Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama

Pretvorba energije položaja vode u mehanički rad – I
Energijske tehnologije
FER 2007.

Gdje smo:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. **Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama**
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Energija Sunca
8. Energija vjetra
9. Geotermalna energija
10. Biomasa
11. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
12. Potrošnja električne en.
13. Prijenos i distribucija el. en.
14. Skladištenje energije
15. Utjecaj na okoliš
16. Održivi razvoj i energija

Sadržaj

- Uvod o električnoj energiji i hidroenergiji
- Hidrološki uvjeti
- Protok vode i nadmorska visina
- Protok vode i vrijeme
- Veličina izgradnje
- Snaga i energija hidroelektrane
- Vrste hidroelektrana

Uvod o električnoj energiji i hidroenergiji

Literatura

- *Hrvoje Požar, Osnove energetike, I dio*
- *Hrvoje Požar, Osnove energetike, II dio*
- *Tehnička enciklopedija, 3. svezak*
- *Tehnička enciklopedija, 6. svezak*
- *Predavanja dostupna na:*
  - **www.fer.hr**
- *Dodatne informacije i na Internetu*
  - **www.hep.hr**
  - **www.energetika-net.hr itd.**

Hidroenergija

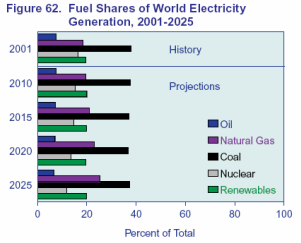
- Obnovljivi izvor energije
- Mala emisija stakleničkih plinova
- Visoka efikasnost pretvorbe u mehanički rad
- Širok raspon instaliranih snaga
- Relativno niska koncentracija energije
- Relativno visoka pouzdanost u odnosu na druge obnovljive izvore
- Mogućnost izvedbe određena karakteristikama lokacije
- Relativno veliki investicijski troškovi
- Ovisno od izvedbe relativno velika fleksibilnost prilagođavanja promjeni opterećenja u EES

Udjel obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji električne energije

- Hidroenergija ima udjel od oko 16% u ukupnoj svjetskoj proizvodnji električne energije
- Struktura udjela razvijenih zemalja u ukupnoj proizvodnji električne energije u HE se smanjuje (iskorištenost ovog oblika proizvodnje u razvijenim zemljama je velika)
- Trenutno najzastupljeniji obnovljivi izvor (slijede ga vjetroelektrane i primjena energije sunca)
- Velike HE su klasični elektroenergetski objekti
- Male elektrane se često označavaju kao novi obnovljivi izvori

El. energija koju trošimo 15 PWh 2001.

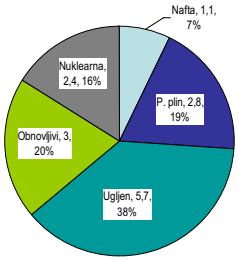
Figure 62. Fuel Shares of World Electricity Generation, 2001-2025



Sources: **2001:** Energy Information Administration (EIA), calculated by the Office of Integrated Analysis and Forecasting, based on estimates of fuel inputs for electricity generation and assumed average generation efficiencies by fuel type. **Projections:** EIA, System for the Analysis of Global Energy Markets (2004).

1 Peta = 10^{15}

Potrošnja el. energije 2001. [PWh]



Obnovljivi: 0,15 PWh, 1,0% biomasa;
2,76 PWh, 18,4% HE;
0,09 PWh, 0,6% ostali.

Hidroenergija u svijetu

Pokazatelji: vodeći svjetski proizvođači, udjel u ukupnim svjetskim instaliranim kapacitetima, udjel HE u proizvodnji električne energije u zemljama vodećim proizvođačima

Producers	TWh	% of World total
Peoples Rep. of China	354	12.6
Canada	341	12.1
Brazil	321	11.4
United States	271	9.7
Russia	176	6.3
Norway	109	3.9
Japan	94	3.3
India	85	3.0
Venezuela	70	2.5
Sweden	60	2.1
Rest of the World	927	33.1
World	**2 808**	**100.0**

2004 data

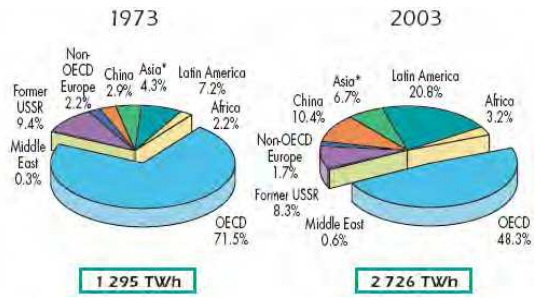
Installed Capacity (based on production)	GW
United States	99
Peoples Rep. of China	86
Canada	67
Brazil	59
Japan	46
Russia	44
India	30
Norway	28
France	25
Sweden	16
Rest of the World	307
World	**807**

2003 data

Country (based on first 10 producers)	% of hydro in total domestic electricity generation
Norway	98.8
Brazil	82.8
Venezuela	71.0
Canada	57.0
Sweden	39.6
Russia	18.9
Peoples Rep. of China	16.1
India	12.7
Japan	8.8
United States	6.5
Rest of the World*	14.2
World	**16.1**

2004 data

Promjene u zastupljenosti pojedinih zemalja u ukupnoj svjetskoj produkciji u HE

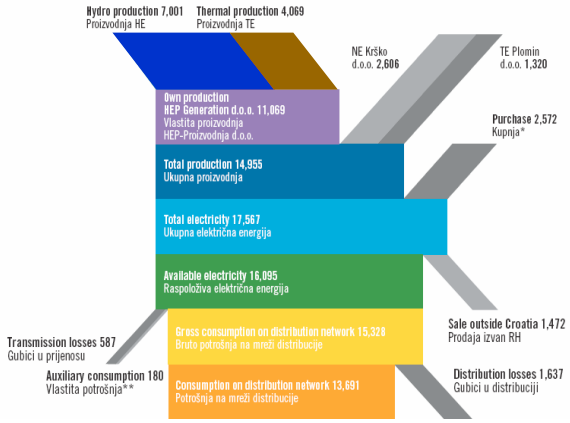


Situacija u Hrvatskoj

- Raspoloživa snaga u HE i TE-NE u RH je približno jednaka
- Proizvedena energija u našim HE značajno varira od godine do godine, ovisno o hidrološkim uvjetima
- Značajan udjel instalirane snage HE u akumulacijskim elektranama jadranskog sliva
- Raspoloživost HE bitno ovisi o o hidrološkim uvjetima ovisno o godišnjem dobu i od godine do godine

Electricity Balance (GWh) Elektroenergetska bilanca (GWh)	2003	2004	**Change (%)** Promjena (%)
Hydro production Proizvodnja HE	4,897	7,001	43.0
Thermal production Proizvodnja TE	5,087	4,068	-20.0
Own production Vlastita proizvodnja	9,984	11,069	10.9
NE Krško d.o.o. NE Krško d.o.o.	1,623	2,606	60.6
TE Plomin d.o.o. TE Plomin d.o.o.	1,616	1,320	-18.3
Purchase Kupnja	2,659	2,572	-3.3
Sale to other power companies Prodaja drugim elektroprivredama	-355	-1,472	314.6
Available electricity Raspoloživa električna energija	15,527	16,095	3.7
Transmission network losses Gubici na mreži prijenosa	660	587	-11.1
Auxiliary consumption on transmission network Vlastita potrošnja na mreži prijenosa	130	180	-38.5
Gross consumption on distribution network Bruto potrošnja na mreži distribucije	14,737	15,328	4.0
Consumption on distribution network Potrošnja na mreži distribucije	13,644	14,458	6.0
Excange, purchase, sale and supply outside Croatia Gubici i neobračunata potrošnja na mreži distribucije	1,883	1,637	-13.1
Gross consumption of electricity Bruto potrošnja električne energije	15,527	16,095	3.7

Electricity Balance 2004 Elektroenergetska bilanca za 2004. [GWh]



System Load Opterećenje sustava

System load 1995 - 2004
Opterećenje sustava 1995. - 2004.

Year Godina	Pmax MW	Pmin MW	Pmin/Pmax %	Wd MWh
1995	2,097	1,151	54.89	42,178
1996	2,471	1,314	53.18	47,143
1997	2,417	1,328	54.94	48,172
1998	2,585	1,316	50.91	51,168
1999	2,600	1,468	56.46	51,266
2000	2,661	1,556	58.47	54,059
2001	2,796	1,601	57.26	56,899
2002	2,685	1,586	59.07	54,617
2003	2,673	1,546	57.84	53,334
2004	2,792	1,626	58.24	55,830

Pmax- Peak system load
Maksimalno opterećenje sustava

Pmin- Minimum system load on the day of Pmax
Minimalno opterećenje u danu ostvarenog Pmax

Wd- Maximum daily consumption
Maksimalna dnevna potrošnja

Electricity generation and procurement 1995-2004
Proizvodnja i nabava električne energije 1995.-2004.

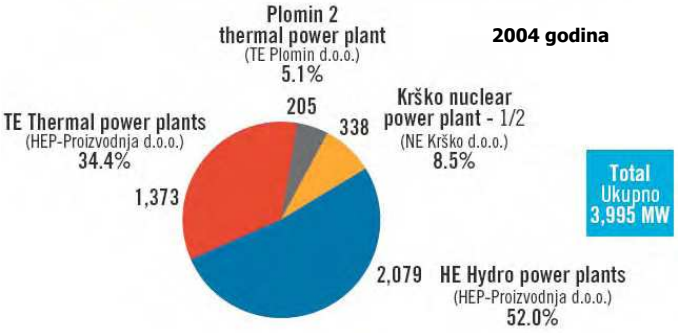
GWh	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Hydro power plants Hidroelektrane	5,164	7,190	5,260	5,428	6,531	5,841	6,550	5,372	4,897	7,001
Thermal* & diesel power plants Termoelektrane* i dizel elektrane	2,740	2,520	3,578	4,561	4,768	3,958	4,713	5,899	6,703	5,388
Krško nuclear power plant NE Krško	2,279	2,182	2,393	1,250	0	0	0	0	1,623	2,606
Imports** - exports Uvoz** - Izvoz	1,221	166	1,562	2,115	2,376	4,037	3,192	3,560	2,304	1,100
Total Ukupno	11,404	12,058	12,793	13,354	13,675	13,836	14,455	14,831	15,527	16,095

HEP Generation HEP Proizvodnja d.o.o.

Hydro power plants Hidroelektrane

	available capacity (MW) raspoloživa snaga (MW) generator generator	total ukupno	minimum safe output tehnički minimum	type tip elektrane
Pogon HE Varaždin A,B,C*	2x47+0.46	94.46	2x18	run-of-river protočna
Pogon HE Čakovec A,B,C,D	2x40.3+1.1+0.34	82.04	2x15	run-of-river protočna
Pogon HE Dubrava A,B,C,D,E	2x40.3+1.1+2x0.34	82.38	2x15	run-of-river protočna
Pogon HE Rijeka A,B	2x18	36	2x9	run-of-river protočna
Pogon HE Vinodol A,B,C	3x30	90		storage akumulacijska
CHE Fužine A	4/(-4.8)	4/(-4.8)		storage akumulacijska
CHE Lepenica	1.4(-1.25)	1.4(-1.25)		storage akumulacijska
HE Zeleni Vir	1.44	1.44		storage akumulacijska
Pogon HE Senj A,B,C	3x72	216	3x33	storage akumulacijska
HE Sklope A	22,5	22,5		storage akumulacijska
Pogon HE Gojak A,B,C	3x16	48	3x2	run-of-river protočna
Pogon HE Ozalj A,B,C,D	2x1+0.8+2x1.1	5,24		run-of-river protočna
Pogon RHE Velebit A,B	2x138/(2x-120)	276/(-240)	80	storage akumulacijska
Pogon HE na Krki				
HE Miljacka A,B,C,D	4.8+3x6.4	24	1	run-of-river protočna
HE Krčić	0.34	0,34		run-of-river protočna
HE Golubić A,B	2x3.27	6,54	1	run-of-river protočna
HE Jaruga A,B	2x3.6	7,2		run-of-river protočna
Pogon HE Peruča A,B	2x20.8	41,6	5	storage akumulacijska
HE Orlovac A,B,C	3x79	237	50	storage akumulacijska
Buško Blato d.o.o.				
CS Buško Blato A,B,C	3x3.8/3x(-3.4)	11.4/(-10.3)	0.81	storage akumulacijska
Pogon HE Đale A,B	2x20.4	40,8	6	storage akumulacijska
Pogon HE Kraljevac A,B,C	2x20.8+4.8	46,4	1	run-of-river protočna
Pogon HE Zakučac A,B,C,D	2x108+2x135	486	50+80	storage akumulacijska
Pogon HE Dubrovnik A,B	2x108	216	50	storage akumulacijska
HE Zavrelje	2	2		storage akumulacijska
Total hydro power plants Ukupno HE		2,078.74/(-256.35)		

Available capacity of generating plants (net)*
Raspoloživa snaga proizvodnih kapaciteta (na pragu)*

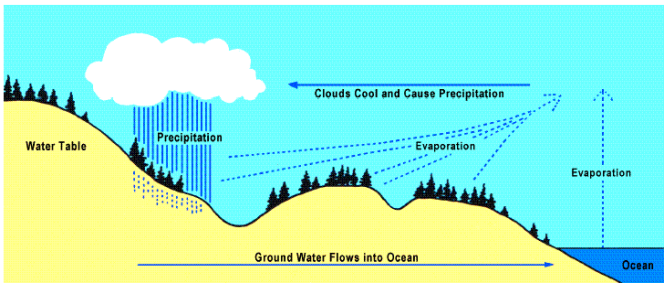


2004 godina

Pretvorba energije položaja

- Uvod
- Hidrološki uvjeti
- Protok vode i visina
- Protok vode i vrijeme
- Veličina izgradnje
- Snaga i energija hidroelektrane
- Vrste hidroelektrana

Ciklus vode u prirodi



Pretvorba EP vode u ME (1)

Energija

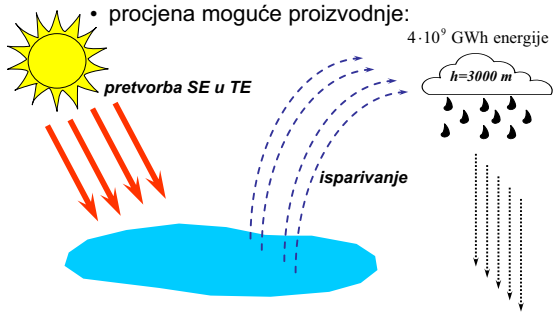
- *plime i oseke*
- *morskih valova*
- *vodotoka*

opisuje se energijom položaja (kretanja) vode.

Energija položaja (EP) jest početni oblik energije vode u prirodi koja se može iskoristiti u tehničkim pretvorbenim sustavima.
EP je posljedica transformacije toplinske energije sunca.

Pretvorba EP vode u ME (2)

- procjena moguće proizvodnje:



- obnovljivi izvor energije, energija dolazi od sunca

Pretvorba EP vode u ME (3)

- "dostupni" dio energije položaja vode, elementi za procjenu
  - prosječna nadmorska visina tla: 700 m
  - visina taloga prosječnih padavina: 0.9 m
  - površina kopna: 130 mil. km^2

$$W = m\,g\,h = \rho\,V\,g\,h$$

$$W = 1000 \times 130 \times 10^{12} \times 0.9 \times 9.81 \times 700$$

$$\mathbf{W = 8{,}035 \times 10^{20}\ J = 223 \times 10^{6}\ GWh}$$

2/3 dostupne energije položaja isparava
od ostatka (koncentracije vodotoka) moguće je iskoristiti oko 16%
što iznosi *11.9 x10^3 TWh*
stvarna svjetska proizvodnja u HE 2003 je bila oko *3000 TWh*

U osnovni način iskorištavanja energije vodotokova je star više tisuća godina

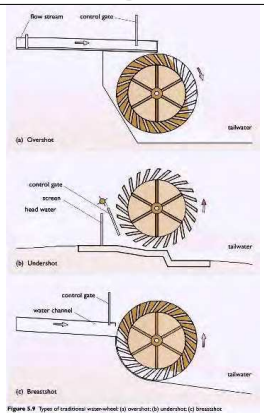


Figure 5.9 Types of traditional water-wheel: (a) overshot; (b) undershot; (c) breastshot

Izvedbe se razlikuju po:

- načinu dovođenja vode,
- tipu i
- efikasnosti pretvorbe

Prva prava turbina 1827 godine (Fourneyron-ova turbina)

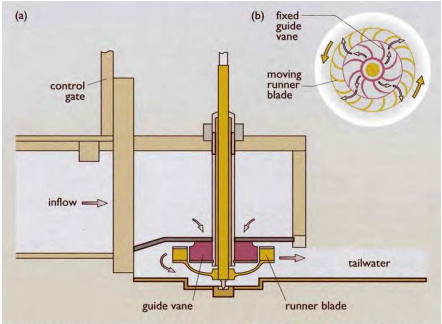
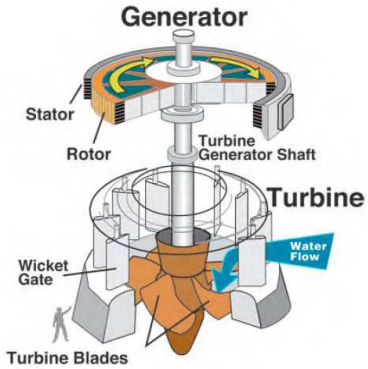


Figure 5.10 Fourneyron's turbine. The runner consists of a circular plate with curved blades around its rim and a central shaft. It spins under the force exerted by water flowing outwards between the fixed guide vanes and across its blades: (a) vertical section; (b) flow across guide vanes and runner

Primjer moderne reakcijske turbine



Efikasnosti modernih turbina su od 75 do 95%

Hidrološka svojstva i karakteristike lokacije HE

- Protok u vodotoku je promjenjiv u prostoru (od izvora do ušća) i vremenu
- Vrlo približno se snaga HE može jednostavno procijeniti poznavajući potencijalnu energiju vode za dani pad i raspoloživi volumni protok vode
- Ukupna proizvedena energija u HE ovisi o stalnosti pretpostavljenog protoka i raspoloživosti pretpostavljenog pada vode

Snaga i energija HE

$$W = mgh \quad /t \quad [\mathrm{W}]$$

$$\frac{W}{t} = P = \frac{m}{t} gh$$

maseni protok [kg/s]

volumni protok [m³/s]

$$P = \frac{V}{t} \rho \cdot g \cdot h = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h$$

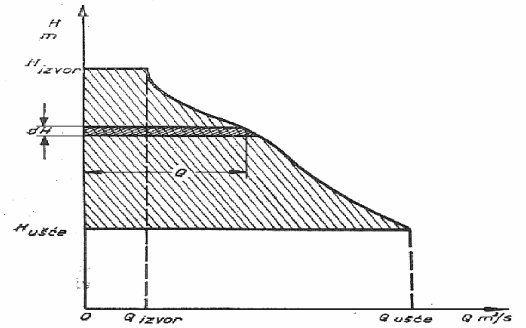
$$P = 9.81 \cdot 10^3 \cdot Q \cdot h \quad [\mathrm{W}]$$

Snaga HE **$P = 9{,}81\ Q_{si}\ h$** **[kW]**

Vjerojatna energija **$W = 8760\ P$** **[kWh]**

Q - H dijagram (1)

Q-H dijagram opisuje protok vode u osnovnom vodotoku od izvora do ušća



Q - H dijagram (2)

Integral funkcije ***$Q_{sr}(H)$*** po ***dH*** od izvora do ušća daje *brutto* snagu odnosno energiju vodotoka:

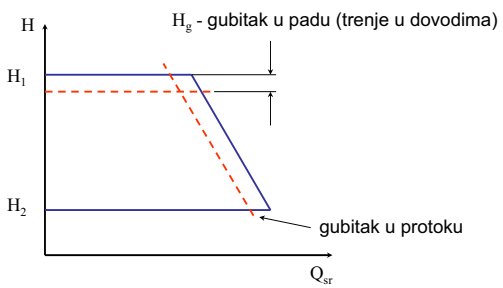
$$dP = 9.81 \cdot Q_{sr}(H) \cdot dH$$

$$P = 9.81 \int_{H_u}^{H_i} Q(H)\, dH$$

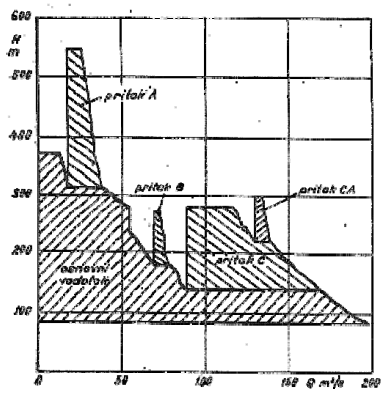
$$W = 8760 \cdot 9.81 \int_{H_u}^{H_i} Q(H)\, dH$$

Q - H dijagram (3)

- tehnički iskoristiva energija vodotoka smanjena je zbog trenja u dovodima (tunel, tlačni cjevovod) te gubitaka protoka



Q - H dijagram (4)



Primjer Q-H dijagrama za vodotok s pritocima

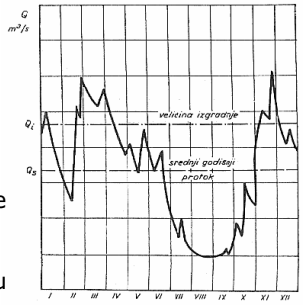
Hidrološka svojstva HE (1)

- količina vode koja pritječe u vodotoke definira se kao:

$$\text{faktor otjecanja} = \frac{\text{voda u promatranom vodotoku}}{\text{oborinsko područje} \cdot \text{količina padavina}}$$

faktor otjecanja ide i do 0,95

- mogućnost pretvorbe energije položaja vode ovisi o poznavanju količine vode u vodotoku po iznosu i vremenu (H=f(Q) – konsumpciona krivulja)

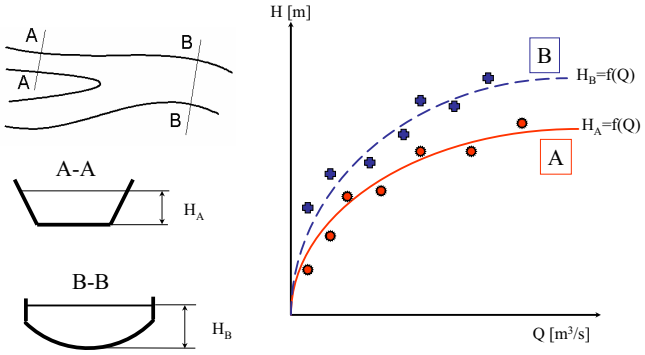


Kretanje protoka za jedan vodotok na jednom mjestu u nekoj godini

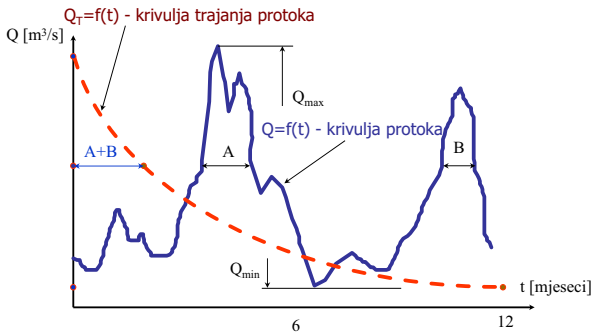
Hidrološka svojstva HE (2)

- Količinu vode u vodotoku određuje:
  - količina oborina
  - sastav i topografija tla
  - vremenski raspored oborina
- osnovno mjerenje razine vode u vodotoku (vodostaj) pomoću vodokaza
- ***KONSUMPCIONA KRIVULJA***
  - istovremeno mjerenje protoka na određenom mjestu vodotoka, odnosno na određenom profilu
  - mjerenja se obavljaju za određeno mjesto i sve očekivane vodostaje
  - ovisna je o obliku korita na mjestu *vodokaza*

Konsumpciona krivulja



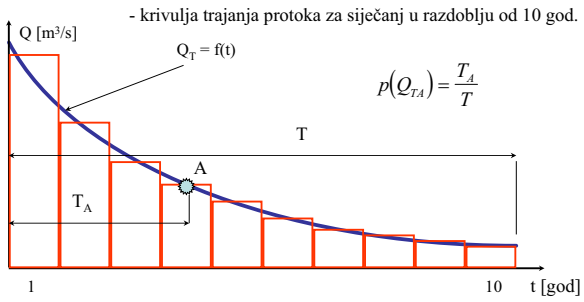
Krivulja trajanja protoka (1)



Krivulja trajanja protoka (2)

- krivulja trajanja protoka predstavlja vjerojatnosnu krivulju - vjerojatnost pojave protoka Q_{TA} jednaka je omjeru vremena T_A i ukupnog vremena promatranja

- krivulja trajanja protoka za siječanj u razdoblju od 10 god.



$$p(Q_{TA}) = \frac{T_A}{T}$$

Krivulja trajanja protoka (3)

- ukupna količina vode koja proteče kroz promatrani profil vodotoka

$$V_{Ag} = \int_0^{12} Q(t)dt = \int_0^{12} Q_T(t)dt \quad [\mathrm{m}^3]$$

- srednji godišnji protok vodotoka

$$Q_{sr} = \frac{V_{Ag}}{3154 \cdot 10^6} \quad [m^3/s]$$

Veličina izgradnje - Q_i

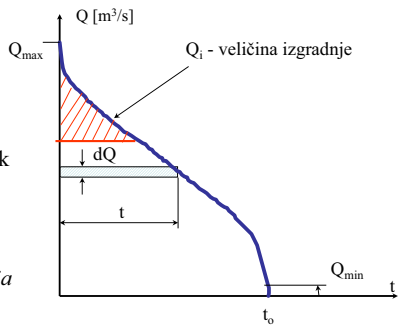
- maksimalni protok koji može HE propustiti kroz postrojenje
- iskoristivi volumen vode V_i

$$V_i = \int_0^{Q_i} t dQ$$

- srednji iskoristivi protok

$$Q_{si} = \frac{V_i}{t_o} = \frac{V_i}{31.54 \cdot 10^6}$$

$\frac{V_i}{V_{Ag}}$ - *stupanj iskorištenja vode*

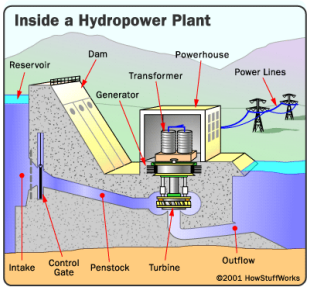


Hidroelektrane (HE) - definicija

- HE su postrojenja u kojima se energija položaja vode pretvara u električnu energiju
- HE se sastoji od objekata i dijelova koji služe za:
  - skupljanje vode,
  - odvođenje vode,
  - pretvorbu energije položaja vode u mehaničku energiju,
  - pretvorbu mehaničke u električnu energiju,
  - transformaciju električne energije i
  - razvod električke energije

Hidroelektrane - dijelovi

- brana ili pregrada
- zahvat vode
- dovod vode
- vodna komora, vodostan
- tlačni cjevovod, kanal
- strojarnica
- odvod vode



HE - uvjeti izgradnje

- topografski i geološki uvjeti
- pogonski zahtjevi
- hidroenergetsko iskorištenje vodotoka
- uvjeti poljoprivrede i opskrbe vodom
- ribarstvo i ekologija

Hidroelektrane - podjela

- prema padu
  - niskotlačne (do 25 m)
  - srednjetlačne (25 - 200 m)
  - visokotlačne (> 200 m)
- HE koje koriste promjenu razine mora (plima i oseka)
- prema korištenju vode
  - protočne
    - pribranske
    - derivacijske
  - crpno-akumulacijske
    - dnevne (punjenje po noći, pražnjenje po danu)
    - sezonske (ravnoteža kišnog i sušnog perioda)

Osnovne izvedbe HE ovisno o raspoloživom padu vode

- mali pad - niskotlačne (do 25 m)
- srednji pad - srednjetlačne (25 - 200 m)
- veliki pad - visokotlačne (> 200 m)

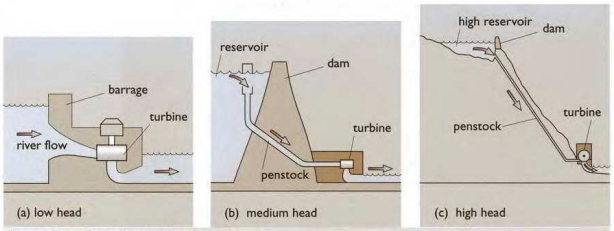
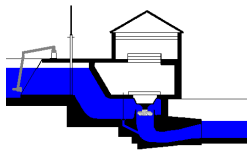


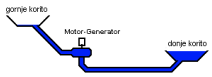
Figure 5.13 Types of hydroelectric installation Boyle, *Renewable Energy*, 2nd edition, Oxford University Press, 2003

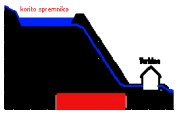
Hidroelektrane – podjela prema veličini

- Velike HE
  - Snaga veća od 100 MW, spojene na EES
- Srednje HE
  - Snage 15 - 100 MW, obično spojene na EES
- Male HE
  - Snage 1 - 15 MW, obično spojene na EES
- Mini HE
  - Snage od 100 kW do 1 MW
  - Otočni rad ili direktni spoj na EES ovisno o lokaciji
- Mikro HE
  - Snage od 5kW do 100 kW
  - Obično otočni rad iako se u novije vrijem razmatra spajanja na EES.
- Piko HE
  - Od 100 W do 5kW
  - Izolirana područja, posebne aplikacije.

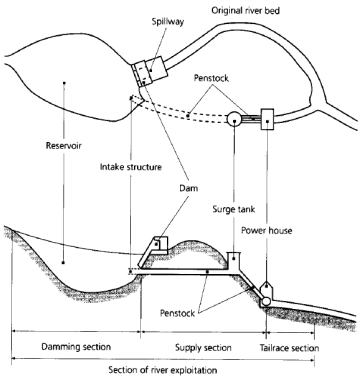
HE – animacija rada različitih tipova





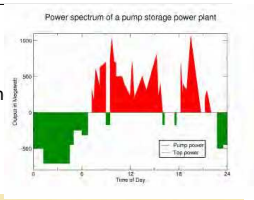


Moguća izvedba HE s oduzimanjem vode iz akumulacije i vraćanjem u vodotok



Način korištenja pumpne HE u dnevno-noćnom režimu rada

- Efikasnost pretvorbe nije na prvom mjestu
- Zadovoljavanje potrošnje u razdobljima povećan potrošnje
- Cijena kWh ovisi o ponudi i potražnji



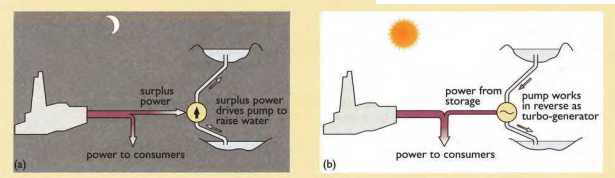
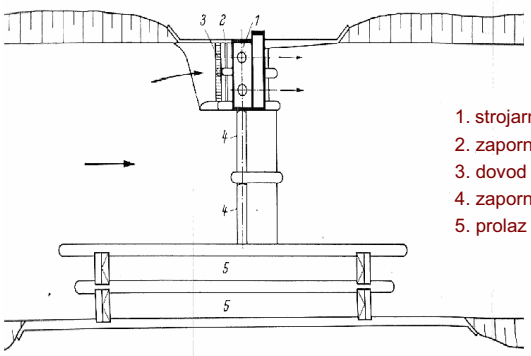


Figure 5.27 Pumped storage system: (a) at time of low demand; (b) at time of high demand

Niskotlačna hidroelektrana (1)



1. strojarnica
2. zapornice
3. dovod
4. zapornice
5. prolaz za brodove

Niskotlačna hidroelektrana (2)

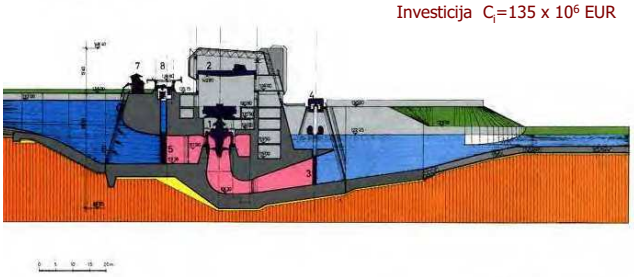
Niskotlačna hidroelektrana (3)

HE PODSUSED

Instalirana snaga P=43 MW

Godišnja proizvodnja W_{Ee}= 220 x 10^6 kWh

Investicija C_i=135 x 10^6 EUR



PRESJEK KROZ STROJARNICU

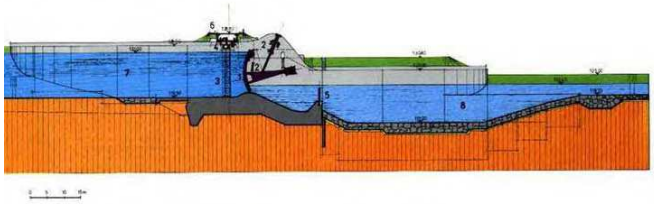
Niskotlačna hidroelektrana (4)

HE PODSUSED

Instalirana snaga P=43 MW

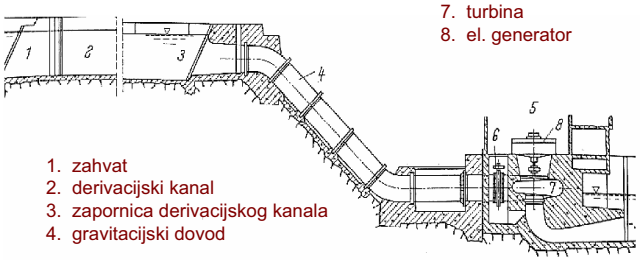
Godišnja proizvodnja W_{Ee}= 220 x 10^6 kWh

Investicija C_i=135 x 10^6 EUR



PRESJEK KROZ PROTOČNO POLJE

Srednjetlačna HE - derivacijski tip (1)



5. strojarnica
6. zaustavni ventil
7. turbina
8. el. generator

1. zahvat
2. derivacijski kanal
3. zapornica derivacijskog kanala
4. gravitacijski dovod

Srednjetlačna HE - derivacijski tip (2)

HE Kraljevac:

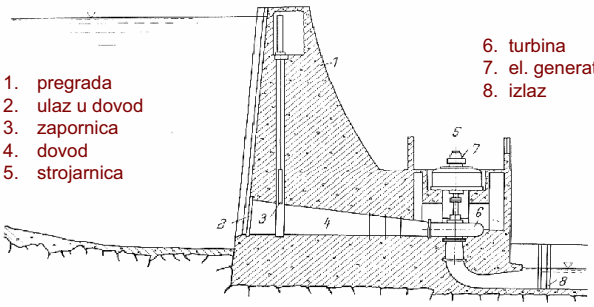
- pad od 110 m; na Cetini;

-građena u tri etape: 1912. 30 m^3/s, 2x12,8 MW; 1932. dodano 2x20,8 MW, 50 m^3/s -> najveća hidroelektrana na Balkanu; 1990. 4.8 MW (mjesto agregata iz 1912.)

Instalirana snaga HE Kraljevac iznosi 59,2 MW (2x20,8 + 12,8 + 4,8), a prosječna godišnja proizvodnja 40 GWh.

Puštanjem u pogon druge etape na HE Zakučac, gubi se značaj HE Kraljevac. Voda iz kompenzacijskog bazena Prančevići najvećim dijelom ide prema turbinama HE Zakučac dok se prema HE Kraljevac ispuštaju vode radi održavanja biološkog minimuma (~ 6 m^3/s). Taj dio vode kasnije preradi HE Kraljevac s agregatom biološkog minimuma. U slučaju velikih dotoka, kad HE Zakučac ne može primiti svu vodu koja pristigne u Prančeviće, višak se ispušta prema HE Kraljevac.

Srednjetlačna HE - pribranski tip (1)



1. pregrada
2. ulaz u dovod
3. zapornica
4. dovod
5. strojarnica

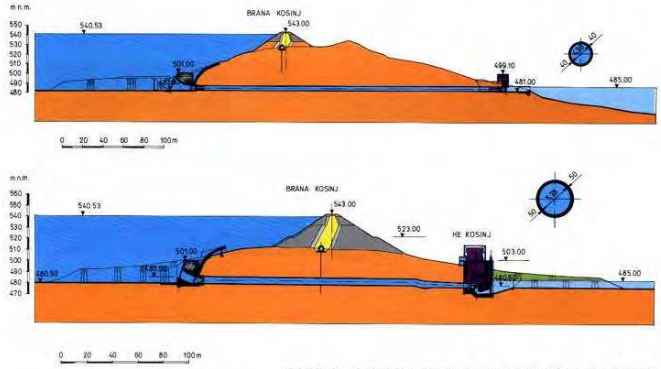
6. turbina
7. el. generator
8. izlaz

Srednjetlačna HE - pribranski tip (2)

HE KOSINJ

Instalirana snaga P>25 MW Godišnja proizvodnja W_{Ee}= 76 x 10^6 kWh

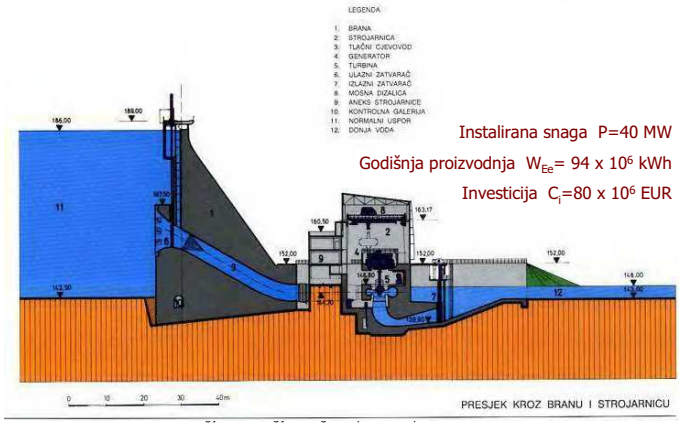
Investicija C_i=160 x 10^6 EUR



UZDUŽNI PRESJECI KROZ TEMELJNI ISPUST I POSTROJENJE HE KOSINJ

Srednjetlačna HE - pribranski tip (3)

HE LEŠĆE

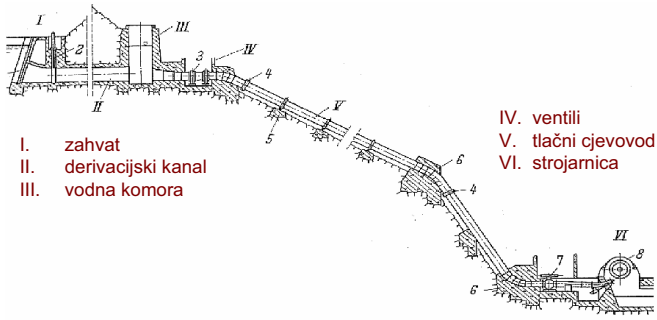


Instalirana snaga P=40 MW

Godišnja proizvodnja W_{Ee}= 94 x 10^6 kWh

Investicija C_I=80 x 10^6 EUR

Visokotlačna HE (1)

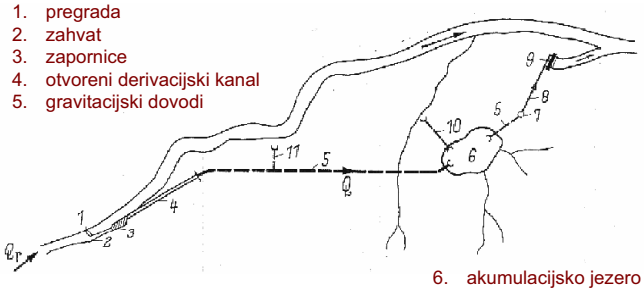


I. zahvat
II. derivacijski kanal
III. vodna komora
IV. ventili
V. tlačni cjevovod
VI. strojarnica

Visokotlačna HE (2)

Visokotlačna HE s akumulacijom

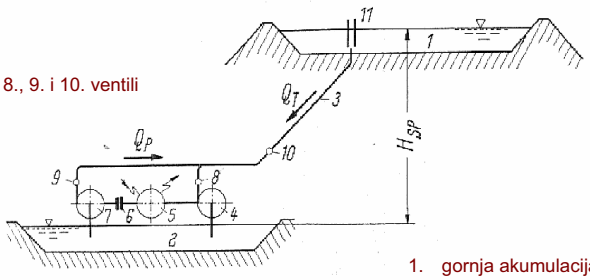
1. pregrada
2. zahvat
3. zapornice
4. otvoreni derivacijski kanal
5. gravitacijski dovodi



6. akumulacijsko jezero
7. vodna komora
8. tlačni cjevovod
9. strojarnica

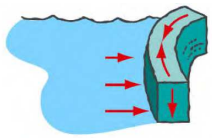
Crpno-akumulacijska HE

8., 9. i 10. ventili

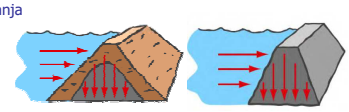


1. gornja akumulacija
2. donja akumulacija
3. tlačni cjevovod
4. turbina
5. sink. generator
6. spojka
7. crpka

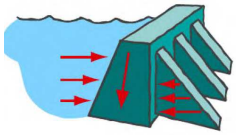
Dijelovi HE - pregrada



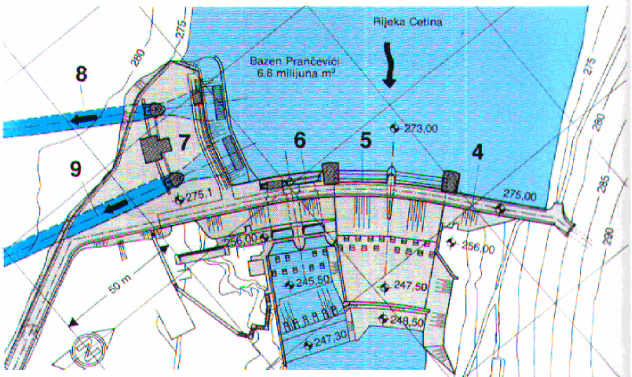
- višestruka namjena
  - skretanje vode od njezinog prirodnog toka prema zahvatu
  - povišenje razine vode radi postizanja većeg pada
  - ostvarivanje akumulacije



- sastavni dijelovi pregrade
  - tijelo pregrade
  - elementi za regulaciju vodenog toka:
    - preljevi, ispusti, preljevna polja (zapornice), temeljni ispust
- osnovni tipovi:
  - gravitacijska pregrada (vlastitom težinom osigurava stabilnost)
  - lučna pregrada (oblikom osigurava stabilnost)
  - lučno - gravitacijska
  - olakšana pregrada

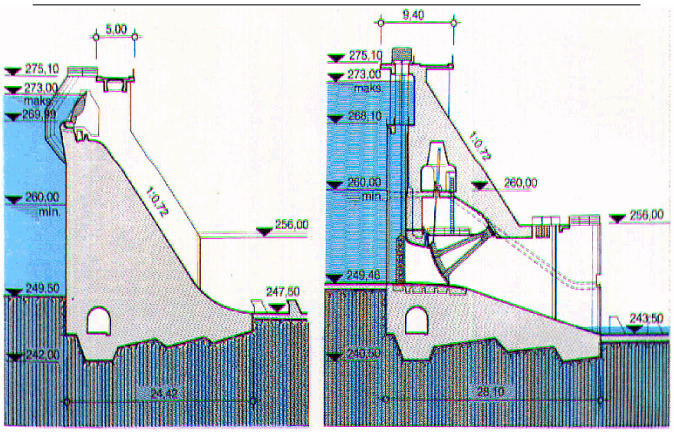


Pregrada "Prančevići"-HE Zakučac



- **instalirani protok**: $Q_i = 220\ m^3/s$ (2x50 + 2x60)
- **konstruktivni pad**: $H_i = 250$ m
- **instalirana snaga turbina**: 486 MW (2x108 + 2x135)
- **maksimalna godišnja proizvodnja:** ('74-'97) $W_{max} = 2022$ GWh ('96)

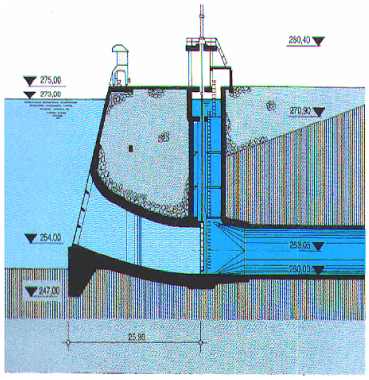
Preg."Prančevići"-preljev i temeljni ispust



Dijelovi HE - zahvat

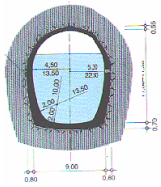
Zahvat prima i usmjerava prema hidroelektrani vodu

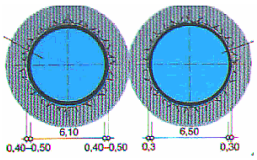
- zahvat na površini (razina vode stalna)
- zahvat ispod površine (akumulacija ili promjenjiva razina vode



Dijelovi HE - dovod vode

- Dovod vode spaja zahvat sa vodnom komorom ili vodostanom
  - gravitacijski dovod (kanal ili tunel nije posve ispunjen vodom)
  - tlačni tunel (tunel posve ispunjen vodom)
- Regulacija protoka u dovodu
  - kod gravitacijskog dovoda protok se regulira visinom zahvata
  - kod tlačnog tunela samo odvodom odn. otvorom na turbini



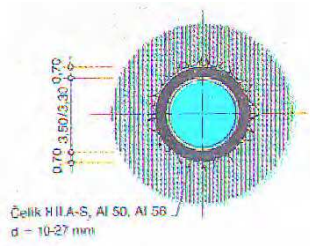


Dijelovi HE - vodna komora

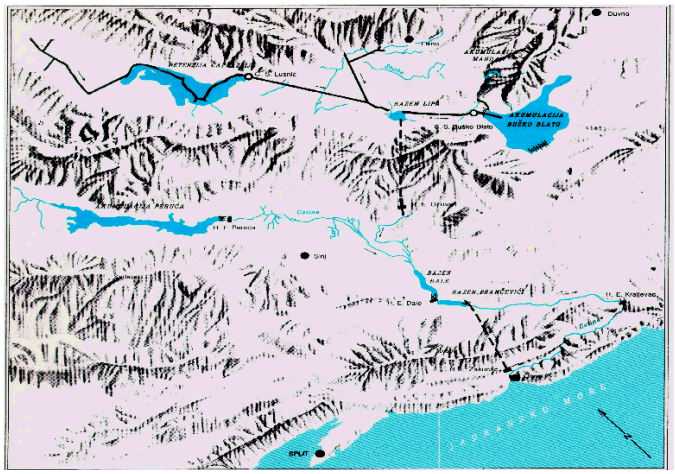
- Vodna komora
  - nalazi se na početku tlačnog cjevovoda sa svrhom da kod naglog smanjenja opterećenja HE tlak vode u cjevovodu ne poraste iznad dozvoljene granice

Dijelovi HE - tlačni cjevovod

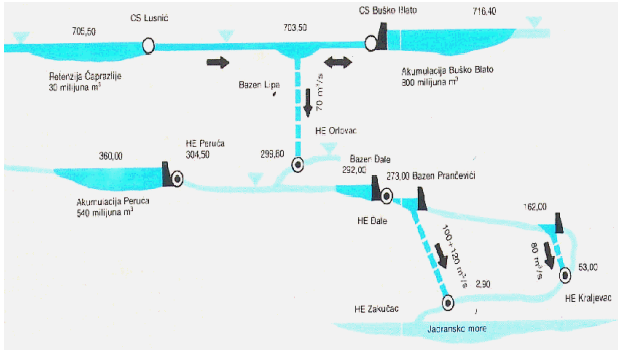
- Tlačni cjevovod je specijalne izradbe i koristi se za dovod vode do turbine
  - slobodno stojeći
  - integralni dio stijene



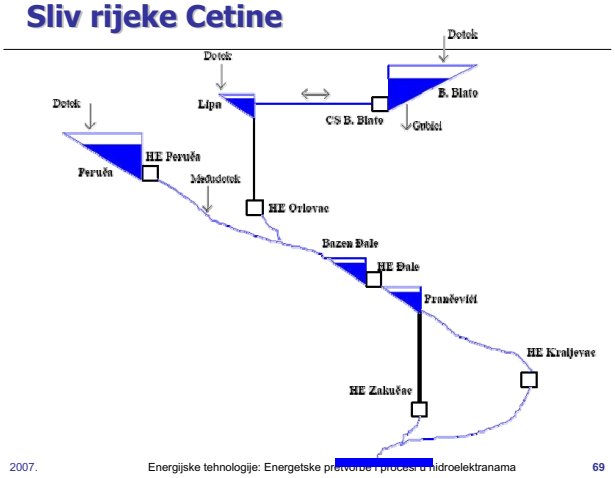
Hidroelektrane sliva Cetine (1)



Hidroelektrane sliva Cetine (2)



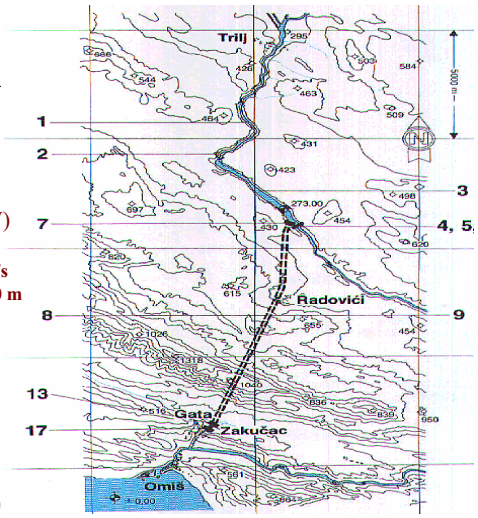
Sliv rijeke Cetine



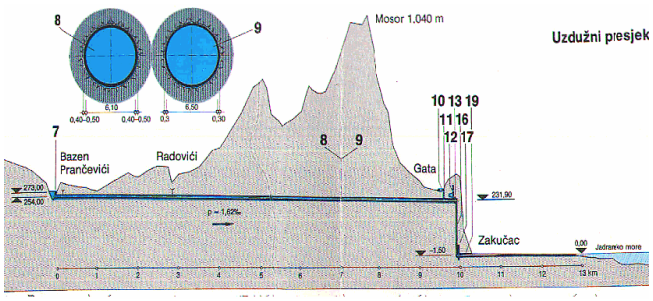
Situacija objekata HE Zakučac (1)

486 MW
(216 MW i 270 MW)

Q_i=2x50+2x60=**220 m³/s**
konstruktivni **pad** je **250 m**
(Francis - vertikalne)



Situacija objekata HE Zakučac (2)

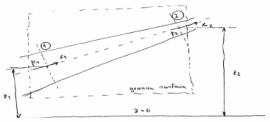


Proračuni vezani za HE – prvi dio

- Primjena I glavnog stavka za otvorene sustave na vodnu turbinu
- Bernoullieva jednadžba – pristup preko energije
- Jednostavni primjeri proračuna – ilustracija ovisnosti snage elektrane o padu vode i raspoloživom protoku
- Proračun lociranja pribranske i derivacijske HE

JSS procesi otvorenih sustava – strujanje vode

Strujanje vode u cjevovodu: **Bernoullieva jednadžba**



$q_{12} = 0,\ w_{RT12} = 0$

$$u_1 + p_1v_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1 = u_2 + p_2v_2 + \frac{1}{2}c_2^2 + gz_2$$

$$q_{12} = \int_{v_1}^{v_2} pdv - |w_{RT12}| + u_2 - u_1 \qquad u_1 = u_2$$

$$(q_{12} = 0,\ w_{RT12} = 0,\ \int_{v_1}^{v_2} pdv = 0\ /v = \text{konst},\ dv = 0/)$$

$$p_1v_1 + \frac{1}{2}c_1^2 + gz_1 = p_2v_2 + \frac{1}{2}c_2^2 + gz_2$$

JSS procesi otvorenih sustava - proces u vodnoj turbini

Tehnički rad vodne turbine

$q_{12} = 0,\ u_1 = u_2 \qquad v_1 = v_2 = v$

$$w_{t12} = -v(p_2 - p_1) - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1)\ [J/kg]$$

$v = \text{konst.}$

$$w_{t12} = -\int_{p_1}^{p_2} vdp - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1) =$$

$$= -v(p_2 - p_1) - \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) - g(z_2 - z_1)\ [J/kg]$$

Primjer 1a

Mala hidroelektrana stupnja djelovanja 83% smještena je na planinskom potoku koji ima efektivni pad vode od 25 m i volumni protok od 600 l/m. Kolika je snaga navedene male HE?

- H = 25 m (pad vode)
- Q = 600 ℓ/min × 1 m³/1000 ℓ × 1 min/60s
  = 0,01 m³/s (volumni protok)
- Stupanj djelovanja HE η = 0,83
- $P \cong 9{,}81\rho\eta QH = 9{,}81(1000)(0{,}83)(0{,}01)(25) = 2036$ W
  $\cong$ 2,0 kW

Primjer 1b

Koliko energije (E) može proizvesti navedena mala HE ako radi cijelu godinu bez prekida i koliko ljudi može obskrbljivati električnom energijom ako je prosječna godišnja potrošnja energije po osobi 3000 kWh?

$E = P \cdot t$
= 2,0 kW · 24 h/dan · 365 dan/god
= 17520 kWh godišnje

Populacija = E/3000 = 17520/3000 = 5,84
5 ljudi ima sigurnu opskrbu el.energijom

Primjer 2

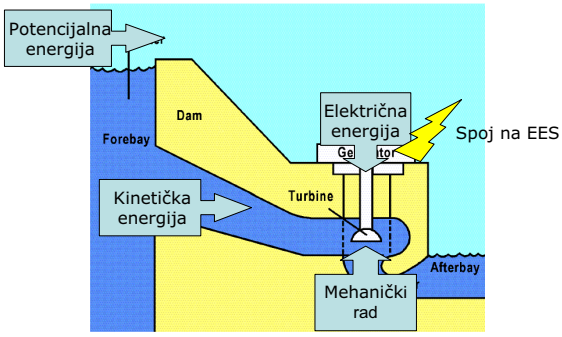
HE stupnja djelovanja 83% je izgrađena na lokaciji s efektivnim padom vode od 100 m i raspoloživim volumnim protokom 6000 m³/s (približno uvjeti na lokaciji Niagara Falls). Kolika je snaga elektrane, proizvedena električna energija (uz pretpostavku nepromjenjivih uvjeta protoka i nivoa vode) i koliki je potencijalni broj potrošača uz pretpostavke navedene u primjeru 1)?

- $P \cong 9{,}81\rho\eta QH = 9{,}81(1000*0{,}83)(6000)(100) \cong 4{,}88*10^9$ W
  $\cong$ 4,88 GW

Zadatak 1: pribranska elektrana

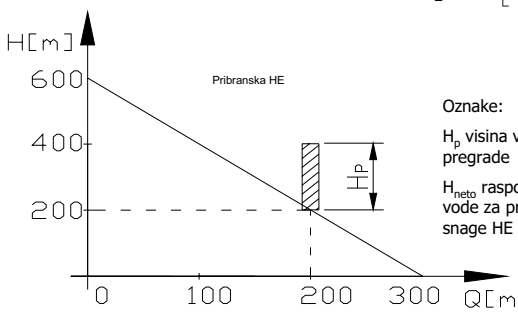
Izgradnjom se pribranske hidroelektrane, na nadmorskoj visini 200 m, rijeke koja ima srednji godišnji protok Q_{sr} = 300-H[m]/2 [m³/s], želi omogućiti rad agregata S_n=80 MVA (nazivni faktor snage 0,8) i stupnja iskorištenja 0,93 punom snagom.
Kolika je potrebna visina vode ispred pregrade/brane HE?

Pribranska HE



Q-H dijagram vodotoka i lokacija HE

$$\Rightarrow Q_i = Q_{sr}(H_Z) = 300 - \frac{200}{2} = 200\left[\frac{m^3}{s}\right]$$



Oznake:

H_p visina vode ispred pregrade

H_{neto} raspoloživa visina vode za proračun snage HE

Zadatak 1

Rješenje:

$$P = S_n \cdot \cos\varphi_n = \rho \cdot g \cdot Q_{sr} \cdot H_{neto} \cdot \eta = \left\{\rho = 10^3\left[kg/m^3\right]\right\} =$$

$$P = g \cdot Q_{sr} \cdot H_{neto} \cdot \eta \ \ [kW]$$

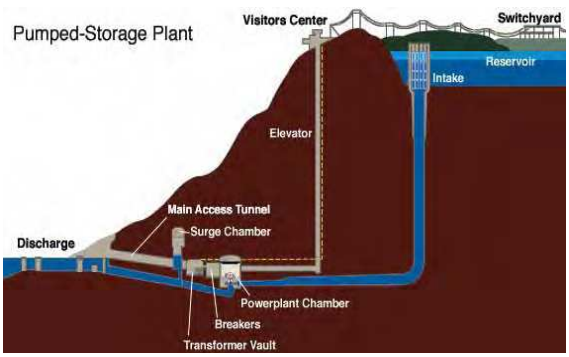
$$H_{neto} = H_P$$

$$H_p = \frac{S_n \cdot \cos\varphi_n}{g \cdot Q_{sr} \cdot \eta} = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8[kW]}{9{,}81 \cdot 200 \cdot 0{,}93} = 35 \ \ [m]$$

Zadatak 2: derivacijska elektrana

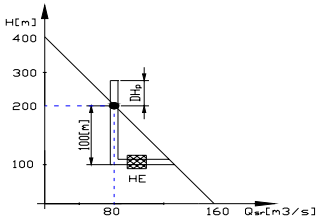
Planira se izgradnja derivacijske HE sa zahvatom na n.v. (nadmorskoj visini) 200 m, na vodotoku koji ima srednji godišnji protok Q_{sr}=160-H[m]/2,5 [m³/s]. Agregat elektrane je izabran tako da na punoj snazi daje u mrežu snagu S_n=100 MVA uz faktor snage 0,8. Pretpostavljen je stupanj iskorištenja na pragu HE 0,9.
Kolika mora iznositi visina vode iza pregrade/brane HE ako je donja voda na n.v. 100 m?
Ukupni gubitci u dovodu vode su procijenjeni na 10 m.

Derivacijska pumpno-akumulacijska HE



Q-H dijagram vodotoka i lokacija HE

$$DH_P = \Delta H_P$$



Korištene oznake:

DH_p=H_{brane} visina vode ispred pregrade/brane

Q_{sr} srednji godišnji volumni protok na mjestu izgradnje

H nadmorska visina

H_g -smanjenje visine zbog gubitaka,

H_{neto} efektivna visina vode,

H_{te} razlika u elevacijama korijena brane i turbine derivacijske HE

Zadatak 2

Rješenje:

$$H = 0[m] \Rightarrow Q_{sr} = 160\left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$Q_{sr} = 0\left[\frac{m^3}{s}\right] \Rightarrow H = 400[m]$$

$$Q_{sr} = 160 - \frac{H}{2.5} = 160 - \frac{200}{2.5} = 160 - 80 = 80\left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$H_{te} = 100[m];\ \mathrm{H_g} = 10[m]$$

$$P = 9.81 \cdot Q_{sr} \cdot H_{neto} \cdot \eta \cdot 10^{-3}[MW]$$

$$H_{neto} = \frac{S_n \cdot \cos\varphi}{9.81 \cdot Q_{sr} \cdot \eta \cdot 10^{-3}} = \frac{100 \cdot 0.8 \cdot 10^3}{9.81 \cdot 80 \cdot 0.9} = 113.3[m]$$

$$H_{neto} = H_{brane} + H_{te} - H_g \Rightarrow H_{brane} = H_{neto} - H_{te} + H_g = 113.3 - 100 + 10 = 23.3[m]$$

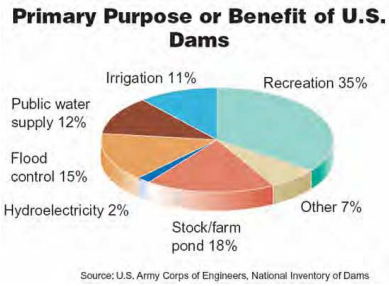
Hidroenergija i okoliš – za i protiv

- Nema emisije u okoliš (uvjetno)
- Reguliranje toka vode

- Ugrožavanje riba
- Umanjivanje kvalitete vode u toku iza
- Negativan utjecaj na neposredni bio-sustav
- Društveni utjecaj na regiju

Pozitivno

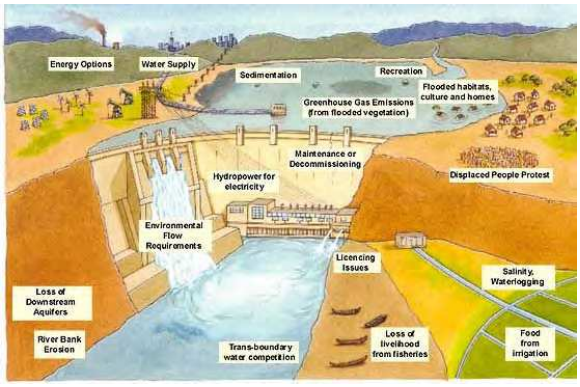
- Kontrola plavljenja i toka
- Obnovljivi izvor el. en.
- Efikasnost – do 90% za el. en.



Negativno

- Drastično mijenja prirodni tok rijeke
- Preseljenje ljudi
- Fertilizacija potropljenog prostora
- Migracije riba
- Sedimentacija
- Dekomisija uklanjanje brane
- Izgradnja i održavanje hidro postrojenja
  - Niz državnih institucija s nejasnim ovlastima i procedurama.
  - Javno mnijenje

Utjecaj velikih brana na okoliš



HE Itaipú (Brazil & Paraguay)

ITAIPU - strojarnica

Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama

Pretvorba energije položaja vode u mehanički rad – II
Energijske tehnologije
FER 2007.

Gdje smo:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. **Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama**
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Energija Sunca
8. Energija vjetra
9. Geotermalna energija
10. Biomasa
11. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
12. Potrošnja električne en.
13. Prijenos i distribucija el. en.
14. Skladištenje energije
15. Utjecaj na okoliš
16. Održivi razvoj i energija

2. Dio

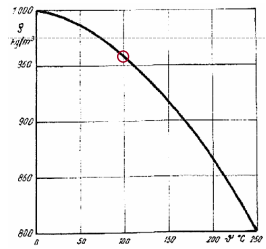
- Svojstva vode
- Opća jednadžba strujanja
  - zatvoreni i otvoreni kanal
  - zatvorena cijev
- Istjecanje
  - kroz mali i veliki otvor
  - preko preljeva
- Koristan pad
  - derivacijska HE
  - pribranska HE
- Turbine
  - reakcijske (pretlačne)
  - akcijske (slobodnog mlaza)
- Aspirator
- Difuzor

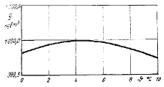
Strujanje tekućina - svojstva

- gustoća ρ [kg/m^3]
- stlačivost 1/E [ms^2/kg]
- tlak isparivanja p_s [bar=10^5 N/m^2 , kg/ms^2 , Pa]
- kinematička viskoznost ν [m^2/s]

Strujanje tekućina - gustoća, ρ

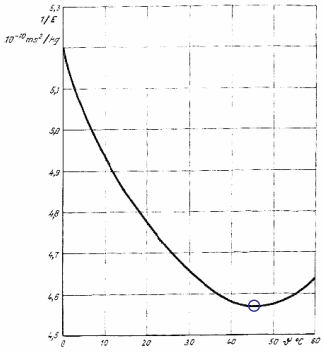
- gustoća je masa tvari u volumenu od 1 m^3
- masa tvari se ne mijenja s promjenom ubrzanja sile gravitacije, ne ovisi o zemljopisnoj širini ni o nadmorskoj visini
- ***gustoća je funkcija temp. i tlaka neovisna o položaju tekućine:***
  ρ = f(p,T) *(f(T) za stac. strujanja)*





Strujanje tekućina - stlačivost

- svojstvo tekućine da joj se s porastom tlaka smanjuje volumen
- vrijednost stlačivosti (1/E) odgovara recipročnoj vrijednost modula elastičnosti E
- funkcija tlaka i temperature
  1/E=0 za stacionarno strujanje
  1/E=f(p,T) ≈ f(T) i za $H_20 \approx 0$

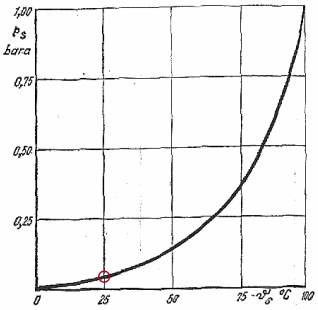


Strujanje tekućina - tlak isparavanja

Padne li tlak za vrijeme strujanja do ***tlaka isparivanja***, tekućina će na tom mjestu ispariti stvarajući mjehuriće i tako spriječiti daljnje opadanje tlaka.

Ako tako stvoreni mjehurići dođu strujanjem do područja s višim tlakom nastaje nagla kondenzacija praćena lokalnim naglim porastom tlaka.

Taj porast tlaka (i do 1000 bara) praćen više ili manje jakim šumom naziva se ***kavitacija***.

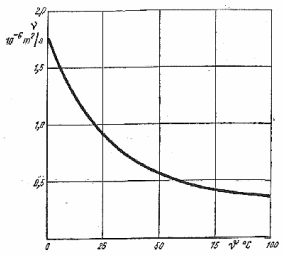


Strujanje tekućina - viskoznost

- na dodirnoj plohi između dva sloja tekućine koji se pomiču relativno jedan prema drugome nastaju naprezanja zbog sile smicanja, te se dio mehaničke energije pretvara u toplinu
- naprezanje je proporcionalno produktu promjene brzine i vrijednosti dinamičke viskoznosti
- dinamička viskoznost je definirana kao produkt kinematičke viskoznosti i gustoće tekućine

  $\mu = \nu \times \rho$

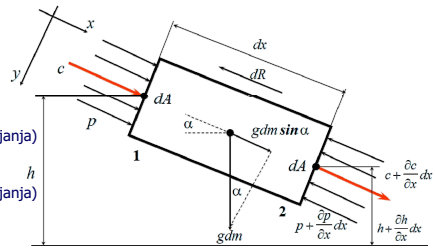
  $\nu = f(p,T) \approx f(T)$



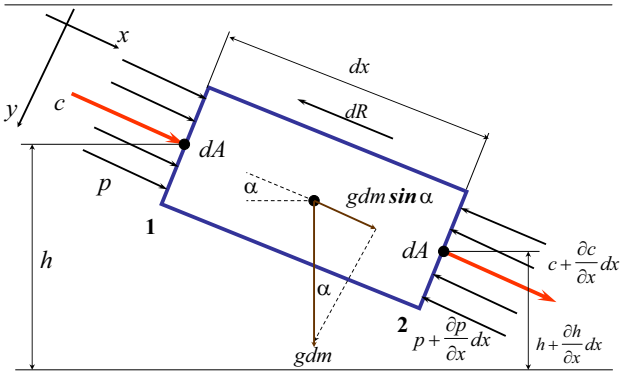
Opća jednadžba strujanja (1)

Na element tekućine duljine *dx* [m], ograničen čeonim plohama *1* i *2* površine *dA* [m^2], djeluju u pravcu strujanja *x* ove sile:

- tlakovi susjednih elemenata tekućine
- komponenta sile teže
- sila inercije
- sila trenja
- centrifugalna sila (ne djeluje u pravcu strujanja)
- Coriolisova sila (ne djeluje u pravcu strujanja)



Opća jednadžba strujanja (2)



Opća jednadžba strujanja (3)

Bernoullijeva jednadžba je specijalni oblike jednadžbe strujanja razvijena za jednu strujnicu u uvjetima stacionarnog strujanja bez trenja i vrtloženja.

Količina gibanja elementa fluida se duž strujnice mijenja zbog razlike tlačnih sila na ulazu i izlazu i djelovanja gravitacijske sile.

Jednadžba se javlja s članovima u obliku specifične energije, tlaka ili visine (članovi s indeksom r su naknadno dodani da se u obzir uzme utjecaj trenja).

$$\frac{p}{\rho} + gh + \frac{1}{2}c^2 + w_r = w_0 = \text{konst.}$$

$$p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho c^2 + p_r = p_0 = konst\ .$$

$$\frac{p}{\rho g} + h + \frac{1}{2}\frac{c^2}{g} + h_r = h_0 = \text{konst.}$$

Bernoullijeva jednadžba

$$\frac{p}{\rho} + gh + \frac{1}{2}c^2 + w_r = w_0 = konst\ . \quad (w_r \text{ - trenje strujanja})$$

$\frac{p}{\rho}$ *spec. energija tlaka*

gh *spec. energija pol. (energija pol.)*

$\frac{1}{2}c^2$ *spec. kinetička energija*

w_r *spec. gubici energije*

Uobičajeni način pisanja jednadžbe strujanja u hidromehanici:

$$\frac{p}{\rho g} + h + \frac{1}{2g}c^2 + h_r = konst. \quad [\text{m}]$$

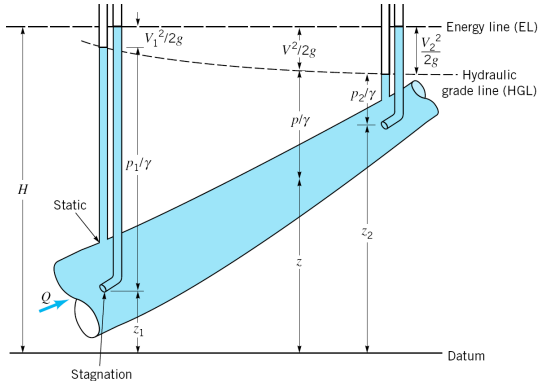
visina tlaka

geodetska visina

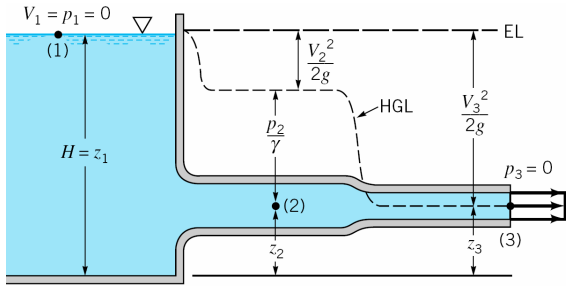
visina brzine

visina gubitaka

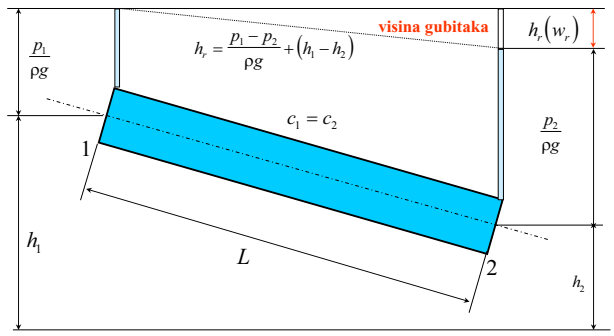
Bernoullijeva jednadžba - primjena



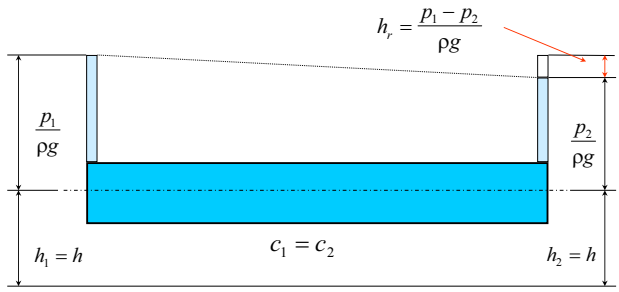
Bernoullijeva jednadžba - primjena



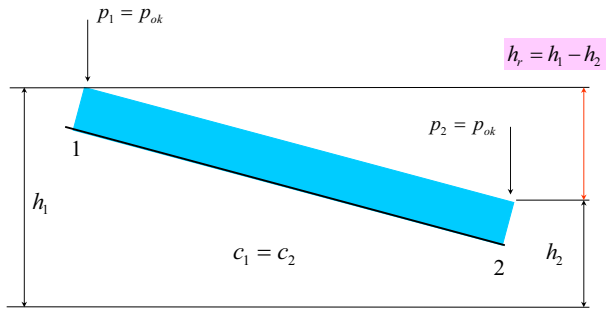
Strujanje u zatvorenoj cijevi



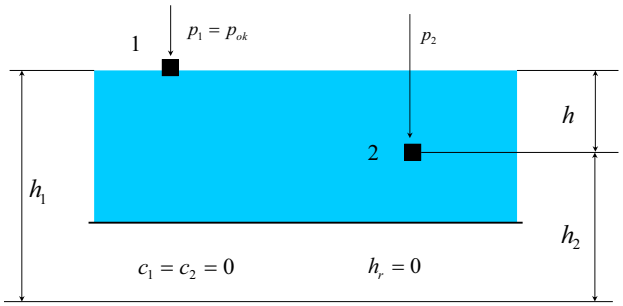
Strujanje kroz zatvoreni kanal ispunjen vodom



Strujanje kroz otvoreni kanal

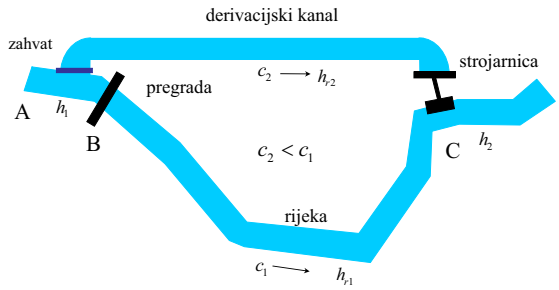


Tekućina u mirovanju – hidrostatski tlak



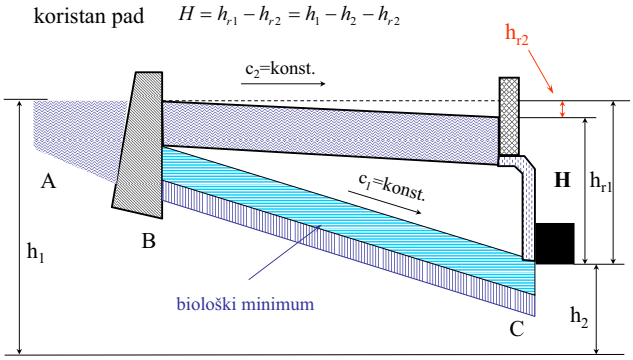
$$\frac{p_1}{\rho g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho g} + h_2 \qquad p_2 = p_1 + \rho g(h_1 - h_2) = p_1 + \rho g h = p_{ok} + \rho g h$$

Prirodni vodotoci i njihovo korištenje



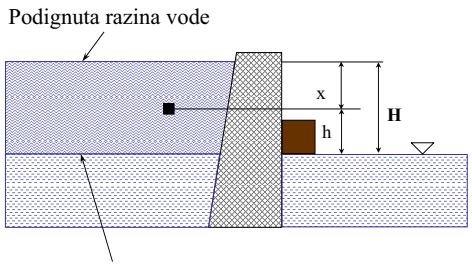
Derivacijski kanal

koristan pad $H = h_{r1} - h_{r2} = h_1 - h_2 - h_{r2}$



Podizanje razine vode pregradom

Maksimalna energija je jednaka H [m]



Stalno kod Q=konst.

Zadatak 1: konsumpciona krivulja

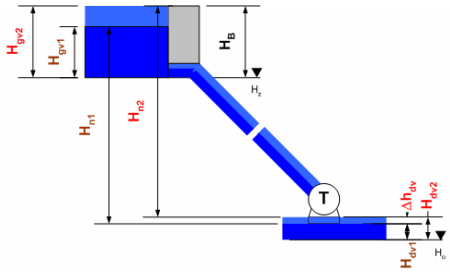
Instalirani protok derivacijske HE iznosi 500 m³/s.
Na mjestu zahvata postavljena je pregrada visine 50 m. Početak tlačnog tunela nalazi se na 200 m n.v. smješten na dnu pregrade, dok se dno odvodnog kanala nalazi na 100 m n.v.
Konsumpciona krivulja na mjestu zahvata dana je izrazom $H_{GV} = Q/10$, a na mjestu odvoda iz postrojenja $H_{DV} = Q/50$.
Kolikom će snagom raditi hidroelektrana kada je razina vode na 3/5 visine pregrade, a kolikom kada se voda podigne do vrha pregrade.
Odrediti aktivnu visinu u oba slučaja.
Računati bez gubitaka i uz stupanj iskorištenja 0,95.

Zadatak 1: rješenje

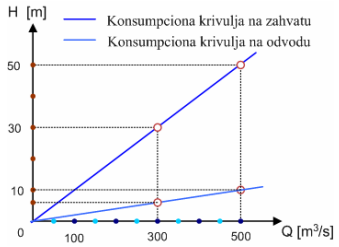
Q_i =500 m³/s, H_B = 50 m, H_z = 200 m n.v., H_o = 100 m n.v.

η_{HE} = 0,95, $H_{GV1} = H_B \cdot 3/5$, $H_{GV2} = H_B$

H_{n1}=?, H_{n2}=?, P_1 = ?, P_2 = ?



Zadatak 1: rješenje (nastavak 1)



Konsumpcione krivulje na zahvatu i odvodu: prikazuju razinu gornje vode i razinu donje vode u ovisnosti o protoku.

$P = 9{,}81\ \rho \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta$

$H_{n1} = H_{gv1} + (H_z - H_o) - H_{dv1}$

$H_{n2} = H_{gv2} + (H_z - H_o) - H_{dv2}$

Zadatak 1: rješenje (nastavak 2)

Postupak:

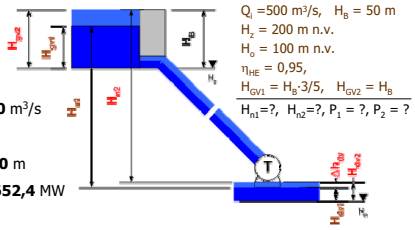
1. Za poznati nivo gornje vode odrediti protok iz konsumpcione krivulje
2. Za određeni protok odrediti nivo donje vode
3. Izračunati aktivnu visinu i snagu

H_{GV1}=3/5*50=**30** m -> **Q**=30*10=**300** m³/s

H_{DV1}=300/50=**6** m

H_{n1}=30 + 200 - 100 – 6 = **124** m

P_1=9,81*1000*300*124*0,95=**346,6** MW



H_{GV2}=50 m -> **Q**=50*10=**500** m³/s

H_{DV1}=500/50=**10** m

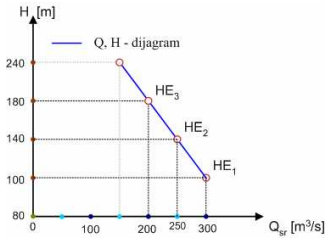
H_{n1}=50 + 200 - 100 – 10 = **140** m

P_1=9,81*1000*500*140*0,95=**652,4** MW

Zadatak 2: vjerojatnostna krivulja protoka

Na slivu čiji je Q-H dijagram dan izrazom
H [m] = 340 - Q_{sr} [m³/s]·4/5 grade se tri pribranske hidroelektrane s visinom brane 40 m;
prva na 100 m, druga na 140 m i treća na 180 m n.v.
Odrediti moguću godišnju proizvodnju hidroelektrana pojedinačno i skupno ako je vjerojatnosna krivulja protoka dana izrazom
Q_T [m³/s] = $Q_{sr} \cdot (2 - t$ [mjesec] /6), a instalirani protoci u hidroelektranama su jednaki srednjim protocima na mjestu postavljanja.

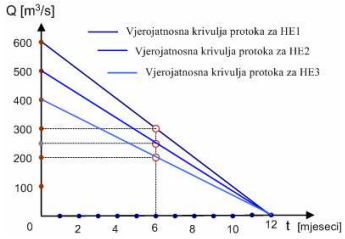
Zadatak 2: rješenje (instalirani protoci)



Q-H dijagram prikazuje iznos srednjeg protoka za odabranu nadmorsku visinu sliva

Srednji volumni protoci (ujedno i instalirani protoci HE) za odabrane nadmorske visine zahvata (100 m, 140 m, 180) su određene iz zadanog Q-H dijagrama H=340 – 4/5 · Q i iznose, 300, 250 i 200 m³/s

Zadatak 2: rješenje (vjerojatnosna krivulja)



Vjerojatnosna krivulja (ili krivulja trajanja) protoka prikazuje očekivano vrijeme (vjerojatnost) pojavljivanja određenog iznosa protoka za odabranu lokaciju. Trajanje protoka jednakog ili većeg od instaliranog odredi se iz vjerojatnosne krivulje protoka.

Za krivulju trajanja protoka zadanu pravcem srednji protok je Q(t=6)

Krivulje su određene za svaku HE na osnovi odgovarajućih srednjih protoka iz Q-H dijagrama vodotoka

Q_{sr1} =300 m³/s

Q_{sr2} =250 m³/s

Q_{sr3} =200 m³/s

$Q_T = Q_{sr} \cdot (2 - t/6)$

Zadatak 2: rješenje (godišnja proizvodnja energije)

Općenito vrijedi za očekivanu godišnju proizvodnju:

$$W = 9{,}81\rho \cdot \left\{ Q_i \cdot \eta_i \cdot \int_0^{t_i} H_n(t) \cdot dt + \int_{t_i}^{12} Q(t) \cdot H_n(t) \cdot \eta(t) \cdot dt \right\}$$

$H_n(t)$ i ***$\eta(t)$*** općenito ovise o protoku;

t_i je vrijeme očekivanog protoka ***$\geq Q_i$***. HE ne može koristiti protoke veće od instaliranog i višak vode odlazi u preljev. Za vremena trajanja protoka od 0 do t_i protok je konstantnan i jednak instaliranom protoku.

Ako se zanemariti vremenska ovisnost ***$H_n(t)$*** i ***$\eta(t)$*** očekivanu snagu možemo računati s godišnjim prosječnim protokom kojeg možemo odrediti iz površine ispod krivulje trajanja protoka (prema x ili y osi).

Zadatak 2: rješenje (godišnja proizvodnja energije)

$$Q_{sri} = \frac{t_i \cdot Q_i + \frac{[Q_i + Q(12)]}{2} \cdot (12 - t_i)}{12}$$

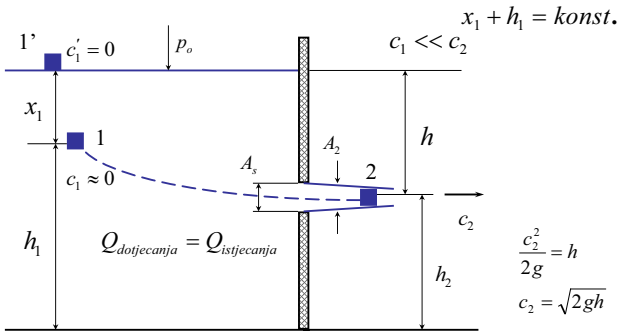
Instalirani protok ***Q_i*** može biti jednak, manji ili veći od srednjeg očekivanog protoka ***Q_{sr}***.
Godišnji srednji protok ***Q_{sri}*** se odnosi na postrojenje i ovisi o instaliranome protoku te vjerojatnosnoj krivulji.

Očekivana godišnja proizvodnja jedne elektrane s pojednostavljenjem iznosi:
W = 8760·9,81·1000 $Q_{sri} \cdot H_n$, (H_n je 40 m)

	Q_{sri} [m³/s]	P [kW]	W [GWh]
HE 1	225	88290	773,4
HE 2	187,5	73575	644,5
HE 3	150	58860	515,6

W_{123} = 1933,5 GWh

Istjecanje kroz mali otvor (1)



$$Q = A_2 c_2 = A_2\sqrt{2gh} = A_s \mu \sqrt{2gh}$$

Istjecanje kroz mali otvor (2)

za presjeke 1 i 2 vrijedi $\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}c_1^2 + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}c_2^2 + gh_2$

za presjeke 1' i 1 vrijedi $\frac{p_o}{\rho} + \frac{1}{2}c_{1'}^2 + g(x_1 + h_1) = \frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}c_1^2 + gh_1$

odnosno zbog $c_1' = 0, c_1 \approx 0$ $\frac{p_1}{\rho} = \frac{p_o}{\rho} + gx_1$

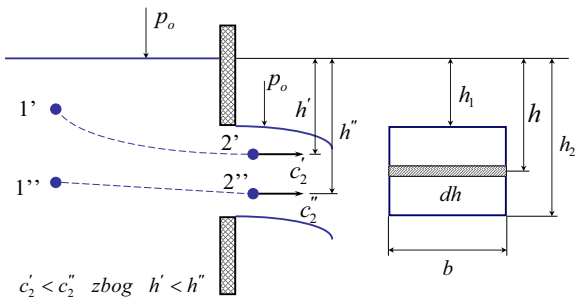
$$\frac{p_o}{\rho} + gh_1 + gx_1 = \frac{p_o}{\rho} + \frac{1}{2}c_2^2 + gh_2$$

$$c_2 = \sqrt{2gh}$$

$$\boxed{Q = A_2 c_2 = A_2\sqrt{2gh} = A_s \mu \sqrt{2gh}}$$

μ - koeficijent istjecanja (određuje se eksperimentalno)

Istjecanje kroz veliki otvor (1)



različite brzine strujanja u pojedinim visinama presjeka mlaza

Istjecanje kroz veliki otvor (2)

$$c_2' = \sqrt{2gh'} \qquad c_2'' = \sqrt{2gh''}$$

$$c_2 = \sqrt{2gh}$$

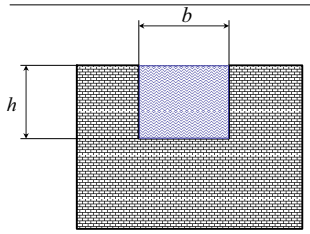
$$dQ = \mu \cdot dA \cdot c_2$$

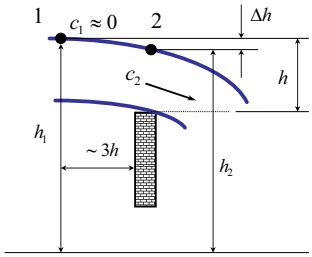
$$dQ = \mu dA \sqrt{2gh} = \mu b dh \sqrt{2gh}$$

$$Q = \mu b \sqrt{2g} \int_{h_1}^{h_2} \sqrt{h}\, dh$$

$$\boxed{Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left(\sqrt{h_2^3} - \sqrt{h_1^3} \right)}$$

Istjecanje preko preljeva





$$Q = \mu b \sqrt{2g} \int_0^h \sqrt{h}\, dh$$

$$\boxed{Q = \frac{2}{3} \mu b h \sqrt{2gh}}$$

$$c_2 = \sqrt{2g\Delta h}$$

$$\Delta h = \frac{c_2^2}{2g}$$

Zadatak 3: preljev

Pribranska hidroelektrana s instaliranim protokom od 500 m^3/s i pregradom visine 30 m, radi sa snagom 112,8 MW pri instaliranom protoku, sa zapornicama podignutim 5 m. Širina brane je 30 m, širina preljevnog polja 10 m i visina preljevnog polja 10 m.
Konsumpciona krivulja na zahvatu zadana je izrazom H_{gv} = Q /20.
Izračunati kolika će biti snaga elektrane ako protok naraste za 100 m^3/s, a zapornice se podignu za 2 m.
Koliko iznosi koeficijent istjecanja kroz preljev μ u navedenom slučaju? Brzina istjecanja preko preljeva i brzina otjecanja vode su jednake. (Uzeti η=1.)

Zadatak 3: rješenje

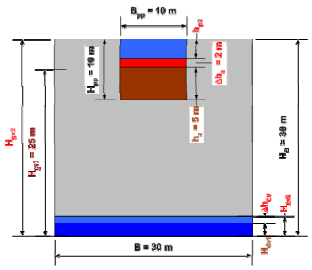
B_{pp} = 10 m, H_{pp} = 10 m, h_z = 5 m, Δh_z = 2 m
H_z = Q/20
$Q_i = Q_1$ =500 m^3/s, ΔQ = 100 m^3/s, H_B = 30 m, B = 30 m

P_2 =, μ = ?

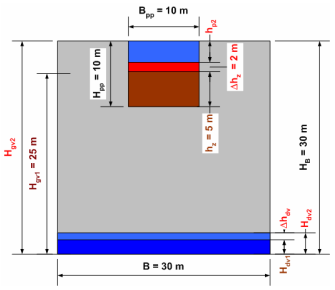
$$P_2 = 9{,}81 \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta$$

Snaga ovisi o protoku kroz turbinu, aktivnoj visini i stupnju djelovanja:

- η = 1 Pretpostavljen stupanj djelovanja.
- Q = Q_i Protok kroz turbinu jednak je protoku ispred pregrade i ograničen na instalirani iznos.
- $H_n = H_{gv} - H_{dv}$



Zadatak 3: rješenje



$$Q = \frac{2}{3} \mu b h \sqrt{2gh} = \frac{2}{3} \mu \cdot 10 \cdot 3 \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \cdot 3} = 100 \qquad \boldsymbol{\mu = 0{,}65}$$

Zadatak 3: rješenje

$H_{n2} = H_{gv2} - H_{dv2}$

$H_{gv2} = H_z(Q_2) = (Q_1 + \Delta Q)/20$ = 30 m (gornji rub brane)

$H_{dv2} = H_{dv1} + \Delta h_{dv}$ (treba odrediti inicijalni nivo donje vode)

$H_{dv1} = H_{gv1} - H_{a1}$

$H_{gv1} = H_z(Q_1)$ = 500/20 = 25 m

$H_{a1} = P_1 / (9{,}81 \cdot Q_1)$ = 23 m

H_{dv1} = 25 – 23 = 2 m

Δh_{dv} = {podignutoj razini na odvodu od ΔQ}

- preko jedn. kontinuiteta i jednakosti brzina vode koja se preljeva i vode na odvodu izlazi (jednakost površina otjecanja):

  $\Delta Q = Q_{p2} = Q_{\Delta hdv}$; $c_{p2} = c_{\Delta hdv} \rightarrow A_{p2} = A_{\Delta hdv}$

  $\rightarrow B_{pp} \cdot h_{p2} = B \cdot \Delta h_{dv}$

  $h_{p2} = H_{pp} - (h_z + \Delta h_{dz})$

  h_{p2} = 10 – (5 + 2) = 3 m

$\Delta h_{dv} = B_{pp} \cdot h_{p2} / B$ = 10·3 / 30 = 1 m

H_{dv2} = 2 + 1 = 3 m

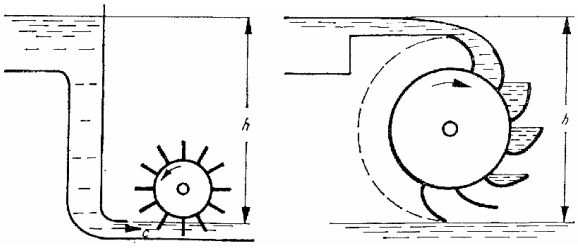
H_{n2} = 30 – 3 = 27 m

P_2 = 9,81·500·27·1 = 132,4 MW

P_2 = 132,4 MW

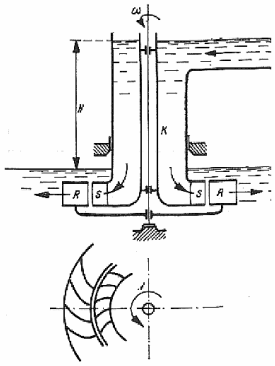
Način pretvorbe EP vode u ME

- iskorištenje kinetičke energije
- iskorištenje potencijalne energije
- iskorištenje energija tlaka



Povijest vodnih turbina

- najjednostavniji pret. sustav je vodenica
- prva vodna turbina u današnjem smislu postavljena je 1837. godine u Francuskoj (Fourneyronova turbina)

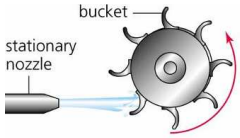


Podjela vodnih turbina

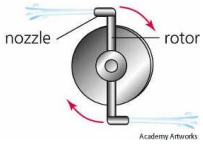
- Pretlačne vodne turbine (reakcijske)
  - Francis (konstruirao Amerikanac Francis 1848. god.)
    - s okomitom osovinom
    - s horizontalnom osovinom
  - Kaplan (konstruirao Čeh Kaplan 1912. god.)
  - propeler (Kaplan turbina s nepomičnim rotorskim lop.)
- Turbine slobodnog mlaza (akcijske)
  - Pelton (konstruirao Amerikanac Pelton 1878. god.)

Turbine: impulsne i reakcione

- Snaga ovisi o: padu, protoku i tlaku
- Impuls – slično vodenom kolu (kotaču)
  - slobodni mlaz
  - udubljene lopatice - okreću se u zraku
  - za velike padove

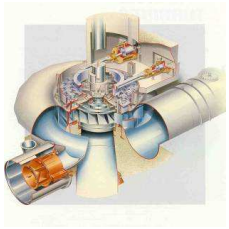


- Reakcija – za velika postrojenja
  - pretlačne
  - lopatice slične elisi broda – potopljene u vodi
  - veliki protok

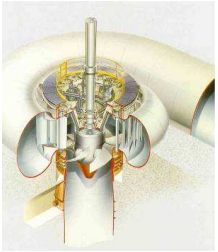


Reakcijske turbine

Francis

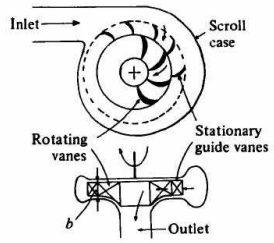


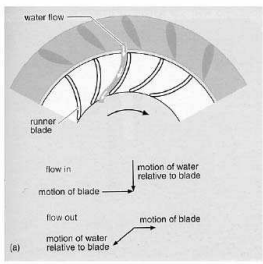
Kaplan



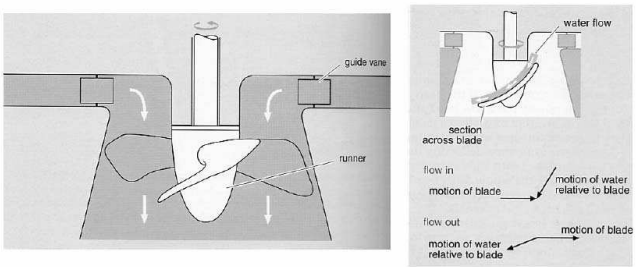
Propeler

Princip rada Francis turbine

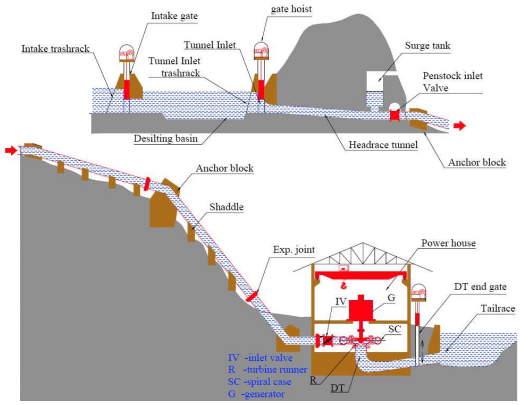




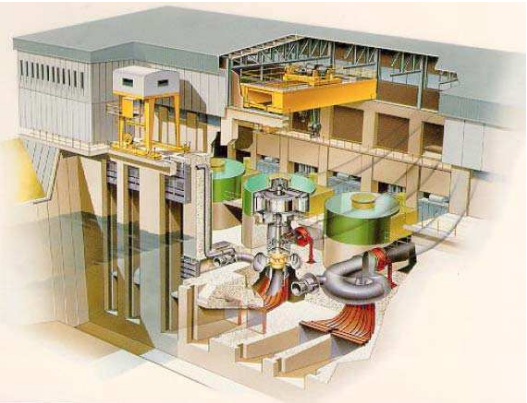
Princip rada Kaplan turbine



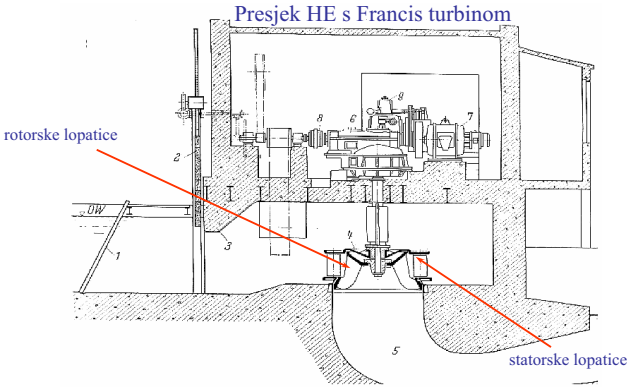
Tipični izgled HE s Francis turbinom



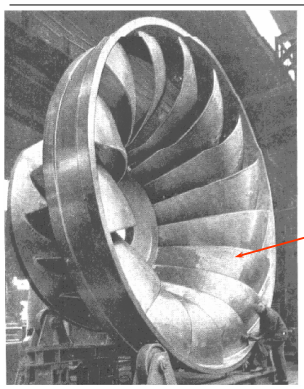
Tipični izgled strojarnice s Francis turbinom



Francis vodna turbina (1)



Francis vodna turbina (2)



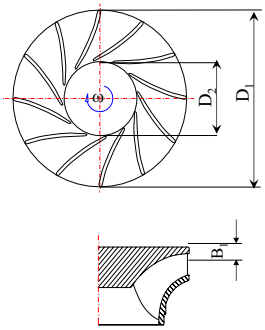
H=15 - 700 m

ω=40 - 500 °/min

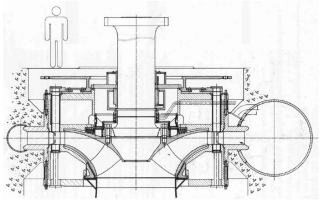
Srednje područje protoka
η do 0,96

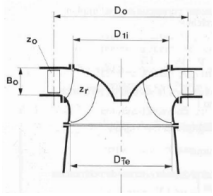
rotor Francis vodne turbine
u usporedbi s veličinom čovjeka

Francis vodna turbina (3)



Francis vodna turbina - izvedba

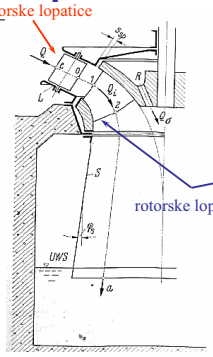




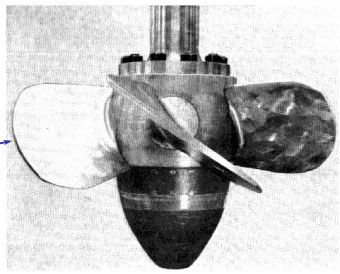
P = 350 MW
H = 543 m
Q* = 71,5 m³/S
D_0 = 4,86 m
D_1 = 4,31m
D_2 = 2,35 m
B_0 = 0,28 m
n = 333 rpm

Kaplan vodna turbina (1)

statorske lopatice



rotorske lopatice



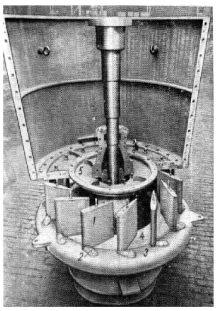
Lopatice Kaplan turbine

$5 < H < 70m$

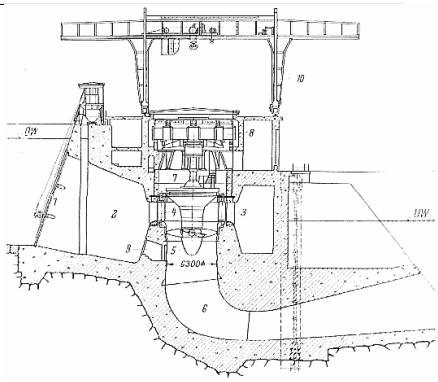
$\omega = 400 - 900\ ^{o}/\min$

Veliki protok
mogućnost reguliranja nagiba lopatica

Kaplan vodna turbina (2)

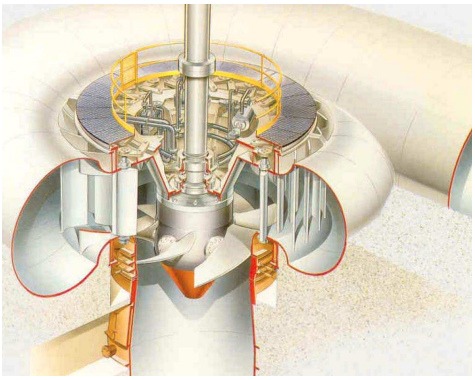


Lopatice statora
Kaplan turbine



Presjek HE s Kaplan turbinom

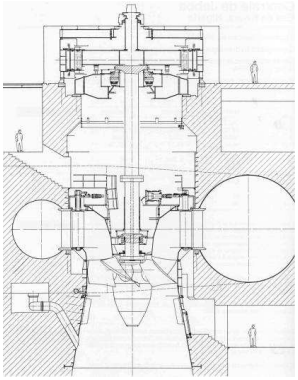
Kaplan vodna turbina (3)



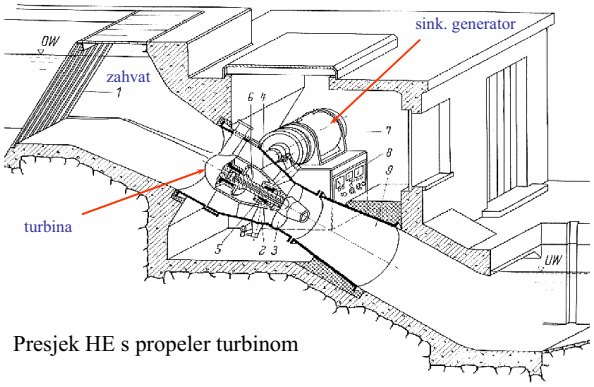
Kaplan vodna turbina - izvedba

D_0 = 8,5 m
D_e = 7,1 m
D_i = 3,1 m
B_0 = 2,8 m

*Q = 376 m³/s
*H = 27,6 m
*P = 96 MW

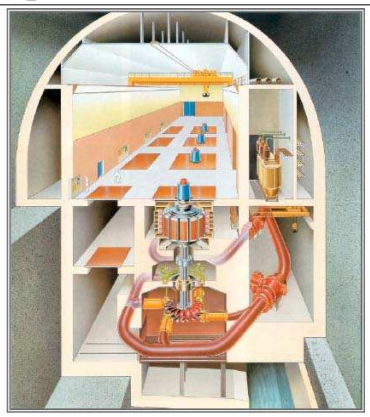


Propeler vodna turbina

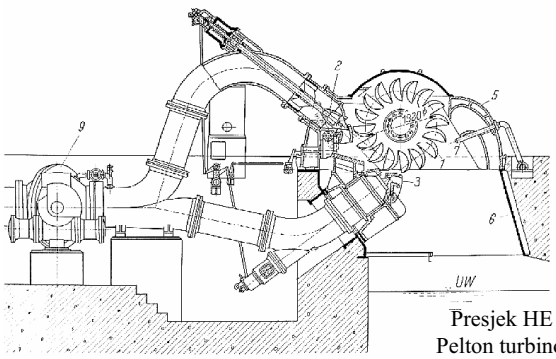


Presjek HE s propeler turbinom

Tipični izgled HE s Pelton turbinom

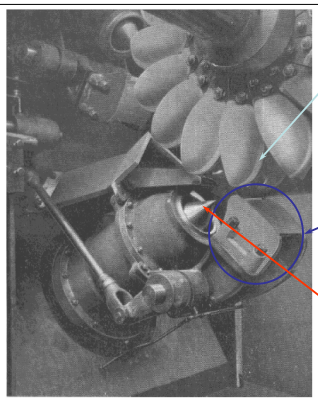


Pelton turbina (1)



Presjek HE s Pelton turbinom

Pelton turbina (2)



lopatica turbine s prorezom za ispuštanje vode

- do 6 mlaznica

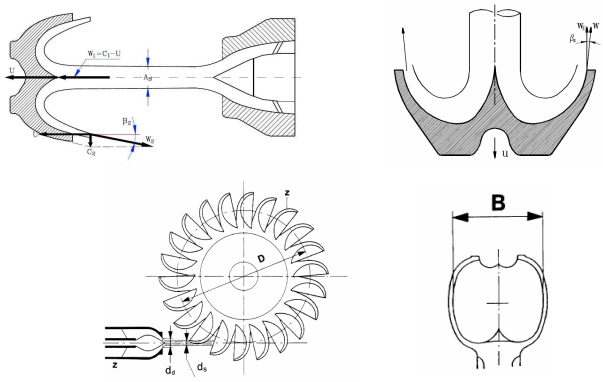
sustav za skretanje mlaza vode

Relativno mali protok

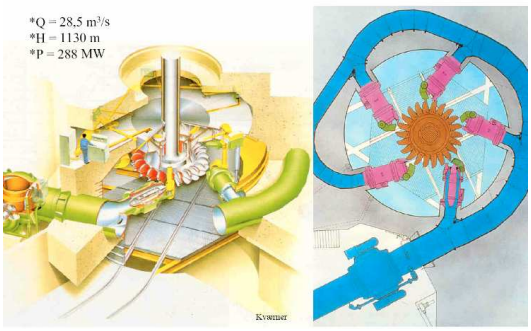
igla mlaznice

H od 100 do 1800 m

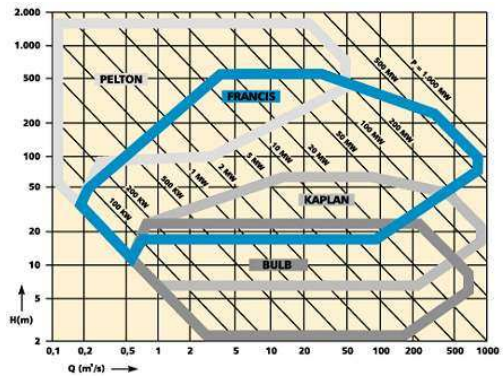
Pelton turbina – princip rada



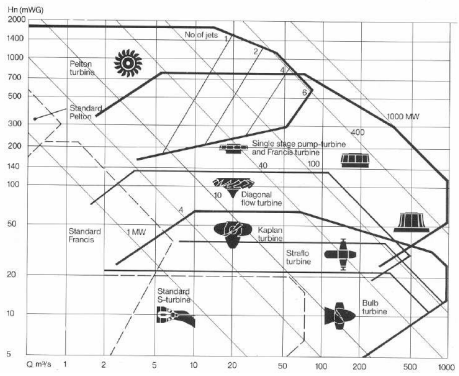
Pelton vodna turbina - izvedba



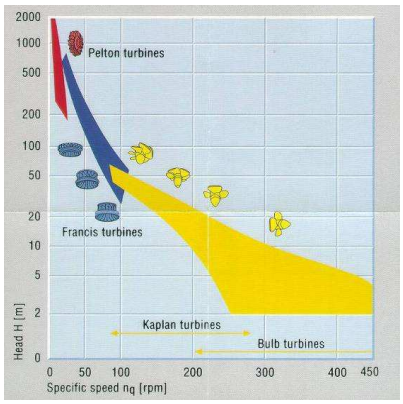
Izbor turbine (prema Voest Alpine)



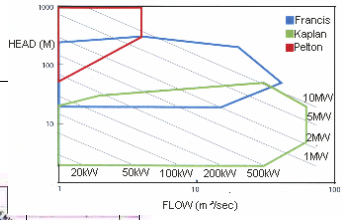
Područje rada turbine – ovisno o tipu

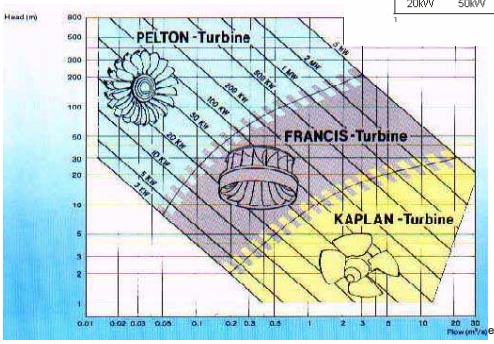


Izbor turbine – pad i specifična brzina



Usporedba turbina

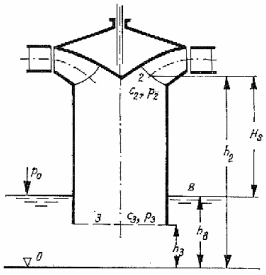




Aspirator (1)

- uređaj na izlazu iz turbine koji omogućava potpuno iskorištenje potencijalne energije vode između izlaza iz turbine i razine donje vode

maksimum limitiran kavitacijom - $H_s \leq 8\ m$



- snaga u presjeku 2

$$P_2 = \frac{p_o}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + gh_2$$

- snaga na razini donje vode

$$P_B = \frac{p_o}{\rho} + gh_B$$

- gubici energije iznose P_2-P_B

$$\Delta P = P_2 - P_B = \frac{c_2^2}{2} + g(h_2 - h_B) = \frac{c_2^2}{2} + gH_S$$

Aspirator (2)

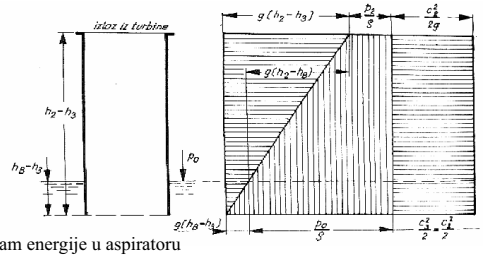
- Specifična snaga na izlazu iz aspiratora

$$c_3 = c_2, \quad P_3 = \frac{p_3}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + gh_3$$

- gubitak energije

$$\Delta P = P_3 - P_B = +\frac{p_3}{\rho} - \frac{p_o}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} - g(h_B - h_3)$$

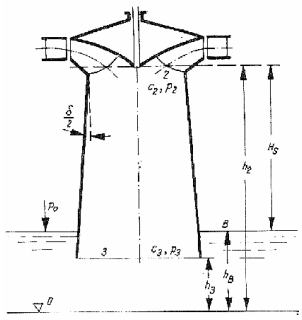
- uz pretpostavku $\frac{p_3}{\rho} + gh_3 = \frac{p_o}{\rho} + gh_B$ gubici iznose $\Delta P = \frac{c_2^2}{2}$



dijagram energije u aspiratoru

Difuzor (1)

- uređaj na izlazu iz turbine koji omogućava potpuno iskorištenje potencijalne energije te smanjenje gubitaka kinetičke energije vode između izlaza iz turbine i razine donje vode



- snaga u presjeku 2

$$P_2 = \frac{p_o}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + gh_2$$

- snaga na razini donje vode

$$P_B = \frac{p_o}{\rho} + gh_B$$

- gubici energije iznose P_2-P_B

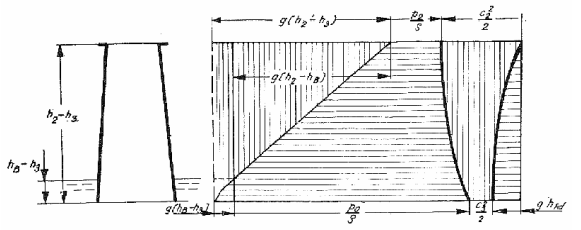
$$\Delta P = P_2 - P_B = \frac{c_2^2}{2} + g(h_2 - h_B) = \frac{c_2^2}{2} + gH_S$$

Difuzor (2)

- Specifična snaga na izlazu iz difuzora
  h_{Rd} uzima u obzir gubitke u difuzoru (zanemarivo u zadacima)
- gubitak energije

$$P_3 = \frac{p_3}{\rho} + \frac{c_3^2}{2} + gh_3 + gh_{Rd} \qquad \Delta P = P_3 - P_B = +\frac{p_3}{\rho} - \frac{p_o}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} - g(h_B - h_3 - h_{Rd})$$

- uz pretpostavku $\frac{p_3}{\rho} + gh_3 = \frac{p_o}{\rho} + gh_B$ gubici iznose $\Delta P = \frac{c_3^2}{2} + gh_{Rd}$



dijagram energija u difuzoru

Zadatak 4: difuzor

Tlačnim se tunelom, sa zahvatom na koti 100 m, iz akumulacijskog jezera dovodi voda do turbine čiji je izlaz na koti 40 m. Razina vode je u jezeru na koti 120 m, a razina donje vode (odvodni kanal) na koti 30 m. Odrediti:

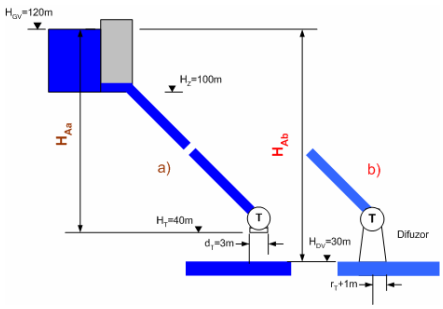
- snagu turbine pri protoku od 100 m³/s u slučaju kada nema difuzora na izlazu iz turbine (promjer izlaznog otvora turbine iznosi 3 m), i
- snagu turbine pri istom protoku, ali kada se postavi difuzor čiji je polumjer izlaznog otvora za 1 m veći od polumjera izlaznog otvora turbine.

Zadatak 4: rješenje

H_{GV} = 120 m n.v., H_z = 100 m n.v., H_T = 40 m n.v.,

H_{DV} = 30 m n.v., Q =100 m³/s, d_T = 3 m, $r_D = r_T$ + 1 m

P_a=?, P_b = ?



Zadatak 4: rješenje (nastavak)

$P = 9{,}81 \cdot \rho\, Q \cdot H_n \cdot \eta$

$H_{na} = H_{Aa} - c_T^2/(2g) = H_{GV} - H_T - c_T^2/(2g) = 69{,}8$ m

$H_{nb} = H_{Ab} - c_D^2/(2g) = H_{GV} - H_{DV} - c_D^2/(2g) = 88{,}7$ m

Brzinu određuje protok i površina:

$c = Q/(d^2\pi/4)$, c_T=14,15 m/s, c_D=5,1 m/s

Stupanj djelovanja nije poznat i ne može se odrediti te je zanemaren.

Pa = 68,47 MW, Pb = 86,99 MW

Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim elektranama

Uvod i fizikalne osnove – I
Energijske tehnologije
FER 2007.

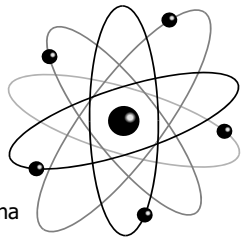
Gdje smo:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
6. **Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.**
7. Energija Sunca
8. Energija vjetra
9. Geotermalna energija
10. Biomasa
11. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
12. Potrošnja električne en.
13. Prijenos i distribucija el. en.
14. Skladištenje energije
15. Utjecaj na okoliš
16. Održivi razvoj i energija

Sadržaj

- Nuklearna fizika
- Građa atoma i jezgre
- Energija veze
- Radioaktivnost
- Fisija/fuzija

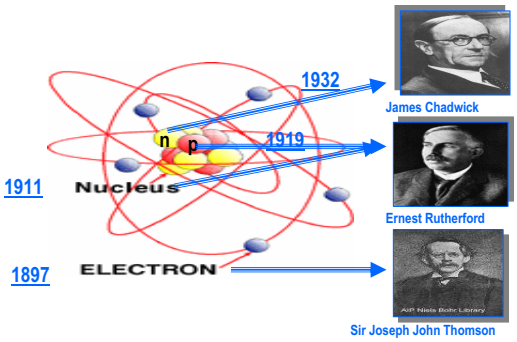
Atom i jezgra



- Nukleoni
  - protoni
  - neutroni
- Elektroni
- Atomski broj (Z) = broj protona
- Atomska masa (A) = broj protona (Z) + broj neutrona (N)
- X = kemijski simbol elementa iz periodnog sustava

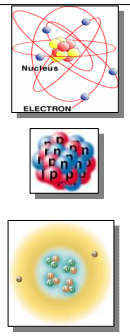
$$^{A}_{Z}X$$

Zbivanja ključna za formiranje sadašnje slike o atomu i jezgri

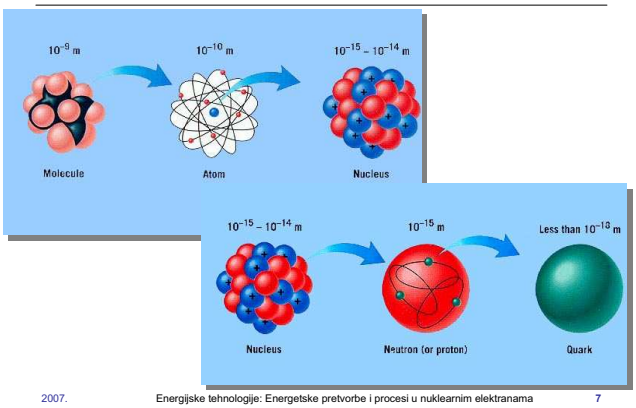


Građa atoma i atomske jezgre

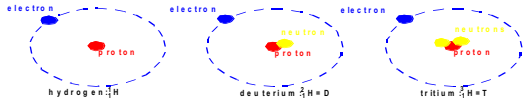
- **Trenutni stav:**
  - Elektroni su u stalnom gibanju u putanjama oko jezgre u formi elektronskog oblaka,
  - Nuklearna jezgra je sastavljena od protona i neutrona,
  - Unutrašnju građu protona i neutrona čine kombinacije čestica koje zovemo quark-ovi .
- Najjednostavnija je jezgra vodika, sastavljena od jednog protona.



Karakteristične dimenzije



Izotopi



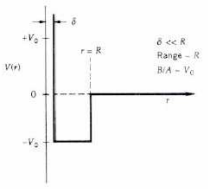
Notation: $^{A}_{Z}Y$

A = *Z* + *N* : atomic mass number
N : number of neutrons
Z : number of nuclear charge (atomic number)
Y : atomic symbol from Periodic Table (Fig.4)

Ukupni električni naboj jezgre = +*Ze*
U neutralnom atomu broj elektrona = broj protona
Naboj protona (+*e*) = +1.60210 * 10^{-19} *C*
Naboj elektrona (-*e*) = -1.60210 * 10^{-19} *C*
Izotopi jednog elementa imaju isti broj protona a različit broj neutrona, kemijska i fizikalna svojstva su im praktično ista.

Nuklearne sile

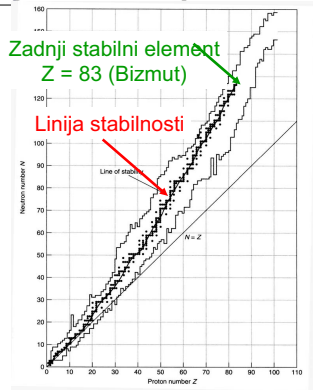
- Drže nukleone u jezgri na okupu
- Kratak domet (red veličine dimenzije nukleona)
- Privlačne i snažne (formiraju jezgru velike gustoće) ne ovise o naboju
- Na vrlo malim udaljenostima pokazuju odbojna svojstva (manje od 0.5 fm)
- Djeluju između parova nukleona
- Pokazuju svojstvo zasićenja
- Ovise o parnosti broja nukleona i protona
- Pokazuju izraziti porast za takozvane magične brojeve (popunjenost energetskih ljuski)
- Karakteristične energije su reda MeV
- Uz pretpostavku konstantne gustoće (10^{17} kg/m^3) veličina jezgre ovisi o broju nukleona



Potencijalna energija neutrona vezanog u jezgri

Stabilnost građe jezgra ovisnost o omjeru broja neutrona i protona

- 3000 poznatih elemenata, 266 stabilnih!
  - Z > 83 nema stabilnih elemenata
- Za male Z, N ≈ Z, za velike Z, N > Z. (potreban veći broj neutrona da kompenzira odbojnu silu protona)
- Posebno su stabilna jezgra s magičnim brojevima nukleona Z, N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 (analogno elektronskim ljuskama)



Granice stabilnosti i radioaktivnost

- Nuklidi s viškom neutrona podložni su beta raspadu (neutron se pretvara u proton i beta česticu).
- Nuklidi s manje neutrona nego što odgovara liniji stabilnosti emitiraju pozitron ili absorbiraju elektron iz omotača (jedan proton se pretvara u neutron).
- β^- i β^+ raspad uobičajeno prate emisije kvanta energije
- Teški nuklidi na vrhu krivulje stabilnosti problem svoje stabilnosti rješavaju emisijom alfa čestice.
- Navedene transformacije jezgre kojima jezgra prelazi u energetski stabilniju konfiguraciju nazivamo radioaktivni raspad ili radioaktivnost.

Zakon radioaktivnog raspada

- Zakon radioaktivnog raspada opisuje kako se mijenja broj radioaktivnih jezgara N u vremenu.
- Brzina promjene broja radioaktivnih jezgara, dN/dt, se zove aktivnost radioaktivnog izotopa i proporcionalna je trenutnom broju jezgara. Konstanta proporcionalnosti, λ, se zove konstanta radioaktivnog raspada

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \qquad \boxed{N = N_0\ e^{-\lambda t}}$$

$$\int_{No}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \qquad R = \left|\frac{dN}{dt}\right| = N_0 \lambda e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t}$$

$$\ln\left(\frac{N}{No}\right) = -\lambda t \qquad \boxed{t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2}$$

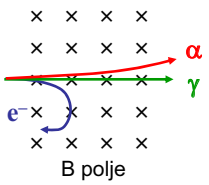
- Vrijeme za koje se početni broj jezgara smanji na pola zove se vrijeme poluraspada $t_{1/2}$ ili poluvrijeme raspada (50% početnog).
  $\tau = 1/\lambda$ = vrijeme života (37% početnog)

Radioaktivnost: mjerne jedinice

- Aktivnost: Becquerel (Bq) = 1 raspad / s
  1 curie (Ci) = 3.7×10^{10} raspada / s (Bq)
  (brzina dezintegracije 1g radija)
- Ekspozicijska doza: broj ionskih parova proizvedenih prolazom zračenja
  Roentgen = 2.6×10^{-4} C/ kg_{air} (0.0084 j/kg)
- Energetska doza ([Gy],[Sv]): rad = 0.01 j/kg ([Gy],[Sv])
  - Energija zračenja aborbirana po jedinici mase tvari
    Biološka doza = doza × faktor kvalitete (α = 10, β,γ = 1)
- Iznosi: 0.5 rem / god = prirodno zračenje okoline
  5 rem / god = granična doza za zaposlene u NE
  500 rem = 50% smrtnosti unutar mjesec dana
  750 rem = fatalna doza (5000 rem = smrt unutar tjedan dana)

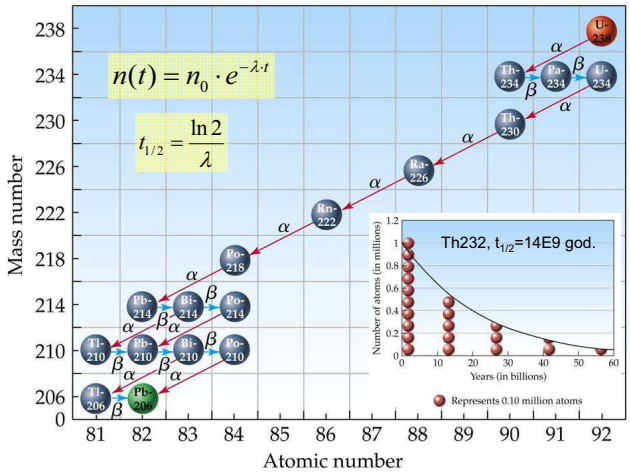
Tip zračenja: α, β, γ

Tip zračenja	Naboj/Masa	Prodornost
alfa α = jezgro He (2p + 2n)	$+2q/4m_p$	list papira
beta β = elektron ili pozitron	$-q/m_e$ ili $+q/m_e$	mm metala
gama γ = visokoenergetski kvant	bez naboja	cm Pb



Radioaktivni nizovi u prirodi

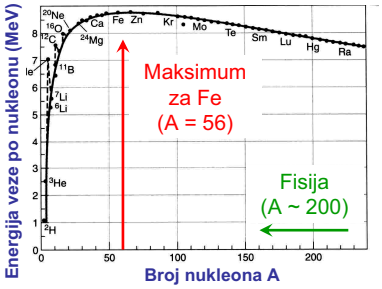
- Uran ($^{238}_{92}U$ i $^{235}_{92}U$) i Torij ($^{232}_{90}Th$)
  - postoje u prirodi ($t_{1/2}$ = 4,5*10⁹, 0,7*10⁹ i 14*10⁹ god.)
  - završavaju olovom (^{206}, ^{207} i $^{208}_{82}Pb$ respektivno)
- Neptunij ($^{237}_{93}Np$)
  - ne postoji u prirodi ($t_{1/2}$ = 2,1*10⁶)
  - završavaja bizmutom ($^{209}_{83}Bi$)
- Postoji i nekoliko drugih: $^{14}_{6}C$ i $^{40}_{19}K$



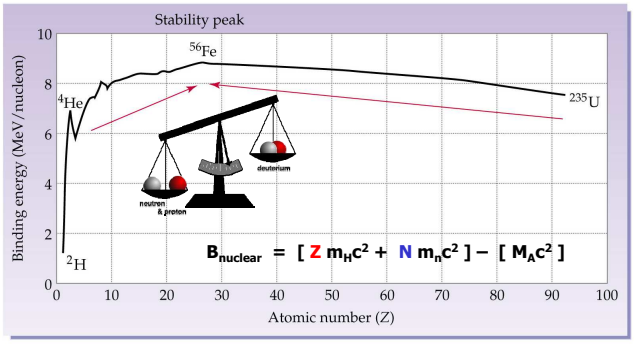
Energija vezanja

- Energija vezanja je energetski ekvivalent defekta mase (razlika mase jezgre i ukupne mase pojedinačnih nukleona). Nuklidi s velikom energijom vezanja su stabilni. $B_{nuclear} = [\, Z\, m_H c^2 + N\, m_n c^2 \,] - [\, M_A c^2 \,]$
  m_H = 1.007825 ajm i m_n = 1.008665 ajm (atomska jedinica mase)

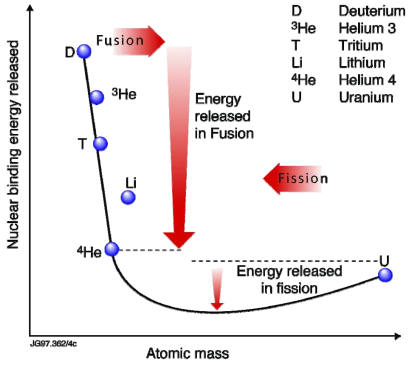
- Energija vezanja se oslobađa kad se formira jezgra. Istu količinu energije je potrebno uložiti da se jezgra rastavi na sastavne dijelove.
- Energija vezanja po nukleonu ima maksimum za A = 56 (~8 MeV/nukleonu).
- Sve reakcije koje vode nastanku nuklida s većom energijom veze od polaznih nuklida oslobađaju energiju.



Energija veze po nukleonu



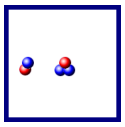
Oslobađanje energije vezanja - fisija/fuzija



Energija iz atomske jezgre

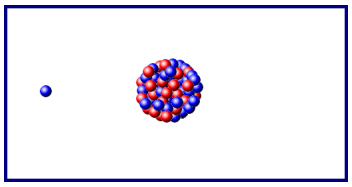
Fuzija

Spajanje manjih jezgri u veću

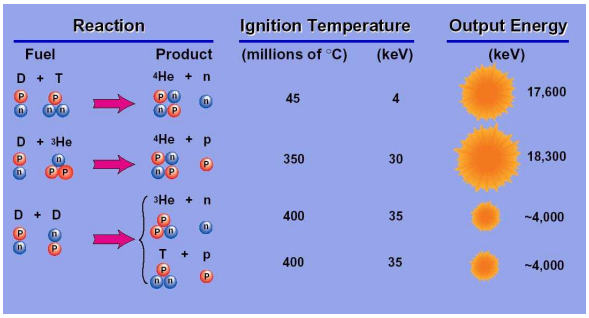


Fisija

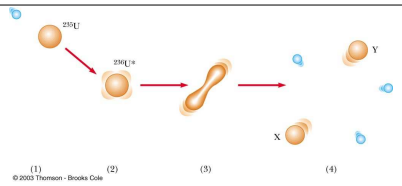
Raspad teških jezgri na lakše



Fuzijske reakcije



Sekvenca događaja tijekom fisije

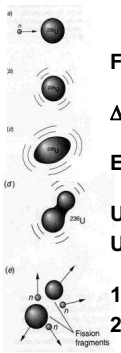


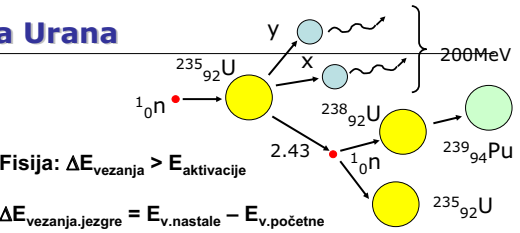
- Jezgra ^{235}U uhvati neutron
- Formira se složena jezgra $^{236}U^*$, koja raspolaže viškom energije (energija veze + kinetička energija neutrona) i počinje oscilirati i mijenjati oblik
- Za velika izobličenja jezgre $^{236}U^*$ privlačne nuklearne sile slabe i prevladavaju odbojne sile među protonima
- Jezgra se cijepa na dva dijela uz emisiju 2 do 3 neutrona i oslobađanje energije (proces fisije traje oko 1e-12 s)

Energija oslobođena u procesu fisije

- Energija veze za inicijalnu tešku jezgru je oko 7.2 MeV po nukleonu
- Energija veze za novonastale jezgre (fisijski fragmenti) je oko 8.2 MeV po nukleonu
- Fisijski fragmenti imaju manju masu mirovanja nego početna jezgra, smanjenje mase po nukleonu rezultira u oslobađanju energije tijekom fisije
- Procjena oslobođene energije za U-235
  - 235 nukleona
  - Oslobađa se oko 1 MeV energije po nukleonu (8.2 MeV – 7.2 MeV)
  - Ukupna oslobođena energija je oko 235 MeV
  - 85% navedene energije je kinetička energija fisijskih fragmenata
- Napomena: red veličine energije oslobođene pri kemijskim procesima je desetak eV

Fisija Urana





Fisija: $\Delta E_{vezanja} > E_{aktivacije}$

$\Delta E_{vezanja.jezgre} = E_{v.nastale} - E_{v.početne}$

$E_{aktivacije}$ = potrebna energija za fisiju

U235 – fisibilan

U238 – fisibilan s pragom

1 eV = 1,60219E-19 J

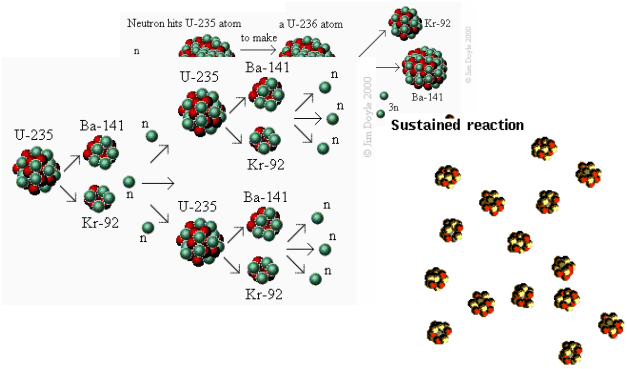
200 Mev = 3,204E-11 J

Energija iz fisije	
Kinetička fragmenata	83.5%
Trenutne γ-zrake	2.5%
Kinetička neutrona	2.5%
β-raspad fragmenata	3.5%
γ zrake fragmenata	3.0%
Energija neutrina	5.0%

Fisijski, fisibilni i oplodni nuklearni materijali

- Fisijski materijal – fisija je moguća neutronima bilo koje energije (U-233, U-235, Pu-239, Pu-241)
- Fisibilni materijal – fisija neutronima je moguća ali može ovisiti o energiji neutrona (energija aktivacije), (U-238, Pu-241 + svi fisijski nuklearni materijali)
- Oplodni materijal – materijal koji uhvatom neutrona prelazi u neki od fisijskih materijala, (Th-232, U-238)

Fisija urana i lančana reakcija



Lančana reakcija

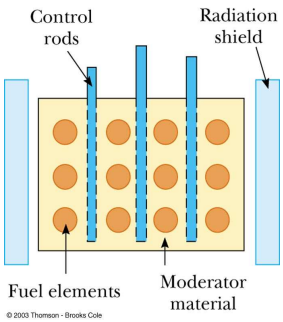
- Slobodnih neutrona nema u prirodi (neutron van jezgre se raspada s vremenom poluraspada od oko 12 min) pa su neutroni nastali pri fisiji od velikog značaja za energetsku primjenu fisije
- 1942: Fermi prva samoodržavajuća nuklearna lančana reakcija.
- Ovisno o uvjetima multiplikacije neutrona njihov broj može rasti ili padati
- Nekontrolirani porast rezultira nuklearnom eksplozijom ali samo ako je koncentracija jezgara urana U-235 dovoljno velika

Nuklearni reaktor

- Nuklearni reaktor je sustav projektiran da omogući kontroliranu samoodržavajuću nuklearnu reakciju fisije
- Parametar koji opisuje tijek odvijanja procesa naziva se multiplikacijski faktor k.
- Definiran je kao omjer srednjeg broja neutrona u dvije susjedne generacije neutrona (prije i poslije fisije)
- Da bi se nuklearna reakcija mogla nadzirati njegova vrijednost ne smije biti puno veća od 1
- Reaktor koji ima k=1 zovemo kritičnim reaktorom i on održava konstantan broj neutrona i snagu proizvedenu fisijom
- Ako je k<1 broj neutrona i snaga reaktora će se s vremenom smanjivati i reaktor zovemo podkritičnim a ako je k>1 broj neutrona u reaktoru i snaga reaktora će se povećavati i reaktor zovemo nadkritičnim
- Kako je k u praksi vrlo blizu 1 uvedena je veličina koja se naziva reaktivnost i definirana je kao $\rho=(k-1)/k$ i predstavlja relativno odstupanje reaktora od kritičnog stanja

Osnovni izgled reaktora

- Nuklearno gorivo je organizirano u gorivne elemente
- Moderator je materijal koji ima sposobnost usporavanja neutrona
- Rashladno sredstvo odvodi toplinu iz reaktora
- Posebni kontrolni elementi napravljeni od materijala koji absorbiraju neutrone služe za nadzor broja neutrona raspoloživih za fisiju
- Nuklearno gorivo, moderator, rashladno sredstvo i kontrolni element čine jezgru reaktora
- Jezgra je okružena štitom od zračenja



Zadatak 1

- Odredite ogrjevnu moć antracita u MJ/kg ako je poznato da se izgaranjem atoma ugljika oslobađa 4.79 eV energije. Pretpostaviti da je težinski udjel ugljika u antracitu 0.98 i da izgori kompletan ugljik. Na isti način odredite ogrjevnu moć 1 kg prirodnog urana (99.282% U-238, 0.712% U-235, 0.006% U-234) i 1 kg 3% obogaćenog UO_2 goriva.
- Pretpostaviti da se fisijom jezgra U-235 oslobodi 200 MeV energije.

Zadatak 1: rješenje

a) Broj jezgara ugljika u 1 kg antracita

N_C=0.98 m N_A/A_C = 0.98 1 kg 6.022 10^{26}/12 = 4.918 10^{25} atoma C
4.79 eV 1.6 10^{-19} J/eV N_C = 37.74 MJ/kg

b) Broj jezgara U-235 u 1 kg prirodnog urana

$$N_{235} = a_{235} m \frac{N_A}{a_{234}A_{234} + a_{235}A_{235} + a_{238}A_{238}}$$

N_{235}=0.00712 1 6.022 10^{26}/(0.00006 234 + 0.00712 235 * 0.9982 238) = 1.792 10^{22}

200 MeV 1.6 10^{-13} J/MeV N_{235} = 57.4 10^4 MJ/kg

c) Broj jezgara U-235 u 1 kg 3% obogaćenog UO_2
Obogaćenje e = m_{U235}/m_U 100%
A_U^{-1}= 0.03/235 + 0.97/238 = 237.91 atomska masa uran metala

A_{UO2} = 237.91 + 32 = 269.91

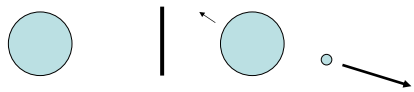
Težinski udjel urana u UO_2 je w_U = 237.91/269.91 = 0.8814

N_{235} = e w_U m_{UO2} N_A/A_{235} = 0.03 0.8814 1 6.022 10^{26}/235 = 6.776 10^{22}

200 MeV 1.6 10^{-13} J/MeV N_{235} = 2.17 10^6 MJ/kg

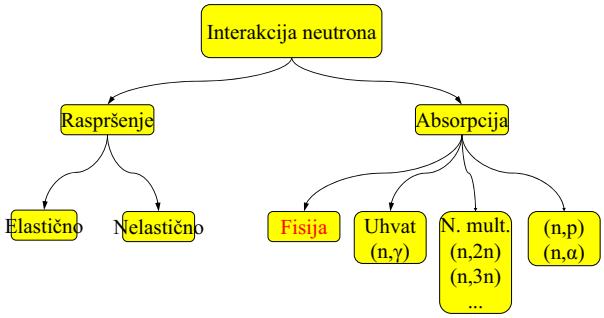
Dva tipa nuklearnih reakcija

Radioaktivni raspad – jezgra se spontano raspada emitirajući česticu/kvant energije (α, β, γ-raspad)



Sudar neutrona i jezgre – raspršenje ili absorpcija

Interakcija neutrona s materijom



Način zapisivanja nuklearne reakcije

$$a + b \rightarrow c + d \qquad a(b,c)d$$

$${}_0^1n + {}_{92}^{235}U \rightarrow {}_{92}^{236}U + \gamma$$

$${}_{92}^{235}U(n,\gamma){}_{92}^{236}U$$

Projektil, meta, rezultirajuća jegra, emitirana čestica

Energetski prinos nuklearne reakcije

$$E = mc^2$$

$$Q = \left[\left(M_a + M_b\right) - \left(M_c + M_d\right)\right]c^2$$

$$Q > 0 \quad \text{exothermic}$$

$$Q < 0 \quad \text{endothermic}$$

Najvažnije reakcije s neutronima

Nuklearna fisija *(n,fis)*

$${}_0^1n + {}_Z^AX \rightarrow {}_{Z_1}^{A_1}X + {}_{Z_2}^{A_2}X + neutrons + 200\,MeV$$

Radijativni uhvat *(n,γ)*

$${}_0^1n + {}_Z^AX \rightarrow \left({}_Z^{A+1}X\right)^* \rightarrow {}_Z^{A+1}X + \gamma$$

Raspršenje *(n,n) or (n,n')*

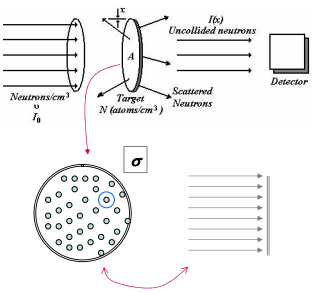
$${}_0^1n + {}_Z^AX \rightarrow {}_0^1n + {}_Z^AX \quad \text{elastic scattering (n,n)}$$

$${}_0^1n + {}_Z^AX \rightarrow {}_0^1n + \left({}_Z^AX\right)^* \rightarrow {}_0^1n + {}_Z^AX + \gamma$$

inelastic scattering (n,n')

Mikroskopski udarni presjek za nuklearnu reakciju

Predstavlja vjerojatnost da dođe do nuklearne reakcije



Ovisi o čestici koja izaziva reakciju i njenoj energiji, tipu reakcije i materijalu mete. Ima dimenziju površine (cm^2, m^2, barn=1.e-24 cm^2). Za velike energije se približava površini presjeka projekcije jezgre i projektila ali je kvantnomehanička veličina. Oznaka: σ:

$$\sigma = \frac{reaction/s\ nucleus}{neutrons/cm^2 s} = \frac{reaction\ cross\ section\ \ (cm^2)}{neutron\ nucleus}$$

Gustoća reakcija

$$R = \sigma \quad I \quad N_A$$

$$\left[\frac{\#}{cm^2 s}\right] \quad \left[cm^2\right]\left[\frac{\#}{cm^2 s}\right]\left[\frac{\#}{cm^2}\right]$$

Broj sudara u jedinici vremena po jedinici površine proporcionalan je intenzitetu neutrona u snopu i plošnoj gustoći jezgara mete – konstanta proporcionalnosti zove se neutronski mikroskopski udarni presjek

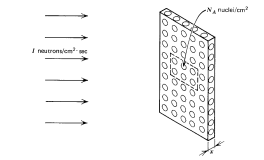


FIGURE 2-1. A monoenergetic neutron beam incident normally upon a thin target.

Ukupni mikroskopski udarni presjek

- **Ukupni udarni presjek je suma presjeka za pojedine reakcije (parcijalni udarni presjeci):**
  - **elastično + neelastično raspršenje, uhvat + fisija, emisija nabijene čestice, emisija neutrona**

$$\sigma_t(E) = \begin{cases} \sigma_s(E) & \text{elastic scattering} \\ +\sigma_{in}(E) & \text{inelastic scattering} \end{cases} \Bigg\} = \sigma_S(E) \quad \text{scattering}$$
$$\begin{cases} +\sigma_c(E) & \text{capture} \\ +\sigma_f(E) & \text{fission} \end{cases} \Bigg\} = \sigma_a(E) \quad \text{absorption}$$
$$+\sigma_{n,2n}(E) \quad (n,2n)\ \text{reaction}$$

Intenzitet neutronske struje *I(x)*

Smanjenje intenziteta snopa po jedinici dužine jednako je broju reakcija s materijalom mete. Broj neutrona u snopu se smanjuje po eksponencijalnom zakonu.

$$\frac{dI(x)}{dx} = -N\sigma_t I(x)$$

$$I(x) = I_0 e^{-N\sigma_t x}$$

Produkt mikroskopskog udarnog presjeka i gustoće jezgara mete zove makroskopski udarni presjek.

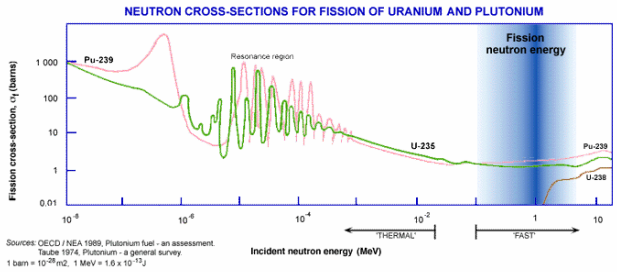
$$\Sigma_t \equiv N \quad \sigma_t$$

$$[cm^{-1}] = [\#/cm^3][cm^2]$$

Udarni presjek za fisiju

Udarni presjek ovisi o energiji i uglavnom se smanjuje s porastom energije neutrona

Veća je vjerojatnost izazivanja fisije sporim neutronima



Snaga nuklearnog reaktora

- Ovisi o broju fisija u jedinici vremena i o energetskom prinosu fisije
- Broj fisija u jedinici volumena i jedinici vremena jednak je produktu neutronskog toka i makroskopskog udarnog presjeka za fisiju
- Neutronski tok Φ je broj neutrona koji u jedinici vremena prođe kroz jediničnu površinu u reaktoru (skalarna je veličina)
- Makroskopski udarni presjek je produkt gustoća jezgara fisibilnog materijala i mikroskopskog presjeka za fisiju

$\nu \approx 2.5$ n/fiss

$\varepsilon_f \approx 200$ MeV/fiss

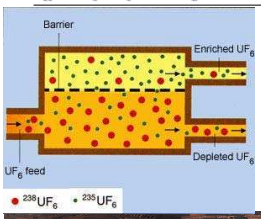
MeV = 1.602×10^{-13} J

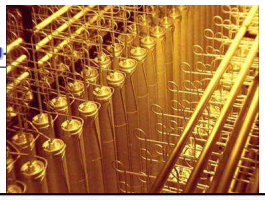
$P_{thermal} = N_{fission} \bullet \varepsilon_f = \Phi \bullet \Sigma_{fission} \bullet V \bullet \varepsilon_f$

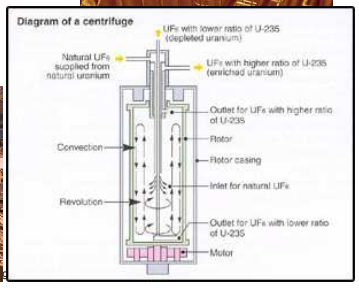
[W] = [#fiss/s] • [MeV/fiss] • [J/MeV]

Obogaćivanje urana

(postupak povećanja težinskog udjela U-







Zadatak 2

- SNAP (Systems for Nuclear Auxilliary Power) generator koristi kao toplinski izvor reakciju $_{94}Pu^{238} \rightarrow {}_{92}U^{234} + {}_{2}He^{4}$. Inicijalno punjenje sadrži 475 g $Pu^{238}C$. Gustoća PuC je 12.5 g/cm^3. Vrijeme poluraspada za $_{94}Pu^{238}$ je 86 godina a za $_{92}U^{234}$ je 2.47 10^5 godina. Atomske mase su za Pu^{238} 238.0496 ajm, $_{92}U^{234}$ 234.0409 ajm, $_{2}He^{4}$ 4.0026 ajm i C^{12} 12.01 ajm.
- Odrediti početnu volumnu gustoću toplinske snage i ukupnu toplinsku snagu izvora.

Zadatak 2: rješenje

Odrediti snagu i volumnu gustoću snage termoionskog generatora u kojem kao izvor topline služi alfa emiter:

$$Pu^{238} \rightarrow U^{234} + He^{4}$$

Odrediti energetski prinos reakcije alfa raspada
Defekt mase u reakciji alfa raspada Pu

$$\Delta m = 238.0496 - 234.0409 - 4.0026 = 6.1 \cdot 10^{-3}\ ajm$$

Energetski ekvivalent defekta mase od 1 ajm je 931.49 MeV

$$\Delta E = 6.1 \cdot 10^{-3} \cdot 931.49\ MeV = 5.6821\ MeV$$

Konstanta radioaktivnog raspada

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{\ln 2}{86 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 2.55576 \cdot 10^{-10}\ s^{-1}$$

Broj jezgara izotopa po jedinici volumena

$$N = \rho \frac{N_A}{A_{PuC}} = 12.5 \cdot \frac{6.022 \cdot 10^{23}}{250.0596} = 3.01 \cdot 10^{22}\ \frac{atom}{cm^3}$$

Atomska masa PuC

$$A_{PuC} = 238.0496 + 12.01 = 250.0596$$

Zadatak 2: rješenje

Aktivnost izotopa

$$A = \lambda N$$

$$N\lambda = 7.694 \cdot 10^{12}\ \frac{raspad}{s\ cm^3}$$

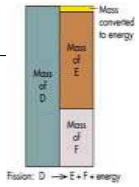
Volumna gustoća snage

$$q''' = A \cdot \Delta E = 6.995 \frac{W}{cm^3}$$

Ukupna snaga izvora

$$Q = q''' \frac{475}{12.5} = 265.81 W$$

Fisijski produkti



$$^{1}_{0}n + ^{235}_{92}U \rightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{140}_{54}Xe + 2\,^{1}_{0}n$$

$$\rightarrow ^{139}_{56}Ba + ^{94}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{1}_{0}n(>1Mev) + ^{238}_{92}U \rightarrow fisioni \cdot produkti, neutroni$$

$$^{1}_{0}n + ^{238}_{92}U \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow[t_{1/2}=24\min]{\beta^-} ^{239}_{93}Np \xrightarrow[t_{1/2}=2,4dana]{\beta^-} ^{239}_{94}Pu$$

$$^{1}_{0}n + ^{239}_{94}Pu \rightarrow ^{240}_{94}Pu \searrow$$

Fisioni produkti i neutroni

Manje od 1% neutrona je zakašnjelo, raspad fisijskih produkata (konstante radioaktivnog raspada do par sekundi).

Ostatna toplina

- Fisijom nastaju nova jezgra – fisijski fragmenti (u konačnici ih zovemo fisijski produkti)
- Postoji stotinjak načina na koji se teška jezgra može cijepati
- Novonastala jezgra su beta i gama radioaktivna jer imaju višak neutrona obzirom na broj protona Z
- Približno 180 MeV energije se oslobodi neposredno pri fisiji a oko 20 MeV je posljedica radioaktivnog raspada fisijskih produkata
- Brzina osobađanja te zakašnjele energije ovisi o konstantama radioaktivnog raspada
- Radioaktivnost fisijskih produkata i pripadajuća toplina osnovni su sigurnosni problem u reaktoru
- Zaustavljanjem lančane reakcije ovaj izvor ne nestaje
- Neposredno nakon obustave ostatna toplina iznosi približno 6% nominalne snage na kojoj je reaktor radio
- Zbog velikog broja fisijskih produkata iznos ostatne topline uzimamo u obzir aproksimativnim relacijama

Ostatna toplina - izvor

^{80}Br fisijski produkt, energetski prinos

β⁻ raspad: $^{80}Br \rightarrow ^{80}Kr + e^- + \underline{\nu}_e$

$Q(\beta^-) = M(^{80}Br)c^2 - M(^{80}Kr)c^2$

$= 79.918528\ uc^2 - 79.916377\ uc^2$

$Q(\beta^-)$ $= (0.002151\ uc^2)$ **(931.5 MeV/uc²)** $=$ **2.00 MeV**

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z+1}D + e^- + \bar{\nu}$$

$$Q\ (MeV) = \left[Mass\left(^{A}_{Z}X\right) - Mass\left(^{A}_{Z+1}D\right) \right] c^2$$

*electron mass included in daughter nucleus

Ostatna toplina

Generirana snaga nakon obustave reaktora:

- **ostatna toplina posljedica je radioaktivnog raspada fisijskih produkata**

P_0 – snaga reaktora prije obustave
t_0 – vrijeme rada reaktora
t – vrijeme rada i obustave ($t-t_0$ je vrijeme nakon obustave)

Napomena: vremena su izražena u danima

$$P = P_0 \cdot 0{,}0061 \cdot \left[(t - t_0)^{-0,2} - t^{-0,2} \right]$$

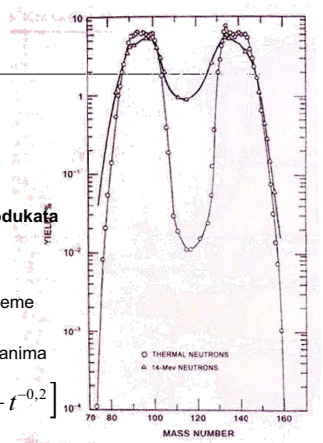


Fig. 1.9 Yield versus mass number for ^{235}U fission. (From Ref. 15.)

Zadatak 3

- Jezgra nuklearnog reaktora sastavljena je od 193 gorivna elementa, svaki s 517.4 kg UO_2 goriva. Prosječno težinsko obogaćenje je 2.78% U-235. Srednji neutronski tok u jezgri reaktora je 2.327 10^{17} n/(m^{2}s) na punoj snazi. Reaktor je radio 6 mjeseci na 95% pune snage. Izračunati koliki je porast temperature hladioca u jezgri reaktora treći dan nakon obustave, ako je maseni protok sustava za odvođenje ostatne topline (RHR) 163 kg/s. Udarni presjek za fisiju u U-235 je σ_f=582 10^{-28} m^2, energija oslobođena pri fisiji je 200 MeV, a specifični toplinski kapacitet hladioca c_p=4.2 kJ/kgK.

Zadatak 3: rješenje

Ukupna masa UO_2

$$m = 193\,FA \cdot 517.4\,\frac{kg}{FA} = 99858.2\,kg\,UO_2$$

Toplinska snaga nuklearnog reaktora

N – broj jezgara U-235,

σ_f – mikroskopski udarni presjek za fisiju

Φ – neutronski tok

$$P = 200 \cdot 1.6 \cdot 10^{-13} N \cdot \sigma_f \cdot \phi$$

e – obogaćenje goriva (težinski udjel U.235 u ukupnom uranu)

N_A – Avogadrov broj

$$N = e\,m\,\frac{238}{270} \cdot \frac{N_A}{235} = 0.0278 \cdot 99858.2 \cdot \frac{238}{270} \cdot \frac{6.022 \cdot 10^{26}}{235} = 6.27 \cdot 10^{27}$$

Zadatak 3: rješenje

$$P = 3.2 \cdot 10^{-11} \cdot 6.27 \cdot 10^{27} \cdot 582 \cdot 10^{-28} \cdot 2.327 \cdot 10^{17} = 2717.59\,MW$$

$$P_0 = 2717.59 \cdot 0.95 = 2581.71\,MW$$

$$\frac{P(\tau)}{P_0} = 6.1 \cdot 10^{-3}\left[(183-180)^{-0.2} - 183^{-0.2}\right] = 0.00274$$

$\dot{m}$ - maseni protok rashladnog sredstva,

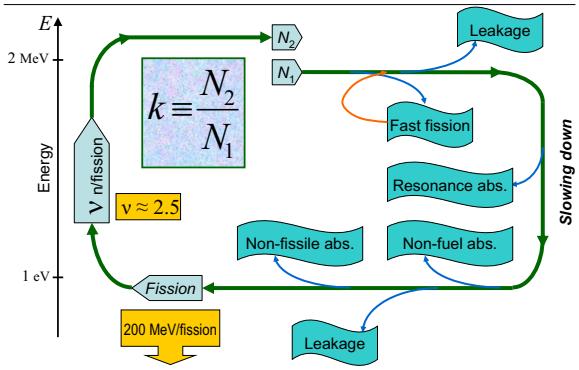
c_p – specifični toplinski kapacitet vode

ΔT – porast temperature rashladnog sredstva

$$P(\tau) = 7.806\,MW = \dot{m}\,c_p \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{7.086 \cdot 10^6}{4.2 \cdot 10^3 \cdot 163} = 10.35\,K$$

Ciklus neutrona u reaktoru



Ciklus neutrona u reaktoru

- Ciklus neutrona počinje fisijom a završava proizvodnjom iduće generacije neutrona
- Omjer broja neutrona u dvije susjedne generacije je faktor multiplikacije
- Neutron u reaktoru može biti absorbiran, izazvati fisiju ili pobjeći van granica reaktora
- Neutron nastaje kao brzi neutron (energija oko 1 MeV) i treba ga usporiti jer se time povećava vjerojatnost fisije
- Najveći broj fisija u termičkim reaktorima izazivaju termički (spori) neutroni energije od 0.0253 eV do 0.625 eV
- Proces snižavanja energije događa se tijekom elastičnih sudara neutrona i materijala koji se zove moderator

Ciklus neutrona u reaktoru

- Neutroni su unutar reaktora podvrgnuti procesu difuzije (struje od mjesta veće gustoće prema mjestu niže gustoće)
- Za kritičnost reaktora bitne su dvije vrste neutrona
- Promptni neutroni nastaju direktno pri fisiji
- Zakašnjeli neutroni su rezultat raspada fisijskih produkata
- Udjel zakašnjelih neutrona u ukupnom broju neutrona je od 0.22% do 0.65% (ovisi o fisibilnom izotopu)
- Najveći broj zakašnjelih neutrona se pojavi unutar 70 s nakon procesa fisije
- Zakašnjeli neutroni su bitni za kontrolu reaktora

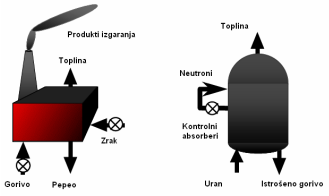
Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim elektranama

Tipovi Nuklearnih elektrana – II
Energijske tehnologije
FER 2007.

Sadržaj

- Podjela nuklearnih elektrana
- PWR elektrane
- BWR elektrane
- Teškovodni reaktori
- Brzi reaktori
- Sigurnost nuklearnih elektrana
- Dodatak: Fuzijski uređaji

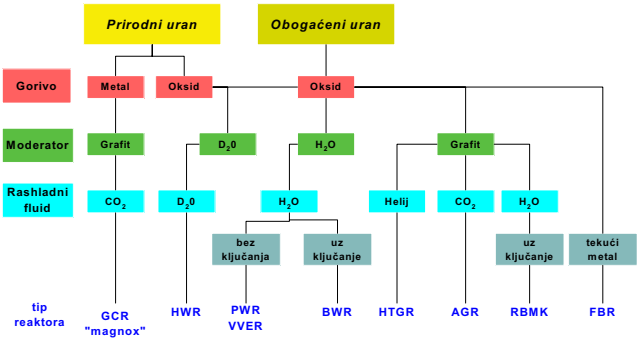
Usporedba klasične i nuklearne termoelektrane



Tipovi reaktora

- **Reaktori se mogu podijeliti:**
  - **prema tipu goriva**
  - **korištenom hladiocu (rashladnom sredstvu)**
  - **potrebi za usporavanje neutrona**
    - **brzi reaktori**
    - **termički reaktori (tip moderatora)**
  - **namjeni reaktora**
    - **istraživački reaktori,**
    - **proizvodnja električne energije i/ili topline,**
    - **proizvodnja nuklearnog materijala**
    - **proizvodnja vodika**
    - **desalinizacija**
- **Da se osigura lančana reakcija potrebno je:**
  - **imati odgovarajuću količinu goriva**
  - **ograničiti apsorpciju neutrona**
  - **ograničiti bijeg neutrona (kritične dimenzije reaktora i reflektor)**

Kriteriji za podjelu NE



Gorivo

- U-235 gorivo - obogaćenje:
  - prirodni uran: 0.7% U-235, 99.3% U-238
  - obogaćeni U-235 (do 5% težinski)
- Mješavina urana i plutonija Pu-239 (MOX – Mixed OXide)
- U-233 gorivo (moguća proizvodnja u reaktoru iz torija-232.)

- **Forme goriva:**
- metal, keramika (oksid npr UO_2, PuO_2, uran karbid)
- cilindrične tablete, šipke, kuglice, homogena mješavina uranovih soli

- U sadašnjim NE koristi se približno 1% potencijala fisijske energije
- Odgor goriva se izražava u MWd/tU (tipično za LWR oko 60 GWd/tU)
- U teškovodnim reaktorima približno 50% energije iz fisije Pu
- U lakovodnim na kraju ciklusa oko 30-40% energije dolazi od Pu

Moderator

- Koristi se u reaktorima s termičkim neutronima (ispod 0.625 eV) da se poveća vjerojatnost fisije
- Usporiti neutrone elastičnim sudarima uz minimalnu apsorpciju

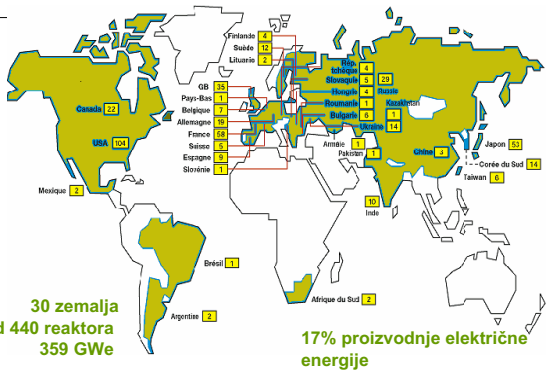
- **Obična voda** (H2O) – lakovodni reaktori (LWR- Light Water Rector): reaktor s vodom pod tlakom PWR (Pressurized Water Reactor) i reaktor s vodom koja ključa BWR (Boiling Water Reactor), dobro usporava neutrone ali ih i absorbira, traži obogaćeno gorivo, kompaktna jezgra
- **Teška voda** (D2O) – teškovodni reaktori (HWR Heavy Water Reactor), manje efikasno usporavanje i mala apsorpcija neutrona, zastupljenost u prirodi: na 6700 atoma običnog vodika dođe jedan atom deuterija, reaktor većih dimenzija
- **grafit** (C) – grafitom moderirani reaktori, manje efikasno usporavanje i mala apsorpcija neutrona, reaktor velikih dimenzija
- **berilij** (Be) – specijalne izvedbe reaktora
- **bez moderatora** – razne izvedbe brzih reaktora

Rashladno sredstvo

- Odvesti toplinu iz jezgre reaktora i osigurati transformaciju u neki drugi oblik energije
- Obična voda
- Teška voda
- Plin: CO_2, helij
- Tekući metali: natrij, olovo, olovo-bizmut
- Rastopljene soli

- Homogena i heterogena konfiguracija reaktora:
  - kriterij, postoji li jasna granica između moderatora/rashladnog sredstva i goriva

Zastupljenost NE u svijetu



30 zemalja
više od 440 reaktora
359 GWe

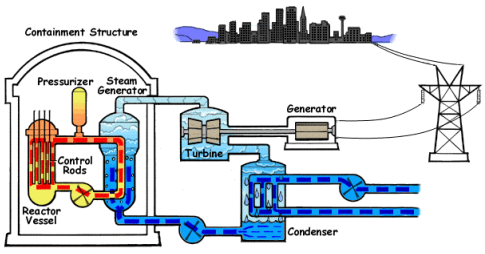
17% proizvodnje električne energije

7% udjel u primarnoj energiji

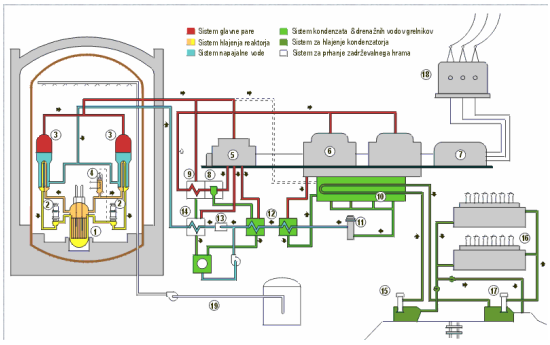
Generacije NE

- Podjela nuklearnih elektrana prema projektnim karakteristikama odnosno prema vremenu ulaska u komercijalni pogon u 4 generacije:
  - prva generacija uključuje prototipna postrojenja koja su u pogon ulazila pedesetih godina 20. stoljeća
  - nuklearna energetska postrojenja u pogonu krajem 20. i početkom 21. stoljeća elektrane su druge generacije (tu pripada i NE Krško)
  - treća generacija nuklearnih elektrana su postrojenja napredne izvedbe koja koriste poboljšanja postojeće tehnologije kojima se poboljšava sigurnost i ekonomičnost, kao što je npr. intenzivnija upotreba oblika pasivne sigurnosti
  - elektrane četvrte generacije ući će u pogon nakon 30-te godina 21. stoljeća

NE PWR – princip rada



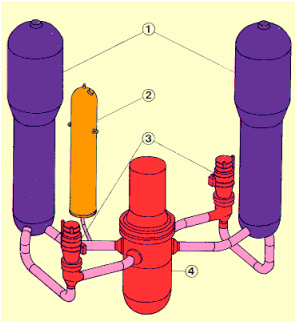
Funkcionalna shema NE Krško



PWR – glavne komponente

- reaktorska posuda
- parogeneratori
- tlačnik
- reaktorske pumpe
- cjevovodi

Primarni rashladni krug



Primarni i sekundarni krug

Koncepcija rashladne petlje

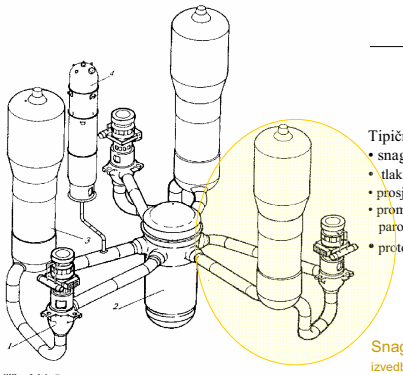
Približna snaga po jednoj petlji 300 MWe

Izmjena goriva za vrijeme obustave svakih 12, 15 ili 18 mjeseci

Količina goriva u jezgri: oko 90 t U za NE 1000 MWe

Obogaćenje U-235 do 5%

Stupanj djelovanja oko 33%



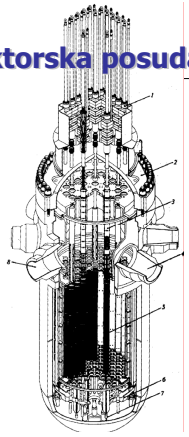
Slika 3.2.2. Prostorni raspored osnovnih komponenata reaktorskog postrojenja s tlakovodnim reaktorom (PWR) i tri rashladna kruga: 1 – cirkulacijska pumpa, 2 – nuklearni reaktor, 3 – parogenerator, 4 – tlačnik.

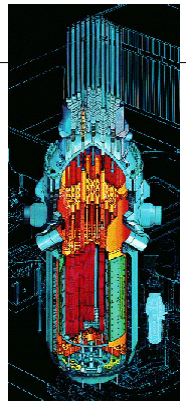
Tipični parametri PWR-a:
- snage 500 do 1500 MWe
- tlak 15 do 16 MPa
- prosječna temp. hladioca 580 K
- promjena temp. u reaktoru i parogeneratoru 40 do 50 K
- protok po rashl. krugu 6 m3/s

Snaga petlje oko 300 MWe

izvedbe s 2, 3 i 4 petlje

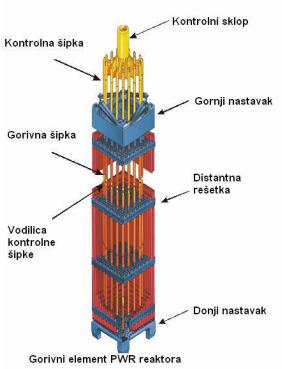
Reaktorska posuda

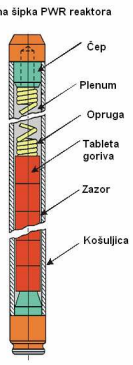




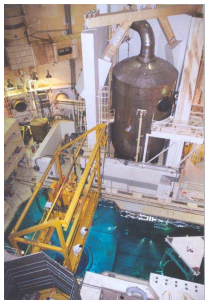
Slika 3.3.5. Tlakovodni reaktor (PWR): 1 – elektromagneti za pogon regulacijskih sklopova, 2 – poklopac reaktorske posude, 3 – vodilice regulacijskih sklopova, 4 – ulaz rashladnog sredstva, 5 – gorivni element, 6 – donja potpora jezgre, 7 – neutronski detektori.

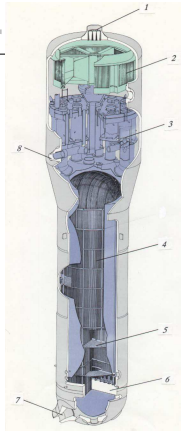
Gorivni element i gorivna šipka





Parogenerator

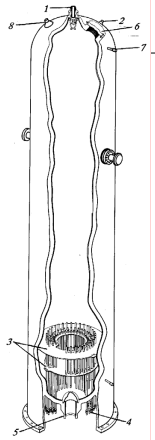




Parogenerator PWR-a:

1. izlaz pare
2. sušionik pare
   (promjena smjera protoka)
3. separator vlage
   (rotacijsko kretanje, centrif.s.)
4. cijevni snop
5. potporna rešetka
6. cijevna stijenka
7. ulaz primarnog fluida
8. ulaz pojne vode

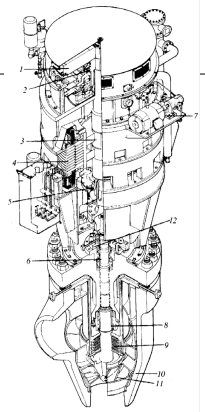
Tlačnik



•Osigurava konstantan tlak

- •volumen posude 40-60 m3
- •promjer 2-2,5 m
- •debljina stijenke 100 mm
- •snaga el. grijača 1 - 2 MW

Rashladna pumpa



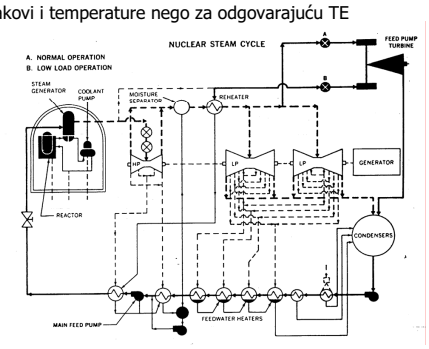
Cirkulira rashladno sredstvo:

- centrifugalna pumpa
- pogonjena asinkronim motorom
- snaga pogonskog motora 6 do 7 MW
- protok kroz pumpu oko 6,5 m3/s
- razlika tlaka fluida na pumpi 0,9 - 1 Mpa
- visina 8,5 m
- masa oko 100 tona

Slika 3.3.16. Pumpa rashladnog fluida reaktora: 1 – zamašnjak, 2 – gornji radijalni ležaj, 3 – osovina motora, 4 – stator motora, 5 – donji radijalni ležaj, 6 – osovina pumpe, 7 – pumpa za ulje, 8 – ležaj pumpe, 9 – hladnjak, 10 – kućište pumpe, 11 – rotor pumpe, 12 – brtve na osovini.

Sekundarni dio NE

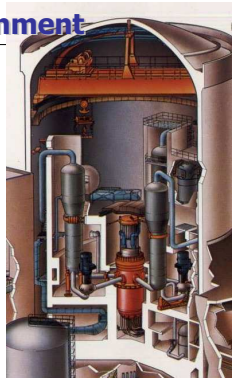
- Rankineov ciklusa s zasićenom parom
- Niži tlakovi i temperature nego za odgovarajuću TE



Zaštitna zgrada - kontejnment

Zaštititi primarni krug od vanjskog djelovanja (projektirana da izdrži pad aviona)

Zaštititi okolinu od radioaktivnog zagađenja u slučaju kvara u postrojenju (nepropusna do nadtlaka od 3 bara)

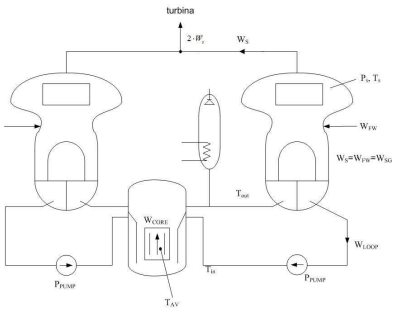


Razmještaj objekata na lokaciji NE

Zadatak: PWR

- Nuklearna elektrana s 2 rashladne petlje i PWR reaktorom ima električnu snagu na pragu 632 MWe. Ako je ukupna efikasnost pretvorbe toplinske energije u električnu (uzevši u obzir sve gubitke i vlastitu potrošnju) η=33.58%, izračunati: toplinsku snagu jezgre, protok pare po parogeneratoru, ukupni protok primarnog rashladnog sredstva i srednju temperaturu hladioca na primarnoj strani.
- Poznati su sljedeći podaci: svaka od dvije primarne pumpe unosi u sustav po 3 MW toplinske energije, temperatura hladioca na ulazu u jezgru je T_{ul}=560.3 K, entalpija pojne vode je h_{vode}=9.508 10^5 J/kg, entalpija zasićene pare u parogeneratoru je h_{pare}=2.78868 10^6 J/kg, tlak i srednja temperatura na sekundarnoj strani parogeneratora su p_S=5.6 MPa i T_S=544.24 K. Pretpostaviti da je efektivni specifični toplinski kapacitet primarnog hladioca c_p=5.8855 kJ/kgK, a da je efektivni toplinski otpor za prijelaz topline kroz cijevi parogeneratora R_T=0.037 K/MW.

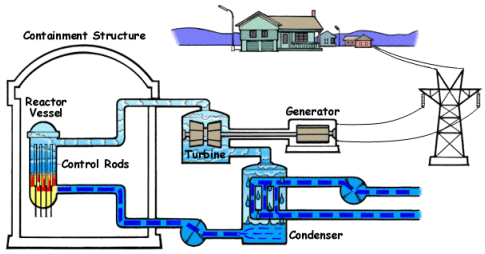
Zadatak: PWR - rjesenje



Zadatak: PWR - rješenje

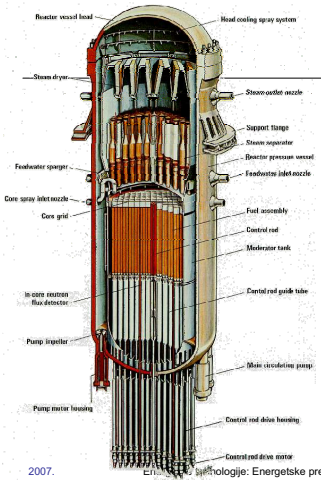
Stupanj djelovanja
$\eta = P_E/(P_{jezgre} + 2P_{pumpe})$,
Snaga jezgre
$P_{COR} = P_E/\eta - 2P_{PUMP} = 632./0.3358 - 2 * 3 = 1876.$ MW
Snaga parogeneratora
$P_{PG} = 0.5\ _{jezgre} + P_{pumpe} = 938 + 3. = 941.$ MW
m_{PG} – maseni protok pare u parogeneratoru
h_{pare}– h_{vode} – entalpija zasićene pare i pojne vode
$P_{PG} = m_{PG}\ (h_{pare} - h_{vode})$, pa je
$m_{PG} = P_{PG}/(h_{pare} - h_{vode}) = 941.\ 10^6/(2.78868\ 10^6 - 9.508\ 10^5) = 512$ kg/s
T_{sr} i T_S srednja temperatura primarne i sekundarne strane
R_T – ekvivalentni toplinski otpor parogeneratora
$P_{PG} = (T_{sr} - T_S)/RT$, pa je
$T_{sr} = P_{PG} * RT + T_S = 941. * 0.037 + 544.24 = 579.05$ K.
Porast temperature hladioca u jezgri
$\Delta T_{jezgre} = 2\ (T_{sr} - T_{ul}) = 2\ (579.05 - 560.3) = 37.5$ K
$P_{jezgra} = m_{jezgra}\ c_p\ \Delta T_{jezgra}$, pa je
Maseni protok kroz jezgru
$m_{jezgra} = P_{jezgra}/(c_p\ \Delta T_{jezgra}) = 1876.\ 10^6/(5.8855\ 10^3 * 37.5) = 8500.$ kg/s.

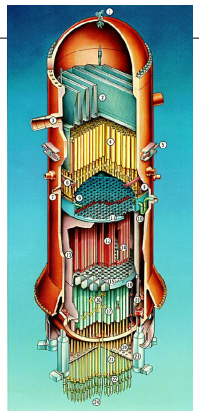
NE BWR – princip rada



BWR - ukratko

- Drugi tip reaktora po brojnosti,
- Jedinične snage od 300 do 1600 MWe
- Voda ispariva u reaktoru
- Direktni ciklus moguća kontaminacija turbine
- Niža gustoća snage u odnosu na PWR
- Velika posuda
- Regulacijske šipke ulaze u jezgru s donje strane
- Recirkulacijske petlje omogućuju regulaciju snage i odgovarajuće hlađenje goriva
- Izvedbe kontejnmenta – manji nego PWR kontejnment, aktivna kondenzacija pare u bazenima
- Nije pogodan za nuklearnu propulziju pa je razvijen isključivo za proizvodnju električne energije
- Ostale svojstva slična kao PWR





Strujanje hladioca u posudi BWR-a

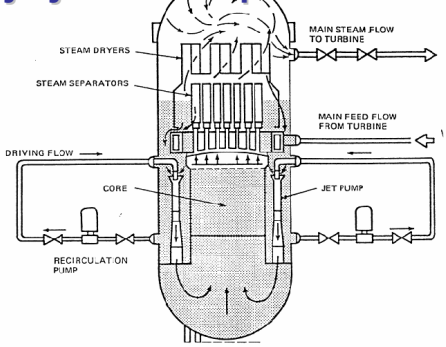
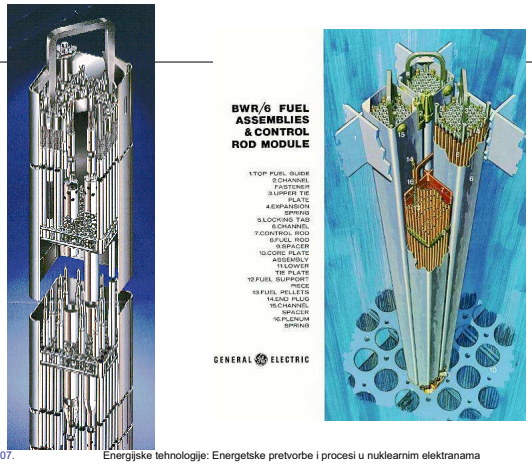
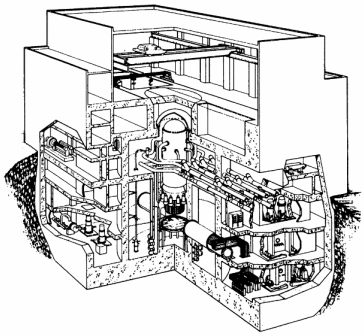


Figure 10-17 BWR reactor vessel internal flow paths.



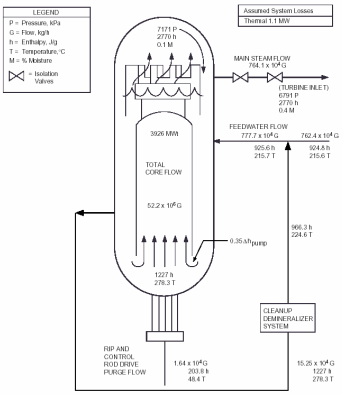
Reaktorska zgrada BWR reaktora



Slika 4.6.1. Postrojenje naprednog kipućeg reaktora (ABWR).

Zadatak 2: BWR reaktor

- BWR reaktor u stacionarnom stanju na punoj snazi proizvodi m_{pare} = 760 10^4 kg/h pare s udjelom vlage 0,1% pri tlaku 7,2 MPa. Entalpija pojne vode temperature 216 ^oC je h_{vode} = 926,7 kJ/kg a entalpije zasićene vode i pare na tlaku od 7,2 MPa su h_f = 1278 kJ/kg i h_g = 2770 kJ/kg. Izračunati termičku snagu jezgre i potrebnu masu UO_2 goriva obogaćenja e = 4% ako se zna da je srednji tok termičkih neutrona u reaktoru Φ = 3,8 10^{13} n/cm^{2}s a mikroskopski udarni presjek za fisiju σ_f = 580 10^{-24} cm^2. Pri fisiji se oslobodi 200 MeV energije. Zanemariti gubitke topline iz reaktora i porast energije fluida zbog rada pumpanja recirkulacijskih pumpi.



Toplinska bilanca BWR reaktora koji je poslužio kao podloga za podatke u zadatku

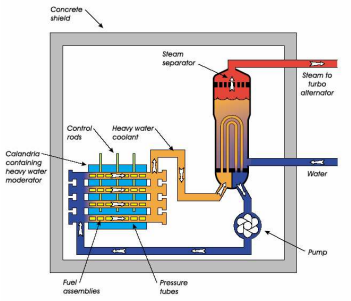
Zadatak 2: BWR reaktor – rješenje

- Maseni sadržaj pare u proizvedenoj pari je x = 1 – 0,001 = 0,999
- Entalpija proizvedene vlažne pare je $h_{pare} = (1-x)\, h_f + x\, h_g$ = 0,001 * 1278 + 0,999 * 2770 h_{pare} = 2768,5 kJ/kg
- Snaga jezgre je $P_{jezgre} = m_{pare}\,(h_{pare} - h_{vode})$
  P_{jezgre} = 760 10^4/3600 * (2768,5 – 926,7)
  P_{jezgre} = 3888,26 MW
- Ta je snaga rezultat N * Φ * σ_f fisija u svakoj sekundi. N je broj jezgara U-235 u reaktoru.
- P_{jezgre} = 200 * 1,6 10^{-13} * N * Φ * σ_f
  P_{jezgre} = 3,2 10^{-11} * N * 3,8 10^{13} * 580 10^{-24} = 3888,26 10^6 W
- Potrebni broj jezgara U-235 u jezgri iznosi N = 5,51 10^{27}

Zadatak 2: BWR reaktor – rješenje

- Broj jezgara U-235 u masi UO_2 m_{UO2} je
  N = e * A_U/A_{UO2} * m_{UO2} N_A/A_{U235}
- Računajući s približnim atomskim masama atomska masa urana je
  $1/A_U = e/A_{U235} + (1-e)/A_{U238}$.
  Za e = 0.04 A_U je 237,88 a atomska masa UO_2,
  $A_{UO2} = A_U + A_{O2}$ = 237,88 + 32 = 269,88.
- Za obogaćenja do 10% uobičajeno je računati s približnim atomskim masama A_U = 238 i A_{UO2} = 270.
  Relativna greška u masenim udjelima urana u UO_2 je tom prilikom mala (238/270 – 237,88/269,88)/(237,88/268,88) = 0,006%.
- N = 0,04 * 238/270 * m_{UO2} * 6,022 10^{23}/235 = 5,51 10^{27},
  m_{UO2} = 60982,5 kg.
- Odgovarajuća masa urana je
  $m_U = m_{UO2} * A_U/A_{UO2}$ = 60982,5 * 238/270 = 53755 kg

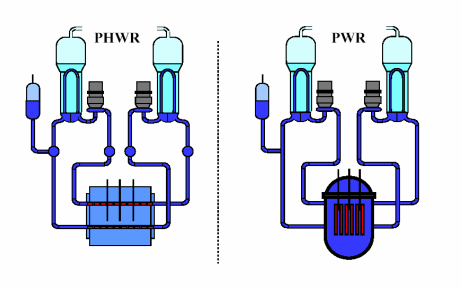
CANDU (CANada Deuterium Uranium) reaktor s teškom vodom



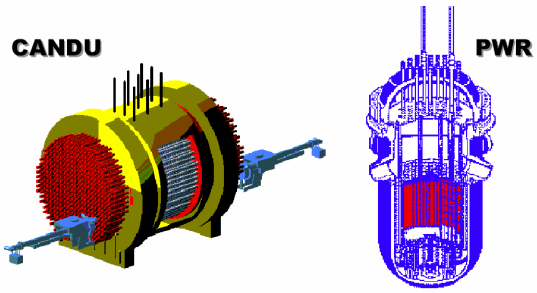
HWR CANDU

- Prirodni ili slabo obogaćeni uran
- Teška voda je moderator i hladilac
- Dva rashladna kruga kao i PWR
- Horizontalni rashladni kanali
- Veliki volumen reaktora
- Niski odgor (3 do 4 puta manji nego PWR i odgovarajuće više proizvedenog istrošenog goriva)
- Izmjena goriva bez zaustavljanja

Sličnosti i razlike PWR i CANDU reaktora



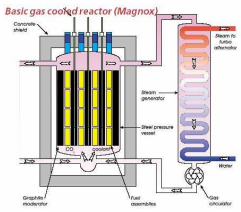
Reaktorska posuda CANDU i PWR



Plinom hlađeni reaktori

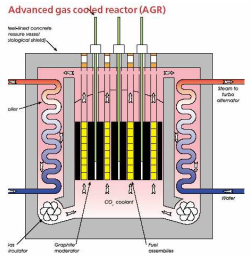
- Prošlost i budućnost
- Moderator je grafit
- Nekad hlađeni s CO_2, danas uglavnom He
- Relativno veliki volumen jezgre
- Moguća izvedba s Rankineovim i Braytonovim ciklusom
- Mogućnost proizvodnje procesne pare
- Visokotemperaturne izvedbe će se koristiti za industrijsku proizvodnju vodika

GCR (Gas Cooled Reactor) Magnox



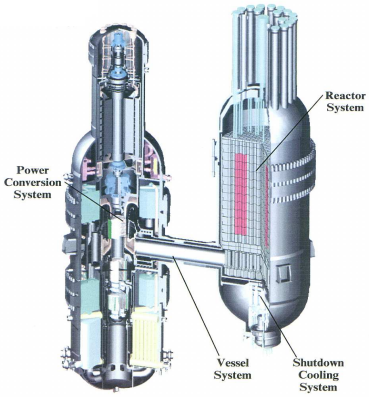
Fuel rod casing material	Magnesium - 0.8% Al
Tonnes of fuel (U) per reactor (approx)	230-595
Fuel Enrichment % U-235	Metallic natural U
Output per reactor MWe	50-420
Typical thermal Efficiency %	27
Moderator	graphite
Coolant	carbon dioxide
Coolant pressure bar	10-27
Coolant outlet temperature C	360
Mean fuel burnup at discharge MW(th)d/tU	4,000
Fuel loading arrangements	On load
How many operating UK	20
How many operating - world (1998 excluding China)	20

AGR (Advanced Gas Reactor)

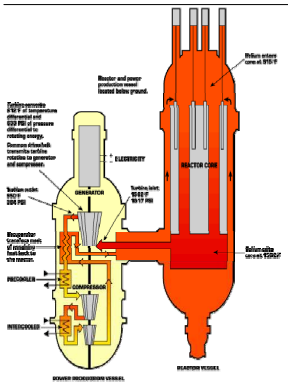


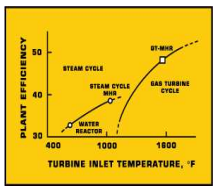
Fuel rod casing material	20%Cr/25%Ni/Nb stainless steel
Tonnes of fuel (U) per reactor (approx)	130
Fuel Enrichment % U-235	Uranium oxide 2.7-3.4%
Output per reactor MWe	600-625
Typical thermal Efficiency %	41
Moderator	graphite
Coolant	carbon dioxide
Coolant pressure bar	30-40
Coolant outlet temperature C	640
Mean fuel burn up at discharge MW(th)d/tU	27,000
Fuel loading arrangements	On load
How many operating UK	14
How many operating - world (1998 excluding China)	14

Reaktorska posuda i sustav za pretvorbu energije – Modularni He reaktor 286 MWe



Modularni reaktor hlađen He

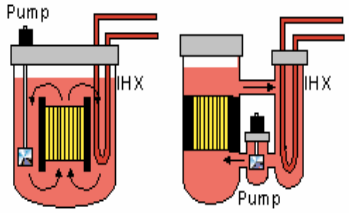




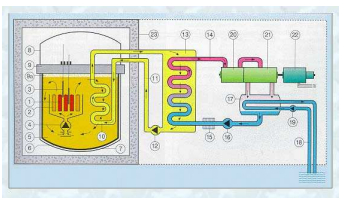
Brzi oplodni reaktori

- Ne trebaju moderator
- Proizvode Pu-239 iz U-238 ili U-233 iz Th-232
- Uhvatom neutrona nastaje novi fisibilni materijal
- Moguća je veća proizvodnja nego potrošnja goriva
- Potrebna prerada goriva
- Potreba za većim obogaćenjem goriva (15 do 20%)
- Velika gustoća snage
- Hlađenje tekućim metalom ili plinom
- U slučaju Na hlađenja obično 3 rashladna kruga

Brzi reaktor bazenskog i petljastog tipa

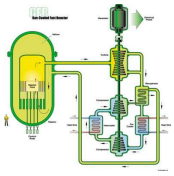


Bazenski brzi reaktor (Phenix) , 250MWe



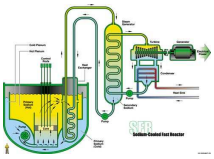
1 Fuel (fissile material)	9 Cover	17 Condenser
2 Fuel (breeder material)	10 Na/Na heat exchanger	18 Cooling water
3 Control rods	11 Secondary Na	19 Cooling water pump
4 Primary Na pump	12 Secondary Na pump	20 High pressure turbine
5 Primary Na coolant	13 Steam generator	21 Low pressure turbine
6 Reactor vessel	14 Fresh steam	22 Generator
7 Protective vessel	15 Feedwater pre-heater	23 Reactor building
8 Reactor cover	16 Feedwater pump	

Izvedbe budućih brzih reaktora



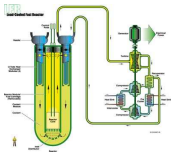
Hlađen plinom

850°C / visoki tlak



Hlađen natrijem

550°C / niski tlak.

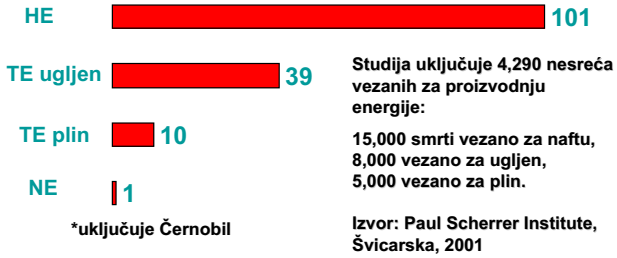


Hlađen olovom

550/800°C / niski tlak.

Sigurnosne statistike različitih načina proizvodnje električne energije

Broj smrti u nesrećama po 1000 TWh proizvedene električne energije



Studija uključuje 4,290 nesreća vezanih za proizvodnju energije:

15,000 smrti vezano za naftu, 8,000 vezano za ugljen, 5,000 vezano za plin.

Izvor: Paul Scherrer Institute, Švicarska, 2001

Sigurnost nuklearnih elektrana

- Zanemarive emisije u normalnom pogonu
- Konzervativan projekt s visokim stupnjem sigurnosti
- Visoki zahtjevi na kvalitetu materijala i ugradnje
- Da bi se postigao siguran pogon potrebno je:
  - spriječiti nagle poraste snage
  - osigurati odvođenje ostatne topline
  - spriječiti ispuštanje radioaktivnog materijala
  - pospremiti na siguran način istrošenog gorivo

Principi sigurnosnih mjera u nuklearnim elektranama

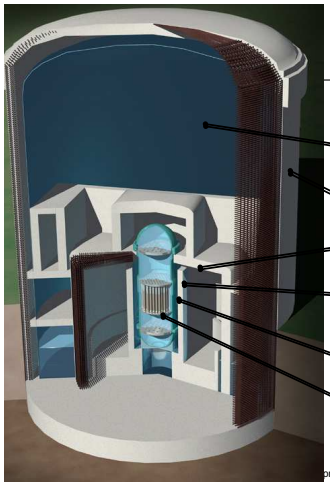
- **Nuklearna eksplozija reaktora je onemogućena projektom**
- **U svojoj jezgri nuklearni reaktor sadrži veliku količinu radioaktivnih tvari, pretežno fisijskih proizvoda.**
- **Sigurnost se u osnovi odnosi na onemogućenje širenja radioaktivnih materijala unutar postrojenja i u okoliš**
- **Do akcidentnog ispuštanja uglavnom dolazi samo ako dođe do pregrijanja goriva**
- **Sigurnost nuklearne elektrane se postiže nizom mjera u fazi projektiranja, gradnje i tijekom pogona.**

Obrana po dubini

- **Osnova filozofije projektiranja nuklearne elektrane sa stajališta sigurnosti je tzv. obrana po dubini.**
- **Obrana po dubini pretpostavlja postojanje višestrukih barijera za širenje radioaktivnosti i sigurnosnih sustava koji osiguravaju njihovu nepropusnost**
- **Barijere u smislu zaštite okoliša djeluju serijski, jedna nakon druge.**
- **Izgubljenu funkciju jednog sustava važnog za sigurnost automatski preuzima drugi.**
- **Bitni sustavi su u najmanju ruku udvojeni**
- **Sustavi mogu biti aktivni ili pasivni (kako dobivaju energiju potrebnu za izvršavanje sigurnosne funkcije)**
- **Barijere možemo razmatrati kao stvarne fizičke barijere ugrađene u nuklearnu elektranu i kao fizičke i administrativne mjere koje se poduzimaju u nuklearnoj elektrani za zaštitu tih barijera.**

Obrana po dubini

- **Fizičke barijere su:**
  - **matrica nuklearnog goriva**
  - **obloga gorivnog elementa**
  - **primarni rashladni krug**
  - **zaštitna posuda (kontejnment)**
- **Tehnički sustavi koji osiguravanju funkciju fizičkih barijera:**
  - **sustav za zaštitno hlađenje jezgre reaktora (štiti gorivne elemente od pregrijanja)**
  - **sustav za ograničavanje porasta tlaka u kontejnmentu (štiti zaštitnu posudu od previsokog tlaka i temperature)**



Višeslojna zaštita

Kontejnmentska posuda
4 cm čelika

Kontejnmentska zgrada
1 m prenapregnutog betona

Unutrašnja betonska struktura
1.5 m prenapregnutog betona

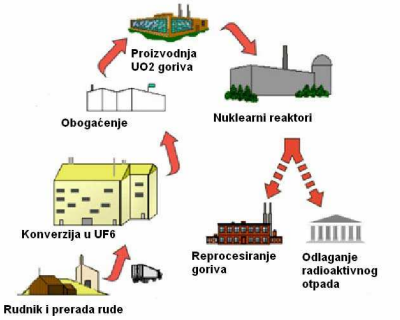
Biološki štit
1,2 m teškog betona +
4 cm čelika

Reaktorska posuda
20 cm čelika

Matrica goriva + košuljica

Nuklearni gorivni ciklus

- Obuhvaća sve aktivnosti od vađenja urana do konačnog odlaganja radioaktivnog otpada



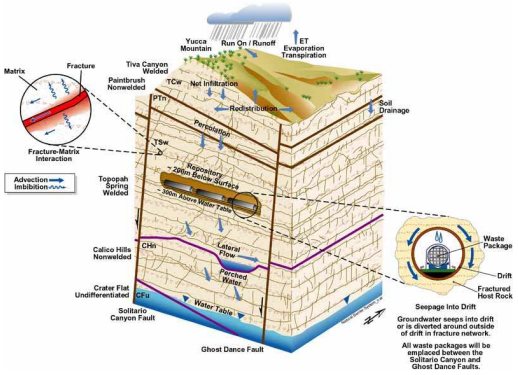
Istrošeno gorivo

- Gorivo provede 3 godine u reaktoru
  - svake godine se mijenja približno trećina
  - sprema se privremeno u bazen za istrošeno gorivo
- Reprocesiranje
  - kemijsko izdvajanje neiskorištenog uranija i plutonija
    - drobljenje tableta goriva, otapanje u dušičnoj kiselini
    - organska otapala za uranij i plutonij
  - opasnost za proliferiranja (širenja) nuklearnih materijala
  - 30% povećanje dostupne energije (cijena NE)
  - važno za tehnologiju oplodnih reaktora
  - smanjuje problem odlaganja radioaktivnog otpada
- Transmutacija istrošenog goriva
  - dodatno izlaganje toku neutrona
  - smanjuje količinu radioaktivnog otpada
  - smanjuje aktivnost i udjel dugoživućih izotopa

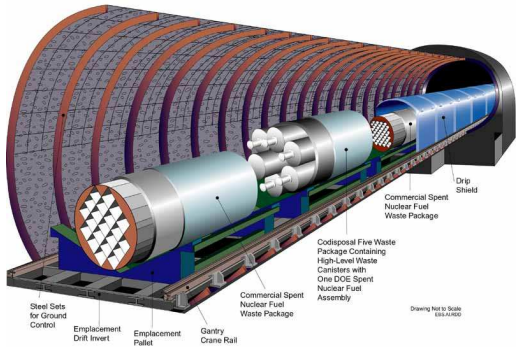
Odlaganje nuklearnog otpada

- nisko i srednje radioaktivni otpad
  - škole, bolnice, industrija, nuklearna elektrana
- visoko radioaktivni otpad
  - Ono što karakterizira visoko aktivni otpad:
    - Nivo radijacije
      - fisijski produkti
      - aktinidi
    - otrovnost
  - Zadatak:
    Pouzdano izolirati otpad od dotičaja s eko-sustavom za dugi niz godina
    - Tehnička rješenja postoje

Odlagalište - sustav prirodnih barijera



Odlagalište - sustav inženjerskih barijera



Dodatak - Nuklearna fuzija

Nuklearna fuzija

- **Spajanje lakših jezgara u teže uz oslobađanje energije**
- **Prvi kandidat za fuzijske uređaje je D-T reakcija**
- **Potrebno je postići i održavati temperaturu od desetak miliona K**
- **Problem održavanja plazme – elektromagnetsko ograničavanje**
- **Tokamak uređaji i inercijalni fuzijski uređaji**
- **Problem materijala (visoke temperature i veliki fluks brzih neutrona)**
- **Komercijalna primjena nije moguća prije sredine stoljeća a i onda će biti ograničena na uski krug zemalja**

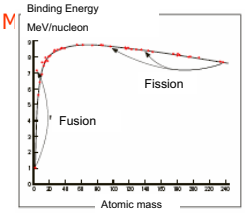
Fuzijske reakcije

D + T ---> He^4 (3.5 MeV) + n (14.1 M

D + D ---> He^3 +n + 3.2 MeV

D + D ---> T + H + 4.03 MeV

D + He^3 ---> He^4 + H + 18.3 MeV



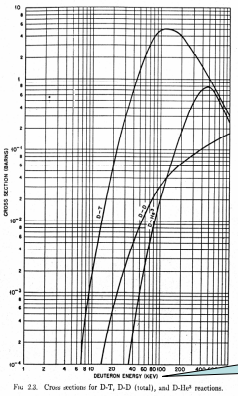
•Li^6 + n ---> T + He^4 +4.8 MeV

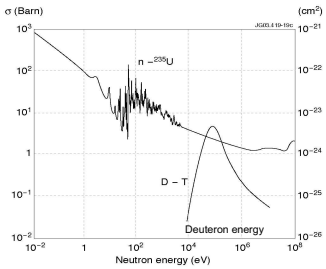
U reaktoru koji koristi D-T reakciju tricij se proizvodi u oplodnom omotaču iz litija uhvatom brzih neutrona

Koji su razlozi za razvoj fuzije?

- Praktično neiscrpan izvor energije (velike rezerve D i Li)
- Nema emisije stakleničkih plinova
- Smanjena proizvodnja radioaktivnog otpada u odnosu na fisiju
- Povoljna sigurnosna svojstva

Udarni presjeci (vjerojatnosti)



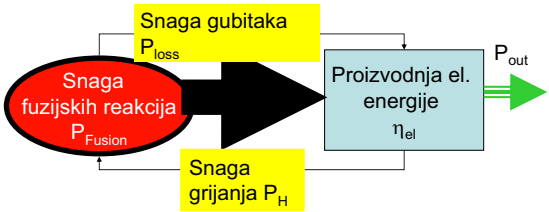


1 keV is equivalent to 10^7 °K

Fig. 2.3. Cross sections for D-T, D-D (total), and D-He³ reactions.

Uvjeti za izvedbu fuzijskog reaktora

- Bilanca topline



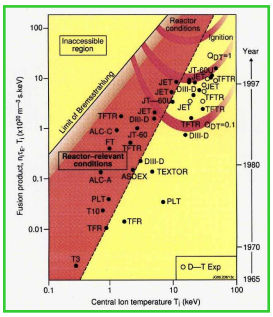
$n\tau_E T > 5 .10^{21}\ m^{-3}s\ keV$

n= gustoća šestica, T = temperatura,
τ_E = vrijeme održavanja plazme

Uvjeti za izvedbu fuzijskog reaktora

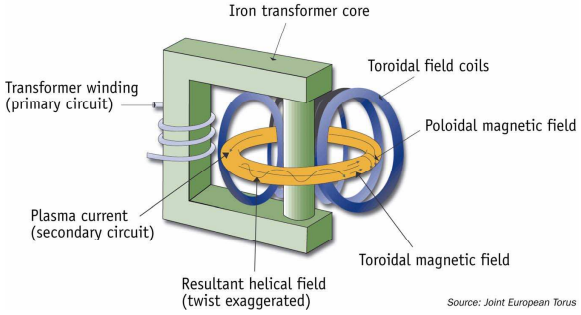
- Temperatura u području od 100 MK.
- Na temperaturi 10^4-10^5 K, materija je u stanju plazme (ionizirani globalno neutralni plin).
- Stvaranje, održavanje i ograničavanje plazme na 10^8 K (inicijalno niski tlak):
  - ograničavanje magnetskim poljem;
  - grijanje RF valovima (170 GHz, 5 GHz, i 50 MHz za ITER) i ubacivanjem snopova neutralnih čestice velike energije

Status fuzijskih uređaja



Fuzijski uređaj tokamak tipa

Simple diagram of a Tokamak fusion reactor



Source: Joint European Torus

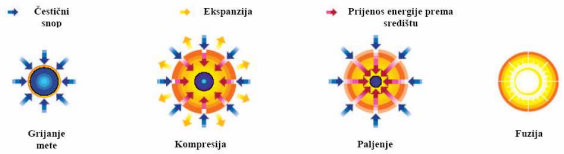
Fuzijski uređaji s inercijalnim ograničavanjem plazme

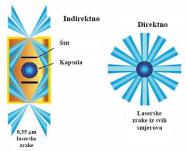
- Laserski snopovi ili čestični snopovi fokusiraju se na površinu mete promjera nekoliko milimetara koja sadrži malu količinu fuzijskog D-T goriva
- Isparivanje i ioniziranje površinskog sloja mete dovodi do formiranja plazme.
- Kako ovaj sloj isparenog materijala ekspandira prema van tako se po principu akcije i reakcije (efekt se može usporediti s lansiranjem mnogo malih raketa ili projektila s površine kuglice) formira tlačna fronta koja ekspandira prema unutrašnjosti mete i komprimira je grijući unutrašnje slojeve materijala.

Fuzijski uređaji s inercijalnim ograničavanjem plazme

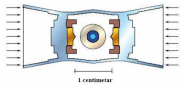
- Centralni dio mete komprimira se do gustoće koja je nekoliko tisuća puta veća od gustoće tekućeg stanja materijala mete i paljenje nuklearne reakcije počinje kad se dostigne temperatura od oko sto milijuna stupnjeva.
- Fuzijska reakcija se brzo širi kroz komprimirani materijal mete proizvodeći energiju koja je tipično nekoliko puta veća od energije deponirane u meti pod djelovanjem inicijalnog snopa.
- Vrijeme unutar kojeg se odvija fuzijska reakcija u ovakvom sustavu je ograničeno jedino inercijom samog goriva pa se zato za skup ovakvih postupaka koristi ime fuzija s inercijalnim ograničenjem plazme.

Princip rada inercijalne fuzije

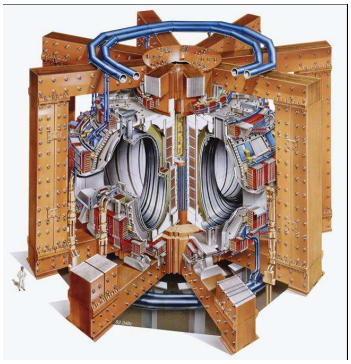




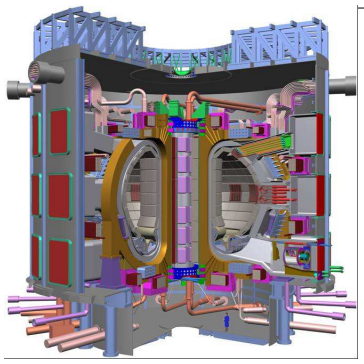
Indirektno i direktno obasjavanje mete laserom i meta za snop teških iona



JET (Joint European Torus)

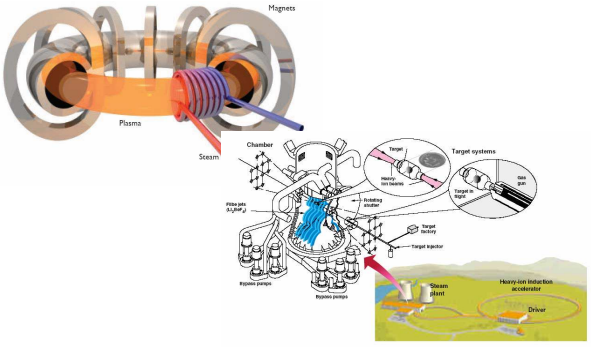


ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)



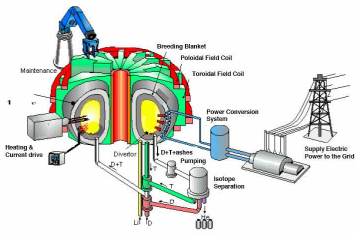
Fusion power	500 MW
Heat flux at 1st wall	0.57 MW/m2
Confinement time	≥ 300 s
Plasma radius (torus)	6.2 m
Plasma radius (cross)	2.0 m
Plasma current (ind)	15 MA
Toroidal field at 6.2 m	5.3 T
Plasma volume	837 m3
Plasma area	678 m2

Fuzijska elektrana, tip pretvorbe?



Konceptualna studija fuzijske NE

- Nastavak ITER projekta
- Definirati parametre fuzijske elektrane i potrebni razvoj
- Ocijeniti sigurnost i utjecaj na okoliš
- Ocijeniti ekonomske aspekte projekta
- Posebni projekt za tokamak a posebni za inercijalnu fuziju



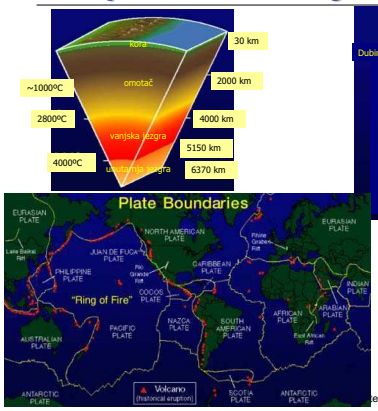
Geotermalna energija

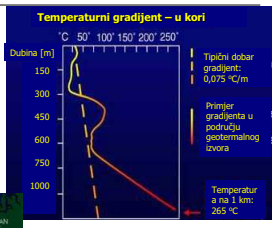
Pozadina i korištenje
Energijske tehnologije
FER 2007.

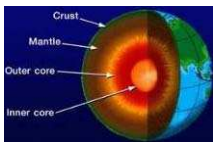
Sadržaj

- Porijeklo
- Potencijal
- Korištenje
  - Grijanje
  - Proizvodnja električne energije
  - Toplinske pumpe

Temperature u Zemlji



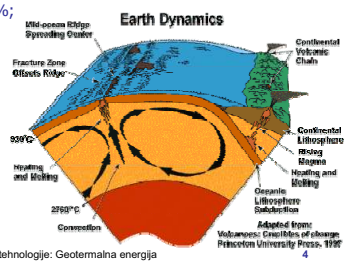




Unutrašnja kalorička energija Zemlje

- Enormna količina energije
  - Samo mali dio dostupan
- Na površini 0,06 W/m²
  - Izvorna toplina i drugi procesi (~60%)
  - Radioaktivni raspad (~40%; $U_{235,238}$, Th_{232}, K_{40})
  - Površina za 100W?
- Litosfera: kondukcija
  - prijelaz topline bez pomicanja materije
- Omotač: konvekcija
  - prijenos topline gibanjem materije (nema radioaktivnosti)

- Izvor za korištenje:
  - Vruće suhe stijene
  - Voda na velikim dubinama i pod velikim tlakom
  - Voda/para na manjim dubinama



Dobri i nedostupni izvori

Vruće suhe stijene

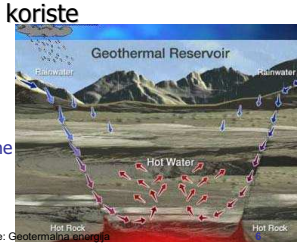
- Dubina i temperatura:
  - 2,5 do 6 km
  - od 150 do 300 °C
- Najveći i najteži izvor za korištenje
  - Stijene slabo vode toplinu
  - Potrebno je izlomiti stijene i dovesti vodu
    - Eksplozije (nuklearne!?)
    - Voda pod tlakom
- Istražuje se

Voda na velikoj dubini i velikom tlaku

- Dubina i temperatura:
  - 2,5 do 9 km
  - oko 160 °C i veliki tlak (>1000 bar)
- Ostale karakteristike
  - Velika slanost (4-10%)
  - Zasićeno prirodnim plinom
    - Najviše metana CH_4
    - Oko 5x više plina volumno
    - Potencijal za kombinirano korištenje
- Istražuje se

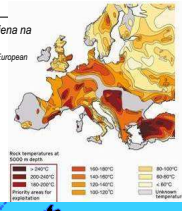
Voda/para na manjim tlakovima i dubinama

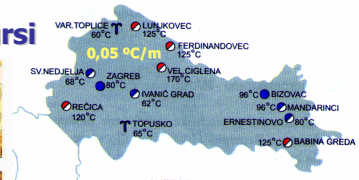
- Dubina, temperature i tlakovi:
  - do 5 km, do preko 300 °C, do 8 bara
- Parni izvori su najpoželjniji ali malobrojni
  - Para sama izlazi van iz bušotine (oko 200 °C)
  - Geysers (SAD) i Larderello (Italija)
- Vodeni izvori se najčešće koriste
  - Voda izlazi sama ili se pumpa
  - Velike koncentracije otopina (i preko 25000 ppm)
- Komercijalno se koriste
  - ne zahtijevaju posebno napredne tehnologije za bušenje i eksploataciju

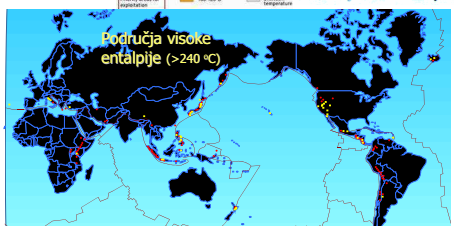


ppm – *parts per million* (dijelova u milijun)

Geotermalni resursi







INA od 1976. napravila više od 50 dubokih bušenja.
Temperaturni gradijent ide i do 0,07°C/m.
Temperature u rasponu od 40 – 170°C.
Procjene:
~50 MW_e
~800 MW_t

Direktno korištenje

Greenhouse in Colorado
Gretz, Warren

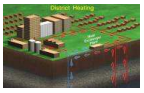
Crop dehydration plant in Nevada.
Gretz, Warren

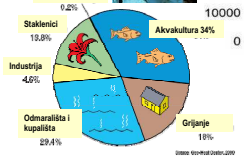
A fish farm in Colorado
Gretz, Warren

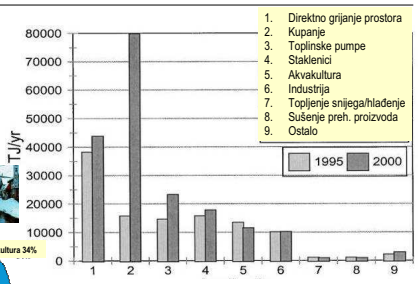
Najstariji način korištenja geotermalne energije:
- Samostalno ili
- Komplementarno proizvodnji el. en.

Djelatnost	Temperatura [°C]
Prerada mesa	60–93
Proizvodnja sira	38–93
Prerada mlijeka	71–204
Dehidracija voća i povrća	71–177
Zamrzavanje voća i povrća	77–100
Sušenje žitarica	49–175
Rafiniranje šećerne repe	60–134
Proizvodnja jestivog ulja	71–204
Proizvodnja pića na bazi slada	76–204
Destilacija žestokih pića	99–204
Proizvodnja cigareta	104
Prerada pamuka	93–135
Proizvodnja papira	99–188

Direktno korištenje geotermalne energije





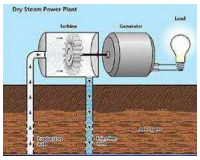


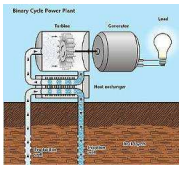
Kapaciteti u svijetu 2000.

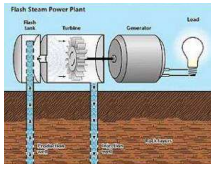
- Instalirano 15 GW_t
- Iskorišteno 191 PJ

Geotermalne elektrane

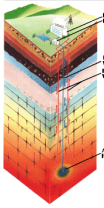
- Elektrane na suhu paru
- Elektrane sa separiranjem pare "Flash steam"
- Elektrane s binarnim ciklusom



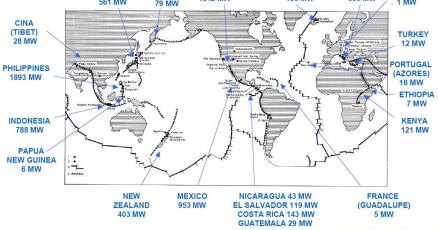




Geotermalna električna energija



2000.



P = 8700 MW_e

W = 55 TWh_e

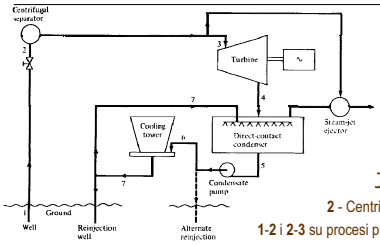
Porast od ~10%/god.

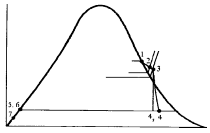
Potencijal:

- -Do 100 GW sa današnjom tehnologijom
- -Dvostruko više sa naprednim tehnologijama
- -Totalni potencijal se procjenjuje na nekoliko tisuća GW

First Geothermal Power Plant, 1904, Larderello, Italy

Elektrane na suhu paru





T-s dijagram

Jeftine, velike i rijetke

2 - Centrifugalni separator odvaja nečistoće

1-2 i **2-3** su procesi prigušivanja uz konstantnu entalpiju

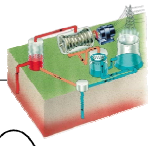
4 - izlaz iz turbine se miješa s recirkuliranom (**5**, **7**) rashladnom vodom u kondenzatoru s direktnim kontaktom i višak se vraća u zemlju

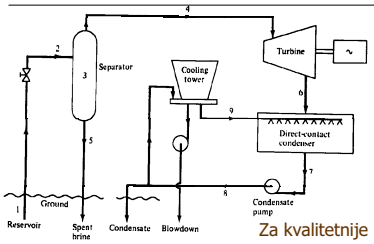
Nekondenzibilni plinovi (CO_2, NH_4, H_2S)se moraju ukloniti iz kondenzatora zbog korozije i tlaka parnim ejektorom (za pogon se izdvaja dio pare).

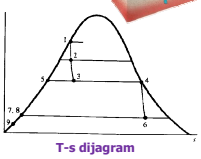
Elektrane u pogonu (jedinice npr.100 MW): Geysers (SAD), Larderello (Italija), Matsukawa (Japan)

Za smanjivanje potrebnog rashladnog protoka tlak u kondenzatoru je visok (~135 kPa) što uz male temperature dodatno umanjuje termički stupanj djelovanja.

Elektrane sa separiranjem pare "Flash steam"







T-s dijagram

Za kvalitetnije izvore vode, preko 200 °C

Salinitet i do 280000 ppm.

1-234-**5** su procesi prigušivanja uz konstantnu entalpiju

Problemi: Znatno veći potrebni protoci (utjecaj na okolno zemljište te dimenzije i degradiranje postrojenja zbog dodatnih sastojaka)

Elektrane u pogonu (jedinice od 10-50 MW): Italija, Japan, Novi Zeland, Meksiko, SAD

Termički stupanj djelovanja još manji zbog niske temperature i niske kvalitete pare.

1. Sustav s isparivanjem kao na prethodnom slajdu koristi rezervoar vode temperature 238 °C i tlaka 34,4 bar. Tlak u separatoru je 6,88 bar. Izračunajte:
A) maseni protok vode iz rezervoara i rasola koji se vraća u rezervoar te maseni protok pare koja se dovodi u turbinu,
B) odnos entalpija rasola i pare.

$T_1 = 237.78\ °C = 510.93\ K$
$P_1 = 3.441 \cdot 10^6\ Pa$
$P_3 = 6.882 \cdot 10^6\ Pa$

a) $\frac{\dot m_1}{\dot m_4} = ?,\ \frac{\dot m_5}{\dot m_4} = ?,$ b) $\frac{h_5}{h_4} = ?$

$(T_1, p_1) \Rightarrow$ pothlađena tekućina (ρ=815.3 kg/m³)
$h_1 = h_f = 1032$ kJ/kg

stanje 3: mokra para ($h_3 \approx h_1$)
$p_3, h_3 \Rightarrow T_3 = 437.4$ K
$x = 0.1634$

ili

$h_3 = h_f + x_3 (h_g - h_f)$
$p_3 \Rightarrow h_f = 694.0$ kJ/kg
$h_g = 2762.0$ kJ/kg

$$x = \frac{h_3 - h_f}{h_g - h_f} = \frac{1032 - 694}{2762 - 694} = 0.1634$$

$$\frac{\dot m_1}{\dot m_4} = \frac{\dot m_1}{x_3 \cdot \dot m_1} = \frac{1}{x_3} = 6.12$$

$$\frac{\dot m_5}{\dot m_4} = \frac{\dot m_1 - \dot m_4}{\dot m_4} = \frac{\dot m_1 - x_3 \dot m_1}{x_3 \dot m_1} = \frac{1 - x_3}{x_3} = \frac{1 - 0.1634}{0.1634} = 5.12$$

b) $\dot m_1 h_1 = \dot m_4 h_4 + \dot m_5 h_5 \quad /:\dot m_4$

$$h_1 \frac{\dot m_1}{\dot m_4} = h_4 + \frac{\dot m_5}{\dot m_4} h_5 \quad /:h_4$$

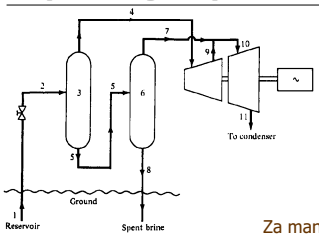
$$\frac{h_1}{h_4} \cdot 6.12 = 1 + 5.12 \frac{h_5}{h_4}$$

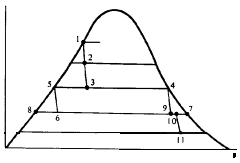
$$\frac{h_5}{h_4} = \frac{1}{5.12} \cdot \left(\frac{1032}{2762} \cdot 6.12 - 1\right) = 0.251$$

ili

$T_4 = T_3 = 437.4$ K, $x_4 = 1 \Rightarrow h_4 = 2762$ kJ/kg
$T_5 = T_3 = 437.4$ K, $x_5 = 0 \Rightarrow h_5 = 694$ kJ/kg
$h_5/h_4 = 694/2762 = 0.251$

Elektrane s dvostrukim separiranjem pare "Flash steam"





T-s dijagram

Za manje kvalitetne izvore (oko 200 °C)

Unapređenje za veći stupanj djelovanja dodatnim iskorištavanjem entalpije povratnog medija.

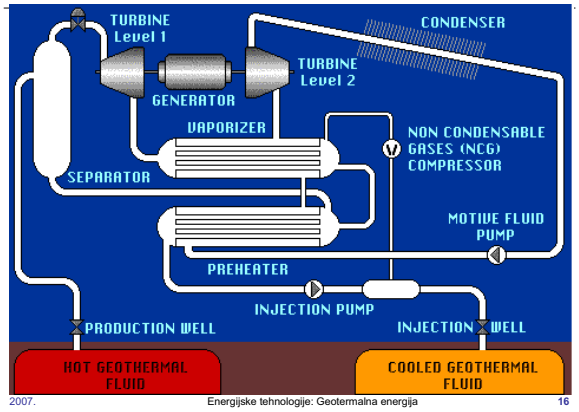
5 – povratni medij se vodi na dodatnu separaciju pare koja pogoni turbinu na nižem tlaku

Problemi: Znatno veći potrebni protoci (utjecaj na okolno zemljište te dimenzije i degradiranje postrojenja zbog dodatnih sastojaka)

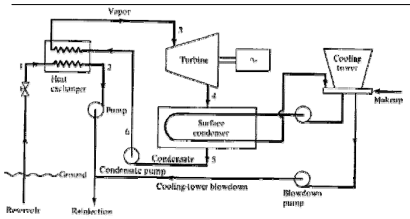
Elektrane u pogonu (jedinice oko 50 MW): Japan

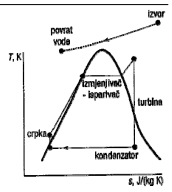
Termički stupanj djelovanja još manji zbog niske temperature i niske kvalitete pare.

Elektrana s dvostrukim separiranjem pare ("Flash steam")



Elektrane s binarnim ciklusom





T-s dijagram

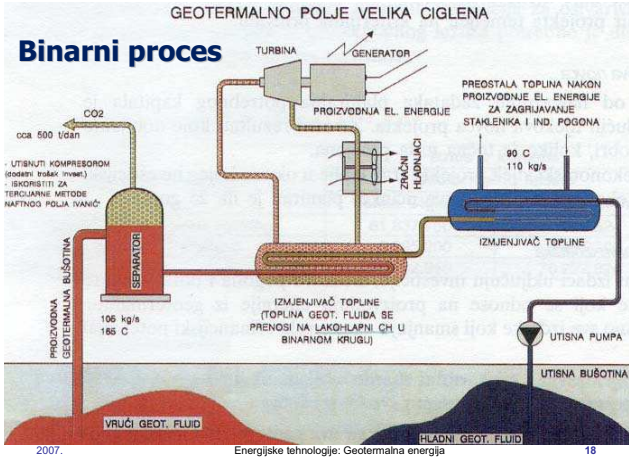
Za manje kvalitetne izvore (ispod 200 °C)

Unapređenje za veći stupanj djelovanja.

Proces se provodi kao Rankineov organski – radni fluid ima nisku temperaturu isparivanja (izobutan C_4H_{10}, freon12, amonijak ili propan)

Vlastita potrošnja u elektrani je oko 35%.

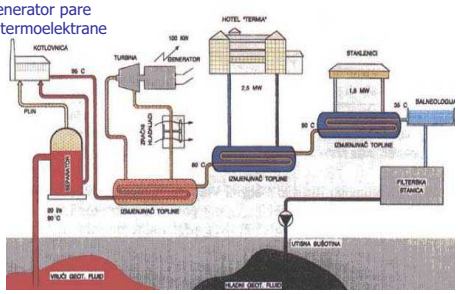
Demonstracijske elektrane u pogonu (jedinice oko 10 do 50 MW) u SAD-u



Kombinirani procesi

Bolji stupanj djelovanja se može osigurati kombiniranim procesima:

- Dogrijavanjem medija iz geotermalnog izvora prirodnim plinom iz samog izvora ili nekim drugim gorivom
- Predgrijavanjem toplinskom energijom iz geotermalnog izvora kondenzata prije ulaska u generator pare konvencionalne termoelektrane



2. Parom dominirano vodotoplinsko polje može davati 2500 kg/s pare temperature 215°C. Turbine rade s ulaznim tlakovima od 6 bara i politropskom učinkovitošću 0.8. Turbinski generatori imaju ukupnu mehaničko – električnu učinkovitost od 0.875. Kondenzatori su površinski (za odstranjivanje sumporovodika H_2S) i rade na 0.4 bara uz rashladnu vodu temperature 26°C, i razliku temperature od 10°C. Izračunajte:

A) ukupni neto kapacitet polja u MW, ako izbacivači pare koriste 1% pare, a pomoćni sustavi koriste 25% ukupno proizvedene energije,

B) bruto i neto učinkovitost elektrane,

C) potreban protok vode za hlađenje u kg/s i m³/s.

$\dot{m}_1 = 2500$ kg/s, $\vartheta_1 = 215$ °C = 488.15 K ⇒ steam

$p_1 = 6$ bar = $6 \cdot 10^5$ Pa

$\eta_{th,polo} = 0.8$

$\eta_{T-SG} = 0.875$

$p_2 = 0.4$ bar = $0.4 \cdot 10^5$ Pa

$\vartheta_4 = 26$ °C

$\Delta T = \vartheta_5 - \vartheta_4 = 10$ °C

a) P=? (1% steam jet ejectors, 25 % of gross output)

b) Bruto η = ?

Neto η = ?

c) $\dot{m}_{Ro} = ?$

$T_1 = 488.15$ K, $p_1 = 0.6$ MPa ⇒ $h_1 = 2883$ kJ/kg (superheated)

$x_2 = 1$, $p_2 = 0.04$ MPa ⇒ $h_2 = 2636$ kJ/kg, $T_2 = 349$ K

a) $P_T = \eta_{th,polo} \cdot \eta_{T-SG} (1-0.01) \cdot \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_4) = 0.8 \cdot 0.875 \cdot 0.99 \cdot 2500 \cdot (2883-2636) = 389$ MW

b) $$\eta_{bruto} = \frac{P_T}{\dot{m}_1 (h_1 - h_4)} = \frac{3.89 \cdot 10^5}{2500(2883-2636)} = 0.63$$

$$\eta_{neto} = \frac{(1-0.25) P_T}{\dot{m}_1 (h_1 - h_4)} = 0.472$$

c) $\dot{m}_1 h_2 + \dot{m}_{Pr} h_4 = \dot{m}_1 h_3 + \dot{m}_{Pr} h_5$

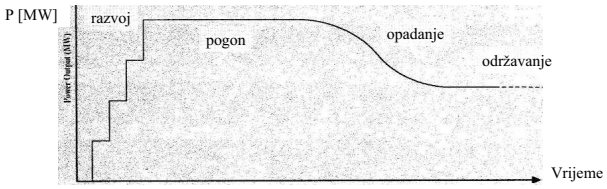
$x_3 = 0$, $p_3 = 0.04$ MPa ⇒ $h_3 = 317.6$ kJ/kg, $T_3 = 349$ K

$$\dot{m}_{Pr} = \dot{m}_1 \cdot \frac{h_2 - h_3}{h_5 - h_4} = \dot{m}_1 \cdot \frac{h_2 - h_3}{c_p (T_5 - T_4)} = 2500 \cdot \frac{2636 - 317.6}{4186 \cdot 10} = 138.5 \, kg/s$$

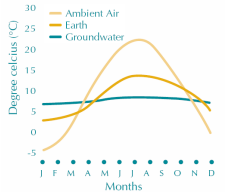
$\dot{V} = \dot{m} \cdot v = 138.5 \cdot 10^{-3} = 0.14$ m³/s

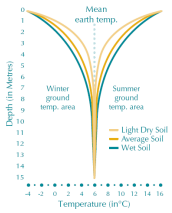
Bušenje, testiranje i korištenje izvora

- Bušotine od ~200 m do ~4 km za određivanje temp. gradijenta i karakteristika nalazišta.
- Nalazište može smanjiti toplinsku snagu nakon nekog vremena (5, 10, 15 godina) i tada treba dodati bušotinu ili koristiti manji kapacitet.
- Planirani radni vijek je oko 30 godina.



Toplinska pumpa i hlađenje



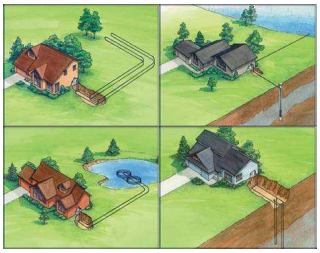


- Temperatura tla
  - konstantna od sunčevog zračenje i zbog slabe toplinske vodljivosti tla
  - konstantnija kroz godinu na većoj dubini i kod manje vlažnog tla
- Time je relativna razlika prema temperaturi okolice razmjerno velika tijekom većeg dijela godine
  - Pogodno za grijanje toplinskom pumpom i
  - Hlađenje klima uređajima

Razne vrste sustava toplinske pumpe

Horizontalni kružni: zauzima najviše zemlje, jeftinije, male zgrade, temperatura varira

Otvoreni: jeftinije, problemi s vodom



Kružni u jezeru: jeftinije, problemi s vodom, uvjetovani lokacijom

Vertikalni: stjenovito tlo, skuplji, treba manje zemlje, visoka efikasnost

Utjecaj na okoliš i recikliranje

- Agresivnost i velika koncentracija otopljenoga u vodi otežavaju rad postrojenja i smanjuju životni vijek
- Rješenje je u izdvajanju i korištenju:
  - H_2S za proizvodnju sumporne kiseline
  - Metali poput cinka kao sirovina
  - Različite naslage za građevinarstvo
- Utjecaj na okoliš se može minimizirati vraćanjem svega u bušotinu uz pozornost da to ne umanji prinos

Ukratko

Korištenje geotermalne energije može imati opravdanje kao cjeloviti gospodarske program koji uključuje proizvodnju el. en., turizam i poljoprivredu.

Ekonomičnost ovisi o karakteristikama bušotine i potporama – rizik može biti veliki.

Udio GE u proizvodnji el. en. nije veliki, ali postoji potencijal za povećanje.

Ekološki prihvatljiv izvor uz dužnu brigu.

Tehnologija je zrela i iskustvo je značajno.

Položaj izvora određuje mjesto korištenja.

Potrošnja električne energije

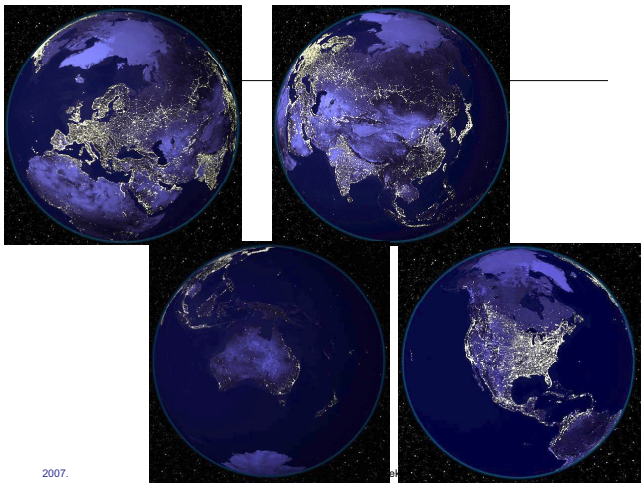
Uvod u potrošnju električne energije
Energijske tehnologije
FER 2007.

Gdje smo:

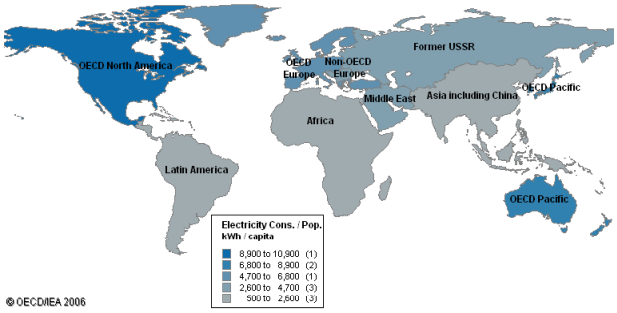
1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Geotermalna energija
8. **Potrošnja električne energije**
9. Prijenos i distribucija električne energije
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Biomasa
13. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
14. Skladištenje energije
15. Utjecaj na okoliš
16. Održivi razvoj i energija

Sadržaj

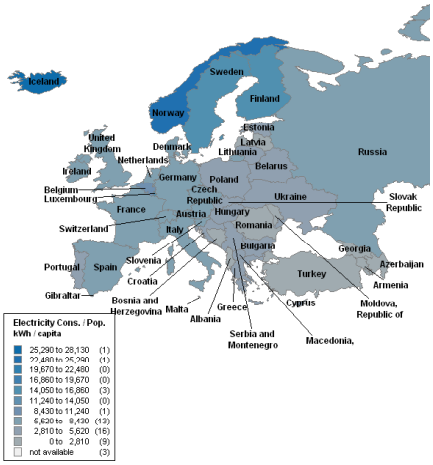
- Uvod u potrošnju električne energije
  - Potrošnja danas i predviđanja porasta potrošnje
  - Veza potrošnje električne energije s ekonomskim faktorima
  - Proizvodnja, uvoz i izvoz električne energije
- Izmjenični sustavi
  - Trošila u izmjeničnim sustavima
  - Osnovne podjele trošila
  - Napon, struja, snaga
  - Djelatna, jalova i prividna snaga



Potrošnja električne energije po stanovniku

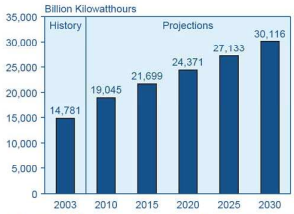


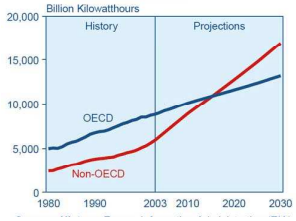
Potrošnja električne energije po stanovniku



Predviđanje porasta potrošnje

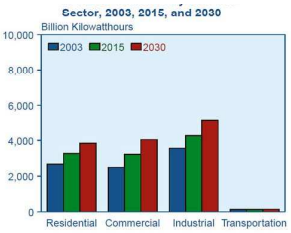
- ukupno
- usporedba OECD i ostale zemlje

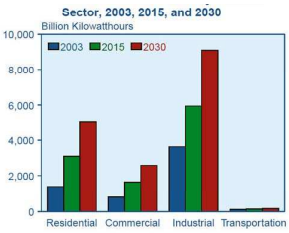




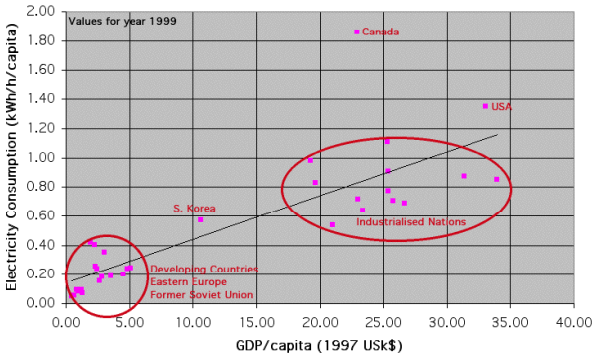
Predviđanje porasta potrošnje

- OECD
- ostale zemlje

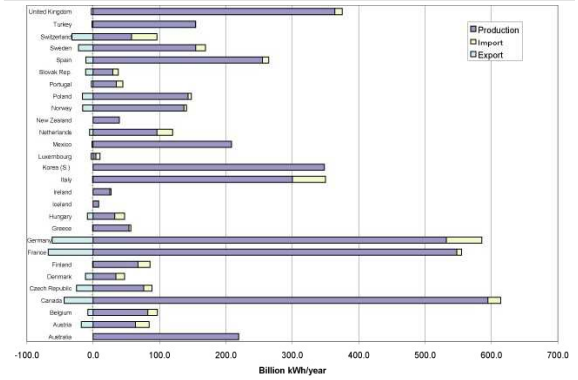




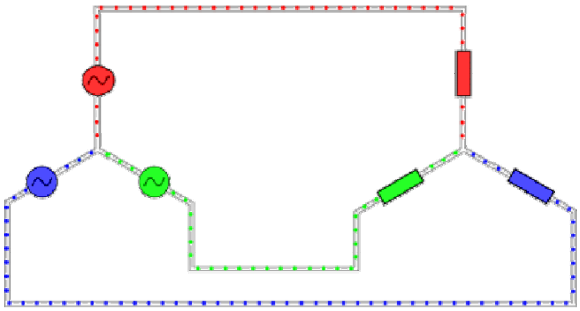
Potrošnja i dohodak



Proizvodnja, uvoz i izvoz električne energije

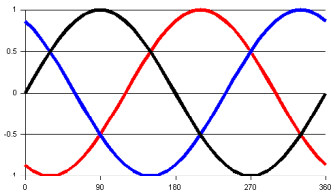


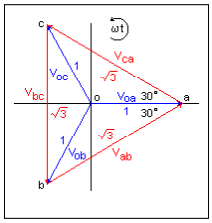
Trofazni izmjenični sustav



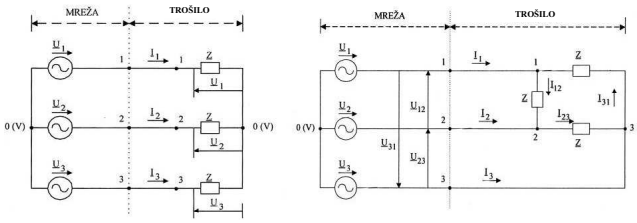
Generator Trofazno trošilo

Napon u trofaznim izmjeničnim sustavima





Spajanje trošila "na mrežu"



Osnovni pojmovi i podjele

Trošilo
- uređaj koji električnu energiju pretvara u neki korisni oblik energije (npr. toster)

Potrošač
- pravna ili fizička osoba spojena na električnu mrežu (npr. Fakultet)

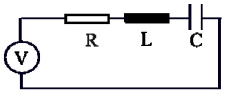
Neke vrste potrošača
- kućanstva (rezidencijalni)
- trgovine/usluge (komercijalni)
- javna potrošnja (rasvjeta)
- industrija

Prema priključku
- jednofazna trošila
  - većina trošila u kućanstvima i uredima
- višefazna trošila
  - veliki motori

Podjela prema vrsti
- omska trošila
  - toster, žarulja…
- elektronički uređaji
  - računalo, televizor…
- motori
  - pumpa, bušilica, hladnjak, klima uređaj…

Napon, struja, snaga

$$v = V_{\max}\cos(\omega t)$$
$$i = I_{\max}\cos(\omega t - \theta)$$
$$p = vi = V_{\max} I_{\max}\cos(\omega t)\cos(\omega t - \theta)$$



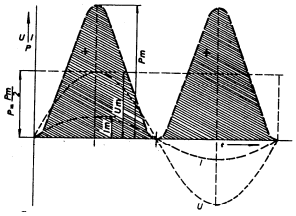
Kružna frekvencija
- ω=2πf

Frekvencija
- f = 50 Hz (Europa…)
- f = 60 Hz (Amerika…)

- Za napon se koriste oznake V i U, pri čemu se sa V obično označava fazni, a sa U linijski napon
- Malo slovo obično označava vremenski promjenjive veličine, a veliko fazore

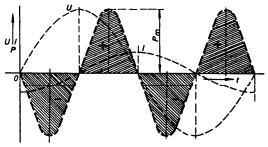
Djelatna snaga

- utjecaj faznog pomaka između struje i napona na vrijednosti snage u krugu izmjenične struje najlakše je razmatrati na grafičkom prikazu trenutnih vrijednosti snaga u toku jedne periode

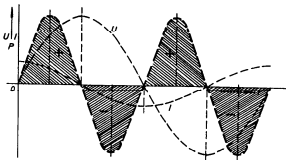


- vremenski dijagram snage za strujni krug s radnim otporom - struja i napon su u fazi (cos φ=1)
- trenutne snage su pozitivnog iznosa u intervalu vrijednosti [0,P_{max}], gdje je P srednja vrijednost snage u toku jedne periode
- snaga preuzeta iz mreže sva se pretvara u koristan rad
  - djelatna, korisna, radna ili aktivna snaga

Jalova snaga



- vremenski dijagram snage za strujni krug u kojem je samo induktivitet (struja kasni za naponom za 90°)

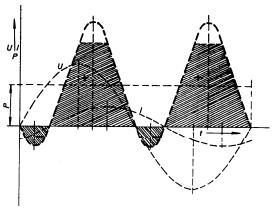


- vremenski dijagram snage za strujni krug u kojem je samo kapacitet (struja prethodi naponu za 90°)

Jalova snaga (nastavak)

- u oba prethodna slučaja cos φ=0
- trenutne vrijednosti snaga kreću se između +/- S_{max}
- trošilo u intervalima pozitivnog predznaka snage uzima energiju iz mreže i energija se pretvara u energiju magnetskog polja
- u intervalima negativnog predznaka snage, energija se vraća u mrežu
- srednja snaga tijekom jedne periode je nula (0)
- snaga oscilira unutar kruga generator-trošilo i ne vrši koristan rad
  - jalova ili reaktivna snaga

Djelatna, jalova i prividna snaga

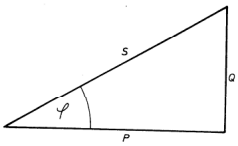


vremenski dijagram snage za strujni krug sa radnim otporom i induktivitetom (općenit slučaj)

trenutne vrijednosti snage imaju pozitivne i negativne vrijednosti s tim da su intervali pozitivne snage veći od intervala negativne snage - postoji radna komponenta snage koja je uvijek pozitivna

Djelatna, jalova i prividna snaga

- intervali negativne snage su veći kod većeg faznog pomaka između struje i napona
- trošilo u takvim slučajevima iz mreže uzima veću snagu nego što je potrebna za vršenje korisnog rada - iz mreže se uzima jalova snaga
- ukupna snaga koju trošilo uzima iz mreže zove se prividna snaga
- omjer radne i prividne snage naziva se faktor snage (cos φ)



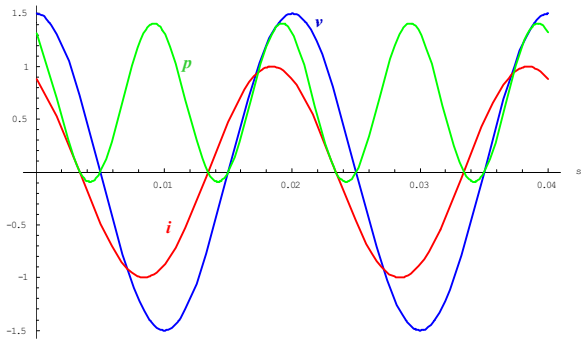
trokut snaga

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

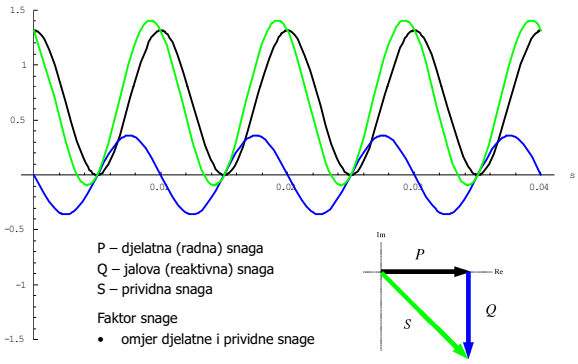
$$P = S \cdot \cos\varphi = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$Q = S \cdot \sin\varphi = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

Primjer
Napon, struja, snaga



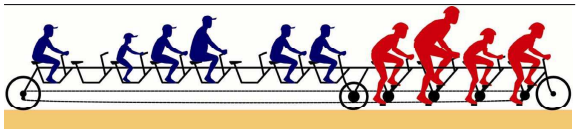
Primjer
Djelatna, jalova i prividna snaga



P – djelatna (radna) snaga
Q – jalova (reaktivna) snaga
S – prividna snaga

Faktor snage
- omjer djelatne i prividne snage

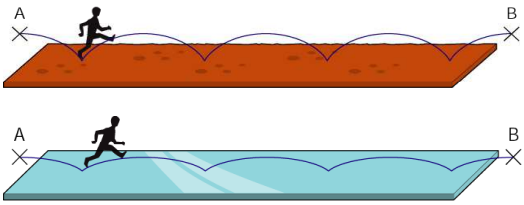
Jalova snaga – analogija 1



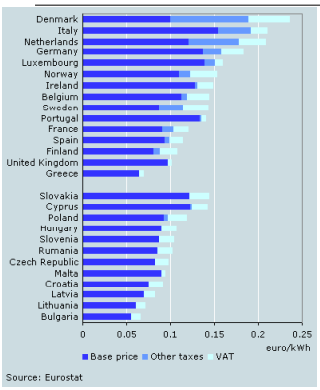
- Vozači – elektrane
- Putnici – potrošači
- Jalova snaga – naginjanje putnika, što vozači moraju kompenzirati naginjanjem na suprotnu stranu

Jalova snaga – analogija 2

- Trčanje po različitim podlogama
- Što je podloga "elastičnija" trkač će više skakati



Kilovatsat



Što s 1 kWh?
- ispeglati 10 košulja
- skuhati ručak za četiri osobe
- gledati televiziju 7 sati
- oprati 4,5 kg rublja
- zagrijati 80 litara vode za 10°C
- osvjetljavati manju sobu 10 sati (žaruljom od 100W)
- skuhati 70 šalica kave

Za dodatne informacije
- prenesite tisuću vreća cementa iz prizemlja na drugi kat

Zaključak

- Vidjeli smo osnove podatke o potrošnji i porastu potrošnje električne energije
- Vidjeli smo osnovne karakteristike trošila u izmjeničnim sustavima i karakteristike napona, struja i snaga izmjeničnih trošila

Potrošnja električne energije

Dnevna krivulja opterećenja
Predviđanje porasta opterećenja
Energijske tehnologije
FER 2007.

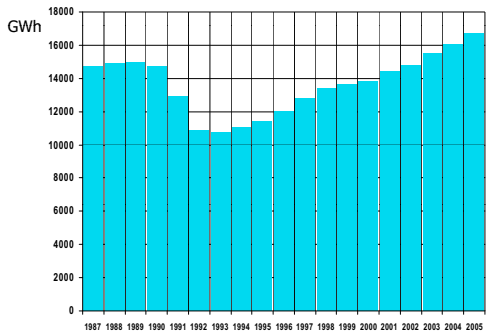
Gdje smo:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Geotermalna energija
8. **Potrošnja električne energije**
9. Prijenos i distribucija električne energije
10. Energija Sunca
11. Energija vjetra
12. Biomasa
13. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
14. Skladištenje energije
15. Utjecaj na okoliš
16. Održivi razvoj i energija

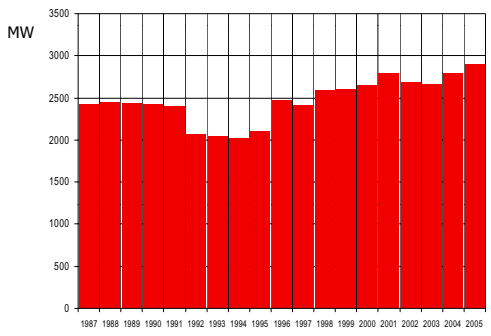
Sadržaj

- Karakteristike potrošnje/opterećenja
- Dnevni dijagram opterećenja
- Pokrivanje dnevnog dijagrama opterećenja (tzv. "vozni red" elektrana)
- Predviđanje porasta potrošnje

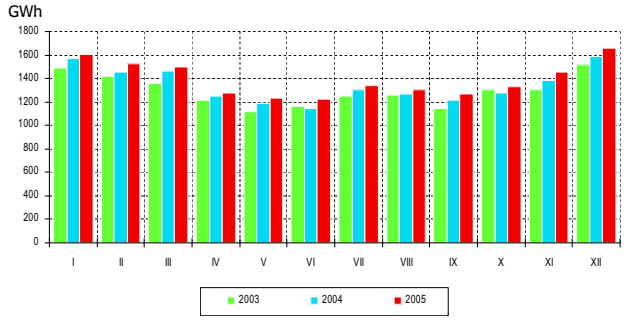
Ukupna godišnja potrošnja u HR



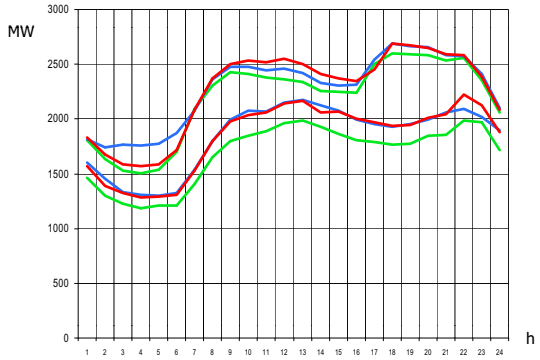
Vršno godišnje opterećenje HR sustava



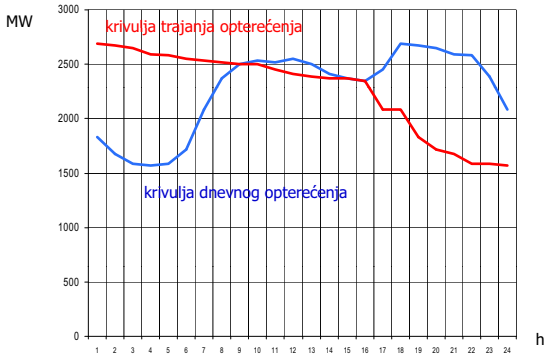
Ukupna mjesečna potrošnja u HR



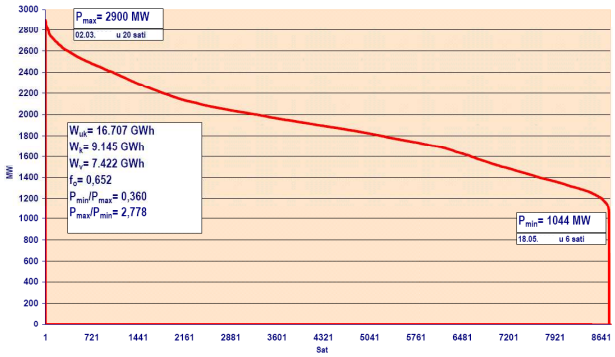
Neke dnevne krivulje opterećenja



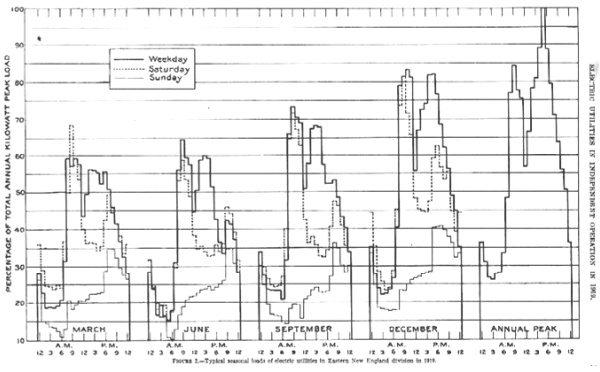
Krivulja dnevnog opterećenja i krivulja trajanja opterećenja



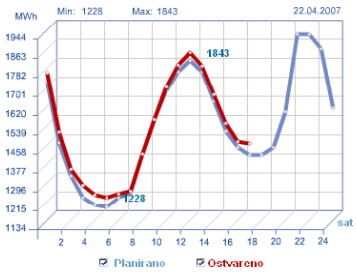
Godišnja krivulja trajanja opterećenja 2005



Dnevna krivulja opterećenja
Opskrbno područje "East New England", Boston - 1919



Dnevna krivulja opterećenja - Hrvatska danas



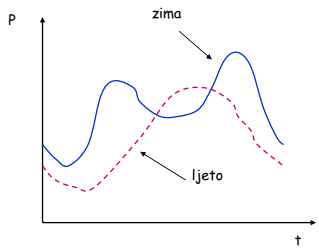
- http://www.hep.hr/ops/hees/dijagram.aspx

Vremenska promjenjivost opterećenja

- godišnje
  - opterećenje uglavnom raste (osim kada nema ratova, prirodnih katastrofa i sl.) zbog
    - povećanja broja stanovnika
    - porasta životnog standarda
- mjesečno
  - zbog godišnjih doba i drugih ciklusa (npr. sezona odmora i sl.)
- dnevno
  - ovisno o danu u tjednu (radni dan, subota, nedjelja) i
  - dobu dana
    - električna energija ne koristi se jednoliko tijekom dana

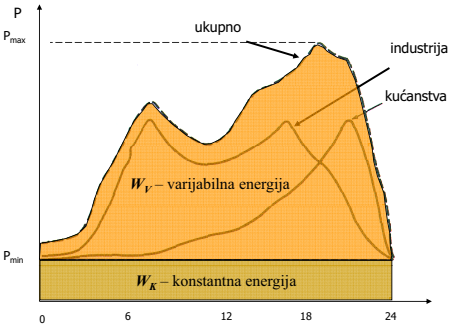
Ovisnosti opterećenja

- geografska lokacija
- godišnje doba
- doba dana
- vrsta potrošača
  - kućanstva (rezidencijalni)
  - uprava/trgovine/usluge (komercijalni)
  - javna potrošnja (npr. rasvjeta)
  - industrija
- utjecaj ostalih energenata
- veliki događaji



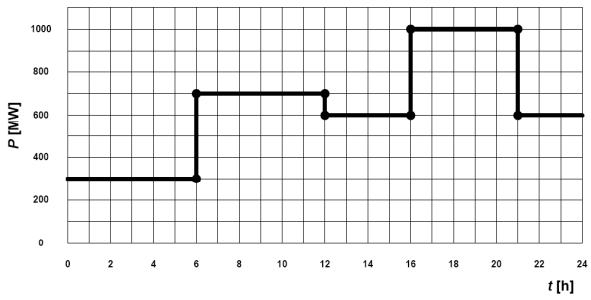
Dnevna krivulja opterećenja

$$W_K = 24 \cdot P_{\min}$$
$$W_V = W - W_K$$
$$m = \frac{W}{24 \cdot P_{\max}}$$
$$m_D = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$$

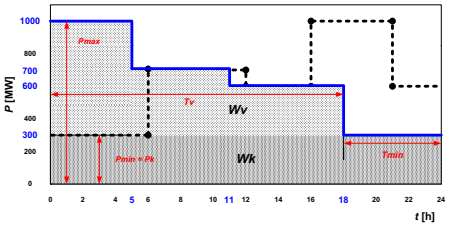


m - faktor opterećenja; m_D - faktor ravnomjernosti

Aproksimacija dnevne krivulje opterećenja



Aproksimacija dnevnog dijagrama opterećenja



$$W_K = 24 \cdot P_K$$
$$W_V = W - W_K$$
$$m = \frac{W}{24 \cdot P_{\max}}$$
$$m_D = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$$

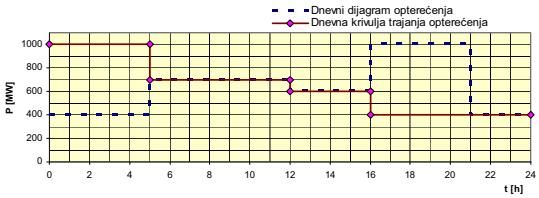
$$T_{P\max} = \frac{W}{P_{\max}} < 24\ \text{h}$$

Dnevni dijagram opterećenja

Dnevna krivulja trajanja opterećenja

P_{min}, P_K	min. snaga, konstantna snaga (ne moraju biti jednake)
P_{max}	maks. snaga
W	ukupna dnevna potrošena energija
m	faktor opterećenja
m_D	faktor ravnomjernosti
W_K	konstantna energija
W_V	varijabilna energija
T_{Pmax}	vrijeme korištenja maksimalne snage

1. Prema aproksimativnim podacima dnevnog opterećenja (21-5 h = 400 MW, 5-12 h = 700 MW, 12-16 = 600 MW, 16-21 = 1000 MW) odredite: minimalnu i maksimalnu snagu, ukupno, konstantno i promjenjivo dnevno potrošenu energiju, faktor opterećenja, te vrijeme korištenja maksimalne snage. Potrebno je i nacrtati dnevnu krivulju trajanja opterećenja.



P_{min} = 400 MW, P_{max} = 1000 MW

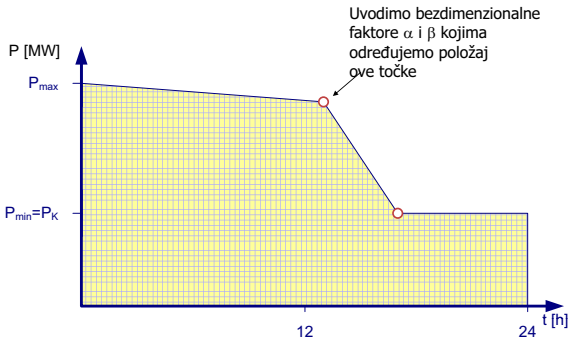
W = 8 h · 400 MW + 7 h · 700 MW + 4 h · 600 MW + 5 h · 1000 MW = 15500 MWh

W_K = 24 h · P_{min} = 24 h · 400 MW = 9600 MWh

W_V = W - W_K = 5900 MWh

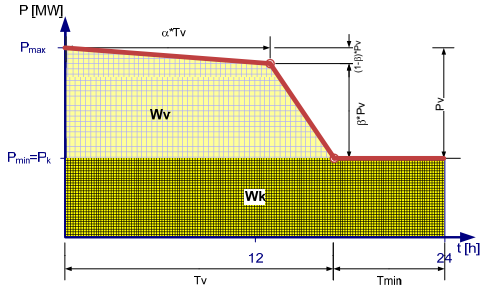
$$m = \frac{W}{24 \cdot P_{\max}} = 0{,}65 \qquad T_{P\max} = \frac{W}{P_{\max}} = 15{,}5\ \text{h}$$

Aproksimacija dnevne krivulje opterećenja s tri pravca

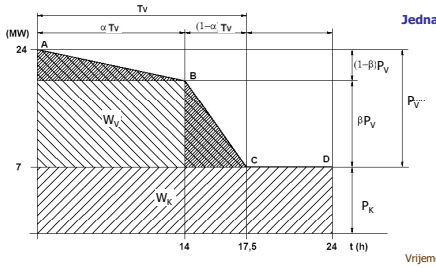


Aproksimacija dnevne krivulje opterećenja s tri pravca

Faktori α i β određeni su zahtjevom da količina varijabilne energije u aproksimiranoj krivulji trajanja opterećenja bude jednaka količini te energije u stvarnoj krivulji trajanja opterećenja.



Aproksimacija dnevne krivulje opterećenja s tri pravca



α=0.8 i β=0.65

Jednadžba pravca kroz dvije točke

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1)$$

I dio krivulje (dužina AB)

$$0 \le t \le \alpha T_V = 14h$$

točka B

$$(x_1, y_1) = (\alpha T_V, P_K + \beta P_V)$$

točka A

$$(x_2, y_2) = (0, P_K + P_V)$$

$$y = P(t)$$

$$x = t$$

Vrijeme t je u satima, a snaga u *MW*.

$$P(t) - (P_K + P_V) = \frac{(P_K + \beta \cdot P_V) - (P_K + P_V)}{\alpha \cdot T_V} \cdot t \quad \Rightarrow \quad P(t) = P_K + P_V - \frac{P_V(1-\beta)}{\alpha T_V} t = 7 + 17 - \frac{17 * (1 - 0,65)}{0,8 * 17,5} * t = \underline{24 - 0,425 * t\,[MW]}$$

II. dio krivulje (dužina BC)

$$\alpha T_V = 14h \le t \le T_V = 17,5h$$

točka B

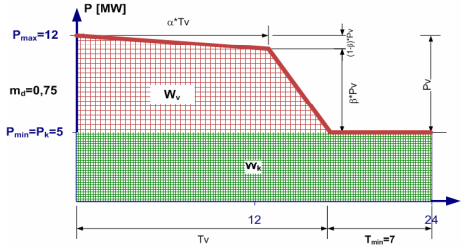
$$(x_1, y_1) = (\alpha T_V, P_K + \beta P_V)$$

točka C

$$(x_2, y_2) = (T_V, P_K)$$

$$P_K = ?$$

2. Dnevna krivulja trajanja opterećenja aproksimirana je s tri pravca, prema slici.
   a) Odrediti (α + β) kao funkciju poznatih veličina (P_v, W_v i T_v).
   b) Navesti područje vrijednosti za faktore α i β.



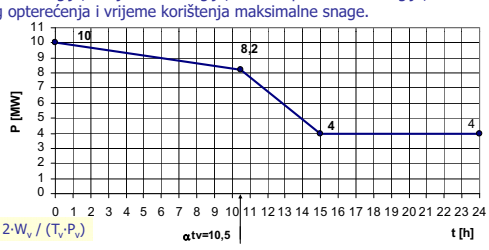
$W_v = [(1-\beta)\, P_v \cdot \alpha \cdot T_v + \cdot \beta \cdot P_v \cdot (1-\alpha) \cdot T_v] / 2 + \alpha \cdot T_v \cdot \beta \cdot P_v$

ili $W_v = [(1-\beta) \cdot P_v \cdot \alpha \cdot T_v - \beta \cdot P_v \cdot (1-\alpha) \cdot T_v)] / 2 + \beta \cdot T_v \cdot P_v$

sređivanjem . . . => $(\alpha + \beta) = 2 \cdot W_v / (T_v \cdot P_v)$

$0 \le \alpha \le 1; \quad 0 \le \beta \le 1; \quad 0 \le (\alpha + \beta) \le 2;$

3. Dnevni dijagram opterećenja nekog elektroenergetskog sustava određuju sljedeći podaci: P_{max} = 10 MW, P_V = 6 MW, T_v = 15 h, α = β = 0,7. Potrebno je nacrtati dnevni dijagram trajanja opterećenja, odrediti iznose konstantne energije, varijabilne energije, dnevno potrošene energije, faktora dnevnog opterećenja i vrijeme korištenja maksimalne snage.



$(\alpha + \beta) = 2 \cdot W_v / (T_v \cdot P_v)$

$P_{min} = P_{max} - P_V = 4$ MW

$W_K = 24$ h $\cdot P_{min} = 24$ h $\cdot 4$ MW $= 96$ MWh

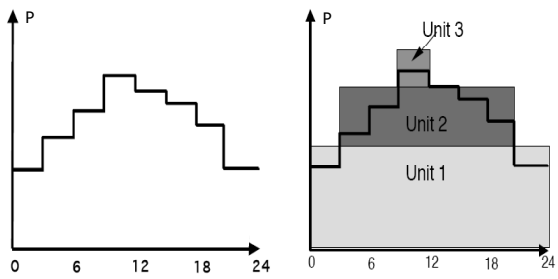
$W_v = (\alpha + \beta) \cdot T_v \cdot P_v / 2 = (0,7+0,7) \cdot 15 \cdot 6/2 = 63$ MWh

$W = W_V + W_K = 159$ MWh

$$m = \frac{W}{24 \cdot P_{max}} = 0,66$$

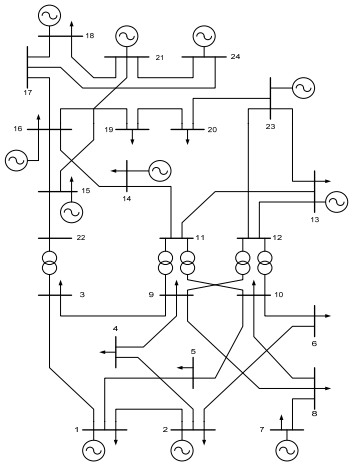
$$T_{Pmax} = \frac{W}{P_{max}} = 15,9 \text{ h}$$

Pokrivanje dnevnog opterećenja

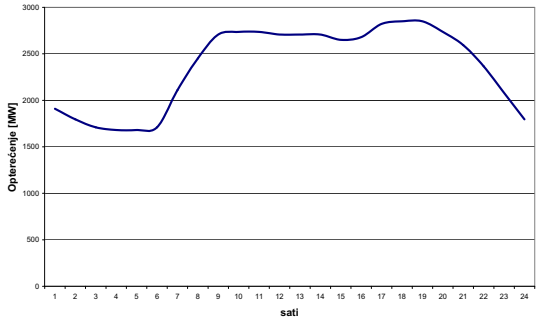


Primjer 1
Test mreža

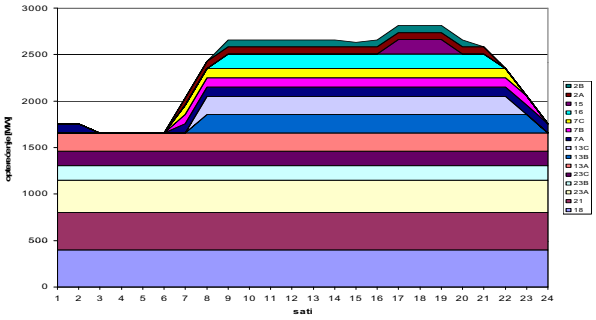
- *IEEE Reliability Test System*
- 24 čvorišta
- 34 grane
- raspoloživa snaga 3405 MW



Primjer 1 – Krivulja predviđenog dnevnog opterećenja



Primjer 1 - Unaprijed pripremljeni raspored proizvodnje (grafički prikaz)



Primjer 1 - Unaprijed pripremljeni raspored proizvodnje (tabelarni prikaz)

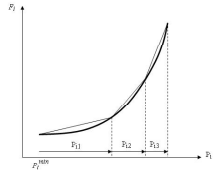
Sat	Opterećenje		Agregati														
	%	MW	18	21	23A	23B	23C	13A	13B	13C	7A	7B	7C	16	15	2A	2B
1	67	1910	400	400	350	155	155	197			100						
2	63	1796	400	400	350	155	155	197			100						
3	60	1710	400	400	350	155	155	197									
4	59	1682	400	400	350	155	155	197									
5	59	1682	400	400	350	155	155	197									
6	60	1710	400	400	350	155	155	197									
7	74	2109	400	400	350	155	155	197			100	100	100			76	
8	86	2451	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100			76	
9	95	2708	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	76
10	96	2736	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	76
11	96	2736	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	76
12	95	2708	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	76
13	95	2708	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	76
14	95	2708	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	76
15	93	2651	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	50
16	94	2679	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	76
17	99	2822	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155	155	76	76
18	100	2850	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155	155	76	76
19	100	2850	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155	155	76	76
20	96	2736	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	76
21	91	2594	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100	155		76	
22	83	2366	400	400	350	155	155	197	197	197	100	100	100				
23	73	2081	400	400	350	155	155	197	197		100	100					
24	63	1796	400	400	350	155	155	197			100						

Primjer 2 – stvarni rezultati optimiranja "voznog reda" elektrana za sustav od 10 elektrana

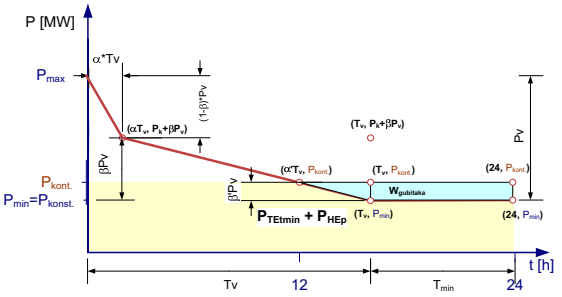
Time (1–24 hours) (1/0: on/off state)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 3	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Unit 4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
Unit 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 6	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Unit 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Unit 8	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Unit 9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Pokrivanje dnevnog opterećenja - složeni optimizacijski postupak

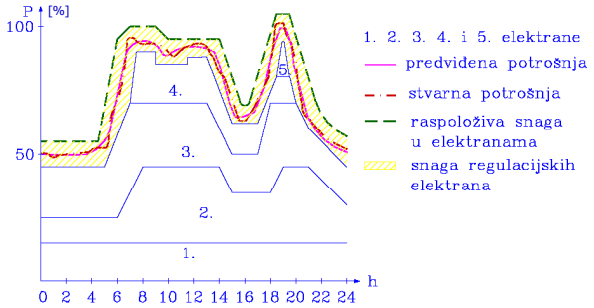
- Standardne elektrane (nuklearne, ugljen, nafta, plin)
  - cijena pokretanja elektrane
  - fiksni trošak pogona
  - varijabilni trošak (trošak po MW)
  - pogonska ograničenja (P_{max}, P_{min}, brzina promjene)
- Protočne hidroelektrane, vjetroelektrane...
  - pogonska ograničenja (raspoloživost "goriva")
- Akumulacijske hidroelektrane
  - mogućnost pohrane energije
  - ograničenje rezervoara
- Reverzibilne hidroelektrane
  - imaju dva spremnika vode
  - tijekom niskog opterećenja mogu povećavati zalihe vode u gornjem spremniku trošenjem energije iz jeftinih elektrana



Preljev protočnih hidroelektrana



Pokrivanje dnevnog opterećenja



4. Dnevna krivulja trajanja opterećenja nekog elektroenergetskog sustava aproksimirana je s tri pravca. Poznati su sljedeći podaci o krivulji: P_{max} = 1000 MW, P_K = 500 MW, T_V = 18 h, W = 17000 MWh, β = 0,5. Potrebno je nacrtati dijagram trajanja opterećenja i razmjestiti u njemu sljedeće elektrane:

NE: P_{NEn} = 125 MW; c_{NE} = 25 lp/kWh
TE1: P_{TE1n} = 350 MW; P_{TE1min} = 25 MW; c_{TE1} = 35 lp/kWh
TE2: P_{TE2n} = 250 MW; P_{TE2min} = 50 MW; c_{TE2} = 30 lp/kWh
HE1: P_{HE1} = 200 MW; protočna
HE2: P_{HE2} = 100 MW; protočna

Rješenja:

$W_K = 24h \cdot P_K = 24h \cdot 500MW = 12000$ MWh

$W_V = W - W_K = 17000-12000 = 5000$ MWh

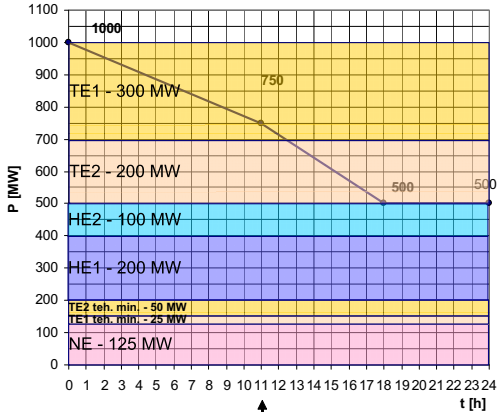
$(\alpha + \beta) = 2 \cdot W_v / (T_v \cdot P_v) \rightarrow \alpha = 2 \cdot W_v / (T_v \cdot P_v) - \beta = 0{,}6111$

$\alpha \cdot Tv = 11$ h

$\Sigma P_i - P_{max} = 1025 - 1000 = 25 < P_{TEi.min}$ - sve elektrane trebaju proizvoditi!

Raspored: P_{NE}, P_{TE2min}, P_{TE1min}, P_{HE1}, P_{HE2}, $P_{TE2\text{-}ostalo}$, P_{TE1}

4. Dijagram trajanja opterećenja i raspored elektrana:

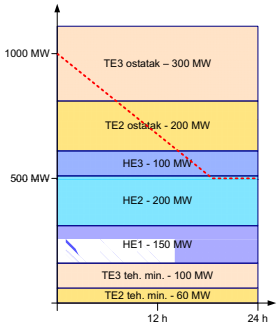


5. Iz dnevnog dijagrama opterećenja nekog elektroenergetskog sustava poznate su maksimalna i minimalna snaga i iznose 1000 i 500 MW. Potrebno je smjestiti termoelektrane i protočne hidroelektrane u dnevnoj krivulji trajanja opterećenja ako su o njima poznati sljedeći podaci:

TE1: P_{TE1n} = 150 MW; P_{TE1min} = 50 MW; c_{TE1} = 50 lp/kWh
TE2: P_{TE2n} = 260 MW; P_{TE2min} = 60 MW; c_{TE2} = 20 lp/kWh
TE3: P_{TE3n} = 400 MW; P_{TE3min} = 100 MW; c_{TE3} = 30 lp/kWh
HE1: P_{HE1n} = 150 MW
HE2: P_{HE2n} = 200 MW
HE3: P_{HE3n} = 100 MW

Rješenja:

- Ukupna instalirana snaga: 1260 MW > P_{max}
- Snaga najskuplje termoelektrane nije potrebna za pokrivanje potrošnje
- Ukupna raspoloživa snaga bez TE1 iznosi 1110 MW > P_{max}
- TE3, najskuplja od preostalih termoelektrana i stoga neće raditi punim kapacitetom
- Zbrojene snage protočnih hidroelektrana i snage tehničkih minimuma TE2 i TE3 iznose 610 MW i veće su od P_{min}, što znači da će se višak vode preliti preko brane (ili nekako drugačije iskoristiti, npr. izvoz)



Raspored agregata u pogonu:
$TE2_{min}$, $TE3_{min}$, HE1, HE2, HE3, $TE2_{ostatak}$, $TE3_{ostatak}$

TE1 će ostati izvan pogona

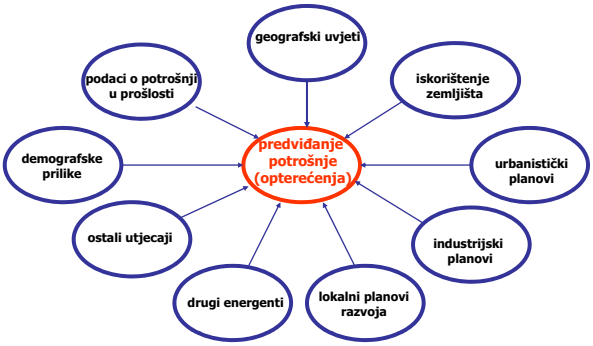
Predviđanje porasta potrošnje električne energije

Za određeno područje predviđamo:
- iznos opterećenja
- vrijeme pojave opterećenja

Prema vremenskom razdoblju planiranja
- kratkoročne (<5 god)
- srednjoročne
- dugoročne (~20 god)

Prema funkcijskoj zavisnosti opterećenja
- nezavisne metode
  - na temelju ponašanja potrošnje u prošlosti (kao funkcije vremena, npr. trend)
- zavisne metode
  - na temelju poznavanja ovisnosti potrošnje o drugim faktorima (BDP, porast stanovništva, drugi energenti…)
  - određuju buduće opterećenje u funkciji nekog utjecajnog faktora koji je karakterističan za razmatrano područje (simulacijske metode)

Utjecaji na predviđanje opterećenja

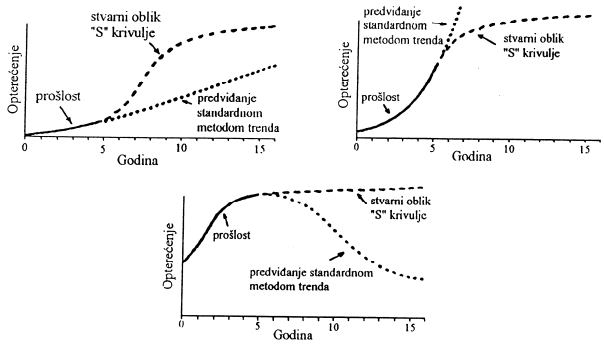


Metode trenda

1. linearni zakon porasta (pravac) $p_1(t) = at + b$
2. logaritamski pravac $\log p_2(t) = at + b$
3. eksponencijalni zakon porasta $p_3(t) = e^{(at+b)}$ *ili* $p_3(t) = b(1+a)^t$
4. polinomni zakon porasta $p_4(t) = b + a_1 t + a_2 t^2 + \ldots + a_n t^n$
5. logaritamski polinomni zakon porasta $p_5(t) = b + a_1 \log(t) + a_2 \log^2(t) + \ldots + a_n \log^n(t)$
6. logistički zakon porasta $p_6(t) = \frac{p_z}{1+e^{(b-at)}}$
7. Gompertzov zakon porasta $p_7(t) = p_z e^{-be^{-at}}$

- krivulje porasta potrošnje ponekad nazivamo i S krivuljama zbog njihovog karakterističnog izgleda
- S krivulje u dijelovima možemo nadomjestiti krivuljama gore

Problemi kod predviđanja opterećenja



6. U zamišljenom gradu porast maksimalnog opterećenja električne energije povećava se 2% godišnje, a 2005. godine je iznosilo 1500 MW. Procijenite opterećenje 2010 godine.

Rješenje:

$$P_{max2010} = 1500*(1,02)^5 = 1656 \text{ MW}$$

7. U zamišljenom gradu porast maksimalnog opterećenja električne energije povećava se linearno s brojem stanovnika, a broj stanovnika se povećava po logaritamskom pravcu.
2005 godine: 1500 MW, 1000000 stanovnika
2000 godine: 1200 MW, 900000 stanovnika
Procijenite opterećenje 2010. godine.

$$p(s) = as + b$$
$$\log s(t) = ct + d$$

Rješenje:

Prvo treba provući logaritamski pravac i odrediti broj stanovnika u **2010. godini**.

0. godina – 900000 stanovnika
5. godina – 1000000 stanovnika
10. godina → ? stanovnika

$$\log 900000 = c \cdot 0 + d$$
$$\log 1000000 = c \cdot 5 + d$$
$$d = 5.95424; \quad c = 0.0091515$$
$$s(10) = 10^{c \cdot 10 + d} = 1111111$$

Grad će 2010. godine imati **1111111 stanovnika**.

Zatim treba provući pravac kroz
900000 stanovnika – 1200 MW
1000000 stanovnika – 1500 MW
1111111 stanovnika 2010 → ? MW

$$1200 = a \cdot 900000 + b$$
$$1500 = a \cdot 1000000 + b$$
$$a = 0.003 \quad b = -1500$$
$$p(1111111) = a \cdot 1111111 + b = 1833$$

Opterećenje će biti **1833 MW**.

Zaključak

- Razmotrili smo karakteristike potrošnje i opterećenja, te njihovu promjenjivost u vremenu.
- Razmotrili smo i neke faktore koji utječu na porast potrošnje i modele za predviđanje porasta potrošnje.
- Detaljnije smo proučili dnevni dijagram opterećenja i njegove karakteristike, te njegove aproksimacije.
- Razmatrali smo pokrivanje dnevnog opterećenja raspoloživim elektranama u sustavu (tzv. "vozni red" elektrana).
- Opisali smo pristupe predviđanju opterećenja u višegodišnjem razdoblju.