

# Sončna energija iz orbite

Opomba: Sekcija 2.2 o toplotnih ciklih ima del besedila označen z zvezdicama, ker je njegov nivo višji, zato je primeren bolj za dijake v vsaj 2. ali 3. letniku. Bralec iz 1. letnika ali osnovnošolec lahko ta del po želji izpusti.

## 1 Uvod

Ocene rasti prebivalstva kažejo, da bo sredi tega stoletja Zemljo naseljevalo okrog 10 milijard ljudi. Zato se bo poraba (fizikalno ustrežnejši izraz je *pretvorba*!) energije povečala okrog trikrat, še posebno pa naraščajo potrebe po električni energiji. Že sedaj je svetovna energijska poraba 16 TW (TW = terawatt =  $10^{12}$  W) in od tega pridobimo 85 % s fosilnimi gorivi (premog, nafta, zemeljski plin). Zaradi okoljskih težav se vse bolj uveljavljajo alternativni energijski viri: direktna sončna energija (svetlobne celice in sončni zbiralniki), jedrska energija (fisijska ali cepitev jeder, medtem ko je fuzijska ali jedrsko zlivanje še v razvojni fazi), geotermalni izviri, vetrna energija, energija plimovanja, energija iz biomase in podobno.

Zemlja sprejema od Sonca 170 000 TW svetlobne moči, približno 10 000 – krat več od trenutne svetovne energijske porabe. Zato je dolgoročno pretvorba direktne sončne energije s svetlobnimi celicami in sončnimi zbiralniki zelo pomembna. Zanimiva pa je tudi zamisel, da bi sončne žarke prestrezali in pretvarjali v električno energijo sateliti v orbitah okrog Zemlje, nato pa zbrano energijo pošiljali v obliki elektromagnetnih mikrovalov sprejemnim postajam na Zemlji. Kolikor je znano iz literature, si je sončno energijo iz orbite prvi zamislil Glaser že leta 1968. To so tako imenovane postaje vesoljskega sončnega napajanja (*SSP = space solar power*).

Prednosti pretvorbe sončne energije v orbiti pred zemeljskimi sončnimi elektrarnami je več:

1) Ni ovir zaradi ozračja. Intenziteta sončne svetlobe (to je energija na časovno in ploščinsko enoto), ki doseže Zemljo vrh ozračja, je okrog  $1,35 \text{ kW/m}^2$ . Zaradi absorpcije (vpijanja) v atmosferi je intenziteta svetlobe na Zemljinih tleh veliko manjša. Seveda pa mora biti izkoristek prenosa energije na Zemljo z mikrovalovi dovolj velik. Tudi mikrovalovi se v ozračju absorbirajo, vendar je absorpcija pri izbiri prave valovne dolžine mikrovalov majhna.

2) V primeru toplotnega cikla (toplotni stroj – glej razlago spodaj) je toplotni izkoristek lahko precej večji kot na Zemlji. Izkoristek toplotnega stroja je tem večji, čim večja je razlika med višjo temperaturo, pri kateri stroj sprejema toploto, in nižjo temperaturo, pri kateri toploto oddaja. En način povečanja izkoristka je torej bistveno znižanje temperature okolice, v katero stroj oddaja odvečno toploto. Vesoljski prostor ima temperaturo le okrog 3 K (podatek 3 kelvini dobimo zaradi kozmičnega radijskega sevanja kot posledice dogajanj po velikem poku).

3) Praktično neomejen prostor v visoki orbiti v primerjavi z Zemljino površino. Ta dejavnik bo postajal vedno pomembnejši, saj zaradi naraščajočega prebivalstva postaja prostor na Zemlji vse bolj dragocen.

4) Stanje breztežnosti, zaradi česar lahko prihranimo pri konstrukcijskih materialih; le-ti morajo na Zemlji prenesti težo objektov.

5) Zmanjšana nevarnost za ljudi v primeru nesreč

6) Daljša doba trajanja zaradi odsotnosti korozivnih snovi

7) Če bi bilo veliko SSP postaj v orbiti, potem bi lahko vsaka oskrbovala manjše območje na Zemlji in ne bi bilo potrebno toliko zapletenega zemeljskega transporta energije (plinovodi, tankerji za nafto, dolgi električni daljnovodi, itd.).

Vendar je treba pred ekonomično in sporazumno uporabo omenjene tehnologije rešiti nekaj resnih izzivov/omejitev:

- 1) pocenitev in zmanjšanje energijske porabe pri transportu opreme v vesolje,
- 2) učinkovit prenos mikrovalov na Zemljo,
- 3) zaščita pred poškodbami, npr. zaradi meteoritov,
- 4) mednarodni sporazumi, npr. glede (pravičnega!) porazdeljevanja energije.

Vedno bolj vlada prepričanje, da bo v bližnji prihodnosti res smiselno pošiljati material z Zemlje za zgraditev SSP postaj v orbitah ali pa zgraditi na Luni ustrezne robotske tovarne in uporabiti Lunin material za energijske postaje.

## **2 Osnova delovanja SSP postaj**

Dva najuporabnejša načina pretvorbe sončne energije v električno sta s svetlobnimi celicami in s sončnimi toplotnimi cikli. Oba načina seveda delujeta tudi na Zemlji.

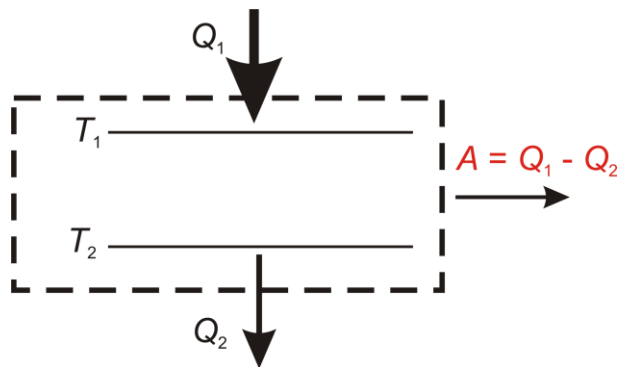
### **2.1 Svetlobne celice**

Svetlobne celice (sončne celice, fotocelice) so polprevodniške diode, ki so zmožne direktne pretvorbe vpadne svetlobe v električno energijo. Diodi so električni elementi, pri katerih zveza med električnim tokom in električno napetostjo ni linearna, torej zanje ne velja Ohmov zakon; razen tega lahko v eno smer prepuščajo neprimerno večje električne tokove kot v drugo (zaporno) smer. Polprevodniške diode naredijo tako, da v njihov osnovni polprevodniški material (npr. silicij, Si) vnesejo zelo majhne količine nečistoč (npr. galij na eni strani silicijeve diode in arzen na drugi strani). Na odvisnost toka od napetosti pa pri fotodiodah močno vpliva tudi vpadna svetloba in to je osnova njihovega delovanja. Komercialne sončne celice so največkrat narejene iz polprevodnika silicija, vse bolj pa se uveljavlja tudi galijev arzenid (GaAs). V električno energijo lahko silicijeve celice pretvorijo samo svetlobo z valovno dolžino krajšo od  $1,15\ \mu\text{m}$ . To pomeni, da se vidna svetloba (njene valovne dolžine so v grobem med  $0,4\ \mu\text{m}$  in  $0,7\ \mu\text{m}$ ) lahko pretvarja v električno energijo in prav tako del infrardeče (IR) svetlobe med  $0,7\ \mu\text{m}$  in  $1,15\ \mu\text{m}$ . Nasprotno IR svetloba z večjimi valovnimi dolžinami svetlobne celice samo segreva. Silicijeve svetlobne celice imajo izkoristek do 23 %.

Svetlobne celice v najnovejši tehnologiji in z drugimi polprevodniki dosegajo izkoristke celo do 35%. Takšne svetlobne celice lahko sestavimo v mreže s specifično električno močjo  $1000\ \text{W/kg}$  ali  $600\ \text{W/m}^2$  (to pomeni  $1000\ \text{W}$  na kilogram celic oz.  $600\ \text{W}$  na kvadratni meter njihove površine).

### **2.2 Toplotni cikli**

Toplotni cikel pomeni neko ponavljajoče se spreminjanje stanja v toplotnem stroju. Za primerjavo: en toplotni cikel v štiriktaktnem bencinskem motorju vsebuje štiri različne takte in to se med delovanjem motorja ves čas ponavlja. Poenostavljena energijska shema vsakega toplotnega stroja je naslednja (slika 1). Stroj na mestu z višjo temperaturo  $T_1$  sprejme toploto  $Q_1$ , pri nižji temperaturi  $T_2$  pa odda manjšo toploto  $Q_2$ . V primeru izkoriščanja direktne sončne energije so vir toplote  $Q_1$  kar sončni žarki. Razlika toplot je delo, ki ga lahko stroj opravi:  $A = Q_1 - Q_2$ . V našem primeru gre za električno delo. Za vsak toplotni stroj lahko opredelimo tudi izkoristek, ki pove, kolikšen del prejete toplote pretvori v koristno delo.



**Slika 1:** Energijska shema toplotnega stroja; črtkan okvir pomeni fizikalni sistem (stroj), za katerega sta značilni vsaj dve različni temperaturi delovanja, čeprav je v večini primerov dogajanje v stroju bolj kompleksno. Navznoter usmerjena puščica za  $Q_1$  pomeni prejeto toploto, navzven usmerjeni puščici za  $Q_2$  in  $A$  pa oddano toploto in delo. Z debelinami puščic ponazorimo, da je prejeta toplota večja od oddane toplote in dela.

Pri obravnavi toplotnih ciklov je v navadi tudi risanje ustreznih diagramov, ki povedo, kako se v ciklu spreminjajo med seboj povezane termodinamske količine v sistemu: predvsem tlak, prostornina in temperatura. S tem se tu ne bomo ukvarjali, čeprav inženirjem, ki se ukvarjajo s toplotnimi stroji, največ povedo prav takšni diagrami. Z njimi je mogoče za vsak primer posebej izračunati izkoristek.

\*Izkoristek stroja (cikla) opredelimo kot kvocient med delom in prejeto toploto:

$$\eta = A/Q_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 = 1 - Q_2/Q_1.$$

Izkoristek je tem večji, čim manjša je oddana toplota  $Q_2$ . To se da doseči na primer z velikim razmerjem temperatur  $T_1/T_2$ , kjer obe temperaturi merimo v kelvinih in ne v stopinjah Celzija. Pri posebnem (idealnem) toplotnem stroju, ki ga imenujemo Carnotov stroj, velja enakost med razmerjema toplot in ustreznih temperatur:

$$Q_2/Q_1 = T_2/T_1.$$

V tem primeru lahko hitro izračunamo izkoristek toplotnega stroja. Recimo, da je zunanja temperatura  $T_2 = 3$  K (vesolje!), delovna temperatura idealnega toplotnega stroja, ki ga ogreva sončna toplota, pa  $T_1 = 10$  K. Tedaj je izkoristek:

$$\eta = 1 - Q_2/Q_1 = 1 - T_2/T_1 = 1 - (3 \text{ K})/(10 \text{ K}) = 0,7 = 70 \text{ \%}.$$

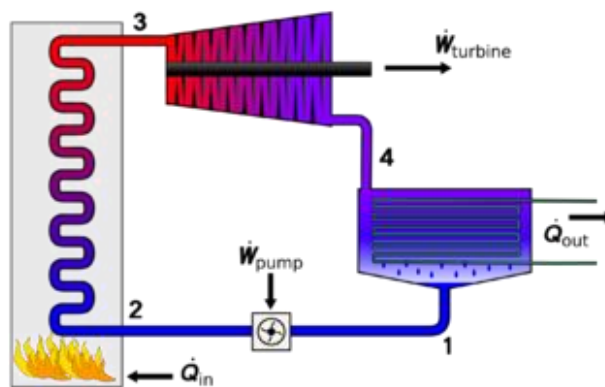
Torej tudi idealni toplotni stroj nima stoo odstotnega izkoristka, kot bi morda kdo napačno sklepal po imenu. Vendar je pri vsakem realnem stroju izkoristek manjši od ustrezne vrednosti idealnega stroja

(pri istih temperaturah). Res pa je, da se nekateri realni toplotni stroji z izkoristkom približajo idealnemu.\*

Med znanimi vrstami toplotnih strojev, ki jih uporabljajo tudi drugod in na katere računajo kot kandidate za uporabo v vesoljskih energijskih postajah, so med drugimi Braytonov, Rankinov, Stirlingov in Ericssonov stroj (glej Wikipedio). Toplotni stroj in toplotni cikel v praksi označujemo z istim imenom: npr. Rankinov toplotni stroj deluje na osnovi Rankinovega toplotnega cikla.

Vsak toplotni stroj ima delovni medij (snov) v plinastem ali kapljevinastem agregatnem stanju ali v kombinaciji obeh agregatnih stanj. Segret delovni medij namreč lahko poganja turbino, ta pa električni generator. Poskusi in izračuni so pokazali, da je mogoče doseči največje izkoristke v strojih z dvoatomnim plinom kot delovnim medijem, npr. vodikom ( $H_2$ ) in dušikom ( $N_2$ ). S temi plini so dosegli naslednje izkoristke: 60 % za Braytonov stroj ter 72 % za Rankinov in Ericssonov stroj.

Na kratko opišimo le Rankinov stroj, ponazorjen z naslednjo shemo:



**Slika 2:** Shema delovanja Rankinovega stroja (vzeto iz Wikipedie); veličine so tukaj preračunane na časovno skalo (torej v enotah watt). Angleške oznake pomenijo:  $\dot{Q}_in = \frac{Q_1}{t}$ ,  $\dot{Q}_out = \frac{Q_2}{t}$ ,  $\dot{W}_turbine = \frac{A}{t}$  in  $\dot{W}_pump = \frac{A_{not}}{t}$ . Modra barva delovnega medija pomeni kapljevinasto agregatno stanje, rdeča pa plinasto.

Črpalka spodaj na sliki 2 med številčkama 1 in 2 usmerja utekočinjeno delovno sredstvo (npr. vodo v klasičnih Rankinovih strojih) od kondenzatorja na desni do segrevalne komore (bojlerja, levo na sliki), kjer je visok tlak. Pri stalnem tlaku se sredstvo segreva in uplini, tako da nastane suha nasičena para (dogajanje med številčkama 2 in 3). Le-ta poganja turbino, se zaradi tega nekoliko ohladi in se ji tudi zniža tlak. Del pare se utekočini (dogajanje med številčkama 3 in 4). Vlažna para vstopi v kondenzator, kjer se še bolj ohladi in vsa utekočini (med 4 in 1). Ta cikel se ves čas ponavlja. To je v nasprotju z delovanjem bencinskega motorja zaprt krog, saj vedno isto delovno sredstvo kroži po stroju. Medtem, ko je pri bencinskem motorju mešanica bencina in zraka hkrati gorivo in delovno sredstvo (zaradi česar se mora ves čas obnavljati), izgoreva gorivo, npr. premog, pri Rankinovem stroju izven delovnega sredstva. Zato delovnega sredstva ni treba kar naprej obnavljati.

Za delovanje moramo Rankinovemu stroju dovesti nekaj dela  $A_{\text{not}}$  za pogon črpalke, tako da je efektivno delo, ki ga od stroja lahko dobimo, enako  $A' = A - A_{\text{not}}$ . Vendar je dovedeno delo  $A_{\text{not}}$  relativno majhno, če gre za usmerjanje utekočinjenega delovnega sredstva.

### 2.3 Prenos energije na Zemljo in njen sprejem z antenami

Električna energija iz fotocelic ali toplotnega stroja se pretvori v mikrovalove, za kar bi lahko uporabili posebno napravo – klistron: to je posebna vakuumsko cev, v kateri pospešeni elektroni (pospeševalna napetost več deset kilovoltov), ki so izstopili iz katode, povzročijo nastanek mikrovalov. Oddajna antena usmeri mikrovalovni žarek k eni ali več sprejemnim antenam na Zemlji – na tleh ali na morju. Le-te pretvorijo mikrovalove v enosmerni tok dokaj varno in učinkovito, električni tok pa teče po vodih do uporabnikov. Sprejemne antene bi morale biti kar velike, zato ocenjujejo, da bi zahtevale 10 % cene celotnega sistema. Za preskus so poslali žarek moči 30 kW prek razdalje ene milje do sprejemne antene in skupen izkoristek prenosa po zraku in pretvorbe v električno energijo je bil 82%.

Značilna frekvenca mikrovalov naj bi bila velikostnega reda GHz (gigahertz,  $\text{GHz} = 10^9 \text{ Hz} = 10^9 \text{ s}^{-1}$ ), čemur ustreza valovna dolžina:

$$\lambda = c/\nu = (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})/(10^9 \text{ s}^{-1}) = 0,3 \text{ m}.$$

Upoštevali smo vrednost svetlobne hitrosti  $c \approx 300\,000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , s katero potujejo mikrovalovi tako kot vidna svetloba in vsako drugo elektromagnetno valovanje.

Začetni predlog je bil, naj bi bila frekvenca mikrovalov 2,45 GHz, saj je pri tej vrednosti absorpcija v zraku zelo majhna. Vendar pa so sedaj to frekvenčno območje zasedli komunikacijski sateliti, tako da bo treba za prenos energijskih mikrovalov izbrati drugo frekvenco v gigaherčnem območju.

Pojavlja se vprašanje morebitne nevarnosti mikrovalov, npr. 1) za zdravje, če se ljudje zadržujejo v bližini sprejemnih anten, 2) ali pa, če leti letalo neposredno skozi mikrovalovni žarek. Vsaj glede prvega vprašanja je bilo narejenih veliko raziskav že zaradi uporabe mobilnih telefonov. Po poročilih niso našli nobenih mutagenskih učinkov, če žarek ne zadene tkivo neposredno. Vendar moramo biti vseeno previdni in vpeljati določene varnostne standarde. Načrtujejo, naj bi bila povprečna intenziteta mikrovalovnega žarka s SSP postaje  $75 \text{ W/m}^2$ , največja intenziteta v sredini žarka pa  $230 \text{ W/m}^2$ , kar je še vedno veliko manj od intenzitete sončne svetlobe. Proti “robu” žarka intenziteta hitro pada. Zato domnevajo, da bi bilo sevanje v neposredni bližini sprejemnih anten veliko manjše kot v bližini današnjih električnih daljnovodov. Zaradi občutljive elektronske opreme pa verjetno ne bi bilo ravno priporočljivo, da bi letalo presekalo sredino mikrovalovnega žarka.

### 3 Položaj energijskih postaj

SPP postaje so lahko v orbiti okrog Zemlje ali pa kar na Luni. Obstaja pa tudi tretja, kar obetavna možnost: te postaje bi lahko izdelovali kar na Luni (robotske tovarne) in jih pošiljali z Lune v orbito okrog Zemlje. Pravzaprav so te postaje pretežke za raketni transport v enem kosu: z Zemlje ali Lune naj bi v orbito pošiljali le dele postaj, sestavljali bi pa jih skupaj v sami orbiti. Glede starta in cilja pošiljanja delov SSP postaj futuriste – načrtovalce trajnostnega razvoja največ zanimajo naslednje štiri možnosti:

1. z Zemlje do “nizke Zemljine orbite” (LEO = Low Earth Orbit)) na višini okrog 200 km nad tlemi,
2. z Zemlje do geostacionarne orbite (GEO) – natančneje  $3,5785 \cdot 10^4$  km nadmorske višine nad ekvatorjem,
3. z Zemlje na Luno na povprečni razdalji  $3,82 \cdot 10^5$  km
4. z Lune na GEO – razdalja okrog  $3,46 \cdot 10^5$  km.

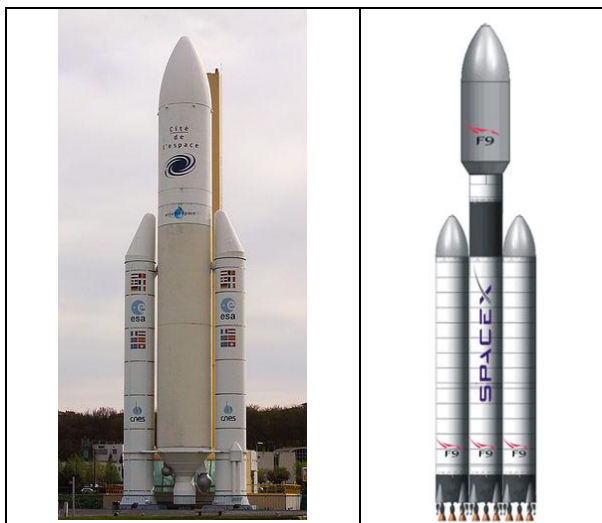
#### 4 Ocene emisij CO<sub>2</sub>

Za zgoraj omenjene štiri možnosti start – cilj smo s sodelavci med drugim ocenili emisije (izločanje) ogljikovega dioksida, CO<sub>2</sub>, za celotno predvideno obdobje delovanja teh energijskih sistemov. CO<sub>2</sub> je namreč toplogredni plin in glede na Kyotski sporazum iz leta 2005 naj bi njegovo emisijo v naslednjih desetletjih zmanjšali ali vsaj ne bistveno povečevali. CO<sub>2</sub> sicer ne nastaja med samim delovanjem SSP postaj (pa tudi, če bi nastajal, ne bi bilo nič hudega, saj bi pobegnil v vesolje), upoštevati pa moramo njegovo izločanje na Zemlji pri izdelavi delov postaj, nosilnih raket in tudi emisije pri izgorevanju raketnega goriva.

Za konkretne izračune smo vzeli znane podatke za francosko raketo Ariane 5 ECA in ameriško aketo SpaceX Falcon Heavy 9. Na primer, Ariane 5 poganjata dve vrsti goriva:

- 1) 476 ton trdnega goriva v dveh stranskih raketnih motorjih za začetni pogon na manjših višinah; to je mešanica 68 % masnega deleža amonijevega perklorata (NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub>, oksidant), 18 % aluminija in 14 % polibutadiena kot veziva;
- 2) tekoče gorivo, to je nizkotemperaturnas mešanica tekočega kisika in tekočega vodika v masnem razmerju 5.1 : 1. To je glavno gorivo, ki začne izgorevati, ko se porabi trdno gorivo.

Pri izgorevanju trdnega goriva pravzaprav NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub> kot oksidant zažge aluminij. Pri tem se sprošča CO<sub>2</sub> le zaradi razpadanja organske snovi butadiena. Pri gorenju tekočega goriva pa se kisik in vodik spajata v vodo – to je navidezno res čist energijski vir. Ne smemo pa pozabiti, da potrebujemo tudi za proizvodnjo aluminija za trdno gorivo energijo: aluminij pridobimo iz rude, za kar potrebujemo energijo. Za to uporabljamo npr. premog, ki pri izgorevanju oddaja CO<sub>2</sub>. Tudi za pridobivanje vodika kot dela tekočega goriva potrebujemo veliko energije, npr. pri elektrolizi vode. Upoštevati moramo tudi emisije CO<sub>2</sub> pri proizvodnji materialov za raketo in satelit. Na primer, 85-tonska raketa Ariane brez goriva vsebuje okrog 35 % aluminija, 40% jekla, 15% plastike, ojačane z ogljikovimi vlakni in 10 % drugih materialov.



### **Slika 3:** Raketi Ariane (levo) in Falcon (desno)

Za primerjavo: Falcon uporablja kot gorivo kerozin, ki izhaja iz petroleja, ta pa je destilacijski produkt nafte. Kerozin je kompleksna mešanica raznih ogljikovodikov. Kot oksidant, ki reagira s kerozinom pri gorenju, se uporablja tekoči kisik.

**Tabela 1:** Primerjava emisij CO<sub>2</sub> na watt električne moči za sistem raketa –SSP satelit pri dveh raketah in pri lansiranju na LEO, GEO in Luno ter z Lune na GEO.

<b>Kg CO<sub>2</sub> / W</b>	<b>Zemlja – LEO</b>	<b>Zemlja – GEO</b>	<b>Zemlja – Luna</b>	<b>Luna – GEO</b>
<b>Ariane 5 ECA</b>	5,2	5,6	5,7	0,056
<b>SpaceX Falcon 9 Heavy</b>	5,6	6,4	6,5	0,064

Morda zgleda čudno, da so emisije CO<sub>2</sub> preračunane na watt in ne morda na joule, ko pa vemo, da npr. pri izgorevanju 1 kg rjavega premoga dobimo okrog 15 MJ energije, masa izgorelega premoga pa je sorazmerna z maso nastalega CO<sub>2</sub>. Emisije lahko preračunamo na enoto moči watt zato, ker predvidevamo določeno življenjsko dobo SSP satelita in vemo, kolikšna je njegova energijska moč. Računamo z značilno življenjsko dobo 25 let.

### **Najpomembnejša tuja vira**

[1] P. E. Glaser, Power from the Sun: Its Future, Science Magazine, 162 (1968) str. 857-861.

[2] N. Lior, Power from space, Energy Conversion & Management J., 42 (2001) str. 1769-1805.