



دانشکده فنی مهندسی  
گروه آموزشی برق

پایان نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد  
در رشته برق گرایش قدرت

### عنوان

**برنامه ریزی توسعه شبکه‌های انتقال قدرت در سیستم‌های تجدید ساختار یافته با  
استفاده از روش برنامه ریزی ریاضی با قیود متوازن (MPEC)**

استاد راهنما

سیدجلال سیدشنوا

استاد مشاور

حسین شایقی

سعید طاهری

پژوهشگر

بهزاد عسکری

زمستان 1393

نام خانوادگی دانشجو: عسکری	نام: بهزاد
عنوان پایان نامه / رساله: برنامه ریزی توسعه شبکه‌های انتقال قدرت در سیستم های تجدید ساختار یافته با استفاده از روش برنامه ریزی ریاضی با قیود متوازن	
استاد راهنما: سیدجلال سیدشنوا اساتید مشاور: حسین شایقی و سعید طاهری	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی برق
گرایش: قدرت	دانشگاه: محققى اردبیلی
<p><b>چکیده:</b></p> <p>در این پایان نامه یک مدل دو سطحی برای برنامه ریزی شبکه انتقال در محیط بازار معرفی شده است که در آن تولیدکنندگان و مصرف کنندگان به تبادل انرژی مابین خود می پردازند. هدف طراح خط که در سطح اول مدل شده، این است که هزینه ی سرمایه گذاری در توسعه انتقال را به حداقل برساند. هدف مورد نظر با قیودی فنی ناشی از سیستم و قیودی ناشی از بازار رقابتی که در سطح دوم مطرح می شود، محدود می گردد.</p> <p>با استفاده از نظریه دوگانی مدل دو سطحی مذکور به یک مسأله ی برنامه ریزی خطی - عدد صحیح تبدیل شده و مدل حاصل با استفاده از نرم افزار GAMS حل شده است. از این برنامه ریزی تحت عنوان برنامه ریزی ریاضی با قیود متوازن یا به طور خلاصه MPEC یاد می شود. مدل پیشنهاد شده بر روی سیستم استاندارد گارور و 24 باسه IEEE پیاده شده و بررسی نتایج بیانگر کارایی مدل در حل مسأله برنامه ریزی توسعه انتقال در شبکه های رقابتی است.</p>	
کلید واژه: برنامه ریزی ریاضی، مدل دو سطحی، قیود متوازن، MPEC	



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	<b>فصل اول: مقدمه</b>
3-1-1	پیشگفتار.....
4-2-1	تعریف مسأله برنامه‌ریزی شبکه انتقال و ویژگیهای آن.....
6-3-1	روش پیشنهادی حل برنامه‌ریزی توسعه انتقال.....
6-4-1	ساختار پایان نامه.....
	<b>فصل دوم: روش‌های برنامه‌ریزی شبکه انتقال در ساختار جدید</b>
9-1-2	مقدمه.....
9-2-2	برنامه‌ریزی ریاضی.....
13-3-2	مدلسازی عدم قطعیتها.....
16-4-2	قابلیت اطمینان.....
	<b>فصل سوم: مدل سازی</b>
19-1-3	مقدمه.....
20-2-3	طرح مدل.....
23-3-3	روش MPEC و مزیت‌های آن.....
25-4-3	تئوری دوگانگی.....
28-5-3	خطی سازی روابط غیر خطی.....
29-6-3	مدلسازی عدم قطعیتها به کمک تحلیل سناریو.....
	<b>فصل چهارم: مطالعه موردی و بررسی عملکرد مدل</b>
33-1-4	مقدمه.....
34-2-4	سیستم 6 باس گارور.....
40-3-4	سناریوی دسترسی و عدم دسترسی به خطوط.....
41-4-4	سیستم 24 باسه IEEE.....

4-5-مدل 24 باسه با در نظر گرفتن احتمال خروج خطوط ..... 44

4-6- جمع بندی نتایج ..... 47

### فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات

منابع و مأخذ ..... 51

پیوست الف: مروری بر روش دو سطحی و روش های حل آن ..... 55

پیوست ب: کد های مسئله برنامه ریزی توسعه شبکه انتقال در نرم افزار GAMS ..... 81

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
35	جدول 4-1- داده های مربوط به بارها و ژنراتورها.....
36	جدول 4-2- مشخصات خطوط.....
36	جدول 4-3- سناریوهای بار برای شبکه گارور.....
37	جدول 4-4- نتیجه مسئله با افزایش تعداد خطوط.....
41	جدول 4-5- دسترسی و عدم دسترسی به خطوط.....
43	جدول 4-6- داده های ژنراتورها و بارها در سیستم 24 باس IEEE.....
43	جدول 4-7- مشخصه و ضرایب بارها در سناریو های سیستم 24 باس IEEE.....
45	جدول 4-8- سناریوهای سیستم 24 باس IEEE با وجود احتمال خروج خطوط.....

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
35.....	شکل 4-1- سیستم 6 باس گارور.....
38.....	شکل 4-2- خروجی گمز برای سیستم گارور به ازای $n=2$ .....
38.....	شکل 4-3- خروجی گمز برای سیستم گارور به ازای $n \geq 2$ .....
39.....	شکل 4-4- توان عبوری از خطوط در سناریوی 1.....
39.....	شکل 4-5- توان عبوری از خطوط در سناریوی 2.....
40.....	شکل 4-6- توان عبوری از خطوط در سناریوی 3.....
42.....	شکل 4-7- سیستم 24 باس IEEE.....
44.....	شکل 4-8- خروجی گمز برای سیستم 24 باس IEEE.....
46.....	شکل 4-9- خروجی گمز برای سیستم 24 باس IEEE با احتمال خروج خطوط.....

## جدول علایم و اختصارات

$b_k$	سوسپیتانس خط $k$
$C_j^u$	هزینه ی قطعی بار مصرف کننده (€/MWh)
$C_k$	هزینه ی سرمایه گذاری روی خط $K$ (€)
$C^{\max}$	بودجه ی کلی برای برنامه ریزی توسعه شبکه (€)
$d_j^{\max}(w)$	حداکثر توان درخواستی $j$ امین بار در سناریوی $w$ (MW)
$d_j^{\min}(w)$	حداقل توان درخواستی $j$ امین بار در سناریوی $w$ (MW)
$d_{jh}^{\max}(w)$	اندازه ی $h$ امین بلوک $j$ امین بار در سناریوی $w$ (MW)
$f_k^{\max}$	ظرفیت خط $k$ (MW)
$g_{ib}^{\max}(w)$	اندازه ی $b$ امین بلوک از $i$ امین ژنراتور در سناریوی $w$ (MW)
$O(k)$	طرف فرستنده خط $K$
$r(k)$	طرف گیرنده خط $K$
$\Gamma^{\max}$	حد بالای متغیر پیوسته ی $\phi_k^-(w)$
$\delta(w)$	اندازه ی سناریوی $w$
$\lambda_{Djh}$	پیشنهاد خرید $h$ امین بلوک از $j$ امین بار (€/MWh)
$\lambda_{Gib}$	پیشنهاد فروش $b$ امین بلوک از $i$ امین واحد تولیدی (€/MWh)
$\sigma$	فاکتور وزن دار برای قابل مقایسه کردن هزینه ی سرمایه گذاری سالیانه و رفاه اجتماعی
$d_{jh}(w)$	توان درخواستی $h$ امین بلوک از $j$ امین بار در سناریوی $w$ (MW)
$f_k(w)$	جریان بار در خط $k$ در سناریوی $w$ (MW)
$g_{ib}(w)$	توان تولیدی $b$ امین بلوک از $i$ امین واحد تولیدی در سناریوی $w$ (MW)
$r_j(w)$	قطع $j$ امین بار در سناریوی $w$ (MW)
$x_k$	متغیر باینری که 1 بیانگر احداث خط، 0 بیانگر عدم احداث خط
$\theta_s(w)$	زاویه ولتاژ در باس $S$ در سناریوی $w$
$\phi_K^-(w)$	متغیر پیوسته ی کمکی مربوط به خط $K$ و سناریوی $w$ برای خطی سازی استفاده می شود.



## ثابت های مسئله

$S(i)$	مشخصه باس، که نشان می دهد $i$ آمین واحد تولیدی در کجا مستقر است.
$S(j)$	مشخصه باس، که نمایش دهنده ی $j$ آمین بار در کجا مستقر است
$\psi_s D$	مجموعه شاخص های بار ها که در باس $S$ مستقر است
$\psi_s G$	مجموعه ی شاخص های واحدهای تولیدی که در باس $S$ مستقر است
$\Omega_i$	مجموعه ی شاخص بلوک های $i$ آمین واحد تولیدی
$\Omega_j$	مجموعه ی شاخص بلوک های $j$ آمین بار
$\Omega^G$	مجموعه شاخص های واحدهای تولیدی
$\Omega^D$	مجموعه شاخص بارها
$\Omega_L$	مجموعه همه ی خطوط انتقال در حال نصب و نصب شده
$\Omega^L$	مجموعه خطوط در حال احداث
$\Omega^N$	مجموعه باس های شبکه ها
$\Omega^W$	مجموعه همه ی سناریوها

# فصل اول

## مقدمه



## 1-1- پیشگفتار:

مقوله برنامه‌ریزی سیستم قدرت در واقع زیرمجموعه‌ای از برنامه ریزی کلان انرژی در یک کشور است. برنامه‌ریزی انرژی خود وابسته به بسیاری پارامترها همچون رشد اقتصادی، رفتار مصرف‌کنندگان است که مدلسازی آن نیازمند در اختیار داشتن طیف وسیعی از اطلاعات فنی، اقتصادی، سیاسی و ... است. بطور معمول پس از پیش بینی مصرف انرژی برای یک افق زمانی بلند مدت و تعیین سهم هر یک از انواع انرژی ها در تأمین آن، نیاز انرژی الکتریکی بصورتی کلی مشخص خواهد شد. پس از این مرحله با تأکید بیشتر بر مسائل فنی، پیش بینی بار الکتریکی انجام شده و بر مبنای آن برنامه‌ریزی تولید برای یک افق زمانی بلند مدت (به عنوان مثال 30 سال) انجام می‌شود (Wang & McDonald, 1993).

برنامه‌ریزی شبکه انتقال پس از مشخص شدن طرح توسعه تولید و با در اختیار داشتن پیش بینی بار منطقه‌ای انجام می‌شود که خود دارای دو مرحله تعیین محل نیروگاهها و سپس برنامه ریزی شبکه با هدف اتصال نیروگاههای جدید به شبکه و تأمین بار است. در این بین ممکن است نتایج برنامه‌ریزی شبکه تأثیراتی بر طرح توسعه تولید داشته باشد که در این صورت برنامه‌ریزی تولید نیاز به اصلاح خواهد داشت (Wang & McDonald, 1993).

در گذشته تمامی موارد فوق الذکر بصورت متمرکز و با در اختیار داشتن کلیه اطلاعات انجام می‌گرفت، حال آنکه در شبکه‌های قدرت تجدید ساختار شده ارگان‌های مختلفی در مقوله برنامه‌ریزی تأثیرگذار خواهند بود که لزوماً یک هدف واحد را نیز دنبال نمی‌کنند.

همین ایده منجر به برنامه‌ریزی، سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری شبکه‌های قدرت بصورت دولتی و یا تحت مقررات سخت دولتی<sup>۱</sup> برای نزدیک به یک قرن شده است. پس از تجربه تجدید ساختار در کشور انگلستان و پاره‌ای از کشورهای آمریکای لاتین و گسترش آن به سایر کشورهای توسعه یافته، مشخص شد که تجدید ساختار شبکه قدرت در عمل منجر به افزایش بهره‌وری<sup>۲</sup> بنگاه‌های دخیل در صنعت برق همچون واحدهای تولیدی و در نهایت کاهش قیمت انرژی الکتریکی تحویلی به مصرف‌کنندگان می‌شود (Galachant, 2003).

با وجود فرازونشیب‌های فراوان در این روند و مشکلاتی همچون بحران بازار برق کالیفرنیا، تجدید ساختار سیستم انرژی الکتریکی تبدیل به امری اجتناب‌ناپذیر شده است چنانکه اتحادیه اروپا کلیه کشورهای عضو را ملزم به این امر کرده است (با وجود عدم تمایل بعضی کشورها همچون فرانسه) (Galachant, 2003).

در کشورهای در حال توسعه، جدای از مسأله افزایش بهره‌وری، مشکل تأمین اعتبار سرمایه‌گذاری در بخش انرژی الکتریکی نیز عامل مهمی در تغییر قوانین و مقررات این بخش می‌باشد در سیستم تجدید ساختار شده با ورود بازیگران جدید به سیستم و تفکیک نقش‌ها، مشکلات و چالش‌های جدیدی در امر برنامه‌ریزی شبکه ایجاد می‌شود و لذا شناخت بازیگران اصلی سیستم تجدید ساختار شده و اهداف هر یک، از ملزومات بررسی و تهیه مدل مناسب برنامه‌ریزی خواهد بود.

## 1-2- تعریف مسأله برنامه‌ریزی شبکه انتقال و ویژگی‌های آن

برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال بخشی از یک فرایند گسترده‌تری است که با برنامه‌ریزی انرژی آغاز و به برنامه‌ریزی بهره‌برداری ختم می‌گردد. برنامه‌ریزی انرژی در یک افق بسیار بلند مدت برنامه‌ریزی انجام شده و در آن نیازهای انرژی کشور و سهم هر یک از انواع انرژی‌ها در تأمین این نیاز کلی، تعیین می‌گردد. برنامه‌ریزی انرژی بر مبنای وضعیت اقتصادی و دور نمای توسعه اقتصادی و بسیاری پارامترهای دیگر از جمله رویکردهای سیاسی انجام شده و مسائل کلان مدیریتی بیش از مسائل فنی در آن تأثیر گذار است.

---

1- Regulated  
2- Efficiency

پس از تعیین سهم انرژی الکتریکی در تأمین نیاز انرژی یک کشور، برنامه‌ریزی تولید برای یک افق بلند مدت (30 تا 40 سال) انجام می‌گیرد که در آن ظرفیت‌های مورد نیاز و نوع نیروگاه‌ها مشخص می‌شود.

پس از مشخص شدن طرح توسعه تولید، برنامه‌ریزی شبکه انتقال در یک افق بلند مدت انجام می‌گیرد. این به روز رسانی و اصلاح طرح‌های توسعه می‌تواند حتی تا افق‌های 2 تا 3 نیز ساله انجام گیرد که وابسته به اتفاقات پیش‌بینی نشده در برنامه‌ریزی است. پس از مشخص شدن طرح توسعه شبکه انتقال، در بازه‌های کوتاه مدت 2 تا 3 ساله برنامه‌ریزی توان راکتیو انجام می‌شود که هدف از آن تعیین نوع، ظرفیت و محل جبران‌سازهای توان راکتیو مورد نیاز برای عملکرد صحیح شبکه و کاهش تلفات است. در نهایت فرایند برنامه‌ریزی بهره‌برداری که افق آن از یک سال قبل تا یک روز قبل از بهره‌برداری است، آغاز شده و مسائلی همچون زمانبندی تعمیرات نیروگاه‌ها و خطوط، سوئیچینگ‌های لازم در شبکه انتقال و اجرای بازار روز قبل (تعیین الگوی تولید واحدها) مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این تقسیم‌بندی برنامه‌ریزی توسعه شبکه توزیع اولیه و ثانویه نیز جزء برنامه‌ریزی شبکه انتقال لحاظ شده است که طبعاً در افق‌های کوتاه‌مدت (حداکثر 5 سال) انجام می‌گردد. پیش‌نیاز اولیه برنامه‌ریزی شبکه انتقال پیش‌بینی بار به تفکیک مراکز مصرف است که برای افق زمانی 10 تا 20 سال انجام می‌شود (Galachant, 2003).

در عمل با توجه به این پیش‌بینی و پارامترهای مختلفی همچون مسائل زیست محیطی، دسترس پذیری منابع آب، مطالعات ژئوفیزیکی، تعادل تولید و مصرف در هر ناحیه و بسیاری پارامترهای دیگر، سایت‌های مناسب برای احداث نیروگاه انتخاب شده و با توجه به پارامترهای فنی-اقتصادی، سایت نهایی احداث و ظرفیت نیروگاه‌ها مشخص خواهد شد. به این ترتیب برنامه‌ریزی شبکه انتقال با فرض مشخص بودن محل و ظرفیت نیروگاه‌ها و پیش‌بینی بار انجام می‌شود.

برنامه‌ریزی شبکه انتقال در عمل به چهار دلیل عمده زیر انجام می‌شود:

- اتصال نیروگاه به شبکه

- اتصال یک نقطه بار جدید به شبکه

- افزایش سطح قابلیت اطمینان

-تقویت شبکه با هدف تبادلات اقتصادی توان (در شبکه‌های تجدید ساختار شده)

اتصال نقاط بار جدید به شبکه عمدتاً در سطح فوق توزیع انجام می‌شود و تأثیر آن بصورت افزایش بار پست‌های انتقال و تغییر الگوی بارگیری آنها مدل خواهد شد. در مواردی همچون تغذیه صنایع بزرگ تأمین توان آنها می‌تواند مستقیماً از شبکه انتقال صورت پذیرد.

طرح‌های متفاوتی با هدف افزایش قابلیت اطمینان شبکه مد نظر قرار می‌گیرند که در دو دسته کلی طرح‌های تقویت و توسعه شبکه طبقه‌بندی می‌شوند.

در طرح‌های تقویت شبکه، معمولاً شبکه موجود در پاره‌ای مسیرها تقویت می‌شود. به عنوان مثال دو مداره‌کردن یک خط موجود، افزایش تعداد ترانسفورماتورهای پست‌ها و یا افزایش سطح ولتاژ انتقال نمونه‌هایی از این طرح‌ها هستند.

در طرح‌های توسعه، برنامه‌ریز با توجه به محدودیت‌های زیست محیطی مسیرها یا مکان‌های جدیدی برای احداث خطوط یا پست‌های جدید انتخاب می‌کند و به این ترتیب در واقع کریدورهای انتقال توان جدیدی به شبکه افزوده خواهند شد. به عنوان مثال تبدیل پست 132 کیلوولت عسلویه به 400 کیلوولت یک طرح تقویت و احداث خط 400 کیلوولت کنگان-عسلویه یک طرح توسعه محسوب می‌شود (گزارشات مرکز کنترل شبکه<sup>1</sup>)

با توجه به مسائل زیست محیطی و تحصیل اراضی، تمرکز برنامه‌ریزان بیشتر بر استفاده از طرح‌های تقویت شبکه است مگر در مواردی که این طرح‌ها پاسخگوی نیازهای شبکه نباشند.

در عمل با توجه به آنکه تمامی پیش‌بینی‌های انجام شده دقیقاً تحقق نخواهد یافت، برنامه‌های توسعه پس از مدتی (مثلاً هر پنج سال یک بار) مورد بازبینی قرار می‌گیرند چرا که با گذشت زمان پاره‌ای از اطلاعات مبهم مشخص شده و آینده با دقت بیشتری قابل پیش‌بینی خواهد بود. همچنین همواره بایستی تأثیرات توسعه شبکه تولید و توسعه شبکه توزیع نیز در برنامه ریزی شبکه دیده شود که این امر نیازمند یک فرایند رفت و برگشتی بین این مسائل بهینه سازی خواهد بود.

---

<sup>1</sup> www.igmc.ir

### 1-3- روش پیشنهادی حل برنامه‌ریزی توسعه انتقال:

کاملاً مشهود است که با توجه به تجدید ساختار در سیستم تولید و برق رسانی حضور بازار رقابتی برای تکمیل فرایند برنامه‌ریزی توسعه امری حیاتی و ضروری است. در بحث برنامه‌ریزی توسعه انتقال از روش‌های متعددی هم چون ابتکاری، فازی و ... بهره گرفته شده است. اما در این میان روش‌های ریاضی اخیراً بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. یکی از نواقص عمده پروژه‌های گذشته این است که در فرایند برنامه‌ریزی بازار برق در نظر گرفته نشده است. در محیط بازار قیودی چون تراکم خطوط، توازن توان و قیود امنیتی مطرح است که برای داشتن برنامه‌ریزی توسعه قابل قبول اعمال قیود بازار امری ضروری است.

در این پایان‌نامه با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی برنامه‌ریزی توسعه انتقال در محیط بازار صورت گرفته است. برنامه‌ریزی مورد نظر به صورت دو سطحی<sup>1</sup> بیان می‌شود. تابع هدف سطح بالا به دنبال حداقل کردن هزینه توسعه شبکه و حداکثر سازی رفاه اجتماعی است. سطح پایین، سطح بازار یا همان سطح ISO<sup>2</sup> می باشد که محیط بازار رقابتی، قیود مربوط به بازار و به طور کلی فرایند تسویه بازار<sup>3</sup> را نشان می‌دهد. بعد از مدل سازی مسئله این سوال مطرح می‌شود که چه روشی برای حل این مسئله اتخاذ شود؟

این روش ریاضی تحت عنوان برنامه‌ریزی ریاضی با قیود متوازن<sup>4</sup> (MPEC) مطرح و حل می‌شود. با روش پیشنهادی که در فصل‌های آینده توضیح داده خواهد شد، مسئله دو سطحی ادغام می‌شود تا در یک نرم افزار بهینه ساز مثل گمز قابل حل باشد.

### 1-4- ساختار پایان نامه

در فصل دوم پیشینه و آنچه در زمینه برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال انجام شده، مطرح شده است. در فصل سوم مدل سازی برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال ارائه شده است. تمام عوامل تاثیر گذار در دو سطح

---

1- Bi-level

2- independent System operator

3- Market clearing time

4- Mathematical Programs with Equilibrium Constraints



مطرح و حل شده است. در فصل چهارم سیستم 6 باس گارور و 24 باسه IEEE برای تست روش آورده شده است.

در فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات را خواهیم داشت.

## **فصل دوم**

**روش‌های برنامه ریزی شبکه انتقال**

**در ساختار جدید**

Family name:Askari	Name:Behzad
Title of thesis: Transmission network Expansion Planning with Mathematical Programs with Equilibrium Constraints(MPEC) in a deregulated electricity system	
Supervisor: Dr.Seyed Jalal Seyed Shenava Advisors:Dr.Hossein Shayeghi-Seyed Saeid Taheri(M.Sc.)	
Graduate Degree: <b>M.Sc</b> Major: Electrical Engineering University: <b>Mohaghegh Ardabili</b> Graduation date: 11/1/2015	
Specialty:Power Engineering Faculty:Technical And Engineering Number of pages:99	
<p><b>Abstract:</b></p> <p>We present a bilevel model for transmission expansion planning within a market environment, where producers and consumers trade freely electric energy through a pool. The target of the planner, modeled through the upper-level problem, is to minimize network investment cost while facilitating energy trading. This upper-level problem is constrained by a collection of lower-level market clearing problems representing pool trading, and whose individual objective functions correspond to social welfare. Using the duality theory the proposed bilevel model is recast as a mixed-integer linear programming problem.After modeling of the problem,the bi-level program is solved with mathematical programwith equilibrium constraints(MPEC).At the end the mentioned model is applied to the Garver's six-bus test system and IEEE 24 bus reliability test system.</p>	
Keywords: Bilevel model, Transmission Expansion Planning,MPEC	



**University of Mohaghegh Ardabili**

**Faculty of Technical and Engineering**

**Department of Electrical Engineering**

**Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
M.Sc. in Electrical Power Engineering**

**Title:**

**Transmission network Expansion Planning with Mathematical Programs with  
Equilibrium Constraints(MPEC) in a Deregulated Electricity System**

**Supervisor:**

**Dr.Seyed Jalal Seyed Shenava**

**Advisors:**

**Dr.Hossein Shayeghi-Seyed Saeid Taheri (M.Sc.)**

**By:**

**Behzad Askari**

**2015**