

***Vaclav Smil***

**KAKO V RESNICI DELUJE SVET**

*Znanstveni vodič po preteklosti,  
sedanjosti in prihodnosti*



*Vaclav Smil*

# **KAKO V RESNICI DELUJE SVET**

*Znanstveni vodič po preteklosti,  
sedanjosti in prihodnosti*

*Prevedel Samo Kuščer*



---

**Ljubljana 2023**

**Vaclav Smil**  
**KAKO V RESNICI DELUJE SVET**  
**Znanstveni vodič po preteklosti, sedanjosti in prihodnosti**

**HOW THE WORLD REALLY WORKS**  
**A Scientist's Guide to Our Past, Present and Future**

Copyright © Vaclav Smil, 2022. All rights reserved.

© za Slovenijo UMco, 2023. Vse pravice pridržane.

*Prevod:* Samo Kuščer  
*Izdajatelj in založnik:* UMco, d. d.  
Zbirka Angažirano

*Odgovorni urednik:* Samo Rugelj  
*Pomočnica urednika:* Nika Hranjec  
*Oblikovanje ovitka in postavitev:* Aleš Cimprič  
*Korektura:* Sandi Kodrič in Boštjan Svete  
*Številčenje kazala in redakcija opomb:* Neža Vilhelm  
*Slika na naslovnici:* iStock  
*Tisk:* Camera, d. o. o.  
*Naklada:* 400 izvodov, 1. natis  
Ljubljana 2023

Knjižno delo je izšlo v okviru programa, ki ga sofinancira  
Javna agencija za knjigo Republike Slovenije.

V okviru določil Zakona o avtorski in sorodnih pravicah so brez pisnega dovoljenja založbe prepovedani reproduciranje, distribuiranje, javna priobčitev, predelava ali druga uporaba tega avtorskega dela ali njegovih delov v kakršnem koli obsegu ali postopku, v številni fotokopiranje, tiskanje in shranjevanje v elektronski obliki.

CIP - Kataložni zapis o publikaciji  
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

001

SMIL, Vaclav

Kako v resnici deluje svet : znanstveni vodič po preteklosti, sedanjosti in prihodnosti / Vaclav Smil ; prevedel Samo Kuščer.  
- 1. natis. - Ljubljana : UMco, 2023. - (Zbirka Angažirano)

Prevod dela: How the world really works  
ISBN 978-961-7136-70-8  
COBISS.SI-ID 146402051

# Vsebina

Uvod	
<i>Zakaj potrebujemo to knjigo?</i>	7
1. Razumevanje energije	
<i>Goriva in elektrika</i>	21
2. Razumevanje proizvodnje hrane	
<i>Prehranjevanje s fosilnimi gorivi</i>	61
3. Razumevanje našega materialnega sveta	
<i>Štirje stebri sodobne civilizacije</i>	101
4. Razumevanje globalizacije	
<i>Stroji, mikročipi in še kaj</i>	137
5. Razumevanje nevarnosti	
<i>Od virusov in prehrane do sončnih izbruhov</i>	179
6. Razumevanje okolja	
<i>Imamo le eno biosfero</i>	223
7. Razumevanje prihodnosti	
<i>Med apokalipso in singularnostjo</i>	271
Dodatek: Razumevanje števil	
<i>Velikostni redi</i>	303
Viri in opombe	307
Imensko in stvarno kazalo	377



# Uvod

## *Zakaj potrebujemo to knjigo?*

VSAKA DOBA JE NEKAJ POSEBNEGA. Zadnje tri generacije v desetletjih po drugi svetovni vojni morda niso doživele tako korenitih sprememb kakor tri generacije pred prvo svetovno vojno, vendarle pa ni manjkalo edinstvenih dogodkov in dosežkov. Danes več ljudi živi bolje in dlje ter so bolj zdravi kakor kdaj koli prej, čeprav so ti, ki jim gre bolje, še vedno v manjšini – le približno petina jih je v celotnem svetovnem prebivalstvu skoraj 8 milijard ljudi.

Drug dosežek, ki je vreden občudovanja, je naše razumevanje tako fizičnega sveta kot vseh živih organizmov. Naše znanje sega od splošnih ugotovitev na ravni vesolja (o galaksijah in zvezdah) in planeta (o ozračju, hidrosferi in biosferi) do dogajanj na ravni atomov in genov: na površino najzmogljivejših mikroprocesorjev zarisujejo dele, ki so le okoli dvakrat širši od premera človeške molekule DNK. Z vsemi temi dognanji smo zgradili naraščajočo množico strojev in naprav ter vpeljali nešteto postopkov, protokolov in posegov, ki vzdržujejo sodobno civilizacijo. Obseg našega celokupnega znanja in vseh načinov, kako ga uporabljamo, pa močno presega dojemanje posameznega človeškega uma.

Leta 1500 bi na Trgu sinjorije v Firencah še vedno lahko srečali kakega čisto zaresnega renesančnega človeka, kmalu zatem pa ne več. Sredi 18. stoletja sta francoska učenjaka Denis Diderot in Jean le Rond d'Alambert še vedno lahko zbrala skupino razgledanih sodelavcev, da sta izdala 28 zvezkov *Enciklopedije* (*Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*) z večjim delom znanja tistega časa. Nekaj generacij pozneje sta se ob temeljnih odkritjih – od magnetne indukcije (Michael Faraday leta 1831, osnove za proizvodnjo elektrike) do presnove rastlin (Justus von Liebig leta 1840, osnove za umetna gnojila) in teorij o elektromagnetizmu (James Clerk Maxwell leta 1861, osnove za brezžično komunikacijo) – obseg in poglobljenost našega znanja povečala za več velikostnih redov.

Leta 1872, sto let po izidu zadnjega zvezka *Enciklopedije*, je bil zaradi hitrega razvoja strokovnih področij možen le še površen pregled vsega znanja, stoletje in pol pozneje pa ne moremo vsega zaobjeti niti znotraj posameznih ožjih področij. Izrazi, kot sta na primer »fizika« ali »biologija«, so razmeroma ohlapne oznake, strokovnjak za fiziko delcev pa se na primer težko prebije že čez prvo stran novega strokovnega članka s področja virusne imunologije. Zaradi takšnega drobljenja znanja odločanje v sferi javnega življenja seveda ni preprosto. Nadvse specializirana področja sodobne znanosti so postala tako težko razumljiva in malodane skrivnostna, da se morajo strokovnjaki včasih izobraževati vse do svojega petintridesetega leta, če se želijo pridružiti tej novi duhovščini.

Kljub temu da jih družijo dolžina vajeniške dobe, pogosto niso enotnega mnenja, kako najprimerneje ukrepati. Med pandemijo virusa SARS-CoV-2 se je jasno pokazalo, da se strokovna



mnenja lahko krešejo celo pri tako preprostih vprašanjih kot je nošnja obrazne maske. Konec marca leta 2020, tri mesece po začetku pandemije, je Svetovna zdravstvena organizacija ta ukrep, razen za okužene posameznike, še vedno odsvetovala, priporočilo so spremenili šele na začetku junija tistega leta. Kako naj se potemtakem človek brez strokovnega znanja sploh odloči glede teh nesoglasij, ki se pogosto končajo s preklicem trditve, ki so prej veljale za nesporne?

Takšne negotovosti in dvomi pa vendarle ne pojasnijo močno razširjenega nerazumevanja, kako deluje naš sodobni svet. Konec koncev ni isto, ali ne vemo, kako pridelujejo pšenico (2. poglavje) ali kako nastaja jeklo (3. poglavje), ali pa ne dojemamo femtokemije (preučevanja kemičnih reakcij v časovnih okvirih  $10^{-15}$  sekunde, Ahmed Zewail je za te raziskave leta 1999 prejel Nobelovo nagrado) ali ne razumemo verižnih reakcij s polimerazo (hitrega kopiranja DNK, Kary Mullis, Nobelova nagrada leta 1993).

Zakaj torej večina ljudi v sodobni družbi tako slabo razume, kako svet dejansko deluje? Ponuja se očitna razlaga, da je vse pač preveč zapleteno, da bi lahko razumeli. Večinoma imamo opravka le s preprostimi izhodnimi podatki iz naprav, ne da bi vedeli kar koli o njihovem delovanju. To drži tako za povsod prisotne naprave, kot so mobilni telefoni in prenosni računalniki (pri teh do želenega podatka pridemo s tipkanjem preprostega vprašanja), kot za množične postopke, na primer cepljenje leta 2021, ki ga je človeštvo videlo predvsem kot injekcijo v ramo – brez poglobljenega razumevanja. Pomanjkanja našega razumevanja pa ne moremo pojasniti zgolj z vse ožjo strokovnostjo, ki vodi k splošnemu plitvemu najosnovnejšemu razumevanju in celo nevednosti.

K pomanjkanju razumevanja sta močno prispevali urbanizacija in avtomatizacija. Od leta 2007 več kot polovica človeštva živi v mestih (v premožnih državah več kot 80 odstotkov), nasprotno od mest industrijskega sveta 19. in začetka 20. stoletja pa so poklici v sodobnih urbanih območjih pretežno storitveni. Večina sodobnih meščanov nima stika s postopki pridelovanja hrane, prav tako skoraj ničesar ne vedo o sestavljanju in delovanju raznovrstnih naprav. Ker je vsa proizvodna dejavnost vse bolj mehanizirana in avtomatizirana, se le droben delež svetovnega prebivalstva ukvarja z zagotavljanjem energije, potrebne za vzdrževanje civilizacije, in materialov, ki sestavljajo naš sodobni svet.

V Ameriki je zdaj le okoli tri milijone prebivalcev (lastnikov kmetij in njihove delovne sile) neposredno vpletenih v pridelavo hrane – oranje, sejanje, gnojenje, pletje in spravljanje pridelka (obiranje sadja in pobiranje zelenjave je fizično najintenzivnejši del celotnega postopka) ter oskrbo živali. To je manj od enega odstotka celotnega prebivalstva ZDA, zato ni nič čudnega, če se večini Američanov ne sanja, od kod prihajata kruh in meso, ki ju kupujejo, ali pa imajo o tem le bežne predstave. KOMBAJNI žanjejo pšenico – toda, ali žanjejo tudi fižol in lečo? Kako dolgo potrebuje odojek, da postane svinjski kotlet – nekaj tednov ali več let? Večina Američanov tega preprosto ne ve, družbo pa jim dela veliko ljudi po vsem svetu. Kitajska je največja proizvajalka jekla na svetu – vsako leto ga tam stalijo, ulijejo in zvaljajo skoraj milijardo ton –, vendar vse to opravlja manj kot 0,25 odstotka kitajskega prebivalstva, ki šteje kar 1,4 milijarde ljudi. Le nadvse droben delež kitajskega prebivalstva bo sploh kdaj od blizu videl plavž ali razbeljeno jeklo v jeklarni. Tovrstna nepovezanost z dejavnostmi je splošna po vsem svetu.

Razumevanje temeljnih postopkov, ki nam zagotavljajo energijo (v obliki hrane ali goriva) in materialov (kovin, nekovin ali betona) se je poslabšalo in še upada tudi zato, ker se nam ti postopki zdijo nekako staromodni, celo zastareli in nerazburljivi v primerjavi s svetom informacij, podatkov in slik. Nadarjeni mladi ljudje praviloma ne stremijo za poklicem na področju raziskovanja tal ali izdelave boljšega cementa. Privlači jih rokovanje z breztelesno informacijo, ki danes obstaja le kot tok elektronov v nešteto mikronapravah. Odvetniki, ekonomisti, programerji, upravitelji denarnih skladov in drugi prejemajo nesorazmerno visoko plačilo za delo, povsem odmaknjeno od materialne stvarnosti življenja.

Za povrh so mnogi ti častilci podatkov prišli do prepričanja, da bodo s temi elektronskimi tokovi stare materialne nujnosti postale nepotrebne. Namesto polj naj bi zrasle mestne agrarne stolpnice, umetni proizvodi pa naj bi sčasoma sploh odpravili potrebo po kakršnem koli gojenju živil. Dematerializacija naj bi pod taktirko umetne inteligence odpravila našo odvisnost od oblikovanih kosov kovin in obdelanih mineralov, nazadnje se morda celo rešimo potrebe po zemeljskem okolju – zakaj bi ga tudi konec koncev potrebovali, če si bomo uredili življenje na Marsu? Seveda vse to niso le pretirano preuranjene napovedi, temveč sanjarjenje, ki lahko uspeva v družbi, v kateri so lažne vesti postale vsakdanje, stvarnost in izmišljija pa sta se do tolikšne mere pomešali, da lahko verneži, dovetni za kulturne vizije, sprejemajo prepričanja, ki bi jih prodornejši opazovalci v preteklosti povsem neprizanesljivo imeli za mejno ali celo pristno blodnjo.

Nihče, ki bere to knjigo, se ne bo preselil na Mars. Še naprej se bomo prehranjevali z žitom, gojenem na velikih

poljedelskih površinah, ne pa v stolpnica, ki si jih zamišljajo zagovorniki tako imenovanega urbanega poljedelstva. Nihče ne bo živel v dematerializiranem svetu, v katerem ne bi bilo več nobene potrebe po tako nepogrešljivih naravnih storitvah kot je izparevanje vode ali oprashaevanje rastlin. Zagotavljanje teh eksistenčnih nujnosti pa bo vse zahtevnejše, kajti velik del človeštva živi v razmerah, ki jih je premožna manjšina že pred mnogimi generacijami pustila za seboj, naraščajoče potrebe po energiji in materialih pa so tako močno in tako hitro obremenile biosfero, da smo ogrozili njene zmožnosti vzdrževanja tokov in zalog v okvirih, združljivih z dolgoročnim delovanjem.

Podajmo eno samo ključno primerjavo. Leta 2020 letna poraba energije na osebo za okoli 40 odstotkov svetovnega prebivalstva (3,1 milijarde ljudi, med njimi tudi skoraj vse prebivalce podsaharske Afrike) ni bila nič večja kot poraba v Nemčiji ali pa Franciji leta 1860! Če bi se teh 3,1 milijarde ljudi želelo približati pragu dostojnega življenjskega standarda, bi morali vsaj podvojiti – še raje pa potrojiti – porabo energije na osebo, da bi tako povečali količino dobavljene električne energije, okrepi pridelavo hrane ter zgradili nujno urbano, industrijsko in prometno infrastrukturo. Te zahteve bodo biosfero neizbežno izpostavile dodatni degradaciji.

Prav tako se ne moremo izogniti vprašanju, kako se bomo spopadli s podnebnimi spremembami. Zdaj že vlada široko soglasje, da je treba storiti *nekaj*, če se želimo izogniti mnogim nadvse nezaželenim posledicam, ni pa soglasja o ukrepah ali vedenjskih spremembah, ki naj bi najbolje delovale. Tisti, ki se ne menijo za energijske in materialne nuje našega sveta ter raje ponavljajo mantr o zelenih rešitvah, namesto da bi skušali razumeti, kako smo se znašli v sedanjem stanju, imajo

preprost odgovor: treba se je znebiti ogljika – prenehati moramo uporabljati fosilni ogljik in izkoriščati zgolj neusahljive tokove obnovljive energije. Težava je v tem, da našo civilizacijo poganjajo fosilna goriva, ves tehnološki in znanstveni napredek, kakovost življenja in blagostanje pa slonijo na izgorevanju velikanskih količin fosilnega ogljika, od te ključne determinante sodobnega udobnega življenja pa se ne moremo kar posloviti v nekaj desetletjih, kaj šele v nekaj letih.

Popolno razogljichenje svetovnega gospodarstva do leta 2050 si je zdaj mogoče zamisliti le ob nepojmljivem gospodarskem upadu ali izredno hitrih transformacijah, ki bi jih izpeljali z malodane čudežnim tehnološkim napredkom. Težko pa si je predstavljati, kdo bi se želel hote izpostaviti prvemu, dokler še nimamo prepričljive, praktično izvedljive in stroškovno sprejemljive globalne strategije ter tehnoloških možnosti, da se lotimo slednjega. Kaj se bo dejansko zgodilo? Razkorak med pobožnimi željami in stvarnostjo je neznansko širok, v demokratični družbi pa se soočanje zamisli in predlogov ne more nadaljevati razumsko, če si vse strani ne delijo vsaj kančka relevantnih informacij o stvarnem svetu, namesto da dokazujejo svoje pristranskosti in vsiljujejo trditve brez podlage v fizičnih možnostih.

V tej knjigi bom poskušal zmanjšati primanjkljaj razumevanja in pojasniti nekaj najosnovnejših stvarnosti, ki nam določajo preživetje in blagostanje. Ne želim podajati napovedi, prav tako ne mislim orisovati ugodnih ali neugodnih možnih prihodnosti. Nobene potrebe ni po širjenju tega priljubljenega in večno neuspešnega žanra, kajti dolgoročno je vse preveč nepredvidenih preobratov in vse preveč zapletenih interakcij,

da bi jih bilo mogoče upoštevati – tako na ravni posameznika kot v širši skupnosti. Prav tako ne mislim zagovarjati katerega koli določenega (pristranskega) tolmačenja stvarnosti – niti kot razloga za obup, niti kot vira brezmejnih pričakovanj. Nisem niti pesimist niti optimist, le znanstvenik, ki skuša pojasniti, kako svet dejansko deluje, s tem razumevanjem pa bom skušal doseči, da bomo bolje dojeli svoje prihodnje omejitve in priložnosti.

Takšno razglabljanje je nujno selektivno, vendar vseh sedem izbranih ključnih področij zadosti pogoju eksistenčne nuje, ničesar nisem lahkomišelnost dodal. V prvem poglavju bomo videli, kako so naše družbe z veliko porabo energije nenehno večale odvisnost od fosilnih goriv in elektrike, te najbolj vsestranske oblike energije. Ko to dobro razumemo, lahko spodbijamo močno razširjena prepričanja (ki izhajajo iz nezadostnega razumevanja kompleksnosti stvarnega sveta), da je mogoče na hitro razogljčiti globalno energijo in da lahko že v dveh ali treh desetletjih shajamo zgolj s pretvarjanjem obnovljivih virov energije. Medtem ko vse večji delež električne energije pridobivamo iz novih obnovljivih virov (sončne in vetrne energije – hidroenergija je že dolgo uveljavljen obnovljiv vir energije) ter uporabljamo vse več električnih avtomobilov, pa bo precej težje razogljčiti tovorni, letalski in pomorski promet ter prilagoditi proizvodnjo ključnih materialov, da ne bo več odvisna od fosilnih goriv.

V drugem poglavju obdelamo najosnovnejšo nujo preživetja – pridelovanje hrane. Poudarek je na pojasnilu, koliko živilom, ki nam zagotavljajo preživetje – od pšenice in paradižnika do morskih rakcev – je skupna potreba po neposredni ali posredni rabi fosilnih goriv. Ko se zavemo te temeljne odvisnosti,

lahko stvarno dojamemo nadaljnjo potrebo po fosilnem ogljiku: razmeroma lahko je proizvajati elektriko z vetrnimi turbinami ali sončnimi celicami namesto z izgorevanjem premoga ali zemeljskega plina, veliko teže pa bi brez tekočih fosilnih goriv poganjali vso kmetijsko mehanizacijo ali brez zemeljskega plina in nafte proizvajali vsa umetna gnojila in druge kemične snovi za kmetijstvo. Skratka, brez uporabe fosilnih goriv kot vira energije in surovin še desetletja ne bo mogoče pridelati dovolj hrane za celotni planet.

V tretjem poglavju pojasnimo, kako in zakaj družbo vzdržujejo materiali, ki jih je ustvarila človeška iznajdljivost. Predvsem se bomo posvetili materialom, ki jim pravim štirje stebri sodobne civilizacije: amonijaku, jeklu, betonu in plastiki. Razumevanje te stvarnosti nam razkrije zavajajočo naravo nedavnih modnih trditev o dematerializaciji sodobnih gospodarstev zaradi prevlade storitev in miniaturizacije elektronskih naprav. Relativna manjša poraba potrebnega materiala za mnoge končne izdelke je eden večjih dosežkov sodobnega industrijskega razvoja. Celotna količina potreb po materialih pa še vedno narašča celo v najpremožnejših državah, v državah z nizkimi prihodki, kjer milijarde ljudi le sanjajo o solidno grajenih stanovanjih, gospodinjskih aparatih in klimatskih napravah (če sploh ne omenjamo avtomobilov), pa te potrebe še zdaleč niso dosegle stopnje nasičenosti.

Četrto poglavje pripoveduje o globalizaciji – o prometni in komunikacijski povezanosti sveta. Zgodovinski pregled nam dokazuje, da so začetki globalizacije že stari, celo starodavni, skrajna stopnja, ki je končno povsem globalna, pa je zelo nova. Podrobnejše preverjanje razkrije, da ni ničesar neizbežnega glede prihodnje usmeritve tega nejasno dojetega pojava, ki ga

nekateri močno hvalijo, nekateri imajo o njem resne pomisleke, nekateri pa ga močno grajajo. V zadnjih letih je po vsem svetu hkrati z naraščanjem populizma in nacionalizma opaziti nekaj nazadovanja, ni pa jasno, kako daleč bo šel ta trend in do kolikšne mere bo na te spremembe vplivala kombinacija gospodarskih, varnostnih in političnih premislekov.

Peto poglavje podaja realistične okvire za presojo nevarnosti in tveganj, s katerimi se soočamo. V sodobnih družbah smo uspešno odpravili ali omilili mnoge predhodno smrtonosne ali vsaj zelo hude nevarnosti, na primer otroško paralizo in rojevanje. Mnoge nevarnosti bodo vedno z nami; nagnjeni smo k nezadostnemu ocenjevanju tveganja, tako da stopnjo nevarnosti, s katero se soočamo, radi podcenjujemo ali precenjujemo. Po tem poglavju bo bralec dobro razumel, kolikšna je relativna nevarnost, ko je nehote izpostavljen čemu običajnemu ali ko kaj namerno počne (od padca v domačem okolju do poleta v drugo državo; od bivanja v mestu, ki ga pogosto prizadenejo orkani, do padalstva). Spoznali bomo tudi vrsto možnosti, kaj lahko uživamo, da bomo dlje živeli.

V šestem poglavju si najprej ogledamo, kako lahko okoljske spremembe vplivajo na naše tri eksistenčne nuje: kisik, vodo in hrano. V preostanku poglavja se bomo posvetili globalnemu segrevanju, spremembi, ki je zadnje čase glavna okoljska skrb in je na eni strani privedla do vznika novega – skoraj apokaliptičnega – katastrofizma, na drugi pa do popolnega zanižanja kakršnih koli težav. Ne bom pa našteval trditev ene in druge strani ali primerjal njihovih verjetnosti (o tem je pisalo že v vse preveč knjigah), temveč bom izpostavil zanimivost, da v nasprotju s splošnim prepričanjem ne gre za nedavno odkrit pojav: osnove tega pojava razumemo že več kot 150 let.



Poleg tega se že več kot stoletje zavedamo dejanske stopnje segrevanja, povezanega s podvojitvijo koncentracije CO<sub>2</sub> v ozračju, svarila o naravi tega planetarnega eksperimenta pa so stara že več kot pol stoletja (neprekinjene, natančne meritve koncentracije CO<sub>2</sub> so začeli izvajati leta 1958). Človeštvo pa se je odločilo, da se za ta pojasnila, svarila in zabeležene podatke ne zmeni, temveč le še krepí svoje zanašanje na izgorevanje fosilnih goriv in tako zagotovi, da ne bomo mogli zlahka ali za majhen strošek odpraviti te odvisnosti. Kako hitro lahko to spremenimo, ostaja nejasno. Če k temu dodamo še vse druge okoljske skrbi, se ne moremo izogniti sklepu, da na ključno eksistenčno vprašanje – ali človeštvo lahko svoja prizadevanja uresniči znotraj varnih meja biosfere? – ni enostavnih odgovorov. Nujno pa je, da razumemo, kaj se dejansko dogaja, saj se le tako lahko učinkovito lotimo reševanja problema.

V zadnjem poglavju se bom zazrl v prihodnost, konkretno na trenutni nasprotujoči si nagnjeni h katastrofizmu (prepričanju, da imamo le še nekaj let, preden zastor dokončno pade na sodobno civilizacijo) in tehno-optimizmu (prepričanju, da si bomo z iznajdljivostjo razširili obzorja in premagali vse omejitve, tako da bodo vse težave postale brezpredmetne). Kot je verjetno jasno, me ne prepriča ne en ne drugi pogled in ju ne bom zagovarjal. Ne verjamem, da se bo človeštvo kmalu znašlo v eni ali drugi skrajnosti. Ne vidim nikakršnega vnaprej določenega izida, temveč zapleteno pot, odvisno od naših – nikakor ne določenih – izbir.

Ta knjiga sloni na dveh temeljih: na obilju znanstvenih ugotovitev ter lastnih raziskavah in pisanju knjig prek obdobja pol stoletja. Med prve sodi vse od prispevkov o pretvorbi energije

in učinkih toplogrednih plinov iz 19. stoletja do najnovejših ocen globalnih izzivov in verjetnosti tveganja. Knjige s tako široko zastavljeno tematiko pa ne bi zmogel napisati, če se ne bi že desetletja ukvarjal z interdisciplinarnimi raziskavami in jih obdelal v mnogih drugih knjigah.

Sodobne znanstvenike lahko v grobem delimo na takšne, ki vrtajo kolikor je mogoče globoko na enem mestu (ta dejavnost je danes najbolj priljubljena pot do slave), in na takšne, ki se razgledujejo po širokih obzorjih (danes je teh vse manj). Nikoli me ni privlačil pristop vrtanja kar se da globoke vrtine, tako da potem dosežeš izjemno mojstrstvo pri ozki strokovnosti ter iz globin zreš na droben košček neba. Vedno sem se raje oziral daleč naokoli, kolikor so mi pač dopuščale moje omejene sposobnosti. Vse življenje pa me je še najbolj zanimala energetika, kajti za solidno dojetje tega področja je potrebno razumevanje fizike, kemije, biologije, geologije in tehnologije, poznati pa je treba tudi zgodovino ter družbene, gospodarske in politične dejavnike.

V skoraj polovici izmed mojih več kot 40 knjig, ki so večinoma bolj strokovne od tele, obravnavam različne vidike energije – od obsežnih vidikov splošne energetike in energije v zgodovini do podrobnejših obdelav posameznih kategorij goriva (nafte, zemeljskega plina, biomase) ter konkretnih značilnosti in postopkov (gostote moči, energijskih prehodov). Preostala moja dela so bolj interdisciplinarna: pisal sem o tako temeljnih pojavih, kot so rast – v vseh njenih naravnih in antropogenih oblikah –, tveganje, globalno okolje (biosfera, biokemična kroženja, globalna ekologija, fotosintezna produktivnost, donos pridelkov), prehrana, kmetijstvo, materiali (predvsem jeklo in umetna gnojila), tehnološki napredek ter razvoj in

nazadovanje proizvodnje, pa tudi o zgodovini antičnega Rima, sodobni ameriški zgodovini in japonski prehrani.

Ta knjiga, namenjena laiku, je kot proizvod mojega življenjskega dela neizbežno nadaljevanje mojega dolgoletnega prizadevanja, da bi razumel temeljno stvarnost biosfere, zgodovine in sveta, ki smo si ga ustvarili. Kot se neumorno trudim že desetletja, se tudi to delo izogiba skrajnim pogledom. Novejši ter vse bolj zagrizeni ali nepremišljeni zagovorniki teh pogledov bodo razočarani, saj ne bodo našli niti tarnanja o koncu sveta leta 2030 niti navdušenja nad neverjetno transformativno močjo umetne inteligence, ki nas bo osrečila prej, kot smo se nadejali. Poskušam le podajati temelje za bolj umerjen in neizbežno agnostičen vidik. Nadejam se, da bo moj razumski, stvarni pristop pomagal bralcu razumeti, kako svet dejansko deluje ter kakšne imamo možnosti, da prihodnjim rodovom zapustimo obete boljše prihodnosti.

Preden pa se lotite konkretnih tematik, bi vas rad posvaril in tudi nekaj prosil. V knjigi mrgoli števil, saj stvarnosti sodobnega sveta ni mogoče razumeti zgolj s kvalitativnim opisovanjem. Veliko števil je neizbežno zelo velikih ali zelo majhnih, kar je najbolje obravnavati z velikostnimi redi, ki jih označujemo s standardnimi predponami. Če vam to ni domače, vam bo v pomoč dodatek o razumevanju velikih in majhnih števil, zato bo morda nekaterim bralcem lažje, če se knjige lotijo s konca. Če pa ne, se vidimo v 1. poglavju s podrobnejšim, kvantitativnim pogledom na energijo. Tega vidika nikoli ne bi smeli zapostaviti.



# 1.

## Razumevanje energije

### *Goriva in elektrika*

ZAMISLIMO SI PREPROST ZNANSTVENOFANTASTIČNI SCENARIJ, v katerem nezemeljska bitja visoko razvite civilizacije pošiljajo sonde do bližnjih galaksij in tudi na Zemljo. To počno zgolj iz želje, da bi čim več razumela, morda pa tudi zato, da bi se izognila nevarnim presenečenjem, če bi jim prebivalci tretjega planeta pri razmeroma običajni zvezdi v spiralni galaksiji postali nevarni ali pa bi morda potrebovala nov dom. Zato redno sledijo dogodkom na Zemlji.

Zamislimo si, da sonda do našega planeta prileti vsakih sto let, programirana pa je tako, da ga še enkrat obkroži in opravi temeljitejši pregled le v primeru, ko zazna pretvorbo energije, kakršne pri predhodnih obiskih ni bilo videti, ali nov pojav, odvisen od te energijske pretvorbe. V okviru fizikalnih pojmov lahko vsako dogajanje – dež, ognjeniški izbruh, rastlinsko rast, plenilstvo živali ali pojav razuma pri človeku – obravnavamo kot vrsto energijskih pretvorb. Nekaj sto milijonov let po nastanku Zemlje te tuje sonde iz naše namišljene zgodbe ne zaznajo drugega kot raznoliko, a vendarle monotono bruhanje ognjenikov, potrese in nevihte v ozračju.

## ***Temeljni premiki***

Prvi mikroorganizmi se pojavijo pred skoraj štirimi milijardami let, vendar jih sonde ne zaznajo, saj jih je malo in so dobro prikriti v alkalnih hidrotermalnih vreclih na oceanskem dnu. Prvič se priložnost za natančnejši ogled pokaže pred okoli 3,5 milijarde let, ko vesoljska sonda v morskih plitvinah zazna enocelične mikrobe, sposobne fotosinteze z vpijanjem kratkovalovne infrardeče svetlobe, ki pa pri tem ne proizvajajo kisika.<sup>1</sup> Več sto milijonov let preteče brez vidnih sprememb, dokler ne začnejo modrozeleno alge oziroma cianobakterije z energijo vidne sončne svetlobe pretvarjati CO<sub>2</sub> in vodo v nove organske spojine ter pri tem sproščati kisik.<sup>2</sup>

To je korenita sprememba, zaradi katere se ozračje obogati s kisikom, vendar traja še 1,2 milijarde let, preden se pojavijo bolj zapleteni vodni organizmi. Tedaj zunajzemeljska sonda zabeleži pojav in bohotenje rdečih alg (žive barve so zaradi barvila fikoeritrin za fotosintezo) in veliko večjih rjavih alg. Zelene alge se pojavijo skoraj pol milijarde let pozneje, zunajzemeljska bitja pa sonde opremijo z natančnejšimi merilnimi napravami, da bolje preučijo morsko dno. To se jim obrestuje, saj pred več kot 600 milijoni let spet odkrijejo nekaj izjemnega – prve organizme iz diferenciranih celic. Ta ploska, mehka bitja naorskem dnu (imenujemo jih ediakaranski organizmi po avstralskem hribovju, kjer so odkrili njihove fosile) so prve preproste živali, ki so pri presnovi potrebovale kisik, nasprotno od alg, ki jih premikajo le morski valovi in tokovi, pa se tudi samostojno gibljejo.<sup>3</sup>

Sonde potem beležijo razmeroma hitre spremembe: ne letijo več nad mrtvimi celinami in ne čakajo več na stotine

milijonov let, preden spet zaznajo epohalen preskok, temveč zaznavajo dviganje, prelamljanje in upadanje valov vznikanja, bohotenja in izumiranja neznanske raznovrstnosti bioloških vrst. Ta doba se začne s kambrijsko eksplozijo življa na morskem dnu (pred 541 milijoni let, ko sprva prevladujejo trilobiti) in se nadaljuje s prvimi ribami, dvoživkami in kopenskimi rastlinami ter nato štirinožnimi (in torej izredno gibljivimi) živalmi. Občasna izumrtja zmanjšajo in včasih skoraj odpravijo to raznolikost, zunajzemeljske sonde pa še niti pred šestimi milijoni let ne vidijo nobenega prevladujočega organizma na planetu.<sup>4</sup> Kmalu zatem sonde skoraj spregledajo pomen mehanskega premika z velikanskimi posledicami, kar zadeva energijo: mnoge štirinožne živali se za kratek čas postavijo pokonci in nerodno hodijo po dveh, pred več kot štirimi milijoni let pa to postane normalna oblika gibanja za opicam podobna bitja, ki vse več časa prebijejo na tleh in ne več na drevju.<sup>5</sup>

Presledki med poročanji sond svojim vesoljskim pošiljateljem o čem pomembnem se zdaj skrčijo z nekaj sto milijonov let na zgolj nekaj sto tisoč let. Sčasoma potomci zgodnjih dvožcev (klasificiramo jih kot opičnjake, ki ob vsej dolgi vrsti naših prednikov pripadajo rodu *Homo*) storijo nekaj, s čimer se podajo na pot do vse hitrejše prevlade na vsem planetu. Pred več sto tisoč leti sonde zaznajo prvo rabo zunajtelesne energije – pretvorbe energije, ki ni vezana na prebavo hrane –, ko nekateri ti pokončni hodci obvladajo ogenj ter ga uporabijo za kuho, večje udobje in varnost.<sup>6</sup> Pri takšnem nadziranem gorenju se kemična energija rastlin pretvarja v toplotno energijo in svetlobo, tako da človečnjaki lahko uživajo prej težko prebavljivo hrano, se grejejo v hladnih nočeh in odganjajo

nevarne živali.<sup>7</sup> To so prvi koraki k obsegu namernega oblikovanja in obvladovanja okolja, ki mu ni primere.

Ta trend se še okrepi z naslednjo izrazito spremembo – začetkom gojenja rastlin za prehrano. Pred približno desetimi tisočletji sonde zaznajo prve zaplate z načrtno gojenimi rastlinami, tako da zdaj drobcen delež celotne fotosinteze na Zemlji obvladuje in uravnava človek z udomačenimi vrstami, ki jih je izbral ter jih sadi, neguje in pozneje pobira pridelek.<sup>8</sup> Kmalu sledi udomačitev prvih živali. Pred tem je človek za fizična opravila uporabljal le svoje mišice – s pretvarjanjem kemične energije zaužite hrane v kinetično (mehansko) energijo dela. Z udomačitvijo delovnih živali, začevši z govedom pred približno 9000 leti, si zagotovi prvo zunajtelesno energijo, uporablja pa jo za delo na polju, dviganje vode iz vodnjakov, vleko in tovorjenje bremen ter za lastno premikanje.<sup>9</sup> Veliko pozneje se pojavijo nežive oblike primarnega pogona: jadra pred več kot petimi tisočletji, vodna kolesa pred več kot dvema tisočletjema in mlini na veter pred več kot tisoč leti.<sup>10</sup>

Pozneje sonde nimajo veliko dela z opazovanjem, saj sledi novo obdobje relativne upočasnitve: stoletje za stoletjem je videti le ponavljanje že obstoječega, zastoje ali počasno rast in širitev uveljavljenih energijskih pretvorb. V Ameriki in Avstraliji, kjer niso poznali ne vlečnih živali ne preprostih mehanskih oblik pogona, so pred prihodom Evropejcev vse delo opravljale človeške mišice. V nekaterih predindustrijskih predelih Starega sveta pomemben delež energije za mletje žita, stiskanje olja, drobljenje in kovanje zagotavljajo delovne živali, veter in tekoča ali padajoča voda, vlečne živali pa postanejo nepogrešljive pri težkem delu na polju (predvsem oranju, saj je žetev še vedno ročna), transportu blaga in vojskovanju.



Tudi v družbah z udomačenimi živalmi in uporabo mehanskih oblik primarnega pogona veliko dela še vedno opravljajo ljudje. Ob uporabi neizbežno nenatančnih podatkov o številu delovnih živali in ljudi ter upošteva je tipično delovno storilnost ocenjujem, da je na začetku drugega tisočletja našega štetja ali 500 let pozneje (leta 1500, ob začetku zgodnje moderne dobe) več kot 90 odstotkov vse uporabne mehanske energije zagotavljala živa sila, v grobem v enaki meri človeška in živalska, medtem ko je vsa toplotna energija izhajala iz izgorevanja rastlinskih goriv (pretežno lesa in oglja, a tudi slame in živalskih iztrebkov).

Leta 1600 pa namišljena zunajzemeljska sonda spet postane pozorna, saj zazna nekaj edinstvenega. Neko otoško ljudstvo se ni več zadovoljilo zgolj z lesom, temveč je začelo kuriti premog, gorivo, ki je nastalo s fotosintezo pred več deset ali sto milijoni let ter pod učinkom toplote in tlaka globoko pod zemljo počasi fosiliziralo. Kolikor je mogoče oceniti, je premog kot toplotni vir v Angliji presegel biomaso okoli leta 1620, morda celo prej. Leta 1650 je izgorevanje fosilnega ogljika zagotavljalo že dve tretjini vse toplote, leta 1700 pa že 75 odstotkov.<sup>11</sup> Anglija s tem začne izjemno zgodaj. Vsi premogovniki, ki so pripomogli k vzponu Združenega kraljestva do položaja vodilne gospodarske sile 19. stoletja, obratujejo že pred letom 1640.<sup>12</sup> Na začetku 18. stoletja v nekaterih angleških premogovnikih začnejo uporabljati parne stroje, prvi neživi primarni pogon, ki ga poganja izgorevanje fosilnega goriva.

Ti prvi stroji so tako neučinkoviti, da jih je mogoče uporabljati le v premogovnikih, kjer je gorivo pri roki in ne zahteva prevoza od daleč.<sup>13</sup> Kljub temu Združeno kraljestvo za zunajzemeljsko sondo ostaja najzanimivejša država na Zemlji, ker je

tako zgodaj prešlo na nov vir. Še leta 1800 so v nekaj evropskih državah in v Združenih državah Amerike skupno nakopali bistveno manj premoga od Britancev.

Leta 1800 zunajzemeljska sonda ugotavlja, da prevladujočemu dvonožcu po vsem planetu rastlinska goriva še vedno zagotavljajo več kot 98 odstotkov vse toplote in svetlobe, človeške in živalske mišice pa 90 odstotkov vse mehanske energije, potrebne za kmetovanje, gradnjo in proizvodnjo. V Združenem kraljestvu, kjer je James Watt v sedemdesetih letih 18. stoletja uvedel izboljšan parni stroj, podjetje Boulton & Watt začne izdelovati stroje s povprečno močjo 25 konj, vendar jih do leta 1800 proda manj kot 500, kar je skoraj zanemarljivo v primerjavi z močjo, ki jo zagotavljajo vprežni konji in človeški težaki.<sup>14</sup>

Še leta 1850 premog kljub naraščajoči količini, ki jo izkopljejo v Evropi in Severni Ameriki, ne zagotavlja več kot 7 odstotkov vse energije, pridobljene iz goriv, skoraj polovico vse uporabne kinetične energije zagotavljajo vlečne živali, okoli 40 odstotkov človeške mišice in le 15 odstotkov trije neživi primarni pogoni: vodna kolesa, mlini na veter in parni stroji, ki se le počasi širijo. Leta 1850 je svet veliko bolj podoben svetu leta 1700 ali celo 1600 kakor pa svetu leta 2000.

Do leta 1900 pa se deleža fosilnih in obnovljivih goriv ter primarnih pogonov že močno spremenita, saj nova energijska vira (premog in nekaj surove nafte) zagotavljata že polovico vse primarne energije, tradicionalna goriva (les, oglje in slama) pa preostalo polovico. Vodne turbine v hidroelektrarnah prvič primarno električno proizvedejo v osemdesetih letih 19. stoletja, sledi geotermalna elektrika, po drugi svetovni vojni pa jedrska, sončna in vetrna (nova obnovljiva vira). In vendar leta

2020 več kot polovico svetovne elektrike še vedno zagotavlja izgorevanje fosilnih goriv, pretežno premoga in zemeljskega plina.

Leta 1900 neživi primarni pogoni zagotavljajo okoli polovico vse mehanske energije: največ prispevajo parni stroji na premog, sledijo izboljšana vodna kolesa in nove vodne turbine (te so uvedli v četrtem desetletju 19. stoletja), mlini na veter in povsem nove parne turbine (od poznih osemdesetih let 19. stoletja) ter motorji z notranjim izgorevanjem (bencinske motorje so uvedli v osemdesetih letih 19. stoletja).<sup>15</sup>

Leta 1950 fosilna goriva zagotavljajo že skoraj tri četrtine primarne energije (prevladuje še vedno premog), neživi primarni pogoni – vodijo bencinski in dizelski motorji z notranjim izgorevanjem – pa več kot 80 odstotkov vse mehanske energije. Leta 2000 so le še revni prebivalci držav z nizkimi prihodki odvisni od goriv iz biomase – les in slama zagotavljata le še okoli 12 odstotkov primarne energije sveta. Motorji na tekoča goriva in elektromotorji so že skoraj povsem nadomestili fizično delo ljudi in živali – to predstavlja le še 5 odstotkov vse porabljene mehanske energije.

V zadnjih dveh stoletjih bi zunajzemeljske sonde lahko sledile nagli globalni zamenjavi primarnih virov energije ob hkratni širitvi in večanju raznovrstnosti ponudbe fosilne energije ter prav tako naglemu uvajanju, sprejemanju in rasti zmogljivosti novih neživih primarnih pogonov – sprva parnih strojev na premog, potem motorjev z notranjim izgorevanjem (batnih in turbinskih). Ob najbolj nedavnem obisku bi sonda videla resnično globalno družbo, ki jo poganjajo obsežne stacionarne in mobilne pretvorbe fosilnega ogljika po vsem svetu z izjemo nekaj nenaseljenih kotičkov planeta.

## ***Sodobna raba energije***

Kako se pozna uporaba zunajtelesnih virov energije? Pri svetovni energiji običajno govorimo o celotni (bruto) proizvodnji, vendar nam več pove količina, ki jo dejansko lahko pretvorimo v uporabne oblike. Zato moramo odšteti izgube pred porabo (med sortiranjem in prečiščevanjem premoga, prečiščevanjem oziroma rafiniranjem surove nafte in pri procesiranju zemeljskega plina), porabo, ki ni energijska (predvsem kot surovine v kemični industriji, pa tudi v obliki maziv za stroje od črpalk do letalskih turbin in kot materialov za tlakovanje), prav tako pa tudi izgube pri prenosu elektrike. S temi popravki in s temeljitim zaokroževanjem pridemo do rezultata 60-kratnega povečanja rabe fosilnih goriv v 19. stoletju, 16-kratnega povečanja v 20. stoletju in približno 1500-kratnega povečanja v zadnjih 220 letih.<sup>16</sup>

Naraščajoča odvisnost od fosilnih goriv je najpomembnejši dejavnik pri razlagi napredka sodobne civilizacije, hkrati pa tudi podlaga naše zaskrbljenosti glede nezanesljivosti dobave in vpliva na okolje pri njihovem izgorevanju. Dejansko se je korist od porabljene energije povečala precej bolj kot za 1500-krat, saj moramo upoštevati tudi istočasno večanje učinkovitosti pretvorb.<sup>17</sup> Leta 1800 je bila učinkovitost izgorevanja premoga v štedilnikih in kotlih za ogrevanje prostorov in vode zgolj 25–30-odstotna, pri delovanju parnih strojev pa sta se v uporabno delo pretvorila le dva odstotka energije iz premoga, tako da v tistih časih celokupna učinkovitost pretvorbe ni preseгла 15 odstotkov. Stoletje pozneje se je celokupna učinkovitost zaradi boljših štedilnikov, kotlov in strojev dvignila na skoraj 20 odstotkov, leta 2000 pa je bila povprečna stopnja

pretvorbe okoli 50 odstotkov. V 20. stoletju se je torej količina porabljene koristne energije povečala za 40-krat, od leta 1800 pa za okoli 3500-krat.

Če si želimo razsežnost sprememb še boljše predstavljati, moramo količine preračunati na osebo. Svetovno prebivalstvo je z ene milijarde leta 1800 naraslo na 1,6 milijarde leta 1900 in 6,1 milijarde leta 2000, tako da je količina uporabne energije (vse vrednosti so podane v gigadžulih (GJ) na osebo) narasla od 0,05 leta 1800 na 2,7 leta 1900 in okoli 28 leta 2000. K porastu globalne stopnje na približno 34 GJ/osebo do leta 2020 je največ prispeval hiter razvoj kitajskega gospodarstva po letu 2000. Povprečni Zemljan ima danes na voljo skoraj 700-krat več uporabne energije kot njegovi predniki na začetku 19. stoletja.

Poleg tega se je količina energije na osebo, rojeno takoj po drugi svetovni vojni, več kot potrojila – od okoli 10 GJ leta 1950 na 34 GJ leta 2020. Če to zadnjo količino prevedemo na ustrezno količino, ki si jo lažje predstavljamo, je to podobno, kot da ima povprečen Zemlja vsako leto zase na voljo okoli 800 kilogramov (0,8 tone ali skoraj šest sodčkov) surove nafte ali okoli 1,5 tone dobrega bitumenskega premoga. Če to prevedemo še v fizično delo, je to toliko, kot da 60 odraslih dan in noč neprekinjeno dela za vsako povprečno osebo; za prebivalce premožnih držav bi ta ekvivalent znašal toliko kot nenehno delo 200 do 240 fizičnih delavcev, odvisno od posamezne države. V povprečju imajo ljudje danes na voljo neznansko več energije kot kdaj koli prej.

Posledice teh sprememb za človeški napor, ure fizičnega dela, količino prostega časa in splošnega življenjskega standarda so očitne. Obilje uporabne energije pojasni vse očitne

pridobitve od boljšega prehranjevanja do množičnih potovanj, od mehanizacije proizvodnje in prometa do hipne osebne elektronske komunikacije – kar je v premožnih državah vse postalo del običajnega življenja in ne več nekaj izjemnega. Nedavne spremembe se močno razlikujejo od države do države: kot bi pričakovali, so skromnejše v državah, v katerih je bila poraba energije na osebo razmeroma velika že pred stoletjem, večje pa v državah, ki so po letu 1950 doživele naglo modernizacijo gospodarstva – na primer na Japonskem, v Južni Koreji in na Kitajskem. Med letoma 1950 in 2020 se je v Združenih državah količina uporabne energije fosilnih goriv na osebo približno podvojila (na okoli 150 GJ), na Japonskem se je več kot popeterila (na skoraj 80 GJ/osebo), na Kitajskem pa se je povečala za več kot 120-krat na skoraj 50 GJ/osebo).<sup>18</sup>

Sledenje večanju količine uporabne energije nam tako veliko pove, ker energija ni le sestavina kompleksnih zgradb biosfere, človeške družbe in njenega gospodarstva, prav tako tudi ni le še ena spremenljivka v zapletenih enačbah, ki določajo razvoj teh medsebojno povezanih sistemov. Pretvorbe energije so temelj življenja in razvoja. Novejšo zgodovino lahko obravnavamo kot nenavadno naglo zaporedje prehodov na nove vire energije, sodobni svet pa je kumulativni rezultat njihovih pretvorb.

Fiziki so prvi spoznali temeljni pomen energije za človeka. Leta 1886 je Ludwig Boltzmann, eden od utemeljiteljev termodinamike, govoril o prosti energiji – energiji, ki je na voljo za pretvorbe – kot o *Kampfobjekt* (predmetu boja) za življenje, ki je v osnovi odvisna od vpadne sončne svetlobe.<sup>19</sup> Erwin Schrödinger, prejemnik Nobelove nagrade za fiziko leta 1933, je takole povzel temelj življenja: »Organizmi se prehranjujejo z negativno entropijo« (negativna entropija ali

negentropija = prosta energija).<sup>20</sup> V dvajsetih letih 20. stoletja je po teh temeljnih ugotovitvah fizikov 19. in zgodnjega 20. stoletja ameriški matematik in statistik Alfred Lotka zapisal, da imajo evolucijsko prednost prav organizmi, ki najbolj zajemajo razpoložljivo energijo.<sup>21</sup>

Na začetku sedemdesetih let 20. stoletja je ameriški ekolog Howard Odum pojasnil, da je »ves napredek posledica posebnih vlaganj v energijo, razvoj pa usahne, če teh ni.«<sup>22</sup> V novjšem času je fizik Robert Ayres v svojem pisanju večkrat poudaril osrednji pomen energije v gospodarstvu: »Gospodarski sistem je v bistvu sistem za pridobivanje, procesiranje in preoblikovanje energije virov v energijo, ki jo vsebujejo proizvodi in storitve.«<sup>23</sup> Povedano preprosto je energija edina resnično splošna valuta, brez pretvarjanja energije pa se ne dogaja nič na tem svetu – niti kroženje galaksij niti življenje kratkoživih žuželk.<sup>24</sup>

Ob vseh teh podatkih, ki jih lahko vsakdo zlahka preveri, je težko razumeti, zakaj se sodobna ekonomija, ki z razlagami in pogledi na javno politiko vpliva bolj od katere koli druge stroke, za energijo ni kaj prida zmenila. Ayers je dejal, da poleg tega, da se ekonomija ne zaveda pomena energije za fizični postopek proizvodnje, tudi predpostavlja, »da energija ni (posebno) pomembna, saj je njen stroškovni delež v gospodarstvu tako majhen, da ga je mogoče zanemariti ... kakor da bi bilo mogoče kaj napraviti zgolj z delom in kapitalom – ali kakor da je energija le oblika umetnega kapitala, ki ga je mogoče proizvesti (in ne pridobiti) z delom in kapitalom.«<sup>25</sup>

Sodobni ekonomisti ne morejo pričakovati nagrad in priznanj, če izkazujejo posebno zanimanje za energijo, sodobna družba pa nanjo postane pozorna šele tedaj, ko je ogrožena

katera od pomembnih komercialnih oblik in se zato podraži. Ta vidik nam lepo kaže Googlov Ngram Viewer, program, s katerim lahko preverimo razširjenost izrazov, ki so se v tisku pojavljali med letoma 1500 in 2019. V 20. stoletju se izraz »cena energije« komajda pojavlja vse do nenadnega porasta na začetku sedemdesetih let 20. stoletja zaradi odločitve držav v združenju OPEC, da surovo nafto podražijo za faktor pet, največkrat pa se pojavlja na začetku osemdesetih let. Ko je cena padla, je sledil podobno strm upad objav, tako da leta 2019 izraz »cena energije« ni bil več nič pogostejši kakor leta 1972.

Če želimo razumeti, kako svet v resnici deluje, moramo vsaj kaj vedeti o energiji. V tem poglavju bom najprej pojasnil, da energije ni posebno lahko definirati, brez težav pa se izognemo pogosti zmoti, da jo zamenjujemo za moč. Videli bomo, kako so različne oblike energije (vsaka s svojimi prednostmi in slabostmi) in različne gostote energije (energija v enoti prostornine ali mase, kar je ključno pri vprašanju skladiščenja in prenosljivosti) vplivale na različne faze gospodarskega razvoja. Podal bom tudi nekaj stvarnih ocen izzivov, ko se skušamo rešiti odvisnosti od fosilnega ogljika. Kot bomo videli, je naša civilizacija tako močno odvisna od fosilnih goriv, da bo naslednji prehod trajal veliko dlje, kot si večina predstavlja.

### ***Kaj je energija?***

Kako definiramo to osnovno količino? Grški izvor besede je jasen. Aristotel je v svoji *Metafiziki* spojil besedi *év* (v) in *ἐργον* (delo) ter prišel do ugotovitve, da vsak predmet vzdržuje *ἐνέργεια*.<sup>26</sup> Vsi predmeti naj bi torej vsebovali potencial



delovanja, gibanja in spremembe, to pa nikakor ni slab opis nečesa, kar se lahko spremeni v drugo obliko – na primer z dvigovanjem, metanjem ali izgorevanjem.

V naslednjih dveh tisočletjih se ni veliko spremenilo. Potem je Isaac Newton (1643–1727) postavil temeljne fizikalne zakone v zvezi z maso, silo in gibalno količino, iz njegovega drugega zakona gibanja pa je bilo mogoče izpeljati osnovne enote energije. Če uporabimo današnje enote, je 1 džul (tudi joule) energija, ki jo prejme telo, ko nanj deluje sila 1 njutona (tudi newton) na poti 1 metra (pri tem je 1 njuton sila, ki maso 1 kilograma potiska – ali vleče – s pospeškom  $1 \text{ m/s}^2$ ).<sup>27</sup> Vendar ta definicija zaobjema le kinetično (mehansko) energijo in ne podaja globljega razumevanja energije v vseh mogočih oblikah.

Razumevanje energije v praktičnem pomenu se je močno izpopolnilo v 19. stoletju, zahvaljujoč množici poskusov v zvezi z izgorevanjem, toploto, sevanjem in gibanjem.<sup>28</sup> S tem smo prišli do definicije energije, ki je še vedno najbolj običajna: »zmožnost za opravljanje dela«, pri čemer z »delom« ne mislimo le na določeno opravilo z določenim ciljem, temveč »spreminjanje sistema s premagovanjem sile, ki se tej spremembi upira,« kakor je to izrazil eden od vodilnih fizikov tiste dobe.<sup>29</sup> To pa je žal še vedno preveč fizikalno teoretično za intuitivno dojetje.

Na vprašanje »kaj je energija?« morda še najbolj odgovori eden najprodornejših fizikov 20. stoletja – vsestranski Richard Feynman, ki se je pri svojih znamenitih *Predavanjih iz fizike* izziva lotil s svojo značilno neposrednostjo in dejal, da ima »energija veliko različnih oblik, za vsako imamo svojo enačbo. To so: gravitacijska energija, kinetična energija, toplotna energija, prožnostna energija, električna energija, kemična energija, energija sevanja, jedrska energija, energija mase.«