چالش افزایش عدم‌قطعیت تولید با ورود حجم انبوه نیروگاه‌های بادی و راهکارهای غلبه بر آن

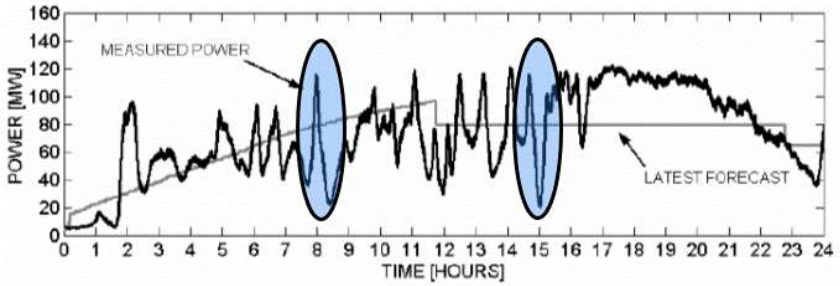
- همایون برهمندپور – محمد جعفریان
- پژوهشگاه نیرو

تجربه‌ی کشورهای مختلف در رابطه با عدم‌قطعیت تولید بـــا ورود حجـــم انبـــوه نیروگاه‌های بادی

❖ تجربه‌ی دانمارک- چالش منطقه‌ی Horns Rev

- چالش ۱- تغییرات ناگهانی سرعت باد

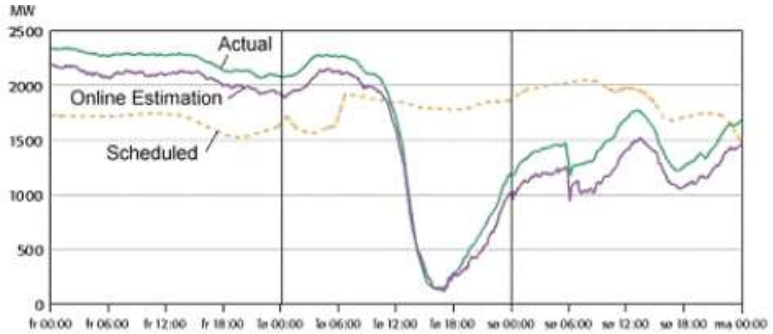
- توان خروجی مزرعه‌ی بادی



- تغییر ۸۳٪ توان خروجی مزرعه ظرف ۱۵ تا ۲۰ دقیقه (۱۰۰ مگاوات)
- اختلاف ۷۵٪ میزان توان تولیدی مزرعه و مقدار پیش‌بینی شده (۶۰ مگاوات)
- مطابق استاندارد UCTE در آن منطقه حداکثر تغییرات توان ناگهانی تا مرز ۵۰ مگاوات قابل‌قبول است.

تجربه‌ی دانمارک– چالش منطقه‌ی Horns Rev

- چالش ۲– اختلاف زیاد مقدار پیش‌بینی توان بادی و مقدار تولیدی نهایی
  - دو سامانه‌ی پیش‌بینی توان بادی
    - ✓ سیستم پیش‌بینی سرعت باد wind power prediction tool (WPPT)
    - ✓ سامانه‌ی Danish Meteorological Institute
    - ✓ پیش‌بینی توان بادی تا ۴۸ ساعت آینده
  - اختلاف ۱۸۰۰ مگاواتی پیش‌بینی با عملی

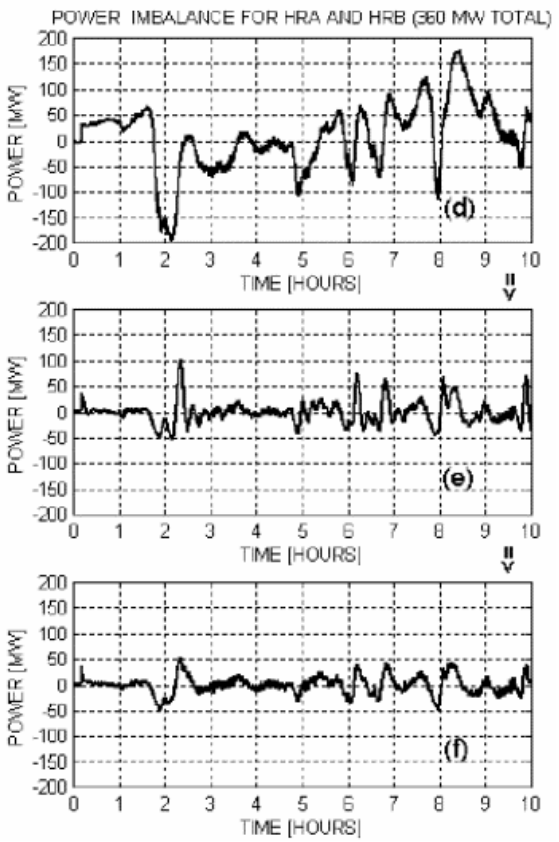


➔ نیاز به حجم بالای ذخیره‌سازها در شبکه

تجربه‌ی دانمارک– چالش منطقه‌ی Horns Rev

- **راه‌حل:**

  - اضافه کردن کنترل ثانویه در مزرعه بادی برای محدود کردن توان تولیدی با شیب حداکثر +5MW/min
  - استفاده از خط HVDC برای اتصال آن منطقه به شبکه دانمارک



تجربه‌ی اسپانیا– چالش کشوری

- **چالش ۱ – عدم امکان استفاده از توان بادی**
  - ۱۱ گیگاوات ظرفیت بادی – ۴۴ گیگاوات پیک مصرف
  - هم‌بستگی منفی بار و باد (توان تولیدی مزارع بادی)
    - ✓ در تابستان سرعت باد کم و مصرف الکتریکی بالا
    - ✓ در زمستان سرعت باد بالا ولی مصرف الکتریکی کم

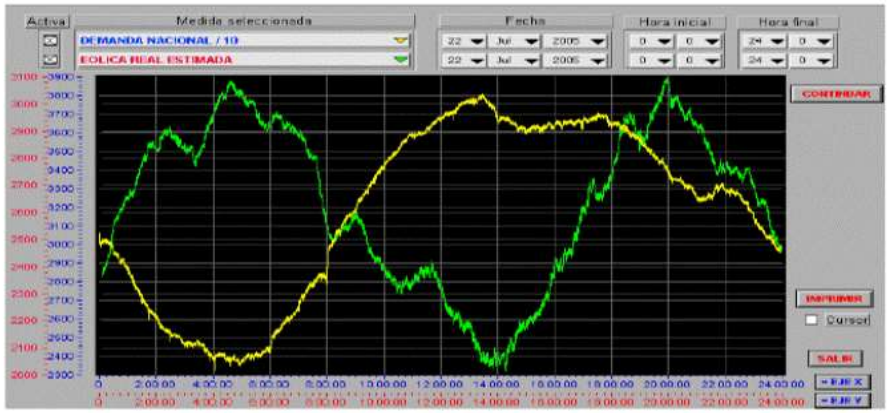


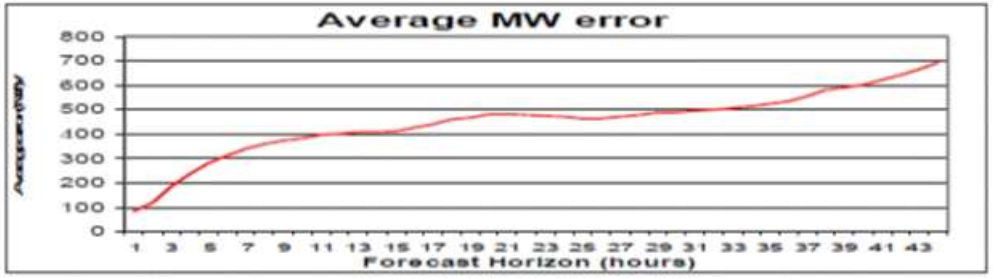
Figure 2-16: Real estimated demand (yellow) versus real estimated wind power supply (green).

تجربه‌ی اسپانیا– چالش کشوری

- نیاز به وجود نیروگاه‌های حرارتی زیاد به‌صورت رزرو
- در زمستان قطع اجباری بعضی از نیروگاه‌های بادی هدر–رفت انرژی
- ضریب نفوذ بیش از حد توان بادی در بعضی از ساعات زمستان و تاثیرات نامطلوب تغییرات توان مزارع بادی بر فرکانس شبکه

چالش ۲– خطای بالای سیستم پیش‌بینی توان مزارع باد

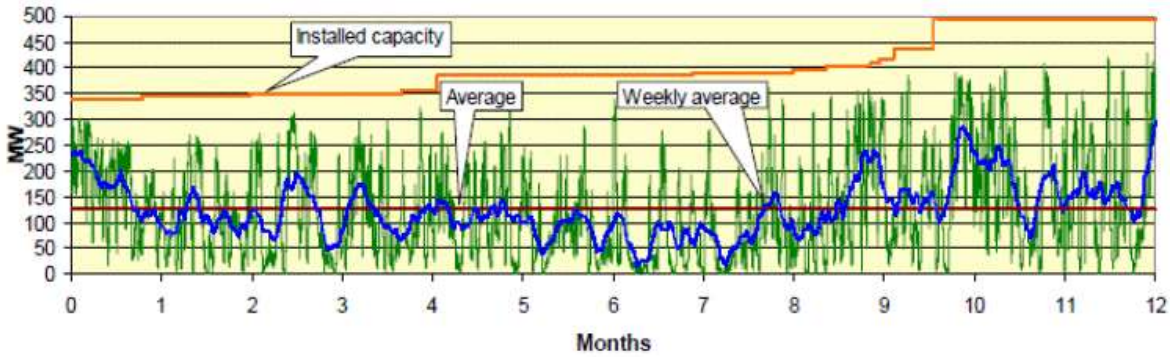
- سامانه‌ی پیش‌بینی سرعت باد SIPREOLICO
  - ✓ پیش‌بینی ساعت به ساعت، تا ۴۸ ساعت آینده
  - ✓ ساعت به ساعت پیش‌بینی‌ها آپدیت می‌گردد
- خطای سامانه‌ی پیش‌بینی



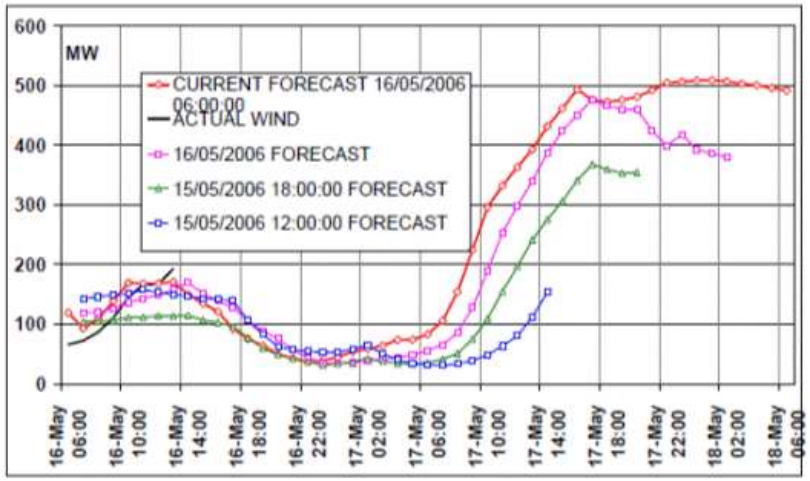
+ تغییرات ناگهانی توان بادی تا 1000 Mw/h
- نیاز به نصب ذخیره‌سازها به مقدار زیاد در سیستم

تجربه‌ی ایرلند

- توان بادی تولیدی



تجربه‌ی ایرلند



- **چالش ۱ – خطای پیش‌بینی بالا**
  - **مرکز NCC پیش‌بینی ساعت به ساعت باد تا دو روز آینده**
    - ✓ هر شش ساعت–یک بار پیش‌بینی‌ها آپدیت می‌شود
  - **در ۶٪ موارد خطای پیش‌بینی بالاتر از ۷۵٪**

← نیاز به حجم بالای ذخیره‌سازها در شبکه

- **چالش ۲– تغییرات زیاد در توان تولیدی مزارع بادی**
  - **در ۱۵ دقیقه ← ۲۵٪ تغییر نسبت به کل ظرفیت بادی نصب شده**
  - **در ۱ ساعت ← ۳۳٪ تغییر نسبت به کل ظرفیت بادی نصب شده**
  - **در ۶ ساعت ← ۴۰٪ تغییر نسبت به کل ظرفیت بادی نصب شده**

← نیاز به حجم بالای ذخیره‌سازها در شبکه

- چالش تغییرات ناگهانی سرعت باد و عدم وجود رزرو کافی

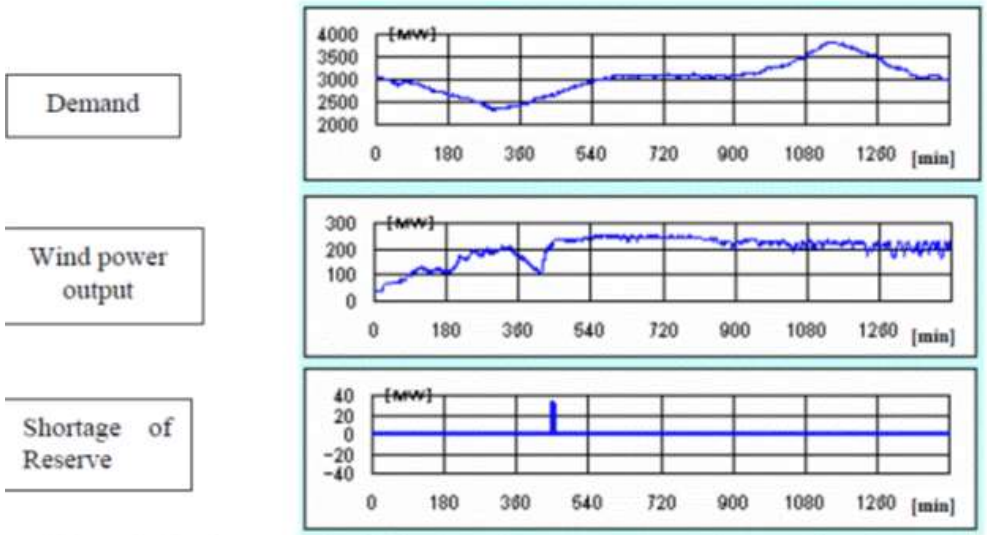


Figure 2-33: An example of shortage of reserve power at a morning rise.

دلایل عدم قطعیت در پیش‌بینی سرعت باد

- خطای دستگاه‌های اندازه‌گیری سرعت باد
  - حدود ۱ تا ۱.۵٪
- عدم تطابق با داده‌های آب و هوایی قبلی (دراز مدت)
  - حدود ۱.۶ تا ۲.۸٪ (نسبت به داده‌های ۷ تا ۱۵ سال گذشته)
- تغییرات آب و هوایی در درازمدت
  - حدود ۱.۶ تا ۲.۸٪
- همبستگی مکانی داده‌ها (spatial)
  - ممکن است بادی که از یک مکان اندازه گیری میگذرد پس از مدتی به مکان اندازه‌گیری بعدی برسد ← همبستگی بین داده‌های اندازه‌گیری ← تشدید خطا
  - ۳ تا ۶٪

← بین ۴.۱٪ تا ۷٪ عدم قطعیت در پیش‌بینی سرعت باد

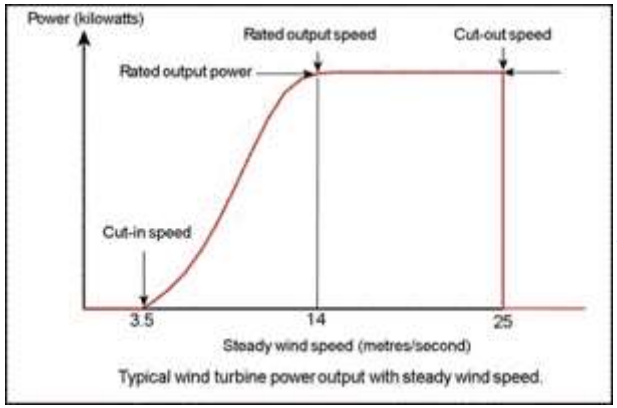
پیش‌بینی سرعت باد

- پیش‌بینی میانگین سرعت باد (میانگین دراز مدت)
  - نقشه‌های تهیه شده
    - ✓ NREL's wind prospector
    - ✓ IRENA global atlas
    - ✓ DTU global wind atlas
  - مورد استفاده در مکان‌یابی محل احداث نیروگاه‌های بادی

- پیش‌بینی سرعت باد کوتاه‌مدت (۷۲ ساعت آینده)
  - مورد استفاده در بهره‌برداری سیستم قدرت

پیش‌بینی کوتاه‌مدت سرعت باد

- اکثر نرم‌افزارهای پیش‌بینی توان مزارع بادی از سامانه‌های پیش‌بینی عددی وضعیت آب و هوا (NWP) استفاده می‌کنند.
- سامانه‌های پیش‌بینی عددی وضعیت آب و هوا (NWP):
  - شبیه‌سازی عددی رفتار اتمسفر
  - پیش‌بینی سرعت و جهت وزش باد در هر ساعت و منطقه
  - از این داده‌های سرعت باد خام می‌بایست توان تولیدی مزارع بادی را پیش‌بینی نمود



Typical wind turbine power output with steady wind speed.

- سه روش برای تبدیل پیش‌بینی سرعت باد به پیش‌بینی توان

1. Physical Approach:

شبیه‌سازی لایه‌های پایین جو ← تخمین سرعت باد در محل توربین بادی (hub height) ← استفاده از منحنی توان تولیدی توربین بادی ← محاسبه‌ی توان تولیدی توربین‌های بادی

- Landberg ← Prediktor
  - استفاده از NWP
  - با درنظر گرفتن عوارض زمین و لایه‌های جوی
- Bailey ← ewind
  - استفاده از NWP
  - شبیه‌سازی دقیق برای مکان‌های مهم (محل استقرار مزارع بادی)
- ...

پیش‌بینی کوتاه‌مدت سرعت باد– ادامه ...

۲. Statistical Approach

مدل‌سازی ارتباط سرعت باد با توان تولیدی مزرعه‌ی بادی با استفاده از داده‌های پیشین

- **سری زمانی**
  - ✓ ARMA
  - ✓ Kalman Filter
  - ✓ Wavelet
  - ✓ …
- Machine Learning
  - ✓ ANN
  - ✓ Fuzzy Modeling
  - ✓ Support Vector Machine
  - ✓ ….

- Nielsen ← WPPT (دانمارک)
  - Time-varying coefficients functions
- Marti ← LocalPred (اسپانیا)
  - Time series
- …

۳. Hybrid Approach

- ترکیب روش Physical و Statistical
- خروجی NWP به عنوان ورودی Time series

۴. Persistence Approach

- بدون استفاده از NWP
- سرعت باد در ساعت آینده میانگین سرعت باد در n ساعت قبل است

$$P_{t+k|t} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{i=n-1} P_{t-i}$$

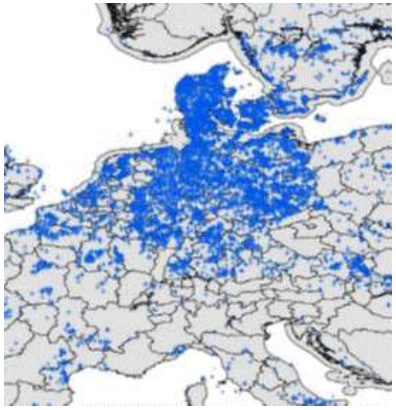
- برای پیش‌بینی چند ساعت بعد کاربرد دارد.

مدل‌های پیش‌بینی کوتاه مدت سرعت باد تجاری

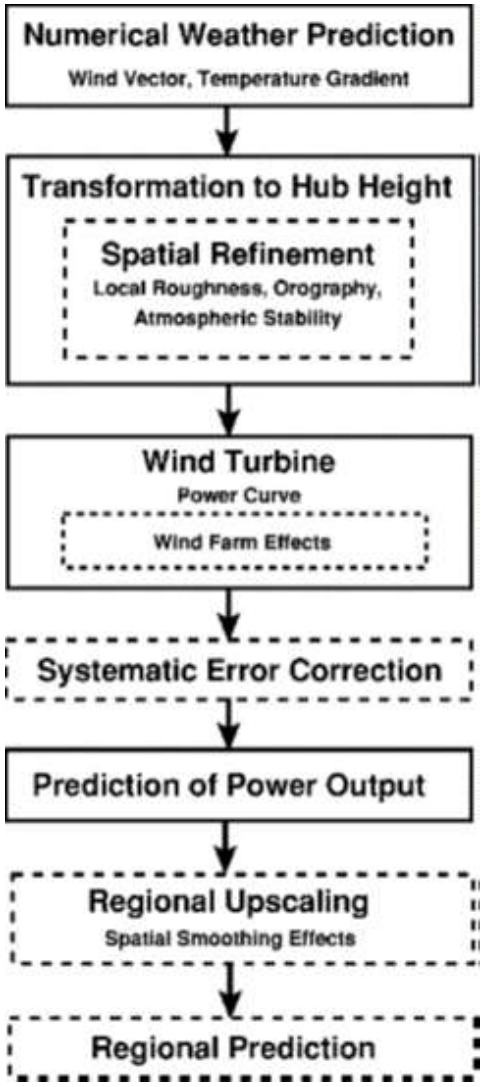
- WPPT
  - دانمارک
- AWPT
  - آلمان
- Sipreolico
  - اسپانیا
- AWPPS
  - ایرلند
- Prediktor
  - اسپانیا، دانمارک، آلمان، آمریکا و ...

مطالعه موردی، Deutschland-Modell

- مورد استفاده در آلمان برای پیش‌بینی توان تولیدی مزارع بادی
- پیش‌بینی هر ۶ ساعت- یک بار برای ۴۸ ساعت
- نقشه مزارع بادی آلمان



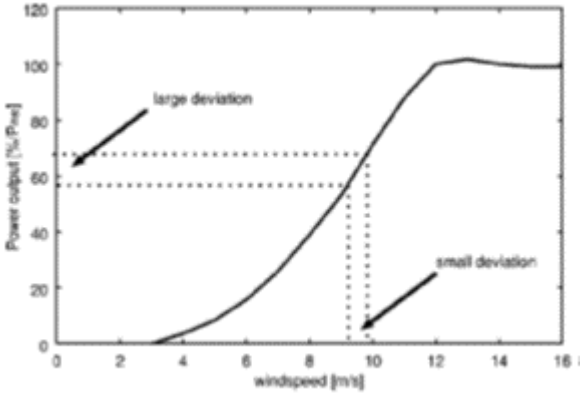
مطالعه موردی، Deutschland-Modell – ادامه ...



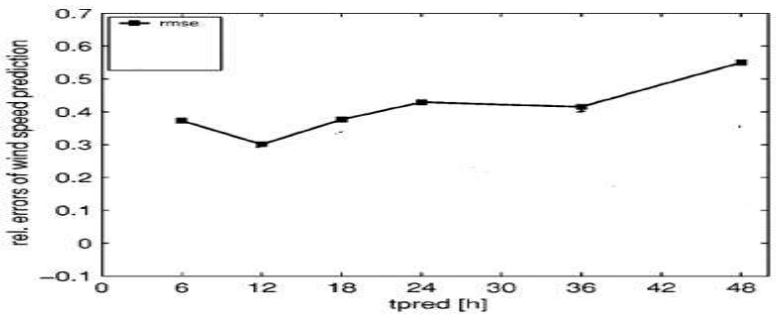
- استفاده از NWP برای پیش‌بینی سرعت باد (در اسکیل 10 km* (10km
- شبیه‌سازی دقیق برای محل استقرار مزارع بادی
- استفاده از رابطه‌ی زیر برای محاسبه سرعت باد در ارتفاع توربین بادی

$$u(h_2)=u(h_1)\frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}.$$

- استفاده از منحنی توربین بادی برای پیش‌بینی توان تولیدی توربین بادی



- میانگین خطا برای منطقه Hilkenbrook



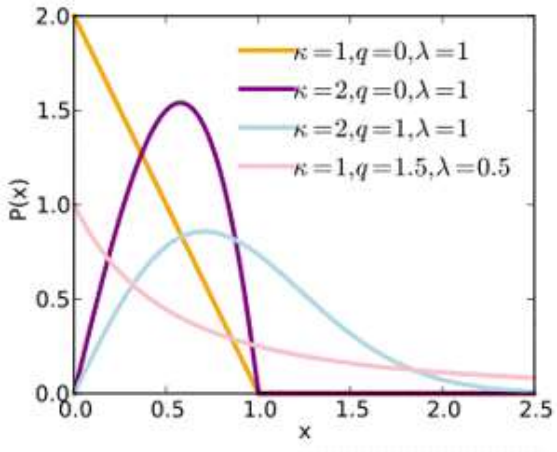
- در پخش بار متداول، تولید همه ژنراتورها و میزان همه بارها ثابت
  - (DLF) Deterministic Load Flow
  - در شبکه‌های با نیروگاه‌های بادی زیاد جواب نمی‌دهد، زیرا توان تولیدی این نیروگاه‌ها عدم‌قطعیت دارد.

← (PLF) Probabilistic Load Flow

- اولین بار توسط Borkowska در سال ۱۹۷۴
- عدم قطعیت تولید، بار و مشخصات شبکه در آن لحاظ می‌شود
- عدم قطعیت‌ها با تابع چگالی احتمال آن‌ها لحاظ می‌شوند

✓ تابع چگالی احتمال سرعت باد ← ویبول

$$f(x;\lambda,k)=\begin{cases}\frac{k}{\lambda}\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1}e^{-(x/\lambda)^k} & x\geq 0,\\ 0 & x<0,\end{cases}$$



❖ روش شبیه‌سازی مونت کارلو

- **معرفی کلی**
  - تابع چگالی احتمال $Y = f(x)$
  - تولید اعداد تصادفی بر اساس این تابع $X_1\ X_2\ X_3\ \dots\ X_n$
  - شبیه‌سازی‌های متعدد با اعداد تصادفی تولید شده
  - به‌دست آمدن n مقدار برای داده‌ی خروجی $Z_1\ Z_2\ \dots\ Z_n$
  - به‌دست آوردن میانگین و واریانس خروجی
    - ✓ $Z = \frac{z1+z2+\cdots+zn}{n}$
    - ✓ ....
- در روش مونت کارلو، برای هر متغیر (ولتاژ شینه‌ها، توان عبوری خطوط و ...) میانگین و واریانس محاسبه می‌گردد.

❖ روش Point estimate

- در این روش تابع چگالی احتمال خروجی‌ها استخراج می‌گردد.
- با داشتن تابع چگالی احتمال، میانگین و انحراف معیار خروجی‌های محاسبه می‌گردد.

❖ روش First order Second Moment Method

- استفاده از ترم اول سری فوریه برای هر متغیر تصادفی
- به علت عدم از ترم‌های بعدی، دارای تقریب است
- دارای سرعت بالایی است
- میانگین و انحراف معیار خروجی‌ها را محاسبه می‌کند.

- سیستم ۳۹ باسه IEEE

Table 9.4 Average error indices for studied cases

Case	Method	Index	$P_{i,j}$	$Q_{i,j}$	V	δ
Case 1	FOSM	$\bar{\varepsilon}_{\mu}$	0.7243	5.9251	0.0624	2.2566
		$\bar{\varepsilon}_{\sigma}$	1.5000	7.8803	12.1214	1.3841
	PEM	$\bar{\varepsilon}_{\mu}$	0.4974	0.2566	0.0006	0.4322
		$\bar{\varepsilon}_{\sigma}$	0.6516	2.5476	3.127	1.2241
Case 2	FOSM	$\bar{\varepsilon}_{\mu}$	11.0162	14.5481	0.1295	53.7988
		$\bar{\varepsilon}_{\sigma}$	6.7087	10.2853	15.4442	3.0396
	PEM	$\bar{\varepsilon}_{\mu}$	0.2044	0.2790	0.0028	0.4058
		$\bar{\varepsilon}_{\sigma}$	0.8034	2.2576	3.0434	0.4788
Case 3	FOSM	$\bar{\varepsilon}_{\mu}$	29.8713	16.9076	0.1373	52.2126
		$\bar{\varepsilon}_{\sigma}$	7.2553	11.7477	16.2279	4.4081
	PEM	$\bar{\varepsilon}_{\mu}$	0.6050	0.3032	0.0015	0.8867
		$\bar{\varepsilon}_{\sigma}$	0.4981	3.3293	4.6567	0.3503

Method	Time (s)
MCS	54.0680
FOSM	0.0312
PEM	0.3276