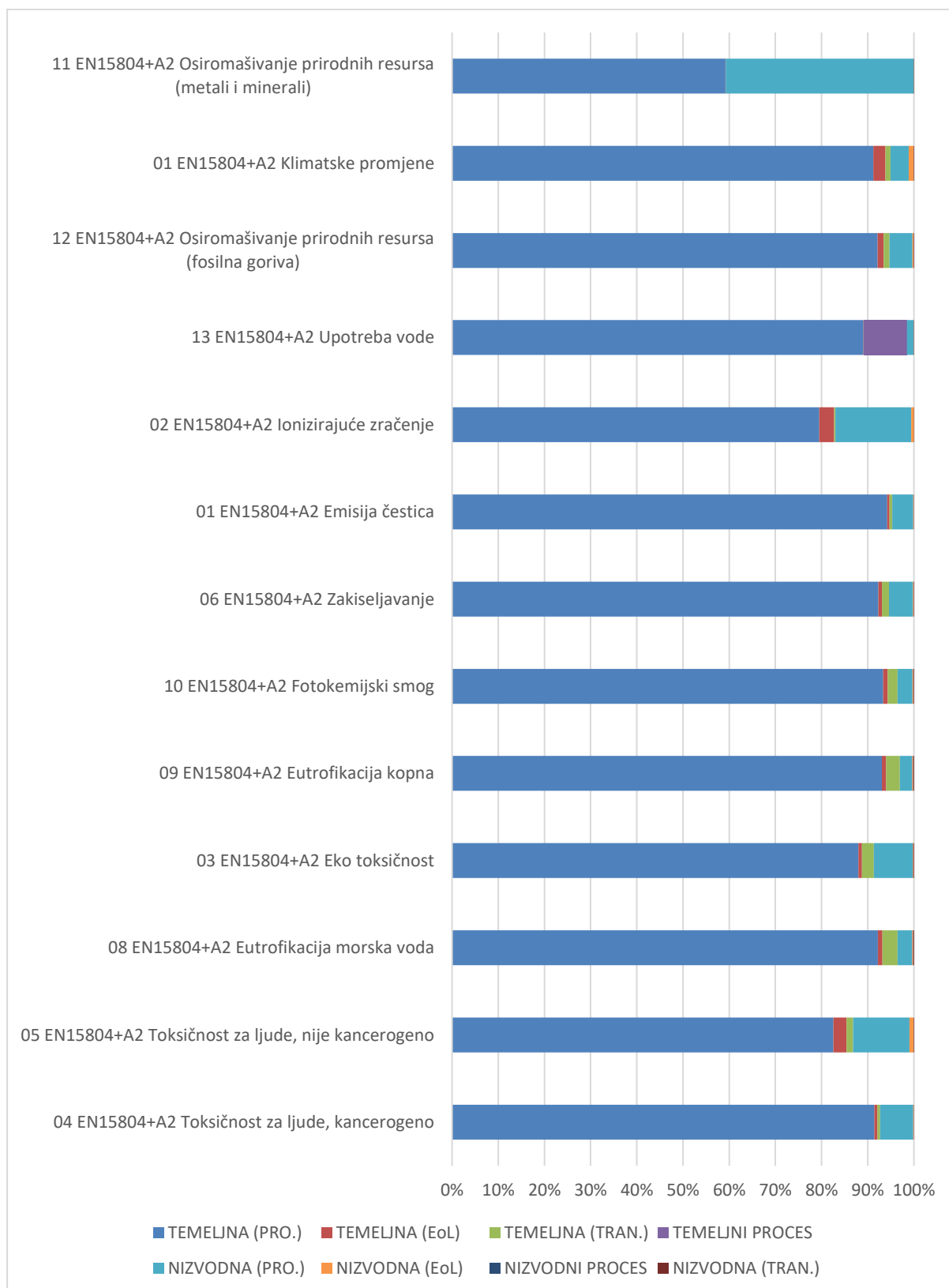
## 5.5. Interpretacija rezultata LCA

Procjena utjecaja na okoliš za predmetni FN sustav provedena je metodom LCA korištenjem edukacijske verzije softvera GaBi. Analizirane su sve sastavnice (svi dijelovi) FN sustava prema mogućnostima i dostupnim informacijama. Provođenjem LCA analize prema PCR-u životni ciklus FN sustava bilo je potrebno podijeliti na fazu temeljne infrastrukture, temeljnog procesa, nizvodne infrastrukture i nizvodnog procesa. Faze temeljne i nizvodne infrastrukture dodatno su analizirane po sljedećim podfazama: proizvodnje, transporta i kraja životnog ciklusa, sve kako bi se mogao razumjeti njihov doprinos ukupnom učinku na okoliš. Iz ponderiranih rezultata kategorija utjecaja prezentiranih u tablici 18. najveću važnost u pogledu utjecaja FN sustava na okoliš imaju kategorije osiromašenja prirodnih resursa (metali i minerali) te klimatske promjene. S druge strane, kategorije osiromašivanja ozona, eutrofikacija slatke vode i korištenje zemljišta u kontekstu ukupnog utjecaja na okoliš sustava nemaju nikakvu važnost.

Na temelju rezultata LCIA, a za kategorije utjecaja koje su prema ponderiranim ocjenama najutjecajnije, izrađen je grafikon prikazan na slici 30., koji prikazuje relativan doprinos svake od odabranih faza životnog ciklusa ukupnom utjecaju FN sustava na okoliš. Iz grafikona se može zaključiti da je:

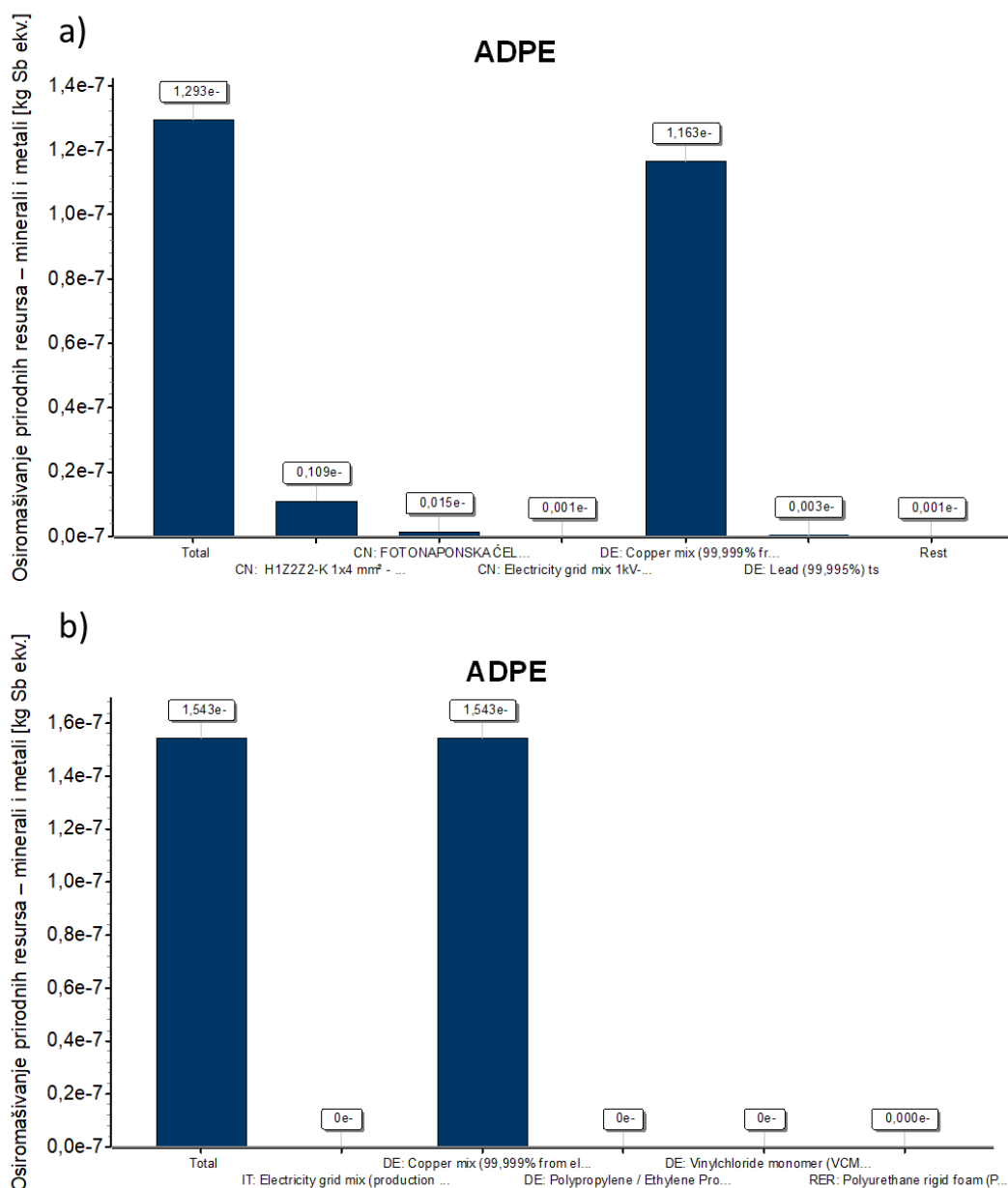
- faza proizvodnje temeljne infrastrukture daleko najutjecajnije po svim kategorijama utjecaja na okoliš, što je povezano s činjenicom da temeljna infrastruktura uključuje najveći broj komponenata sustava
- faza proizvodnje nizvodne infrastrukture neznatno utječe na okoliš, osim u pogledu osiromašivanja prirodnih resursa (minerala i metala) i emitiranja ionizirajućeg zračenja
- faze transporta i kraja životnoga ciklusa, kako za temeljnu tako i za nizvodnu infrastrukturu, od minimalnog su značaja u širem kontekstu utjecaja FN sustava na okoliš.

Analizirani FN sustav proizvodi električnu energiju iz obnovljivog izvora energije, sunca, pa samim time faze temeljnog i nizvodnog procesa ne bi imale nikakav utjecaj na okoliš. Korištenje vode, radi redovitog čišćenja FN modula kako bi se postigao optimalni prijam sunčane energije, jedini je čimbenik po kojem faza temeljnog procesa utječe na okoliš.



**Slika 30. Relativni doprinosi pojedinih faza životnog ciklusa fotonaponskog sustava prema kategorijama utjecaja na okoliš**

FN sustav je kompleksni sustav koji se sastoji od niza međusobno zavisnih komponenata koje su proizvedene različitim proizvodnim postupcima na različitim lokacijama. Pojedini proizvodni postupci, stoga, prema pojedinim kategorijama utjecaja na okoliš utječu više od drugih. Kako bi se odredilo koji proizvodni postupci najviše utječu na okoliš, sagledane su faze proizvodnje pojedinih komponenata sustava prema nekim od kategorija utjecaja. Na iskorištavanje prirodnih resursa (mineralnih i metalnih) najviše utječe proizvodnja bakrenih žica energetskih kabela, bakrenih sabirnica FN modula i proizvodnja bakrenih zavojnica pretvarača. Ti utjecaji prikazani su na slici 31. Potrebno je napomenuti kako je pri izradi inventara u LCI fazi za sve komponente izrađene od bakra odabran isti proizvodni postupak. Postupak proizvodnje elektrolitičkog bakra sastoji se od agregiranih ulaznih i izlaznih tokova za fazu ekstrakcije bakrene rude i njezine obrade u proizvodnom pogonu te postupkom nije predviđena opcija upotrebe recikliranog bakra.

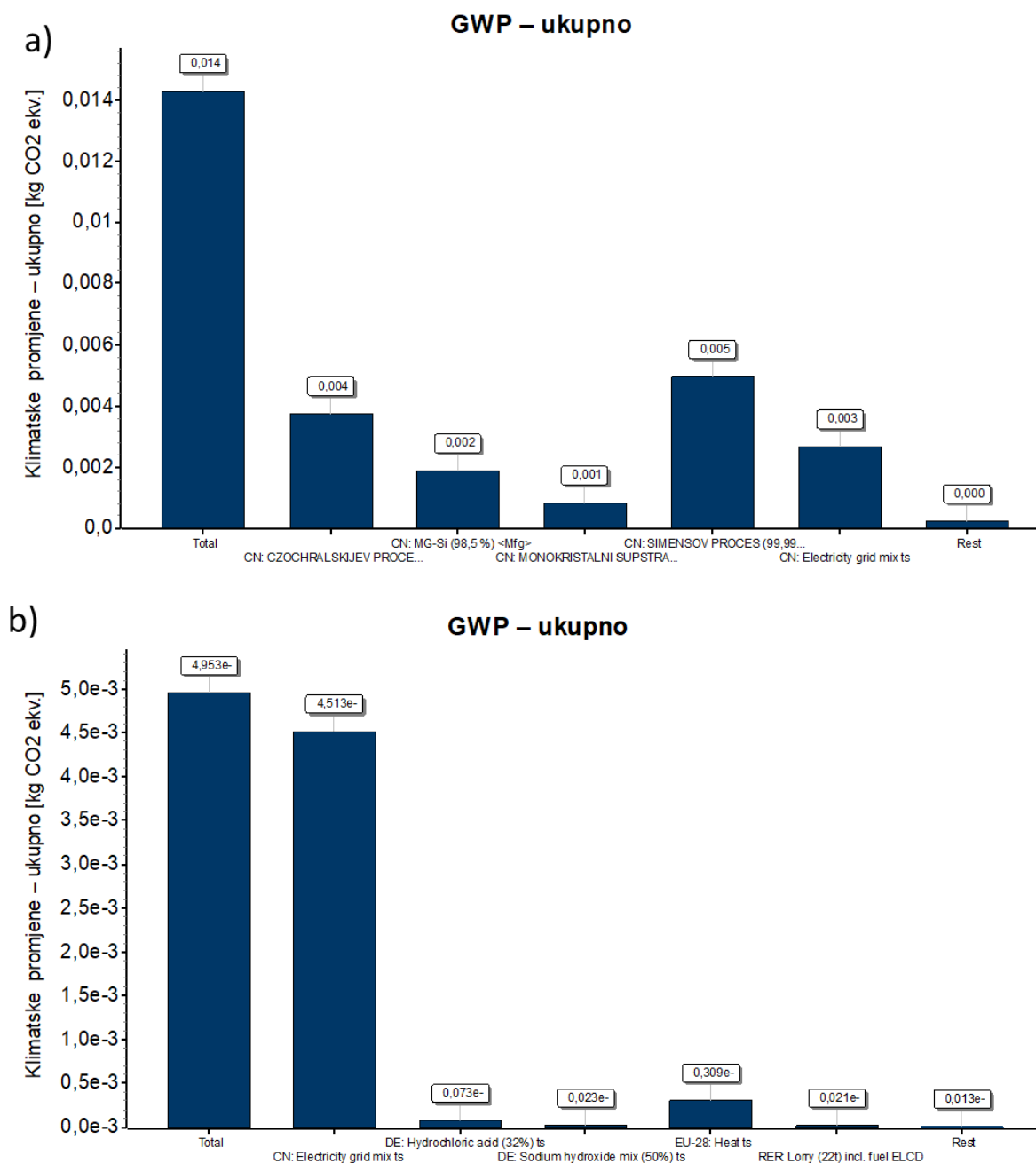


**Slika 31. Osiromašivanje prirodnih resursa (minerali i metali) po 1 kWh neto distribuirane električne energije: a) Proizvodnja fotonaponskog modula, b) Proizvodnja energetskeg kabela FG16OR16 5 × 10 mm<sup>2</sup>**

Prema rezultatima analize, na klimatske promjene najviše utječe proizvodnja FN modula, odnosno proizvodnja monokristalnih silicijskih ćelija od koji je sastavljen. Proizvodnja monokristalnog ingota iz kojeg se FN ćelije izrađuju složen je postupak, koji se sastoji od niza proizvodnih procesa za koje je utjecaj na klimatske promijene prikazan na slici 32. a). Ovaj utjecaj prikazan je preko parametra potencijala globalnog zatopljenja (engl. *Global Warming Potential*, GWP). GWP predstavlja potencijal za klimatsko zagrijavanje nekog stakleničkog

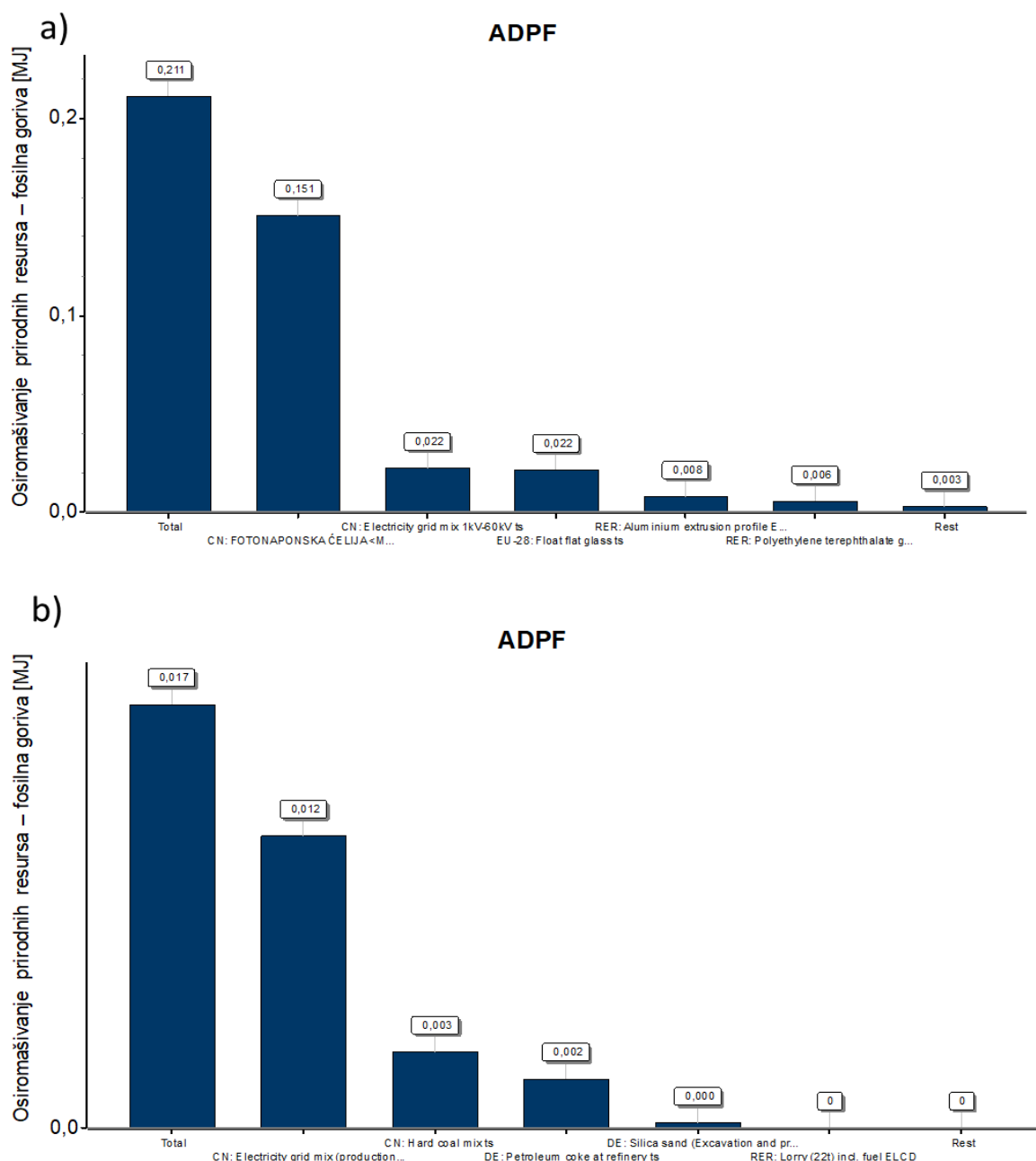


plina u razdoblju od 100 godina u odnosu na potencijal klimatskog zagrijavanja ugljikovog dioksida [135]. U svrhu proizvodnje silicijevog monokristalnog ingota, silicij je potrebno više puta pretaliti, što zahtijeva velike utroške energije. Na slici 32. b) prikazan je utjecaj na klimatske promijene Siemensovog procesa kojim se proizvodi silicij visoke čistoće. Vidljivo je kako je proizvodnja električne energije potrebne za njegovu realizaciju glavni uzročnik emisija stakleničkih plinova.



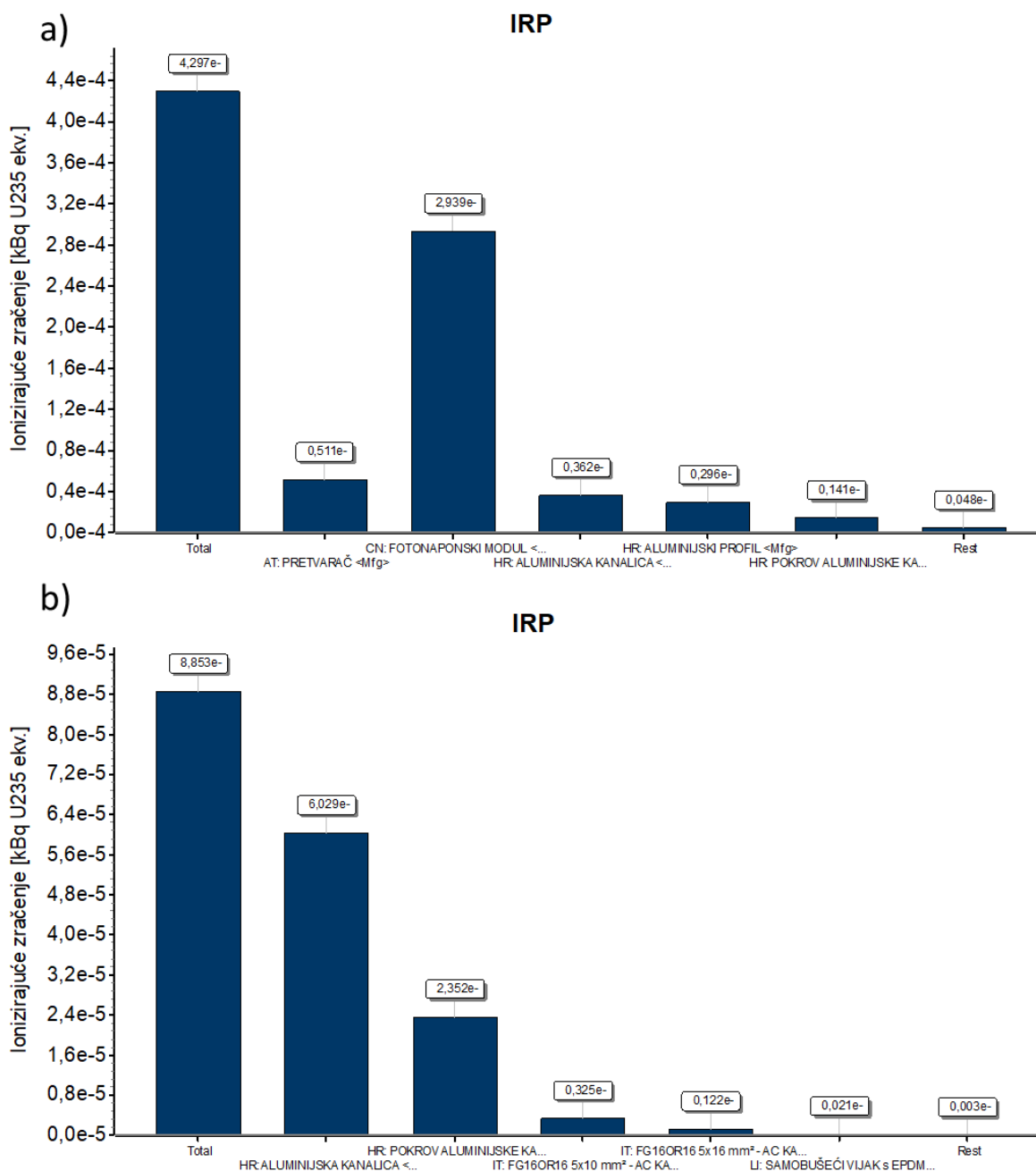
**Slika 32. Klimatske promjene po 1 kWh neto distribuirane električne energije: a) Proizvodnja monokristalne fotonaponske ćelija, b) Proizvodnja silicija Siemensovim procesom (99,9 %)**

Proizvodnja monokristalnih silicijskih ćelija najveći je uzročnik i pri iskorištavanju prirodnih resursa, fosilnih goriva. Na slici 33. a) prikazan je doprinos proizvodnje FN ćelija u odnosu na proizvodnju ostalih komponenti FN modula, dok je na slici 33. b) prikazan doprinos proizvodnje silicija metalurške čistoće. S oba dijagram vidi se da se fosilna goriva sagorijevaju u svrhu proizvodnje električne energije potrebne da bi se procesi mogli provesti.



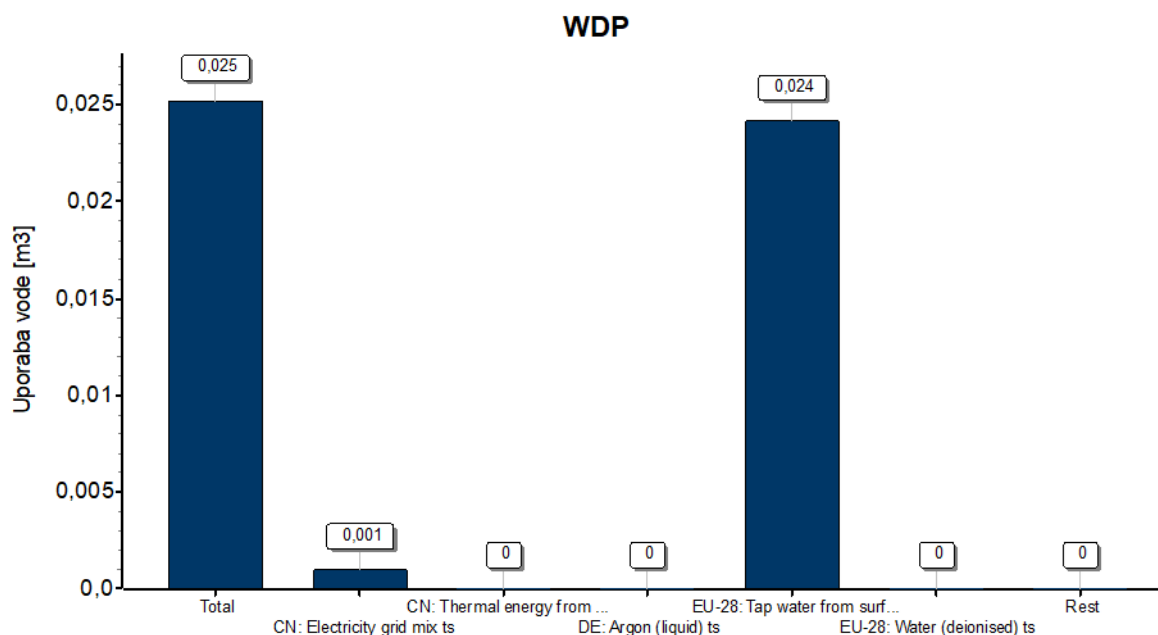
**Slika 33. Osiromašivanje prirodnih resursa (fosilna goriva) po 1 kWh neto distribuirane električne energije: a) Proizvodnja fotonaponskog modula, b) Proizvodnja silicija metalurške čistoće (MG-Si)**

Emisijama ionizirajućeg zračenja veliki doprinos ima proizvodnja različitih komponenta sustava proizvedenih od aluminija kako je i prikazano na slici 34. Ovaj se negativni učinak pripisuje tome što su u boksitnoj rudi od koje se aluminij proizvodi sadržani uključeni radioaktivnih izotopa radija ( $^{225}\text{Ra}$ ), torija ( $^{232}\text{Th}$ ) i kalija ( $^{40}\text{K}$ ) [136].



**Slika 34. Ionizirajuće zračenje po 1 kWh neto distribuirane električne energije: a) Proizvodnja temeljne infrastrukture, b) Proizvodnja nizvodne infrastrukture**

U pogledu uporabe vode, uz ranije spomenuto održavanje FN modula, najveća se količina vode troši pri proizvodnji monokristalnih silicijskih ingota Czochralskijevom metodom, prikaz na slici 35. Ovaj utjecaj pripisuje se potrebi za korištenjem velike količine vode u sustavu vodenog hlađenja silicijskih ingota kako bi se povećala produktivnosti, snizio trošak te zadržala kvaliteta istih [130].



**Slika 35. Upotreba vode po 1 kWh neto distribuirane električne energije: Proizvodnja monokristalnog silicijevog ingota Czochralskijevom metodom**

Prema kategorijama utjecaja emisija čestica, zakiseljavanje, eutrofikacija (slatke vode, mora ili kopna), fotokemijski smog i ekotoksičnost najveći doprinos onečišćenju okoliša ima proizvodnja FN modula, što se pripisuje tome da oni čine preko 80 % ukupne mase popisanog FN sustava.

### 5.5.1. *Limitacije*

LCA analiza provedena u okviru diplomskog rada primjenjiva je za FN sustav kakav se uobičajeno ugrađuje na stambene objekte. Svi podaci o instaliranim komponentama takvoga sustava prikupljeni su od strane instalatera sustava. Potpuni podaci o udjelima različitih vrsta materijala od kojih su pojedine komponente izrađene nije bilo moguće prikupiti te su iste dijelom pretpostavljene na temelju tehničkih crteža, postojećih EPD-a i literature.

Podaci o proizvodnim postupcima svake od potkomponenti preuzeti su iz edukacijske baze podataka softvera GaBi za 2020. godinu te ih se smatra relevantnim. Nadalje, podaci o proizvodnji FN ćelija i FN modula preuzeti su iz izvješća iz 2020. godinu, a koji odgovaraju prosječnim ulaznim i izlaznim vrijednostima proizvodnje modula u Kini. Korišteni podaci iz izvješća koriste se i pri izradi verificiranih EPD-a objavljenih na stranicama Međunarodnog EPD sustava te se stoga zaključuje kako su mjerodavni.

Mase pojedinih komponenta pretvarača preuzete su iz EPD istoga, dok su podaci o ulaznim i izlaznim tokovima proizvodnog postupka preuzeti iz literature o proizvodnji prosječnog pretvarača na području Europe za 2016. godinu. Ovi podaci ne odgovaraju u potpunosti realnom stanju te su jedna od limitacija provedene analize. Podaci o proizvodnji kondenzatora, matične ploče i kompleksnih elektroničkih dijelova od kojih je pretvarač sastavljen nisu uzeti u obzir jer u korištenom softveru GaBi nije bilo relevantnih procesa s kojima bi se mogli povezati.

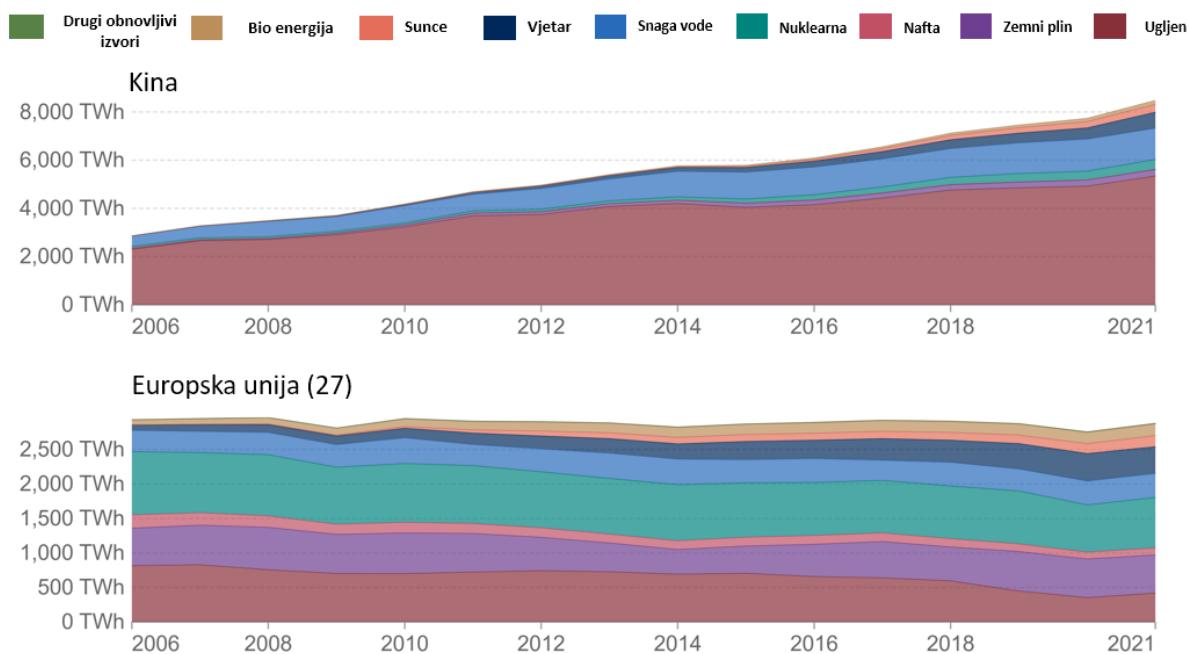
Tijekom provedene analize popisano je ukupno preko 93 % mase komponenti FN sustava. Prema PCR-u za navedeni sustav, zahtjeva se minimalno popisati 99 % ukupne mase kako bi se rezultati analize smatrali mjerodavni. To nije postignuto zbog nedostupnih podataka i ograničenog pristupa bazi podataka u edukacijskoj verziji softvera GaBi, kako je ranije opisano. Unatoč navedenim ograničenjima, važno je napomenuti da je analiza provedena s ciljem upoznavanja autora rada s LCA metodom, te da su rezultati namijenjeni isključivo akademskoj zajednici. Ova analiza pruža temeljno razumijevanje i potiče daljnja istraživanja u području LCA analize FN sustava. Buduće studije u kojima će se koristiti cjelovitiji podaci i preciznije informacije pružat će sveobuhvatniju sliku i točniju procjenu FN sustava na okoliš.

### 5.5.2. Preporuke

Na temelju rezultata analize zaključuje se kako je korištenje bakra pri proizvodnji dijelova FN sustava najkritičnija točka životnog ciklusa. Bakar zbog svoji svojstva provodljivosti električne energije neophodan pri proizvodnji energetskih kabela i drugih vodiča te ga je teško zamijeniti alternativnim materijalima. Preporučuje se upotreba recikliranog bakra koja u sklopu provedene analize nije uzeta u obzir zbog prethodno navedenih razloga.

Prema ostalim utjecajnim kategorijama u pogledu negativnih utjecaja na okoliš kritična je proizvodnja FN monokristalnih ćelija i FN modula, s obzirom na to da se proizvode uz velike utroške električne energije, koja se u Kini pretežito proizvodi u termoelektranama na ugljen, kako je i prikazano na slici 36. gore. Taj proces pretvorbe energije nepovoljan je po okoliš i to posebice u pogledu velikih emisija stakleničkih plinova koji pridonose globalnom zatopljenju. Jedno od rješenja kako bi se smanjio utjecaj na okoliš FN sustava je da se povećaju kapaciteti proizvodnje FN modula u zemljama EU, u kojim se električna energija u sve većoj mjeri proizvodi iz obnovljivih izvora energije, kako je i prikazano na slici 36. dolje.

#### Električna energija prema izvoru



Slika 36. Izvori električne energije: Kina i Europska unija [137]

### **5.5.3. Usporedba utjecaja na okoliš fotonaponskog sustava u odnosu na druge izvore električne energije**

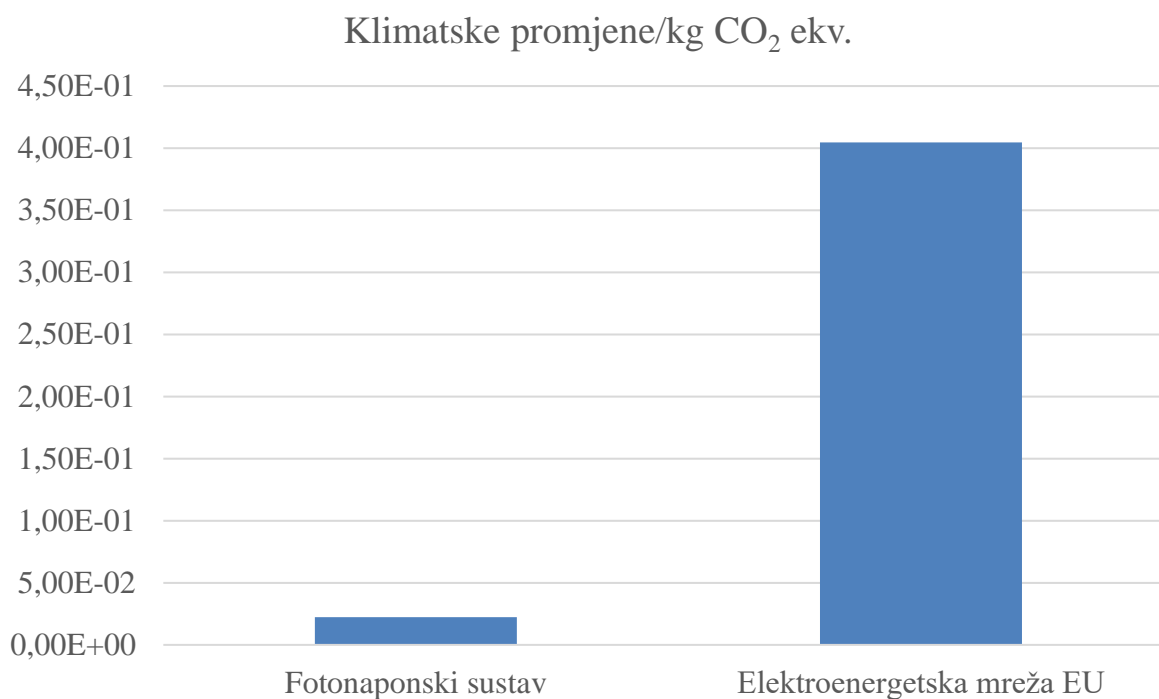
U svrhu ocjenjivanja utjecaja na okoliš fotonaponskog sustava u odnosu na druge izvore energije dobiveni rezultati LCA usporedili su se s rezultatima utjecaja na okoliš elektroenergetskog sektora Europske unije. Elektroenergetski sektor EU u softveru GaBi predstavljen je kroz proces elektroenergetske mreže (EE) EU-28 te uključuje sve ulazne i izlazne tokove različitih sustava za proizvodnju i distribuciju električne energije za 2016. godinu. Dostupni podaci ne odražavaju realno stanje za 2023. godinu, ali kako je transformacija cjelokupnog elektroenergetskog sektora na obnovljive izvore energije dugotrajan proces, smatra se kako nije došlo do drastičnih promjena u istome. U tablici 19. prikazani su izračunati rezultati utjecaja na okoliš životnog ciklusa FN sustava i EE mreže po 1 kWh distribuirane električne energije. Usporedbom procijenjenih rezultata vidljivo je kako FN sustav prema gotovo svim kategorijama utjecaja manje utječe na okoliš u odnosu na EE mrežu EU. Primjerice, za proizvodnju i distribuciju 1 kWh električne energije putem EE mreže EU emitira se 18 puta više stakleničkih plinova u odnosu na FN sustav (0,404 naspram 0,022 kg CO<sub>2</sub> ekv.), što pokazuje kako povećanje kapaciteta fotonaponskih sustava može pozitivno utjecati na borbu protiv klimatskih promjena i postizanje cilja o klimatskoj neutralnosti EU do 2050. godine. Također, instalacija FN sustava izrazito pozitivno utječe na smanjenje (više od 300 puta) ionizirajućeg zračenja uslijed ekstrakcije i prerade nuklearnih goriva potrebnih za rad nuklearnih elektrana, a koje su sastavni dio elektroenergetskog sektora EU. U sklopu Solarne strategije EU predviđa se ubrzana instalacija FN sustava na krovove, čime bi se zadovolji energetski zahtjevi te se smanjila devastacija prirodnih krajolika, kao što je to slučaj prilikom izgradnje hidroelektrana. Uz sve navedene pozitivne učinke po okoliš, rezultati provedene LCA analize utvrdili su kako fotonaponski sustav u odnosu na EE mrežu EU negativno utječe na iskorištavanje prirodnih resursa (minerala i metala) i osiromašivanje ozona. Pri izradi komponenta FN sustava, a kako bi se postigla što veća efikasnost sustava, potrebno je u velikoj mjeri ekstrahirati i preraditi rijetke sirovine, kao što su indij ili galij te strateške metale, kao što je bakar, čija primarna proizvodnja značajno opterećuje okoliš. Također, fotonaponski sustav u odnosu na EE mrežu EU nepovoljan je po okoliš i u pogledu razaranja ozonskog omotača jer se prilikom izrade aluminijskih okvira emitiraju štetni plinovi poput klorofluorouglijaka, halona, brommetana (metil bromid) i slično.

**Tablica 19. Rezultati utjecaja na okoliš životnog vijeka fotonaponskog sustava i elektroenergetske mreže Europske unije (EU-28) po 1 kWh distribuirane električne energije**

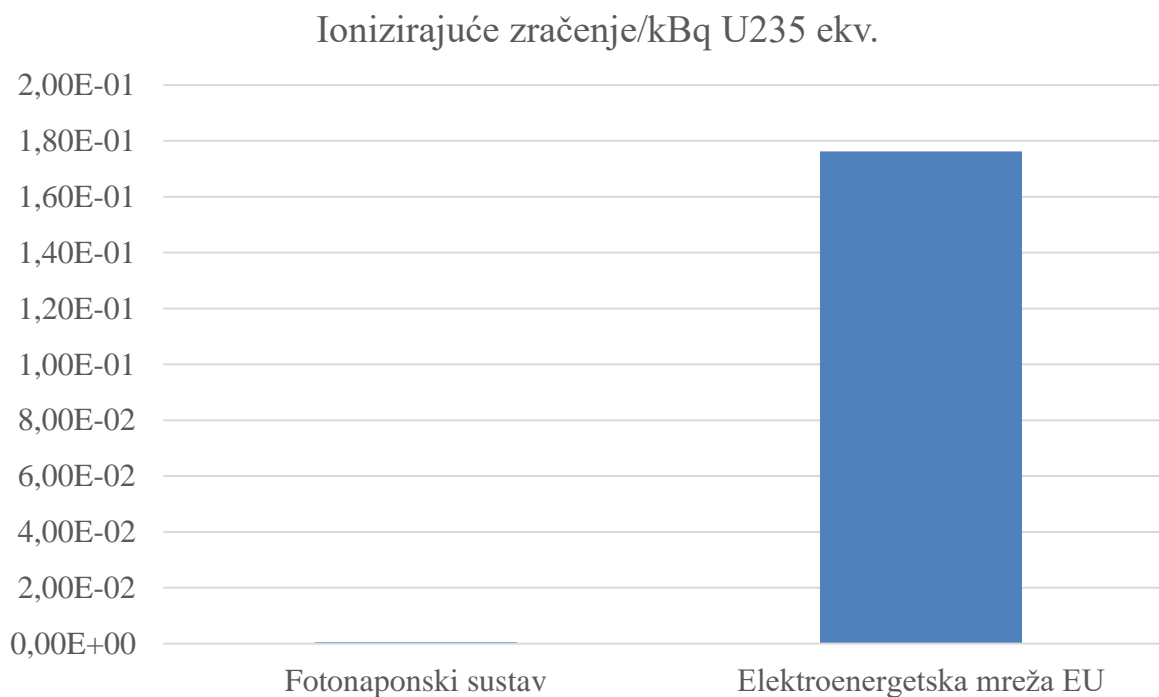
Kategorija utjecaja	Mjerna jedinica	Fotonaponski sustav	Elektroenergetska mreža EU
Emisija čestica	Učestalost bolesti	1,15E-09	7,45E-09
Klimatske promjene	kg CO <sub>2</sub> ekv.	2,24E-02	4,04E-01
Ionizirajuće zračenje	kBq U235 ekv.	5,39E-04	1,76E-01
Eko toksičnost	CTUe	1,10E-01	3,03E+00
Toksičnost za ljude, kancerogeno	CTUh	8,31E-12	8,36E-11
Osiromašivanje ozona	kg CFC-11 ekv.	4,66E-11	8,86E-15
Toksičnost za ljude, nije kancerogeno	CTUh	1,74E-10	3,08E-09
Korištenje zemljišta	Pt	2,67E-02	2,25E+00
Zakiseljavanje	mol H <sup>+</sup> ekv.	9,25E-05	8,89E-04
Eutrofikacija slatke vode	kg P ekv.	2,91E-08	1,08E-06
Eutrofikacija morska voda	kg N ekv.	2,08E-05	1,97E-04
Eutrofikacija kopna	mol N ekv.	2,55E-04	2,07E-03
Fotokemijski smog	kg NMVOC ekv.	6,11E-05	5,41E-04
Osiromašivanje prirodnih resursa (metali i minerali)	kg Sb ekv.	5,30E-07	1,17E-07
Osiromašivanje prirodnih resursa (fosilna goriva)	MJ	2,47E-01	7,08E+00
Upotreba vode	m <sup>3</sup> svjetski ekv.	3,52E-02	8,77E-02

U nastavku su dani dijagrami na kojima su prikazani utjecaji na okoliš životnog vijeka fotonaponskog sustava i elektroenergetske mreže EU-28 prema kategorijama utjecaja: klimatske promjene, ionizirajuće zračenje, korištenje zemljišta, osiromašivanje prirodnih resursa (minerali i metali) i osiromašivanje ozona.

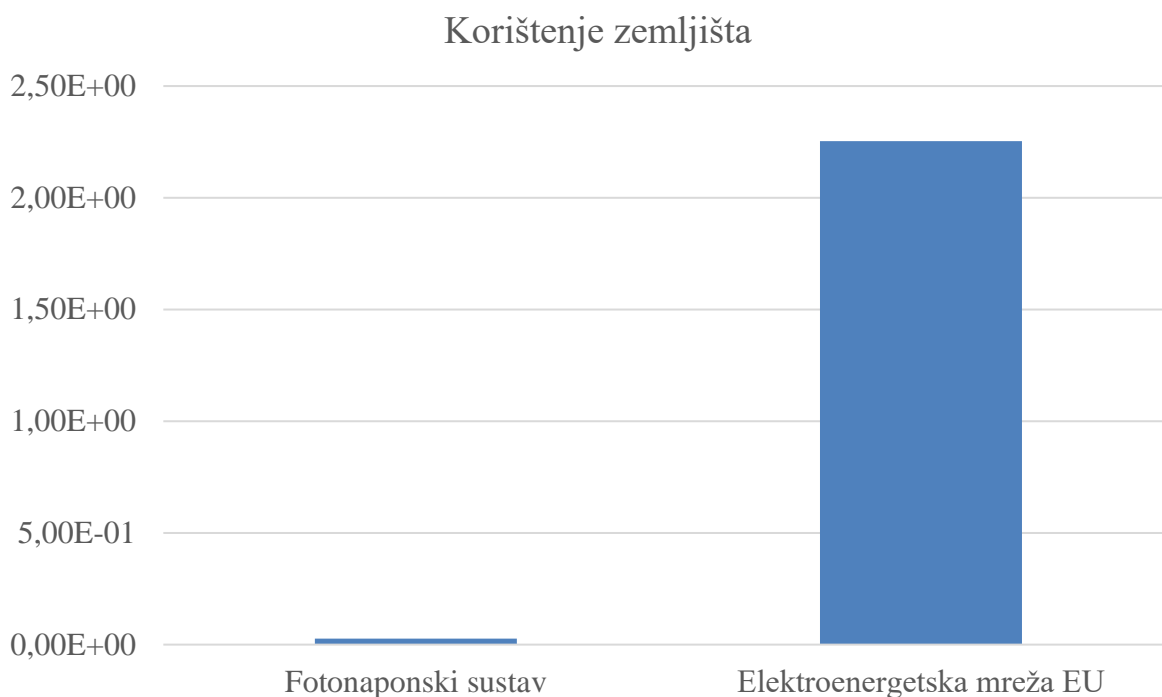




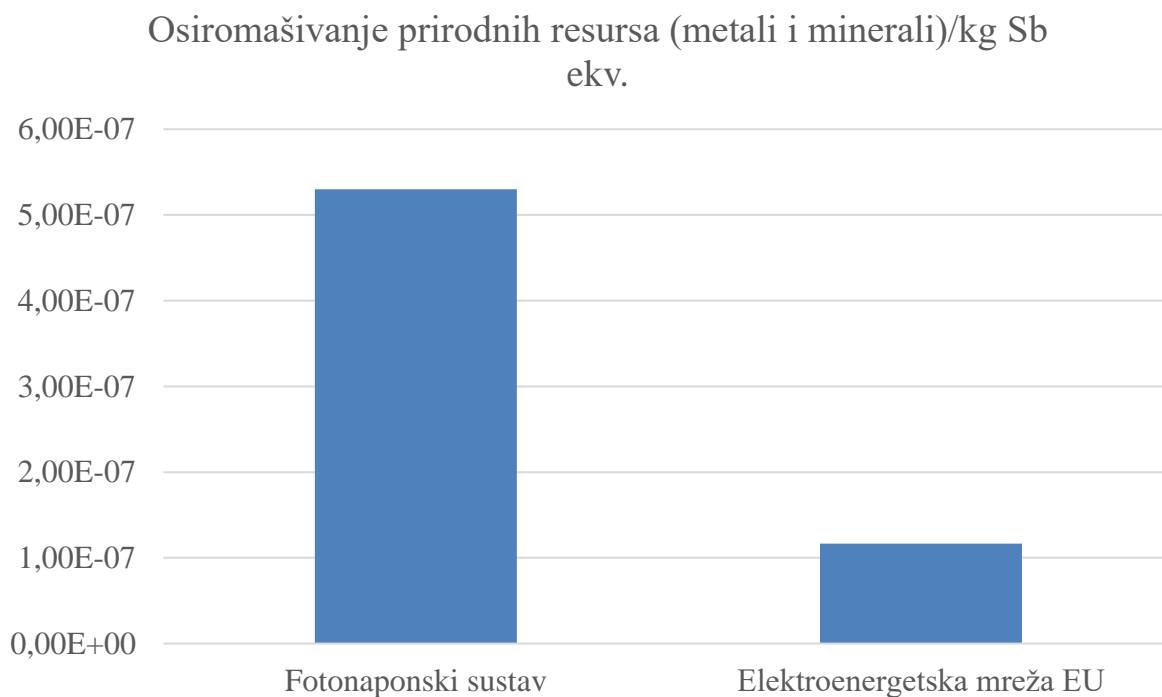
**Slika 37.** Utjecaj na klimatske promjene po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije



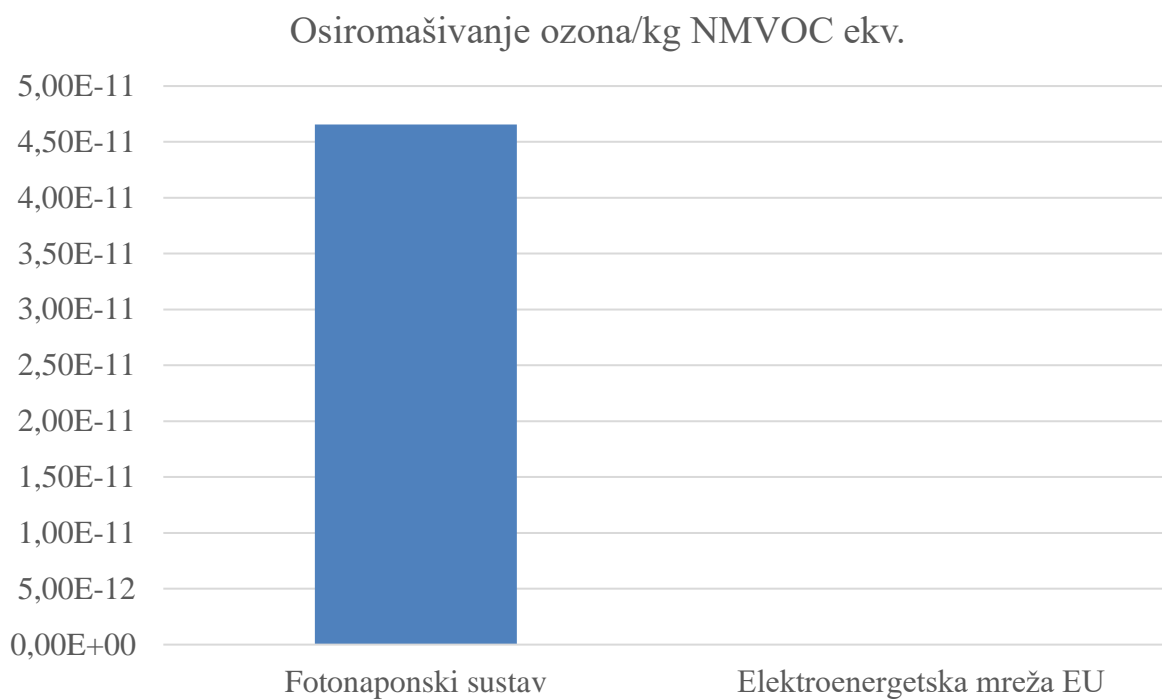
**Slika 38.** Utjecaj na ionizirajuće zračenje po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije



**Slika 39.** Utjecaj na korištenje zemljišta po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije



**Slika 40.** Utjecaj na osiromašivanje prirodnih resursa po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije



**Slika 41.** Utjecaj na osiromašivanje ozona po 1 kWh distribuirane električne energije za fotonaponski sustav i elektroenergetsku mrežu Europske unije

## 6. ZAKLJUČAK

U ovome radu provedena je procjena utjecaja na okoliš fotonaponskog sustava instaliranog na površinu od 50 m<sup>2</sup> krovišta stambenog objekta u Zagrebu predviđene vršne snage sustava od 9,72 kWp standardizirane fotonaponske snage. Procjena utjecaja na okoliš provedena je kroz sve faze životnog ciklusa ovog fotonaponskog sustava. Kroz detaljnu analizu različitih životnih faza, uključujući proizvodnju pojedinih komponenata, transport, eksploataciju i konačnu uporabu, dobiveni su uvidi o utjecaju fotonaponskog sustava na okoliš. Provedena analiza je pokazala kako fotonaponski sustav u manjoj mjeri utječe na okoliš od tradicionalnih izvora energije te da ima značajne prednosti u pogledu smanjenja emisija stakleničkih plinova. Pozitivan utjecaj na okoliš fotonaponskog sustava očituje se tijekom njegova rada jer nema emisija stakleničkih plinova koji pridonose klimatskim promjenama, kako je slučaj kod elektrana na neobnovljive izvore energije.

Negativni učinci fotonaponskog sustava po okoliš su i potreba za upotrebom kritičnih sirovina, kao što su metalni silicij, kadmij, indij, galij, selenij, telurij i drugi. Potrebne su i značajne količine primarnog bakra, dobivenog ekstrakcijom iz ruda uz moguće posljedice na okoliš. Rezerve bakra ne zadovoljavaju uvjete za kritičnost sirovina, no bakar je također uvršten na popis kritičnih sirovina kao strateška sirovina. Povećanje stope recikliranja bakra smanjilo bi rizike povezane s dostupnošću ove sirovine.

Također, fotonaponske ćelije je teško oporabiti te predstavljaju opasnost za okoliš prilikom njihova odlaganja. U konačnici prednosti fotonaponskih sustava značajnije su od nedostataka. Pretvorba sunčeve svjetlosti u električnu energiju postupkom bez emisija štetnih plinova nužna je kako bi se obuzdalo globalno zatopljenje i onečišćenje na dobrobit cijelog društva. Postavljanje fotonaponskih sustava je i isplativa investicija, pogotovo kako bi se podjedinici zaštitili od oscilacija cijena energenata na tržištu. Tehnologije fotonaponskih sustava i fotonaponskih modula još su u fazi razvoja te se očekuje kako će se daljnjim napredcima smanjiti utjecaji na okoliš uz povećanje efikasnosti sustava.

## LITERATURA

- [1] Quotations From Roger Revelle [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-24). Dostupno na: [https://library.ucsd.edu/scilib/biogr/day\\_quotations-from-roger-revelle.pdf](https://library.ucsd.edu/scilib/biogr/day_quotations-from-roger-revelle.pdf)
- [2] Here's how CO2 emissions have changed since 1900 \_ World Economic Forum [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-20). Dostupno na: <https://www.weforum.org/agenda/2022/11/visualizing-changes-carbon-dioxide-emissions-since-1900/>
- [3] REPowerEU\_ New industrial Alliance [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_22\\_7617](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_7617)
- [4] Solar PV manufacturing capacity by country and region, 2021 – Charts – Data & Statistics - IEA [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-29). Dostupno na: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-manufacturing-capacity-by-country-and-region-2021>
- [5] Callendar GS. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. travanj 1938.;64(275):223–40. doi: 10.1002/qj.49706427503
- [6] From Stockholm to Kyoto\_ A Brief History of Climate Change \_ United Nations [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-01). Dostupno na: <https://www.un.org/en/chronicle/article/stockholm-kyoto-brief-history-climate-change>
- [7] Harris DC. Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO2. Anal Chem. 01. listopad 2010.;82(19):7865–70. doi: 10.1021/ac1001492
- [8] Manabe S, Wetherald RT. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. J Atmos Sci. svibanj 1967.;24(3):241–59. doi: 10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2
- [9] United Nations Conference on the Human Environment, Stockholm 1972 \_ United Nations [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-01). Dostupno na: <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>
- [10] What is the United Nations Framework Convention on Climate Change\_\_ UNFCCC [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-10). Dostupno na: <https://unfccc.int/process-and-meetings/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change>
- [11] The Paris Agreement \_ UNFCCC [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-10). Dostupno na: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

- [12] 2020 climate & energy package [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-28). Dostupno na: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2020-climate-energy-package\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2020-climate-energy-package_en)
- [13] 2030 climate & energy framework [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-16). Dostupno na: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_en)
- [14] The European Parliament declares climate emergency \_ News \_ European Parliament.
- [15] Europska komisija. Komunikacija komisije. Europski zeleni plan. Bruxelles; 2019.
- [16] Uredba (EU) 2021/1119 Europskog Parlamenta i Vijeća o uspostavi okvira za postizanje klimatske neutralnosti. Službeni list Europske unije . 09. srpanj 2021.;L 253/1.
- [17] Što je ugljična neutralnost i kako je postići do 2050. \_\_ Vijesti \_ Europski parlament [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-23). Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20190926STO62270/sto-je-ugljicna-neutralnost-i-kako-je-postici-do-2050>
- [18] Europski propis o klimi\_ Vijeće i Parlament postigli privremeni dogovor - Consilium [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: <https://www.consilium.europa.eu/hr/press/press-releases/2021/05/05/european-climate-law-council-and-parliament-reach-provisional-agreement/>
- [19] Uredba (EU) 2018/1999 Europskog Parlamenta i Vijeća o upravljanju energetsom unijom i djelovanjem u području klime. Službeni list Europske unije . 21. prosinac 2018.;L 328/1.
- [20] Spremni za 55 %: ostvarivanje klimatskog cilja EU-a za 2030. na putu ka klimatskoj neutralnosti. Bruxelles: Europska komisija; 2021.
- [21] Fit for 55 - The EU's plan for a green transition - Consilium [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-10). Dostupno na: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- [22] EU Emissions Trading System (EU ETS) [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-10). Dostupno na: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en)
- [23] Market Stability Reserve [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-10). Dostupno na: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/market-stability-reserve\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/market-stability-reserve_en)

- [24] Direktiva (EU) 2018/2001 Europskog parlamenta i Vijeća o promicanju uporabe energije iz obnovljivih izvora. Službeni list Europske unije . 21. prosinac 2018.;L 328/82.
- [25] Zakon o energiji - Zakon.hr [Internet]. Narodne novine . (pristupljeno: 2023-06-24). Dostupno na: <https://www.zakon.hr/z/368/Zakon-o-energiji>
- [26] Renewable energy statistics - Statistics Explained [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-20). Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable\\_energy\\_statistics#Share\\_of\\_renewable\\_energy\\_more\\_than\\_doubled\\_between\\_2004\\_and\\_2021](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics#Share_of_renewable_energy_more_than_doubled_between_2004_and_2021)
- [27] Accelerate the rollout of renewable energy [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-20). Dostupno na: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_23\\_2061](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_2061)
- [28] Fit for 55 Council agrees on higher targets for renewables and energy efficiency - Consilium [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/06/27/fit-for-55-council-agrees-on-higher-targets-for-renewables-and-energy-efficiency/>
- [29] Energetska učinkovitost \_ Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-24). Dostupno na: <https://www.fzoeu.hr/hr/energetska-ucinkovitost/1343>
- [30] Direktiva 2012/27/EU Europskog Parlamenta i Vijeća o energetske učinkovitost. Službeni list Europske Unije. 14. studeni 2012.;L 315/1.
- [31] Direktiva (EU) 2018/2002 Europskog Parlamenta i Vijeća o izmjeni Direktive 2012/27/EU o energetske učinkovitosti. Službeni list Europske unije. 21. prosinac 2018.;
- [32] Glossary\_Final energy consumption - Statistics Explained [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-25). Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Final\\_energy\\_consumption](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Final_energy_consumption)
- [33] Glossary\_Primary energy consumption - Statistics Explained [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-25). Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Primary\\_energy\\_consumption](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Primary_energy_consumption)
- [34] Energy efficiency statistics - Statistics Explained [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_efficiency\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_efficiency_statistics)

- [35] Prijedlog Direktive Europskog Parlamenta i Vijeća o energetske učinkovitosti (preinaka). Bruxelles: Europska komisija; 2021.
- [36] Energetska učinkovitost \_ Informativni članci o Europskoj uniji \_ Europski parlament [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-23). Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hr/sheet/69/energetska-ucinkovitost>
- [37] „Spremni za 55 %” \_ Vijeće postiglo dogovor o strožim pravilima za energetska svojstva zgrada - Consilium [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: <https://www.consilium.europa.eu/hr/press/press-releases/2022/10/25/fit-for-55-council-agrees-on-strict-rules-for-energy-performance-of-buildings/>
- [38] Val obnove \_ stvaranje zelenih zgrada za budućnost - Consilium [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: <https://www.consilium.europa.eu/hr/infographics/renovation-wave/>
- [39] Plan REPowerEU. Bruxelles: Europska Komisija; 2022.
- [40] EU Energy Platform [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-26). Dostupno na: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/eu-energy-platform\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/eu-energy-platform_en)
- [41] REPowerEU [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-26). Dostupno na: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_22\\_3131](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131)
- [42] REPowerEU with Clean Energy [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/872548/FS\\_CleanEnergy.pdf.pdf](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/872548/FS_CleanEnergy.pdf.pdf)
- [43] REPowerEU \_ povoljna, sigurna i održiva energija za Europu [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe\\_hr](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_hr)
- [44] Strategija EU-a za solarnu energiju. Bruxelles: Europska komisija; 2022.
- [45] Jäger-Waldau A, Kakoulaki G, Taylor NG, Szabó S. The Role of the European Green Deal for the Photovoltaic Market Growth in the EU. U: 2022 IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC). IEEE;
- [46] Sigurna i održiva opskrba kritičnim sirovinama kao potpora usporednoj tranziciji. Bruxelles: Europska Komisija; 2023.
- [47] Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report.



- [48] Building a more efficient solar cell \_ Research and Innovation [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-25). Dostupno na: <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/projects/success-stories/all/building-more-efficient-solar-cell>
- [49] Global installed PV capacity passes 1.18TW - study [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-21). Dostupno na: <https://www.pv-tech.org/global-installed-pv-capacity-passes-1-18tw-ia/>
- [50] Solar (photovoltaic) panel prices [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-18). Dostupno na: <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices>
- [51] Fraas LM. Low-Cost Solar Electric Power. Cham: Springer International Publishing; 2014. doi: 10.1007/978-3-319-07530-3
- [52] Shubbak MH. Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends. Renewable and Sustainable Energy Reviews. studeni 2019.;115:109383. doi: 10.1016/j.rser.2019.109383
- [53] Pohl UW. Doping, Diffusion, and Contacts. U 2013. str. 225–73. doi: 10.1007/978-3-642-32970-8\_6
- [54] Doping method of monocrystalline silicon for photovoltaics. CN101906659A. 2010.
- [55] Semiconductor material...Silicon \_ Semiconductor \_ Shindengen Electric mfg.co.,ltd [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-18). Dostupno na: [https://www.shindengen.com/products/semi/column/basic/semi/semi\\_basic.html](https://www.shindengen.com/products/semi/column/basic/semi/semi_basic.html)
- [56] Gray JL. The Physics of the Solar Cell. U: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2011. str. 82–129. doi: 10.1002/9780470974704.ch3
- [57] Photovoltaics and electricity - U.S. Energy Information Administration (EIA) [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-19). Dostupno na: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>
- [58] Ranjan S, Balaji S, Panella RA, Ydstie BE. Silicon solar cell production. Comput Chem Eng. kolovoz 2011.;35(8):1439–53. doi: 10.1016/j.compchemeng.2011.04.017
- [59] Friedrich J. Methods for Bulk Growth of Inorganic Crystals: Crystal Growth. U: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier; 2016. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.01010-9
- [60] Saga T. Advances in crystalline silicon solar cell technology for industrial mass production. NPG Asia Mater. 22. srpanj 2010.;2(3):96–102. doi: 10.1038/asiamat.2010.82

- [61] Maximum Power Point\_ Laufende Berechnung beim MPP-Tracking [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-20). Dostupno na: <https://photovoltaik.org/photovoltaikanlagen/solarzellen/maximum-power-point>
- [62] Fill Factor \_ PVEducation [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>
- [63] Solar Cell Efficiency | PVEducation [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-efficiency>
- [64] Schrack Technik\_ Osnove o fotonaponskoj ćeliji i fotonaponskom modulu [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-15). Dostupno na: <https://www.schrack.hr/know-how/fotonapon-pohrana-energije/osnove-o-fn-celiji-i-modulu>
- [65] Roche D, Outhred H, Kaye RJ. Analysis and control of mismatch power loss in photovoltaic arrays. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 1995.;3(2):115–27. doi: 10.1002/pip.4670030204
- [66] Jafari M, Malekjamshidi Z. A review of energy management methods for residential renewable energy systems. U: *Design, Analysis, and Applications of Renewable Energy Systems*. Elsevier; 2021. str. 437–60. doi: 10.1016/B978-0-12-824555-2.00024-1
- [67] Solar Panel Manufacturing - AESOLAR [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-15). Dostupno na: <https://ae-solar.com/solar-panel-manufacturing/>
- [68] Alaaeddin MH, Sapuan SM, Zuhri MYM, Zainudin ES, M. AL-Oqla F. Development of Photovoltaic Module with Fabricated and Evaluated Novel Backsheet-Based Biocomposite Materials. *Materials*. 17. rujan 2019.;12(18):3007. doi: 10.3390/ma12183007
- [69] Arabach JR. Development of a c-Si Photovoltaic Module for Desert Climates [doktorski rad]. [Antofagasta]: University of Antofagasta; 2019.
- [70] Benda V, Černá L. PV cells and modules – State of the art, limits and trends. *Heliyon*. prosinac 2020.;6(12):e05666. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05666
- [71] Gagrica O, Nguyen PH, Kling WL, Uhl T. Microinverter Curtailment Strategy for Increasing Photovoltaic Penetration in Low-Voltage Networks. *IEEE Trans Sustain Energy*. travanj 2015.;6(2):369–79. doi: 10.1109/TSTE.2014.2379918

- [72] Centralized inverter detailed introduction - string inverter vs centralized inverter The Best lithium ion battery suppliers \_ lithium ion battery Manufacturers - Tycorun Energy. (pristupljeno: 2023-06-26); Dostupno na: <https://www.takomabattery.com/centralized-inverter/>
- [73] Bhatia SC. Solar photovoltaic systems. U: *Advanced Renewable Energy Systems*. Elsevier; 2014. str. 144–57. doi: 10.1016/B978-1-78242-269-3.50005-X
- [74] Compared\_ Grid-Tied, Off-Grid, and Hybrid Solar Systems [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-22). Dostupno na: <https://www.solarreviews.com/blog/grid-tied-off-grid-and-hybrid-solar-systems>
- [75] Rabbani M. Solar power systems and dc to ac inverters. *Acta technica corviniensis - Bulletin of Engineering*. travanj 2020.;3:19–28.
- [76] Muralikrishna I V., Manickam V. Life Cycle Assessment. U: *Environmental Management*. Elsevier; 2017. str. 57–75. doi: 10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1
- [77] Bjørn A, Owsianiak M, Molin C, Hauschild MZ. LCA History. U: *Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing; 2018. str. 17–30. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3\_3
- [78] Freidberg S. From behind the curtain: talking about values in LCA. *Int J Life Cycle Assess*. 01. srpanj 2018.;23(7):1410–4. doi: 10.1007/s11367-015-0879-6
- [79] Pryshlakivsky J, Searcy C. Fifteen years of ISO 14040: a review. *J Clean Prod*. listopad 2013.;57:115–23. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.05.038
- [80] HRN EN ISO 14044:2008/A2:2020. Upravljanje okolišem -- Procjena životnog ciklusa (LCA) -- Zahtjevi i smjernice (ISO 14044:2006/Amd 2:2020; EN ISO 14044:2006/A2:2020). Hrvatski zavod za norme;
- [81] HRN EN ISO 14040:2008/A1:2020. Upravljanje okolišem -- Procjena životnog ciklusa (LCA) -- Načela i okvir rada (ISO 14040:2006/Amd 1:2020; EN ISO 14040:2006/A1:2020). Hrvatski zavod za norme;
- [82] PCR 2007:08 Electricity, steam and hot/cold water generation and distribution [Internet]. (pristupljeno: 2023-04-20). Dostupno na: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/cbaa4849-ebea-41e7-3f0b-08d91f78ae38/Data>
- [83] Bjørn A, Moltesen A, Laurent A, Owsianiak M, Corona A, Birkved M, i ostali. Life Cycle Inventory Analysis. U: *Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing; 2018. str. 117–65. doi: 10.1007/978-3-319-56475-3\_9

- [84] Schaubroeck T, Schaubroeck S, Heijungs R, Zamagni A, Brandão M, Benetto E. Attributional & Consequential Life Cycle Assessment: Definitions, Conceptual Characteristics and Modelling Restrictions. *Sustainability*. 01. srpanj 2021.;13(13):7386. doi: 10.3390/su13137386
- [85] Hauschild MZ, Huijbregts MAJ. Introducing Life Cycle Impact Assessment. U 2015. str. 1–16. doi: 10.1007/978-94-017-9744-3\_1
- [86] Wang Z, Liu F. Environmental assessment tools. U: *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Elsevier; 2021. str. 435–48. doi: 10.1016/B978-0-12-816673-4.00002-X
- [87] Kayo C, Tojo S, Iwaoka M, Matsumoto T. Evaluation of Biomass Production and Utilization Systems. U: *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems*. Elsevier; 2014. str. 309–46. doi: 10.1016/B978-0-12-404609-2.00014-3
- [88] Torabi F, Ahmadi P. Battery technologies. U: *Simulation of Battery Systems*. Elsevier; 2020. str. 1–54. doi: 10.1016/B978-0-12-816212-5.00005-2
- [89] EPD Umweltproduktdeklaration - Fraunhofer IBP [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-25). Dostupno na: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/ganzheitliche-bilanzierung/methoden-ganzheitliche-bilanzierung/epd-umweltproduktdeklaration.html>
- [90] The PCR \_ EPD International [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-25). Dostupno na: <https://www.environdec.com/product-category-rules-pcr/the-pcr>
- [91] Electricity and heat statistics - Statistics Explained [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-25). Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_and\\_heat\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_and_heat_statistics)
- [92] Carbon intensity of electricity, 2000 to 2021 [Internet]. (pristupljeno: 2023-07-25). Dostupno na: [https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart&facet=none&country=~OWID\\_EU27](https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart&facet=none&country=~OWID_EU27)
- [93] Eugeos' 15804\_A2-IA Database: Method [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-05). Dostupno na: <https://nexus.openlca.org/ws/files/19560>
- [94] EN 15804 reference package [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-06). Dostupno na: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/EN15804.xhtml>
- [95] 11BB\_144CELL PV Solar Module \_ 3D CAD Model Library \_ GrabCAD [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-20). Dostupno na: <https://grabcad.com/library/11bb-144cell-pv-solar-module-1>
- [96] YLM-J 144 CELL (M10) [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-15). Dostupno na: <https://file.yinglisolar.com/yingli/2022/11/24/1669273226298.pdf>

- [97] Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems . 2020 pros.
- [98] Overview of materials for Ethylene Vinyl Acetate Copolymer (EVA), Film Grade [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-01). Dostupno na: [https://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=f34f846b98f1466780dfb3c0e5c0ca82&n=1](https://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=f34f846b98f1466780dfb3c0e5c0ca82&n=1)
- [99] Pfreundt A, Beinert AJ, Yucebas D, Mesquita LV, Pitta-Bauermann L, Romer P. Post-Processing Thickness Variation Of Pv Module Materials And Its Impact On Temperature, Mechanical Stress And Power. Marseille; 2019 ruj.
- [100] How To Choose And Use Solar Panel Junction Box [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-04). Dostupno na: <https://www.linkedin.com/pulse/how-choose-use-solar-panel-junction-box-solar-panel-products>
- [101] Ensinger NORYL® Polyphenylene oxide (PPO) [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-03). Dostupno na: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=cffb99cec96c4359bcd7e20f082134fc>
- [102] Polyvinylidene fluoride \_ Designerdata [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-05). Dostupno na: <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-plastics/polyvinylidene-fluoride>
- [103] Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-04). Dostupno na: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdff6f41dd98f8eec3599eaa20>
- [104] KPK Double-sided Fluorocarbon Series - KPK-3501 [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na: <http://www.jolywood.cn/upload/202002/17/202002171011123545.pdf>
- [105] Naqvi SZ, Ramkumar J, Kar KK. Fly ash/glass fiber/carbon fiber-reinforced thermoset composites. U: Handbook of Fly Ash. Elsevier; 2022. str. 373–400. doi: 10.1016/B978-0-12-817686-3.00023-2
- [106] Aluminum, Al [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?bassnum=AMEAL00&ckck=1>

- [107] Solar Glass & Mirrors, Photovoltaics \_ Solar Energy [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na:  
[http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/solar\\_glass.php](http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/solar_glass.php)
- [108] Solar PV manufacturing capacity by country and region, 2021 – Charts – Data & Statistics - IEA [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-29). Dostupno na:  
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-manufacturing-capacity-by-country-and-region-2021>
- [109] Copper, Cu; Cold-Worked [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-01). Dostupno na:  
<https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ca486cc7cefa44d98ee67d2f5eb7d21f>
- [110] MC4 connectors - Male and Female \_ 3D CAD Model Library \_ GrabCAD [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-21). Dostupno na: <https://grabcad.com/library/mc4-connectors-male-and-female-1>
- [111] Metal pin for photovoltaic 4-6mm2 male MC4 connector @ Morek [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-03). Dostupno na: <https://morek.eu/en/a/metal-pin-for-photovoltaic-2-5-6mm2-male-connector>
- [112] Metal pin for photovoltaic 4-6mm2 female MC4 connector @ Morek [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-03). Dostupno na: <https://morek.eu/en/a/metal-pin-for-photovoltaic-2-5-6mm2-female-connector>
- [113] H1Z2Z2-K Photovoltaic Solar Cable [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-01). Dostupno na: [https://www.ttcables.com/wp-content/uploads/2022/05/TDS\\_H1Z2Z2-K.pdf](https://www.ttcables.com/wp-content/uploads/2022/05/TDS_H1Z2Z2-K.pdf)
- [114] NPE SUN H1Z2Z2-K cable for photovoltaic systems [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-05). Dostupno na: <https://www.latrivenetacavi.com/fr/filehandler.axd?id=509>
- [115] Irradiation Cross-linked Halogen-free Flame Retardant Polyolefin VW-1 [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-05). Dostupno na:  
<https://www.polyrocks.net/xlpe/ep8400x105vwb-irradiation-cross-linked.html>
- [116] EPAL Euro Pallet [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-02). Dostupno na:  
<https://www.epal-pallets.org/eu-en/load-carriers/epal-euro-pallet>
- [117] Cardboard - Cargo Handbook - the world's largest cargo transport guidelines [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-07). Dostupno na: <https://www.cargohandbook.com/Cardboard>
- [118] Google karte [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-26). Dostupno na:  
<https://www.google.com/maps/>

- [119] Sea-Distances.Org - Distances [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-26). Dostupno na: <https://sea-distances.org/>
- [120] Find Distance between Cities - Train on Rails [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-27). Dostupno na: <https://trainonrails.com/distance-between-different-cities>
- [121] Fronius GEN24 Plus – A Benefit for the Environment [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-15). Dostupno na: [https://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Whitepaper/SE\\_WP\\_LCA\\_GEN24\\_Plus\\_EN.pdf](https://www.fronius.com/~/downloads/Solar%20Energy/Whitepaper/SE_WP_LCA_GEN24_Plus_EN.pdf)
- [122] Fronius Symo GEN24 10.0 Plus [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-20). Dostupno na: <https://www.fronius.com/en-au/australia/solar-energy/installers-partners/technical-data/all-products/inverters/fronius-symo-gen24-plus/fronius-symo-gen24-10-0-plus>
- [123] Laura Tschümperlin, Philippe Stolz, Rolf Frischknecht. Life cycle assessment of low power solar inverters (2.5 to 20 kW) [Internet]. Uster; 2016 lis (pristupljeno: 2023-05-10). Dostupno na: [https://treeze.ch/fileadmin/user\\_upload/downloads/Publications/Case\\_Studies/Energy/174-Update\\_Inverter\\_IEA\\_PVPS\\_v1.1.pdf](https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Energy/174-Update_Inverter_IEA_PVPS_v1.1.pdf)
- [124] Tim Kabel - FG16OR16 [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na: <http://www.tim-kabel.hr/content/view/459/449/lang,hrvatski/>
- [125] H07V-K, PVC-om izolirani vodič-finožični [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na: [http://www.tim-kabel.hr/images/stories/katalog/datasheetHRV/0104\\_H07V-K.pdf](http://www.tim-kabel.hr/images/stories/katalog/datasheetHRV/0104_H07V-K.pdf)
- [126] End Clamp \_ 3D CAD Model Library \_ GrabCAD [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-20). Dostupno na: <https://grabcad.com/library/end-clamp-2>
- [127] Drawing for Solar panel mid clamps [Internet]. (pristupljeno: 2023-04-25). Dostupno na: <https://www.solarpartscomponents.com/solar-panel-mid-clamps-size-profile-drawing>
- [128] Hexagon Washer Head Self Drilling Screws 6,3 x 19 mm Stainless steel C1 (AISI 410) GOEBEL Silver GL - EPDM Disc DIN7504 K \_ goebel-shop.com [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na: <https://www.goebel-shop.com/en/hexagon-washer-head-self-drilling-screws-6-3-x-19-mm-stainless-steel-c1-aisi-410-goebel-silver-gl-epdm-disc-din7504-k/a-487>
- [129] Weight & Count Chart of Popular Fasteners \_ ITA Fasteners [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na: <https://itafasteners.com/weight-chart.php>

- [130] 80NLRI\_791,,M8 Ribbed Lock Washer BIN791,Jugenheimer Industrial Supplies, Inc. [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na:  
<https://www.jugenheimersupplies.com/itemdetail/?itemCode=80NLRI%2F791>
- [131] Spring Washer D8.1\_14.8x2mm St Glv – B K Services [Internet]. (pristupljeno: 2023-05-25). Dostupno na: <https://bkservicesonline.co.uk/products/037-81-908>
- [132] Jolywood N-type Bifacial Double Glass Photovoltaic Modules [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-20). Dostupno na:  
<https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/73dabc56-9dcb-4526-a2fe-08db196e9a1c/Data>
- [133] Water Use Management \_ SEIA [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-20). Dostupno na:  
<https://www.seia.org/initiatives/water-use-management>
- [134] Sala S, Crenna E, Secch M, Pant M. Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment. Luxembourg; 2017.
- [135] Uredba (EU) br. 517/2014 Europskog Parlamenta i Vijeća o fluoriranim stakleničkim plinovima i stavljanju izvan snage Uredbe (EZ) br. 842/2006 . Službeni list Europske unije. 20. svibanj 2014.;L 150/195.
- [136] Altıkulaç A. Investigation of Radiological and Chemical Contents of Bauxite Ore Extracted in Turkey. ACS Omega. 08. studeni 2022.;7(44):39917–23. doi: 10.1021/acsomega.2c04203
- [137] Electricity production by source [Internet]. (pristupljeno: 2023-06-20). Dostupno na:  
[https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked?time=2006..2021&country=CHN~OWID\\_EU27](https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked?time=2006..2021&country=CHN~OWID_EU27)

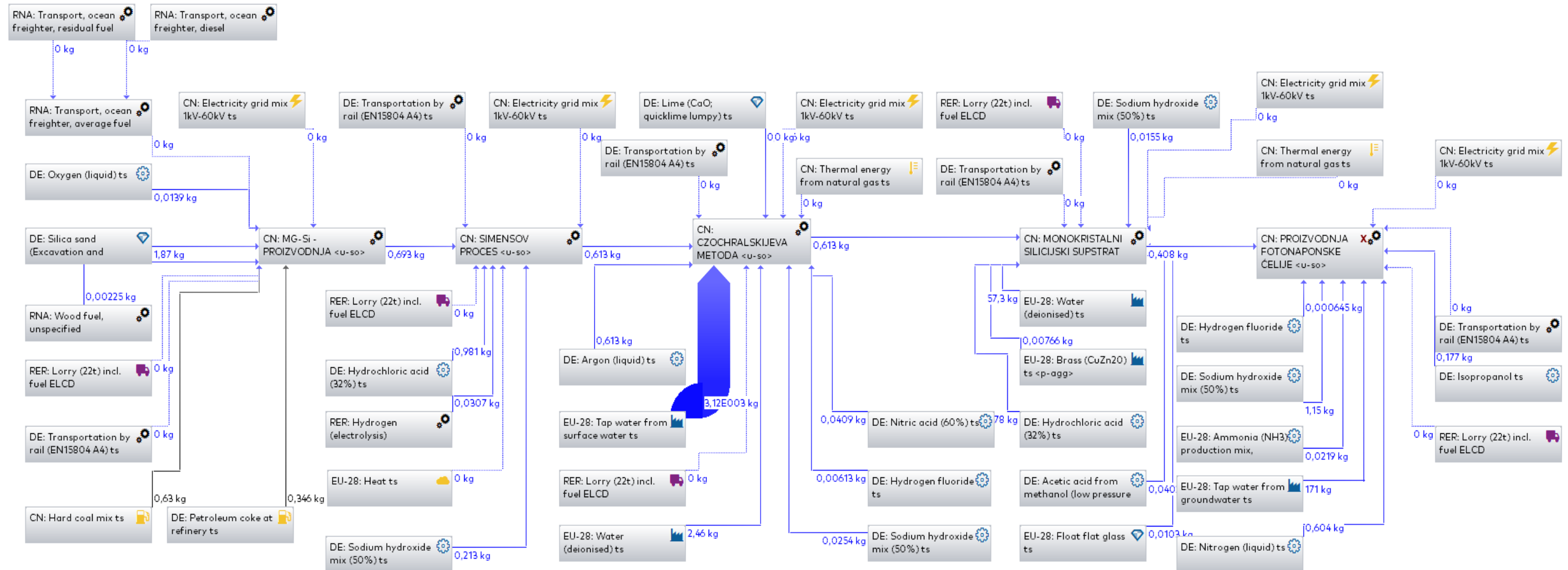


**PRILOZI**

**Prilog 1.** Model proizvodnje 1 m<sup>2</sup> monokristalnih silicijskih fotonaponskih ćelija u Kini. Model je izrađen na temelju podataka o ulaznim i izlaznim tokovima preuzetih iz izvješća IEA PVPS T12, 2020.

**PROIZVODNJA FOTONAPONSKJE ĆELIJE**

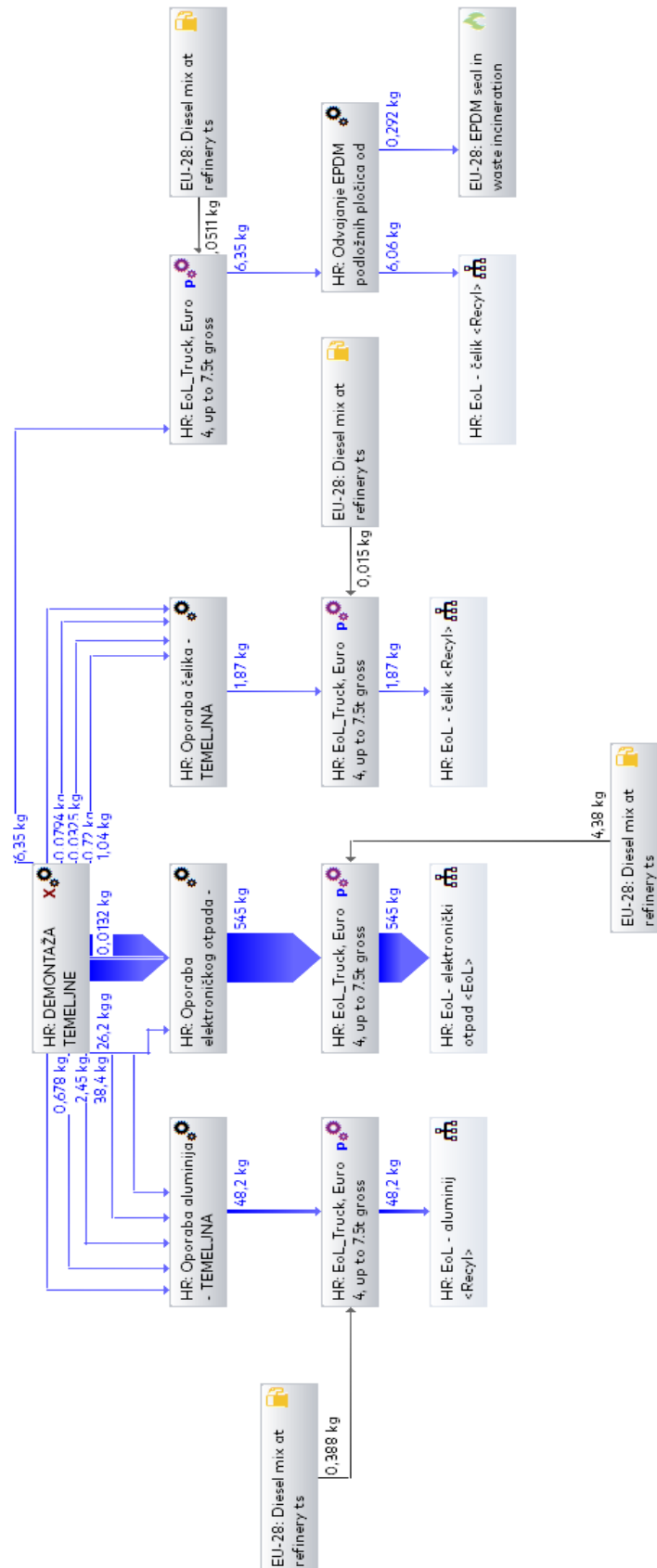
Process plant: Mass [kg]  
The names of the basic processes are shown.



**Prilog 2.** Plan kraja životnog ciklusa (EoL) Temeljne infrastrukture

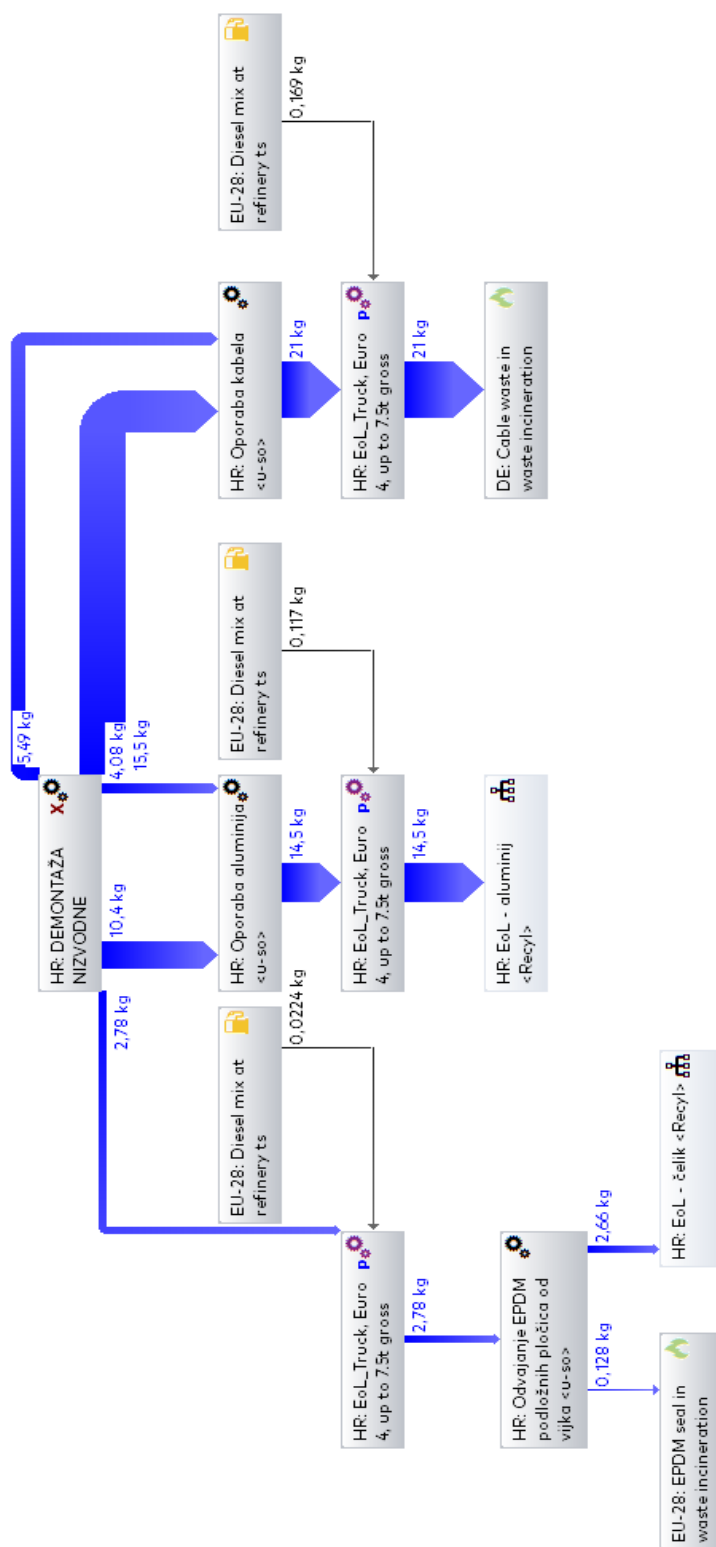
**TEMLJNA INFRASTRUKTURA**

Process plant: Mass [kg]  
The names of the basic processes are shown.



**Prilog 3.** Plan kraja životnog ciklusa (EoL) nizvodne infrastrukture

**NIZVODNA INFRASTRUKTURA**  
 Process plant, Mass [kg]  
 The names of the basic processes are shown.



**Prilog 4.** Izjava o okolišu (EPD) fotonaponskog sustava postavljenog na stambeni objekt.  
Izjava je na engleskom jeziku

# Environmental Product Declaration

According to ISO 14025

**Electricity generated in a photovoltaic power plant,  
*Residential building, 9,72 kWp***



## Programme information

<b>Independent:</b>	Academic research at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb
---------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------

<b>Accountabilities for PCR, LCA and independent, third-party verification</b>	
<b>Product Category Rules (PCR)</b>	
PCR: Electricity, Steam and Hot Water Generation and Distribution, 2007:08, Version 4.2 and UN CPC 171, 173 (valid until 2024-03-16)	
PCR review was conducted by: The Technical Committee of the International EPD® System. See <a href="http://www.environdec.com/TC">www.environdec.com/TC</a> for a list of members.	
<b>Life Cycle Assessment (LCA)</b>	
LCA accountability: Jan Karl Ormuž, graduate student at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb	
<b>Third-party verification</b>	
No third-party verification has been conducted.	

---

## 1. Product information

The analysed product system is a photovoltaic power plant set up on a residential building at a location in Zagreb, Croatia.

The photovoltaic power plant has a surface of 50 m<sup>2</sup>.

The plant has a peak installed power of 9,72 kWp using monocrystalline silicon photovoltaic panels.

The basic function of the power station can be divided into three areas. There is a first area with photovoltaic panels where DC electricity is generated, a second area in which the power is inverted to AC, and a third area where the power is distributed to end consumers.

### 1.1. UN CPC Code

UN CPC 171 Electrical Energy.

## 1.2. Main equipment

Product components	Units installed	Supplier	Origin
Photovoltaic panel/ YLM-J 144 CELL (M10) – 540 Wp	18	Yingli Solar	China
Inverter/ Fronius Symo Gen24 10.0 Plus	1	Fronius	Austria
Aluminium profile	42 m	/	Croatia
Aluminium cable tray and cover	40 m	/	Croatia
End clamp	12	/	Croatia
Mid clamp	30	/	Croatia
H1Z2Z2-K 1 × 4mm <sup>2</sup> - DC cable	60 m	/	Italy
FG16OR16 5 × 10 mm <sup>2</sup> - AC kabel	20 m	/	Italy
FG16OR16 5 × 16 mm <sup>2</sup> - AC kabel	5 m	/	Italy
H07V-K 1 × 16mm <sup>2</sup>	20 m	/	Italy
Self Drilling Screws	1640	/	Liechtenstein
M8 × 40 mm Bolt	42	/	Germany
M8 Split Lock Washer	42	/	Germany
M8 Ribbed Lock Washer	42	/	Germany
Slide-in T-slot nut	42	/	Germany
RCD, 40-4-003/AC, 10kA	1	/	Croatia
Signal Lamp-LED-230V	1	/	Croatia
Circuit Breaker, 6A, 1P, 10kA	1	/	Croatia
Circuit Breaker, AMPARO 10 kA,C 40A, 3P+N	1	/	Croatia
Emergency Stop Push Button	1	/	Croatia
LS-FI(KZS), C/40A/30mA, 1P+N, Type AC, 10kA	1	/	Croatia
MC4 connector – male	2	/	China
MC4 connector - female	2	/	China



## 2. LCA Information

### 2.1. Life Cycle Assessment Methodology

The International EPD® System uses an approach in which all attributional processes from “cradle to grave” should be included using the principle of “limited loss of information at the final product”. According to the ISO 14025 standard, the life cycle assessment (LCA) methodology was applied to quantify the environmental impact of the electricity generation of the photovoltaic power plant in a residential building and the subsequent distribution. LCA is a structured framework, based on international standards ISO 14040 and ISO 14044, that facilitates the quantification and assessment of emissions to the environment and resource use along the entire electricity production chain. The LCA allows for comprehensive findings on overall energy, mass, and emission flows, involved key processes, and the quantification of important environmental impacts, such as greenhouse gas emissions. However, despite these advantages, there are also issues beyond the scope of an LCA. For example, the LCA study only focuses on the normal operation of processes. Unusual process conditions or even accidents are not included. Additionally, due to the investigation of the full process chain, local effects on the environment may not be considered, such as the impact on flora and fauna near the power plant. Finally, the LCA study only quantifies environmental impacts; no economic, social, or ethical aspects are included. The LCA study for the electricity residential building power plant has been carried out according to the Product Category Rules (PCR) Electricity, Steam, and Hot Water Generation and Distribution, 2007:08, Version 4.2 and UN CPC 171, 173 (valid until 2024-03-16). The PCR provides specific rules, requirements, and guidelines for developing an EPD for a specific product category.

### 2.2. The Life Cycle Assessment Methodology

The functional unit is a reference which defines the element being analysed and assessed from the environmental point of view in the declaration. All the information in this document is referenced to the functional unit, which is 1 kWh of net electricity generated in the residential building photovoltaic power plant.

The amount of energy used as a reference flow was 237827,71 kWh. This reference flow represents the total net energy that the power station can generate over its 25 years of planned operation.

### 2.3. Time Representativeness

The data collected from the installer of the system refers to the year 2022. The data collected on the manufacturing of components refers to the year 2020. The general dataset from the used database is representative and valid for the year 2020.

### 2.3. Database and LCA Software Used

The software used was GaBi Educational. The database “GaBi Educational Database 2020” was included with the software.

## 2.4. Assumptions and limitations

The LCI data for China from IEA PVPS Task 12, 2020 was used for the modelling of the PV module produced by Yingli Solar.

The LCI data for average European low power inverters from IEA PVPS Task 12, 2020 was used for modelling of the inverter produced by

The electricity generation during the power plant's planned 25-year operation was modelled using PVSol.

The data describing the end-of-life scenario was assumed based on the available dataset. The transport distances for components were calculated using "GoogleMaps" for road travel, "Sea Distances" for sea transportation, and "Train on Rails" for railway travel.

The LCA analysis was not performed for electronic protection devices as the data could not be obtained.

## 2.5. System boundaries

The life cycle assessment encompasses the entire plant life cycle and associated processes, from "cradle to grave". In accordance with the reference PCR, the complete life cycle has been divided into three major blocks in order to be able to clearly define the limits of the assessed system. These blocks are called: upstream, core and downstream. However, since a photovoltaic power plant does not use fuels for electricity generation, the upstream process has not been analysed. Furthermore, core and downstream blocks have been divided into subdivisions of infrastructure and process.

### CORE INFRASTRUCTURE

- Raw materials consumption for the equipment
- Equipment manufacturing: photovoltaic modules, DC energy cables, inverter, aluminium profiles, aluminium cable trays with cover, end and mid clamp, nuts, bolts, and screws
- Transport of the equipment and materials
- Decommissioning of the core infrastructure and waste management

### CORE PROCESS

- DC electricity generation and conversion to AC
- Maintenance of the photovoltaic modules

### DOWNSTREAM INFRASTRUCTURE

- Raw material consumption for the equipment
- Equipment manufacturing: AC energy cables, aluminium cable trays with cover, screws
- Transport of the equipment
- Decommissioning of downstream infrastructure and waste management

### DOWNSTREAM PROCESS

- Distribution of AC energy to end consumers

### 3. Results of the environmental performance indicators

The following tables present the environmental behaviour of the energy generated in the photovoltaic power plant of a residential building from a complete life cycle perspective. The results have been calculated with the method developed in accordance with EN 15804, and they have been divided into columns according to the stages described in the previous sections. Functional unit is declared as 1 kWh of distributed electrical energy.

#### Impact category indicators

PARAMETER		UNIT	CORE		DOWNSTREAM		TOTAL
			Infrastructure	Process	Infrastructure	Process	
Global warming potential (GWP)	Fossil	kg CO <sub>2</sub> eq.	2,10E-02	0,00E+00	1,14E-03	0,00E+00	2,22E-02
	Biogenic	kg CO <sub>2</sub> eq.	-1,79E-05	0,00E+00	-2,37E-07	0,00E+00	-1,81E-05
	Land use and land transformation	kg CO <sub>2</sub> eq.	2,17E-04	0,00E+00	1,03E-06	0,00E+00	2,18E-04
	TOTAL	kg CO <sub>2</sub> eq.	2,12E-02	0,00E+00	1,14E-03	0,00E+00	2,24E-02
Ozone layer depletion (ODP)		kg CFC 11 eq.	4,66E-11	0,00E+00	1,48E-16	0,00E+00	4,66E-11
Acidification potential (AP)		mol H <sup>+</sup> eq.	8,75E-05	0,00E+00	4,98E-06	0,00E+00	9,25E-05
Eutrophication potential (EP)	Aquatic freshwater	kg P eq.	2,02E-08	0,00E+00	8,89E-09	0,00E+00	2,91E-08
	Aquatic marine	kg N eq.	2,00E-05	0,00E+00	7,41E-07	0,00E+00	2,08E-05
	Aquatic terrestrial	mol N eq.	2,48E-04	0,00E+00	7,79E-06	0,00E+00	2,55E-04
Photochemical oxidant creation potential (POCP)		kg NMVOC eq.	5,90E-05	0,00E+00	2,15E-06	0,00E+00	6,11E-05
Abiotic depletion potential (ADP)	Metals and minerals	kg Sb eq.	3,14E-07	0,00E+00	2,16E-07	0,00E+00	5,30E-07
	Fossil resources	MJ, net calorific value	2,34E-01	0,00E+00	1,30E-02	0,00E+00	2,47E-01
Water deprivation potential (WDP)		m <sup>3</sup> world eq. deprived	3,14E-02	3,25E-03	5,42E-04	0,00E+00	3,52E-02

## Resource use indicators

PARAMETER		UNIT	CORE		DOWNSTREAM		TOTAL
			Infrastructure	Process	Infrastructure	Process	
Primary energy resources – Renewable	Use as energy carrier	MJ, net calorific value	4,15E-02	-3,60E+00	3,60E-03	3,24E-03	-3,55E+00
	Used as raw materials	MJ, net calorific value	INA	INA	INA	INA	INA
	TOTAL	MJ, net calorific value	4,15E-02	-3,60E+00	3,60E-03	3,24E-03	-3,55E+00
Primary energy resources – Non-renewable	Use as energy carrier	MJ, net calorific value	2,34E-01	0,00E+00	1,31E-02	0,00E+00	2,47E-01
	Used as raw materials	MJ, net calorific value	INA	INA	INA	INA	INA
	TOTAL	MJ, net calorific value	2,34E-01	0,00E+00	1,31E-02	0,00E+00	2,47E-01
Secondary material (optional)		kg	INA	INA	INa	INA	INA
Renewable secondary fuels (optional)		MJ, net calorific value	5,90E-26	0,00E+00	4,09E-26	0,00E+00	1,00E-25
Non-renewable secondary fuels (optional)		MJ, net calorific value	6,93E-25	0,00E+00	4,81E-25	0,00E+00	1,17E-24
Net use of fresh water		m <sup>3</sup>	7,44E-04	7,57E-05	1,79E-05	0,00E+00	8,38E-04

INA – Indicator not assessed

## Waste indicators

PARAMETER	UNIT	CORE		DOWNSTREAM		TOTAL
		Infrastructure	Process	Infrastructure	Process	
Hazardous waste disposed	kg	8,91E-10	0,00E+00	3,19E-11	0,00E+00	9,23E-10
Non-hazardous waste disposed	kg	2,45E-03	0,00E+00	3,11E-04	0,00E+00	2,76E-03
Radioactive waste disposed	kg	5,10E-06	0,00E+00	4,81E-07	0,00E+00	5,58E-06

## Other environmental performance indicators

PARAMETER	UNIT	CORE		DOWNSTREAM		TOTAL
		Infrastructure	Process	Infrastructure	Process	
Particulate matter emissions	Disease incidence	1,09E-09	0,00E+00	5,37E-11	0,00E+00	1,15E-09
Ionising radiation	kBq U 235 eq.	4,47E-04	0,00E+00	9,15E-05	0,00E+00	5,39E-04
Ecotoxicity	CTUe	1,00E-01	0,00E+00	9,57E-03	0,00E+00	1,10E-01
Human toxicity, cancer effects	CTUh	7,70E-12	0,00E+00	6,07E-13	0,00E+00	8,31E-12
Human toxicity, non-cancer effects	CTUh	1,51E-10	0,00E+00	2,30E-11	0,00E+00	1,74E-10
Land use related impacts, soil quality	/	2,43E-02	0,00E+00	2,43E-03	0,00E+00	2,67E-02

---

## References

General Programme Instructions of the International EPD® System. Version 4.0.  
PCR 2007:08. Electricity, Steam, and Hot Water Generation and Distribution. 4.2  
ISO 14040: 2006 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework  
ISO 14044: 2006 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines

