نام درس: تولید انرژی الکتریکی

اهداف درس:

- آشنایی با وضعیت تولید صنعت برق ایران و انواع فناوری های تولید
- آشنایی با برنامه ریزی توسعه تولید انرژی الکتریکی و مسائل اقتصادی مرتبط با آنها
- آشنایی با سیستم های مکانیکی حاکم بر نیروگاه ها
- آشنایی با سیستم های الکتریکی حاکم بر نیروگاه ها (ژنراتورها، ترانسفورماتورها، مصارف داخلی، سیستم های کنترل ولتاژ و فرکانس)
- بازدید برخی از نیروگاه ها

مراجع:

1. کتاب «تولید برق در نیروگاه ها»، دکتر رحمت الله هوشمند، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ویرایش دوم، چاپ سوم (۱۳۹۱).
2. کتاب «تجهیزات نیروگاه»، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۰.
3. T. Elliol, K. Chen and R.C. Swanckamp, ”Standard Handbook of Powerplant Engineering”, McGraw-Hill, 1997.
4. M.M. El-Wakil, ”Powerplant Technology”, McGraw-Hill, 2002.

ارزشیابی:

- تمرین و حضور موثر در کلاس: ۱۰ درصد
- میانترم: ۳۵ درصد
- پایان ترم: ۵۵ درصد

مدرس: دکتر علی کریمی

فهرست مطالب درس

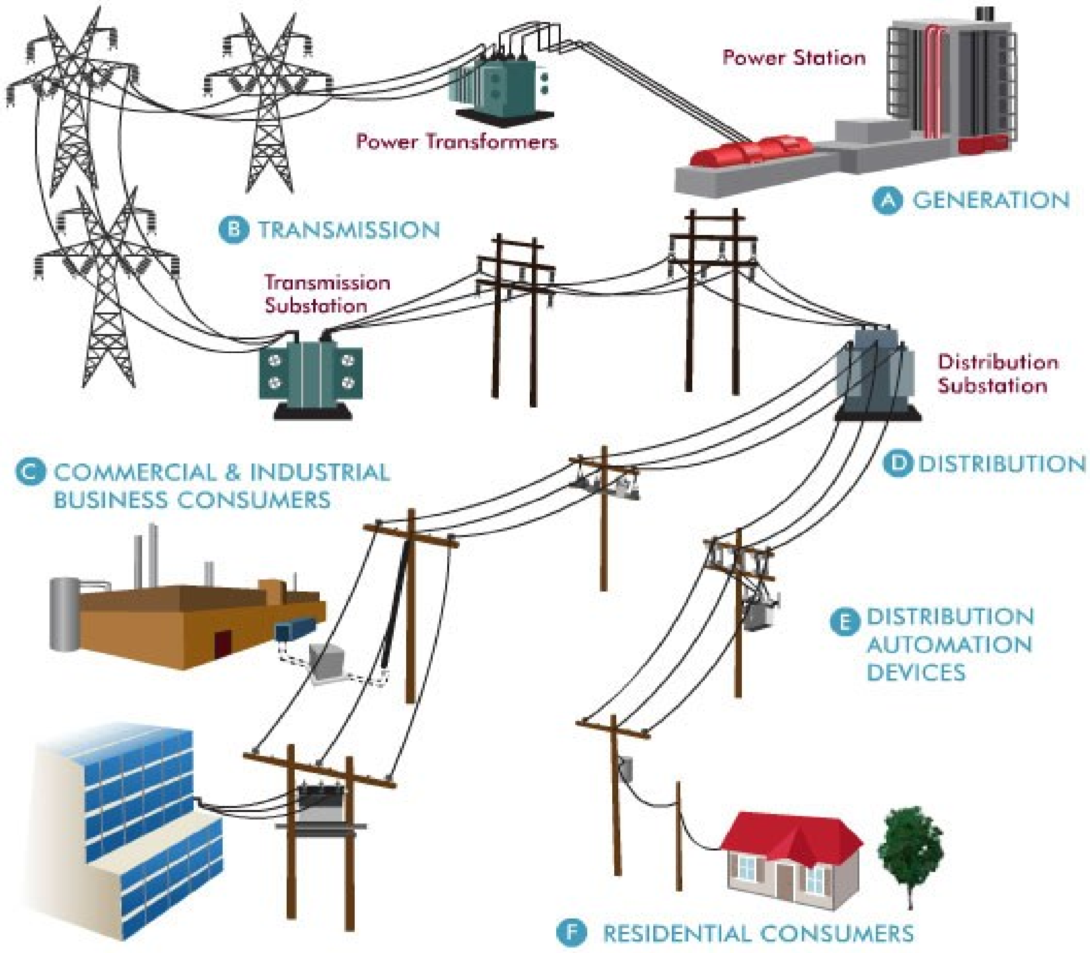
- بخش اول: مقدمه
- بخش دوم: برنامه ریزی نیروگاه ها و مسائل اقتصادی مرتبط با آنها
- بخش سوم: نیروگاه های بخاری
- بخش چهارم: نیروگاه های گازی و سیکل-ترکیبی
- بخش پنجم: نیروگاه های برق آبی
- بخش ششم: نیروگاه های هسته ای
- بخش هفتم مسائل دیگر در نیروگاه های برق (مصرف داخلی، ژنراتورها، سیستم های کنترل ولتاژ و کنترل فرکانس)
- بخش هشتم: نیروگاه های تجدیدپذیر (بادی، خورشیدی، و ...)

بخش اول

مقدمه

شبکه های قدرت

- تولید انرژی الکتریکی (نیروگاه های بزرگ یا Bulk Power Generation و نیروگاه های کوچک یا Distributed Generation)
- مصرف (خانگی، تجاری، صنعتی، کشاورزی، عمومی)
- شبکه ارتباطی بین تولید و مصرف (خطوط انتقال، فوق توزیع و توزیع و همچنین، و پست های الکتریکی)


Power Station
Power Transformers
A GENERATION
B TRANSMISSION
Transmission Substation
Distribution Substation
C COMMERCIAL & INDUSTRIAL BUSINESS CONSUMERS
D DISTRIBUTION
E DISTRIBUTION AUTOMATION DEVICES
F RESIDENTIAL CONSUMERS

شبکه های ارتباطی بین تولید و مصرف برق (خطوط)

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، سال ۹۹-۹۸

انواع خطوط انتقال

- خط هوایی معمولی
- خط هوایی فشرده (Compact)
- خط زمینی (شبکه کابلی)

❖انتقال به صورت AC (بسیار رایج) یا DC (در سطوح خیلی بالا: HVDC)

❖وضعیت ایران (۹ سطح ولتاژ AC داریم):

✓شبکه انتقال ۲۳۰ و ۴۰۰ کیلوولت

✓شبکه فوق توزیع (۶۶) ۶۳ و ۱۳۲ کیلوولت

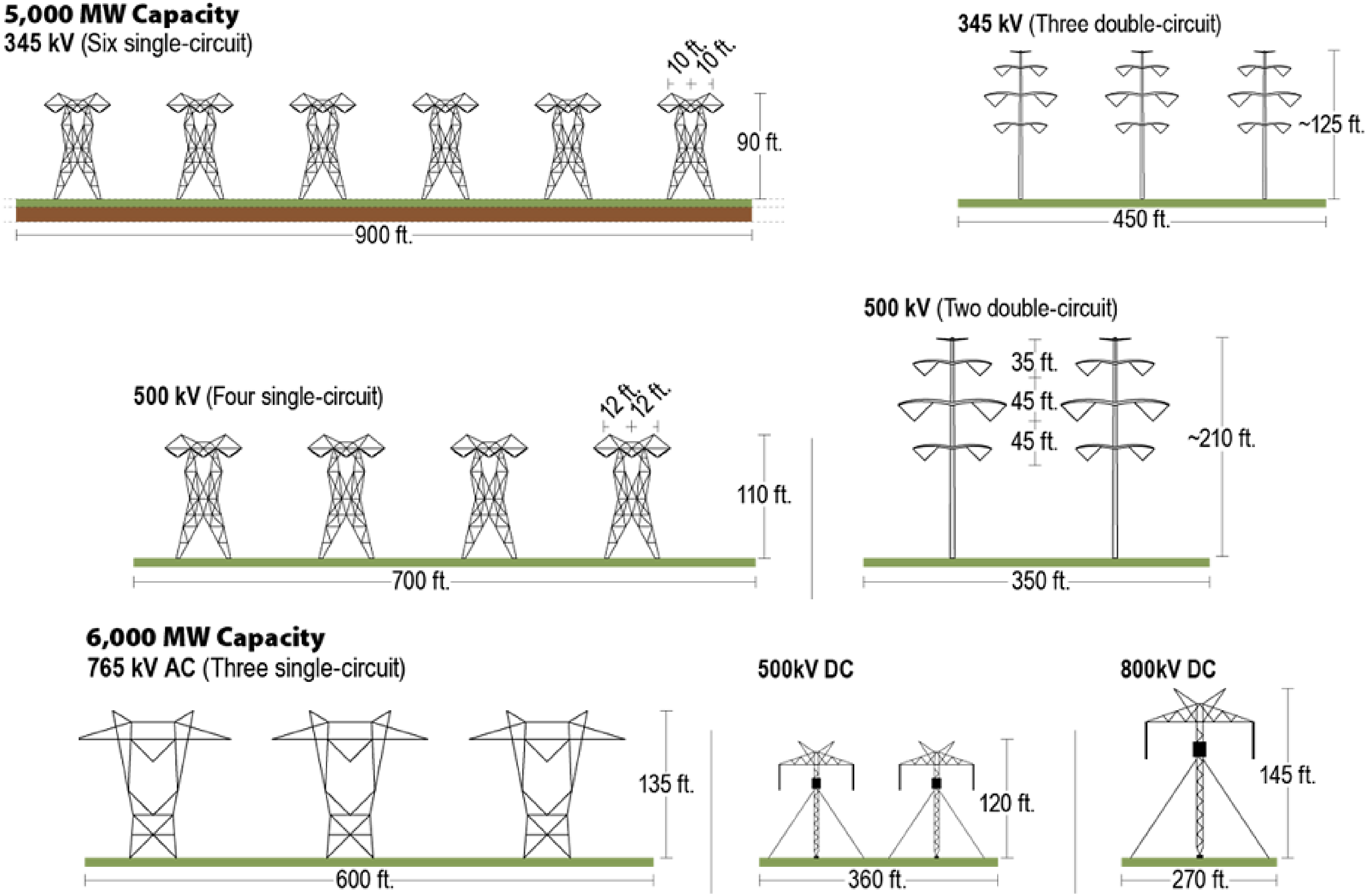
✓شبکه توزیع ۰/۴، ۱۱، ۲۰ و ۳۳ کیلوولت

ولتاژ ۶۶ کیلو ولت بجای ۶۳ کیلو ولت در استان فارس
۱۱ کیلو ولت در استان های خوزستان و فارس و سیستان و بلوچستان
۳۳ کیلو ولت در استان خوزستان

❖سطوح ۷۶۵ و بالاتر در آمریکا، کانادا، برزیل، هند و ...

خط 800kV به صورت DC

شبکه های ارتباطی بین تولید و مصرف برق (خطوط –مقایسه سطوح ولتاژ و فضای موردنیاز)


5,000 MW Capacity
345 kV (Six single-circuit)
10 ft.
10 ft.
90 ft.
900 ft.
345 kV (Three double-circuit)
~125 ft.
450 ft.
500 kV (Four single-circuit)
12 ft.
12 ft.
110 ft.
700 ft.
500 kV (Two double-circuit)
35 ft.
45 ft.
45 ft.
~210 ft.
350 ft.
6,000 MW Capacity
765 kV AC (Three single-circuit)
135 ft.
600 ft.
500kV DC
120 ft.
360 ft.
800kV DC
145 ft.
270 ft.

شبکه های ارتباطی بین تولید و مصرف برق (پست های الکتریکی–Substation)

- **پستهای افزاینده (Step-up):**

پس از تولید برق با ژنراتور، جهت کاهش تلفات و امکان انتقال توانهای بالا به سایر نقاط، بایستی ولتاژ خروجی ژنراتور (که معمولا کمتر از ۲۰ کیلوولت است) را به ولتاژ سطوح انتقال (۲۳۰ یا ۴۰۰ کیلوولت) تبدیل نمود.

- **پستهای کاهنده (Step-down):**

با نزدیکی به محل مصرف، بایستی سطح ولتاژ را کاهش داد که معمولا در چند مرحله (مثلا توسط پستهای انتقال ۴۰۰/۶۳ ،فوق توزیع ۶۳/۲۰ و توزیع ۲۰/.۴ کیلوولت) انجام می شود.

- **پست سوئیچینگ**

تولید انرژی در نیروگاه ها

انواع نیروگاه ها:

- ✓ بخاری (سوخت فسیلی-تبدیل آب به بخار)
- ✓ گازی (سوخت فسیلی-هوای محیط داغ می شود)
- ✓ سیکل ترکیبی (سوخت فسیلی-ترکیب واحدهای گازی و بخاری)
- ✓ هسته ای (سوخت اورانیوم غنی شده-آب به بخار)
- ✓ دیزلی (سوخت فسیلی-موتور درون سوز)
- ✓ موتورهای گازسوز (سوخت فسیلی-موتور رفت و برگشتی)

نیروگاه های حرارتی- طیف وسیعی از تولید انرژی در جهان

- ✓ آبی
- ✓ تلمبه ذخیره ای (دارای دو سد بالایی و پایینی، کار ذخیره انرژی را انجام می دهد)
- ✓ بادی (توربین های بادی)
- ✓ خورشیدی (هم به صورت فتوولتائیک هم به صورت CSP یا Concentrated Solar Power)
- ✓ و نیروگاه های دیگر (پیل سوختی (Fuel Cell)، زمین گرمایی، جذر ومد، بیوماس و ...)

عمدتا به صورت تجدیدپذیر

- ❖ اکثر نیروگاه های بزرگ (Bulk Power Generation) شامل بخاری، هسته ای، گازی، سیکل ترکیبی، آبی و تلمبه ذخیره ای است.
- ❖ بسیاری از نیروگاه های بادی، خورشیدی، دیزلی، موتورهای گازسوز و سایر نیروگاه ها به صورت تولید پراکنده یا DG استفاده می شوند (اگرچه بادی و خورشیدی بزرگ هم وجود دارد).

تولید انرژی در نیروگاه ها (هزینه های نوعی در سال ۲۰۱۶)

Technology	Nominal Capacity (MW)	Overnight Capital Cost ($/kW)	Fixed O&M Cost ($/kW-yr)	Variable O&M Cost ($/MWh)
Coal (Ultra Supercritical)	650	3600	42	4.6
Natural Gas Combined Cycle (NGCC)	700	978	11	3.5
Gas Turbine Power Plant	211	651	5.26	28
Nuclear	2234	5530	93.28	2.14
Conventional Hydroelectric	500	1500-3000 (Location dependent)	14	0
Pumped Storage	250	1000-5000 (Location dependent)	18	0
Onshore Wind	100	1870 (2300 in 2013)	39	0
Offshore Wind	400	4600	74	0
Fuel Cells	10	7000	0	43
Solar Thermal	100	5000	67	0
Photovoltaic	20	2600 (4400 in 2013)	23	0
Geothermal	50	4500	130	0

✓سطرهایی از جدول که رنگی شده است، نیروگاههایی هستند که در اکثر شبکه های برق وجود دارد.

✓سوال: در صورتی که بار شبکه زیاد شود و فرصت زمانی و هزینه کافی وجود نداشته باشد، کدام نیروگاه برای ساخت پیشنهاد می شود؟

✓سوال: در بین نیروگاه های موجود، کدام نیروگاه ها باید Base load باشند؟

Reference: U.S. Energy Information Administration (EIA)

تولید انرژی در نیروگاه ها (هزینه های نوعی)

هزینه یک شبه (OC) را می توان با رابطهٔ استهلاک اقتصاد مهندسی به هزینه ثابت در یک بازه دلخواه تبدیل کرد:

$$FC = \frac{r}{1-e^{-r\times T}} \times OC$$

FC: هزینه ثابت
r: نرخ تنزیل (برحسب درصد در سال)
T: عمر نیروگاه (برحسب سال)

مثال: برای یک نیروگاه زغال سنگی با طول عمر ۴۰ سال و نرخ تنزیل ۱۰ درصد داریم:

$$FC = \frac{o.1}{1-e^{-0.1\times 40}} \times 3600 = 366.7 \quad \$/kWy$$

هزینه یک شبه یا سرمایه گذاری در هر ساعت:

$$\Rightarrow FC = 366.7 \times \frac{1000}{8760} = 41.9\,\$/MWh$$

نکته مهم:

برای سوددهی درآمدهای نیروگاه در هر سال باید بزرگتر از:

هزینه ثابت یک شبه در سال + هزینه تعمیر و نگهداری ثابت در سال + هزینه بهره برداری متغیر در سال باشد

تمرین۱ : با توجه به جدول مذکور، برای نیروگاه های زغال سنگی، توربین گازی و فتوولتائیک، محاسبه کنید که حداقل فروش آنها در هر سال باید چقدر باشد تا هزینه ها جبران گردد (فرض: نیروگاه زغال سنگی ۹۰ درصد، نیروگاه گازی ۵۰ درصد و نیروگاه فتوولتائیک ۳۵ درصد ظرفیت خود را در سال می تواند استفاده کند). سعی کنید اعداد را برای ظرفیت ۱ کیلووات محاسبه کنید تا قابل مقایسه باشند

موعد تحویل: جلسه آینده

تولید انرژی در نیروگاه ها

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، سال ۹۹-۹۸

۱۰ نیروگاه بزرگ جهان:

Rank	Station	Country	Capacity (MW)	Type
1	Three Gorges Dam	China	22,500	Hydro
2	Itaipu Dam	Brazil Paraguay	14,000	Hydro
3	Xiluodu	China	13,860	Hydro
4	Guri	Venezuela	10,235	Hydro
5	Tucuruí	Brazil	8,370	Hydro
6	Kashiwazaki-Kariwa	Japan	7,965	Nuclear
7	Grand Coulee	United States	6,809	Hydro
8	Longtan	China	6,426	Hydro
9	Sayano-Shushenskaya	Russia	6,400	Hydro
10	Bruce	Canada	6,300	Nuclear

بزرگترین نیروگاه های ایران:

- ✓ سیکل ترکیبی دماوند (شهدای پاکدشت): ۲۸۶۸MW: ۱۲ واحد گازی ۱۵۹MWو ۶ واحد بخار ۱۶۰MW
- ✓ نیروگاه سیکل ترکیبی شهید سلیمی نکا: ۲۲۱۳MW شامل ۴ واحد بخار ۴۴۰ مگاواتی، یک بلوک سیکل ترکیبی ۴۳۲ مگاواتی متشکل از ۲ واحد گازی ۱۳۶ مگاواتی و ۱ واحد بخار ۱۶۰ مگاواتی و همچنین ۲ واحد ۹٫۴ مگاواتی است
- ✓ نیروگاه های رودشور(۲۱۶۲MW) و رجایی (۲۰۴۲MW) نیز در رده های بعدی هستند.
- ✓ نیروگاه های کارون۳، شهید عباسپور (کارون ۱)، مسجدسلیمان و گتوند نیز نیروگاه های برق آبی بزرگ هستند (هر کدام ۲۰۰۰MW)

وضعیت نیروگاه ها در ایران (سال ٩٧)

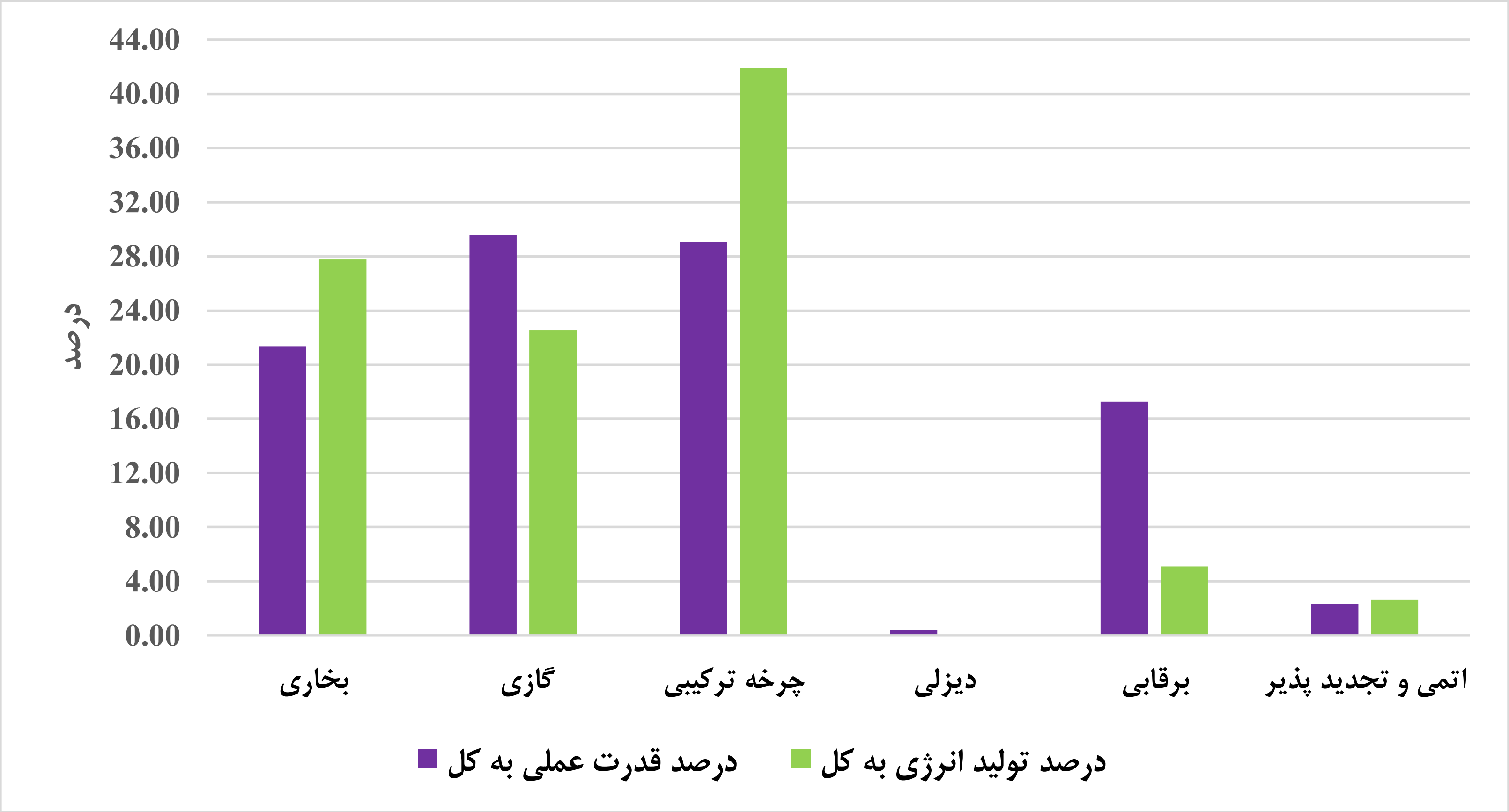
نوع نیروگاه	تعداد واحد نیروگاهی				قدرت نامی (مگاوات)			
	وزارت نیرو	صنایع بزرگ	بخش خصوصی	جمع	وزارت نیرو	صنایع بزرگ	بخش خصوصی	جمع
بخاری	٥٤	٢٣	٢٥	١٠٢	١١٢٤١	٥٨٩	٤٠٠٠	١٥٨٢٩
گازی	١١٩	٦١	٣٢١	٥٠١	٦١٩٥	٥٤٧٦	١٣٦٧٢	٢٥٣٤٣
چرخه ترکیبی	٣٧	–	١٣٥	١٧٢	٥٣٨٩	–	١٩٦٠٧	٢٤٩٩٥
دیزلی	١٦٩	–	–	١٦٩	٤٠٩	–	–	٤٠٩
جمع حرارتی	٣٧٩	٨٤	٤٨١	٩٤٤	٢٣٢٣٤	٦٠٦٥	٣٧٢٧٨	٦٦٥٧٧
برق آبی	١٤٥	–	–	١٤٥	١٢٠٢٣	–	–	١٢٠٢٣
اتمی و سایر تجدید پذیر	١٧٤	–	١٥٥	٣٢٩	١١٢٧	–	٤٩٩	١٦٢٦
جمع تجدید پذیر	٣١٩	٠	١٥٥	٤٧٤	١٣١٤٩	٠	٤٩٩	١٣٦٤٩
جمع	٦٩٨	٨٤	٦٣٦	١٤١٨	٣٦٣٨٤	٦٠٦٥	٣٧٧٧٧	٨٠٢٢٥

مرجع: آمار تفصیلی صنعت برق ایران در سال ٩٧

وضعیت نیروگاه ها در ایران (سال ٩٧)

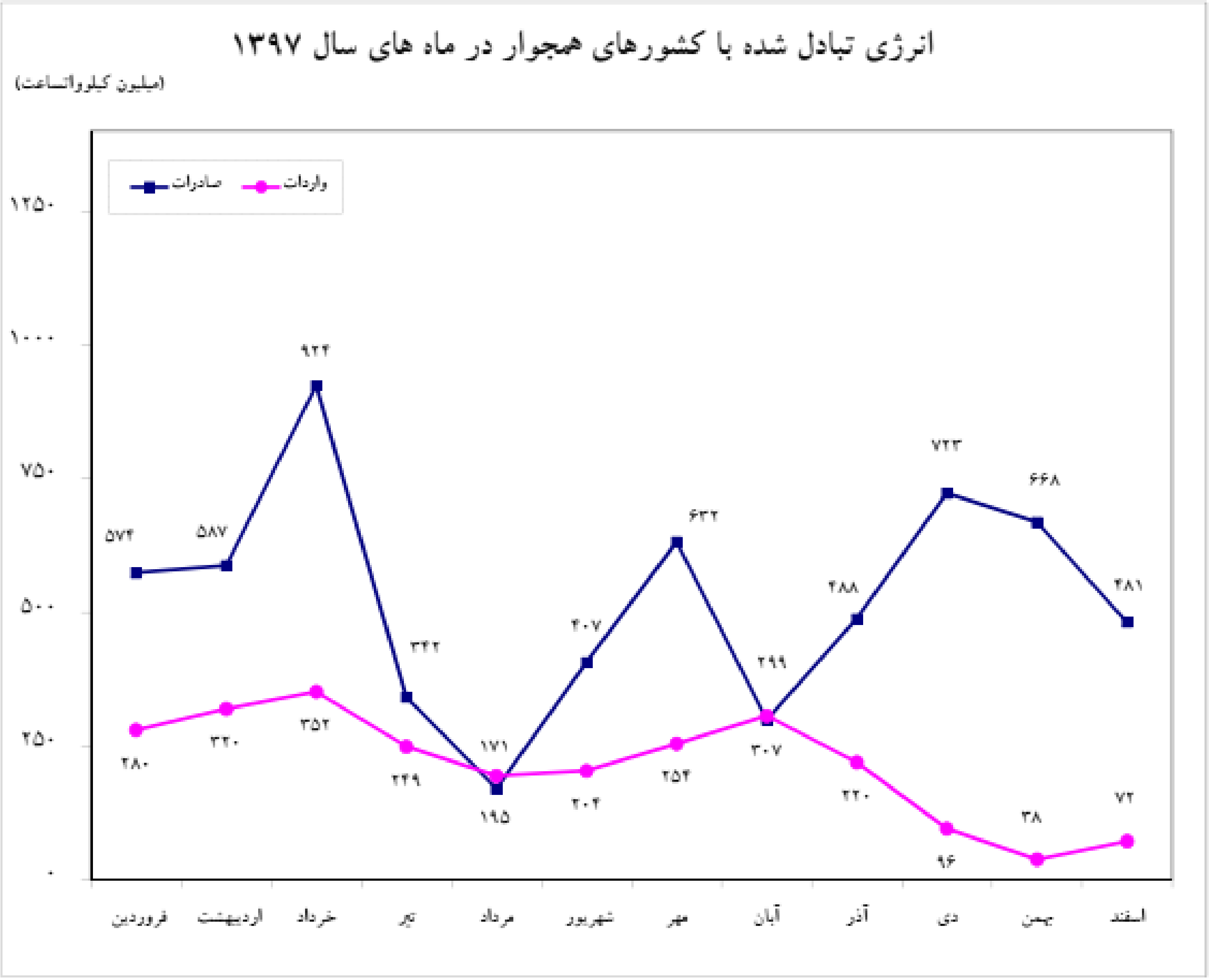
نوع نیروگاه	قدرت نامی (مگاوات)	قدرت عملی (مگاوات)	درصد قدرت عملی به کل	تولید انرژی (گیگاوات ساعت)	درصد تولید انرژی	مصرف داخلی (گیگاوات ساعت)	درصد مصرف داخلی به تولید انرژی
بخاری	١٥٨٢٩	١٤٨٩٢	٢١/٣٧ یا ١٤٨٩٢÷٦٩٦٨٦	٨٥٦٥٥	٢٧/٧٨یا ٨٥٦٥٥÷٣٠٨٣٥٥	٥٩٧٩	٦/٩٨ یا ٥٩٧٩÷٨٥٦٥٥
گازی	٢٥٣٤٣	٢٠٦١٧	٢٩/٥٩	٦٩٥٢١	٢٢/٥٤	٣٦٥	٠/٥٣
چرخه ترکیبی	٢٤٩٩٥	٢٠٢٦٥	٢٩/٠٨	١٢٩٢٠١	٤١/٩٠	٢٢٥٨	١/٧٥
دیزلی	٤٠٩	٢٦٣	٠/٣٨	٥٤	٠/٠١٨	٤	٧/٤١
جمع حرارتی	٦٦٥٧٧	٥٦٠٣٧	٨٠/٤١	٢٨٤٤٣١	٩٢/٢٤	٨٦٠٥	٣/٠٣
برق آبی	١٢٠٢٣	١٢٠٢٣	١٧/٢٥	١٥٧٦٤	٥/١١	٨٧	٠/٥٥
اتمی و سایر تجدید پذیر	١٦٢٦	١٦٢٦	٢/٣٣	٨١٦٠	٢/٦٥	٠	٠
جمع تجدید پذیر	١٣٦٤٩	١٣٦٤٩	١٩/٥٩	٢٣٩٢٤	٧/٧٦	٨٧	٠/٣٦
جمع	٨٠٢٢٥	٦٩٦٨٦	١٠٠	٣٠٨٣٥٥	١٠٠	٨٦٩٢	٢/٨٢

وضعیت نیروگاه ها در ایران (تولید انرژی و قدرت عملی در سال ۹۷)

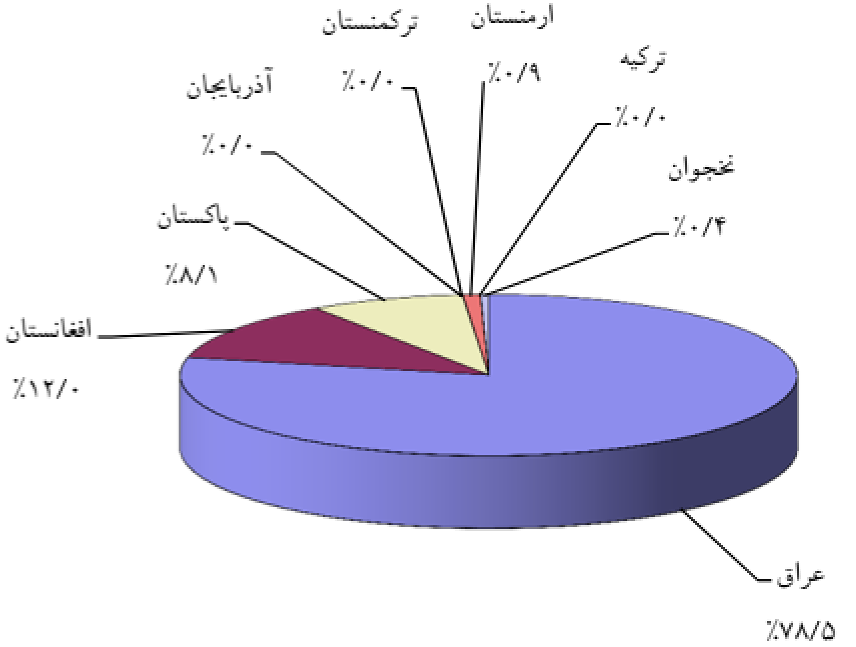


سوال: شکل فوق را تفسیر کنید.

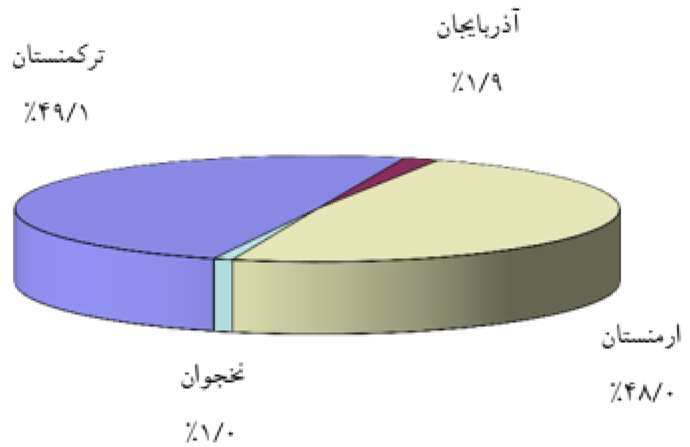
وضعیت تبادلات انرژی برق با کشورهای همجوار (سال ۹۷)



وضعیت تبادلات انرژی برق با کشورهای همجوار (سال ۹۷)

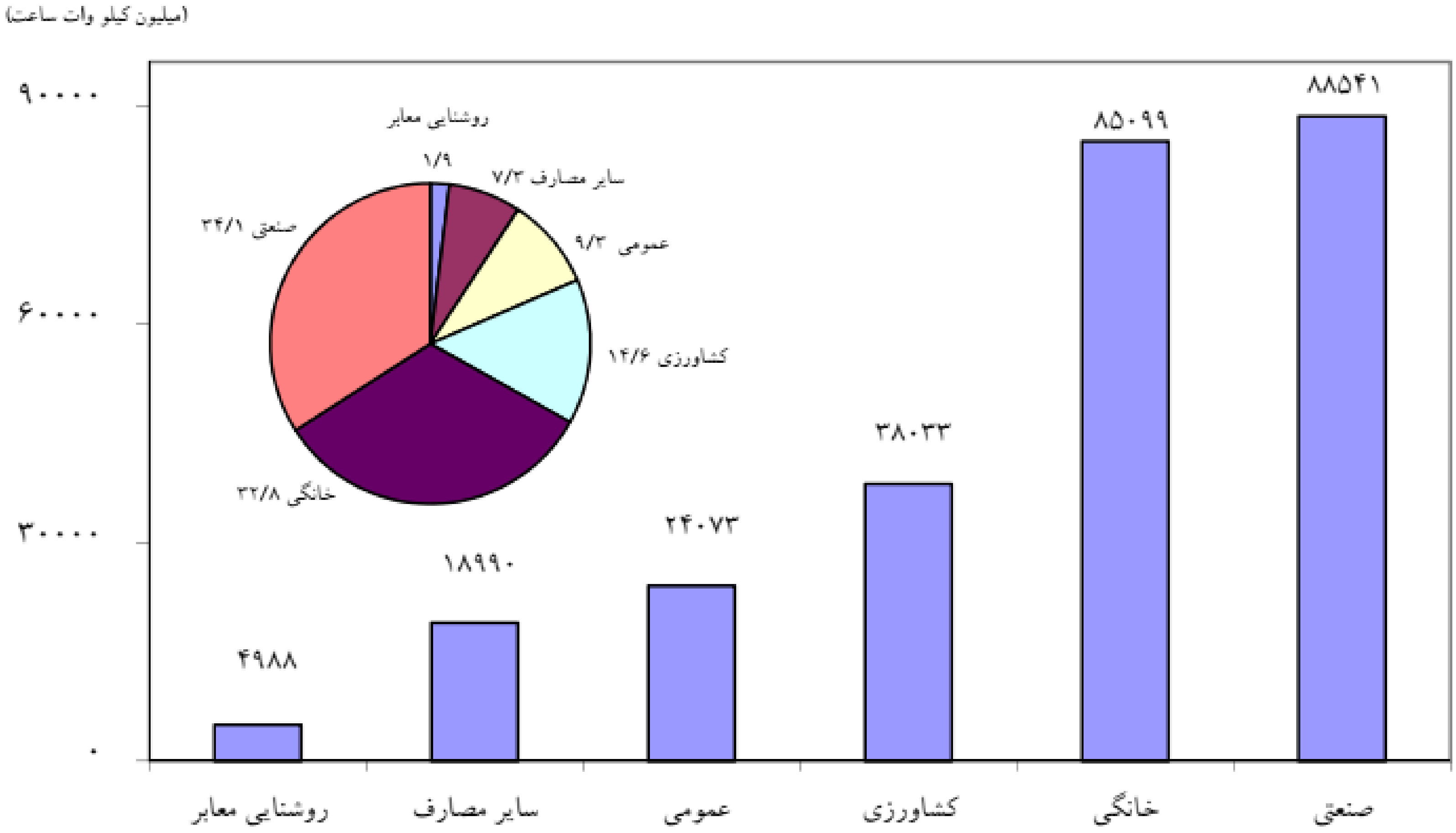


سهم کشورهای همجوار از ۶۲۹۵ میلیون کیلوواتساعت صادرات برق از کشور در سال ۱۳۹۷



سهم کشورهای همجوار از ۲۵۸۷ میلیون کیلوواتساعت واردات برق به کشور در سال ۱۳۹۷

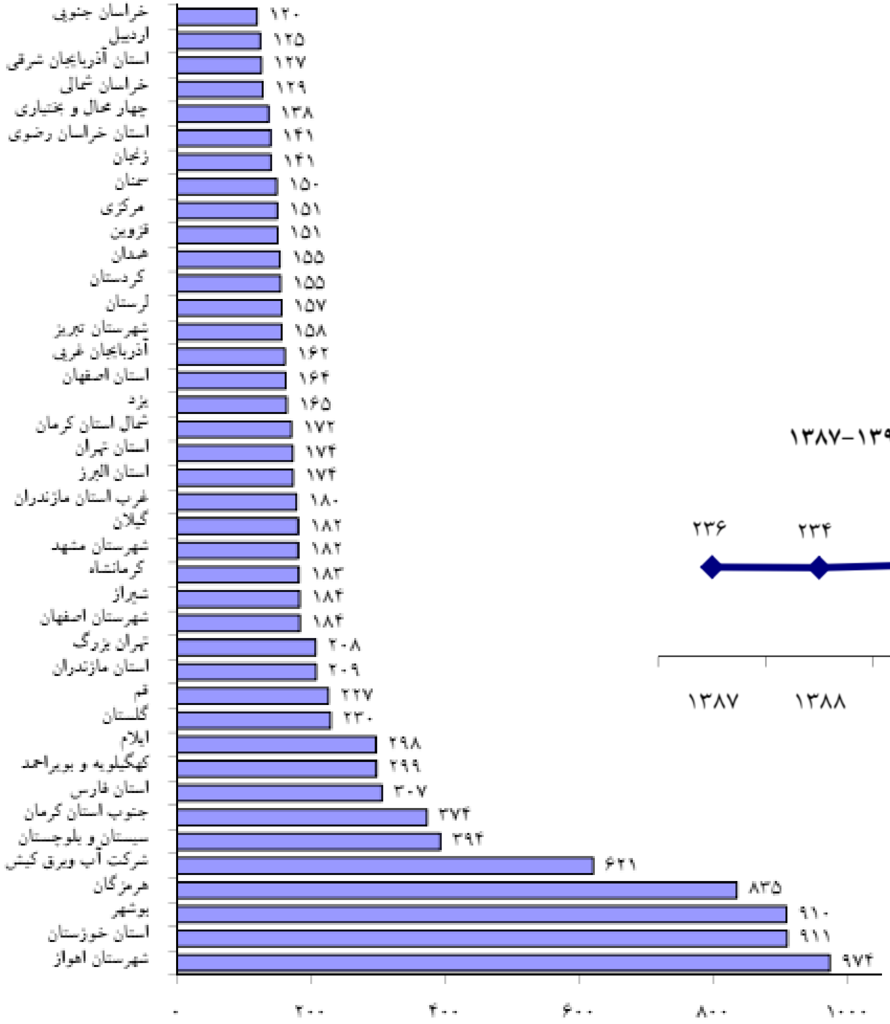
وضعیت فروش انرژی برق در سال ۹۷ به تفکیک (مقادیر مصرف انرژی)



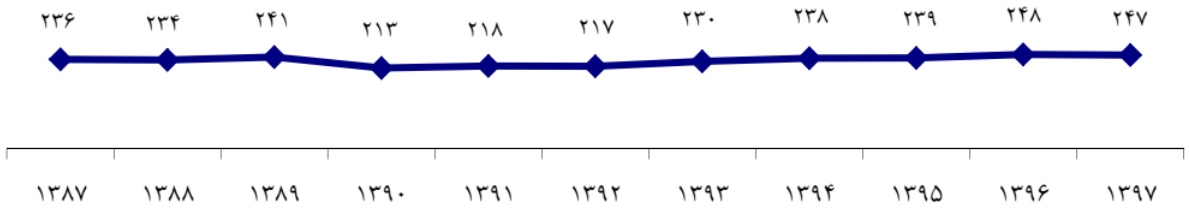
جمع کل مصرف انرژی در سال ۱۳۹۷ حدود ۲۵۹۷۲۴ گیگاوات ساعت بوده است (با تولید مقایسه و تلفات برآورد شود)

وضعیت مصرف برق در ایران

متوسط مصرف ماهانه مشترکین خانگی شرکت های توزیع در سال ۱۳۹۷ برحسب کیلووات ساعت (شکل سمت چپ)

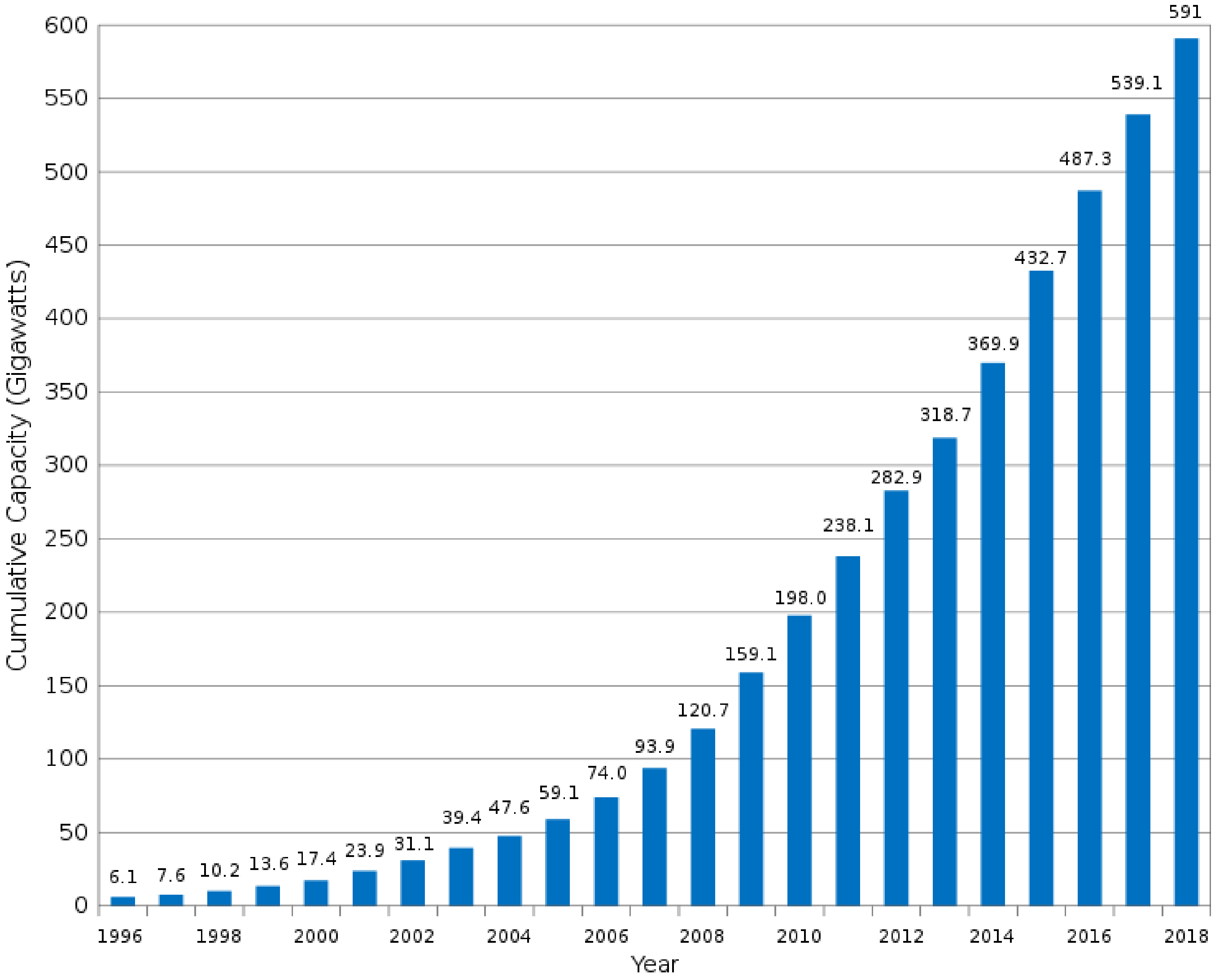


روند تغییرات متوسط مصرف ماهانه مشترکین تعرفه خانگی کل کشور در طی سال های ۱۳۹۷–۱۳۸۷

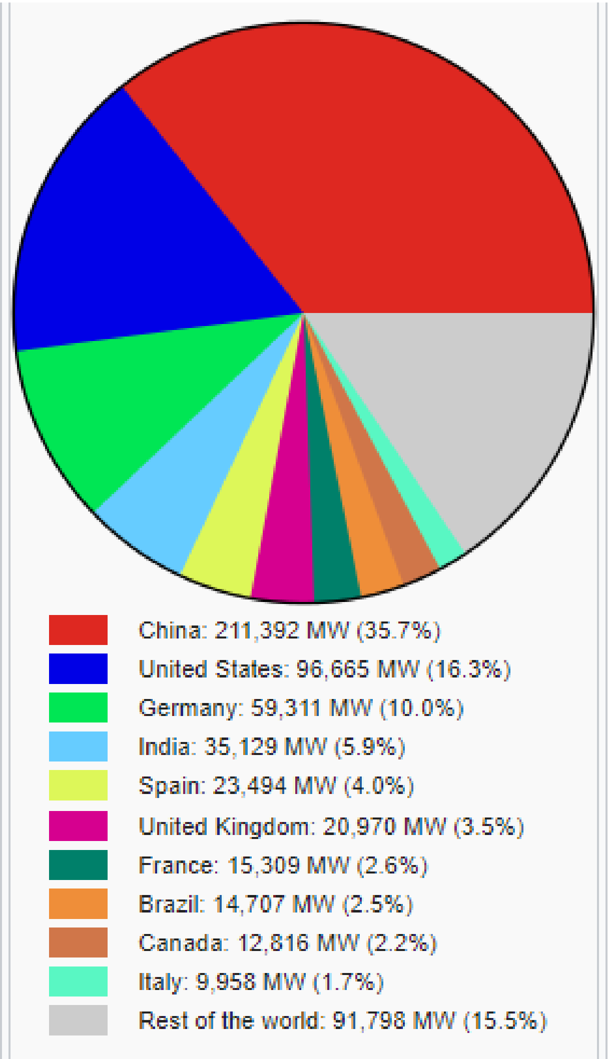


توسعه انرژی های تجدیدپذیر در جهان (بادی)

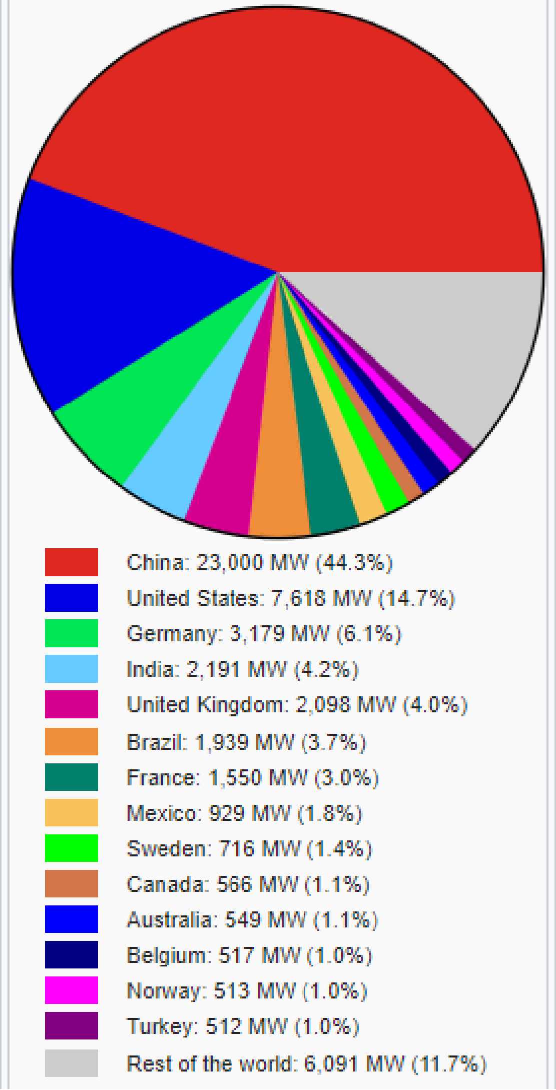
ظرفیت کل توربین‌های بادی نصب شده در جهان برحسب GW یا 1000MW (منبع: GWEC)



توسعه انرژی های تجدیدپذیر در جهان: وضعیت کشورها در زمینه نصب توربین‌های بادی



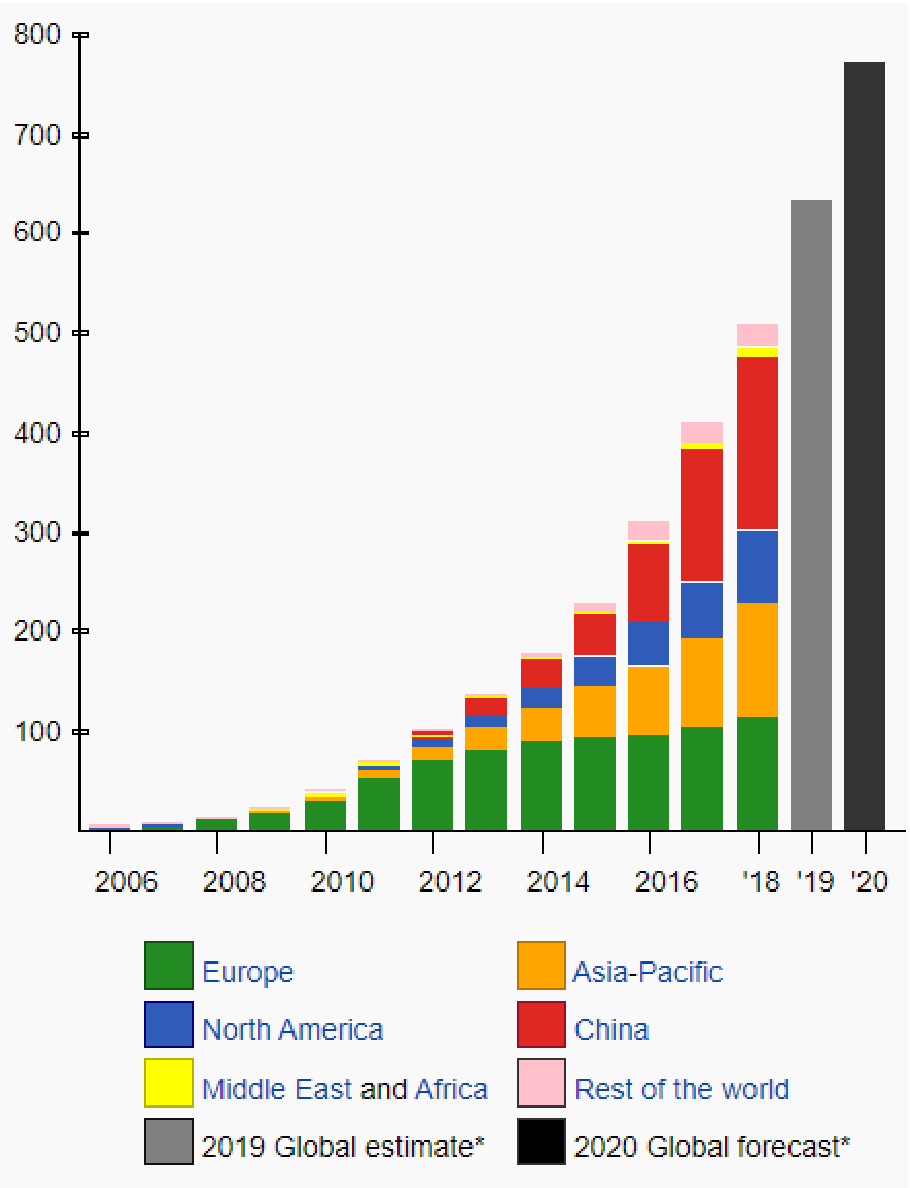
ظرفیت نصب کل بادی در سال ۲۰۱۸



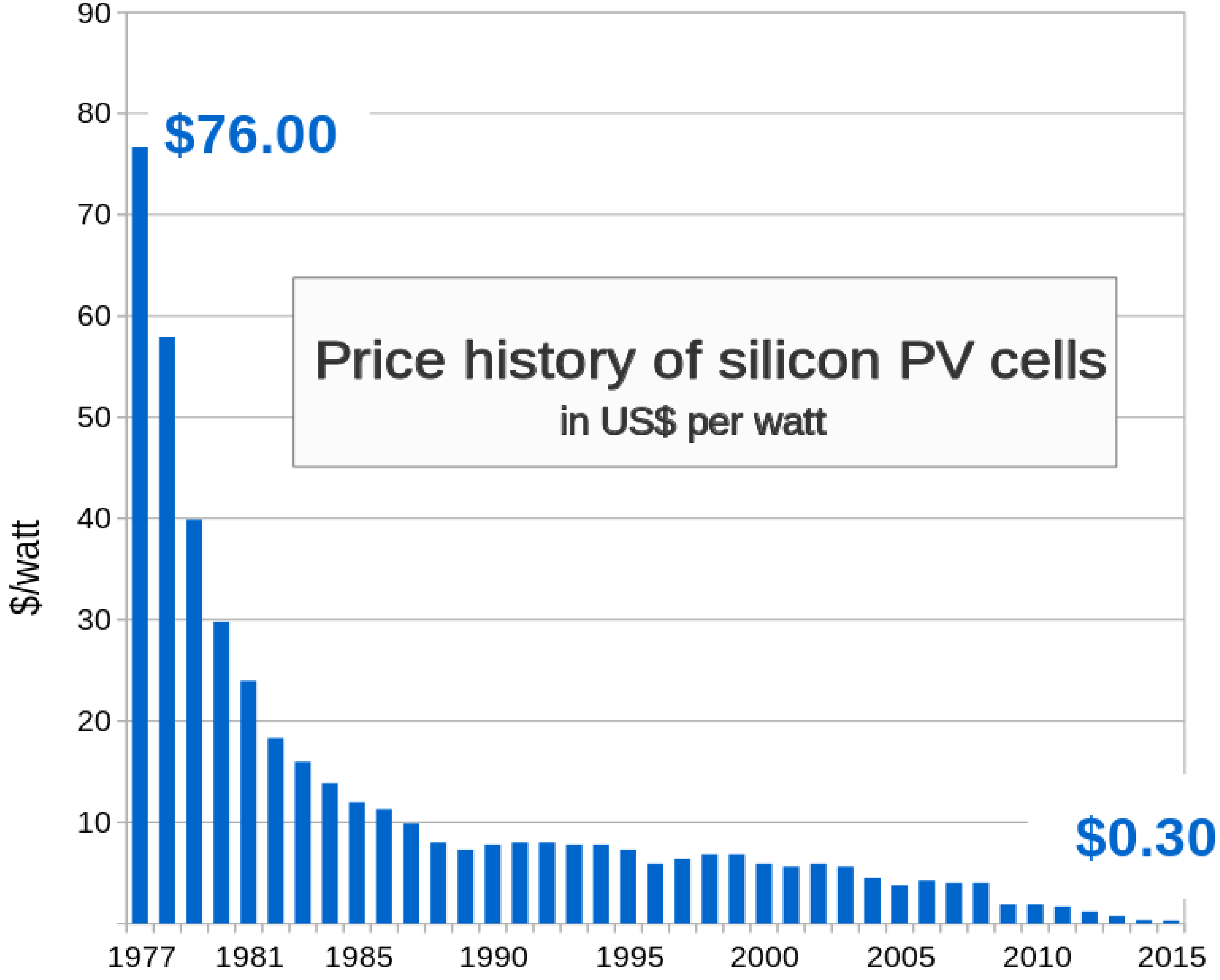
ظرفیت نصب جدید بادی در سال ۲۰۱۸

توسعه انرژی های تجدیدپذیر در جهان (فتوولتائیک)

ظرفیت کل سامانه‌های PV نصب شده در جهان تا سال ۲۰۱۸ (بر حسب GW یا 1000MW)



توسعه انرژی های تجدیدپذیر در جهان (فتوولتائیک)



Source: Bloomberg New Energy Finance & pv.energytrend.com

وضعیت ایران

تمرین ۲:

با مراجعه به آمارهای تفصیلی صنعت برق ایران در ۵ سال گذشته، میزان تولید ناخالص انرژی و مصرف داخلی نیروگاه ها، مصرف انرژی مشترکان مختلف برق و تلفات انرژی را بررسی نمایید (یک گزارش تحلیلی ازآن ارائه کنید).

موعد تحویل: جلسه آینده