

# Elektromotorno vozilo pogonjeno fotonaponskim sustavom

---

**Turčin, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2015**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:039465>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-02**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

**STROJARSKI ODJEL**

**STROJARSKE KONSTRUKCIJE**

ZAVRŠNI RAD

**ELEKTROMOTORNO VOZILO POGONJENO  
FOTONAPONSKIM SUSTAVOM**

IVAN TURČIN

Karlovac, 2015.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

**STROJARSKI ODJEL**

**STROJARSKE KONSTRUKCIJE**

ZAVRŠNI RAD

**ELEKTROMOTORNO VOZILO POGONJENO**

**FOTONAPONSKIM SUSTAVOM**

Mentor:

Prof. dr. sc. Ljubomir Majdandžić

Student:

Ivan Turčin

Karlovac, veljača 2015.



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL**

Stručni studij strojarstva

Usmjerenje: Strojarske konstrukcije

Karlovac, 01.12.2014.

**ZAVRŠNI RAD**

Student: **Ivan Turčin**                      Matični broj: **0110612107**

Naslov: **ELEKTROMOTORNO VOZILO POGONJENO FOTONAPONSKIM SUSTAVOM**

Opis zadatka:

Radom je potrebno opisati te izvršiti usporedbe trenutno dostupnih tehnologija pojedinih dijelova solarnog fotonaponskog vozila, osobito solarnih ćelija i elektromotora. Potrebno je navesti trenutne modele solarnih vozila.

Rad mora obuhvatiti opis svih komponenti električnog vozila te opisati temeljne karakteristike pojedinih sastavnih dijelova vozila.

Posebnu pozornost treba obratiti na sustav pohrane energije te navesti vrste baterija koje se trenutno najviše koriste kod solarnih električnih vozila.

Razraditi mogućnosti ugradnje fotonaponskih modula na karoseriju vozila vodeći računa o aerodinamičkim svojstvima solarnog električnog vozila.

Zadatak izraditi i opremiti sukladno Pravilniku o diplomskom ispitu VUK-a.

Zadatak zadan:  
01.12.2014.

Rok predaje rada:  
20.02.2015.

Predviđeni datum obrane:  
25.02.2015.

Mentor:

Prof. dr.sc. Ljubomir Majdandžić

Predsjednik Ispitnog  
povjerenstva:

Marijan Brozović, dipl.ing.

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno služeći se navedenom literaturom i materijalima sa interneta, te znanjem stečenim tijekom studija. Zahvaljujem mentoru Prof.dr.sc. Ljubomiru Majdandžiću, koji mi je svojom susretljivošću, primjedbama i savjetima pomogao u izradi ovog rada.

## **Sažetak**

U ovome radu opisan je princip rada elektromotornog vozila pogonjenog fotonaponskim sustavom. U prvom dijelu rada opisane su geometrijske osnove odnosa planeta, važnost kutova upada sunčanih zraka na sfernu površinu, kao i promjene koje se ciklički događaju na godišnjoj razini. U nastavku su opisani pojedini sustavi vozila, osnovne zakonitosti te trenutno dostupne i raspoložive tehnologije. Na kraju su opisani mehanički i aerodinamički utjecaji na samo vozilo.

## **Abstract**

This paper describes the principle of an electromotive vehicle powered by a photovoltaic system. The first part of the paper presents the geometric basics of relationships between planets, the importance of the incidence angle of sunlight on the surface, as well as annual cyclic changes. The second part deals with individual vehicle systems, basic principles, currently available and accessible technologies and gives their comparison with an emphasis on energy storage. Finally, the paper discusses mechanical and aerodynamic resistance such as rolling and air resistance.

# SADRŽAJ

1. Uvod
2. Obnovljivi izvori
3. Energija sunca
  - 3.1 Sunčevo zračenje
  - 3.2 Geometrijski odnos zemlje i sunca
  - 3.3 Sunčevo zračenje na vodoravnu plohu
4. Osnovni principi iskorištavanja sunčeve energije
  - 4.1 Solarni kolektor
  - 4.2 Fotonaponske ćelije
  - 4.3 Fotoelektrični efekt
  - 4.4 Tipovi fotonaponskih panela, karakteristike, prednosti i nedostaci
5. Osnovni princip fotonaponskog vozila
6. Pohrana energije
  - 6.1 Apsorpcija energije
  - 6.2 Baterija – povijest i osnovni pojmovi
  - 6.3 Vrsta baterija
  - 6.4 Pohrana energije kod solarnog vozila
7. Pogon solarnog vozila
  - 7.1 CSIRO elektromotor
  - 7.2 Mitsubo elektromotor
8. Konstrukcija solarnog vozila
  - 8.1 Karoserija i aerodinamika
  - 8.2 Okvir vozila
  - 8.3 Ovjes vozila
9. Otpor kretanja fotonaponskog vozila
  - 9.1 Vučna sila vozila
  - 9.2 Otpor i deformacija kotača
  - 9.3 Tvrdi podloga – mekani kotač
  - 9.4 Mekana podloga – tvrdi kotač
  - 9.5 Otpor zraka
10. Zaključak
11. Literatura

## Popis oznaka i kratica

$F_{xp}$	longitudinalna vučna sila prednjih kotača [N]
$F_{xz}$	longitudinalna sila stražnjih kotača [N]
$R_z$	ekvivalentna aerodinamična sila [N]
$R_{xp}$	sila otpora kotrljanja prednjih kotača [N]
$R_{xz}$	sila otpora kotrljanja zadnjih kotača [N]
$m$	ukupna masa automobila [kg]
$g$	gravitacijsko ubrzanje $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
$\alpha$	Kut uspona podloge [°]
$f_k$	Koeficijent otpora kotrljanja [-]
$v$	Brzina gibanja [m/s]
$G_v$	Ukupna težina vozila (prazno vozilo i opterećenje) $\left[\frac{kg \cdot m}{s^2}\right]$
$r$	Radius ne deformiranog kotača [m]
$r_{st}$	Statički radius kotača [m]
$\phi$	Deformacija kotača [m]
$G_{v1}$	Težina vozila na osi kotača $\left[\frac{kg}{s^2}\right]$
$F_{N1}$	Reakcija podloge [N]
$\omega$	Kutna brzina vrtnje kotača [rad/s]
$r_d$	Dinamički radius kotača [m]
$a$	Pomak hvatišta sile [m]
$F_v$	Iskoristiva vučna sila [N]
$M_p$	Pogonski moment [Nm]
$F_{RK}$	Sila otpora kotrljanja [N]
$F_o$	Idealna vučna sila [N]
$B$	Širina neopterećenog pneumatika [m]
$H$	Visina profila pneumatika [m]
$D$	Promjer obruča kotača (naplatka) [m]
$f_{k,n}$	Nominalni faktor otpora kotrljanja
$p_n$	Nominalni tlak pneumatika [N/m <sup>2</sup> ]
$v_o$	Brzina protu vjetra [m/s]
$\rho$	Gustoća zraka [kg/m <sup>3</sup> ]
$p$	Dinamički tlak zraka (na čeonu površinu vozila) [N/m <sup>2</sup> ]
$C_d$	Koeficijent otpora zraka [-]
$A_f$	Referentna površina vozila [m <sup>2</sup> ]



## **Popis tablica**

1. Karakteristična svojstva pojedinih tipova baterija
2. Očekivani razvoj performansi baterija
3. Usporedba Steel back i Halback motora

## Popis slika

1. Obnovljivi izvori energije
2. Sunce
3. Insolacijski nivo
4. Primjena fotonapona u svemiru
5. Sunčevo zračenje ovisno o njegovom upadu na plohe na Zemlji
6. Sunčev spektar
7. Zemljina putanja oko sunca
8. Utjecaj sfernosti Zemlje na ozračenje
9. Utjecaj visine Sunca na ozračenje vodoravne plohe
10. Utjecaj nagiba plohe na ozračenje
11. Prikaz solarnog kolektora
12. Princip rada fotonaponske ćelije
13. Monokristalna i polikristalna ćelija
14. Amorfni panel
15. Poboljšanje iskoristivosti
16. Shema električnog sustava fotonaponskog vozila
17. Prikaz vozila s različitim položajima apsorpcije sunčeve energije
18. Voltin članak
19. Voltin niz
20. Li-ion baterija u kućištu za lakšu ugradnju
21. Karakteristike i dijagram baterijske tehnologije
22. Trofazni asinkroni motor s permanentnim magnetima
23. Magnetsko prstenje
24. Sklopljeni CSIRO motor
25. Sklopljeni Mitsuba motor
26. Prikaz smanjenja koeficijenta otpora tokom godina
27. Cad model okvira
28. Okvir sa integriranim ovjesomi kotačima
29. Ovjes fotonaponskog vozila
30. Vozilo na kosini
31. Prikaz deformacije kotača pri mirovanju
32. Prikaz deformacije kotača pri vožnji
33. Prikaz načina za određivanje  $R_k$
34. Prikaz eliminacije  $R_k - a$
35. Prikaz deformacije podloge
36. Utjecaj oblika vozila na koeficijent otpora zraka

## 1. Uvod

Popularizacija teme globalnog zagrijavanja te emisije CO<sub>2</sub> i trend ekološkog pristupa problemu opskrbe energijom uvelike su odredili put razvoja alternativnih energija.

Jedna od njih je svakako energija sunca koja je besplatna, dostupna svugdje i ima je u neograničenim količinama.

Tragom tog trenda (tj. neophodnosti po mom mišljenju) krenuo je i razvoj solarnog automobila. Pošto sama tehnologija nije uznapredovala do razine komercijalne uporabe i ne može pratiti potrebe modernog čovjeka, projekt solarnih vozila još se svodi na prototipove i natjecanja s ciljem usavršavanja tehnologija.

U ovom radu biti će opisan temeljni princip rada i konstrukcije solarnog vozila. Posebna pozornost biti će posvećena pohrani energije pošto se ista pokazala kao najveća prepreka u samoj komercijalizaciji.

## 2. Obnovljivi izvori

Obnovljive izvore energije možemo podijeliti u dvije glavne kategorije: tradicionalne obnovljive izvore energije poput biomase i velikih hidroelektrana, te na takozvane "nove obnovljive izvore energije" poput energije Sunca, energije vjetra, geotermalne energije itd. Iz obnovljivih izvora energije dobiva se 18% ukupne svjetske energije (2006), ali je većina od toga energija dobivena tradicionalnim



Slika1. Obnovljivi izvori energije

iskorištavanjem biomase za kuhanje i grijanje - 13 od 18%. Od velikih hidroelektrana dobiva se dodatnih tri posto energije. Prema tome, kad izuzmemo tradicionalne obnovljive izvore energije jednostavno je uračunati da takozvani "novi izvori energije" proizvode samo 2,4% ukupne svjetske energije. 1,3% otpada na instalacije za grijanje vode, 0,8% na proizvodnju električne energije i 0,3% na biogoriva. Taj udio u budućnosti treba znatno povećati jer neobnovljivih izvora energije ima sve manje, a i njihov štetni utjecaj sve je izraženiji u zadnjih nekoliko desetljeća. Sunce isporučuje Zemlji 15 tisuća puta više energije nego što čovječanstvo u sadašnjoj fazi uspijeva potrošiti. Iz toga se vidi da se obnovljivi izvori mogu i moraju početi bolje iskorištavati i da ne trebamo brinuti za energiju nakon fosilnih

goriva. Razvoj obnovljivih izvora energije (osobito od vjetra, vode, sunca i biomase) važan je zbog nekoliko razloga:

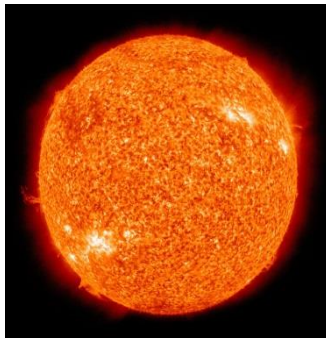
- obnovljivi izvori energije imaju vrlo važnu ulogu u smanjenju emisije ugljičnog dioksida (CO<sub>2</sub>) u atmosferu. Smanjenje emisije CO<sub>2</sub> u atmosferu je politika Europske unije, pa se može očekivati da će i Hrvatska morati prihvatiti tu politiku.
- povećanje udjela obnovljivih izvora energije povećava energetske održivost sustava. Također pomaže u poboljšavanju sigurnosti dostave energije na način da smanjuje ovisnost o uvozu energetskih sirovina i električne energije.
- očekuje se da će obnovljivi izvori energije postati ekonomski konkurentni konvencionalnim izvorima energije u srednjem do dugom razdoblju

Proces prihvaćanja novih tehnologija vrlo je spor i uvijek izgleda kao da nam izmiče za samo malo. Glavni problem za instalaciju novih postrojenja je početna cijena. To diže cijenu dobivene energije u prvih nekoliko godina na razinu potpune neisplativosti u odnosu na ostale komercijalno dostupne izvore energije. Veliki udio u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora rezultat je ekološke osviještenosti stanovništva, koje usprkos početnoj ekonomskoj neisplativosti instalira postrojenja za proizvodnju "čiste" energije. Europska zajednica ima strategiju udvostručavanja upotrebe obnovljivih izvora energije do 2010. godine u odnosu na 2003. godinu.

To znači da bi se ukupni udio obnovljivih izvora energije povećao na 12% 2010. godine. Taj plan sadrži niz mjera kojima bi se potaknule privatne investicije u objekte za pretvorbu obnovljivih izvora energije u iskoristivu energiju (najvećim dijelom u električnu energiju). Dodatno, države Europske unije (EU) zadale su si još jedan ambiciozan cilj da povećaju udio obnovljivih izvora energije 20% cjelokupne potrošnje energije u EU do 2020. godine. Zbog trenutne financijske krize u kojoj su se našle najveće države u Europskoj uniji, vjerojatno je da plan neće biti proveden u potpunosti.

### 3. Energija Sunca

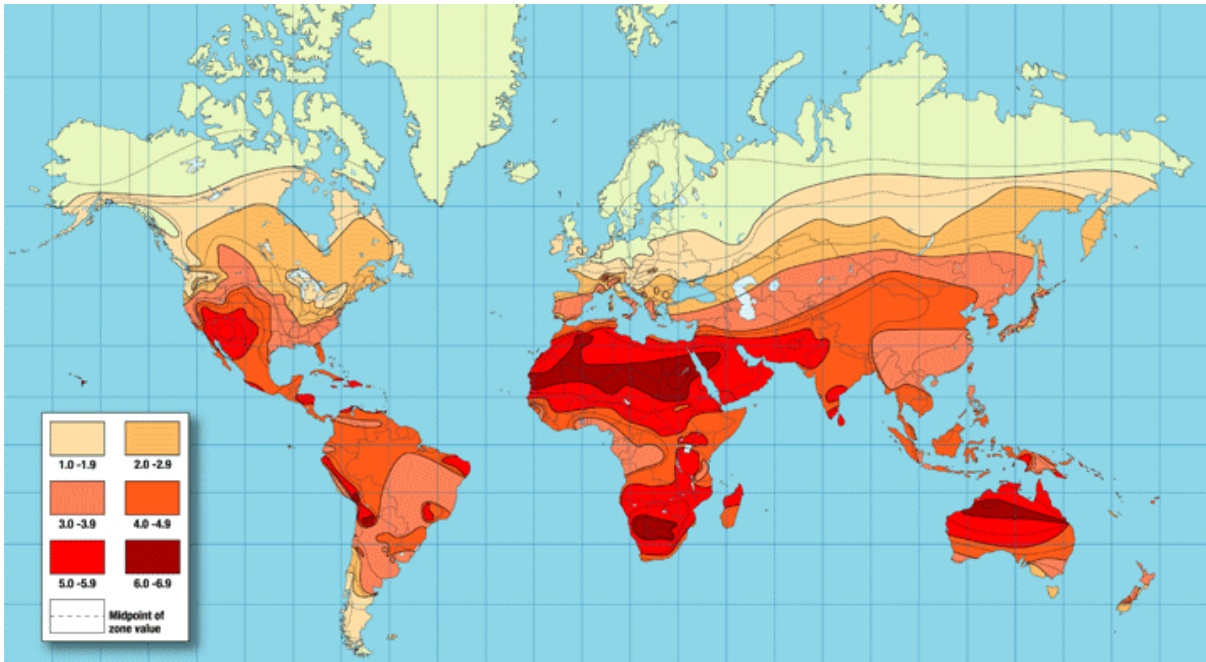
Sunce je zvijezda u centru našeg Sunčevog sustava. Ona je gotovo savršena kugla (razlika između ekvatora i pola je samo 10 km) i sastoji se od plinovite vruće plazme, koja je isprepletana sa magnetskim poljima. Promjer mu je oko 1 392 000 km, što je za 109 puta više od Zemlje i masu oko  $2 \times 10^{30}$  kilograma, što je za 330 000 puta više od Zemlje, a to je 99,86 % mase cijelog Sunčevog sustava. Kemijski,  $\frac{3}{4}$  ima vodika, dok je ostatak skoro sve helij, a manje od 2 % se sastoji od težih elemenata kao kisik, ugljik, neon, željezo i drugi.



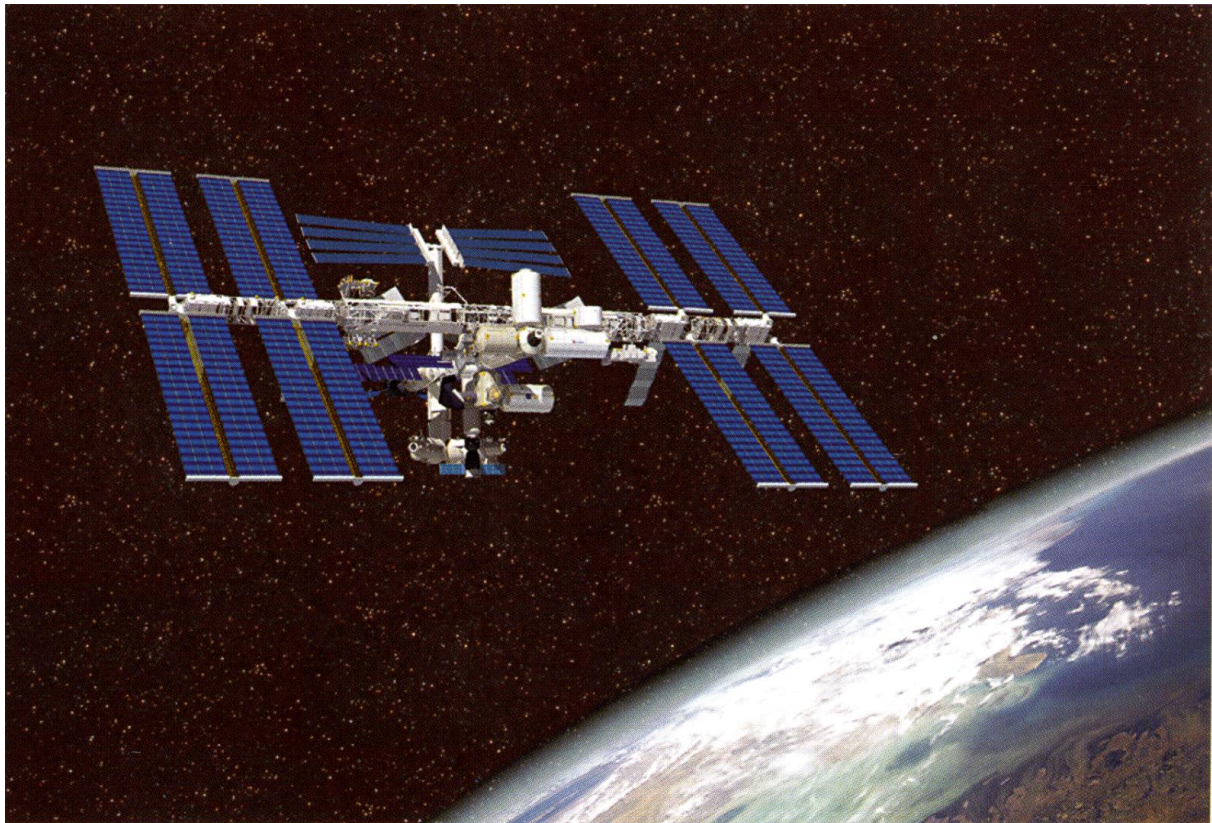
Slika 2. Sunce

Sunčeva energija potječe od nuklearnih reakcija u njegovom središtu, gdje temperatura doseže 15 milijuna °C. Radi se o fuziji, kod koje spajanjem vodikovih atoma nastaje helij, uz oslobađanje velike količine energije. Tim oslobađanjem se energija u vidu svjetlosti i topline širi u svemir pa tako jedan njezin mali dio dolazi i do Zemlje. Pod optimalnim uvjetima, na površini Zemlje može se dobiti  $1 \text{ kW/m}^2$ , a stvarna vrijednost ovisi o lokaciji, godišnjem dobu, dobu dana, vremenskim uvjetima itd. U Hrvatskoj je prosječna vrijednost dnevne insolacije na horizontalnu plohu 3-4,5 kWh/m<sup>2</sup>. Na karti koja prikazuje insolacijski nivo vidi se da Europa nije na vrlo pogodnom području za eksploataciju, ali unatoč tome u Europi je direktno iskorištavanje sunčeve energije u velikom porastu. Većinom je to rezultat politike pojedinih država koje subvencioniraju instaliranje elemenata za pretvorbu sunčeve energije u iskoristivi oblik energije. Osnovni problemi iskorištavanja su mala gustoća energetskog toka, velike oscilacije intenziteta zračenja i veliki investicijski troškovi.





Slika 3. Insolacijski nivo

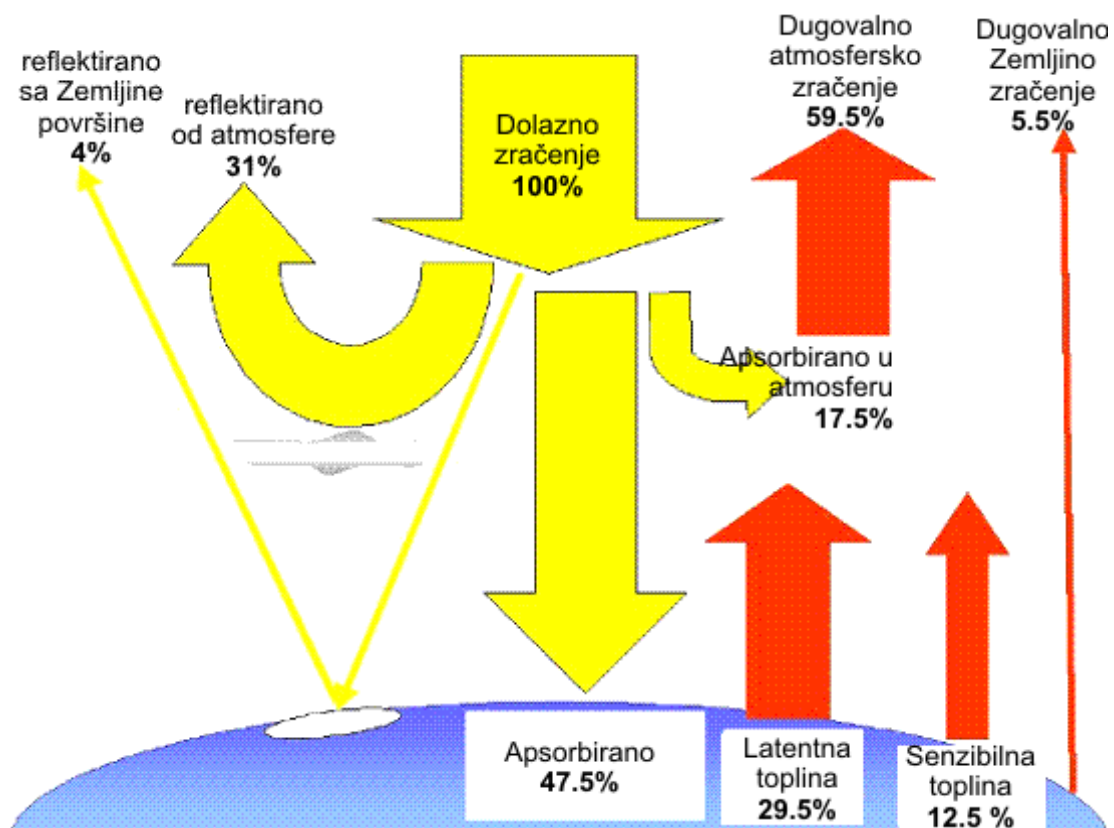


Slika 4. Primjena fotonapona u svemiru

### 3.2 Sunčevo zračenje

Sunčevo zračenje kratkovalno je zračenje koje Zemlja dobiva od Sunca. Izražava se u  $W/m^2$ . Ovisno o njegovom upadu na plohe na Zemlji ono može biti:

- neposredno ( zračenje Sunčevih zraka )
- difuzno zračenje neba (raspršeno zračenje cijelog neba zbog pojava u atmosferi )
- difuzno zračenje obzorja ( dio difuznog zračenja koji zrači obzorje)
- okosunčevo difuzno (cirkumsolarno) zračenje ( difuzno zračenje bliže okolice
- odbijeno zračenje: zračenje koje se odbija od okolice i pada na promatranu plohu Sunčevog diska koji se vidi sa Zemlje)



Slika 5. Sunčevo zračenje ovisno o njegovom upadu na plohe na Zemlji

Izravno (direktno) Sunčevo zračenje:

Zbog velike udaljenosti Zemlje i Sunca može se smatrati da se Sunčevo zračenje prije ulaska u atmosferu sastoji od snopa paralelnih elektromagnetskih valova. Međudjelovanjem s plinovima i česticama u atmosferi Sunčevo zračenje se može upiti (apsorpcija), odbiti (refleksija) ili može manje ili više nesmetano proći kroz atmosferu (transmisija).

Raspršeno (difuzno) Sunčevo zračenje:



Raspršivanje zračenja izazivaju molekule plinova i čestice koje su suspendirane u atmosferi. Kad Sunčeva energija na svom putu dopre do molekule plina i čestice, pobuđuje je na titranje i zračenje čime postaje izvoz elektromagnetskog zračenja specifične valne duljine. Primljenu energiju predaje nejednako u svim smjerovima, ovisnosti o svojstvima plina ili čestice. Energija se više ne širi u jednom smjeru kao prije ulaska u atmosferu već na sve strane. Utjecaj raspršenja je dvojak, s jedne strane smanjuje jačinu izravnog Sunčevog zračenja a s druge uzrokuje raspršeno zračenje neba. Jedan dio Sunčevog zračenja se vraća u međuplanetarni prostor i on je izgubljen za procese u atmosferi. Spuštanjem Sunca, raspršenje kratkovalnog zračenja se povećava, ono sve više slabi i njen relativni udio u ukupno raspršenom zračenju se smanjuje. Pri niskim kutovima Sunca, pri izlasku i zalasku, plavi dio spektra se potpuno apsorbira pa preostaje samo žuto i crveno zračenje.

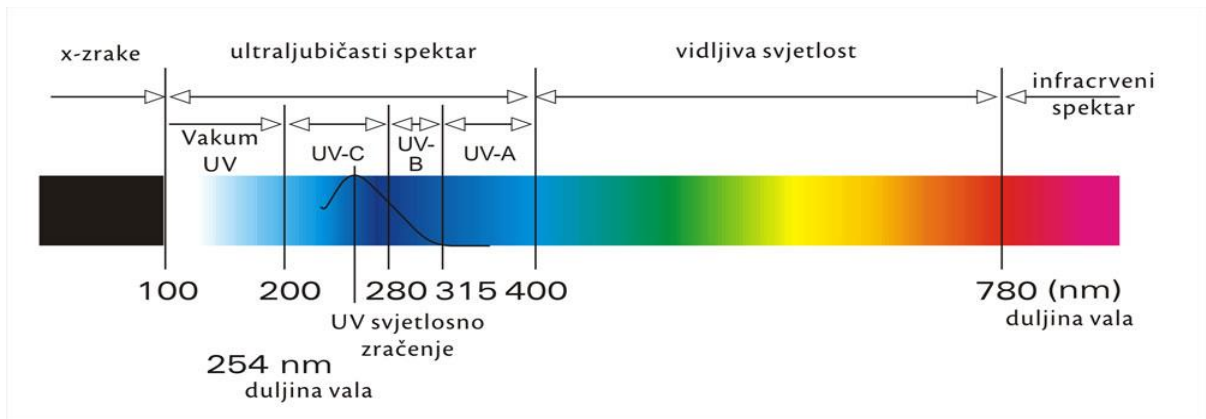
#### Odbijeno (reflektirano) Sunčevo zračenje:

Nakon prolaska kroz atmosferu, Sunčevo zračenje nailazi na tlo ili vodenu površinu (more, jezera, rijeke). Ovisno o svojstvima podloge, veći ili manji dio zračenja će se odbiti (reflektirati). Svojstva podloge da odbije zračenje možemo izraziti koeficijentom refleksije ili albedom( $\rho$ ). Potpuno bijelo tijelo imalo bi albedo = 1 jer bi potpuno odbijalo zračenje, a potpuno crno tijelo imalo bi albedo = 0.

Ukupno zračenje na Zemlji može biti različite energije, odnosno frekvencije ili valne dužine. Ono što je zajedničko za sve oblike radijacija je njihova elektromagnetska priroda. Zračenja svih valnih dužina zajedno čine elektromagnetski spektar. Sva tijela zagrijana do određene temperature emituju elektromagnetsko zračenje. Na nižim temperaturama tijela emitiraju zračenje valnih dužina infracrvenog dijela spektra, a na višim temperaturama tijela emitiraju zračenje vidljivog dijela spektra. Emitirano zračenje ovih tijela posljedica je transformacije njihove unutarnje energije u elektromagnetskoo zračenje, a spektar zračenja zavisi od temperature do koje je tijelo zagrijano.

Raspodela elektromagnetskog zračenja emitiranog sa površine Sunca koje dopire do gornjeg sloja atmosfere, u funkciji valne dužine, naziva se Sunčev spektar. Optičko zračenje je potpun Sunčev spektar koji obuhvaća valne dužine 100 - 10 000 nm. Ovaj opseg valnih duljina može se podijeliti na tri valne razine:

- 100 – 400 nm Ultraljubičasta (UV)
- 400 – 770 nm Vidljiva (VV)
- 770 – 10 000 nm Infracrvena (IC)



Slika 6. Sunčev spektar

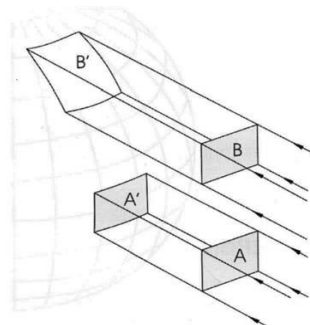
### 3.3 Geometrijski odnos zemlje i sunca

Sunčevo zračenje pada okomito na vodoravnu plohu na površini Zemlje samo između obratnica, i to samo dva određena dana u godini (na obratnicama samo jedan dan). Sferičan oblik Zemljine površine smanjuje ozračenje na višim zemljopisnim širinama jer Sunčevo zračenje upada pod većim kutom, pa se energija raspodjeljuje na veću površinu.



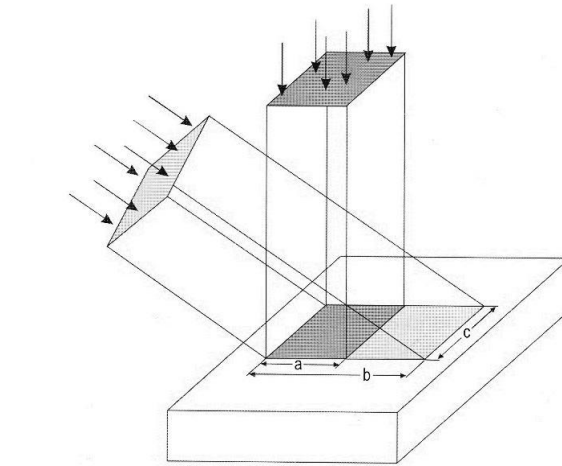
Slika 7. Zemljina putanja oko sunca

Na donjoj slici se vidi klimatska važnost zemljopisne širine jer jednaka količina zračenja ( $A=B$ ) pada na mnogo veću površinu u slučaju B' (na višim zemljopisnim širinama), nego u slučaju A' (na ekvatoru).



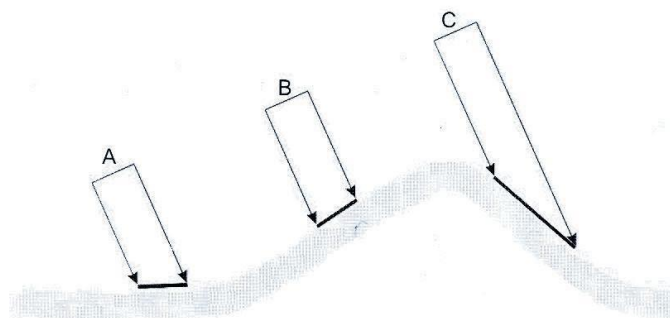
Slika 8. Utjecaj sfernosti Zemlje na ozračenje

Gustoća energetskega toka po jedinici površine ovisi i o dnevnom hodu Sunca. Na slici su prikazane su dvije karakteristične visine Sunca, ujutro i u podne. Ozračenje ovisi o upadnom kutu Sunčevih zraka jer se u podne zračenje podijeli na manjoj površini (površina  $a \times c$ ), nego kad zračenje upada koso (površina  $b \times c$ ). Kretanje Sunca po nebu je jedan od uzroka porasta i pada temperature zraka.



Slika 9. Utjecaj visine Sunca na ozračenje vodoravne plohe

Zemljina površina nije posve ravna pa će različiti dijelovi reljefa primati različite količine Sunčevog zračenja. Na slici 9 je prikazano kako se ista količina zračenja raspodjeljuje na različito velike plohe. Na godišnjoj razini, ozračenost prisojne padine B je najveća, a osojne padine C najmanja. Takva raspodjela ozračenja ima vrlo veliku ulogu u brdovitim i planinskim predjelima, a naročito u područjima na višim zemljopisnim širinama, gdje su moguće velike razlike klime na malom prostoru. Zbog skraćenog vegetacijskog razdoblja i naglog pada srednjih temperatura zraka s porastom visine, prisojne padine mogu biti ekonomski daleko važnije od osojnih.



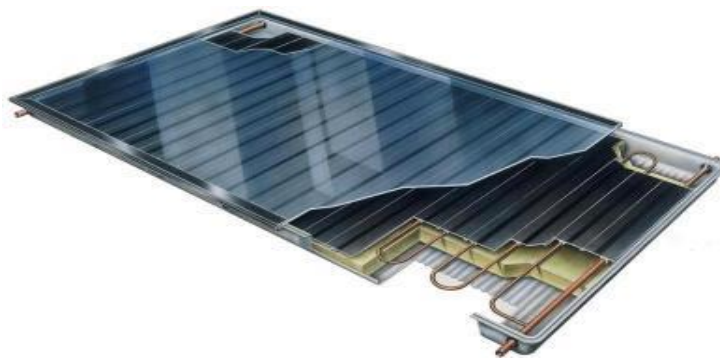
Slika 10. Utjecaj nagiba plohe na ozračenje

## 4. Osnovni principi direktnog iskorištavanja energije Sunca

- solarni kolektori - pripremanje vruće vode i zagrijavanje prostorija
- fokusiranje sunčeve energije - upotreba u velikim energetske postrojenjima
- fotonaponske ćelije - direktna pretvorba sunčeve energije u električnu energiju

### 4.1 Solarni kolektori

Solarni kolektori pretvaraju sunčevu energiju u toplinsku energiju vode (ili neke druge tekućine). Sistemi za grijanje vode mogu biti ili otvoreni, u kojima voda koju treba zagrijati prolazi direktno kroz kolektor na krovu, ili zatvoreni, u kojima su kolektori popunjeni tekućinom koja se ne smrzava (npr. antifriz). Zatvoreni sustavi mogu se koristiti bilo gdje, čak i kod vanjskih temperatura ispod nule.



Slika 11. Prikaz solarnog kolektora

### 4.2 Fotonaponske ćelije

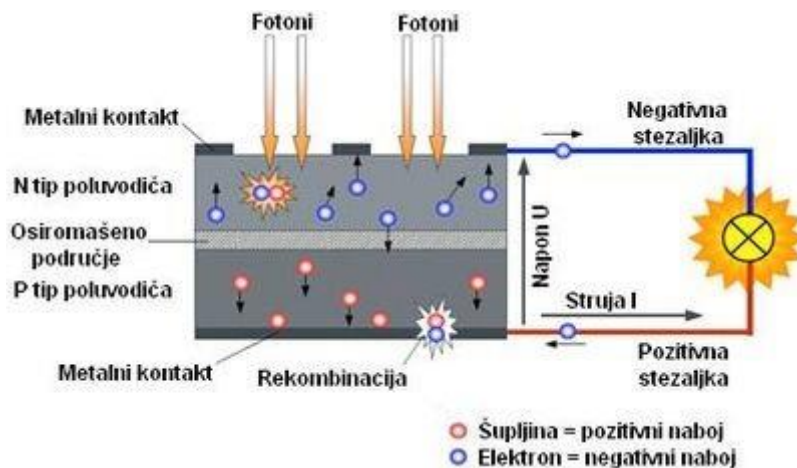
Fotonaponske ćelije su poluvodički elementi koji direktno pretvaraju energiju sunčeva zračenja u električnu energiju. Efikasnost im je od 10% za jeftinije izvedbe s amorfnim silicijem, do 25% za skuplje izvedbe, cijena im je oko 2000 \$/kW. Fotonaponske ćelije mogu se koristiti kao samostalni izvori energije ili kao dodatni izvor energije. Kao samostalni izvor energije koristi se npr. na satelitima, cestovnim znakovima, kalkulatorima i udaljenim objektima koji zahtijevaju dugotrajni izvor energije. U svemiru je i snaga sunčeva zračenja puno veća jer Zemljina atmosfera apsorbira veliki dio zračenja pa je i dobivena energija veća.

Fotonaponski efekt počeo je 1839. Godine promatrati Henri Becquerel i na početku dvadesetog stoljeća bio je predmetom mnogih istraživanja.

U Europskoj Uniji trenutno je 40% godišnji rast instalirane snage fotonaponskih ćelija. To se naizgled čini kao velik rast, ali u biti radi se o vrlo malim količinama, pa rast od 40% ne utječe posebno na ukupnu zastupljenost takvih izvora energije.

### 4.3 Fotoelektrični efekt

Fotoelektrični učinak ili fotoefekt je fizikalna pojava kod koje djelovanjem elektromagnetnog zračenja dovoljno kratke valne duljine (npr. u vidljivom ili ultraljubičastom području spektra) dolazi do izbijanja elektrona iz obasjanog materijala (obično kovine). Zračenje s valnom duljinom većom od granične ne izbija elektrone, jer elektroni ne mogu dobiti dovoljno energije za raskidanje veze s atomom. Ponekad se ti izbačeni elektroni nazivaju "fotoelektroni". Prvi puta tu pojavu je primjetio Heinrich Herz 1887. I on je otkrio ako su elektrode osvijetljene sa ultraljubičastim zračenjem, lakše stvaraju iskru.



Slika 12. Princip rada fotonaponske ćelije

Za fotoefekt potrebni su fotoni energije od nekoliko elektronvolti do preko 1 MeV i kemijski elementi visokog atomskog broja. Proučavanje fotoefekta je dovelo do važnog otkrića kvantne prirode svjetlosti i elektrona, te na stvaranje ideje dualizma, ili dvostrukog svojstva vala i čestice. Osim toga, došlo se do novih pojmova, kao što je fotoprovodljivost, fotootpornost, fotovoltazni efekt i fotoelektrokemijski efekt.

#### 4.4 Tipovi fotonaponskih panela, njihove karakteristike, prednosti i nedostaci

- Monokristalni

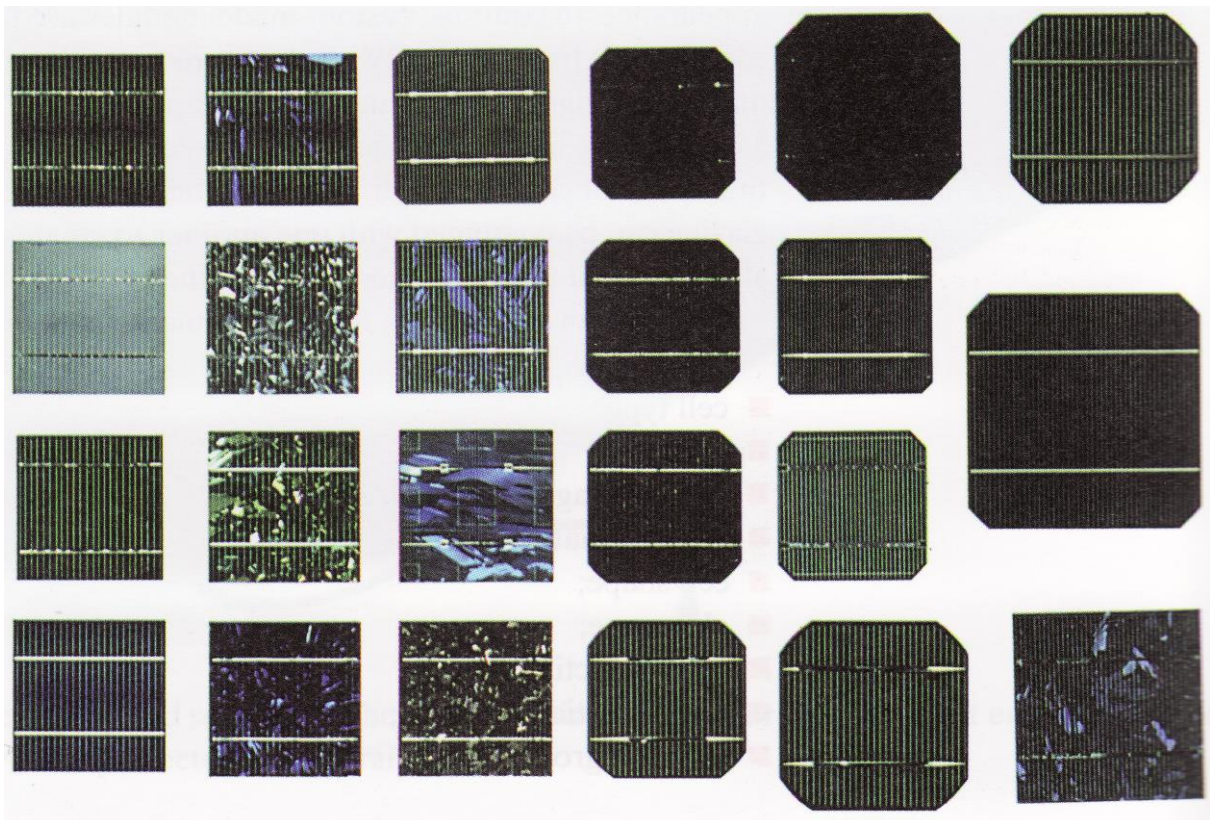
Dobro izdržavaju visoke temperature i imaju visoku stopu pretvorbe – do 18%, no skup proces proizvodnje. Također se u samo dobivanje čistog kristala mora uložiti puno energije.

- Polikristalni

Jednostavnija proizvodnja, ali samim time i niža stopa pretvorbe – do 15%. Ne ponašaju se dobro na visokim temperaturama.

- Amorfni

Relativno nova tehnologija s jeftinijom proizvodnjom, ali i nižom stopom djelotvornosti. Amorfni silicij često nalazimo u satovima i kalkulatorima. Razlikujemo čiste amorfne, tankoslojne i nešto novije, hibridne panele.



Slika 13. Monokristalna i polikristalna ćelija



Tankoslojni ili 'thin-film' paneli naziv su dobili po tome što imaju samo tanki nanos amornog silicija, imaju manju efikasnost, te samim time zahtijeva i veću površinu. Djelotvornost je oko 10-13 %, ali ukoliko raspoloživa površina nije problem, tankoslojni paneli su jeftinije (do 40% manje od kristalnih!), dobro rješenje koje se čak bolje ponaša u klimi sa iznimno visokim temperaturama nego kristalni paneli. Tankoslojni paneli ekološki su najmanje štetni.

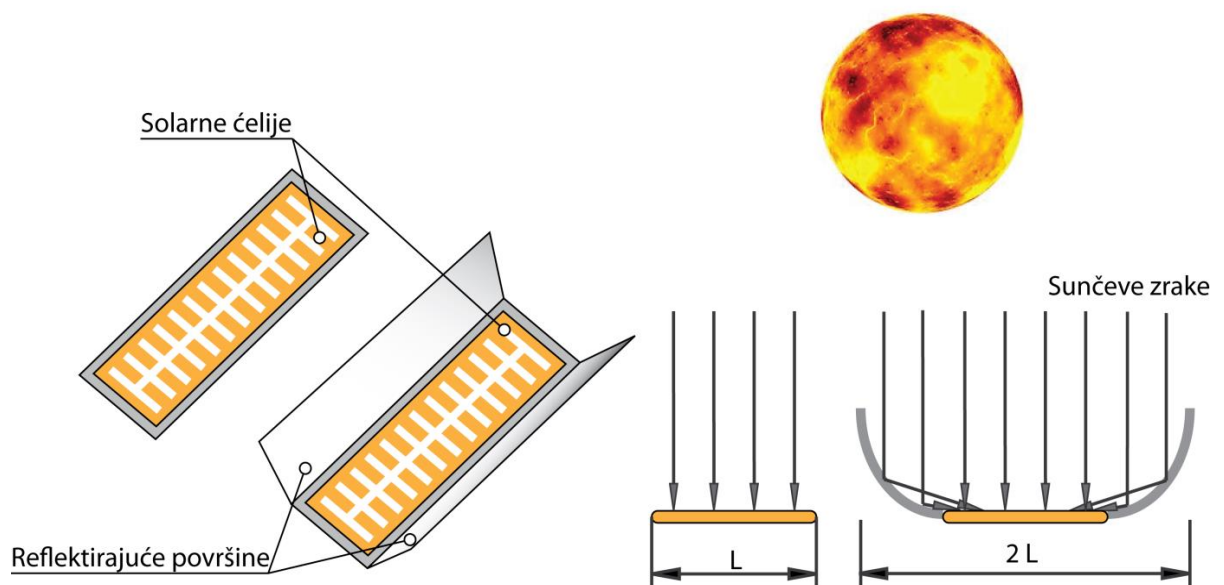
Hibridni paneli su relativno novo rješenje koje ima čak 40-ak % veću stopu pretvorbe nego obični tankoslojni moduli. Povezuju dva sloja: mikro-kristalni silikonski sloj sa tankim slojem amornog silikona. Pogodni su i za kućnu i za komercijalnu upotrebu jer imaju odlične karakteristike i manju cijenu instalacije.



Slika 14. Amorfni panel

- Koncentrirani fotonapon

Kao što postoji fokusiranje sunčeve energije uz pomoć kolektora, tako se i fotonaponski moduli mogu usmjeriti te pojačati zrcalima za dobivanje veće količine električne energije. Tehnologija još nije potpuno razvijena i postoje mnogi problemi poput pregrijavanja, roka trajanja opreme i visoke cijene. Ipak, ukoliko se ti problemi uspješno premoste, efikasnost takvog načina korištenja solarnih ćelija može biti puno veća nego bilo koji mogući budući napredak koji će se postići na klasičnim ćelijama bez zrcala.

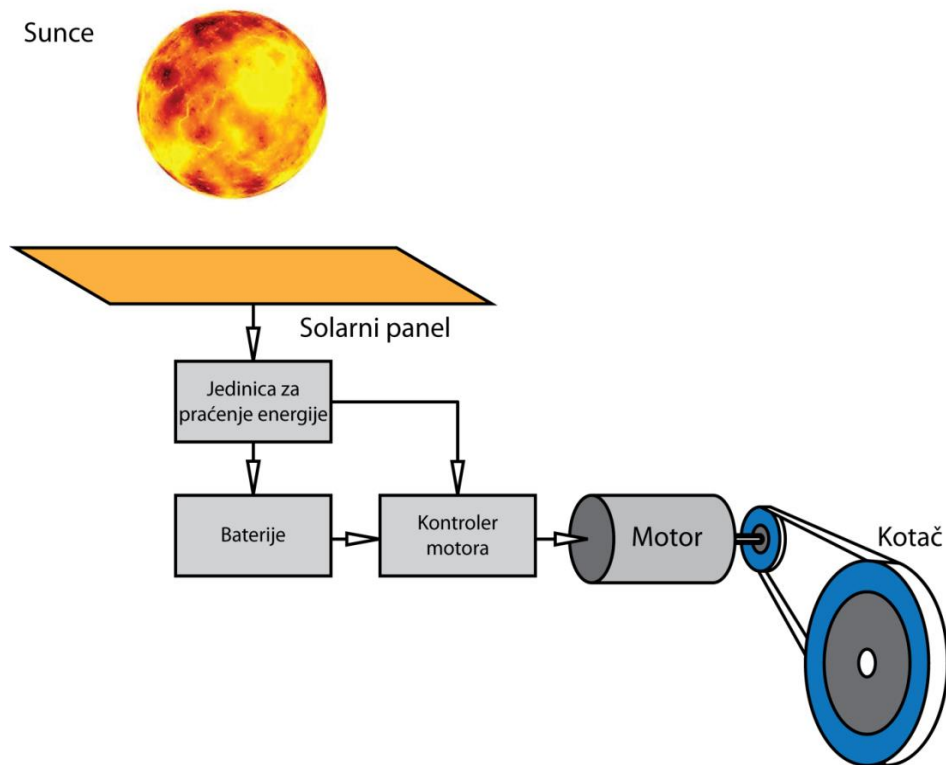


Slika 15. Poboljšanje iskoristivosti

## 5. Osnovni princip fotonaponskog vozila

Solarno vozilo je izgrađeno s tri glavne električne komponente u paraleli. To su baterija, solarni paneli i elektromotor.

S takvim spojem, osim što se baterije mogu izravno puniti preko solarnih panela, ostvaruje se dodatna mogućnost napajanja motora iz oba izvora. Zapravo vozilo bi moglo voziti samo uz pomoć sunčeve energije, ali s ograničenim mogućnostima ubrzavanja. Baterija pruža potpora kad god solarni paneli nisu u mogućnosti proizvesti dovoljno električne energije.



Slika 16. Shema električnog sustava fotonaponskog vozila

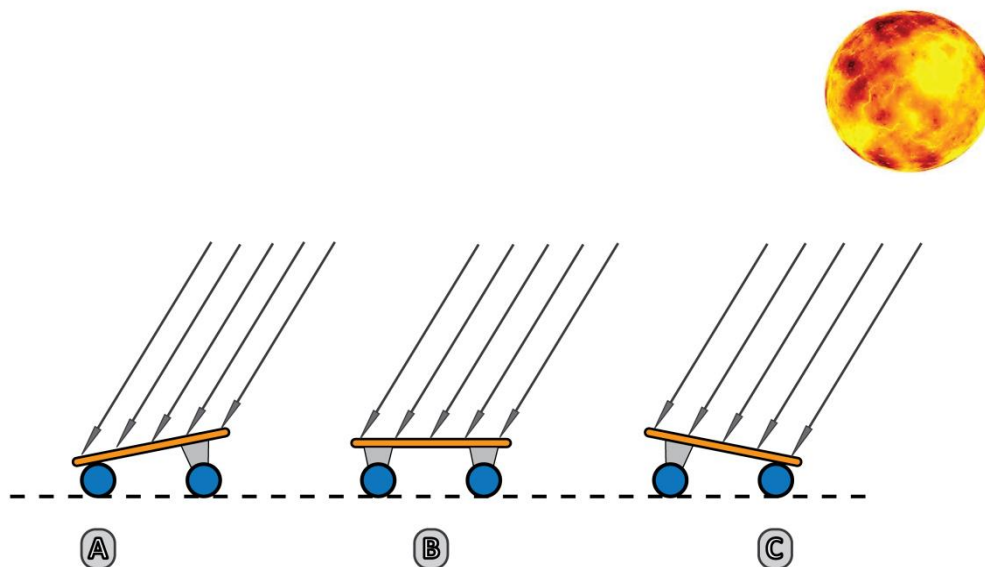


## 6. Pohrana energije

### 6.1 Apsorpcija energije

Pod optimalnim uvjetima, na površini Zemlje može se dobiti 1 kW/m<sup>2</sup>, a stvarna vrijednost ovisi o lokaciji, godišnjem dobu, dobu dana, vremenskim uvjetima itd. U Hrvatskoj je prosječna vrijednost dnevne insolacije na horizontalnu plohu 3-4,5 kWh/m<sup>2</sup>. Pogledom na kartu s insolacijskom razinom jasno je da Europa nije na vrlo pogodnom području, ali unatoč tome u Europi je direktno iskorištavanje sunčeve energije u velikom porastu.

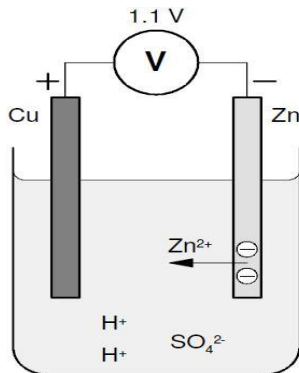
Kako nismo na povoljnoj lokaciji što se insolacije tiče, potrebno je da poboljšamo određene dijelove na solarnom automobilu. Jedan od načina je da auto konstruiramo tako da upija više sunčeve energije.



Slika 171. Prikaz vozila s različitim položajima apsorpcije sunčeve energije

## 6.2 Baterija - povijest i osnovni pojmovi

Prva baterija nastala je 1793. godine a izradio ju je Alessandro Volta pokojemu je dobila ime – Voltin članak. Njen princip bio je vrlo jednostavan - otopinu  $H_2SO_4$  ili  $KOH$  stavimo između bakra i cinka i dobili smo bateriju . Njen napon je 1.1 V



Slika 18. Voltin članak

Napon baterije određuje se prema elektrokemijskom nizu ( Voltin niz) potencijal pojedinog metala prema standardnoj vodikovoj elektrodi.

Au	Ag	Cu	H	Pb	Sn	Ni	Cd	Fe	Cr	Zn	Al	Na	Li
+1.36	+0.80	+0.34	0	-0.13	-0.14	-0.23	-0.40	-0.44	-0.56	-0.76	-1.28	-2.71	-3.05

Slika 19. Voltin niz

Prije nego počnemo razmatrati pojedine vrste baterija, upoznajmo se s nekim osnovnim pojmovima koje ćemo susretati:

### Kapacitet

mjera za količinu električne energije koju baterija može pohraniti prilikom punjenja, te koju može dati tijekom pražnjenja. Uobičajena mjerna jedinica je Ah (ampersat).

### Gustoća energije

omjer sadržane električne energije i mase baterije, obično se navodi u Wh/kg (vatsati po kilogramu). Veća gustoća energije znači lakšu bateriju uz isti kapacitet i nazivni napon.

### Ciklus

pod ciklusom podrazumijevamo jedno pražnjenje i jedno punjenje baterije. Obično se podrazumijeva da se baterija uvijek puni do kraja, a prema tome koliko se baterija isprazni razlikujemo plitke i duboke cikluse.

### Životni vijek

broj ciklusa nakon kojeg kapacitet baterije nepovratno padne ispod 80% početnog kapaciteta. Također, pod životnim vijekom može se smatrati i vrijeme (npr. broj godina) nakon kojeg dolazi do osjetnog pogoršanja performansi baterije.

### Održavanje baterije

periodičko pražnjenje baterije do donje granice nakon kojeg slijedi ponovno punjenje do punog kapaciteta, a sve u cilju eliminacije ili smanjivanja izgubljenog kapaciteta kao posljedice kristalizacije ili memorijskog efekta.

## 6.3 Vrste baterija

### NiCd (nikal-kadmij) baterija

Spomen je zaslužila zato jer je udarila temelj današnjem poimanju punjivih baterija, a postavila je i dobru tehnološku osnovu za razvoj novijih vrsta. Unatoč tome što nudi nisku gustoću energije, a i kemijski sastav joj je daleko od ekološki prihvatljivog (toksični kadmij), veliki životni vijek (čak i do 1500 ciklusa) i dobro podnošenje većih struja pražnjenja čini je i danas vrlo pogodnom za određene primjene (kućanski uređaji i alati, prijenosne radio-stanice, medicinska oprema, profesionalne video- kamere). Njenu prikladnost za široke mase umanjuje činjenica da s ovom baterijom treba znati ispravno postupati, zbog vrlo izraženog problema kristalizacije.

### NiMH (nikal-metal-hidrid)

Donijela je mnoga poboljšanja, ali i neke probleme. Osnovni napredak je u tome što je toksični kadmij zamijenjen hidridom (spojem metala i vodika) netoksičnog metala. Ovaj ekološki znatno prihvatljiviji kemijski sastav donio je i znatno veću (do 50%) gustoću energije od NiCd baterija. NiMH baterije se odlikuju i znatno smanjenom kristalizacijom, pa su stoga osjetno manje zahtjevne za svakodnevno korisnika jer traže tek minimalno održavanje. Osnovni nedostatak im je oko dva puta kraći životni vijek, no ne brinite previše - NiMH bateriju ćete napuniti i isprazniti barem 300-500 puta prije nego primijetite pad kapaciteta. Potencijalni nedostatak je i vrlo izraženo samopražnjenje: već 24 sata nakon punjenja baterija će izgubiti oko 10% svog kapaciteta, a nakon toga samopražnjenje polako pada i smanjuje se na 10% mjesečno. Ni zbog ovoga ne trebate brinuti jer ćete napunjenu bateriju vjerojatno iskoristiti unutar nekoliko dana.

### Litij-ionska baterija (Li-Ion)

Predstavlja veći korak u evoluciji punjivih baterija. Budući da kao osnovnu aktivnu tvar koristi litij, jedan od najlakših metala, ova vrsta baterije odlikuje se vrlo malom masom. Jedna od najvećih prednosti joj je vrlo velika gustoća energije, čak dvostruko veća od tipične NiMH baterije, a odlikuje je i tri puta veći nazivni napon od niklenih baterija (3.6V u odnosu

na 1.2V). Velika prednost joj je i u tome što, za razliku od baterija na bazi nikla, Li-Ion baterija ne zahtijeva apsolutno nikakvo održavanje jer ne pati ni od memorijskog ni od kristalizacijskog efekta. Dakle, moguće ju je puniti bilo kada i nema potrebe za periodičkom pražnjenjem. Li-Ion baterija je, sama po sebi, izuzetno osjetljiva na prepunjavanje i pretjerano pražnjenje, no za to se, umjesto korisnika, brine elektronika koja je ugrađena u svaku komercijalnu Li-Ion bateriju. Iako nije pogodna za pražnjenje jakim strujom, pokazala se kao izvrsno rješenje za mobilne telefone. Njen relativno dug životni vijek (500-1000 ciklusa) može biti skraćen starenjem baterije i bez njene upotrebe, što je znatno naglašenije nego kod baterija na bazi nikla.

### **Zn-Air (cink-zrak) bateriji**

Iako ova baterija ne spada u punjive, pokazala se kao vrlo korisnom u funkciji rezervne baterije ili baterije za hitne slučajeve. Ova baterija isporučuje se hermetički zapakirana i specifičnog je izgleda. Kao što joj ime govori, stvaranje električne energije u ovoj bateriji se zasniva na reakciji cinka i zraka, tj. kisika. Kako bi kisik imao pristup do cinčanih elektroda u unutrašnjosti baterije, kućište baterije probušeno je mnoštvom malih otvora. Kada se hermetičko pakiranje jednom otvori, kisik u dodiru s cinčanim elektrodama proizvodi električnu energiju i baterija se postupno prazni, koristili je mi ili ne. Kapacitet ovih baterija obično je više nego tri puta veći od prosječnih Li-Ion ili NiMH baterija. Kada prestane davati napon, Zn-Air bateriji preostaje samo recikliranje. Kao zanimljivost spomenimo da su ove baterije komercijalno dostupne i u obliku punjača.

### **Gorive ćelije (eng. *fuel cell*)**

Princip na kojem se teoretski zasnivaju iznimno je jednostavan, a temelji se na procesu suprotnom elektrolizi vode. Elektroliza vode je razlaganje vode na vodik i kisik provođenjem električne energije kroz nju. Ideja je obrnuti ovaj postupak te iz vodika i kisika dobiti vodu i električnu energiju. Ovaj ekološki savršen postupak izgleda vrlo jednostavno u teoriji, no praksa pokazuje da je ovaj proces u praksi znatno teže izvesti. Naravno, ovdje ne govorimo o oksidaciji vodika sagorijevanjem, već kontroliranim procesom uz pomoć katalizatora (tvari koja taj proces potiče). Postoje mnoge varijante gorive ćelije, od onih koje rade na elementarni vodik i kisik, do onih koje vodik dobivaju indirektno. Za mobilnu elektroniku zanimljive su gorive ćelije koje kao gorivo troše metanol. Umjesto da mobitel priključimo na punjač, gorivoj ćeliji bit će dovoljno doliti malo metanola i aparat će raditi

## 6.4 Pohrana energije kod solarnog vozila

Električna energija se provodi prema baterijama za spremanje (akumulatori), ili direktno na uređaj za upravljanje radom motora ili kombinirano na oboje.

Kod solarnih automobila baterija služi za opskrbu energije u vrijeme oblačnog vremena, također i za vožnji po noći.

Do danas se razvilo mnogo različitih vrsta baterija za pogon električnog (solarnog) vozila. Najviše se razvija litij ionska baterija koja se i primjenjuje u većini hibridnih i električnih (solarnih) vozila. Osim litij ionske baterije, za pohranu energije kod baterijskih električnih (solarnih) vozila koriste se i olovni akumulatori, nikel kadmijeve baterije, natrij nikel klorid baterije, nikel metal hibridna baterija i baterije na bazi litij ionskih polimera. Baterije koje se primjenjuju kod tih automobila moraju zadovoljavati zahtjeve postavljene na njih:

- velika specifična energija [kWh/kg] (lagana s velikom količinom pohranjene energije)
- velika specifična snaga [W/kg] (velika specifična snaga na jedinicu mase),
- velika energijska gustoća [kWh/m] (male dimenzije s velikom količinom pohranjene energije)
- dugo razdoblje rada (mogućnost višestrukog punjenja i pražnjenja bez značajnijeg smanjenja svojstava baterije)
- kratko punjenje
- dubok ciklus djelovanja (mogućnost pražnjenja do kraja bez posljedica za bateriju)
- sigurnost
- mogućnost reciklaže
- mogućnost djelovanja u širokom temperaturnom području
- cijena (što niža)

Tablica 1. Karakteristična svojstva pojedinih tipova baterija

	Pb/ac	Ni/Cd	NiHM	Li-ion	Li/p	Na/NiCl <sub>2</sub>
Specifična energija [kWh/kg]	35-40	55	70-90	125	155	80
Specifična snaga [W/kg]	80	120	200	260	315	145
Gustoća energije [kWh/m <sup>3</sup> ]	0	90	90	200	165	130
Razdoblje djelovanja [broj punjenja]	300	1000	600	+600	+600	600
Vrijeme punjenja[h]	6-8	6-8	6	4-6	4-6	4-6
Doseg [km]	75	100	200	200	250	200

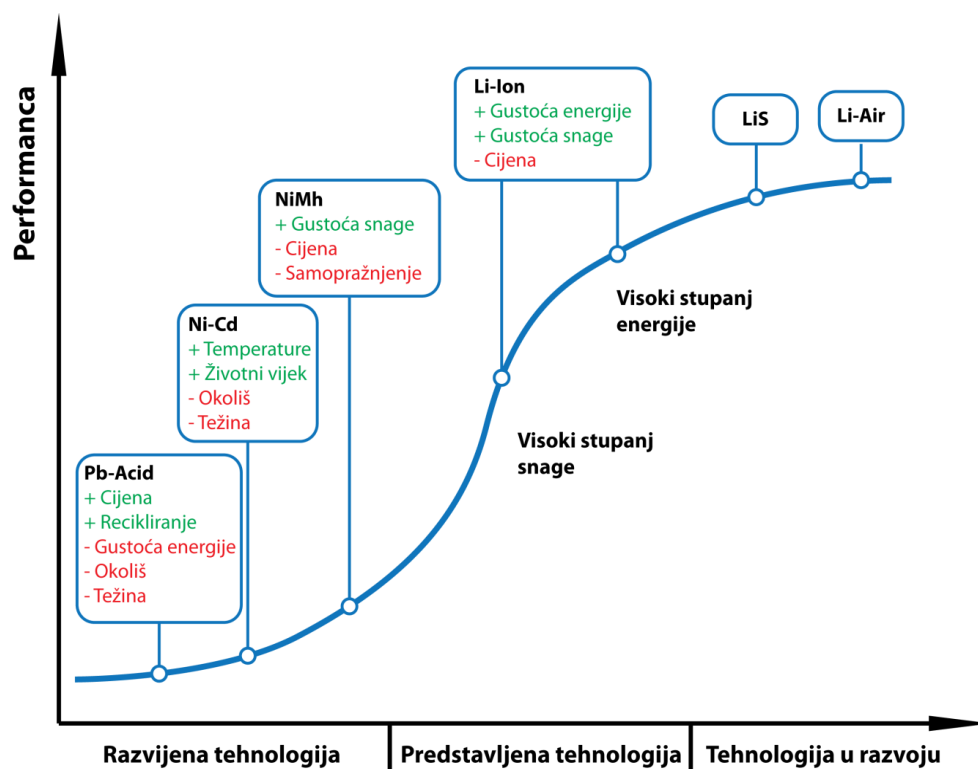


Slika 20. Li-ion baterija u kućištu za lakšu ugradnju

Ipak, nove baterijske tehnologije omogućavaju produljenje dometa električnih automobila za čak deset puta. Jedan od primjera takvih tehnologija su aluminij – zrak (Li-Air) baterije koje je razvila tvrtka Phinergy, a koje su nakon ugradnje u Citroenovo električno vozilo omogućile povećanje njegova dometa na više od 1500 kilometara. Ipak, ova vrsta baterija nije punjiva u klasičnom smislu, budući da ih je potrebno puniti destiliranom vodom približno svakih 300 kilometara i mogu prije svega biti korisne za povremena dulja putovanja ili kao pričuvna baterija za slučaj da se baterija ugrađena u vozilo isprazni tijekom putovanja

daleko od mjesta gdje je možete napuniti. Razlog tome jest i činjenica da se tijekom korištenja baterije uz destiliranu vodu troše i same aluminijske elektrode koje se troše znatno brže nego kod klasičnih baterijskih tehnologija koje se koriste u električnim vozilima.

Životni vijek baterija je između 4 i 7 god., ovisno o vrsti baterije. Nakon toga potrebna je zamjena, što može rezultirati odbačenim baterijama u prirodi. Iako postoje zakoni o odlaganju baterija, za taj problem rješenje su našli sami proizvođači vozila – ponudivši kupcima mogućnost iznajmljivanja baterija, što znači da kupac nije odgovoran za recikliranje baterija, već proizvođač.



Slika 22. Karakteristike i dijagram baterijske tehnologije

Tablica 2. Očekivani razvoj performansi baterija

	Gustoća energije (Wh/kg)	Gustoća snage (W/kg)	Cijena (Euro/kwh)
2010	100	1000 - 1500	1000 - 2000
2015	150	1000 - 1500	250 - 300
2020	200 - 250	1000 - 1500	150 - 200
2030	500	1000 - 1500	100

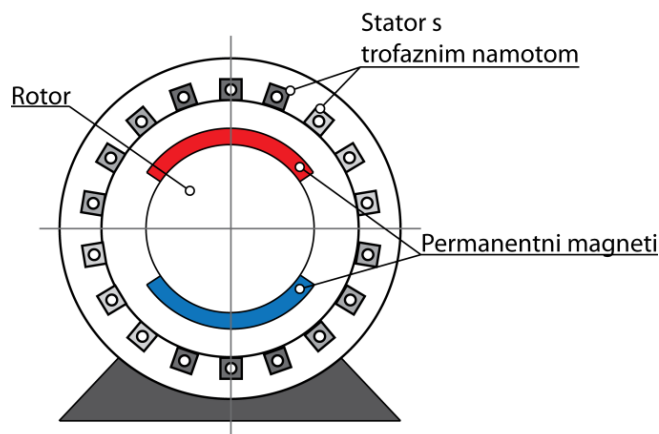
## 7. Pogon solarnog vozila

Kod električnog (solarnog) vozila na motor otpada prilično mali dio cijene od ukupne cijene vozila. Elektromotori su znatno jednostavnije konstrukcije od motora sa unutarnjim sagorijevanjem. Moderni motori sa unutarnjim sagorijevanjem sastoje se od oko tisuću pokretnih dijelova. Elektromotori se u pravilu sastoje od tri do pet pokretnih dijelova što ih čini znatno pouzdanijim i trajnijim te praktički ne zahtijevaju nikakvo održavanje. Nema ulja niti uljnih i zračnih filtera, praktički nemaju dijelova koji se troše. Uz to su znatno lakši i manji.

Elektromotor je prilično općenit pojam. Postoji više vrsta elektromotora koji se znatno razlikuju po konstrukciji i principu rada. Jedna vrsta motora za svoj rad zahtjeva istosmjernu struju te ih nazivamo istosmjerni motori (DC). Druga vrsta radi na izmjeničnu struju te ih nazivamo izmjenični motori (AC). Neke vrste mogu koristiti i izmjeničnu i istosmjernu struju i nazivamo ih univerzalni motori. Svaka od ovih grupa i dalje se dijeli na svoje podvrste s obzirom na konstrukciju. Tako imamo istosmjerne motore s permanentnim magnetima, motore sa serijskom, paralelnom ili kombiniranom uzбудom te sinkrone i asinkrone izmjenične motore. Svi ti motori razlikuju se i po naponu potrebnom za rad, a kod izmjeničnih je još važna i frekvencija struje. Svaki od njih razlikuje se po karakteristikama, npr. krivulji momenta, stupnju iskoristivosti itd. Kod pogona vozila susrećemo sve ove tipove elektromotora. Do nedavno su istosmjerni (DC) motori suvereno vladali kao pokretači električnih (solarnih) vozila, no sve više ih istiskuju izmjenični motori (AC) koji su po svojoj konstrukciji jednostavniji, ali je upravljanje kompliciranije. Elektromotori se upravljaju kontolerom.

Također vrlo važna prednost električnog (solarnog) vozila, jest rekuperacija (energija kočenja). Većina motornih kontrolora omogućuju vozaču kočenje pomoću motora umjesto mehaničkim kočnicama. U vrijeme kočenja, elektromotor prelazi u generatorski režim rada u kojem se pritom energija kočenja pretvara u električnu energiju. Ta dobivena električna energija se pohranjuje u bateriju.





Slika 22. Trofazni asinkroni motor s permanentnim magnetima

Glavinu tržišta elektromotora u svijetu pokrivaju dva proizvođača CSIRO ( Council for Scientific and industrial Research) te Mitsuba. Oba proizvođača predstavljaju sam vrhunac tehnologije elektromotora za primjenu u električnim automobilima

## 7.1 CSIRO elektromotori

Laboratorij Csiro osnovan je u Australiji s ciljem poboljšanja sekundarnih djelatnosti rudarenja. U suradnji s Aurora solar car temom 1997. godine dizajniraju visoko učinkoviti motor koji se ugrađuje u kotač automobila.

Licenca za taj električni motor predana je firmi Marand koja nastavlja usavršavati model te izrađuje dvije verzije Steel – back i halbach

	STEEL -BACK	HALBACH
<b>Rated power</b>	1800 W	1800 W
<b>Continuous power</b>	4 KW	5 KW
<b>Peak power</b>	10 KW	12 KW
<b>Efficiency</b>	97.3 %	98.4 %
<b>Mass</b>	10	7

Tablica 3. Usporedba Steel back i Halback motora

Motor je smješten unutar kotača solarnog vozila, gdje se dva mnagnetna prstena rotiraju zajedno s kotačem oko statora koji je fiksno pozicioniran na statorsku osovinu.

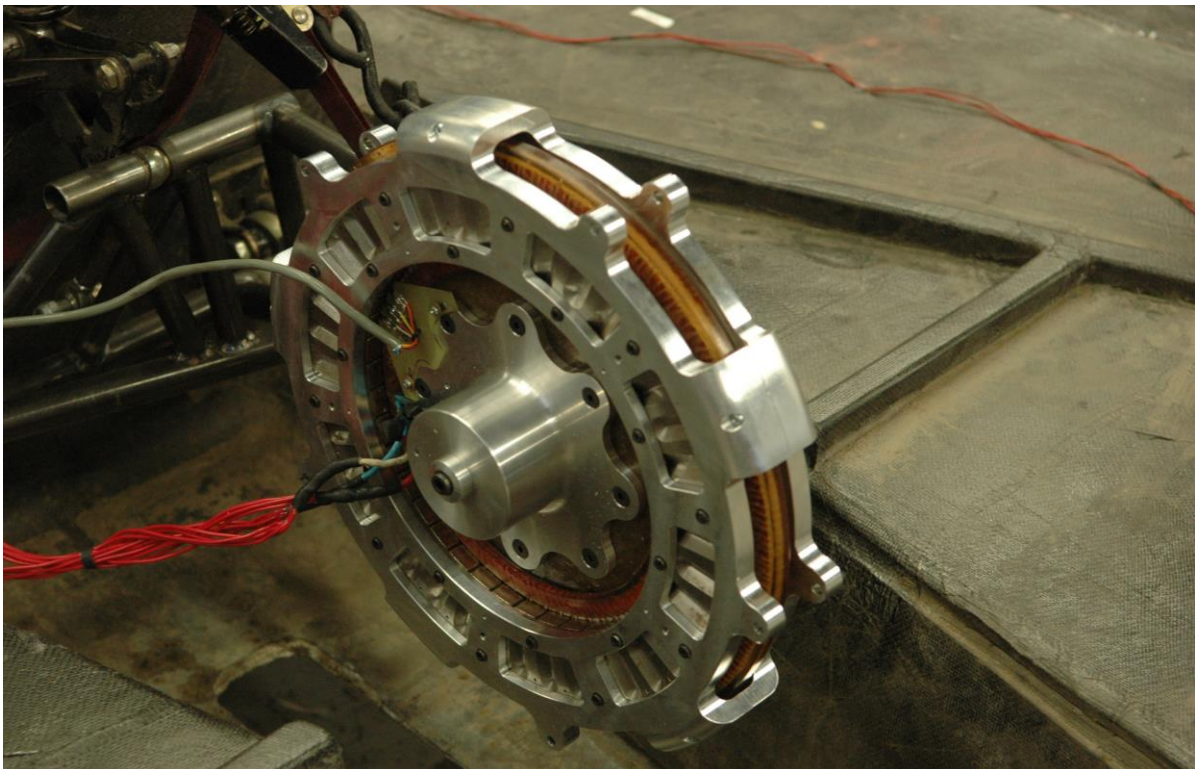
Halbach motor (novija izvedba) ima 120 magneta naspram 40 magneta u Steel back izvedbi, što mu omogućuje veće ubrzanje uz istu ili manju struju.



Slika 23. Magnetsko prstenje

Svaki magnetski prsten sastoji se od 40 neodimijskih rijetkih zemljanih magneta, sveukupno 80 magneta po motoru. Međusobno su razmaknuti 10.9 mm i privlačna sila iznosi 5kN.

Svki motor u sebi ima 40 metara Litz žice, a sator se sastoji od 6 namotaja u tri sekcije koja se ponavlja 40 puta.



Slika 24. Sklopljeni CSIRO motor

## 7.2 Mitsuba električni motor

Mitsuba je tvrtka osnovana u Japanu . Prvotno su izrađivali svjetla za bicikle, potom brisače te startere za motocikle a u novije vrijeme bave se isključivo proizvodnjom električnih motora koji se koriste u trkačim i cestovnim automobilima.

Pod brandom Mitsuba way dizajniraju svoj najpoznatiji model električnog motora M2096 II koji se ugrađuje u kotač. Uz težinu od 11 kg motor snage 2 kw postiže učinkovitost od 95%.

Ovaj motor nema četkice te se nalazi na nepomičnom statoru koji ujedno služi i kao osovina. Sastoji se od 36 koncentrično postavljenih magneta, međusobno spojenih na upravljački mehanizam.



Slika 25. Sklopljeni Mitsuba motor

Motor se ističe učinkovitošću, kompaktnim dimenzijama, malom masom t iznimnom pouzdanošću, što je i osnovna filozofija tvrtke.

## 8. Konstrukcija fotonaponskog vozila

U mehaničkom sustavu solarnog vozila postoje tri glavne stvari. To su karoserija, okvir i ovjes. Oni služe istoj svrsi kao svim automobilima.

Međutim kod solarnih vozila imamo različita ograničenja:

- mora biti lagan
- kompaktan
- aerodinamičan s velikom krovnom plohom za dovoljno prostora za solarni panel

To dovodi do toga da će vozilo biti tako konstruirano da radi i izgleda drugačije od svih proizvedenih automobila.

### 8.1 Karoserija i aerodinamika

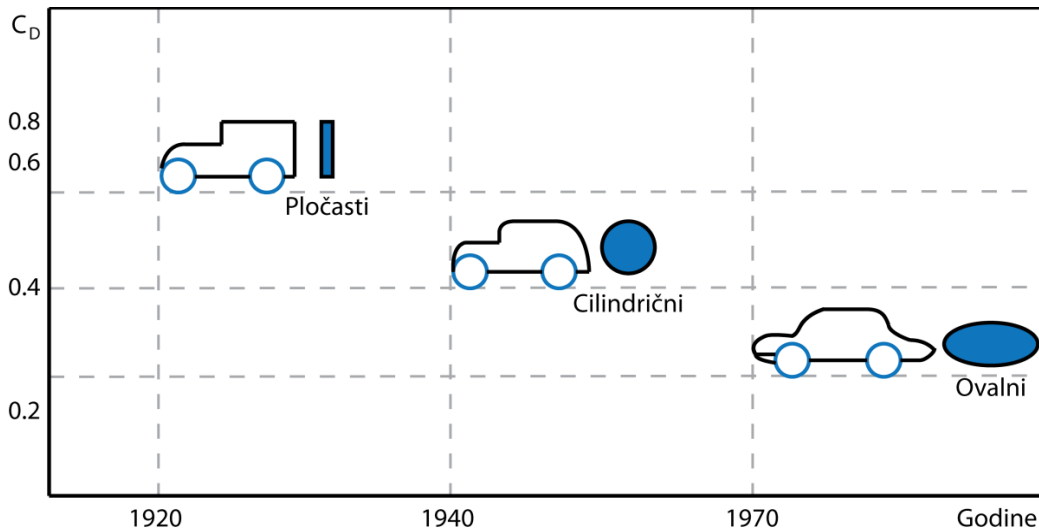
U zadnjih pet godina većina proizvođača se odlučuju na tri raspoređena kotača, prednja dva kotača služe za upravljanje vozila, dok je zadnji kotač pogonski.

U ovoj konfiguraciji vozač uglavnom sjedi bliže zadnjem djelu vozila, taman ispred pogonskog kotača.

Karoserije koja sadrži solarne panele imaju takozvanu oplatu koja okružuje kotače radi smanjenja turbulencije. Mnogi proizvođači preferiraju izvedbu karoserije s aktivnim dijelom koji se po potrebi može pomicati omogućujući dovoljno prostora za veći kut zakreta kotača pri manjim brzinama. Time je ujedno omogućen i manji radijus zakreta vozila što je vrlo važno kod gradske vožnje.

Za optimizaciju i preliminarno određivanje performansi automobila, koriste se računalno potpomognuti programi za rješavanje problema mehanike fluida. Takvi programi, odnosno alati nazivaju se na engleskom Computational fluid dynamics (CFD).

Solarni automobili se proizvode tako da imaju što niži koeficijent otpora ( $C_d$ ), za razliku od ostalih automobila na kojima se daju veća važnost na ostale faktore kao što su izgled i komfor prilikom vožnje, veći prtljažni prostor itd. Zbog toga koeficijent otpora ( $C_d$ ) za solarno vozilo može biti manji od 0,1, što ga čini najaerodinamičnijim vozilom u svijetu.



Slika 26. Prikaz smanjenja koeficijenta otpora tokom godina

Karoserija je izgrađen od laganih kompozitnih materijala. Većina proizvođača koriste karbonska vlakna, koje je poznato po svojoj izuzetnoj jakosti i maloj masi. Ostali proizvođači koriste ipak staklena vlakna zbog svoje povoljnije cijene, ali nisu niti približno tako jaki ili čvrsti. Prije nego što je moguće napraviti karoseriju, moraju se napraviti visoko precizni kalupi. To je mukotrpan proces koji uključuje mnoge sate strojne obrade, brušenje i završne obrade poliuretanske pjene s visokom gustoćom.

Karoserija je izrađena iz jednog ili dva sloja karbona, ili od kompozitnog materijala gdje vanjski slojevi čine karbon, a unutarnji takozvani materijala Nomex u obliku pčelinjeg saća.

Konačni rezultat je lagana izdržljiva karoserija koja može biti pojačana s odgovarajućim pregradama u unutrašnjosti vozila.

## 8.2 Okvir vozila

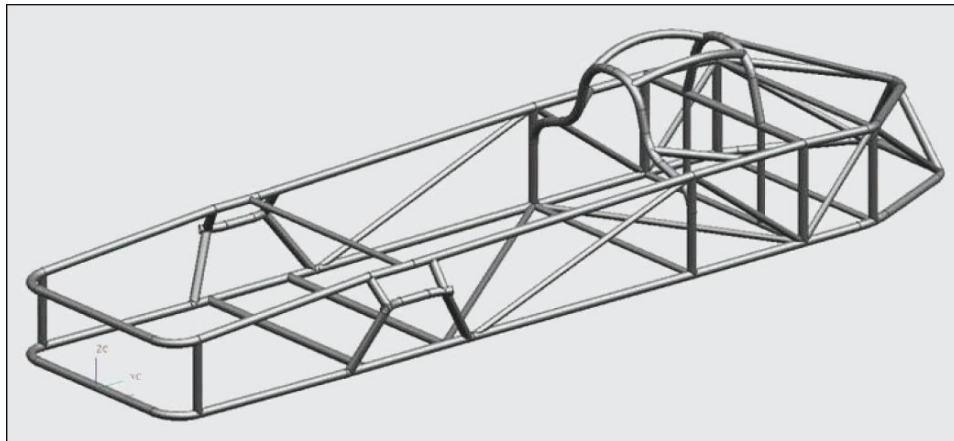
Okvir ima tendenciju da se mnogo više razlikuje od oblika karoserije među proizvođačima.

Neki proizvođači u potpunosti integriraju okvir i karoseriju u školjkasti oblik. S time postižu manju masu i povećanju na krutosti karoserije, ali taj način je daleko najteži za analizirati i proizvoditi. Analiza i izgradnja je nešto jednostavnija nego kod potpuno integriranih školjki, ali kad bi došlo do nepravilnosti pri izgradnji dobivamo puno slabiji okvir nego konstruiran.

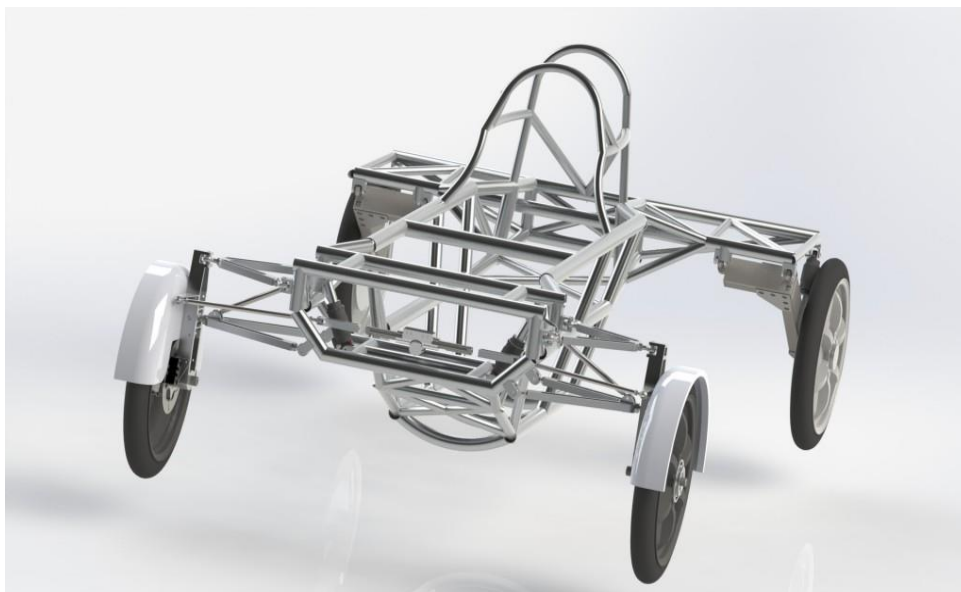
Opet drugi proizvođači koriste takozvani prostorni cjevasti okvir karoserije koji pričvršćen na ljsku. Oni mogu biti od aluminija ili čelika zavareni. Prednost ove vrste okvira je da za razliku od kompozitnih materijala, da je metal izotropan (proizlazi u skladu s

mehaničkim svojstvima u svim smjerovima). To nam olakšava konstrukciju i analizu, a programi poput ANSYS-a obavljaju analizu metodom konačnih elemenata s relativnom lakoćom.

Sigurnosni i prometni propisi zahtijevaju analizu koja pokazuje da će okvir biti oporan na sudare sa svih strana i uključujući prevrtavanje. Proizvođači bi trebali izvršiti analizu kako bi osigurali da je okvir tijekom vremena otporan na opterećenje ovjesa, bez pretjeranog zamora materijala. Okvir ujedinjuje karoseriju i ovjes. Idealno bi bilo da se konstruiraju sva tri dijela paralelnim načinom uz stalnu komunikaciju konstrukcijskih timova. Nedostatak komunikacije može dovesti do slabo optimiziranog vozila.



Slika 27. Cad model okvira



Slika 28. Okvir sa integriranim ovjesom i kotačima



### 8.3 Ovjes vozila

Ovjes vozila se sastoji od 3 glavna dijela:

- amortizera
- opruge
- gume

Sve tri komponente moraju biti ispravne da bi se osiguralo dobro prianjanje gume s cestom. Većina pojedinačnih komponenata od ovjesa nisu komplicirana, dok je njihova geometrija, zajednički rad, različiti uvjeti na cesti i odaziv vozača izuzetno kompleksna.

Najbolja vozila će imati ovjes koji je pažljivo podešen na smanjenje trošenja guma, amortizera s oprugama koja su pravilno podešena na prigušivanje i otklon, te na rukovanje koji ima vrlo dobar odaziv. Postizanje odličnog ovjesa nije mali pothvat. Potrebno je nekoliko stotina sati za konstrukciju, analizu, simulaciju i mehaničke prilagodbe da bi se kao takav postigao. Prednji kotači često pružaju većinu kočenje uz pomoć kočionih čeljusti na svaki kočioni disk. Dva glavna hidraulična cilindra su potrebna da bi se osiguralo kočenje, ako dođe do kvara jedne čeljusti, druga čeljust je dalje na raspolaganju.

Stražnji ovjes ima oblik takozvane prateće ruke koncept sličan motociklu i s motorom koji je izravno postavljen na stražnji dio kontrolne ruke. Obično zadnje disk kočnice nisu potrebne, jer vozilo posjeduje rekuperacijsko kočenje.

Kad bi se ovjes sastojao samo od opruga i guma, dakle bez amortizera, vozilo bi apsorbiralo izbočine na cesti, ali zbog neprigušivanja vozilo bi se nastavilo ljuljati i vrlo je lako moguće da bi se izgubio kontakt s podlogom. Zajedno s amortizerima, ovjes apsorbira izbočine, ali i sprečava vozilo od ljuljanja i poskakivanja i time vraća kontrolu



Slika 29. Ovjes fotonaponskog vozila

## 9. Otpori kretanja fotonaponskog vozila

### 9.1 Vučna sila vozila

Vučna sila je rezultat trenja između kotača i podloge po kojoj se kotač kreće. Za vozila kod kojih se vučna sila prenosi na podlogu preko kotača vučno trenje je pozitivan efekt.

Najveća moguća vučna sila između kotača i podloge ovisi o:

- značajkama materijala u dodiru
- makro- i mikroskopskoj geometriji na mjestu kontakta (hrapavost)
- silama koje djeluju na mjestu kontakta
- veličini dodirne plohe

Pogon vozila mora osigurati vučnu silu i brzinu koju želimo realizirati. Vučna sila kompenzira otpore vožnje.

Sile koje djeluju na vozilo:

- Vanjske sile utječu na gibanje (Otpori vožnje)
- Unutarnje sile značajne za naprezanje pojedinih elemenata konstrukcije vozila (bitno kod konstruiranja)

Ukupni otpori vožnje sastoje se od:

Otpora prilikom vožnje konstantnom (najvećom) brzinom po ravnoj horizontalnoj cesti, bez protu-vjetra:

- Otpor kotrljanja ( $R_k$ )
- Otpor zraka ( $R_z$ )
- Otpor prijenosa snage ( $R_t$ ) –mehanički gubici u transmisiji

Otpor vožnje na usponu, u zavoju, prilikom ubrzavanje, pri vožnji protiv vjetra, itd.:

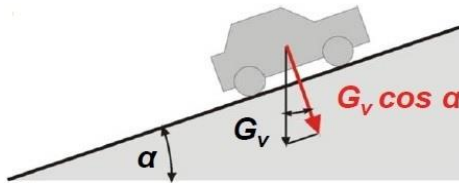
- Otpor uspona ( $R_p$ )
- Otpor ubrzanja, tj. inercije ( $R_i$ )
- Otpori u zavoju



## 9.2 Otpor kotrljanja i deformacije kotača

Dio kotača u dodiru s podlogom deformira se prilikom vožnje, otpor koji predstavlja rad utrošen na deformaciju:

$$R = f_k G_v \cos \alpha \quad (0.2)$$



Slika 30. Vozilo na kosini

Prilikom vožnje na usponu, uzima se u obzir samo onaj dio sile teže, koji djeluje okomito na podlogu, povećanjem kuta uspona otpori kotrljanja se smanjuju. Koeficijent otpora kotrljanja ovisi o brzini kretanja vozila. U mirovanju ( $v=0$ ), vrijednost mu je statička  $f_k$ .

Za statičku vrijednost  $f_k$  usvaja se:

- $f_k = 0,01$  – za dobru asfaltnu podlogu

$f_k$  Koeficijent otpora kotrljanja [-]

$v$  Brzina gibanja [m/s]

$G_v$  Ukupna težina vozila (prazno vozilo i opterećenje)  $\left[ kg \frac{m}{s^2} \right]$

$\alpha$  Kut uspona podloge [°]

Deformacije na mjestu kontakta pneumatike i podloge :

- Cestovna vozila - dominiraju deformacijom pneumatike
- Terenska vozila - dominiraju deformacijom podloge

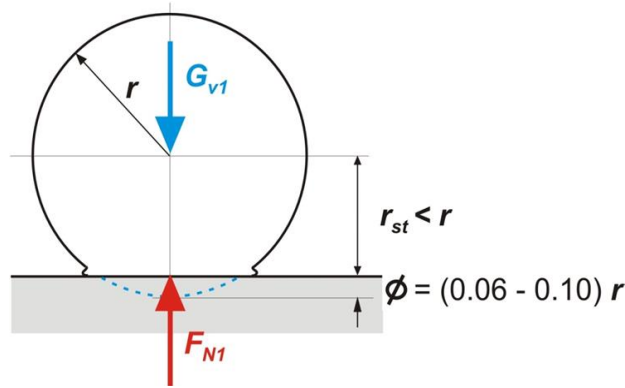
Otpori trenja u ležajevima kotača je zanemarivi ( iznose  $< 1\%$  ).

Dva različita modela opisuju nastajanje otpora kotrljanja:

- Tvrda podloga - mekani kotač
- Mekana podloga - tvrdi kotač

### 9.3 Tvrda podloga - mekani kotač

Kotač u vrijeme mirovanja:

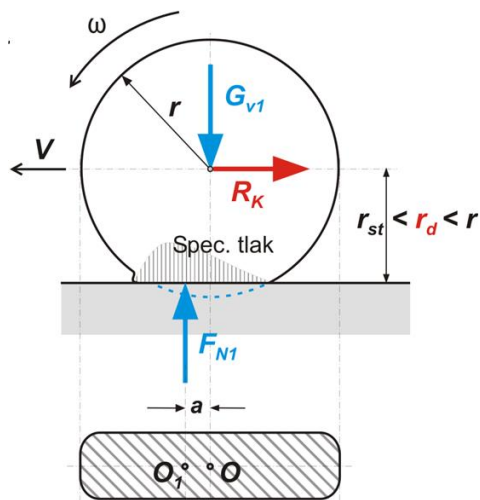


Slika 31. Prikaz deformacije kotača pri mirovanju

Deformacija  $\phi$  opada s porastom tlaka u pneumatiku. Ako je pneumatik jače napuhan  $\phi \rightarrow 0$ . Porastom deformacije  $\phi$  raste otpor kotrljanja (negativno), no raste udobnost vožnje (pozitivno), pod pretpostavkom da nema udarnih opterećenja u obliku oštih rubova, koji mogu dovesti do presjecanja pneumatika.

- $r$       Radijus ne deformiranog kotača [m]
- $r_{st}$     Statički radijus kotača [m]
- $\phi$       Deformacija kotača [m]
- $G_{v1}$     Težina vozila na osi kotača [N]
- $F_{N1}$     Reakcija podloge [N]

Kotač u vrijeme vožnje:



Slika 32. Prikaz deformacije kotača pri vožnji

Dinamički radijus kotača mjerodavan je za određivanje obodne brzine kotača, tj. brzine vožnje vozila. Opseg kotača:

$$O = 2 \pi r_d \quad (0.3)$$

Da bi se kotač mogao okretati na osovini mora djelovati sila suprotna sili  $R_k$  :

$$\Sigma M_O = 0 \rightarrow R_k r_d = F_{N1} a \rightarrow R_k = F_{N1} \frac{a}{r_d} = G_{v1} \frac{a}{r_d} \quad (0.4)$$

$v$	Brzina vozila [m/s]
$\omega$	Kutna brzina vrtnje kotača [rad/s]
$r_d$	Dinamički radijus kotača [m]
$a$	Pomak hvatišta sile [m]
$G_{v1}$	Težina vozila na osi kotača[N]
$F_{N1}$	Reakcija podloge [N]
$F_V$	Iskoristiva vučna sila [N]
$M_p$	Pogonski moment [Nm]

Pokušavamo smanjiti težina vozila  $G_v$  jer se time smanjujemo i  $R_k$  , a posredno i potrošnja kao i emisija štetnih plinova.

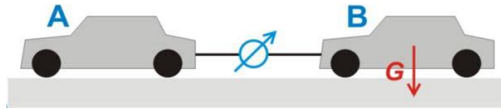
Porastom  $r_d$  i pada  $R_k$  postizemo vozilo koje lakše savladava neravnine na kolniku. Povišenjem udaljenosti  $a$  , povisuje se i  $R_k$  . Nemoguće je precizno odrediti veličinu  $a$ .

Uvodi se koeficijent otpora kotrljanja:

$$f_k = \frac{a}{G_{v1}} \quad (0.5)$$

$$R_k = f_k G_{v1} \rightarrow f_k = \frac{R_k}{G_{v1}} \quad (0.6)$$

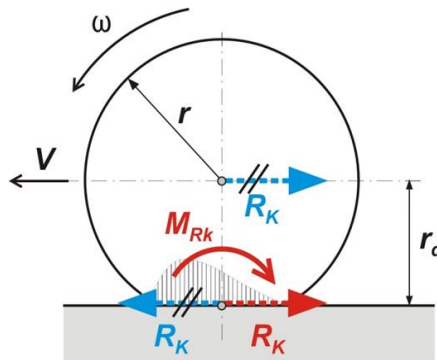
Silu  $G_v$  mjerimo vaganjem vozila (masa), dok se  $R_k$  određujemo tako da vozilo B povežemo dinamometrom za vozilo A i očita se sila potrebna za pokretanje.



Slika 33. Prikaz načina za određivanje  $R_k$

Silu  $R_k$  možemo eliminirati spregom (momentom) kotrljanja. Hvatište  $R_k$  premjestimo iz osovine na kontaktno mjesto pneumatike i kolnika:

$$M_{Rk} = R_k r_d = G_{v1} f_k r_d \quad (0.7)$$

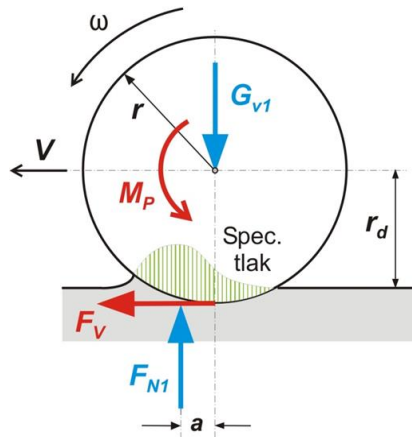


Slika 34. Prikaz eliminacije  $R_k - a$

## 9.4 Mekana podloga – tvrdi kotač

Na mjestu uklinjenja stvara se moment otpora koji pogonski moment  $M_p$  mora savladati:

$$M_p = F_V r_d + F_{N1} a \quad (0.8)$$



Slika 35. Prikaz deformacije podloge

$v$	Brzina vozila [m/s]
$\omega$	Kutna brzina vrtnje kotača [rad/s]
$r_d$	Dinamički radijus kotača [m]
$a$	Pomak hvatišta sile [m]
$G_{v1}$	Težina vozila na osikotača [N]
$F_{N1}$	Reakcija podloge [N]
$F_V$	Iskoristiva vučna sila [N]
$M_P$	Pogonski moment [Nm]

$$\frac{M_P}{r_d} = F_V + F_{N1} \frac{a}{r_d} \quad (0.9)$$

I

$$F_V = F_0 - F_{RK} \quad (0.10)$$

I

$$F_{RK} = \frac{a}{r_d} F_{N1} \quad (0.11)$$

$$F_0 = \frac{M_P}{r_d} \quad (0.12)$$

$F_V$	Iskoristiva vučna sila (stvarna sila) [N]
$F_{RK}$	Sila otpora kotrljanja [N]
$F_0$	Idealna vučna sila [N]

## 9.5 Otpor zraka

Ekvivalent aerodinamične sile otpora na vozilo, odnosno otpor zraka, možemo prikazati sljedećim izrazom:

$$R_z = p A_f C_d \quad (0.16)$$

$$p = \frac{1}{2} \rho (v + v_0)^2 \quad (0.17)$$

$$R_z = \frac{1}{2} \rho C_d A_f (v + v_0)^2 \quad (0.18)$$

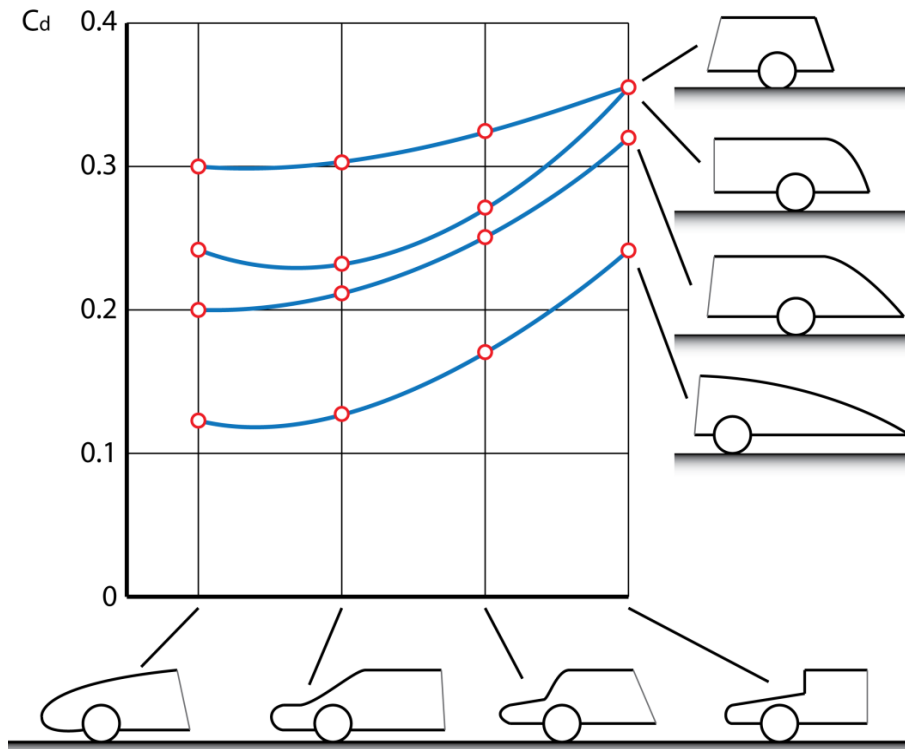
v	Brzina vozila [m/s]
v <sub>0</sub>	Brzina protu vjetra [m/s]
ρ	Gustoća zraka [kg/m <sup>3</sup> ]
p	Dinamički tlak zraka (na čeonu površinu vozila) [N/m <sup>2</sup> ]
C <sub>d</sub>	Koeficijent otpora zraka [-]
A <sub>f</sub>	Referentna površina vozila [m <sup>2</sup> ]
m	Masa vozila [kg]

Atmosferski uvjeti utječu na gustoću zraka, te time mogu znatno utjecati na otpor zraka. Često se uzimaju vrijednosti takozvane standardne atmosfere pri kojoj temperatura iznosi 15 °C (288.15 K) te atmosferski tlak od 101 325 Pa. Prema tim uvjetima, gustoća zraka iznosi  $\rho$  iznosi  $1.2255 \frac{kg}{m^3}$ .

Referentna površina vozila  $A_f$  za osobna vozila se najčešće kreće u rasponu 79 ÷ 84% od površine izračunate prema visini i širini vozila. Prema [Wong, 2001] za osobna vozila ukupne mase između 800 ÷ 2000 kg, može se koristiti slijedeća relacija između referentne površine i mase vozila:

$$A_f = 1.6 + 0.00056(m - 765) \quad (0.19)$$

Aerodinamični koeficijent  $C_d$  može se odrediti eksperimentima provedenim u zračnim tunelima. Jedna od šire primijenjenih metoda mjerenje vremena zaustavljanja vozila, opisana je u [White and Kosrt, 1972].



Slika 36. Utjecaj oblika vozila na koeficijent otpora zraka

## 10. Zaključak

Iako je prisutna više od 40 godina, tehnologiju iskorištenja solarne energije prate brojni problemi. Kontinuiranim radom na poboljšanju iskoristivosti ćelija, povećanju kapaciteta pohrane energije, tehničkim dosjetkama za integraciju tehnologije u svakodnevicu, solarna energija polako ali sigurno grabi naprijed.

Ekološka osviještenost također ide u korist solarnoj energiji i pitanje je dana kada će fosilna goriva izgubiti bitku sa ekološki prihvatljivijim oblicima energije.

Iluzorno je za očekivati da će to biti u skorijoj budućnosti ali svijet daje jasnu poruku kroz nacionalne smjernice za smanjenje emisije CO<sub>2</sub>, brojne poticaje za energetske učinkovitost te korištenje alternativnih izvora energije. Samimi time polako ali sigurno otvara vrata novim tehnologijama i kako to obično biva pitanje je dana kada će cijena pasti na prihvatljivu razinu da bi tehnologija mogla zaživjeti u punom obujmu i našla svoje mjesto pod suncem.

Doslovno.



## 11. Literatura

1. „Solarni sustavi“ Ljubomir Majdandžić
2. „Vozila“ Sven Čerlek
3. „Akumulatorske baterije za neprekidna napajanja“ Javor Škare, Končar
4. [http://www.speedace.info/solar\\_car\\_anatomy.htm](http://www.speedace.info/solar_car_anatomy.htm)
5. [http://calsol.berkeley.edu/team/mechanical\\_team/suspension-chassis.php](http://calsol.berkeley.edu/team/mechanical_team/suspension-chassis.php)
6. <http://www.fisita.com/students/congress/sc08papers/f2008sc048.pdf>
7. [http://www.academia.edu/3134289/Development\\_of\\_a\\_Solar\\_Car](http://www.academia.edu/3134289/Development_of_a_Solar_Car)
8. <http://www.csiro.au/Outcomes/Energy/Powering-Transport/In-wheel-motor-for-solar-powered-electric-vehicles-technical-details.aspx>
9. <http://www.csiropedia.csiro.au/display/CSIROpedia/Low+emission+vehicles>
10. <http://www.mitsuba.co.jp/english/products/autoelectricalsystems>
11. <http://solarcar.stanford.edu/design/systems/aerodynamics/>
12. <http://solarcar.engin.umich.edu/history-of-winning.html#11>
13. <http://www.solarcarchallenge.org/info/comp.html>