

# Potrošnja električne energije – 2

---

Dnevna krivulja opterećenja

Predviđanje porasta opterećenja

Energijske tehnologije

FER 2008.



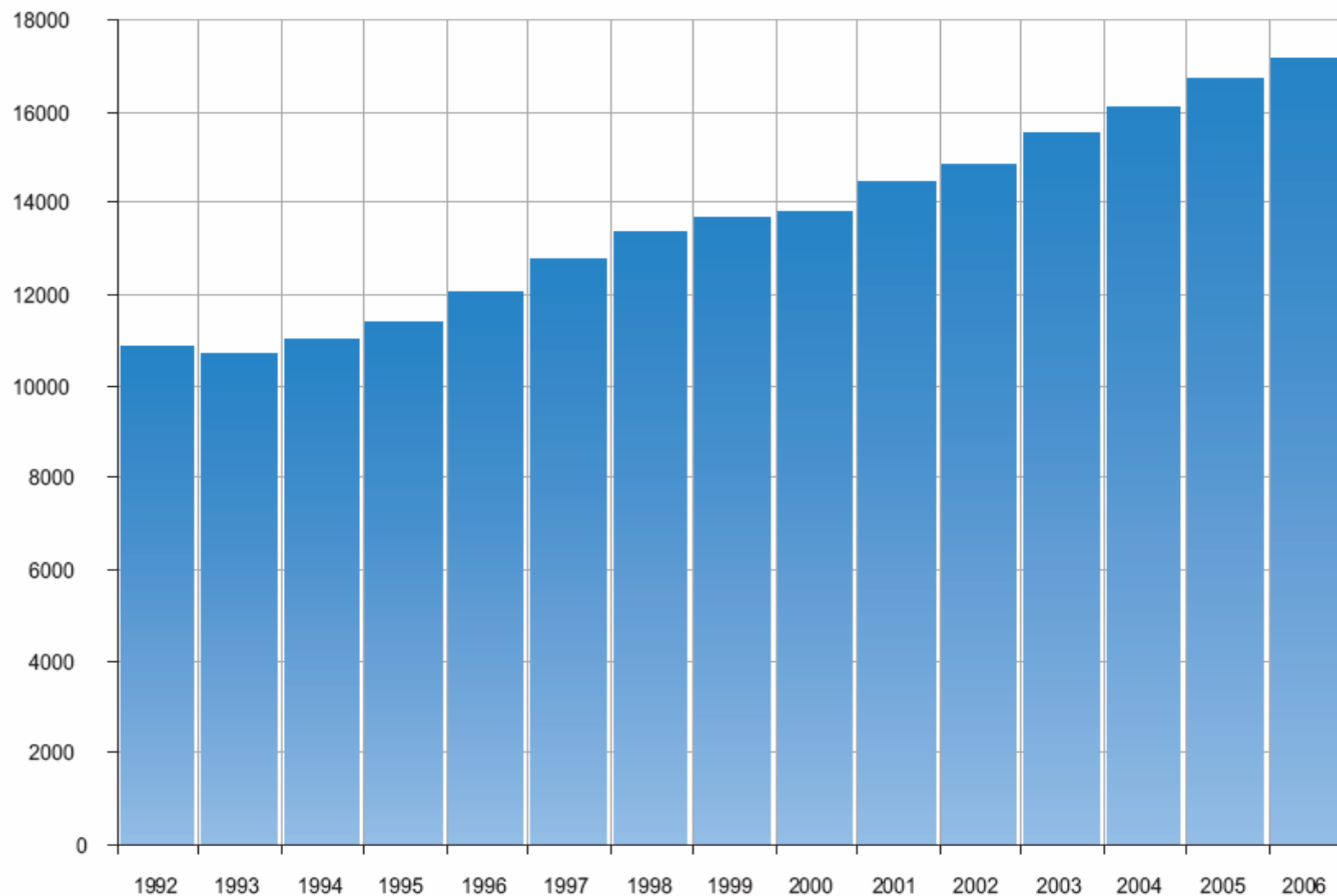
# Gdje smo:

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

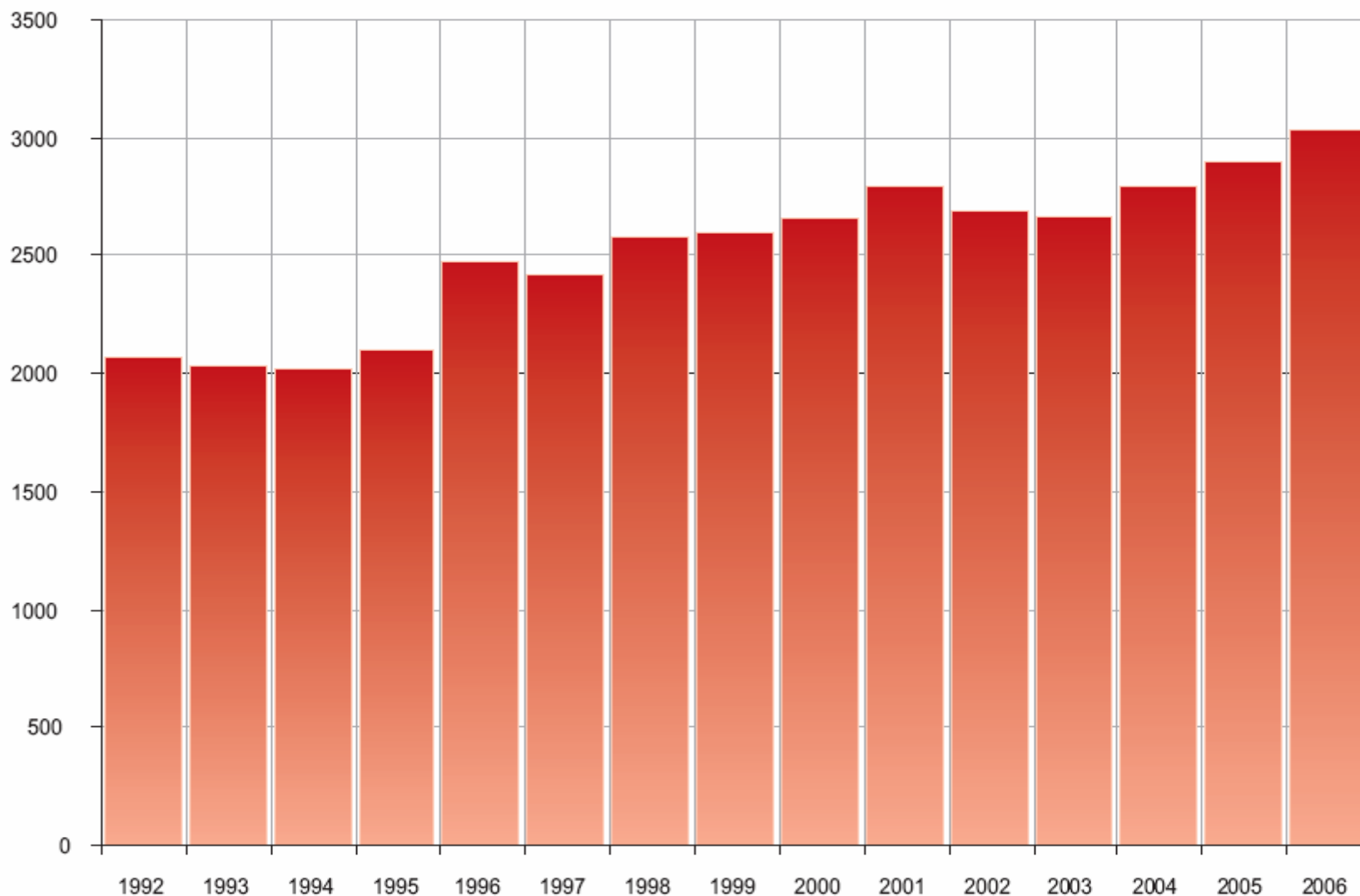
# Sadržaj

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

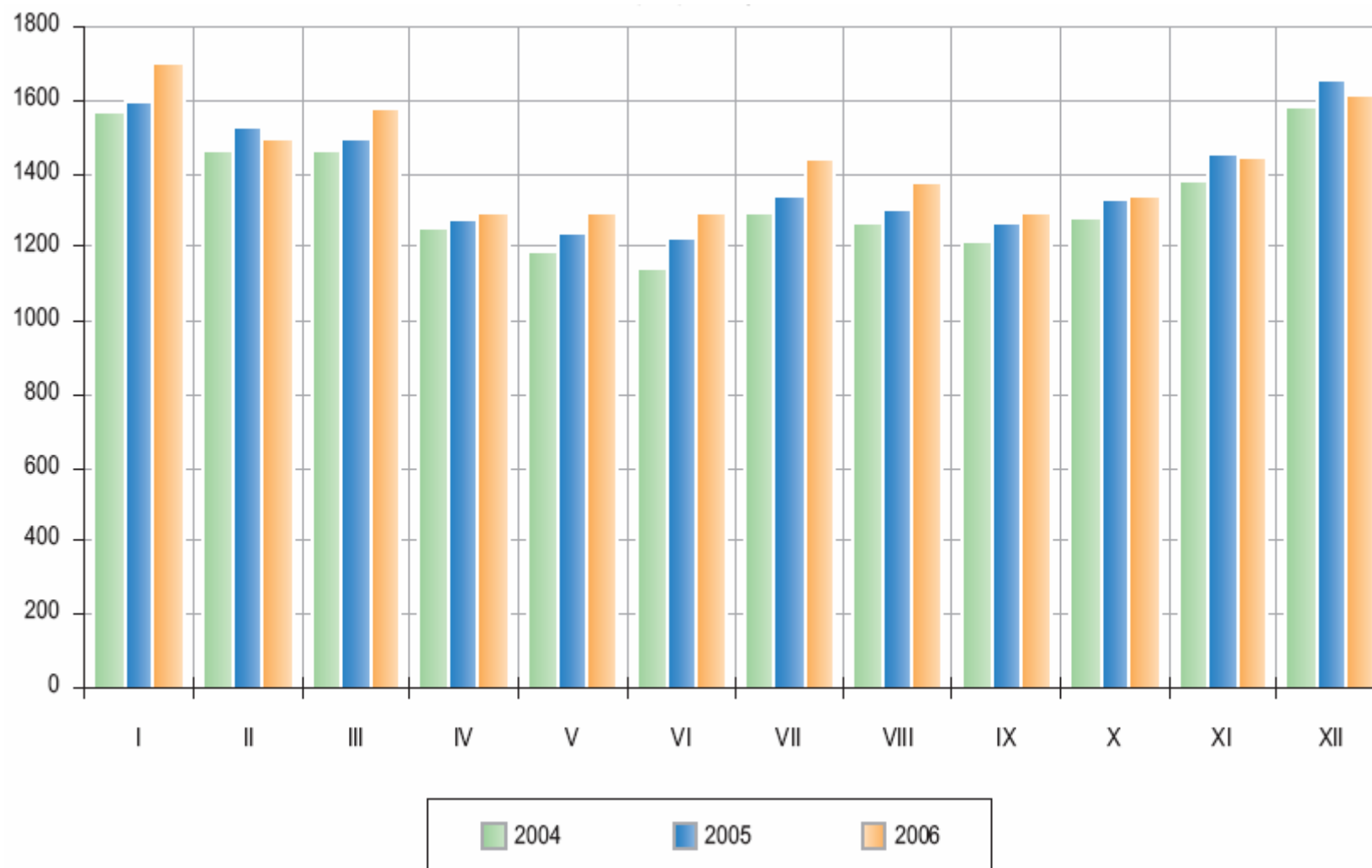
# Ukupna godišnja potrošnja u HR (GWh)



# Vršno godišnje opterećenje HR sustava (MW)

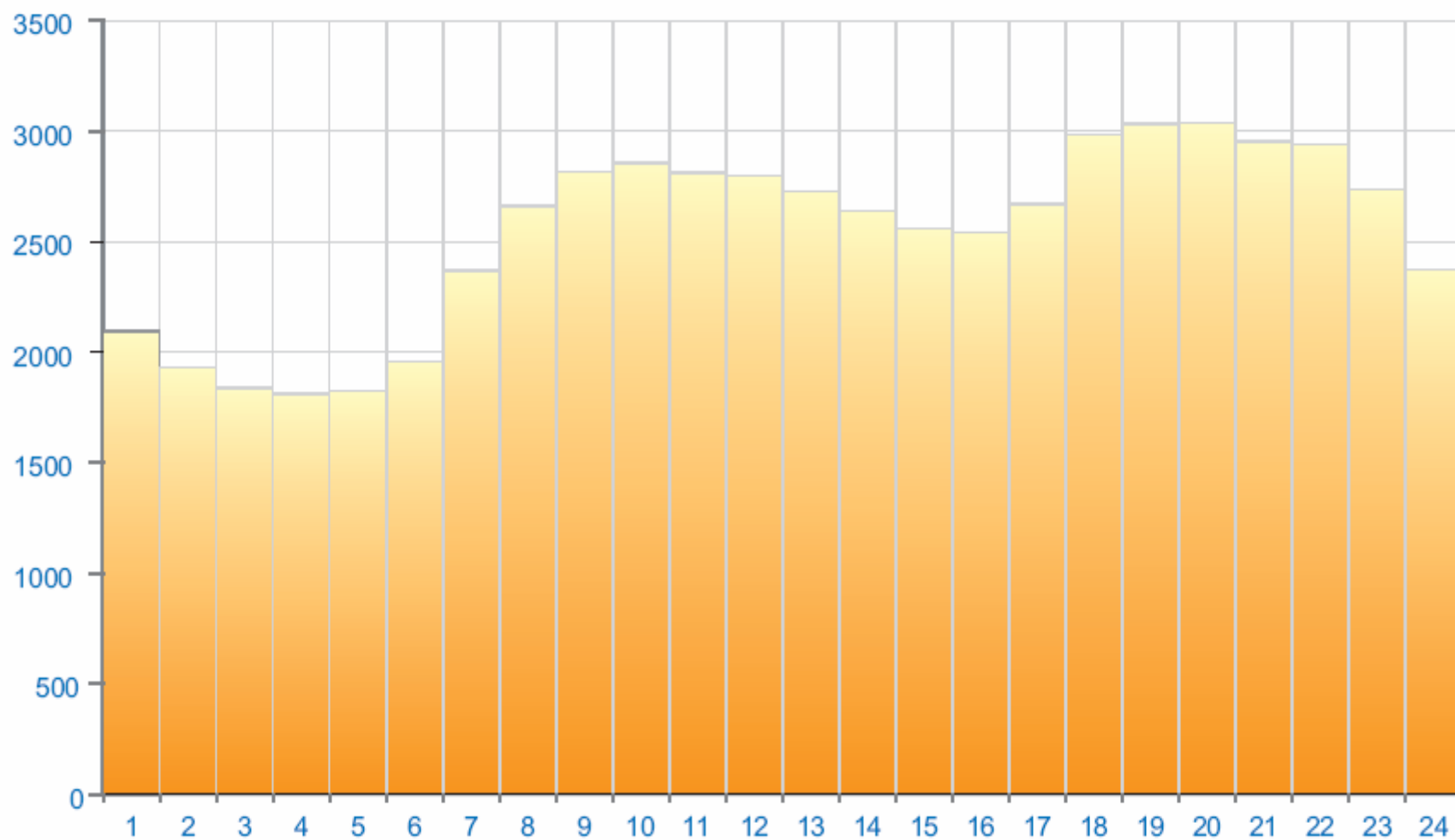


# Ukupna mjesečna potrošnja u HR (GWh)

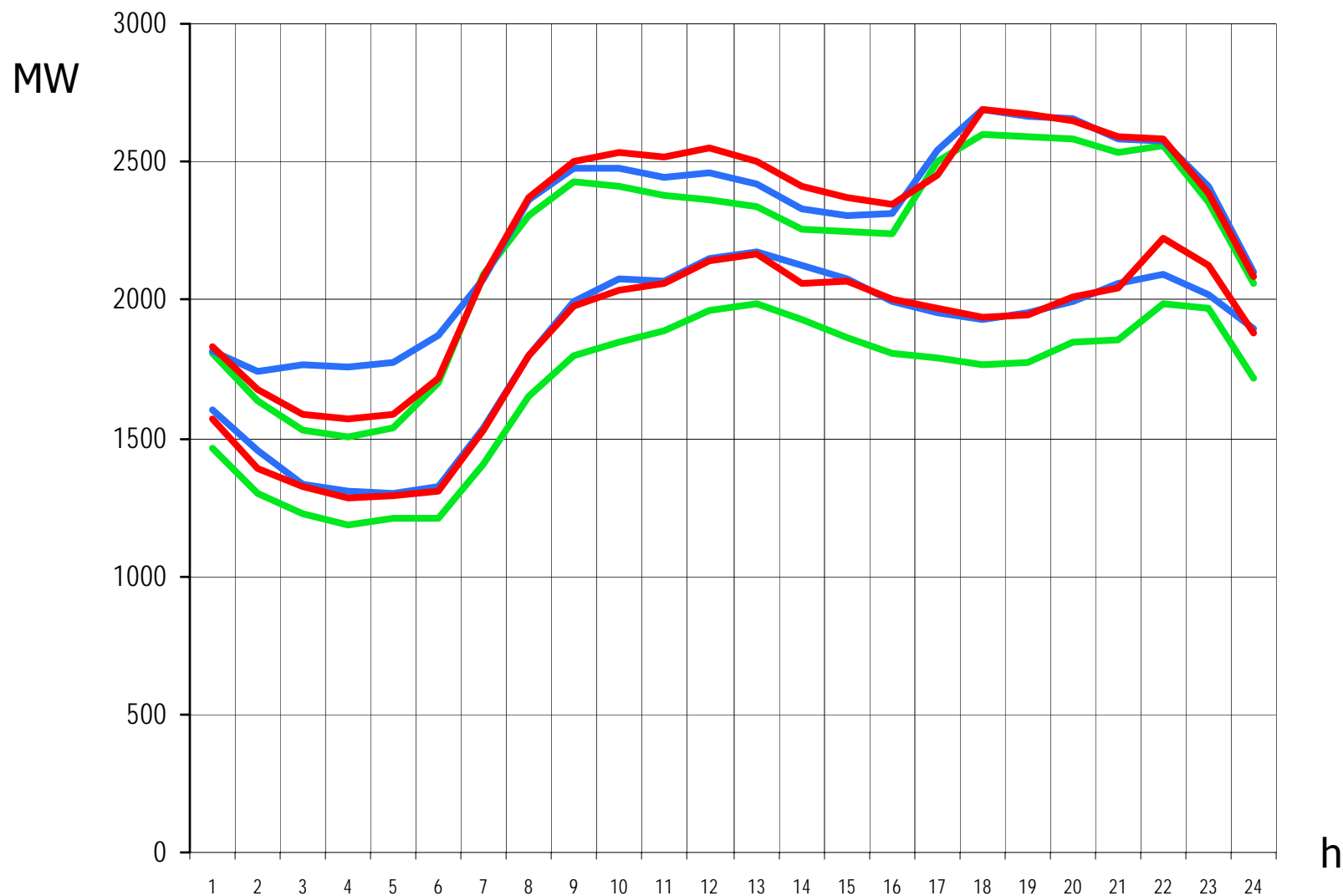


# Dnevni dijagram opterećenja

## Srijeda, 20.12.2006. (MW)

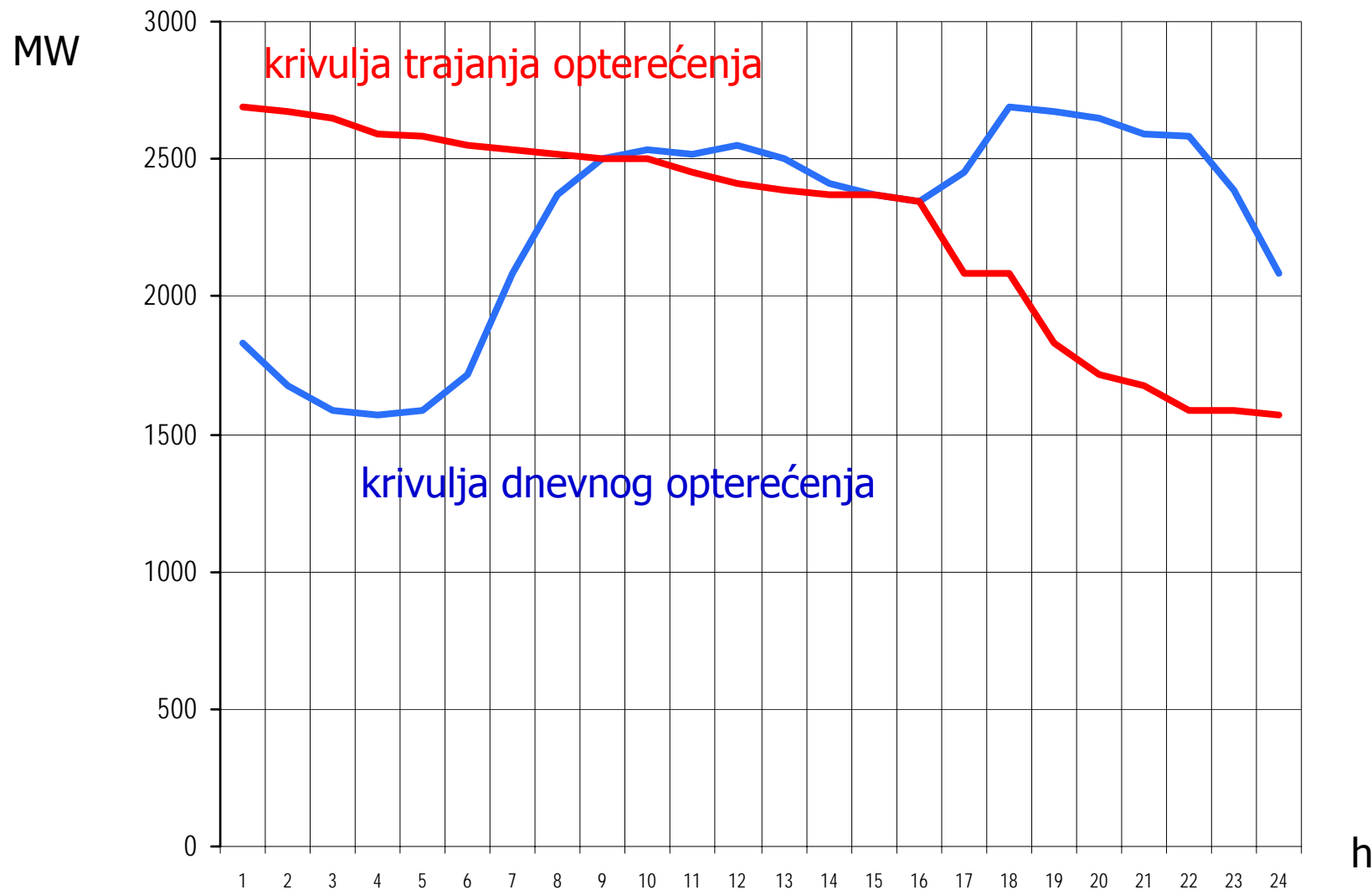


# Neke dnevne krivulje opterećenja

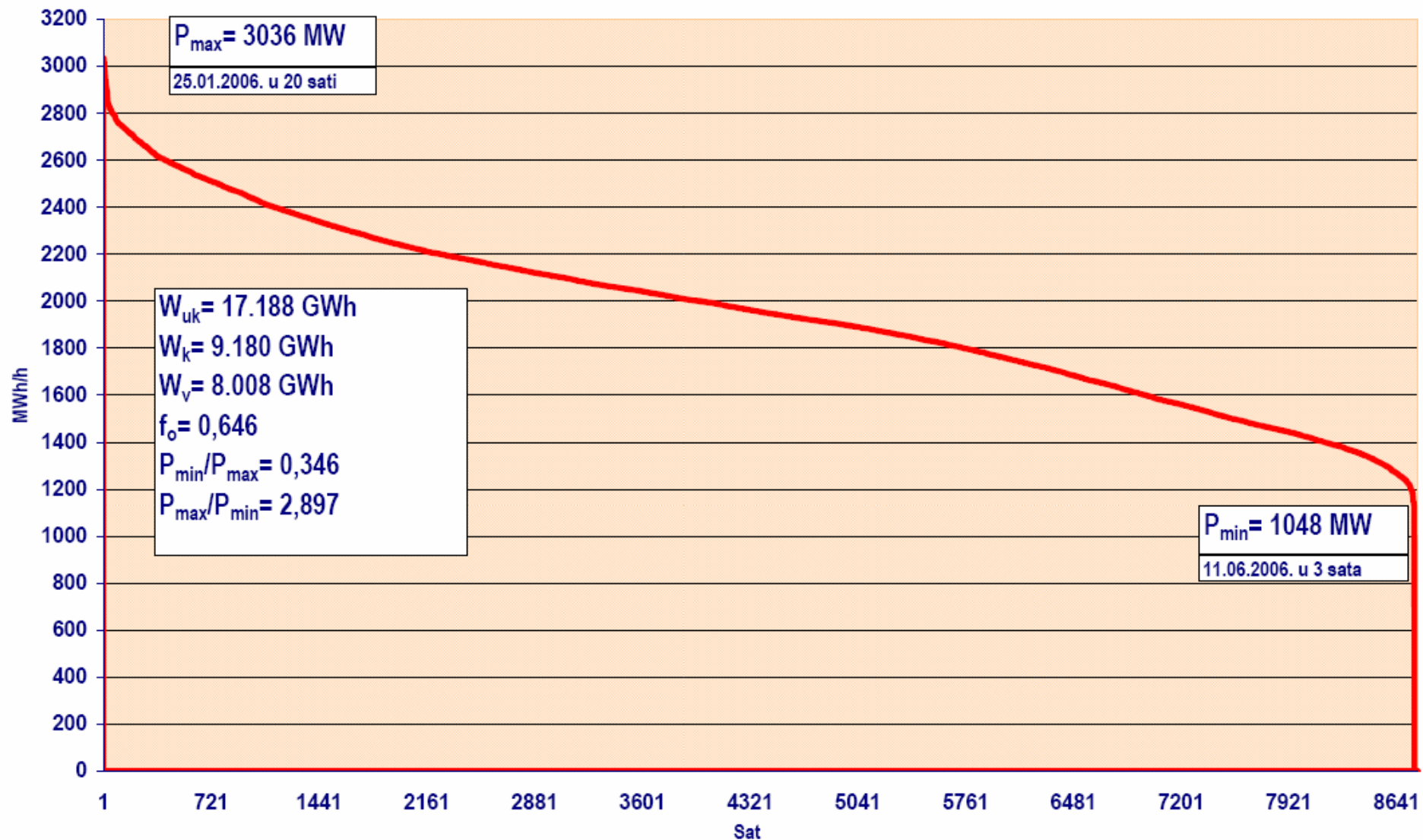




# Krivulja dnevnog opterećenja i krivulja trajanja opterećenja



# Godišnja krivulja trajanja opterećenja 2006



# Dnevna krivulja opterećenja

## Opskrbno područje "East New England", Boston - 1919

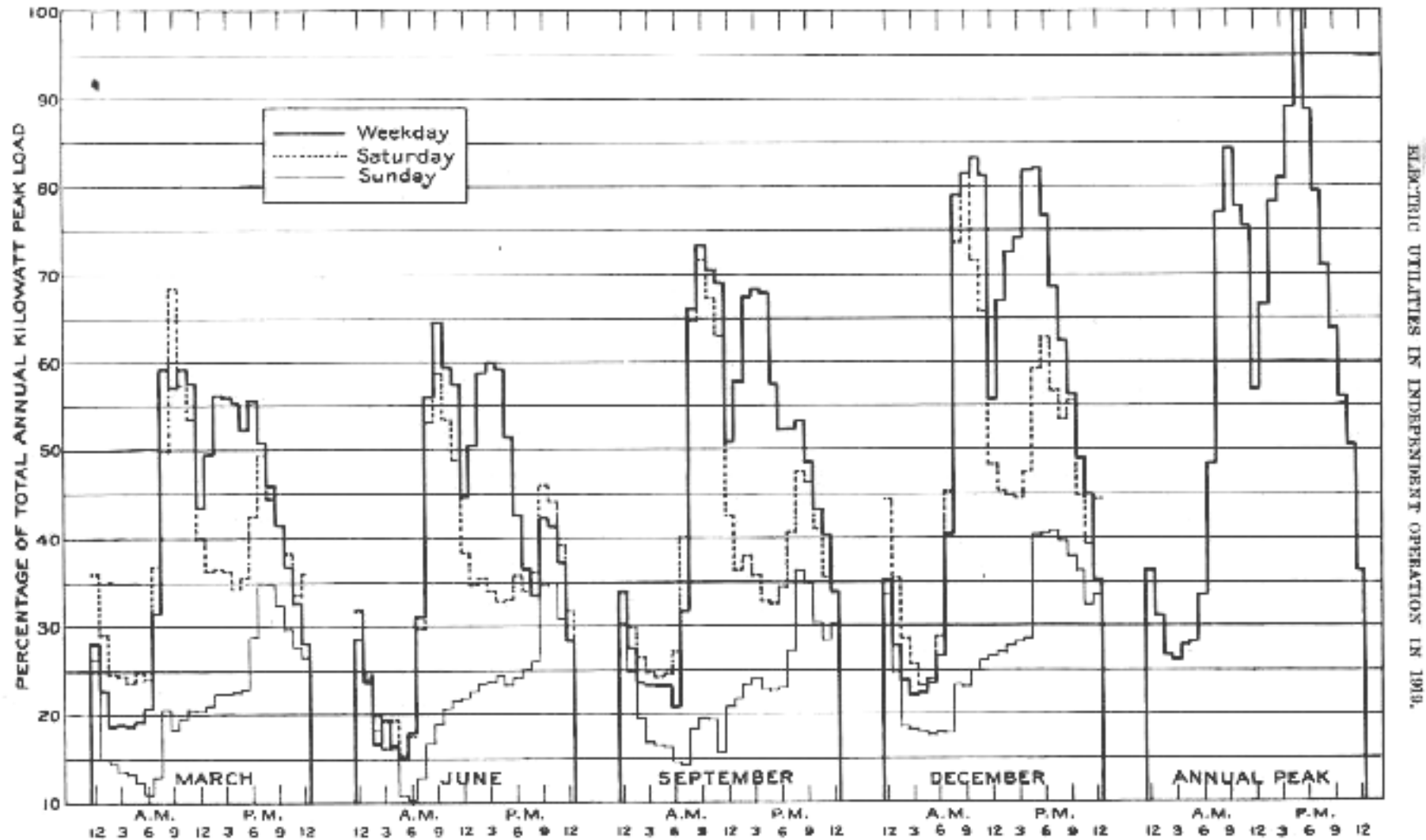
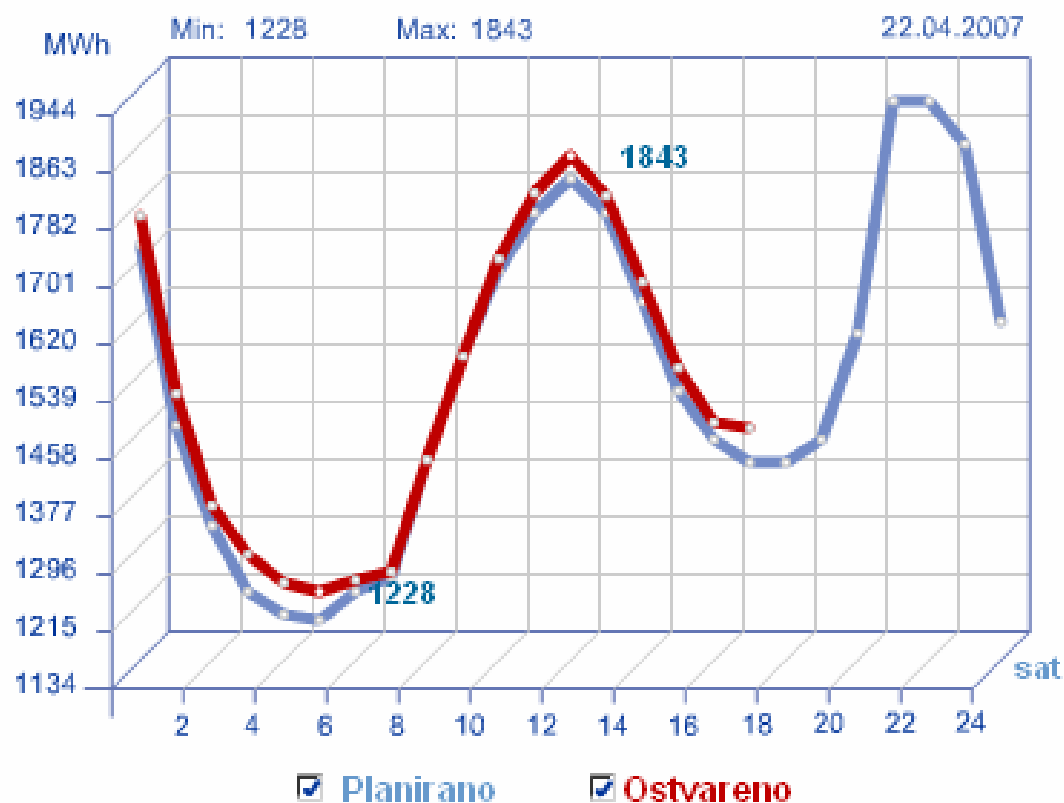


FIGURE 2.—Typical seasonal loads of electric utilities in Eastern New England division in 1919.

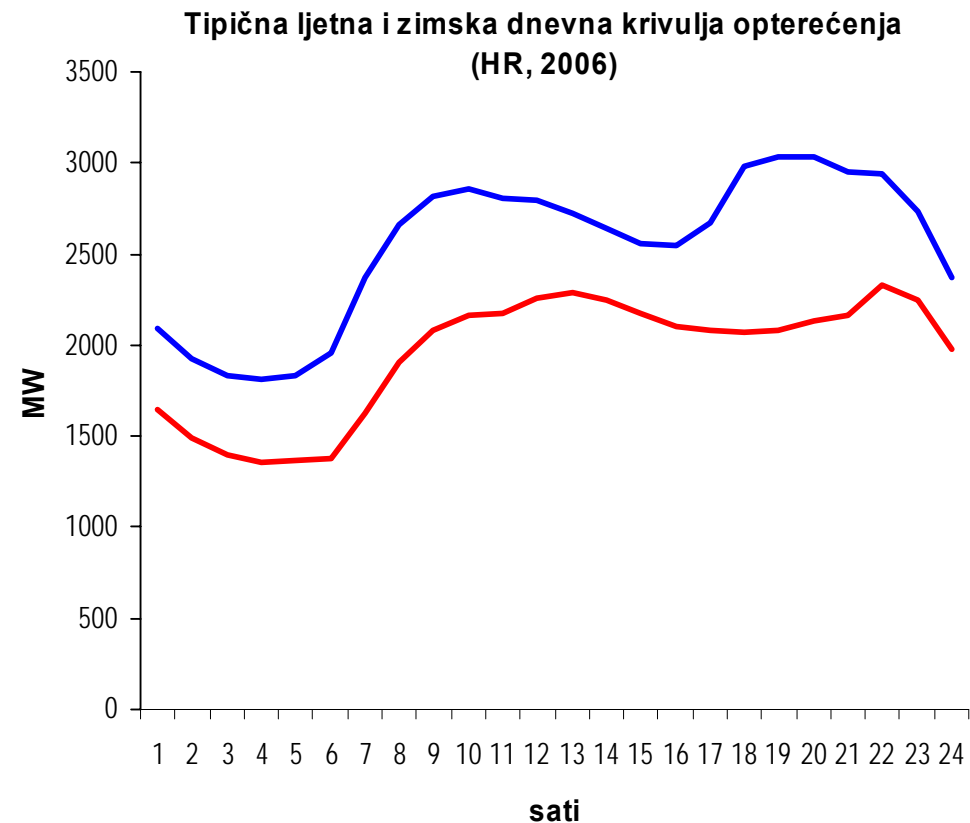
# Dnevna krivulja opterećenja – danas



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

# Ovisnosti opterećenja

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



# Vremenska promjenjivost opterećenja

- godišnje
  - (osim u slučaju ratova, velikih prirodnih katastrofa i sl.) opterećenje uglavnom raste 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
- trenutno
  - električna energija ne koristi se jednoliko tijekom dana

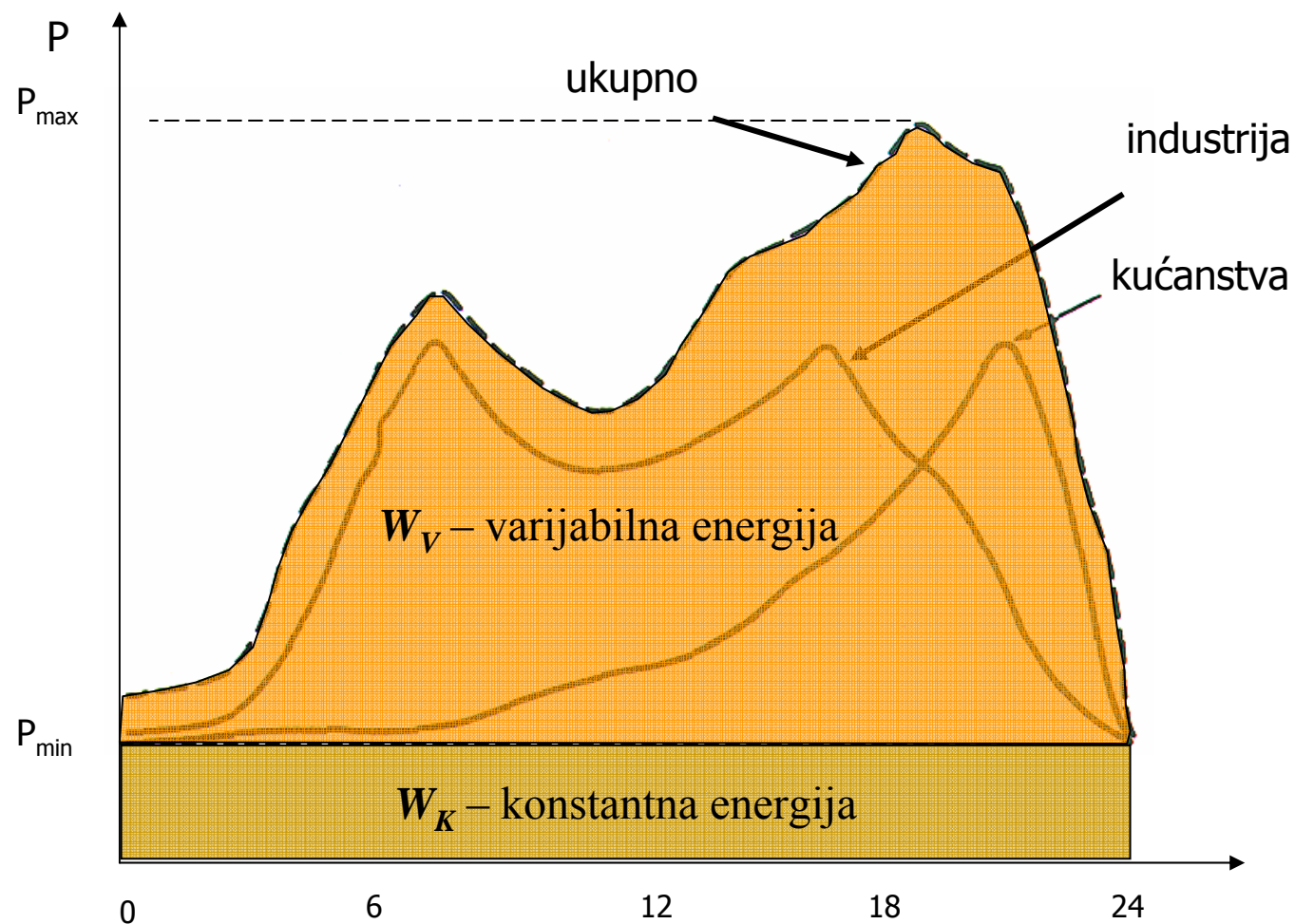
# Dnevna krivulja opterećenja

$$W_K = 24 \cdot P_{\min}$$

$$W_V = W - W_K$$

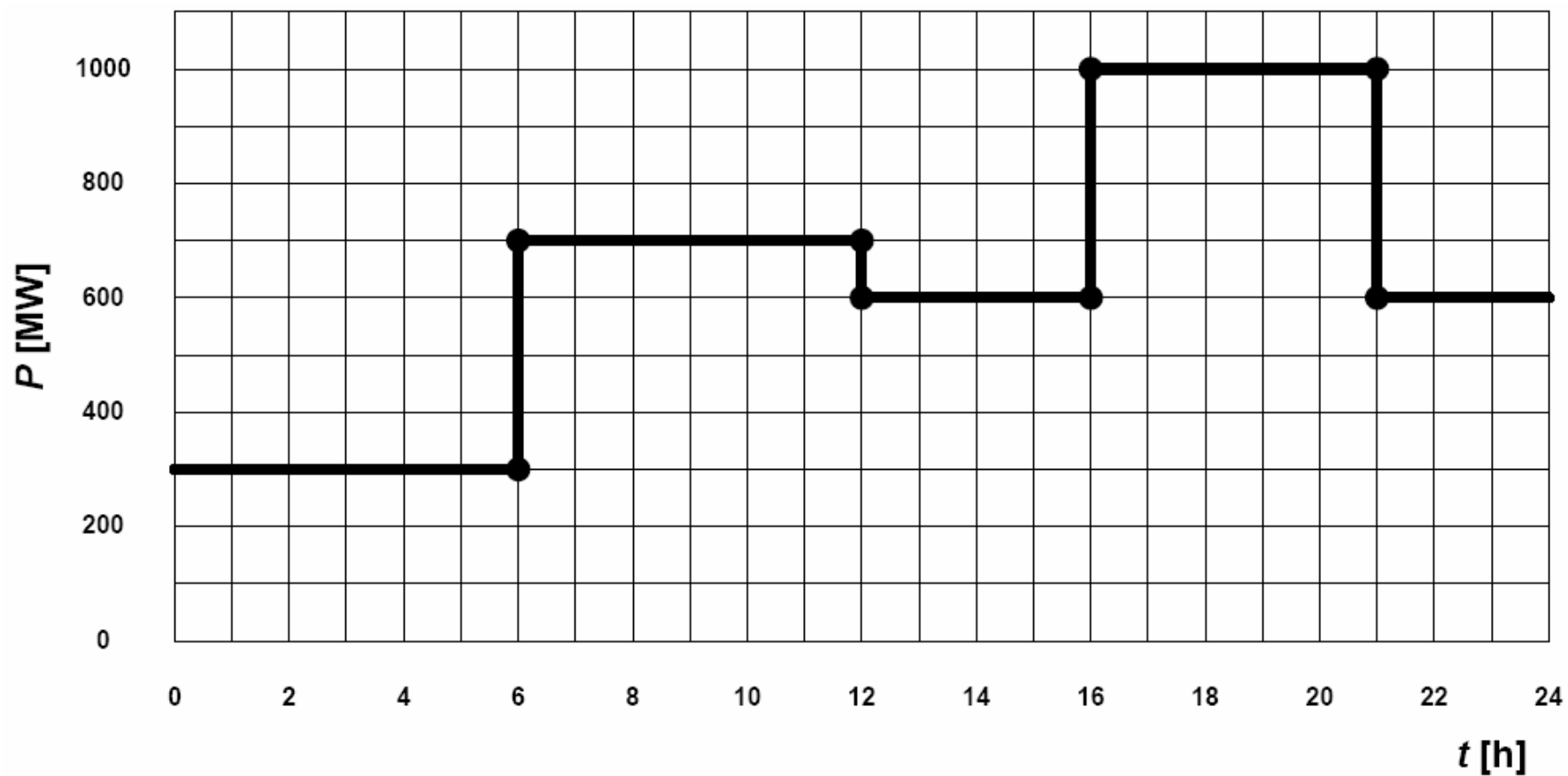
$$m = \frac{W}{24 \cdot P_{\max}}$$

$$m_D = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$$



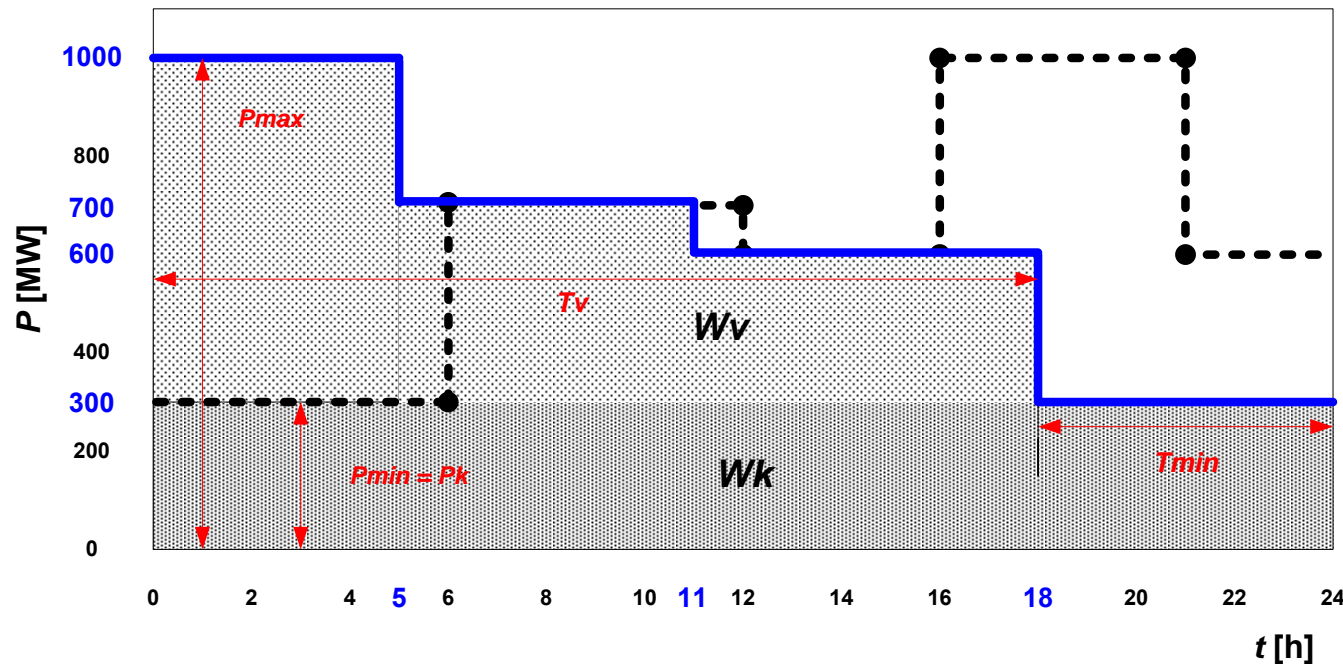
$m$  - faktor opterećenja;  $m_D$  - faktor ravnomjernosti

# Aproksimacija dnevne krivulje opterećenja





# Aproksimacija dnevnog dijagrama opterećenja



- - - Dnevni dijagram opterećenja
- Dnevna krivulja trajanja opterećenja

$P_{min}, P_K$  najmanja snaga, konstantna snaga (ne moraju biti jednake)  
 $P_{max}$  najveća 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

$$W_K = 24 \cdot P_K$$

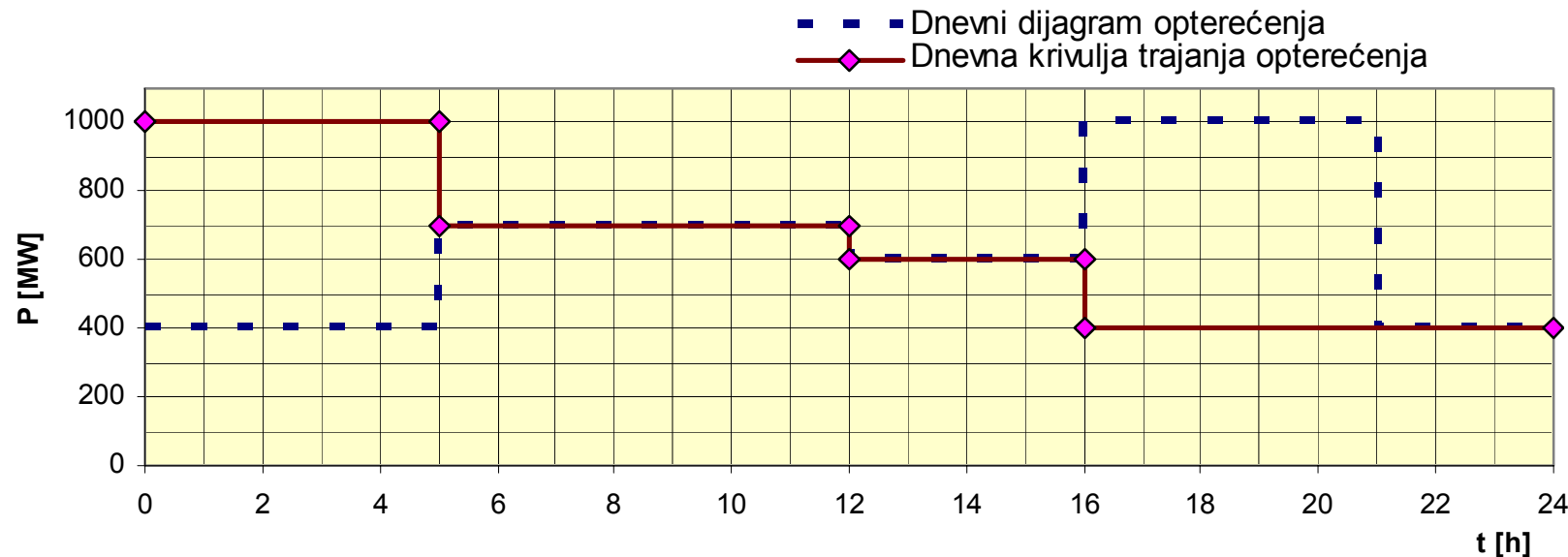
$$W_V = W - W_K$$

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

$$m_D = \frac{P_{min}}{P_{max}}$$

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

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.



$$P_{\min} = 400 \text{ MW}, P_{\max} = 1000 \text{ MW}$$

$$W = 8 \text{ h} \cdot 400 \text{ MW} + 7 \text{ h} \cdot 700 \text{ MW} + 4 \text{ h} \cdot 600 \text{ MW} + 5 \text{ h} \cdot 1000 \text{ MW} = 15500 \text{ MWh}$$

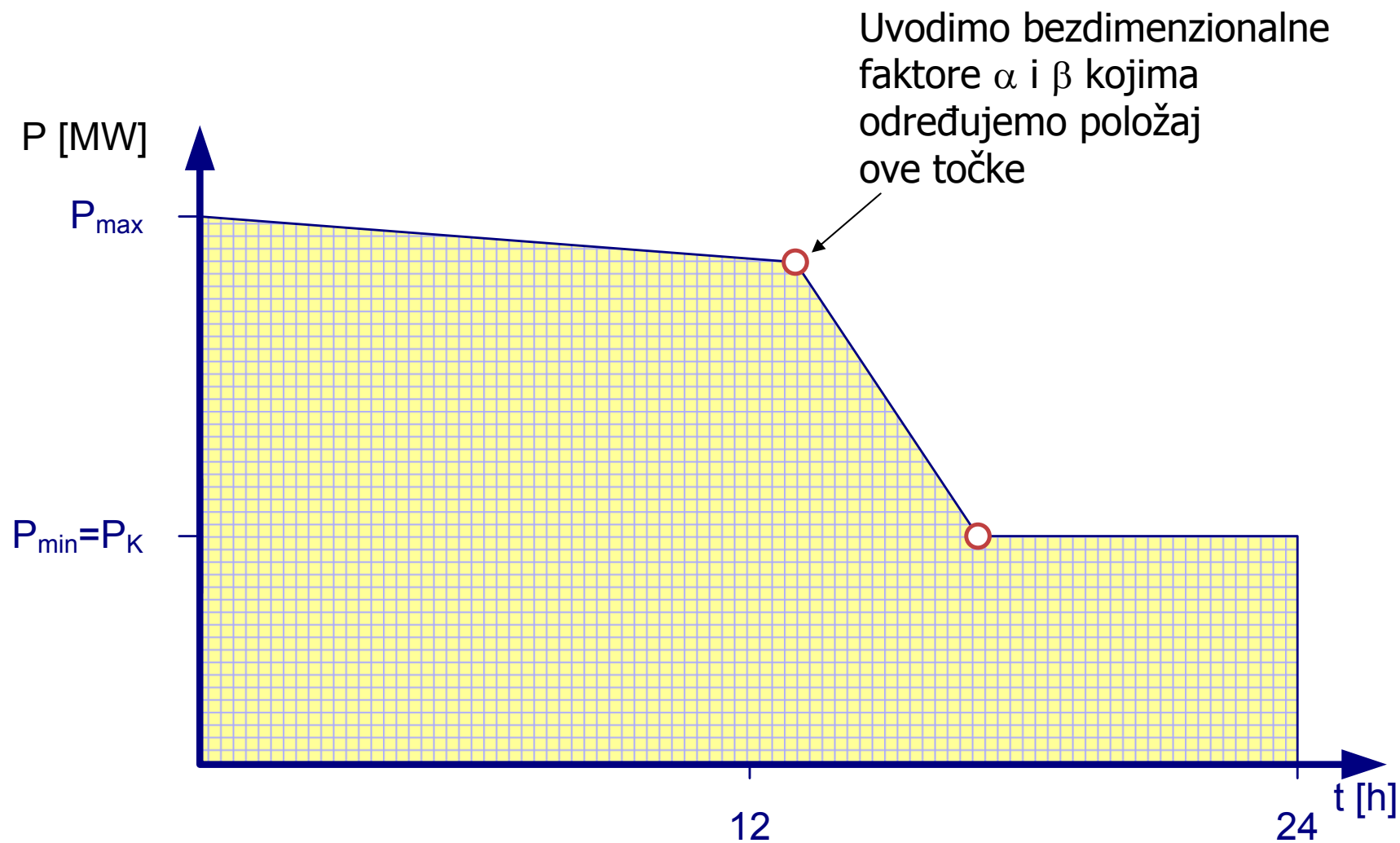
$$W_K = 24 \text{ h} \cdot P_{\min} = 24 \text{ h} \cdot 400 \text{ MW} = 9600 \text{ MWh}$$

$$W_V = W - W_K = 5900 \text{ MWh}$$

$$m = \frac{W}{24 \cdot P_{\max}} = 0,65$$

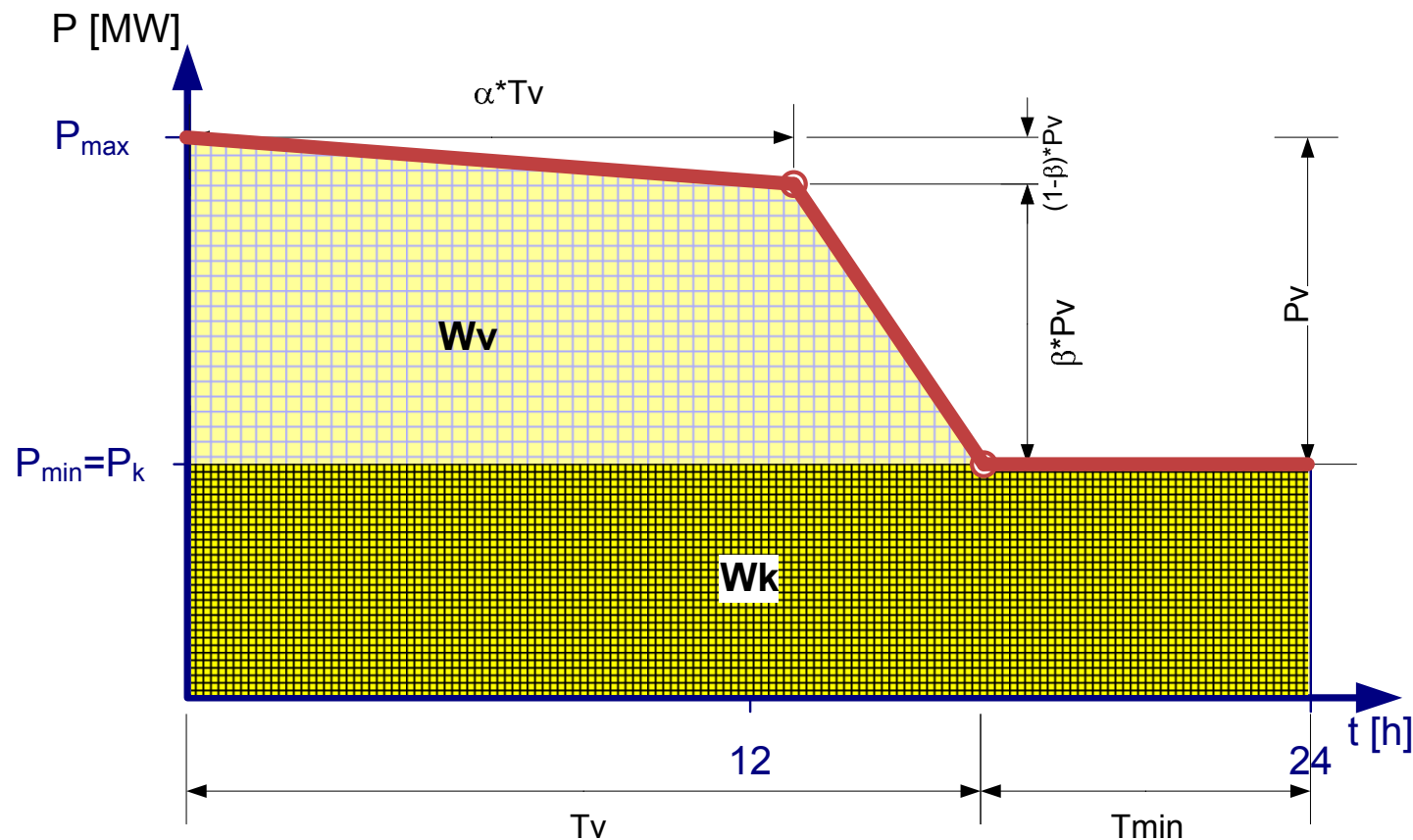
$$T_{P_{\max}} = \frac{W}{P_{\max}} = 15,5 \text{ h}$$

# Aproksimacija dnevne krivulje opterećenja s tri pravca



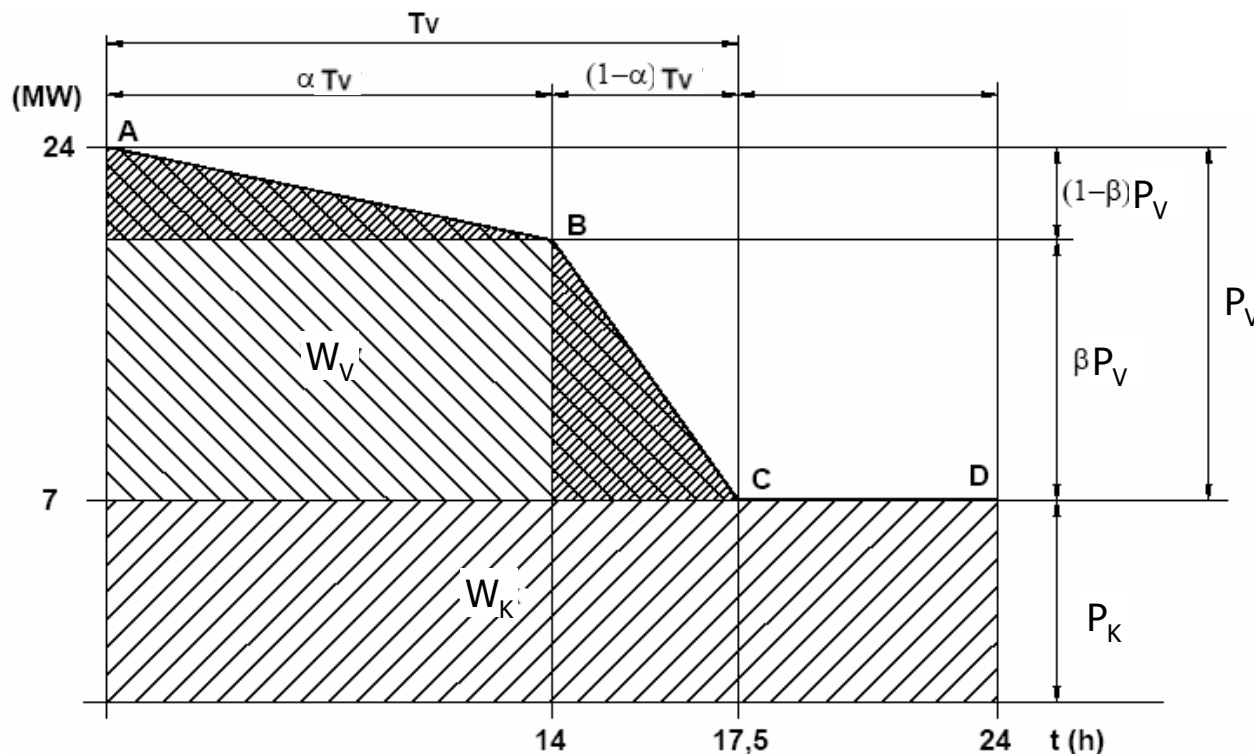
# Aproksimacija dnevne krivulje opterećenja s tri pravca

Koeficijenti  $\alpha$  i  $\beta$  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

$$\alpha=0.8 \text{ i } \beta=0.65$$



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)

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

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.

$$P(t) - (P_K + P_V) = \frac{(P_K + \beta \cdot P_V) - (P_K + P_V)}{\alpha \cdot T_V} \cdot t \Rightarrow P(t) = P_K + P_V - \frac{P_V(1-\beta)}{\alpha T_V} t = 7 + 17 - \frac{17 \cdot (1-0.65)}{0.8 \cdot 17.5} \cdot t = 24 - 0.425 \cdot t [MW]$$

II. dio krivulje (dužina BC)

$$\alpha T_V = 14h \leq t \leq T_V = 17.5h$$

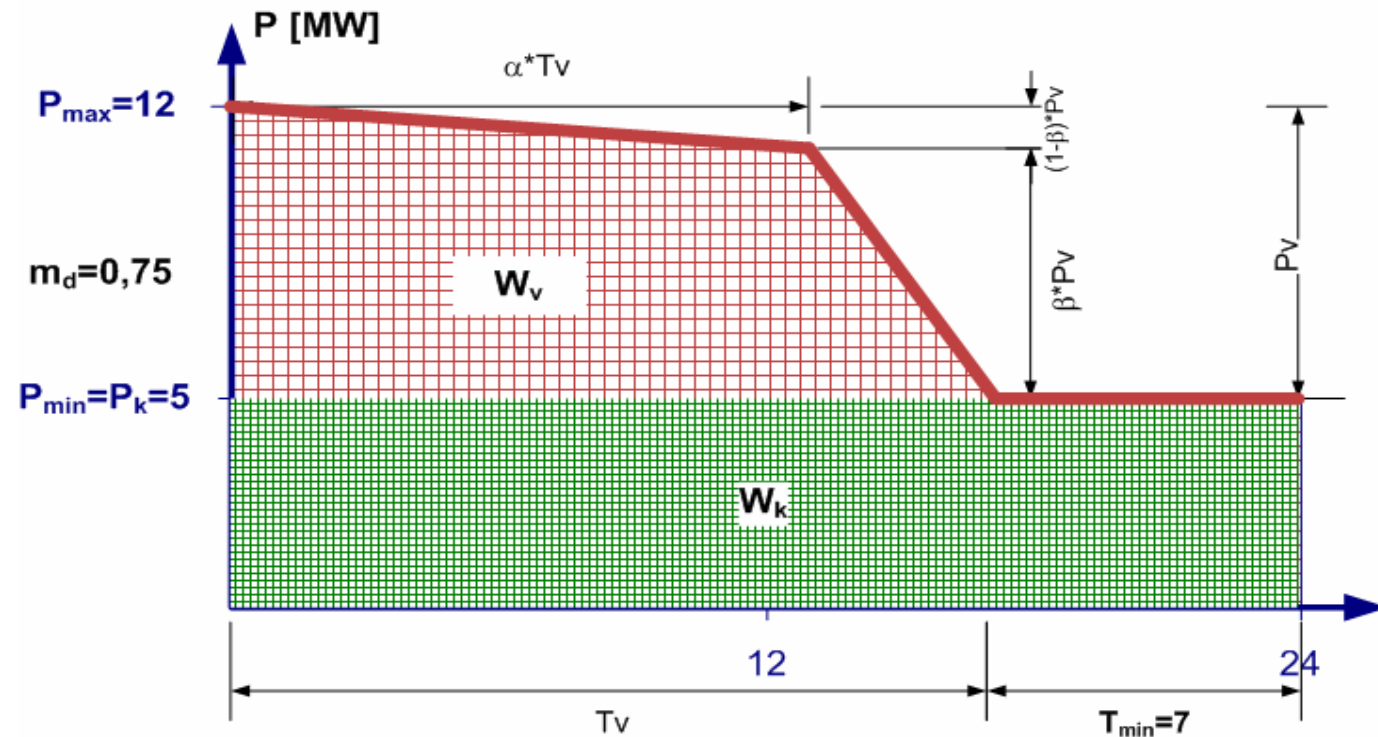
točka B

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

točka C

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

2. Dnevna krivulja trajanja opterećenja aproksimirana je s tri pravca, prema slici.
- Odrediti  $(\alpha + \beta)$  kao funkciju poznatih veličina ( $P_v$ ,  $W_v$  i  $T_v$ ).
  - Navesti područje vrijednosti za faktore  $\alpha$  i  $\beta$ .



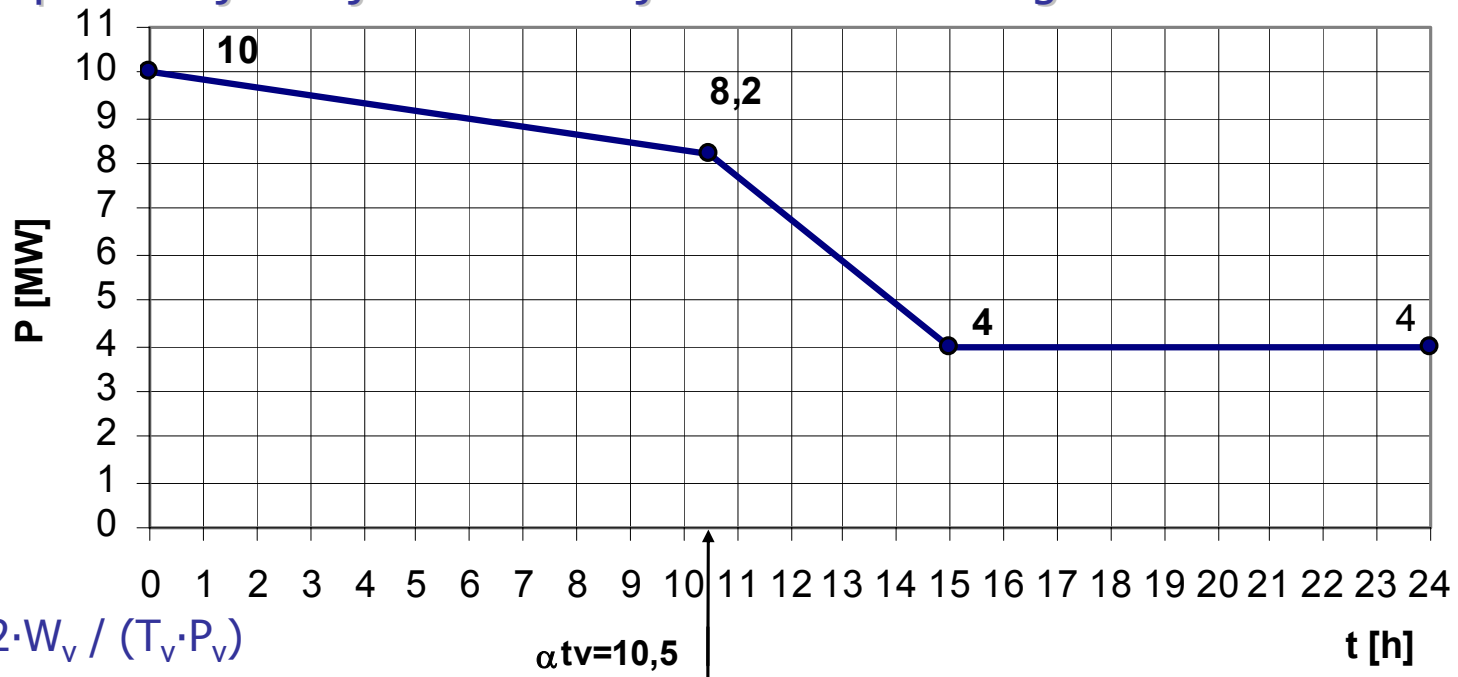
$$W_v = [(1-\beta) P_v \cdot \alpha \cdot T_v + \beta \cdot P_v \cdot (1-\alpha) \cdot T_v] / 2 + \alpha \cdot T_v \cdot \beta \cdot P_v$$

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

$$\text{sređivanjem } \dots \Rightarrow (\alpha + \beta) = 2 \cdot W_v / (T_v \cdot P_v)$$

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

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



$$(\alpha + \beta) = 2 \cdot W_V / (T_V \cdot P_V)$$

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

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

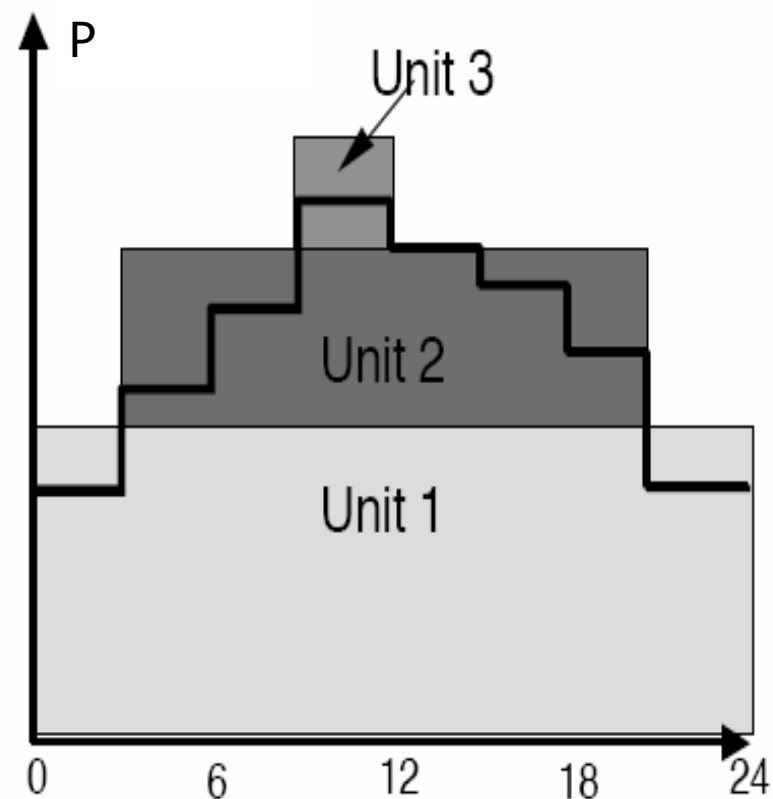
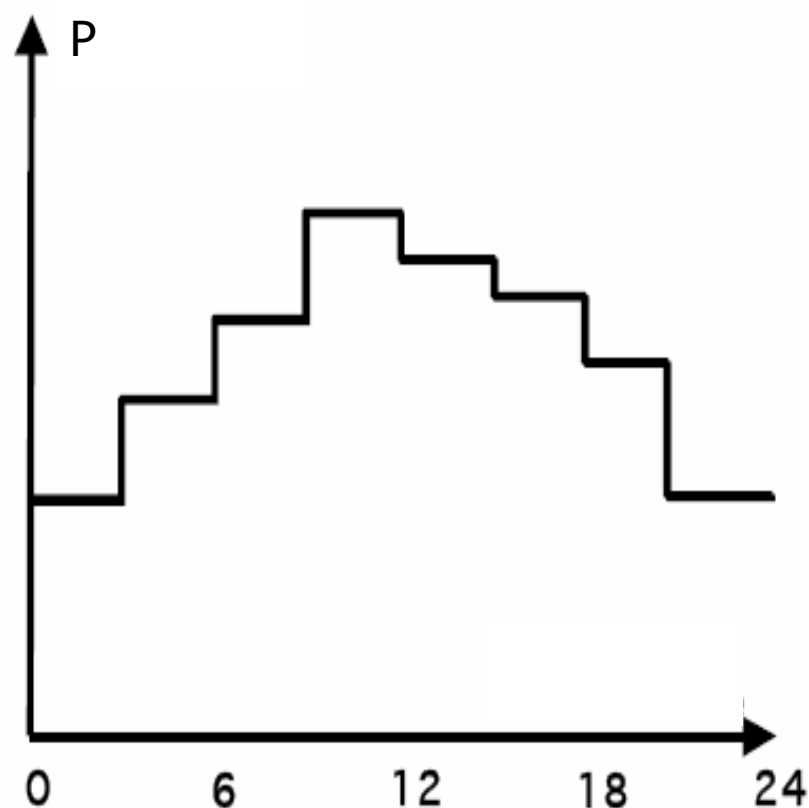
$$W_V = (\alpha + \beta) \cdot T_V \cdot P_V / 2 = (0,7 + 0,7) \cdot 15 \cdot 6 / 2 = 63 \text{ MWh}$$

$$W = W_V + W_K = 159 \text{ MWh}$$

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

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

# Pokrivanje dnevnog opterećenja

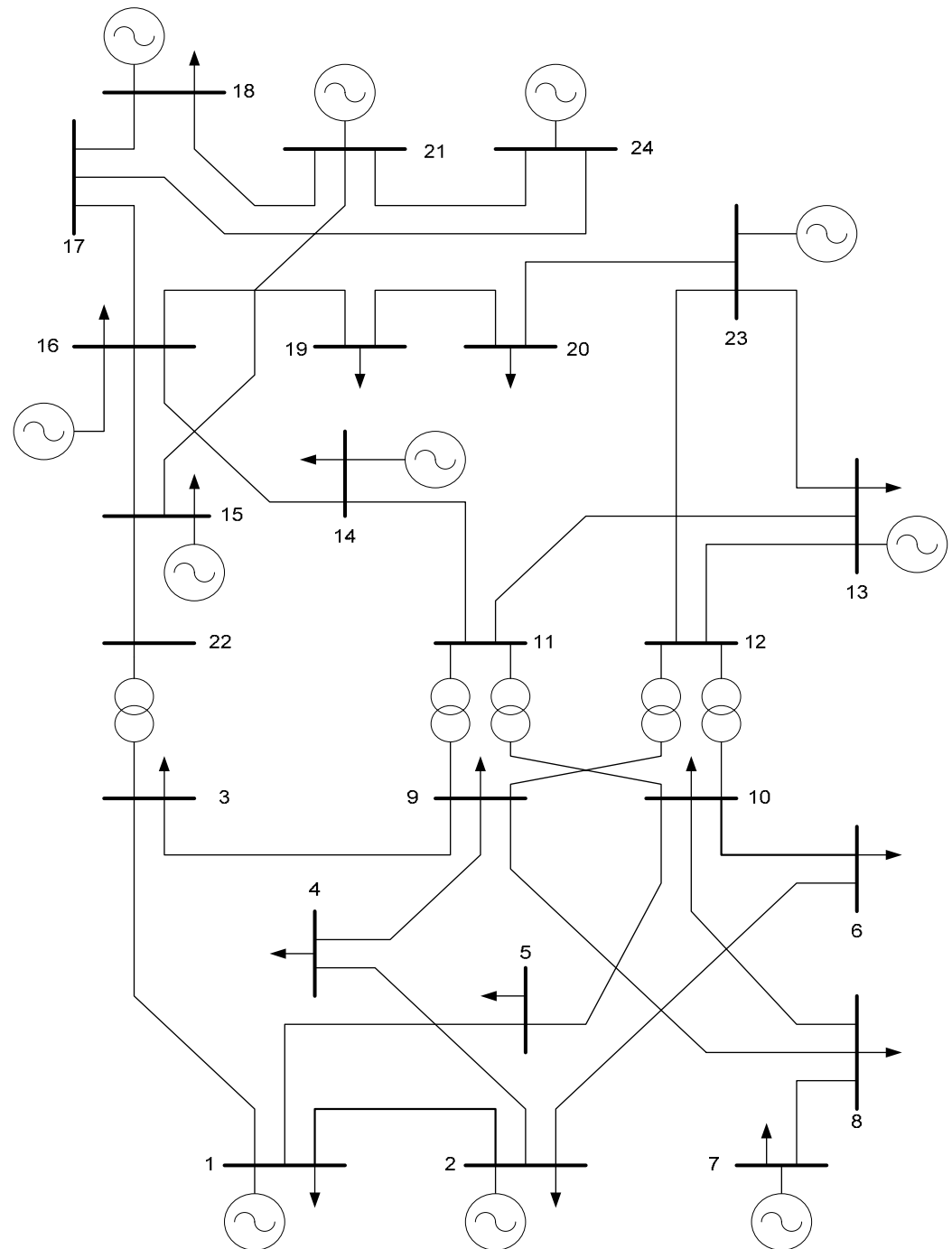




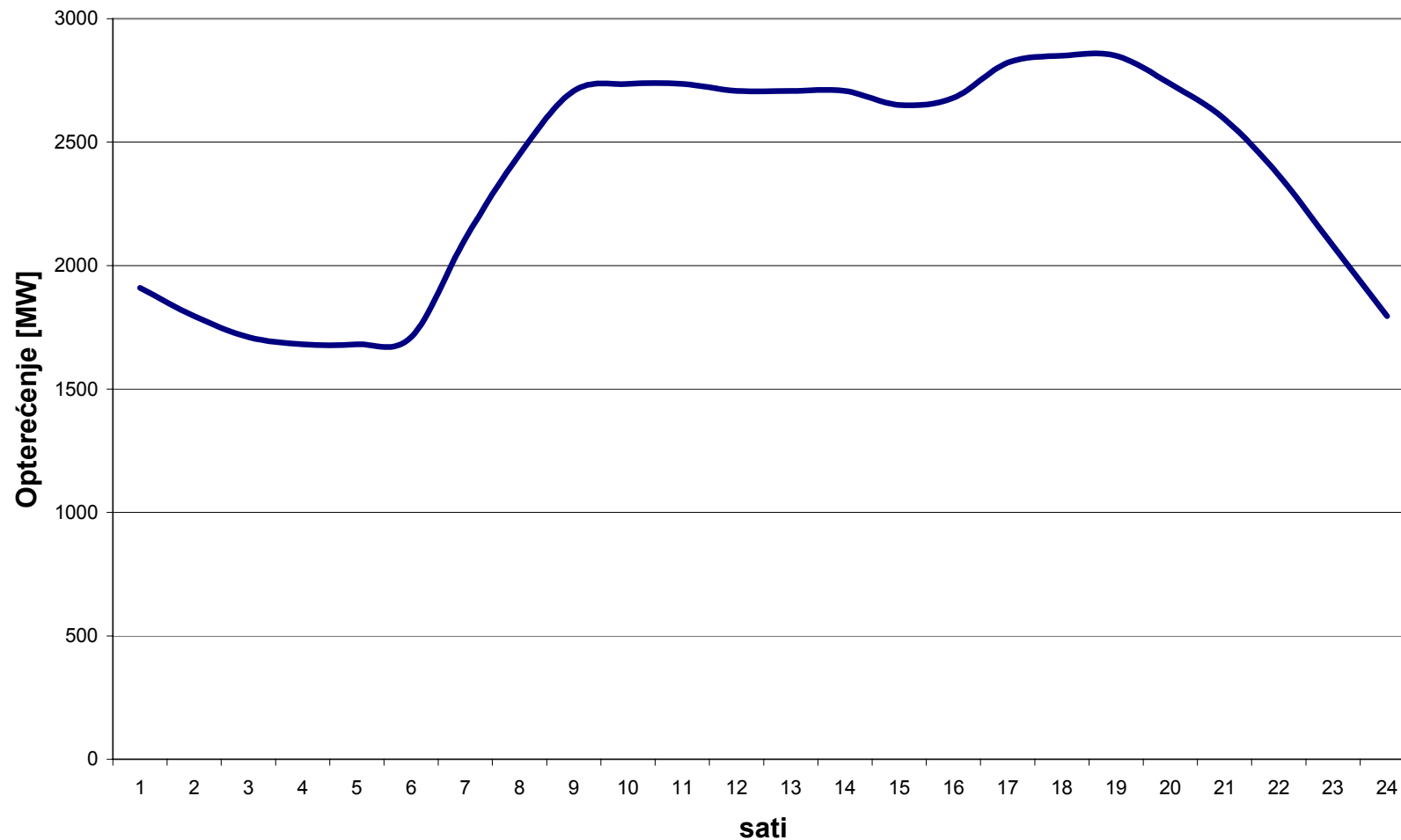
# Primjer 1

## Test mreža

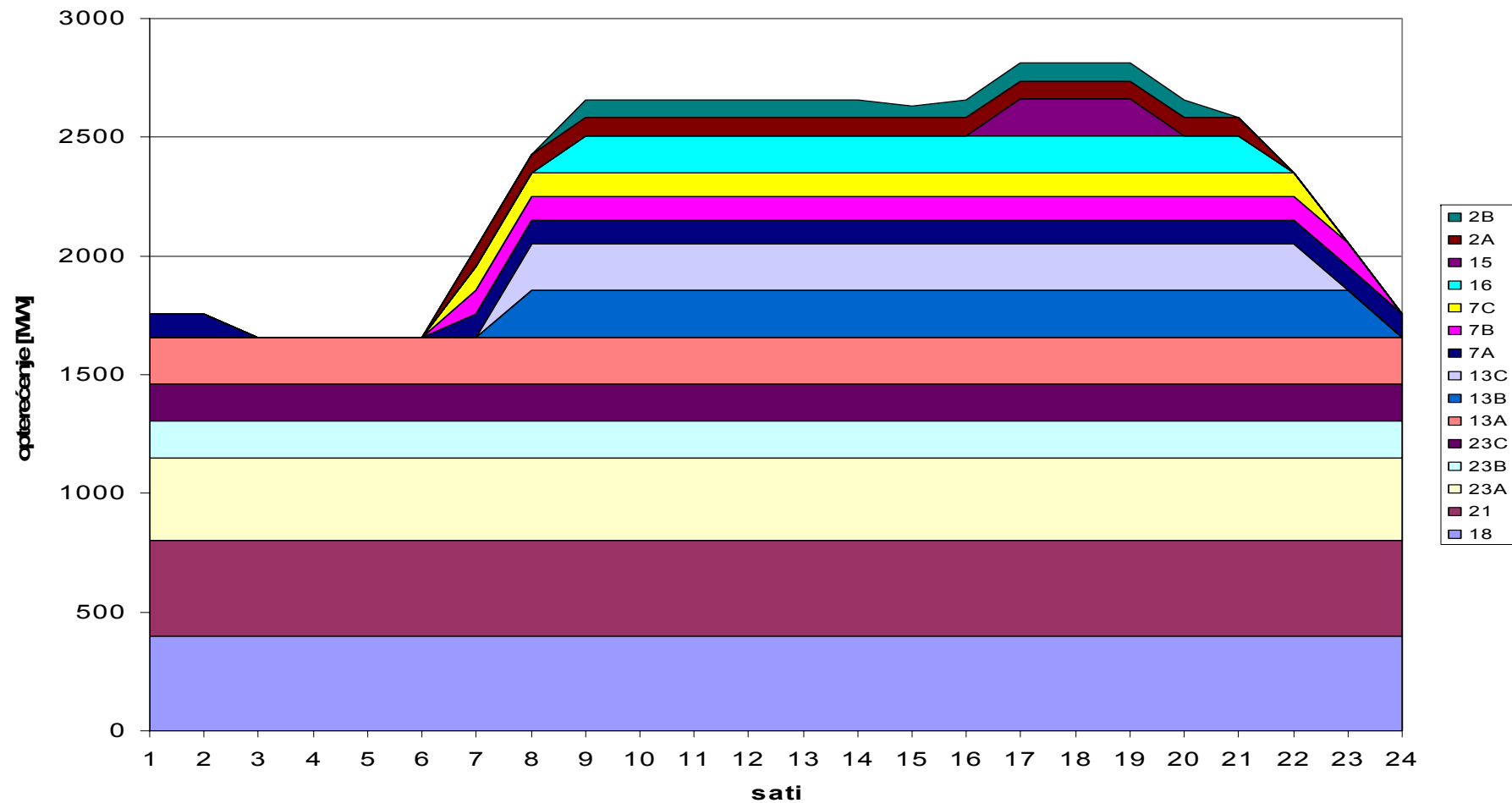
- *IEEE Reliability Test System*
- 24 čvorišta
- 34 grane
- raspoloživa snaga 3405 MW



# Primjer 1 – Krivulja predviđenog dnevnog opterećenja



# Primjer 1 - Unaprijed pripremljeni raspored proizvodnje (grafički prikaz)



# Primjer 1 - Unaprijed pripremljeni raspored proizvodnje (tabelarni prikaz)

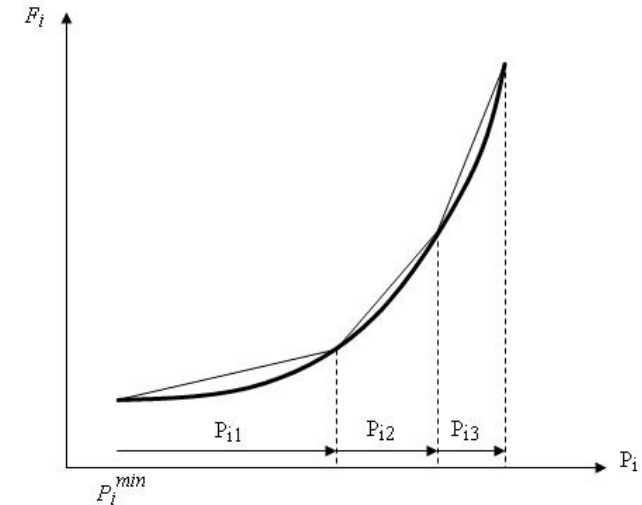
Sat	Opterećenje			Agregati													
	%	MW	18	21	23A	23B	23C	13A	13B	13C	7A	7B	7C	16	15	2A	2B
1	67	1910	400	400	350	155	155	197			100						
2	63	1796	400	400	350	155	155	197			100						
3	60	1710	400	400	350	155	155	197									
4	59	1682	400	400	350	155	155	197									
5	59	1682	400	400	350	155	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

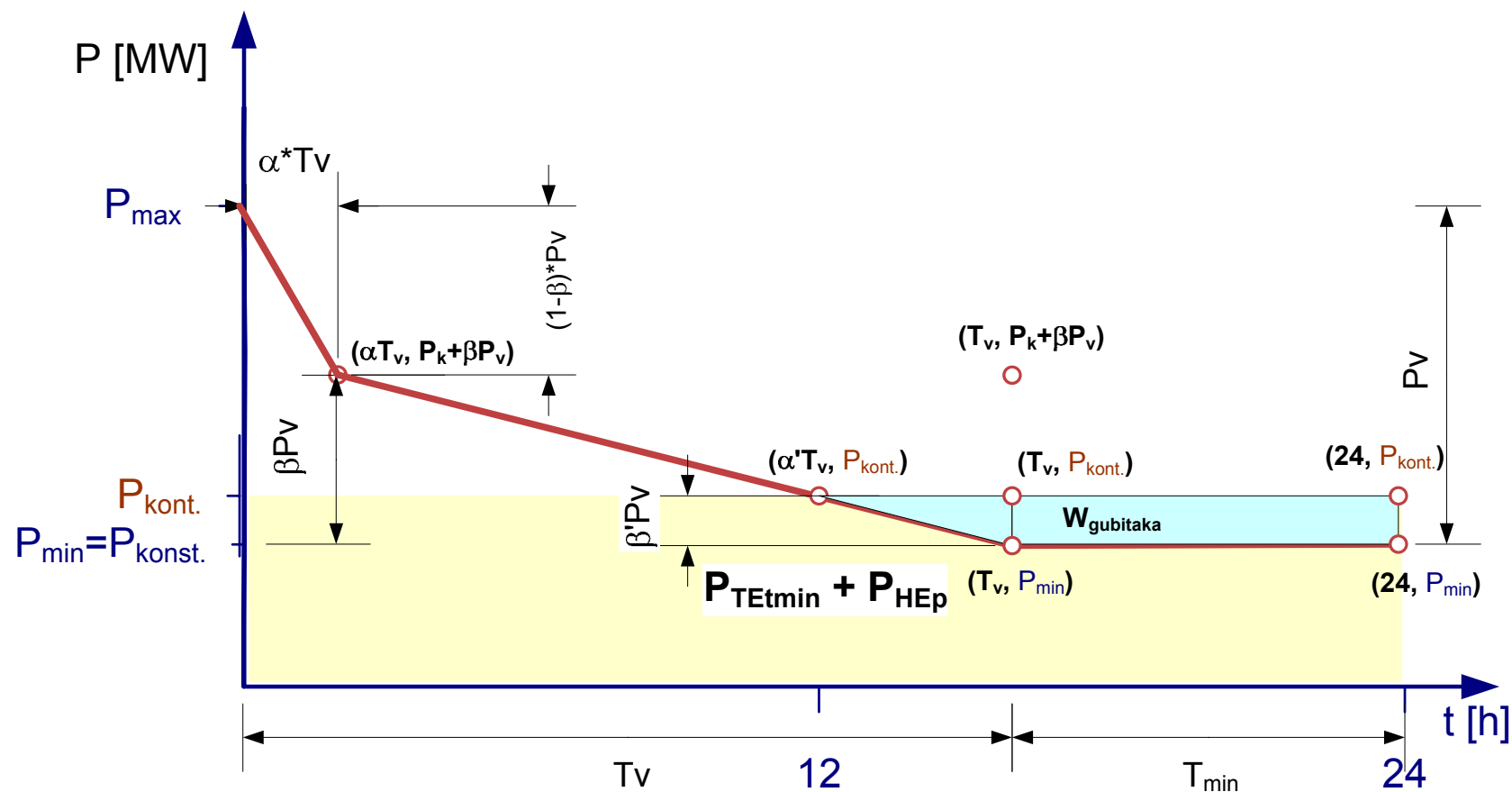
Time (1–24 hours) (1/0: on/off state)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Unit 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unit 2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Unit 3	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
Unit 4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1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

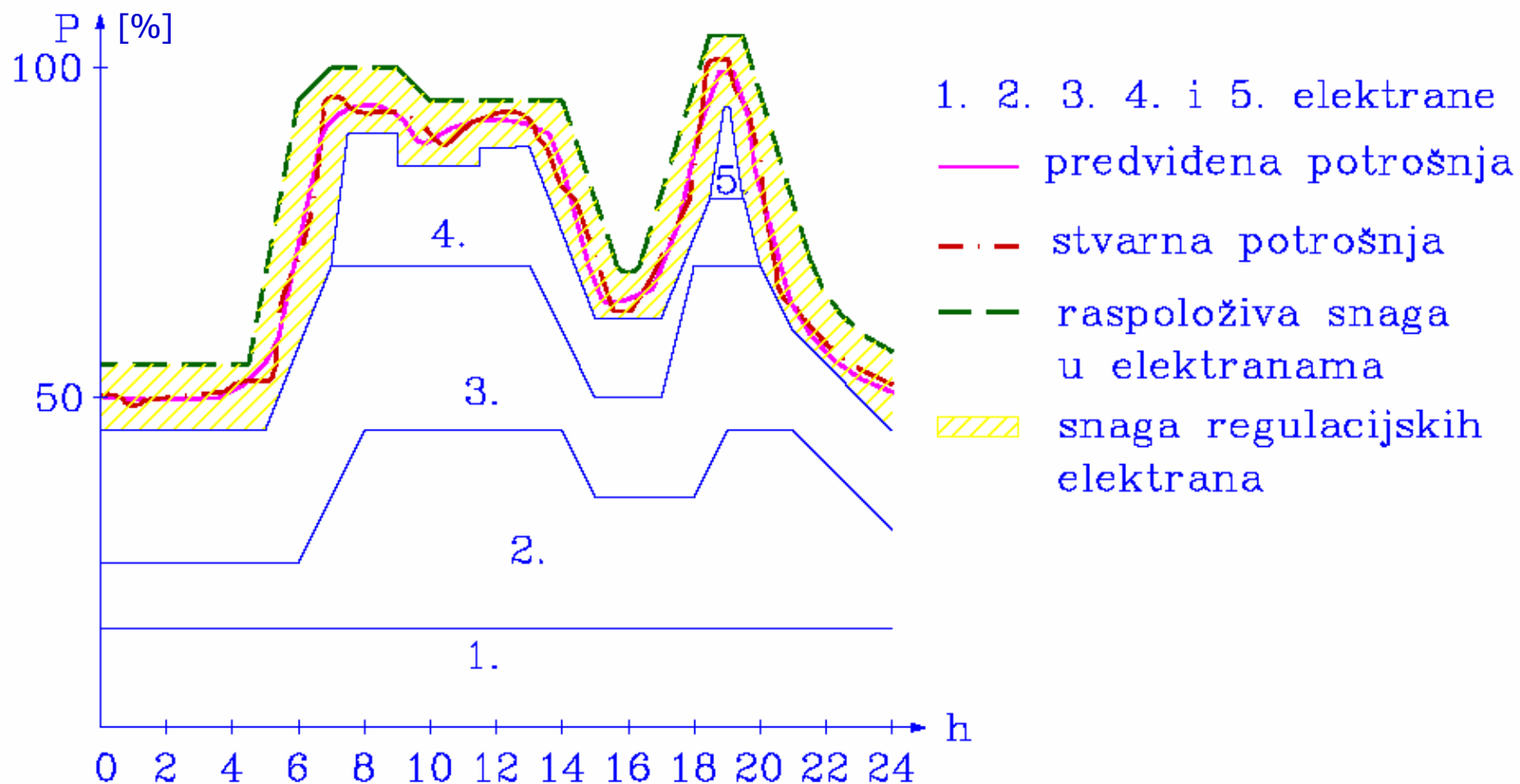
- Standardne elektrane  
(nuklearne, ugljen, nafta, plin)
  - cijena pokretanja elektrane
  - fiksni trošak pogona
  - varijabilni trošak (trošak po MW)
  - pogonska ograničenja  
( $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$ , brzina promjene)
- Protočne hidroelektrane, vjetroelektrane...
  - pogonska ograničenja (raspoloživost "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:

$$P_{\max} = 1000 \text{ MW}, P_K = 500 \text{ MW}, T_v = 18 \text{ h}, W = 17000 \text{ MWh}, \beta = 0,5.$$

Potrebno je nacrtati dijagram trajanja opterećenja i razmjestiti u njemu sljedeće elektrane:

$$\text{NE: } P_{\text{NE}n} = 125 \text{ MW};$$

$$C_{\text{NE}} = 25 \text{ lp/kWh}$$

$$\text{TE1: } P_{\text{TE1}n} = 350 \text{ MW}; P_{\text{TE1}min} = 25 \text{ MW}; C_{\text{TE1}} = 35 \text{ lp/kWh}$$

$$\text{TE2: } P_{\text{TE2}n} = 250 \text{ MW}; P_{\text{TE2}min} = 50 \text{ MW}; C_{\text{TE2}} = 30 \text{ lp/kWh}$$

$$\text{HE1: } P_{\text{HE1}} = 200 \text{ MW}; \text{ protočna}$$

$$\text{HE2: } P_{\text{HE2}} = 100 \text{ MW}; \text{ protočna}$$

Rješenja:

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

$$W_v = W - W_K = 17000 - 12000 = 5000 \text{ MWh}$$

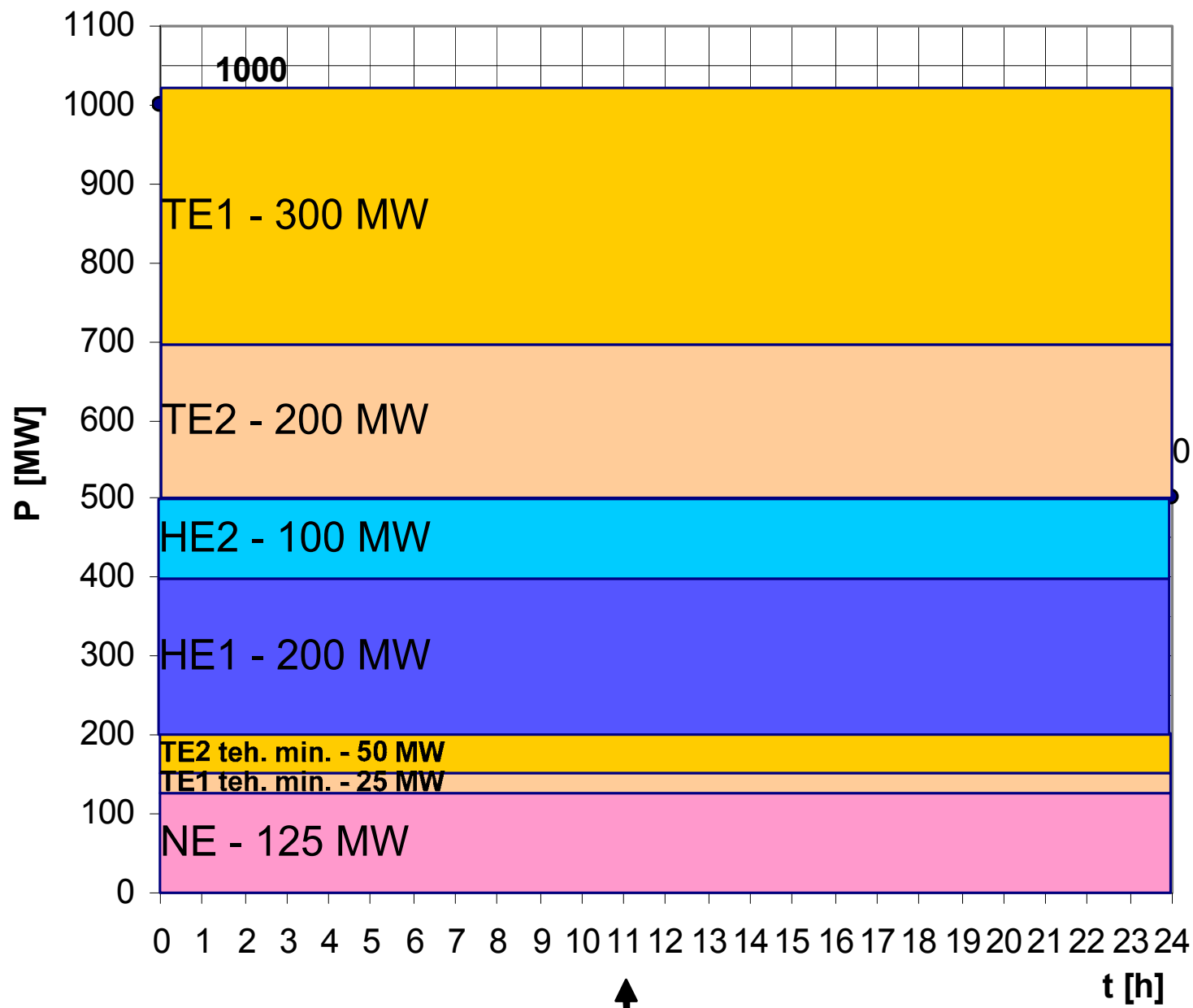
$$(\alpha + \beta) = 2 \cdot W_v / (T_v \cdot P_v) \rightarrow \alpha = 2 \cdot W_v / (T_v \cdot P_v) - \beta = 0,6111$$

$$\alpha \cdot T_v = 11 \text{ h}$$

$$\Sigma P_i - P_{\max} = 1025 - 1000 = 25 - \text{sve elektrane trebaju proizvoditi!}$$

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

#### 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:  $P_{TE1n} = 150 \text{ MW}$ ;  $P_{TE1min} = 50 \text{ MW}$ ;  $c_{TE1} = 50 \text{ lp/kWh}$

TE2:  $P_{TE2n} = 260 \text{ MW}$ ;  $P_{TE2min} = 60 \text{ MW}$ ;  $c_{TE2} = 20 \text{ lp/kWh}$

TE3:  $P_{TE3n} = 400 \text{ MW}$ ;  $P_{TE3min} = 100 \text{ MW}$ ;  $c_{TE3} = 30 \text{ lp/kWh}$

HE1:  $P_{HE1n} = 150 \text{ MW}$

HE2:  $P_{HE2n} = 200 \text{ MW}$

HE3:  $P_{HE3n} = 100 \text{ MW}$

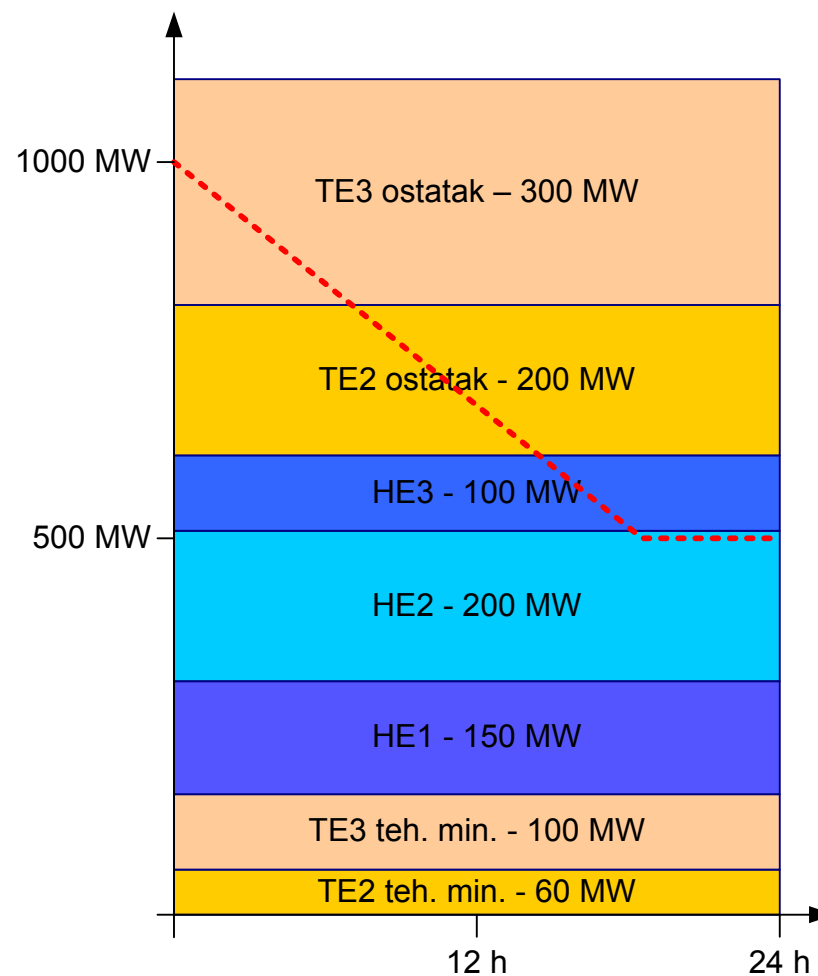
Rješenja:

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

Raspored agregata u pogonu:

$TE2_{\min}$ ,  $TE3_{\min}$ , HE1, HE2, HE3,  $TE2_{\text{ostatak}}$ ,  $TE3_{\text{ostatak}}$

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 ovisnosti  
opterećenja

- neovisne metode
  - na temelju ponašanja potrošnje u prošlosti (kao funkcije vremena, npr. trend)
- ovisne 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)
2. logaritamski pravac
3. eksponencijalni zakon porasta
4. polinomni zakon porasta
5. logaritamski polinomni zakon porasta
6. logistički zakon porasta
7. Gompertzov zakon porasta

$$p_1(t) = at + b$$

$$\log p_2(t) = at + b$$

$$p_3(t) = e^{(at+b)} \quad \text{ili} \quad p_3(t) = b(1+a)^t$$

$$p_4(t) = b + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n$$

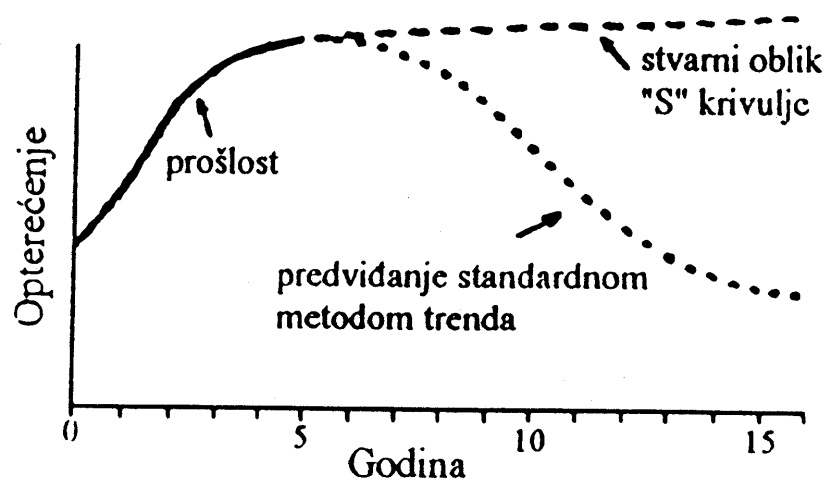
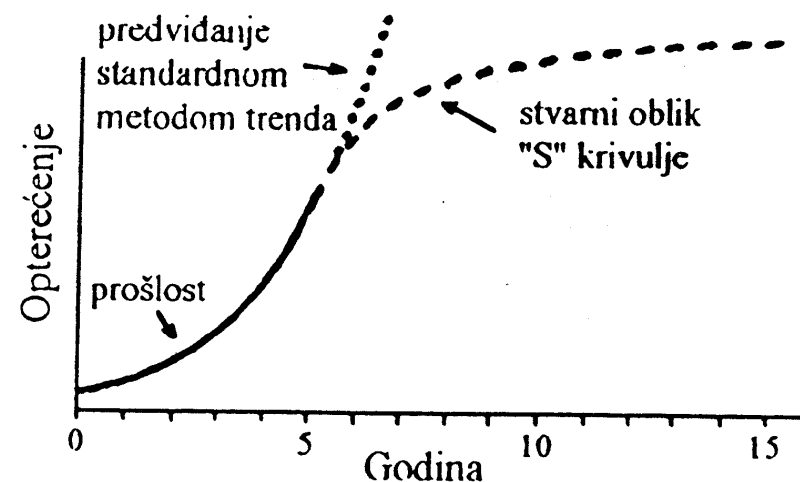
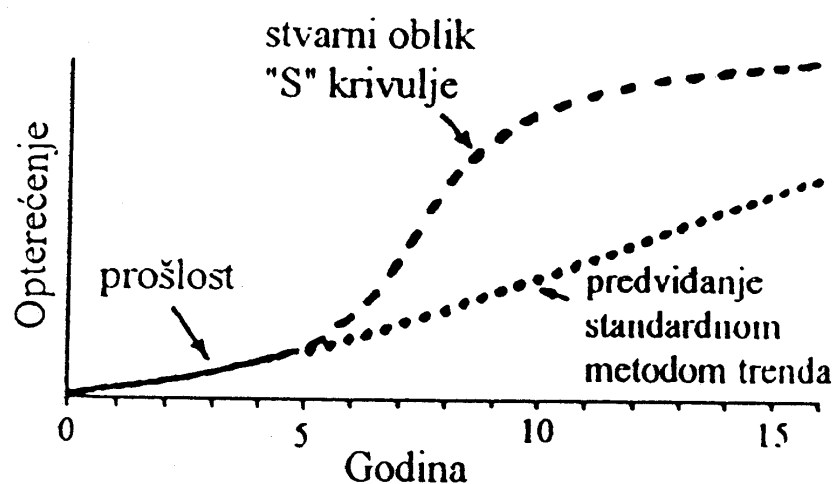
$$p_5(t) = b + a_1 \log(t) + a_2 \log^2(t) + \dots + a_n \log^n(t)$$

$$p_6(t) = \frac{p_z}{1 + e^{(b-at)}}$$

$$p_7(t) = p_z e^{-ba^t}$$

- 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:

$$P_{\max 2010} = 1500 * (1,02)^5 = 1656 \text{ MW}$$



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.

Rješenje:

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

0. godina – 900000 stanovnika

5. godina – 1000000 stanovnika

10. godina → ? stanovnika

Grad će 2010. godine imati

**1 111 111 stanovnika.**

Zatim treba provući pravac kroz

900000 stanovnika – 1200 MW

1000000 stanovnika – 1500 MW

1111111 stanovnika 2010 → ? MW

Opterećenje će biti **1833 MW.**

$$p(s) = as + b$$

$$\log s(t) = ct + d$$

$$\log 900000 = c \cdot 0 + d$$

$$\log 1000000 = c \cdot 5 + d$$

$$d = 5.95424; \quad c = 0.0091515$$

$$s(10) = 10^{c \cdot 10 + d} = 1111111$$

$$1200 = a \cdot 900000 + b$$

$$1500 = a \cdot 1000000 + b$$

$$a = 0.003 \quad b = -1500$$

$$p(1111111) = a \cdot 1111111 + b = 1833$$

# 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.