Energija

NOVE MOGUĆNOSTI – 2. DIO

Mogli bismo reći da je borba za energiju u samoj srži fenomena života. Svemu živom potrebna je energija, od stanice pa do slona, bez obzira koliko je tko velik. Tu prije svega govorimo o energiji potrebnoj za održavanje temeljnih životnih funkcija. Ali, osim te energije, možemo govoriti i o energiji koja je živim bićima potrebna da utječu na svoj okoliš – za gradnju nastambi, za prijenos hrane i drugih dobara. Na tom je području čovjek najdalje dogurao. No, to nije ni jednostavna, ni jeftina zadaća, a »proizvodnja« energije središnji je dio svakog društva pogotovo društva današnjice. Kakva je budućnost *održivog razvoja* i *obnovljivih izvora energije* pročitajte u drugom nastavku članka kojeg je napisao prof. dr. sc. Ivica Aviani iz zagrebačkog Instituta za fiziku.

Ivica AVIANI, Zagreb

Kao mogući obnovljivi izvori energije, na raspolaganju su nam solarna energija, koja dolazi od Sunčevog zračenja, geotermalna energija, koja dolazi od topline Zemljine unutrašnjosti i planetarna energija, koja se očituje kao plima i oseka. Zbog radioaktivnog raspada izotopa teških jezgara, unutrašnjost Zemlje stalno se zagrijava pa postoji i toplinski tok prema hladnijoj površini. Krenemo li od površine Zemlje prema njezinoj unutrašnjosti nakon svakih 30 m dubine temperatura će se povisiti za oko 1 K. Zbog toga uzimamo da je ravnotežna temperatura unutrašnjosti oko 4000 K. Geotermalna energija može se koristiti bušenjem Zemljine kore i ubrizgavanjem vode kao izmjenjivača topline. Tako dobivena energija je, za sada je još uvijek skupa u usporedbi s drugim izvorima energije.

Plima i oseka nastaju zbog gravitacijskog privlačenja, prvenstveno Mjeseca, a manjim dijelom i Sunca, te zbog rotacije Zemlje. Gravitacijska sila deformira površinu oceana, stvarajući ispupčenja na strani najbližoj, i najdaljoj Mjesecu. Zbog rotacije Zemlje taj poremećaj obilazi Zemlju stvarajući plimu i oseku dva puta dnevno. Visinska razlika je u prosjeku manja od 0,5 m, ali na nekim mjestima može iznositi i do 12 m te biti vrlo povoljna za pogon hidroelektrane.

Vjetroelektrane

Oko 1 % Sunčeve energije pretvara se u energiju vjetra. Sunce nam pak isporučuje 10 000 puta više energije nego što nam je potrebno pa bi, kada bismo iskoristili samo 1 % energije vjetra, to bilo bi sasvim dovoljno za ukupne potrebe čovječanstva. Teorijski, vjetrenjača (sl. 3.) može iskoristiti 16/27, tj. 59 % snage vjetra. To je zbog toga, jer je za normalan rad vjetrenjače potrebno omogućiti stalan protok zraka, što znači da dio kinetičke energije vjetra ostaje neiskorišten.

Kod nas postoje dva sustava vjetroelektrana. Sustav na paškom brdu Ravne sastoji se od sedam vjetroelektrana pojedinačne

Slika 3. Sustav vjetroelektrana na paškom brdu Ravne.

Slika 4. Sustav vjetroelektrana na lokaciji Trtar Krtolin kod Šibenika.

snage 850 kW, pri čemu je ukupna snaga sustava 6 MW. Visina stupa (sl. 2.) svake turbine iznosi 49 metara, a promjer rotora 52 metra. Drugi sustav nalazi se na lokaciji Trtar Krtolin, kod Šibenika. Ovaj sustav sastoji se od 14 vjetroturbina pojedinačne snage 800 kW. Ukupna snaga sustava je 14 MW. Svu energiju proizvedenu u idućih 15 godina otkupljivat će Hrvatska elektroprivreda. Do 2010. godine u Hrvatskoj se planira instalacija vjetroelektrana ukupne snage 170 MW, što iznosi oko 4 % ukupne snage električne energije u Hrvatskoj. Planirane lokacije su: Ponikve-Ston, Čićarija, Vrataruša-Senj i Pometeno brdo-Klis. Važno je napomenuti da će na lokaciji kod Klisa, tvornica *Rade Končar* postaviti prve vjetroelektrane hrvatske proizvodnje.

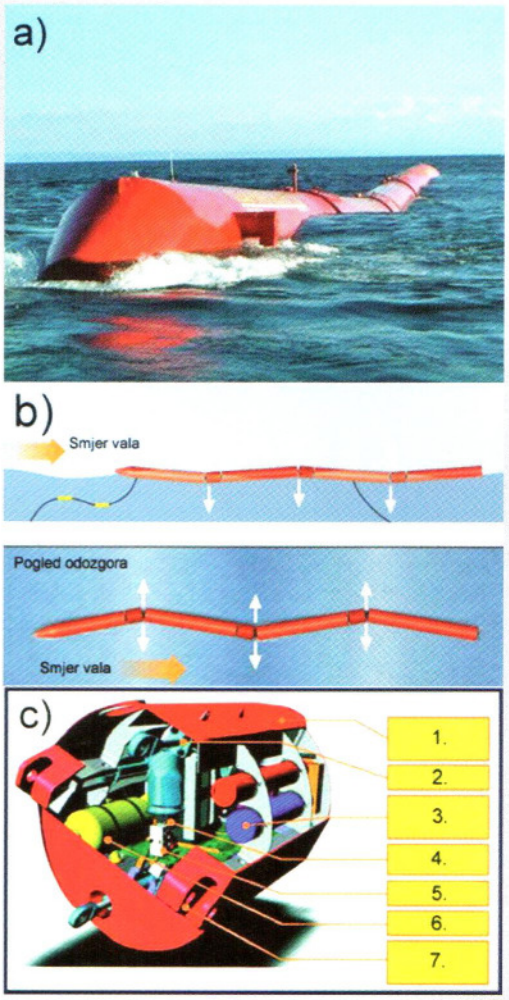
Energija valova

Veliki dio energije vjetra pretvara se u energiju valova. Pelamis je jedan od najzanimljivijih europskih projekata za iskorištavanje energije valova (sl. 5.). Uređaj se sastoji se od četiri cilindrična segmenta promjera 3,5 m, a ukupna duljina mu je 140 m. Segmenti plutaju na valovima i međusobno se izvijaju prateći njihov oblik. Segmenti su povezani hidrauličkim vezama koje svojim pomicanjem pumpaju ulje u visokotlačni rezervoar. Ulje pod visokim tlakom pokreće hidraulični motor koji kontinuirano pokreće električni generator. Snaga svakog od segmenata otprilike je jednaka snazi jedne vjetroelektrane.

ZADATAK PRVI

Kolika je teorijska snaga vjetrenjače u sustavu Ravne, ako vjetar puše brzinom $v = 10$ m/s?

Rješenje: Snaga vjetrenjače je $0{,}59 \cdot P = 1{,}6$ MW

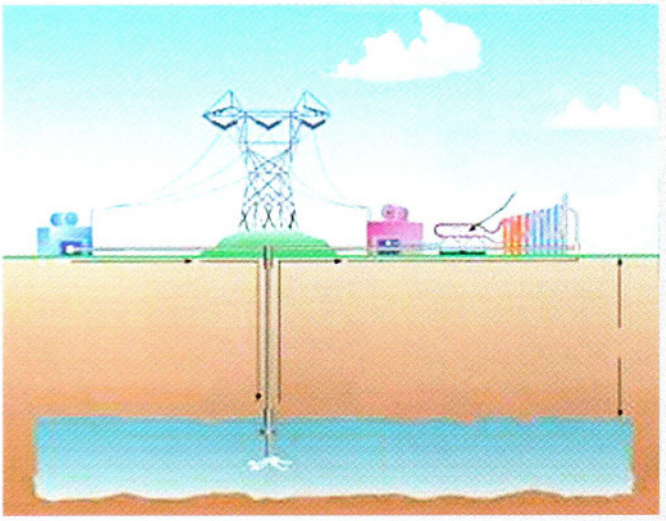


Slika 5. **a)** Prva komercijalna farma za iskorištavanje energije valova postavljena je 2006. godine u Portugalu u Aguçadora Wave Parku. **b)** Tri Pelamis P-750 modula ukupne snage od 2,25 MW ljuljaju se na valovima i pohranjuju njihovu kinteičku energiju. Vrijednost cijele planirane investicije je 70 mil. EUR. **c)** Bitni dijelovi modula su: 1. zglobni oslonac sa slobodom zakreta oko vertikalne osi, 2. hidraulički stap, 3. visokotlačni spremnici energije, 4. generator, 5. hidraulički cjevovod, 6. spremnik, 7. zglobni oslonac sa slobodom zakreta oko horizontalne osi

Reverzibilne elektrane

Reverzibilne elektrane dragocjene su za sustav opskrbe električnom energijom jer predstavljaju sustav pohrane viška energije. One mogu pohraniti višak energije koja je dobivena u nekoj udaljenoj termoelektrani ili vjetroelektrani. Višak električne energije, koji nastaje kada je potrošnja energije umanjena, npr. noću, koristi se u reverzibilnoj hidroelektrani za pumpanje vode u akumulacijsko jezero smješteno na visini. Pritom se, uz pomoć. snažnih električnih pumpi, električna energija pretvara u gravitacijsku potencijalnu energiju vode, $E_p = m\,g\,h$. Za vrijeme pojačane potrošnje, kada u sustavu nedostaje energije, ova se energija, u električnom generatoru, ponovo pretvara u električnu energiju i vraća natrag u energetski sustav. Kod

Slika 6. Reverzibilna HE Velebit na rijeci Zrmanji. Kad je potrošnja energije mala, energija se sprema pumpanjem vode iz donjeg jezera u gornju akumulaciju. Visinska razlika u odnosu na donje jezero je 559 m.



Slika 7. Princip rada reverzibilne termoelektrane s izotermnom kompresijom zraka u podzemnu šupljinu.

nas postoje dvije reverzibilne hidroelektrane. To su reverzibilna HE Velebit na rijeci Zrmanji (sl. 6.) i reverzibilna HE Lepenica kod Fužina.

Energija komprimiranog zraka

Izotermna kompresija je reverzibilni proces. To znači da mehaničku energiju koju pospremimo izotermnim tlačenjem zraka u obliku energije plina, možemo dobiti natrag izotermnom ekspanzijom bez gubitaka. Da bismo to ostvarili, rezervoar mora biti dobro termički povezan s okolinom, jer treba odvoditi toplinu koja se razvija prilikom kompresije i dovoditi toplinu iz okoline prilikom ekspanzije kako se zrak ne bi hladio. U praksi se rezervoaru volumena V dodaje stlačeni zrak iz okoline. U idealnom slučaju možemo pohraniti energiju $E = p\,V \ln(p/p_{atm})$ jednaku energiji idealnog plina pri tlaku p, gdje je p_{atm} atmosferski tlak. Kao spremište stlačenog zraka može poslužiti prostor podzemnih špilja ili starih rudnika. Na ovaj način rade reverzibilna termoelektrana E.ON Kraftwerk Huntorf u Njemačkoj, snage 290 MW i reverzibilna termoelektrana Alabama Electric Corporation u McIntosh, Alabama, USA, snage 110 MW.

ZADATAK DRUGI

Usporedite gustoću energije vode u akumulacijskom jezeru HE Velebit na visini $h = 559$ m s gustoćom energije benzina koja iznosi oko 30 MJ/kg.

Rješenje: Gustoća energije ove vode je oko 5000 puta manja od gustoće energije benzina.

ZADATAK TREĆI

Koliko energije sadržava rezervoar od 300 L zraka pri tlaku od 300 bar?

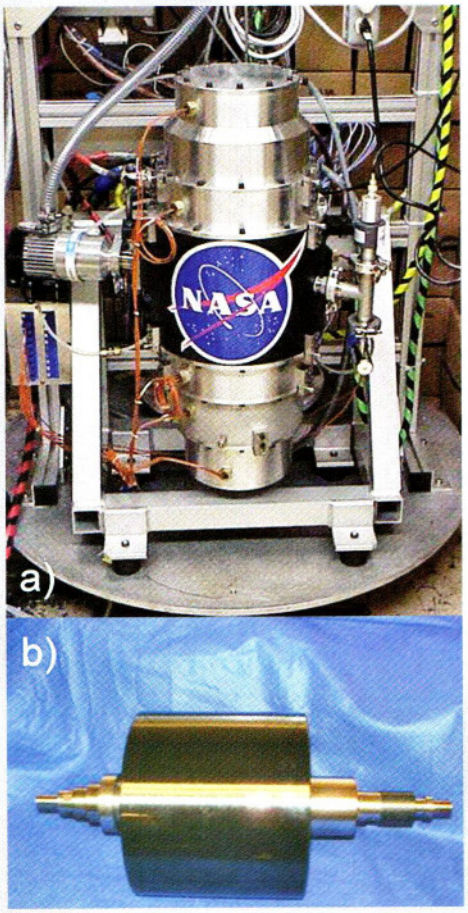
Rješenje: $E = 50$ MJ

Ova godina trebala bi biti revolucionarna u korištenju komprimiranog zraka kao goriva. Najveći indijski proizvođač vozila Tata Motors, zajedno s MDI-grupom iz Francuske, trebao bi započeti serijsku proizvodnju malog gradskog hibridnog automobila CityCat na komprimirani zrak (sl. 7.). Uz zračni motor snage 20 kW ovaj automobil postiže brzinu od 90 km/h, s dometom od 100 km – dovoljno za dva dana gradske vožnje. Spremnik stlačenog zraka izrađen je od ugljičnih vlakana. Tlak zraka iznosi do 300 bara, a spremnik bi se u specijaliziranim punionicama mogao napuniti za oko tri minute ili za oko pet sati kućnim kompresorom. Ovakav automobil ne zagađuje okolinu na mjestu rada jer zapravo koristi energiju velikih udaljenih elektrana. Kako je koeficijent korisnosti velikih elektrana i dvostruko veći od koeficijenta korisnosti motora s unutrašnjim sagorijevanjem, u konačnici bi i globalno zagađenje bilo značajno manje. Zadatak 3 pruža nam donekle uvid u odnose korištenja motora na komprimirani zrak i motora s unutrašnjim izgaranjem. Bitno je pri tome imati na umu da motor na komprimirani zrak nije toplinski stroj pa je njegova korisnost i trostruko veća od korisnosti benzinskog motora, pogotovo u gradskoj vožnji. Prema tome, komprimirani zrak iz zadatka 3 je energijski ekvivalent za približno 4,5 L benzina, a to je dovoljno za 100 km vožnje štedljivim automobilom. Povrh toga, emisiju štetnih plinova značajno je lakše kontrolirati u velikim sustavima – elektranama.

Slika 8. *CityCat* – automobil na komprimirani zrak.

Zamašnjak

Zamašnjak najčešće vežemo uz industrijsku revoluciju i zastarjelu tehnologiju. Malo tko ga se danas sjeća kao korisne naprave, a rijetko koji učenik je za njega i čuo. Zato, kad se zamašnjak pojavi u nekom zadatku iz fizike, nitko ni ne zna o čemu se zapravo radi. Međutim, zamašnjaci koje trenutačno razvija NASA s ciljem pohranjivanja energije u obliku kinetičke energije vrtnje zamašnjaka, rezultat su vrhunske tehnologije (sl. 9). To su valjci izrađeni od posebnog materijala koji u vakuumu lebde na magnetskim ležajevima i okreću se frekvencijom i do 1000 okretaja u sekundi. Uz takvu frekvenciju, akceleracija na udaljenosti od $r = 25$ cm od središta vrtnje iznosi čak $a = r\,\omega^2 = 10^6\,g$! Uz elektromagnetski prijenos, energije vrtnje omogućuju izuzetnu efikasnost i visoku gustoću energije. Pohranjena energija $E = I\,\omega^2/2$ proporcionalna je momentu tromosti I i kvadratu kutne brzine ω. Zbog toga je povoljnije koristiti čvršći materijal uz veću kutnu brzinu nego li materijal velike gustoće. To jasno vidimo kada energiju vrtnje izrazimo preko centrifugalne sile kojoj je izložena molekula na obodu valjka $E \sim r\,F_{cf}$. Vidimo odmah da treba odabrati materijal koji će, bez deformacije, moći izdržati što veće naprezanje. Za izradu zamašnjaka se, zbog toga, koriste relativno lagani kompozitni materijali.

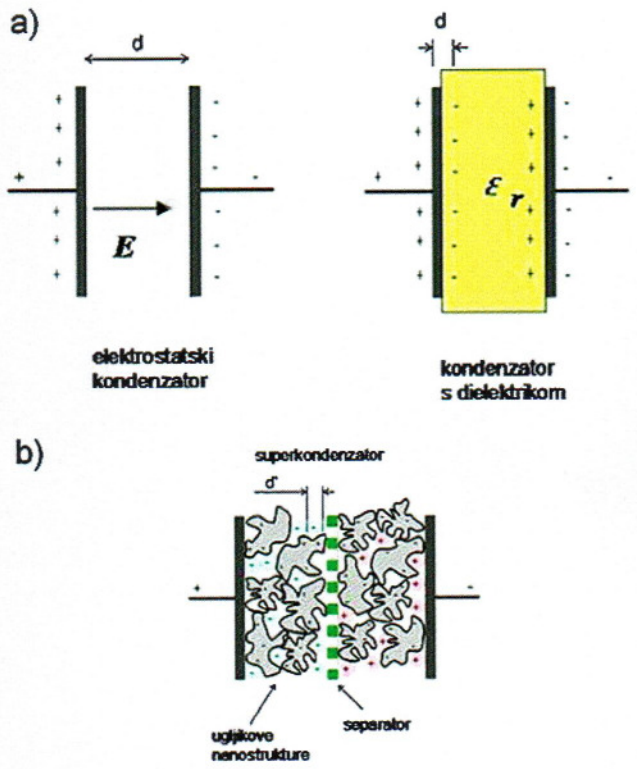


Slika 9. *G2 Flywheel*-modul i zamašnjak (http://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage) koji radi pri frekvenciji od 30 000 okr/min. Modul odlikuje dugo vrijeme života 10^5–10^7 ciklusa punjenja-pražnjenja, visoka gustoća energije 0,5 MJ/kg, velika izlazna snaga 3–133 kWh, te efikasnost od 90 %.

Superkondenzatori

U kondenzatoru koji se sastoji od dviju ravnih elektroda površine S udaljenih za d možemo pohraniti elektrostatsku energiju jednaku $W = V\varepsilon_0 E^2/2$, gdje je E električno polje u prostoru između ploča, $V = S\,d$, volumen između ploča kondenzatora, a ε_0 dielektrična konstanta vakuuma. Uzmemo li u obzir da za električno polje približno vrijedi $E = U/d$, gdje je U napon između elektroda, za energiju dobivamo $W = \varepsilon_0\,U^2\,S/d$. Ovaj izraz možemo tumačiti na sljedeći način. Imamo li dvije bliske plohe nabijene suprotnim nabojem, tada je u prostoru između njih uskladištena energija statičkog električnog polja. Ova energija proporcionalna je površini ploha, a obrnuto proporcionalna njihovoj udaljenosti. Želimo li u kondenzator pohraniti više energije, moramo povećati površinu i smanjiti razmak između sloja suprotnih naboja – dipolnog sloja. Razmak možemo smanjiti tako da, između ploča kondenzatora, ubacimo dielektrično sredstvo. Tada će se između svake metalne elektrode i plohe dielektrika formirati bliski dipolni sloj što će bitno smanjiti efektivni d (sl. 10.). Zapravo će se efektivni d smanjiti ε_r puta, tj. onoliko puta koliko iznosi relativna dielektrična konstanta dielektričnog sredstva. Razmak se može dodatno smanjiti, ako se jedna elektroda zamijeni elektrolitom, odnosno ionskim vodičem. Tada se dipolni sloj i električno polje formiraju samo u vrlo tankom sloju na elektrodi, debljine nekoliko nanometara.

Kod superkondenzatora napravljen je bitan iskorak. Površina elektroda višestruko je povećana uz pomoć poroznih elektroda. Elektrode su nanočestice grafita ili isprepletene ugljikove nanocjevčice u međusobnom električnom kontaktu. Presvučene su nanometarskim slojem izolatora i uronjene u elektrolit. Dipolni sloj formira se u vrlo tankom sloju, između plohe nanočestice i elektrolita. Superkondenzatori mogu imati ogroman



Slika 10. Kod elektrolitskog kondenzatora kapacitet je značajno povećan u odnosu na elektrostatski kondenzator, jer je jako smanjena udaljenost elektroda, dok je kod superkondenzatora još višestruko povećana površina elektroda.

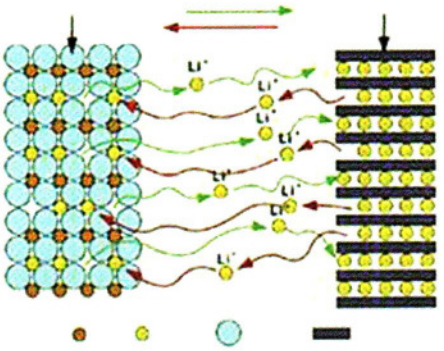
kapacitet i do 3000 F, ali njihov radni napon je malen i iznosi svega oko 2 V. Energija koju možemo pohraniti u tipični superkondenzator, $W = \frac{1}{2} C U^2 = 6000$ J, dovoljna je tek za zagrijavanje 1,5 L vode za 1 K. Međutim, za razliku od baterije, superkondenzatori mogu razviti veliku snagu i imati gotovo neograničen broj ciklusa punjenja-pražnjenja. Zbog toga već nalaze široku primjenu, npr. u hibridnim vozilima gdje služe za pohranu kinetičke energije automobila za vrijeme kočenja.

Prava revolucija sa superkondenzatorima tek se očekuje. Ultrakondenzatori s feroelektričnim barijevim titanatom, $BaTiO_3$, koji se odlikuje gigantskom dielektričnom konstantom, u stanju su raditi pri naponima od 3000 V. Kako energija raste s kvadratom napona, u ove kondenzatore moguće je pohraniti mnogo više energije. Ove kondenzatore bit će moguće koristiti za pogon automobila. Američka kompanija EEstor tvrdi da su uspjeli konstruirati kondenzatore čija je gustoća energije 1 MJ/kg.

Baterije

U baterijama, energija je pohranjena kao kemijska energija. Jedan od sastavnih atoma baterije kemijski može biti vezan na dva različita načina. Jedna od veza ima višu energiju, pa atom spontano želi prijeći u stanje niže energije, tj. prijeći iz jedne

Slika 11. Litij-ionska baterija.



veze u drugu. Kada bi ove kemijske spojeve doveli u neposredni kontakt, kemijska reakcija odvila bi se brzo, a energija bi se oslobodila naglo, kao toplina. U bateriji su ovi spojevi prostorno razdvojeni, a kemijska energija oslobađa se kontrolirano, tako da atom po atom putuje od jednog spoja do drugog. Baterija se sastoji od elektroda i elektrolita. Atom o kojem je riječ putuje s jedne elektrode na drugu. On to radi tako da se ionizira, pa njegov elektron prolazi kroz vanjski krug baterije, a pozitivni ion kroz samu bateriju, odnosno kroz elektrolit. Na drugoj elektrodi elektron i ion se ponovo spoje u atom, pri čemu se atom veže u novi spoj. Elektron u vanjskom krugu može izvršiti rad. Energije kemijskih veza su reda veličine 1 eV, pa su naponi baterija reda veličine oko 1 V.

Baterije koje danas sve više upotrebljavamo su Li-ionske baterije (sl. 11.). Zbog velike gustoće energije koristimo ih u mobitelima, prijenosnim računalima, hibridnim automobilima... Ovakva baterija prikazana je na slici. Atom litija rado se kemijski veže na metalni oksid, pa je u Li-ionskoj bateriji jedna elektroda napravljena od metalnog oksida (npr. litijevog kobaltovog(III) oksida, $LiCoO_2$). Druga elektroda je izrađena je od grafita. Prilikom nabijanja baterije ion litija odvaja se iz $LiCoO_2$, prolazi kroz elektrolit i ulazi između grafenskih ravnina na grafitnoj elektrodi gdje se neutralizira primanjem elektrona iz vanjskog kruga. Prilikom izbijanja litij se ponovo ionizira i spontano vraća na početnu elektrodu. Tamo se kemijski veže oslobađajući energiju kemijske veze. Njegov elektron ga slijedi putujući u vanjskom krugu.

Literatura

1. J. Andrews i N. Jelley, *Energy science: principles, technologies, and impacts*, Oxford University Press, New York 2007.
2. N. Spielberg i B. Anderson, *Seven Ideas that Shook the Universe*, John Wiley and Sons, New York 1987.
3. Edward De Bono, *Povijest izuma: od kotača do računala*, Marjan tisak d.o.o. Split, 2005.
4. http://www.our-energy.com/hr/