

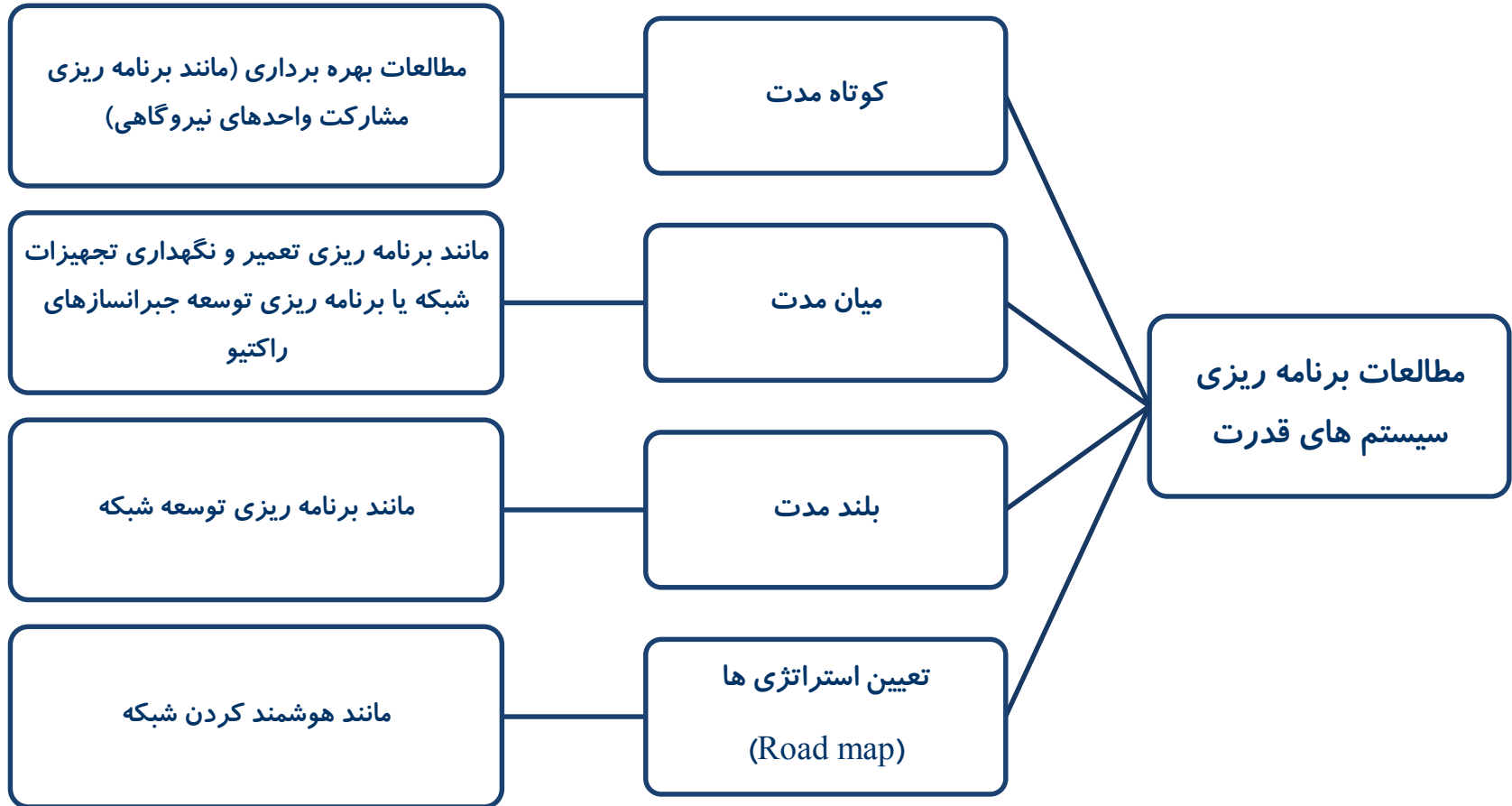
نام درس: تولید انرژی الکتریکی

بخش دوم

برنامه ریزی نیروگاه ها و مسائل اقتصادی مرتبط با آنها

مدرس: دکتر علی کریمی





برنامه‌ریزی توسعه پست‌ها (Substation Expansion Planning)

- ظرفیت کدامین تجهیزات پست‌های موجود باید افزایش یابد؟
- چه پست‌های جدیدی، با چه ظرفیت تجهیزاتی، در چه مکان‌هایی و در چه زمانی باید احداث شوند؟

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال و فوق توزیع (Network Expansion Planning)

- در کدام مسیر چه خطی و با چه ظرفیت و سطح ولتاژی باید احداث گردد؟
- اتصالات خطوط موجود در کدام محل و چگونه تغییر یابد؟

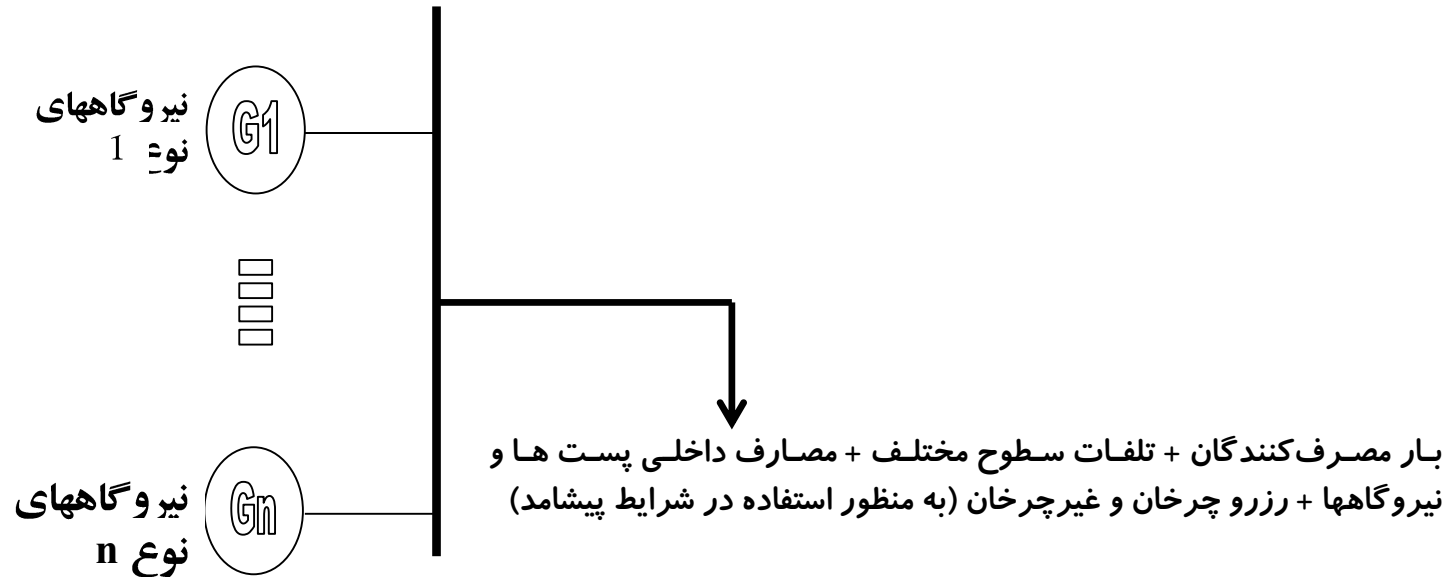
برنامه‌ریزی توسعه نیروگاه‌ها (Generation Expansion Planning)

- تعیین نوع، ظرفیت، محل نصب و زمان نصب واحدهای نیروگاهی جدید برای رعایت توازن تولید و مصرف در شبکه با کمترین هزینه ممکن

برنامه ریزی توسعه نیروگاهها در شبکه تک شینه:

❖ از توزیع جغرافیایی بارها و نیروگاهها، قابلیت انتقال توان شبکه انتقال موجود، محدودیت توسعه شبکه انتقال و همچنین تفاوت قیمت سوخت برای نواحی جغرافیایی مختلف صرف نظر می شود

مجموعه تولید همه نیروگاهها



البته در عمل، پس از برنامه ریزی به صورت تک شینه، برنامه ریزی توسعه مرکب نیروگاهها و شبکه انتقال، با در نظر گرفتن چگونگی توزیع بار در منطقه مورد مطالعه، به همراه محدودیت های محیطی جهت احداث نیروگاه، محدودیت های خطوط انتقال جهت انتقال توان تولیدی و محدودیت های سوخت رسانی مکان احداث نیروگاهها نیز مشخص می گردد.

❖ اهداف در مسئله تک شینه:

- ✓ حداقل سازی هزینه احداث نیروگاه
- ✓ حداقل سازی هزینه تامین سوخت
- ✓ حداقل سازی هزینه تعمیر و نگهداری
- ✓ حداقل سازی هزینه بهره برداری

❖ قیود در مسئله تک شینه:

✓ تامین بار، تلفات و مصرف داخلی نیروگاه ها و پست ها در سال های مطالعه

پیش بینی بار بسیار مهم است
(با روش های ریاضی، ابتکاری و هوشمند)

○ میزان حداکثر تقاضای شبکه (Maximum Demand)

○ کل انرژی مورد نیاز

○ نحوه توزیع انرژی تقاضا شده

✓ تامین حداقل قابلیت اطمینان

✓ محدودیت حداکثر تولید انرژی واحدهای آبی

✓ محدودیت تامین انواع سوخت ها

✓ محدودیت حداکثر تولید آلودگی

✓ محدودیت زمان تعمیرات

✓ محدودیت احداث حداکثر واحدهای نیروگاهی از هر نوع

❖ ضریب تقاضا (Demand Factor): میزان حداکثر تقاضا به کل بارهای قابل اتصال

$$d = \frac{\text{maximum demand}}{\text{connected load}}$$

← مثلا، هتل ها ضریب تقاضا کمی دارند 0.5-0.9

❖ ضریب اختلاف یک گروه (Diversity Factor): مجموع حداکثر تقاضاهای منفرد به میزان حداکثر تقاضای آن گروه به صورت همزمان (یک گروه مثل یک خانه، یک مجتمع مسکونی، یک شهر و ...)

$$D = \frac{\sum(\text{maximum demand})}{\text{Maximum Demand of group}}$$

← با توجه به همزمان نبودن تقاضای حداکثر برای مصرف کنندگان مشابه مثلا، برای مصارف مسکونی ممکن است 5 باشد؛ ولی در صنعت کمترین است (حدود 1.3)

❖ ضریب اختلاف حداکثر (Peak Diversity Factor): حداکثر تقاضای گروه مصرف کننده به میزان تقاضای آن گروه در زمان پیک

$$r = \frac{\text{Maximum Demand}}{\text{Maximum Demand (in peak hours)}} > 1$$

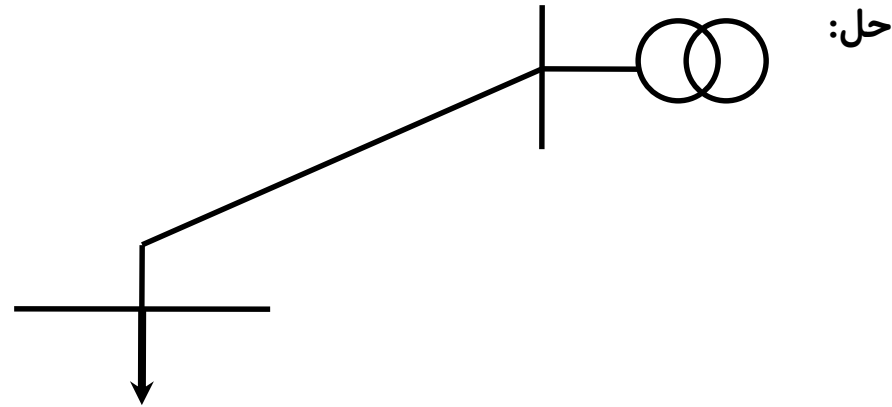
← دوره زمانی که حداکثر بار سیستم یا شبکه وجود دارد، ممکن است با دوره زمانی حداکثر بار مصرف کنندگان یک گروه متفاوت باشد

تعاریف اساسی مرتبط با دیماندا (تقاضا)

مثال: یک مجتمع مسکونی بزرگ دارای ۱۰۰۰ واحد مسکونی با قابلیت اتصال ۴ kW برای هر واحد می باشد. ضریب تقاضای واحدهای مسکونی ۰/۴۵، ضریب اختلاف گروه بارهای خانگی برابر ۳/۵ و ضریب اختلاف حداکثر برابر ۱/۴ است. مشخصات واحدهای غیر مسکونی این مجتمع در جدول زیر آمده است.

ضریب اختلاف گروه بارهای تجاری برابر ۱/۵ و ضریب اختلاف حداکثر برابر ۱/۱ می باشد. با فرض اینکه تلفات توان خط برابر ۵ درصد است. میزان بار حداکثر فیدر تغذیه کننده این مجتمع را در ساعت پیک بدست آورید.

واحد	تعداد	بار قابل اتصال (kW)	ضریب تقاضا بر حسب درصد
خشک شویی	۱	۲۰	۶۸
نمازخانه	۲	۱۰	۵۶
سالن غذاخوری	۱	۶۰	۵۲
کتابفروشی	۱	۵	۶۶
فروشگاه خشکبار	۱	۷	۷۶
داروخانه	۲	۱۰	۷۹
فروشگاه سبزی	۲	۵	۷۳
فروشگاه کفش	۱	۲	۶۷
فروشگاه لباس	۱	۴	۵۳
سالن نمایش	۱	۱۰۰	۴۹



منازل مسکونی:

$$D=3.5, r=1.4$$

$$\text{Maximum demand} = 4 \times 0.45 = 1.8 \text{ kW}$$

$$\text{M.D for 1000 unit} = (1.8 \times 1000) / 3.5 = 514 \text{ kW}$$

$$\text{M.D for 1000 unit in peak} = 514 / 1.4 = 367 \text{ kW}$$

4kW, d=0.45	4kW, d=0.45
4kW, d=0.45	4kW, d=0.45
.	.
.	.
.	.

تعاریف اساسی مرتبط با دیمانند (تقاضا)

واحدهای تجاری:

$D=1.5, r=1.1$

Maximum demand	ضریب تقاضا بر حسب درصد	بار قابل اتصال (kW)	تعداد	واحد
13.6kW	۶۸	۲۰	۱	خشک شویی
11.2	۵۶	۱۰	۲	نمازخانه
31.2	۵۲	۶۰	۱	سالن غذاخوری
3.3	۶۶	۵	۱	کتابفروشی
5.3	۷۶	۷	۱	فروشگاه خشکبار
15.8	۷۹	۱۰	۲	داروخانه
7.3	۷۳	۵	۲	فروشگاه سبزی
1.3	۶۷	۲	۱	فروشگاه کفش
2.1	۵۳	۴	۱	فروشگاه لباس
49	۴۹	۱۰۰	۱	سالن نمایش

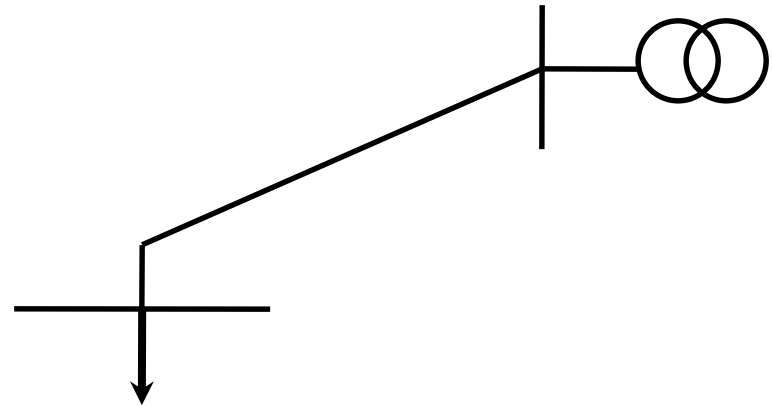
مجموع حداکثر تقاضاهای واحدهای تجاری = 140.1 kW

Commercial maximum demand for all units= $140.1/1.5=93.4$ KW

Commercial M.D in peak= $93.4/1.1=84.9$ KW

Total M.D in peak= $367+84.9=452$ KW

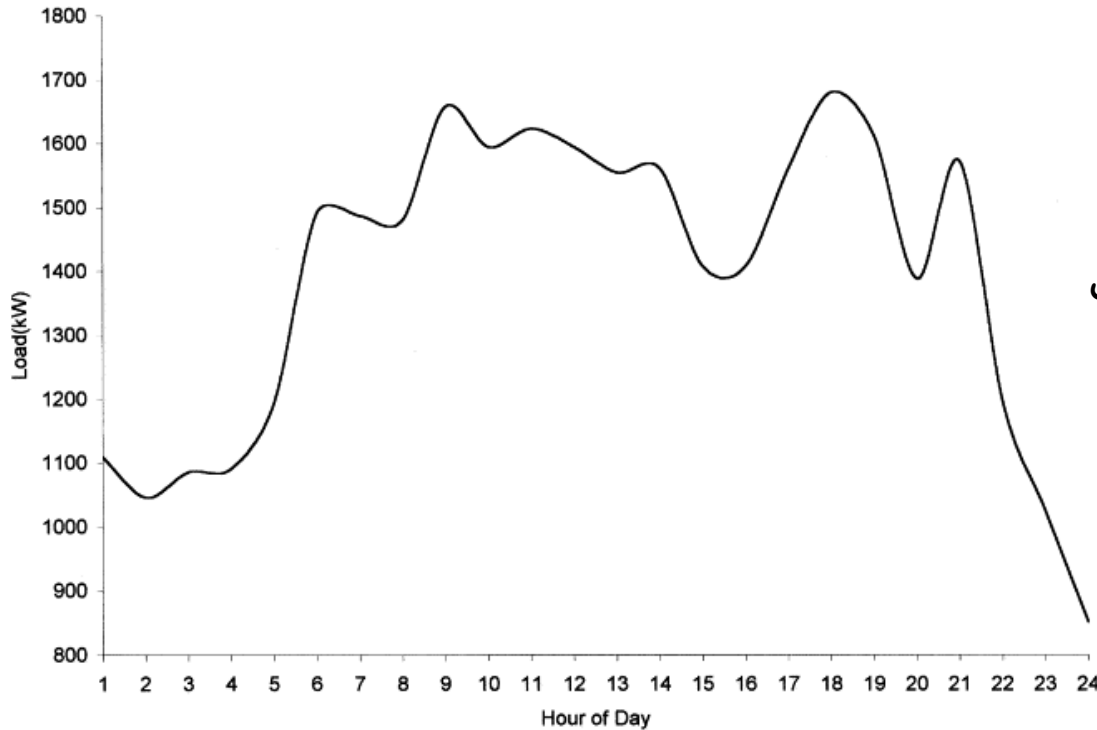
Feeder Capacity= $452\times 1.05=474.6$ KW



منحنی بار: برای بارهای مختلف، متفاوت است. به لحاظ زمانی نیز منحنی های بار متفاوت داریم:

- ❖ روزانه
- ❖ هفتگی
- ❖ ماهانه
- ❖ سالانه

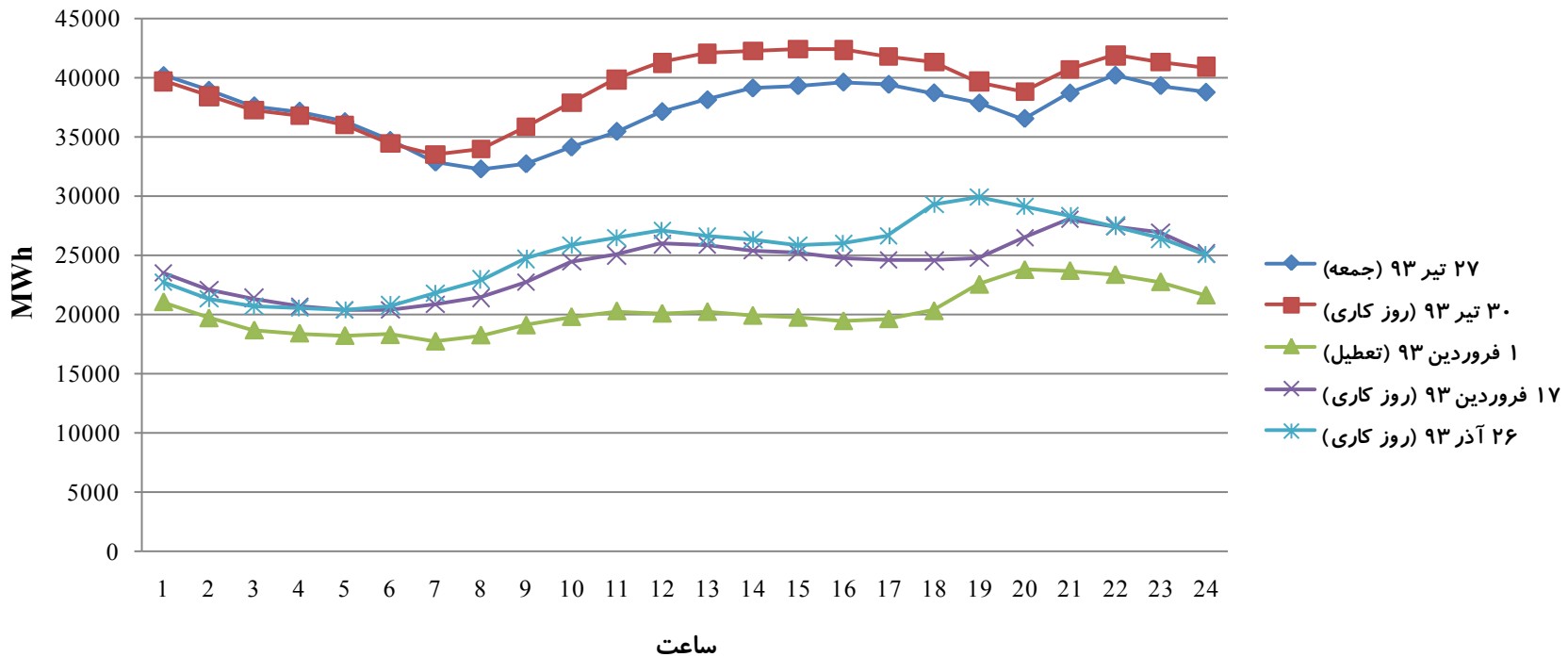
با توجه به نوع مطالعات کوتاه مدت (منحنی های روزانه و هفتگی)، میان مدت و بلندمدت می توان منحنی بارهای متناسب را استفاده نمود.



منحنی بار روزانه یک شبکه برق:

به طور معمول، در شبکه های برق (از دید بالادست)، منحنی های روزانه مشابه منحنی همان روز در سال قبل هستند (فقط کمی رشد در آنها مشاهده می شود)

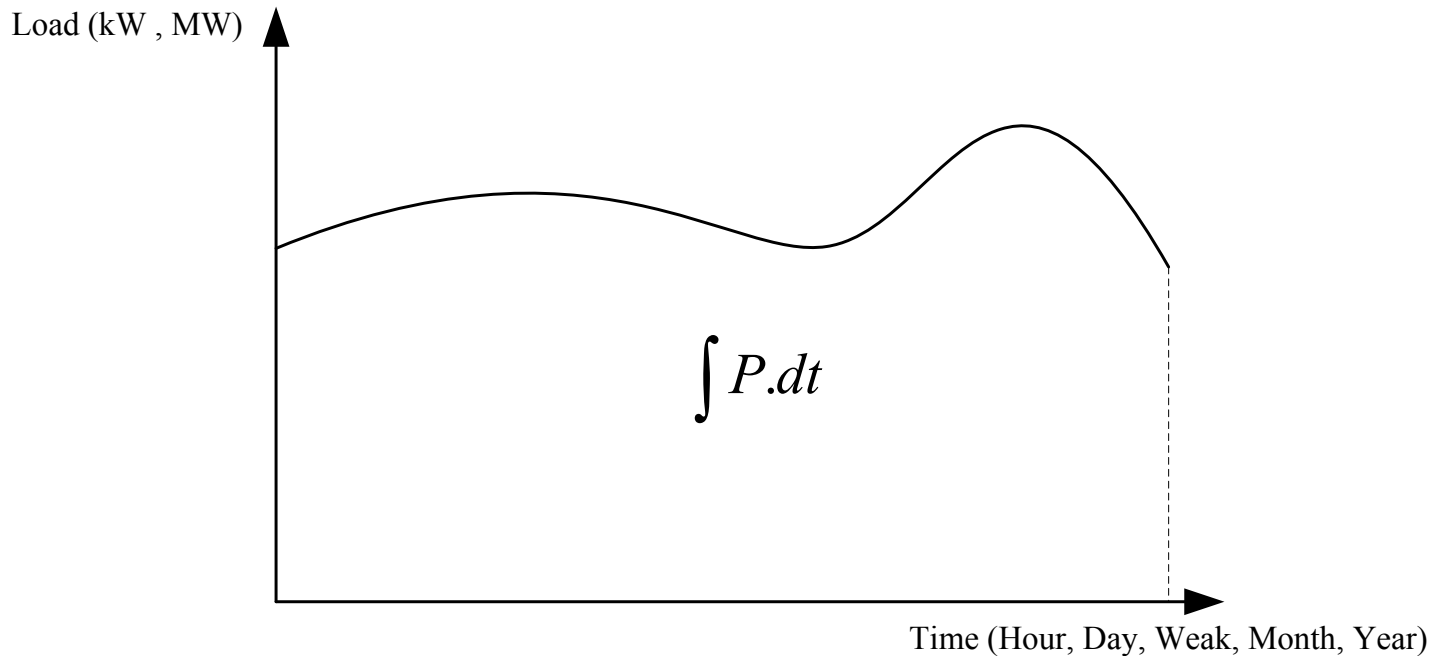
انرژی فروخته شده به کلیه بارهای شبکه سراسری



- ✓ شکل فوق اطلاعات واقعی بارهای شبکه سراسری را در مقاطع زمانی مختلف سال ۹۳ نشان می دهد.
- ✓ تفاوت مصرف در روزهای کاری و تعطیل مشخص است.
- ✓ در همه منحنی ها تقریباً دو پیک مشاهده می شود که البته، در روزهای متفاوت، زمان آن فرق می کند.

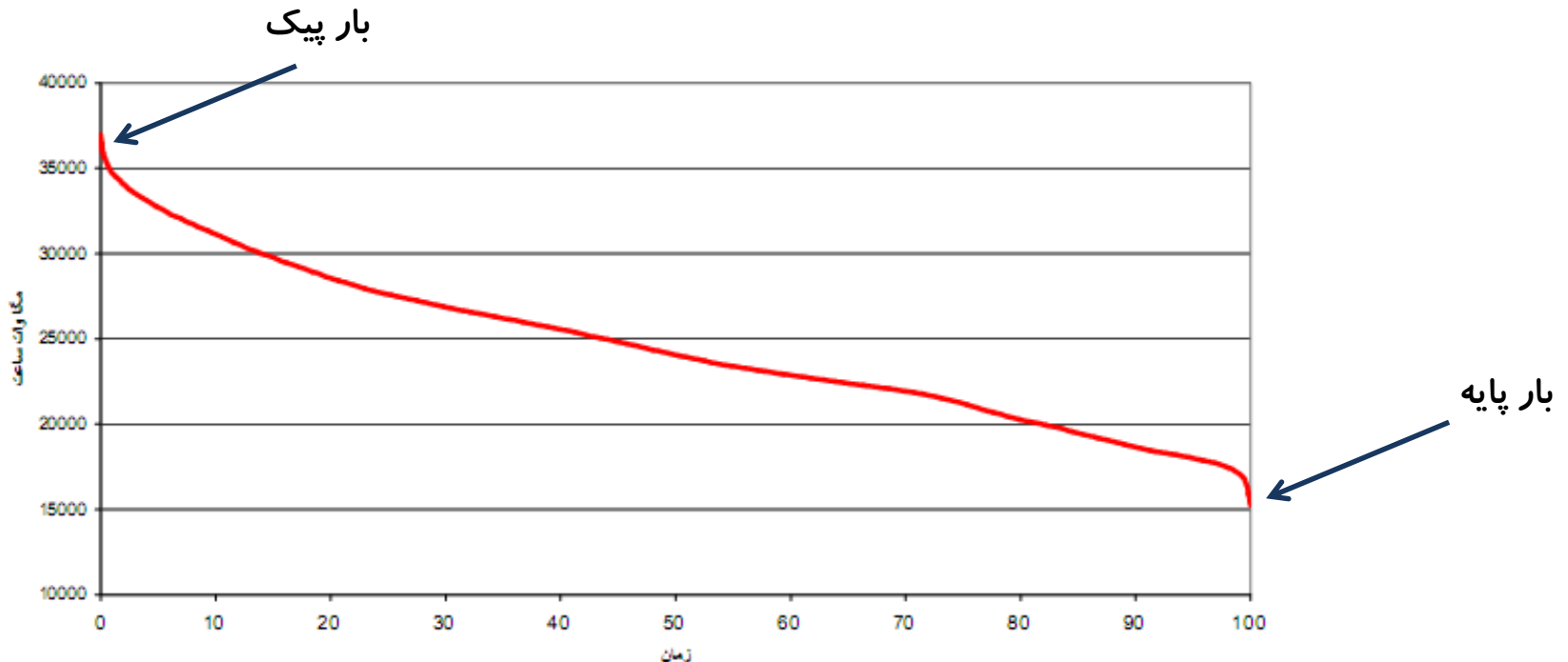
مرجع: دفتر بازار برق شرکت مدیریت شبکه برق ایران

- ✓ با استفاده از منحنی های بار می توان میزان انرژی مصرفی شبکه را در دوره تناوبی موردنظر (روزانه، هفتگی و ...) محاسبه کرد.
- ✓ مساحت زیر نمودار و یا انتگرال بار بر حسب زمان، انرژی مصرفی را مشخص می کند.



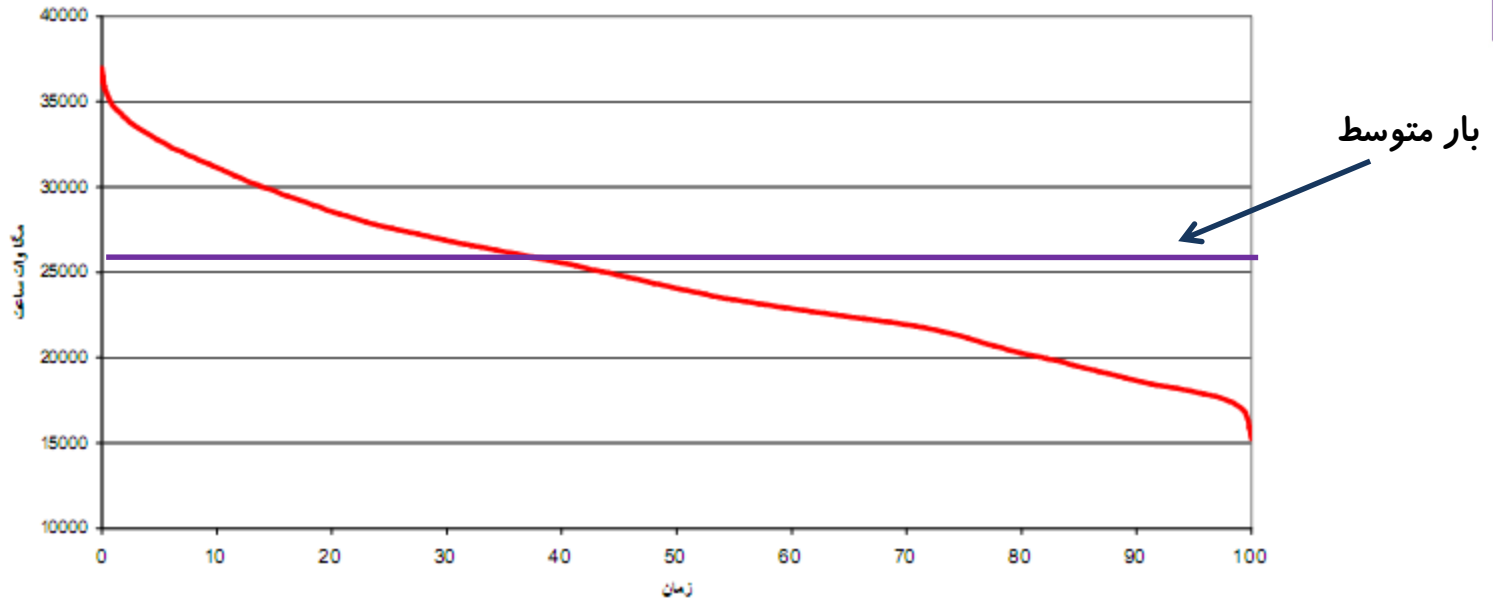
- ❖ در صورتی که منحنی های بار بر اساس مدت زمان بارگیری مرتب شوند (نه بر حسب زمان خودش)، منحنی تداوم بار یا LDC (Load Duration Curve) بدست می آید.
- ❖ محور افقی بر حسب درصد و یا زمان مشخص می شود. به عنوان مثال، منحنی افقی برای حالت سالانه می تواند از صفر تا ۸۷۶۰ ساعت مشخص گردد.
- ❖ بار پایه: در تمام دوره موردنظر وجود دارد.
- ❖ بار پیک یا حداکثر: فقط در یک دوره کوتاه ممکن است به وجود آید.
- ❖ هر چه منحنی LDC، flat تر باشد، برنامه ریزی تولید با هزینه کمتری انجام می شود (زیرا بسیاری از نیروگاه های شبکه می توانند نیروگاه های ارزان تر باشند)

منحنی تداوم بار سال ۱۳۸۷



- ❖ بار متوسط شبکه (P_m): میزان باری که اگر فرض کنیم به صورت یکسان در کل دوره تناوب وجود داشته باشد، انرژی آن برابر با سطح زیر منحنی LDC است.
- ❖ در شکل زیر مساحت مستطیل ساخته شده توسط بار P_m برابر با مساحت زیر منحنی LDC است.

منحنی تداوم بار سال ۱۳۸۷



❖ ضریب بار شبکه یا Load Factor (m):

$$m = \frac{P_m}{P_{max}}$$

✓ اگر از دید یک نیروگاه، m را محاسبه کنیم، این ضریب نشان دهنده میزان استفاده مناسب از نیروگاه است. در واقع، هر چه m کوچکتر باشد، به این معنی است که در کل دوره مورد نظر نیروگاه با ظرفیت کمتری تولید می کند (هزینه تولید آن بالاتر می رود).

✓ از دیدگاه کل شبکه، هر چه m به یک نزدیک باشد بهتر است و هزینه تولید کمتر خواهد بود. در ایران، این ضریب بین ۶۰ تا ۷۰ درصد است.

✓ هر چه شبکه های برق بهم پیوسته باشند (اتصال به کشورهای همسایه)، با توجه به تنوع بارها و اختلاف افق، m به یک نزدیک تر می شود.

✓ در صورتی که F میزان انرژی مصرفی کل شبکه در یک سال باشد، P_m را می توان از تقسیم F بر ۸۷۶۰ ساعت بدست آورد. بنابراین، m را بر حسب انرژی نیز می توان بدست آورد:

$$m = \frac{F}{8760 * P_{max}}$$

❖ مدت زمان بهره برداری (T_m):

✓ مدت زمانی که کل انرژی مصرفی سالانه با تولید P_{max} حاصل می شود.
 ✓ هر چه T_m کوچکتر باشد هزینه تولید انرژی گرانتر خواهد بود.

$$T_m = \frac{F}{P_{max}} \longrightarrow T_m = m * 8760$$

$$U.F = \frac{P_{Max}}{P_n}$$

❖ ضریب استفاده (بهره) نیروگاه (Utilization Factor)

✓ نسبت بار حداکثر نیروگاه به بار نامی آن

✓ مقدار کم این ضریب نشان دهنده نیروگاه رزرو است.

$$C.F = \frac{P_M}{P_n}$$

❖ ضریب ظرفیت نیروگاه (Capacity Factor)

✓ نسبت بار متوسط سالیانه نیروگاه به ظرفیت نامی آن

✓ اگر نیروگاه همواره با ظرفیت نامی خود کار کند، این ضریب برابر یک است.

✓ این ضریب با ضریب بار متفاوت است.

❖ رزرو یا ذخیره (Reserve): به صورت چرخان (Spinning reserve) و غیرچرخان (Non-spinning reserve)

✓ رزرو چرخان: تعدادی از نیروگاه های شبکه باید به منظور ثابت نگهداشتن فرکانس در شرایط پیشامد آماده ی افزایش تولید خود باشند. به طور معمول، از نیروگاه های روشن استفاده می شود تا حداکثر در حد چند دقیقه تولید خود را افزایش دهند (مثلا در حد ۲ دقیقه).

✓ رزرو غیرچرخان: تعدادی از نیروگاه های شبکه باید به منظور ثابت نگهداشتن فرکانس، در صورت نیاز، از رزرو چرخان پشتیبانی کنند. به طور معمول، از نیروگاه های خاموش استفاده می شود تا حداکثر در حد چند ده دقیقه تولید خود را وارد مدار کنند (مثلا، ۳۰ دقیقه).

❖ **هزینه های ثابت سالیانه:** میزان تولید نیروگاه تاثیری بر این هزینه ها ندارد. این هزینه ها عبارتند از:

- ✓ هزینه های سرمایه گذاری تاسیسات: (این هزینه ها که در ابتدای ساخت نیروگاه وجود دارد، می تواند با توجه به طول عمر نیروگاه، به صورت سالانه تبدیل شود)
 - خرید زمین و تجهیزات
 - نصب و راه اندازی
- ✓ هزینه های سالیانه بیمه، مالیات، بهره نیروگاه
- ✓ هزینه های استهلاک ساختمان و ماشین آلات: آن بخشی از هزینه های تعمیر و نگهداری که به تولید بستگی ندارد را می توان جزء هزینه های ثابت در نظر گرفت.
- ✓ هزینه های نگهداری و مدیریتی: بخش زیادی از هزینه ای نیروی انسانی و مدیریتی را می توان ثابت در نظر گرفت و به عبارتی، به تولید وابسته نیست.

رابطه ی هزینه ثابت سالیانه (Annual Fixed Cost): براساس طول عمر نیروگاه (r نرخ تنزیل و T طول عمر نیروگاه)

$$K_{AFC} = P_n \cdot (\alpha \cdot FCR + \text{Annual Fixed O \& M cost}) \quad , \quad FCR = \frac{r}{1 - e^{-r \times T}}$$

ظرفیت نامی نیروگاه

ضریب هزینه ی ثابت سالیانه (Fixed Charge Rate)

هزینه سرمایه گذاری نیروگاه (\$/kW)

❖ **هزینه های متغیر سالانه:** میزان تولید نیروگاه ارتباط مستقیمی با این هزینه ها دارد. این هزینه ها عبارتند از:

✓ هزینه ی سوخت مهمترین هزینه در نیروگاه های حرارتی است و به عوامل زیر بستگی دارد:

- نوع سوخت
- در دسترس بودن
- هزینه حمل و نقل
- میزان تولید
- بازده نیروگاه

✓ هزینه ی تعمیر و نگهداری (Maintenance)

- معاینه فنی تجهیزات
- تعمیرات معمول
- تعمیرات اساسی با باز و بسته کردن تجهیزات (Overhauling)

✓ هزینه ی تدارکات و ملزومات

- مانند آب برای خنک کنندگی و سیکل نیروگاه های بخار
- روغن و

✓ هزینه ی پرسنلی: بخشی از هزینه های پرسنلی را می توان متغیر در نظر گرفت.

نکته: اصلی ترین هزینه متغیر همان هزینه سوخت است.

رابطه هزینه متغیر سالیانه (Annual Operating Cost) با توجه به اینکه اصلی ترین هزینه مربوط به سوخت است.

$$K_{AOC} = P_n \cdot T_m \cdot b$$

مدت زمان بهره برداری

هزینه ی سوخت برای تولید 1kWh انرژی

هزینه ی کل سالیانه (Annual Plant Cost):

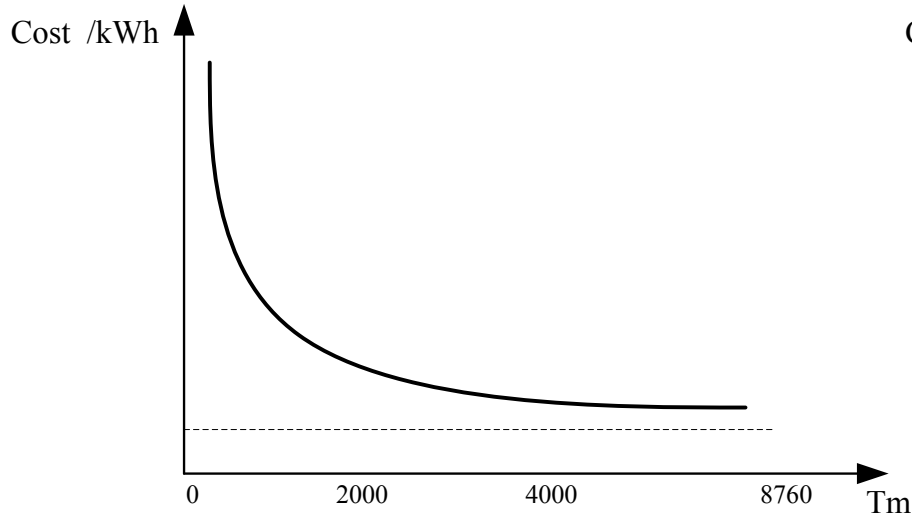
$$K_{APC} = K_{AFC} + K_{AOC} = P_n \cdot (\alpha \cdot FCR + \text{Annual Fixed O \& M cost}) + P_n \cdot T_m \cdot b$$

ارزش تولید یک کیلووات:

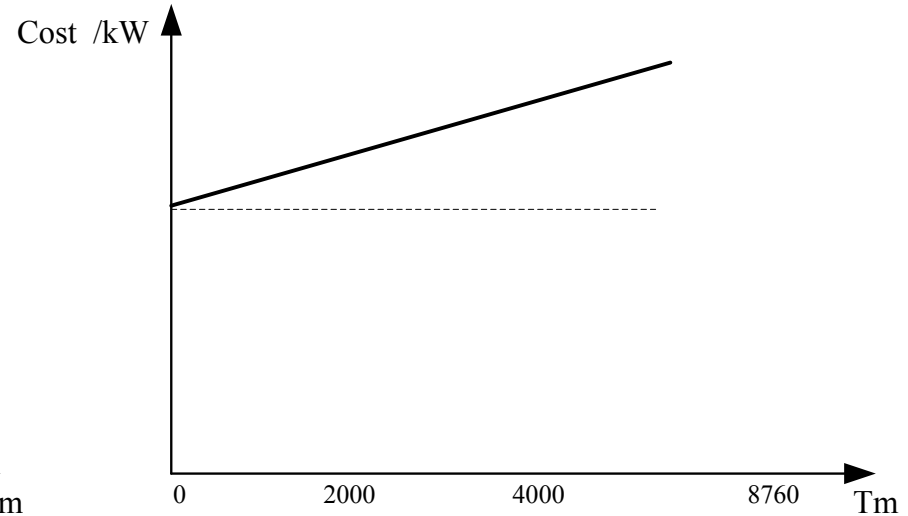
$$\frac{K_{APC}}{P_n} = (\alpha \cdot FCR + \text{Annual Fixed O \& M cost}) + T_m \cdot b$$

هزینه تولید یک کیلووات انرژی (با توجه به اینکه در یک سال به مقدار $P_n \times T_m$ کیلووات ساعت انرژی تولید می شود):

$$\frac{K_{APC}}{P_n \cdot T_m} = \frac{(\alpha \cdot FCR + \text{Annual Fixed O \& M cost})}{T} + b$$



تغییرات هزینه تولید برای هر کیلووات ساعت



تغییرات هزینه تولید برای هر کیلووات

- ✓ هرچه از نیروگاه بار کمتری دریافت شود جزء مربوط به هزینه های ثابت اثر بیشتری در قیمت توان تولیدی دارد و هرچه تولید نیروگاه بیشتر باشد قیمت سوخت اثر بیشتری بر قیمت تولید دارد.
- ✓ هر چه مدت اثر بهره برداری یک نیروگاه بیشتر شود، هزینه تولید انرژی کمتر می گردد

❖ روش های کاهش هزینه تولید در نیروگاه ها:

- ✓ ساخت نیروگاه های با ابعاد و قدرت بزرگ: هم هزینه های سرمایه گذاری را کاهش می دهد و هم هزینه سوخت.
- ✓ طراحی مناسب
- ✓ افزایش بازده
- ✓ بهره برداری اقتصادی از نیروگاه ها: مشارکت دادن نیروگاه های مناسب در تولید انرژی بسیار اهمیت دارد
- ✓ کاهش تلفات سیستم انتقال: می تواند هزینه نهایی را برای مصرف کننده کاهش دهد.

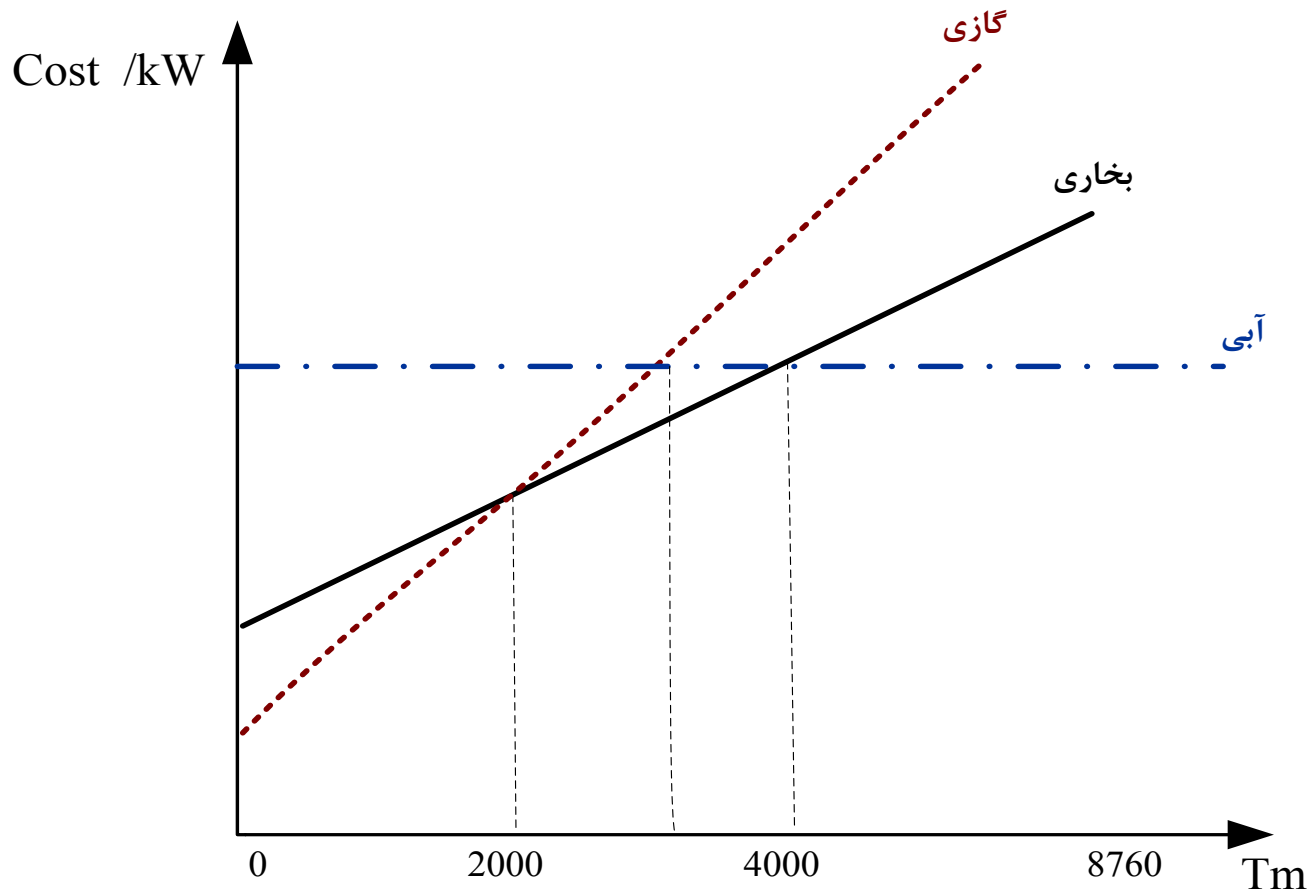
❖ انتخاب نوع نیروگاه ها با توجه به هزینه:

- ✓ می توان از جنبه هزینه تولیدی به ازای هر کیلووات نیروگاه ها را مقایسه کرد (مثلا، مقایسه بخاری، گازی و آبی)
- ✓ در ترسیم توابع هزینه دو نیروگاه نسبت به هم، نقطه تقاطع را می توان از مساوی قرار دادن هزینه بدست آورد. به طور مثال، در رابطه زیر نقطه تقاطع منحنی های هزینه نیروگاه های بخاری و گازی تعیین می شود (T_m).

$$\left(\alpha_{gas} \cdot FCR_{gas} + Annual\ Fixed\ O\ \&\ M\ cost_{gas} \right) + T_m \cdot b_{gas} =$$

$$\left(\alpha_{steam} \cdot FCR_{steam} + Annual\ Fixed\ O\ \&\ M\ cost_{steam} \right) + T_m \cdot b_{steam} \quad \Rightarrow T_m$$

❖ انتخاب نوع نیروگاه ها با توجه به هزینه در هر کیلووات تولیدی



۱- دسترسی به مواد اولیه و حمل و نقل آن

✓ نیاز به سوخت مصرفی روزانه

۲- نزدیکی بودن به مراکز مصرف

✓ عدم نیاز به احداث خطوط انتقال جدید

✓ کاهش تلفات انتقال و توزیع

۳- وجود نیروی کارگر و متخصص

۴- امکان دفع مازاد فراورده های ناخواسته

✓ گازها، دود و زباله های هسته ای

۵- زمین مورد نیاز برای ساختمان و عملکرد

✓ چندصد هزار مترمربع زمین (نیروگاه بخاری) جهت نصب تجهیزات ، مخازن سوخت و ...

✓ خریداری زمین های بسیار زیاد جهت احداث نیروگاه آبی

✓ پستی و بلندی زیاد باعث مشکلاتی در سیستم خنک کننده میگردد

✓ زمین از نظر زلزله و مسیرهای سیلاب (حداکثر ارتفاع کندانسور از پایینترین تراز ۱۰ متر)

۶- آلودگی محیط زیست

- ✓ افزایش حرارت محیط
- ✓ گازها و دود ناشی از سوختن
- ✓ چشم انداز محیط زیست

۷- در دسترس بودن آب

- ✓ تامین آب سیکل
- ✓ خنک کنندگی کندانسور

۸- مطالعه ی شبکه

- ✓ کمک به افزایش پایداری سیستم قدرت

و غیره

الف) با توجه به جدول موجود در بخش یک درس، برای نیروگاه های زغال سنگی، گازی و آبی، منحنی های هزینه در هر کیلووات را ترسیم و مقایسه نمایید.

ب) با توجه به آخرین آمار موجود در دفتر بازار برق شرکت مدیریت شبکه برق ایران، منحنی بار یک روز تابستانی (مثلا ۲۰ تیرماه) و یک روز تعطیل (مانند روز عاشورا) را استخراج و مقادیر بار بیشینه، بار کمینه، بار متوسط، ضریب بار و منحنی LDC را مقایسه نمایید.

موعد تحویل: هفته آینده