

Rafael Mihalič*

Energetski viri z nizkim EROEI – perspektive in možnosti

POVZETEK

Demografski, ekonomski in socialni razvoj človeške družbe je bil vedno povezan z njeno zmožnostjo izrabe virov energije. Predpogoj za obstoj višjih družbenih dejavnosti, kot so na primer podpora neaktivnim članom družbe, zdravstveno varstvo, umetnost ..., pa je dostop do takih virov, ki v splošnem ne zahtevajo veliko družbene aktivnosti (danes lahko slednje izrazimo z deležem BDP, ki ga družba porabi za oskrbo z energijo, včasih ga izražamo preko EROI – Energy Returned on Investment – pridobljena energija glede na investicijo). Z drugimi besedami, energetski viri morajo imeti dovolj visok EROEI – Energy Received on Energy Invested (razmerje med pridobljeno in v njeno pridobivanje vloženo energijo), da je možen razvoj uspešne družbe. V Evropi smo sprejeli politično odločitev energetskega preobrata (Energiewende) in za to do sedaj porabili ca. 1000 milijard €. Pojavlja pa se vprašanje, kaj to pravzaprav pomeni za EROEI oskrbe z energijo in kaj za ekonomijo držav. Koliko smo Evropejci prispevali k »trajnostni« oskrbi z energijo, potem, ko smo potrošili omenjene milijarde? Ali sploh imamo dovolj sredstev in/ali virov, da bi zamenjali vsaj znaten del klasične električne proizvodnje z obnovljivimi viri? Kaj intenziven prehod na obnovljive vire energije pomeni za konkurenčnost na globalnem trgu? Nekateri avtorji ugotavljajo, da glavna dilema pravzaprav ni: obnovljivi viri energije, da ali ne, pač pa ekonomska rast ali oskrba družbe s sonaravnimi energetske viri. Ob tem se velja vprašati, kako prihodnost pa ima dežela, ki izbere »sonaravno« alternativo, pri čemer ostale države temu ne sledijo in to deželo ekonomsko povsem prehitijo. Ali je za družbo res dobro odpirati nove službe v branži obnovljive energetike, kot je pogosto slišati na promocijah »zelene energije«, upoštevajoč dejstvo, da en rudar v premogovniku oskrbi družbo s toliko energije, kot 79 zaposlenih v solarni industriji? Predstavljene dileme so med ključnimi vprašanji moderne družbe. Naivno je pričakovati, da je moč končne odgovore na te in podobna vprašanja stresti iz rokava. Je pa pomembno take dileme izpostaviti in o njih razpravljati, tem bolj, ker obstajajo številni politični poizkusi kriminalizacije zastavljanja takih vprašanj in izražanje dvomov v katastrofične scenarije raznih prerokovalcev katastrof in v njihove ideje »reševanja sveta«.

Ključne besede: energija; sonaravni viri; energetska politika, oskrba z energijo, EROEI

1. Uvod

V eni od knjig o razvoju človeških civilizacij si avtor zastavi centralno vprašanje, okrog katerega razvija svojo tezo, nekako tako: »Zakaj so Španci odpluli v Ameriko in si podjarmili tamkajšnja ljudstva, ne pa Indijanci v Evropo in si podjarmili njo?« V knjigi nato obravnava številne ključne faktorje, od možnosti razvoja poljedelstva in živinoreje do dostopnosti rudnin. Vendar menim, da je ob tem mogoče stopiti še korak nazaj in najti bolj splošen skupni imenovalac. V samem bistvu gre za energijo oz. sposobnost družbe izkoristiti energetske vire in ustvariti presežke energentov, t. j. snovi, ki jih znamo pretvarjati tako, da zagotovijo naše potrebe v najširšem smislu. Na dlani je, da je razvoj civilizacije nemogoč, če je dejavnost vseh članov družbe izključno zagotavljanje njenih energetskih potreb, npr. hrane, kurjave. Manj ljudi je sposobno oskrbeti družbo z energetskimi viri, potrebnimi za njeno funkcioniranje, več jih ostane »na razpolago« za višje družbene dejavnosti (in na žalost tudi, kakor kaže zgodovina, vojskovanje). Seveda ob vsem skupaj ni pomembno samo to, da imamo relativno preprost dostop do energetskih virov, predpogoj je, da sploh znamo energetske vire izkoristiti oz. imeti ustrezno infrastrukturo, ki to omogoča. Kaj nam npr. pomagajo velike zaloge torija (Th), če

zaenkrat še nimamo delujočega reaktorja za njegovo izkoriščanje.

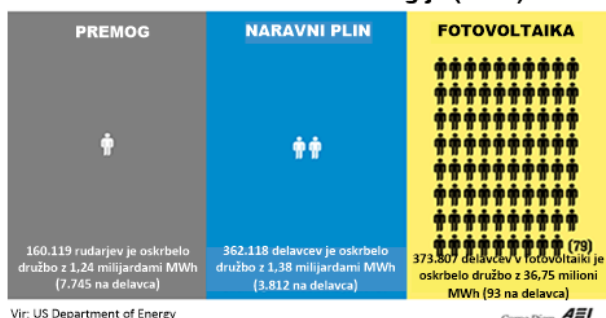
Prvi energetski »bum« sodobne dobe se je zgodil med in po drugi svetovni vojni. Razvoj motorjev na notranje izogrevanje je naredil kvantni preskok, tehnologija izkoriščanja kuriv za npr. proizvodnjo elektrike je omogočila izboljšanje izkoristka za red velikosti, iznašli so (v začetku sicer ne s tem namenom) način za izkoriščanje praktično neomejenega energetskega vira, t. j. kontrolirano cepitev atomov in postavili temelje zlivanju atomskih jeder. V bistvu je šlo za osnovo za razvoj sodobne civilizacije in kakovosti življenja (vsaj v razvitem delu sveta), ki je v zgodovini brez primere. Z ustreznim razvojem tehnologij izkoriščanja lahko s takrat razvitimi načini skoraj gotovo oskrbujemo človeško družbo s poceni energijo še stoletja. Izraz »poceni« je mišljen v smislu, da je zelo malo članov družbe za to potrebnih in ostali lahko opravljajo druge družbene dejavnosti (npr. šolstvo, znanost, skrb za neaktivne člane družbe, kultura, gradnja infrastrukture itd.), skratka dvignejo kakovost življenja.

Vendar oskrba z energijo, zlasti v Evropi, ni ubrala smeri evolucije, pač pa bolj revolucije. Dogajanje najlepše parafrazira v Evropi ponarodeli izraz Energiewende, ki naj bi označeval energetski preobrat v smislu energetskega »nazaj k naravi!« Z drugimi besedami; oskrba z energijo, predvsem z električno, naj bi popolnoma spremenila paradigmo, in sicer iz t. i. klasičnih virov (beri prejšnji odstavek) v obnovljive, sonaravne, čiste, brezogljne in kar je še takih in podobnih izrazov. Gre za

Fakulteta za elektrotehniko / Tržaška 25, Ljubljana,
E-Mails: E-Mail: rafael.mihalic@fe.uni-lj.si
* Avtor za korespondenco; Tel.: +386 1 4768 438

politične odločitve, ki imajo pri praktični implementaciji pogosto »resen konflikt« s fizikalnimi dejstvi in omejitvami, vendar gre praviloma karavana dalje pač v maniri: »Če je odločitev v nasprotju s fizikalnimi dejstvi, toliko slabše za dejstva.« Idej, na kak način pridobivati energijo, je nebroj, večinoma pa imajo neko skupno značilnost, in sicer, da je potrebna precejšnja investicija in energijski vložek, da idejo udejanjimo. Če npr. pridelujemo ogrščico za biodiesel je potrebno precej energije investirati bodisi direktno (seme, oranje, sejanje, škropljenje, gnojenje, žetje, transport, predelava) ali indirektno (izdelava traktorjev, priključkov, kombajnov, predelovalnic v biodiesel, materialne dobrine vseh, ki se ukvarjajo s to dejavnostjo...). Na koncu, če odštejemo omenjeno porabo energenta za pridelavo novega, bilanca ni posebno razveseljujoča. Podobno velja tudi za druge vrste obnovljivih virov. V [1] npr. navajajo, da je za oskrbo družbe z električno energijo potrebnih pri oskrbi preko sončnih celic 79 krat več ljudi, kakor, če isto energijo dobimo iz premoga. Če torej zelo na grobo špekuliramo in upoštevamo, da je v rudniku Velenje zaposlenih 1200 ljudi, in da TEŠ »pridobi« 1/3 slovenske elektrike, bi torej po tej logiki za elektroenergetsko oskrbo Slovenije s sončnimi elektrarnami potrebovali ca. 300.000 zaposlenih, kar predstavlja skoraj 40% vseh zaposlenih v RS oz. polovica vseh, ki niso zaposleni v javnem sektorju. Seveda je vse skupaj popolna utopija, če uporabimo mili izraz.

Število delavcev potrebnih za oskrbo družbe z isto količino električne energije (2016)



Slika 1: Primerjava potrebnih človeških virov za oskrbo družbe z isto količino energije [1]

Torej si lahko zastavimo čisto splošno vprašanje, in sicer: »Ali je mogoče oskrbovati razvito družbo z energijo s tehnologijami, ki imajo relativno nizek presežek pridobljene energije nad vloženo?« Kako to vpliva na ekonomijo družbe oz. njeno ekonomsko kompetitivnost? Ali drugače, ali je moč razvito družbo oskrbovati s tehnologijo z nizkim EROEI.

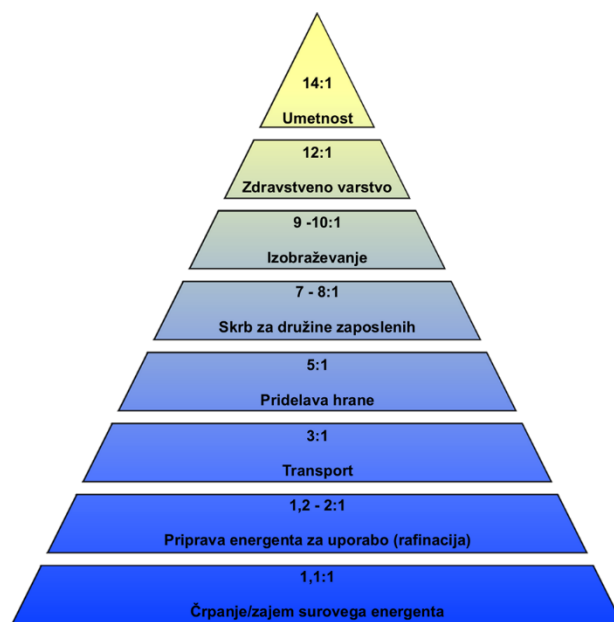
2. Vpliv EROEI na družbo

V strokovnih krogih indikator EROEI predstavlja začetnice za merilo, koliko energije pridobimo glede na vloženo energijo (po angleškemu "Energy Received on Energy Invested"). Predstavil ga je Charles Hall na primeru plenilca. Ta mora iz ujetega plena dobiti več energije, kot je porabi za to, da ga ulovi (EROEI mora biti nujno večji od 1), sicer plenilec pogine. Če pomislimo nekoliko širše, vidimo, da na nek način tako funkcionira celotna narava. Pri vsaki energetski pretvorbi prihaja do izgub (v končni fazi v obliki toplote). To ima za posledico, da se nobena sprememba v vesolju (kemična,

mehanska, jedrska) ne more zgoditi, če začetna energijska bilanca (recimo kinetična, kemična, jedrska ... energija snovi, ki vstopajo v proces) ne presega končne (recimo koristne energije), saj se je del vstopne energije pretvori v izgube.

Dokler je bilo človeštvo odvisno samo od sile lastnih mišic ter mišic udomačenih živali, in toplote iz izgorovanja lesa, so bile dejavnosti, ki jih je družba lahko vzdrževala, pretežno tiste za osnovno preživetje, saj je bil EROEI tehnologij za oskrbo družbe z energijo (sem prištevamo tudi hrano) nizek. Višje oblike kot izobraževanje, zdravstveno varstvo in umetnost so bile (če sploh) dostopne le majhni eliti. Pogoji za kakovost življenja, kakršno danes sprejemamo kot samoumevno, je zadostna energija z dovolj visokim EROEI, kar je človeštvo doseglo šele v 20. stoletju z množičnim izkoriščanjem fosilnih goriv, predvsem premoga in nafte.

Pogoj za obstoj višjih družbenih dejavnosti, kot sta na primer umetnost in zdravstveno varstvo, je namreč celotna piramida pod njimi, od pridobivanja energenta do splošnega izobraževanja. In ker vsak nivo družbenih dejavnosti potrebuje energijo za lastno delovanje, z višjo razvitostjo dejavnosti tudi raste razmerje med energijo, ki jo za tak nivo rabimo, in primarno pridobljeno. Višji EROEI je torej pogoj za višjo kakovost življenja. Če naj bi se civilizacija razvijala, se bo po tudi piramida višala in za funkcioniranje nadgradnje bo potrebno družbo oskrbovati z energenti z vedno višjim EROEI. Temu sicer nekateri oporekajo v smislu, da bo tehnologija omogočila razvoj z nižjo stopnjo rabe energije. Trenutno na to prav nič ne kaže in BDP družbe je v strogi korelaciji z njeno porabo energije [2].



Slika 2: Piramida EROEI: kolikšno razmerje med pridobljeno in za pridobivanje vloženo energijo je potrebno za vzdrževanje posameznih dejavnosti družbe [3]

Ilustrirajmo nekoliko predhodno razmišljanje s primerom, kaj se energetsko "izplača". Velikokrat lahko slišimo, da pri sicer fizikalno povsem nesmiselni in etično in okoljsko na moč sporni pridelavi energentov (npr. bio-diesla ali metanola iz koruze ali pšenice) res porabimo veliko energije, vendar pa, da je bojda »energetska žetev« vendarle obilnejša od porabljene energije (za metanol to sploh ni res niti na nivoju same

pridelave). Napaka oz. zavajanje pri takem razmišljanju je parcialni pogled na problem, ki zanemara nujno energetske porabe za ustvarjanje pogojev, da sploh lahko energijo v »pridelani obliki« porabimo. Samo zato, da npr. nafto predelamo (rafinerije) in njo in njene produkte transportiramo rabimo EROEI krepko čez 1, pri tem ne smemo pozabiti, da je za izdelavo rafinerij, prevoznih sredstev, poti ... bilo potrebno veliko energije. Sledi kompletna infrastruktura za distribucijo energentov (milijoni črpalk za gorivo). Ampak to še ni vse. Rabimo tudi naprave, ki nam pretvorbo energije sploh omogočajo – beri avtomobile, vlake, infrastrukturo zanje (ceste, železnice, parkirišča, mehanične delavnice, tovarne avtomobilov, železarne za material za vse to – skratka neskončen niz povezav). Pa to še vedno ni vse. V branži pridobivanja energentov, njihovega transporta, distribucije, industriji avtomobilov, pridobivanju surovin za izdelavo prevoznih sredstev itd. je zaposleno milijone ljudi. Za te ljudi je potrebno zagotoviti hrano, obleko, določen življenjski standard, za kar je tudi potrebna energija. Če povzamemo, zato da ima sploh smisel izkoriščati npr. nafto za transport ljudi in blaga mora biti EROEI njenega pridobivanja mnogo večji od 1 (glede na podrobno analizo v [3] mora biti EROEI vsaj 5), sicer imamo načrpano nafto, ampak kaj naj z njo?! V tem smislu velja razumeti piramido na Sl. 2. Z drugimi besedami; na srednji rok (recimo nekaj desetletij) ni prav nobene možnosti, da bi lahko vzdrževali doseženo stopnjo civilizacijskih pridobitev človeštva, če presedlamo na energente z nizkim faktorjem EROEI npr. enakim 5. Taka Slovenija bi sicer lahko pridelala in/ali kupila dovolj hrane za preživetje – a nič več. Z drugimi besedami, družba bi v tem primeru vlagala vso dejavnost samo še v pridobivanje in ustvarjanje pogojev za izkoriščanje energentov in hrane. Tu preprosto nobena miselna telovadba ali filozofiranje ne pomaga. Če prevedemo v preprostejši jezik, denarja za vse ostalo bi zmanjkalo, državljani bi bili obdavčeni do meje, ko bi imeli samo še za hrano in energijo, potrebno za osnovne dejavnosti. Kar se mene tiče: »Hvala za tako družbo!«

3. Kako se v luči EROEI »odrežejo« različni energetske viri

Kakor je moč sklepati iz predhodne razlage glede nafte in potrebnega EROEI za njeno izrabo, je določitev tega faktorja za posamezne energente oz. vire energije, ki jo znamo rabiti, izjemno zahtevna naloga, saj je v družbi »vse povezano z vsem«. Kljub temu so avtorji v preteklosti skušali izvesti izračune EROEI za različne načine pridobivanja energije. Povzemimo v nadaljevanju na kratko njihove izsledke.

2.1 EROEI klasičnih virov

Vodna energija sodi med najstarejše in tudi energetske najučinkovitejše energetske vire. Kljub temu, da gre po vseh fizikalnih kriterijih za obnovljiv vir energije (OVE), ga poklicni okoljevarstveniki ne prištevajo med OVE. Vzroki za to so politično-spekulativne narave, a o tem drugič. Ob današnji tehnologiji dosega proizvodnja elektrike na osnovi vodnih virov EROEI reda 100:1 [4].

Energijo vode lahko izkoriščajo tudi bivične elektrarne, z EROEI približno od 15:1 do 100:1 [5], vendar je prispevek tistih, ki že obratujejo tudi, če jim prištejemo tiste v načrtih, zanemarljiv.

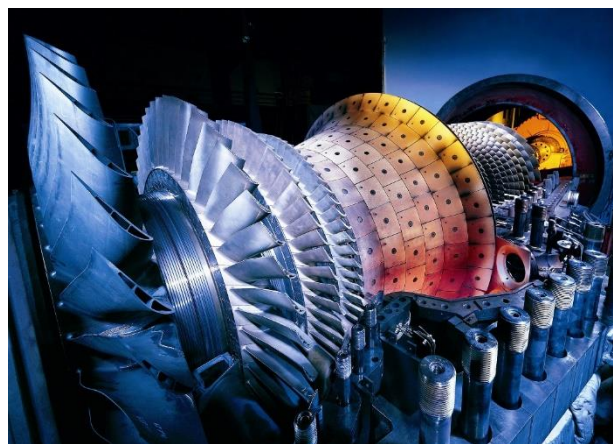
Premog predstavlja navkljub pravi gonji in CO₂ histeriji glavni energent za proizvodnjo električne energije, trenutno premogovne elektrarne globalno zagotavljajo ca. 40 % elektrike. Svetovna poraba premoga je leta 2016 znašala okrog 8 milijard ton [6]. V letih 2005 – 2015 je poraba rastla v povprečju 2,1 % [7] letno.

EROEI premoga za proizvodnjo elektrike je odvisen od tehnologije in danes sega od 27:1 na Kitajskem [8] do 80:1 v ZDA [5].

Nafti že desetletja napovedujejo »skorajšen konec«, prerokovalci katastrof nam slikajo prihodnost v stilu filmov, kjer nastopa kot glavni junak Mad Max. Vendar dejstva kažejo prav nasprotno. V letih 1980 – 2015 je človeška poraba surove nafte zrastle za dobrih 56 % [9], a so dokazane rezerve zrastle za kar 152 % [10]! Pa pri tem nismo upoštevali zalog v naftnih skrilavcih, kar rezerve ob današnji tehnologiji vsaj podvoji. EROEI energije naftnih derivatov je močno odvisen od sestave surove nafte, obsega črpališč, tehnologije ipd., zato segajo njegove vrednosti od 18:1 v ZDA (2006) do 45:1 v Mehiki (2009) [3].

Naravni plin je tako rekoč idealni vir za energetske potrebe človeštva. Pri izogrevanju oddaja samo ogljikov dioksid in vodo. Z njim je mogoče v kombiniranem ciklu proizvajati električno energijo s preko 60-odstotno učinkovitostjo. Uporabiti ga je moč za pogon motorjev z notranjim izogrevanjem, celo letal (Tu-155). Je pa manipulacija z njim nekoliko dražja, kakor z nafto. Zaloge so zelo velike, še posebno če upoštevamo še tako-rekoč nedotaknjene zaloge hidrometana, in jih merimo v stoletjih trenutne porabe.

Naravni plin danes dosega EROEI od 20:1 (Kanada) [11] do 67:1 (ZDA) [3].



Slika 3: Plinsko-parne elektrarne (na sliki »drobovje« turbine) dosegajo na pragu 60% izkoristek. Vir: Siemens

Jedrska energija globalno prispeva nekaj čez 10% električne energije, vendar je njen delež v elektroenergetskem portfelju različnih držav zelo različen. Za države, ki nimajo naravnih danosti za izkoriščanje drugih virov predstavlja skoraj edino tehnično-ekonomsko smiselno možnost za stabilno samooskrbo z električno energijo. Pravzaprav uporabljajo obstoječe jedrske elektrarne (JE) precej staro tehnologijo, ki se v svojem bistvu ni spremenila že skoraj 70 let. Glede na različne vire ima taka proizvodnja energije EROEI nekje 50 – 75:1 [12]. Ponekod srečamo tudi veliko nižjo vrednost faktorja, vendar je podlaga zanj spekulativne narave – glej »Komentar« na koncu

podpoglavja. Razvoj novih tehnologij na tem področju je problematičen zaradi ekstremno ostrih varnostnih standardov in iz političnih razlogov.

Dokaz, da je tehnično gledano možno na tem področju izvesti kvantni preskok predstavljajo t. i. »hitri« reaktorji, ki bi omogočali bistveno boljšo izrabo jedrskega goriva in obratovanje z bistveno manj vzdrževanja. Taka proizvodnja energije ima potencialno $ERoEI > 1200 : 1$ in ni znanstvena fantastika. Izkušenj je kar nekaj, vendar so veliko večina takih reaktorjev ustavili, ker v preteklosti ekonomsko/tehnično niso dosegli zadovoljivih rezultatov. Trenutno dva taka energetska reaktorja s hlajenjem na tekoči natrij obratujeta v Rusiji (BN600 in BN800), v ZDA in drugje pa že razvijajo še učinkovitejše »hitre« reaktorje s hlajenjem na tekočo sol.

Komentar: Avtorji (praviloma nasprotniki jedrske energije) od teh vrednosti odštejejo energijo, potrebno za popravilo posledic, če bi prišlo do jedrske katastrofe širših razsežnosti. Tak pristop je zelo sporen, saj ni mogoče narediti verodostojne ocene za to in postavlja jedrsko energijo v neenakopraven položaj. Po enaki logiki lahko zmanjšamo $ERoEI$ npr. sončnih in/ali vetrnih elektrarn, za primer izbruha vulkana in nastopa globalne zime. S to razliko, da bodo v tem primeru »obnemeli« vsi OVE, v primeru okvare nuklearke pa le ena.

3.2 $ERoEI$ sodobnih, obnovljivih virov energije (OVE)

Postavimo ob bok klasičnim virom sedaj OVE. Ker OVE v splošnem nimajo sposobnosti klasičnih elektrarn in je njihova proizvodnja po svoji naravi stohastična in odvisna zgolj od naravnih danosti (trenutna osončenost, trenutna hitrost vetra), nudi določitev njihovega $ERoEI$ obilo priložnosti za špekulacije. Dejansko je ta odvisen od mnogih faktorjev in se lahko bistveno razlikuje za isti tip OVE. Navedimo v nadaljevanju samo najvažnejše.

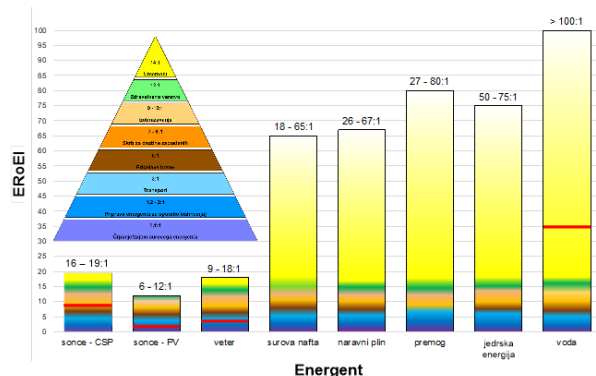
- Naravne danosti – seveda ni vseeno ali sončna elektrarna (SE) leži v Sahari ali Skandinaviji.
- Če je delež OVE v elektroenergetskem sistemu (EES) majhen, OVE v bistvu izkoriščajo njegovo inherentno rezervo in potrebni niso skoraj nobeni dodatni ukrepi v EES, $ERoEI$ takih OVE je lahko relativno visok.
- Če delež OVE preseže določen delež moči in/ali energije v EES se lahko razmere iz predhodne točke drastično spremenijo in OVE morajo dobiti funkcionalnost klasičnih elektrarn, da lahko EES funkcioniira, kakor smo navajeni, t. j. da imajo porabniki na razpolago elektriko »po mili volji«.

Z drugimi besedami; potrebno je zagotoviti rezervo s klasičnimi viri, ojačati omrežje in/ali vgraditi shranjevalnike električne energije. Ti ukrepi lahko drastično poslabšajo $ERoEI$ OVE in stanejo več, kot sami OVE.

Poglejmo sedaj, kaj pravijo nekateri avtorji.

Fotocelice naj bi po trditvah njihovih proizvajalcev dosegale $ERoEI$ 6 – 12 : 1 [3], vendar to velja pod laboratorijskimi pogoji in brez upoštevanja energije, ki je potrebna za njihovo namestitev in priključitev v EES.

Pri promociji OVE velikokrat slišimo argumente njihovih zagovornikov, ki praviloma vsebujejo besedno zvezo »tehnični napredek«. Seveda je to res. Na primer, celice, ki so jih razvili francosko podjetje Soitec, in inštituta Fraunhofer ISE (Nemčija)



Slika 4: $ERoEI$ energentov, ki jih že uporabljamo, v primerjavi s piramido dejavnosti. Rdeča črta označuje pri virih, na proizvodnjo katerih nimamo oz. imamo omejen vpliv, $ERoEI$ upoštevajoč rezervo/akumulacijo.

ter CEA-Leti (Francija) naj bi dosegale učinkovitost 46% in najbrž lahko pričakujemo še nove znanstveno-tehnološke uspehe v tej smeri. Ampak vse to ne more dosti pomagati. Tudi, če bi dosegle 100% učinkovitost in bi jih postavili v področje z največjo osončenostjo na Zemlji, bi še vedno realno dosegale $ERoEI$ največ 8 – 8,5 in lahko zagotavljale poljedeljsko družbo, ki skrbi za neaktivne člane. Vendar pri tem še vedno ni upoštevan transport elektrike do porabnikov, ki pač živijo v manj osončenih predelih od Sahare in zaloge za ponoči. Upoštevajoč tudi potrebno skladiščenje energije avtorji v [31] navajajo številke okrog 1.6.

Ferruccio Ferronia in Robert J. Hopkirk sta vse omenjeno skušala upoštevati za področje Švice (ki je po osončenosti precej podobna Sloveniji) [14]. Ugotovila sta, da je povprečni $ERoEI$ za fotovoltaične celice na teritoriju Švice $0,82 \pm 15\% : 1$, torej, v svoji življenjski dobi ne proizvedejo niti toliko energije, kot jo je bilo potrebne za njihovo izdelavo, namestitev, priključitev v EES in prilagoditev EES! Kot sta avtorja zapisala v zaključku članka " ... dobave električne energije na osnovi današnjih fotovoltaičnih celic ne moremo pojmovati kot energetska vir, ampak kot ponor in čisto energetska izguba."

Vetrne elektrarne (VE) predstavljajo največji delež vseh t.i. sodobnih OVE, globalno proizvedejo ca. 3% svetovne elektrike, v EU27 pa celo okrog 10%. Seveda vse skupaj s pomočjo zakonodaje, ki zahteva odkup njihove proizvodnje, tudi če elektrike nihče ne rabi in hidroelektrarne vodo prelivajo, na borzi pa pride do negativne cene elektrike (!!!).

V testih dosegajo vetrne elektrarne povprečni $EroEI$ 19,8 : 1, vendar gre to visoko povprečje predvsem na račun meritev ob stalni hitrosti vetra, za katero so vetrnice načrtovane [15]. To sliko močno pokvari z zahtevo po funkcionalnosti klasičnih elektrarn. Friedrich Wagner^[1] je na osnovi proizvodnje nemških OVE v letih 2010 – 2013 in 2015 izračunal, da je bilo mogoče proizvodnjo OVE (največja obremenitev = 100%) uskladiti z delovanjem EES, če dodamo 89% energije iz klasičnih elektrarn [16]. Druga pot bi bila, da bi za hranjenje odvečne energije, ki jo proizvedejo vetrne elektrarne kot najpogostejši OVE, zgradili ustrezne hranilne zmogljivosti, npr. v črpalnih elektrarnah. A to bi $ERoEI$ energije, ki jo lahko generiramo z vetrnimi elektrarnami, več kot prepolovilo. V [31] navajajo $ERoEI$ VE

okrog 16, če pa obračunamo tudi potrebne ukrepe za rezervo in/ali skladiščenje, pade ta na 3,9, kar je zelo nizko.

Koncentrirana sončna moč (CSP - Concentrated Solar Power) predstavlja elektrarno, ki z množico ogledal koncentriira sončno sevanje v majhno področje (tipično na stolpu ali v gorišču paraboloida), kjer segreva utekočinjeno sol ali uparja vodo. Toploto iz utekočinjene soli z izmenjevalci prenaša v vodno paro, ki poganja običajne parne turbine z generatorji. Prednost take elektrarne v primerjavi z ostalimi OVE je, da lahko višek pregrete soli shranjuje v posebej izoliranih shranjevalnikih, in jo dovaja v izmenjevalec takrat, ko sončne energije ni več dovolj ali ko naraste poraba – elektrarna CSP lahko torej v določeni meri sledi porabi elektrike v omrežju in celo proizvaja elektriko po sončnem zahodu. Slaba stran pa je, da je od izmenjevalca dalje proizvodni del tehnično enak kot v termoelektrarnah in realno lahko doseže učinkovitost do 50% [17]. Elektrarne CSP so sicer lahko bolj učinkovite kot fotovoltaične celice v zelo vročih krajih, saj zmogljivosti slednjih s temperaturo (nad 21 °C) upadajo. Njihov EROEI je ne upoštevajoč problema prenosa in skladiščenja energije nekje 16 – 19 : 1 [31], če upoštevamo skladiščenje pa pade nekje na 9.

Geotermalna energija je sicer na videz neizčrpen vir energije, vendar je smiselnost njenega izkoriščanja močno odvisna od naravnih danosti. Z drugimi besedami, posploševanje razmer, kot so na Islandiji, ki leži na srednjeatlantskem grebenu, in že v globini 50 – 300 m pod površino naletimo na pregreto paro, ni relevantno. Drugod po svetu velja kot velik uspeh, če iz globine 1500 metrov dobimo vodo temperature 55°C. Tako pridobljeno geotermalno energijo na nizkem temperaturnem nivoju pa je mogoče izkoriščati le za ogrevanje bivalnih prostorov, pa še to večinoma le ob uporabi toplotnih črpalk, ki seveda zahtevajo električno energijo. Končni učinek (če zanemarimo stroške oz. energijo za izdelavo vrtine) je odvisen od kakovosti izmenjevalcev, a tipično ne presega EROEI 2:1, zato omembe vrednega deleža energije, ki jo potrebuje naša civilizacija, ne more prispevati.

Kot »eksoitika« lahko iz energetskega stališča označujemo različne ideje, kot so izkoriščanje morskih valov, izkoriščanje morskih tokov, bioplinarne na kmetijske pridelke, bioetanol, biodiesel, kurjenje odpadkov, izkoriščanje temperaturne razlike v oceanih, pa še marsikaka »šank – ideja« bi se našla. Skupno tem idejam je, da je dejanski EROEI zelo majhen, v nekaterih primerih je celo pod 1 (in torej ne proizvajajo, temveč porabljajo energijo) že na nivoju gole pridelave.

Ena takih genialnih idej je ideja biogoriv (bioetanol iz koruze in sladkornega trsa in »bio« dizelsko gorivo iz oljne palme, oljne ogrščice in soje). Zaradi ekološke in občečloveško moralne spornosti takega početja vpletimo nekoliko tudi socialni vidik. Subvencionirana pridelava biogoriv vspostavlja konkurenco med pridelavo teh poljščin za hrano in za pogon motornih vozil in s tem draži hrano [18]. Indur M. Goklany ocenjuje, da je spodbujanje proizvodnje biogoriv samo v letu 2010 povzročilo dodatnih 192.000 smrti zaradi lahkote [19]. Da o degradaciji okolja zaradi tega in hipokriziji raznih kvaziokoljevarstvenikov, ki tečnarijo za vsako drevo (ki sploh ni njihovo) in uvajajo »pasuše« za prevoz drv, zagovarjajo pa, da v tropih dobesedno »zradirajo« tisoče hektarov pragozda in postavijo plantaže oljnih palm. Pa nikomur nič!

3.3 Kaj pa EROEI energetskih virov bodočnost?

Ko govorim o prihodnosti si ne morem si kaj, da ne bi ob tem citiral svojega kolega Miša, ki pravi naslednje-citiram.

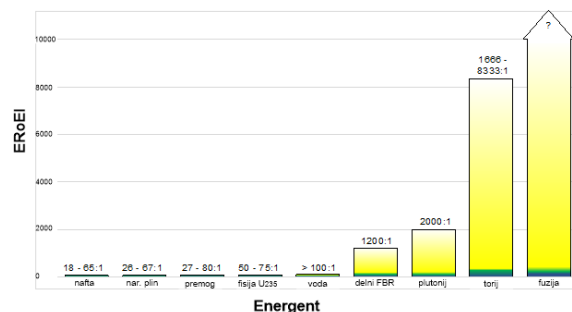
»Še enkrat se spomnimo nauka iz stave Simon-Ehrlich: človeška civilizacija je bila ob upoštevanju takrat znanih virov vedno pred propadom in vedno znova so jo »rešile« nove tehnologije [20]. Energentov, ki danes zagotavljajo preko 90 % energije za potrebe človeštva, nam vsaj še naslednjih 50 let ne bo zmanjkalo. In če v naslednjih 50 letih ne odkrijemo nič novega na področju energetike, kar bi zagotavljalo našo bodočo oskrbo, potem si pa res zaslužimo, da propademo.«

Če upoštevamo poleg stave Simon-Erlich še znamenit izrek Nielsa Bohra, da »je napovedovanje težavna reč, še posebno, če gre za prihodnost«, potem je bolj ali manj na dlani, da na osnovi današnjega znanja ne moremo znanstveno utemeljeno napovedati, koliko energije bodo naši zanamci potrebovali čez 50 let, niti, kako jo bodo znali pridobivati. A nekatere tehnologije, ki obetajo še bistveno bolj obilno preskrbo človeštva z energijo, imamo že danes, nekatere pa uspešno razvijamo.

Po drugi strani, kakor je bilo že omenjeno, verjamem, da se bo piramida človeških dejavnosti (slika 2) ob predpostavki napredka civilizacije (če to pojmuje kot višanje človeškega blagostanja za večino ljudi in sploh ni nujno dejstvo, a recimo, da upanje umre zadnje) višala in družba bo potrebovala vire z vedno višjim EROEI.

Špekulirajmo in pogledjmo nekatere tehnologije, ki sicer še niso dovolj razvite, vendar lahko na podlagi obstoječega stanja njihovega razvoja oz. znanja vsaj »kredibilno špekuliramo«.

Hitri reaktorji so dobili ime po dejstvu, da je povprečna hitrost nevtronov v sredici v primerjavi z obstoječimi klasičnimi (termičnimi reaktorji) bistveno višja. Vzdrževanje kontrolirane verižne reakcije je v takih razmerah bistveno bolj zapleteno, vendar ne nemogoče. Take reaktorje je možno izdelati že z obstoječo tehnologijo, vendar ekonomsko še niso opravičljivi. Njihova glavna prednost je za red ali dva velikosti boljša izraba goriva, kot v obstoječih reaktorjih, ustrezno temu manjša količina hkrati bistveno manj problematičnih odpadkov in potencialna možnost obratovanja več desetletij skoraj brez vzdrževanja. Predvidevajo, da bi imel tak način izkoriščanja urana EROEI > 2000.



Slika 5: EROEI energentov, ki jih že uporabljamo, v primerjavi z možnimi bodočimi.

Torijevi reaktorji so z današnjo tehnologijo po vsej verjetnosti že izvedljivi. Torija je na Zemlji 3,3-krat toliko kot urana; ob absorpciji nevtrona se pretvori v uranov izotop U233, ki ima kot gorivo podobne lastnosti kot U235, ki je »gorivo«

obstoječih, termičnih reaktorjev. Za energetske potrebe je (kolikor danes vemo) najbolj učinkovita tehnologija s tekočim torijevim fluoridom (LFTR - Liquid Fluoride Thorium Reactor), ki ni nova: prvi tak reaktor so razvili že v 1950tih letih v laboratoriju Oak Ridge v ZDA, kot možni vir energije za prvo ameriško jedrsko podmornico Nautilus [21] (a kasneje ni bila izbrana ta rešitev). Prednosti torijevih LFTR reaktorjev pred obstoječimi uranovimi bi bile med drugim:

- približno 200 krat manj nevarnih odpadkov, ki pa jih je treba hraniti le okrog 300 let, saj ni plutonija in ostalih transuranovih odpadkov,
- skoraj nemogoče je izrabljeno gorivo uporabiti za izdelavo jedrske bombe,
- velik negativni temperaturni koeficient in inherentna varnost zaradi potrebe po permanentnem odstranjevanju Xe; če tega ne počnemo se reaktor sam od sebe zaustavi,
- reaktorska posoda ni pod visokim tlakom, kar bistveno zmanjša varnostne probleme,
- v primarnem krogu ni vode in torej ni nevarnosti tvorbe vodika (problem v Fukošimi), ravno tako ni grafita, ki bi se lahko vžgal (Černobil),
- če bi razvili tehnologijo bi bili LFTR verjetno relativno poceni,
- pogostost torija v večini držav.

Danes razvijajo LFTR na Japonskem [22], na Kitajskem [23], v Avstraliji [24] ter v ZDA [25, 26] (in najbrž še kje). V odvisnosti od uporabljene tehnologije bi lahko imel LFTR EROEI od 1666 do 8333:1 [27].

Da je **fuzija** vir prihodnosti se govori, odkar pomnim. Vendar hkrati že kakih 30 let poslušam, da bo za širšo uporabo nared čez 30 let. Očitno ne gre tako enostavno, kakor so predvidevali na začetku. Kot glaven problem se je, poleg ekstremnih pogojev, ki jih zlivanje jeder zahteva, in kontroliranja reakcije, izkazalo doseganje pozitivne energetske bilance fuzijskega reaktorja.

V preteklosti je bilo kar nekaj uspešnih kontroliranih zlivanj jeder z uporabo različnih principov, vendar le za zelo kratek čas in, kot rečeno, z negativno energetsko bilanco. 21. stoletje in bistveno povečanje natančnosti pri simulaciji obnašanja plazme so prinesli novo upanje: stelaratorja Wendelstein 7-X [28] na inštitutu Max Planck v Nemčiji in HSX (Helically Symmetric Experiment) [29] na univerzi Wisconsin–Madison v ZDA obetata zadrževanje plazme, primerne za zlivanje jeder, za celih 30 minut! Seveda to še ni zagotovilo, da bomo že kmalu dobivali energijo iz fuzije, a res presenetljiv napredek v zadnjih letih vsaj daje upanje, da je to mogoče. O tem, kakšen bi bil EROEI take tehnologije zaenkrat ne moremo niti špekulirati.

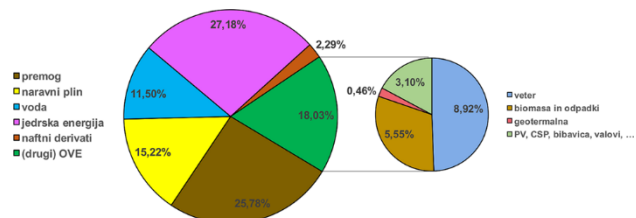
6. Ekonomska ocena eksperimenta »Energiewende« in kaj to pomeni za Slovenijo

Za projekt Energiewende (energetski preobrat) je do sedaj Evropa porabila približno 1000 milijard €. Samo za občutek. Če bi petmetrske avtomobile, ki stanejo vsak 50.000 € (recimo Mercedes E razreda) postavili eden drugega dotikajoč se v vrsto. Bi za ta denar kupili kolono, ki bi jo lahko ovili 2,5 krat okoli zemeljskega ekvatorja.

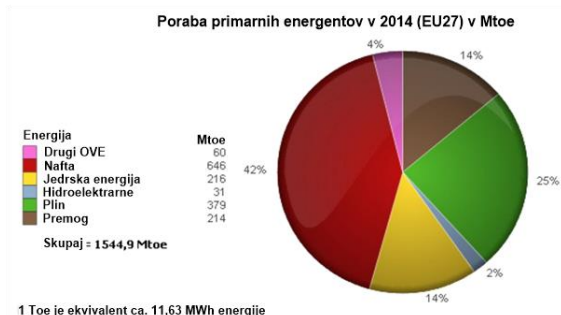


Slika 6: Cena evropskega energetskega eksperimenta.

In kaj smo s tem naredili v smislu tega, kar je bil formalni razlog za tako politiko? Ne dosti! Na kratko povedano, 18% električne energije proizvajamo v EU z OVE. Sledi velik AMPAK: ob pomoči zakonodaje, ki zahteva odkup njihove proizvodnje, tudi če elektrike nihče ne rabi in hidroelektrarne vodo prelivajo, na borzi pa pride do negativne cene elektrike. Zato je treba te procenete gledati še bolj sumničavo, ker je v njih tudi energija, ki so jo zaradi regulative morale ostale elektrarne dobesedno »vreči stran.« V skupni rabi energije EU to znese 3%, če prištejemo pa še razne biodiesle in bio-metanole za goriva, dobimo 4%. Na svetovnem nivoju so te številke še ca. 3 krat manjše. Torej ca. 7% elektrike in 1% vse energije. »Zlobneži« so izračunali (z enakimi metodami, kot znamenito omejitev izpustov CO₂, da se ne preseže ogrevanje planeta za 2o – seveda neumno, vendar lepo za primerjavo), da bi Nemčija z vsemi svojimi silnimi preteklimi in predvidenimi vlaganji v razogljíčenje ta »prelomni trenutek« samo zamaknila za 6 mesecev (Slovenija pa dva dni). Človek se res vpraša, kako je mogoče, da take neumnosti relativno dobro izobraženi državljani EU požrejo in plačajo iz svojih žepov.



Slika 7: Osnovni energenti za proizvodnjo električne energije v EU-27 v letu 2014 (Vir: The Shift Project Data Portal)



1 Toe je ekvivalent ca. 11,63 MWh energije

Slika 8: Poraba primarnih energentov v EU-27 v letu 2014 (Vir: The Shift Project Data Portal)

Pa pogledjmo, kako bi bil/bo (vseeno upam, da ne bo) učinek »razogljíčenja« Slovenije. V politično zastavljenih strategijah energetske oskrbe Slovenije bomo občasno naleteli na izraz »energetska učinkovitost«, ki pomeni, koliko energije družba porabi, da ustvari enoto bruto domačega proizvoda. Dejansko je

bolj uporabna obratna vrednost, ki pove, koliko BDP ustvarimo na 1 MWh porabljene energije. Ker naši politiki Slovenijo tako radi primerjajo z najuspešnejšimi članicami EU, naredimo tako primerjavo tudi tu. S podatki na spletu (recimo World Bank) pridemo do številke v Tabela 1 za eno leto.

Država	Poraba končne energije na preb. [MWh]	BDP na preb. [k€]	Koliko BDP ustvarimo na enoto energije [€/MWh]
Luxemburg	89,4	86,9	972
Nemčija	44,4	36,0	810
Slovenija	40,4	18,4	456

Tabela 1. Odnos med BDP in porabo energije

Nadalje moramo ugotoviti, koliko nas kot družbo stane ta energija iz katere potem skozi družbene aktivnosti v Sloveniji nastane teh 456 € BDP. Da to ugotovimo, moramo poznati katere vire uporabimo in koliko stanejo. Na spletni strani Ministrstva za infrastrukturo se nahajajo Energetske bilance Republike Slovenije, navedene energetske vire pa ovrednotimo s stroškom, ki ga ima družba s pridobitvijo te energije (lastna cena elektrike + elektroenergetsko omrežje, cena naftnih derivatov brez davka in trošarin itd.). Stroškovnemu ovrednotenju (ki ga tu ne podajam) je lahko marsikdo oporeka, glede na prepričanje in interese bodisi v eno, bodisi v drugo smer. Vendar bi hkrati kdorkoli tudi težko rekel, da niso "nekje tu" v območju realnega. Za prikaz logike dogajanja in trendov so torej povsem ustrezne. Pri teh in pri nadaljnjih izračunih gre le za oceno in kot rezultat nas zanima velikostni red in ne natančnost na odstotek. Po kalkulaciji ugotovimo, da Slovenijo stane energija, ki zagotavlja da naša družba funkcionira na taki stopnji razvoja in proizvede obstoječ BDP ca. 12,4% tega BDP. Špekulirajmo, koliko bi nas stalo, če bi želeli zamenjati najprej pol porabe elektrike z elektriko iz OVE (sončne-, vetrne-, bioplinarne - scenarij 1), nato celotno trenutno porabo (s tem, da bi bile obstoječe HE porabljene za povečanje porabe v tem času –scenarij 2), nato pa dodatno še pol naftnih derivatov (scenarij 3). Pri tem izračunu se takoj pojavi problem cene "zelene elektrike" in to je lahko predmet neskončnih debat. V nadaljevanju pač podajam neke vrednosti, ki so do OVE zelo prizanesljive. Neposredni ceni OVE je namreč treba prišteti tudi stroške za rezervo in stroške za posebne ukrepe pri reguliranju nemirne proizvodnje (večja poraba goriv klasični elektrarn in zmanjšana življenjska doba le-teh zaradi "opletanja" delovne točke ali strošek hranilnikov energije – glej predhodna razmišljanja) in posebne ukrepe v omrežju (dodatni vodi, koncept pametnih omrežij ...). Temu lahko, če želimo, prištejmo še vse druge subvencije (npr. subvencije za njivo koruze, ki jo obdelujejo s traktorjem za katerega so dobili ½ nakupne cene subvencionirane, iz te koruze v bioplinarni, ki je za izgradnjo dobila subvencije, proizvedemo nekaj elektrike, ki je subvencionirana. Če smo nerealno »na strani OVE« pridemo do 230€/MWh. Zlasti pri zamenjavi nafte z OVE bi bila ta številka verjetno še bistveno višja.

Rezultati za ostale scenarije in za dve izbrani državi so zbrani v Tabela 2. Seveda primerjava med državami ni ustrezna, ker imajo prvič drugačen "energijski mix" in proizvodnja OVE pri nekaterih pripomore k dvigu BDP, ker jih tam delajo (saj pri nas

OVE tudi nekaj zaposlujejo, a to je pljunek v morje). Kot rečeno, gre za občutek. Če povzamem tabelo 2, bi nas zamenjava pol elektrike (npr., ne bi izgradili TEŠ6, temveč morje vetrnic in SE) stala vsako leto denarja za okrog 4% BDP (za dober TEŠ6-vsako leto). Pri scenariju 2, bi bil ta strošek skoraj 8% (nevzdržno za vsako državo), naprej pa skoraj nima smisla razmišljati. In to so, kot rečeno - zaradi upoštevanja nizkega stroška OVE, zelo optimistične številke.

Država	% BDP za energijo	% BDP za energijo Scenarij 1	% BDP za energijo Scenarij 2	% BDP za energijo Scenarij 2
Luxemburg	5,8	7,6	9,3	13,8
Nemčija	7,0	9,1	11,2	16,6
Slovenija	12,4	16,2	19,9	29,5

Tabela 2. Odnos med BDP in porabo energije – različni scenariji »razogljičenja«

Iz Tabele 2 hkrati izhaja tudi, da pri razvitih državah številke niso tako drastične in si to nekatere iz političnih in strateških razlogov preprosto lahko privoščijo in celo kujejo dobičke. Če imajo ustrezno industrijo in/ali banke v bistvu njihovo finančno breme lahko prevalijo na »šibkejš« države, ki so se pri njih primorane zadolževati in kupovati tehnologijo.

Kakor ugotavljajo avtorji v [30] energetske preobrat v bistvu ne predstavlja alternative »zelena energija« DA ali NE, pač pa ALI »zelena energija« ALI ekonomski razvoj. Problem nastane, če neka družba izbere »sonaravno« alternativo, pri čemer ostale države temu ne sledijo in to deželo ekonomsko povsem prehitijo. Tisti, ki to lahko, deželo zapustijo (beri: mladi, izobraženi), ostali pa životarijo? Ko zmanjka denarja je tudi vseh zgodb o ekologiji v hipu konec.

7. Za na konec

V bistvu ni veliko za povzemati. Dokler izkoriščamo vire, ki imajo visok EROEI si lahko privoščimo eksperimente v manjšem obsegu z viri, katerih EROEI je nižji, kot ga zahteva naša civilizacija. Pri resnem prehodu na slednje, pa bi bilo »heca« hitro konec.

Stavim, da se fanatični zagovorniki navidezno »čistih« in bojda »okolju prijaznih« energetskih virov z nizkim EROEI, še posebno pa njihovi tihi sledilci, ne zavedajo, kakšno družbeno spremembo bi predstavljalo udejanjenje njihovih zahtev po hitri popolni zamenjavi fosilnih goriv z »alternativnimi« viri. Spremembe, ki jih zahtevajo, torej takojšnje »razogljičenje« in »raznuklearjenje« globalne energetske oskrbe, bi imele za civilizacijo, kot jo poznamo, uničujoče posledice. V knjigi Propad civilizacij avtor ugotavlja, da tak scenarij sploh ni neverjeten. Analiza propada številnih kultur je pokazala, da njihovemu propadu skoraj nikoli ni botroval zgolj zunanji vzrok, in da bi se mu z racionalnim obnašanjem brez težav izognili, pa so izbrali neracionalno in v končni fazi pogubno strategijo obnašanja na religioznih temeljih (če kot religiozno označimo prepričanje, ki ga ni moč spremeniti z racionalnimi argumenti). Mnogi avtorji na podlagi obstoječih meril dokazujejo, da gre pri ideji gibanj za razogljičenja oskrbe z energijo za vsako ceno in uvedbo virov z nizkim EROEI, po vseh socioloških kazalnikih,

za religijo. Vprašati se moramo ali bomo verjeli znanstveno neutemeljenim prerokbam katastrofe in bojda nujnim ukrepom, ki izničujejo pridobitev razsvetljenstva in svobodo človeka ali razmišljali z lastno glavo in ravnali racionalno v smislu ohranitve civilizacije. Zanašati se na to, da bo namesto nas to storil kdo drug, in da Rim tudi ni propadel v enem dnevu, zagotovo ni prava pot. Rim sicer res ni propadel v enem dnevu, je pa na koncu propadel.

Literatura

1. <http://joannenova.com.au/2017/05/one-coal-worker-or-79-solar-ones-same-electricity/>
2. MIHALIČ, Rafael, ALKALAJ, Mišo. Energija za človeštvo : kaj si želimo in potrebujemo. Življenje in tehnika : revija za poljudno tehniko, znanost in amaterstvo, ISSN 0514-017X, apr. 2017, letn. 68, št. 4, str. 20-29, ilustr
3. EROI of different fuels and the implications for society Charles A. S. Hall n, Jessica G. Lambert, Stephen B. Balogh, Energy Policy 64 (2014) 141–152
4. Cleveland,C.J., Costanza,R., Hall,C.A.S. and Kaufmann,R.(1984): Energy and the U.S. economy: A biophysical perspective. Science, 225, 890-897.
5. EROEI of electricity generation. Jamie Bull, oCoCarbon, MAY 19, 2010
6. World Energy Council – Energy Resources - Coal
7. BP Statistical Review of World Energy June 2016
8. Energy Return on Investment (EROI) of China's conventional fossil fuels: Historical and future trends. Yan Hu, Charles A.S. Hall, Jianliang Wang, Lianyong Feng, Alexandre Poisson. Energy (2013) 1-13
9. Index Mundi - World Crude Oil Consumption by Year
10. Index Mundi - World Crude Oil Reserves by Year
11. J. Freise: The EROI of conventional Canadian natural gas production. Sustainability, 3 (11) (2011), pp. 2080–2104
12. OMICS International - Energy returned on energy invested
13. New world record for solar cell efficiency at 46%. French-German cooperation confirms competitive advantage of European photovoltaic industry. Press Release 26/14, December 1, 2014; Bernin, France and Freiburg, Germany
14. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. Ferruccio Ferronia, Robert J. Hopkirkb. Energy Policy, Volume 94, July 2016, Pages 336–344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.034>
15. Meta-analysis of net energy return for wind power systems. Ida Kubiszewski, Cutler J. Cleveland, Peter K. Endres. Renewable Energy 35 (2010) 218–225
16. Surplus from and storage of electricity generated by intermittent sources.Friedrich Wagner, Eur. Phys. J. Plus (2016) 131: 445 DOI 10.1140/epjp/i2016-16445-3
17. Electropedia - Battery and Energy Technologies - Steam Turbine Electricity Generation Plants
18. World Bank Chief: Biofuels Boosting Food Prices; NPR, April 11, 2008
19. Could Biofuel Policies Increase Death and Disease in Developing Countries? Indur M. Goklany, Ph.D.; Journal of American Physicians and Surgeons, Volume 16, Number 1, Spring 2011
20. Tim Worstall: But Why Did Julian Simon Win The Paul Ehrlich Bet?; Forbes, 1/13/2013
21. U.S. Geological Survey Marine and Coastal Geology Program; Gas (Methane) Hydrates -- A New Frontier
22. UXC SMR Design Profile Fuji Molten Salt Reactor
23. China Details Next-Gen Nuclear Reactor Program. Richard Martin, MIT Technology Review, October 16, 2015
24. Thorium Energy Generation Pty Limited (ACN 125319726) Consolidated Submission to the Nuclear Fuel Cycle Royal Commission
25. Flibe Energy
26. ThorCon Power
27. Thorium EROEI. Charles Barton, The Oil Drum, April 11, 2008
28. Wendelstein 7-X
29. The Helically Symmetric eXperiment – HSX
30. <https://mpira.ub.uni-muenchen.de/67422/>
31. D. Weißbach, G. Ruprecht, A. Huke, K. Czerski, S. Gottlieb, A. Hussein; Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants, Energy 52 (2013) 210-22