

# شبیه‌سازی تقاضای برق صنایع ایران با استفاده از سیستم دینامیک

پریسا موسوی اهرنجانی<sup>۱</sup>، سید فرید قادری<sup>۲\*</sup> و محمد علی آزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> مؤسسه پژوهش در مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی - گروه مهندسی صنایع دانشگاه آزاد واحد پرند

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی صنایع - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۴/۹/۲۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۶/۱۰/۱۰، تاریخ تصویب ۸۶/۱۰/۳۰)

## چکیده

انرژی الکتریکی امروزه به عنوان یکی از ارکان مهم توسعه اقتصادی جوامع به شمار می‌رود. از این رو پیش‌بینی تقاضای آن در بخش‌های مختلف اقتصادی، از جمله صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است. اکثر مطالعاتی که تا کنون در زمینه تقاضای برق در ایران صورت گرفته به روش اقتصادسنجی بوده است. در روش‌های اقتصادسنجی نمی‌توان تأثیرات سیاست‌های مختلف را بر تقاضای برق بررسی کرد. روش سیستم دینامیک ضمن برطرف نمودن مشکل مذکور امکان تحلیل‌های متفاوت و کلان را برای تصمیم‌گیری فراهم نموده است. از این‌رو در این مقاله به تحلیل تقاضای برق در بخش صنعت با این روش پرداخته شده است. ابتدا با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه تقاضای برق بخش صنعت، عوامل مؤثر بر تقاضای برق که عبارتند از ارزش افزوده، تعرفه برق صنعتی و بهره‌وری تجهیزات مورد استفاده در صنعت شناخته شده و سپس چگونگی تأثیر این عوامل بر تقاضای برق مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که عامل بهره‌وری به عنوان یک عامل کیفی به شمار می‌رود، از شاخص شدت برق برای اندازه‌گیری آن استفاده شده است و در نهایت با توجه به این عوامل و تقسیم‌بندی مصارف برق صنعتی به دو دسته مصارف متغیر با تولید و مصارف ثابت و نیز مفهوم شدت برق، مدل تقاضای برق بخش صنعت با استفاده از روش سیستم دینامیک بدست آمده است. مدل برای سالهای ۸۲-۱۳۷۶ اجرا شده است و برای تصدیق اعتبار آن، تقاضای برق بدست آمده از مدل با مقادیر واقعی تقاضای برق در طی این سالها مقایسه گردیده است، با توجه به پایین بودن خطای مدل مقدار تقاضای برق تا سال ۱۴۰۰ تخمین زده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تقاضای برق - صنعت - شبیه‌سازی - سیستم دینامیک - بهره‌وری

## مقدمه

داخلی در تصریح مدل آورده شده است. تبریزیان [۳] تابع مصرف برق در دو بخش خانگی و تجاری و صنعت را برای ایران تخمین زده و با توابع برق کشورهای OECD مقایسه کرده‌اند. در این مطالعه مصرف برق صنعتی دوره قبل، تولید ناخالص داخلی، قیمت برق در صنعت و قیمت گاز به عنوان متغیر در مدل وارد شدند که به غیر از قیمت گاز ضرایب سایر متغیرها از نظر آماری معنی دار بوده است؛ یعنی در بخش صنعت، گاز نمی‌تواند جانشین برق در وسایل و تجهیزات شود. در مدل بخش صنعت که توسط صادقی [۴] ارائه شده است، مقدار مصرف برق تابعی از متغیرهای قیمت واقعی برق، تعداد مشترکین برق در بخش صنعت، ارزش افزوده واقعی بخش صنعت و متغیر مجازی مربوط به دوران جنگ و صلح است. در مدل مذکور تمام ضرایب در سطح اطمینان ۵ درصد معنی دار می‌باشند. نکته قابل ذکر این است که تغییرات قیمتی سایر حاملهای انرژی که عمدتاً فرآورده‌های نفتی است، در بخش صنعت نمی‌تواند مصرف برق را تحت تأثیر قرار

امروزه انرژی برق یکی از ارکان مهم توسعه اقتصادی جوامع است. از این رو پیش‌بینی تقاضای آن در بخش‌های مختلف اقتصادی، از جمله صنعت از اهمیت بالایی برخوردار است. در ایران نیز مطالعاتی در این مورد صورت پذیرفته است که اغلب آنها به روش اقتصادسنجی بوده است. کاظمی [۱] برای تخمین تابع تقاضای بخش صنعت از متغیرهای توضیحی قیمت واقعی برق فروخته شده به بخش صنعت، ارزش افزوده بخش صنعت، قیمت واقعی نفت کوره و نفت گاز و مقدار مصرف برق دوره قبل استفاده نموده‌اند که در نهایت تقاضای کل صنعت، تابعی از ارزش افزوده صنعت و مصرف دوره قبل بوده است. مدل نشان می‌دهد که تقاضا تابعی از قیمت کالاهای جانشین برق (نفت کوره و نفت گاز) نیست. فخرایی [۲] توابع تقاضای انواع حاملهای انرژی برای بخش‌های مختلف اقتصادی کشور از جمله صنعت ارائه نموده‌اند. در این مدل برای تعیین میزان فروش کل برق به بخش صنعتی، قیمت واقعی فروش برق به بخش صنعتی و تولید ناخالص

دهد. لذا در تصریح الگوی مصرف برق نقشی نداشته است. مطالعات دیگری نیز در مورد تقاضای بخش صنعت در ایران انجام شده است [۸-۵].

## بررسی عوامل مؤثر بر تقاضای برق بخش صنعت

در مطالعات انجام شده در خصوص تقاضای برق بخش صنعت در ایران که به تعدادی از آنها نیز اشاره شد، از جمله عواملی که تأثیر آنها بر تقاضای برق مورد بررسی واقع شده است، عواملی چون سطح تولید، قیمت برق، قیمت حاملهای انرژی جایگزین برق، تعداد مشترکان صنعتی و فناوری مورد استفاده در تجهیزات تولیدی می‌باشد.

آشکار است که هر چه میزان (سطح) تولید بیشتر شود، استفاده بیشتر از عوامل تولید و از جمله برق را به دنبال خواهد داشت. به دلیل نبود متغیر سطح تولید بنگاههای صنعتی، از متغیر جانشین آن یعنی ارزش افزوده که با متغیر سطح تولید همبستگی بالایی دارد استفاده می‌شود. ارزش افزوده در حقیقت دربر دارنده تعداد مشترکان صنعتی نیز است به طوریکه در یکی از مطالعات انجام شده که علاوه بر ارزش افزوده، تعداد مشترکان صنعتی نیز به عنوان متغیر در مدل وارد شده است، به دلیل وجود همخطی شدید بین دو متغیر توضیحی تعداد مشترکان و ارزش افزوده، مدل دچار مشکل شده و برای رفع این مشکل متغیر تعداد مشترکین از مدل حذف گردیده است [۵].

در مورد متغیر قیمت برق نیز از آنجا که تغییرات قیمت برق در کشور، در سطح نازلی بوده هیچ گاه باعث به وجود آمدن انگیزه کافی در تعدیل قابل ملاحظه مصرف برق نشده است و با وجود اینکه در اغلب مطالعات متغیر قیمت برق از مدل حذف نشده است، اما کشش قیمتی بدست آمده بسیار پایین بوده است.

بخش صنعت از جمله بخشهایی است که در کوتاه مدت نسبت به تغییرات قیمت حاملهای انرژی جایگزین برق حساسیت نشان نمی‌دهد زیرا امکان جایگزینی سریع وسایل و تجهیزات مصرف کننده برق وجود ندارد. در آن دسته از مطالعاتی که قیمت حاملهای انرژی جانشین برق به عنوان متغیر آماری در مدل وارد شده است، از لحاظ آماری فاقد اهمیت شناخته شده و از مدل حذف گردیده

است [۱، ۲، ۴، ۶، ۷]. در یکی از مطالعات انجام شده، کشش متقاطع نشان داده است که برق و حاملهای انرژی جانشین برق در بخش صنعت دارای رابطه مکملی (و نه جانشینی) هستند [۷].

با توجه به اینکه مطالعات انجام شده به روش اقتصادسنجی بوده است میزان مصرف برق یک دوره قبل نیز به عنوان متغیر وارد شده است که البته در بردارنده تکنولوژی تجهیزات مورد استفاده نیز است و این متغیر در همه مطالعات، دارای ضریب معنی دار بالایی بوده است.

بنابراین در کل، تقاضای برق در صنعت را می‌توان تابعی از ارزش افزوده این بخش، قیمت برق در صنعت و تکنولوژی مورد استفاده دانست. بدین معنی که همچنانکه قبلاً نیز ذکر شد هرچه سطح تولید و یا به عبارتی ارزش افزوده صنعت بیشتر باشد، تقاضای برق در این بخش بیشتر خواهد بود. در مورد قیمت برق در صورتیکه تغییرات قیمت برق زیاد باشد در بلند مدت بر تقاضای برق تأثیر گذار خواهد بود و در کوتاه مدت تأثیر کمتری خواهد داشت. عامل تکنولوژی نیز از طریق میزان بهره‌وری برق بر تقاضای برق تأثیرگذار است.

## تعیین میزان بهره‌وری مصرف برق از طریق تعریف شاخص شدت برق

در میان عوامل تأثیرگذار بر تقاضای برق، ارزش افزوده و قیمت برق عوامل کمی هستند، اما از آنجا که بهره‌وری، عاملی کیفی است برای سنجش بهره‌وری صنایع در مصرف برق شاخصی به نام شدت برق صنایع تعریف شده است که مفهوم آن برگرفته از شاخص شدت انرژی (شدت انرژی عبارت است از میزان انرژی مصرف شده به ازای ایجاد یک واحد ارزش افزوده) است. شدت برق عبارت است از میزان برق مصرف شده برای ایجاد یک واحد ارزش افزوده در صنایع [۱۰]. شدت برق عکس میزان بهره‌وری برق است؛ یعنی هرچه شدت برق پایین‌تر باشد مطلوب‌تر است.

## شاخص استاندارد بهره‌وری

برای تعیین میزان بهره‌وری صنایع مختلف ایران، لازم است شدت انرژی برق این صنایع با استانداردهای جهانی مقایسه شود. اما به دلیل اینکه در این زمینه استاندارد تعریف شده‌ای وجود ندارد، شدت برق صنایع کشور آمریکا

ویژگی‌های تولید در هر صنعت، از جمله تکنولوژی‌های مختلف مورد استفاده در صنایع مختلف است. بنابراین نمی‌توان شاخص شدت انرژی برق یک فعالیت صنعتی را با فعالیت دیگر مقایسه نمود. لذا برای هر گروه از صنایع، لازم است شدت انرژی برق استاندارد آن گروه، محاسبه شود تا در هر صنعت مبنای مقایسه وضعیت فعلی با استاندارد آن صنعت بدست آید.

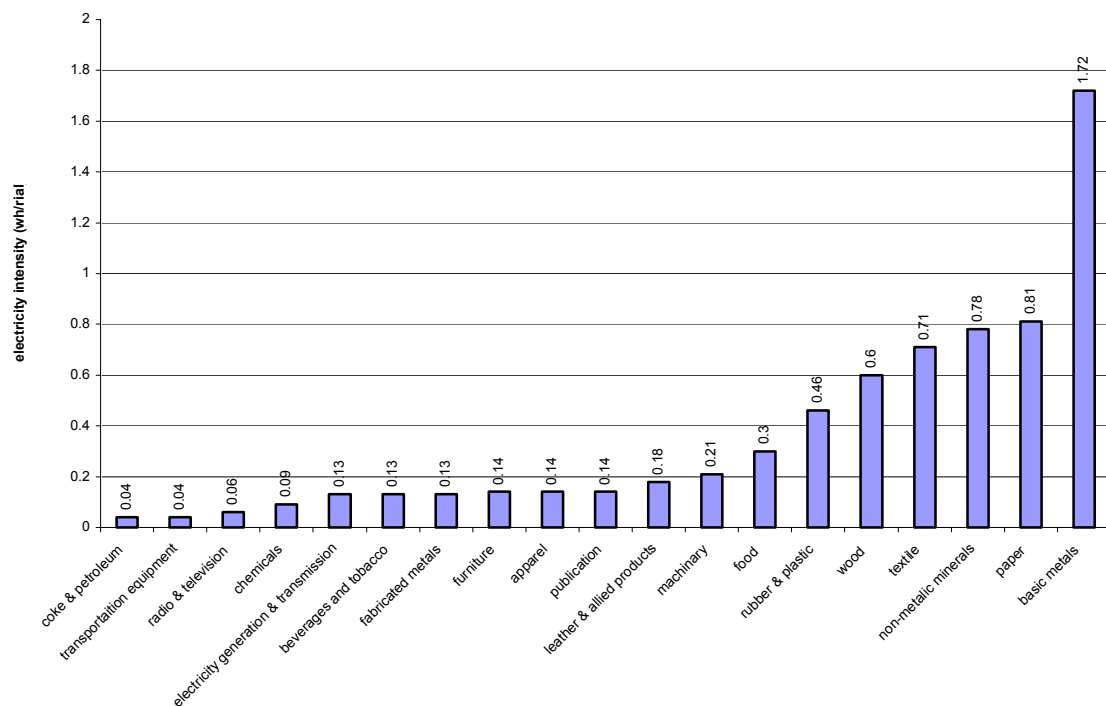
شاخص محاسبه شده شدت برق صنایع ایران و صنایع آمریکا (آخرین آمار بدست آمده از صنایع آمریکا مربوط به سال ۱۹۹۷ است. با توجه به اینکه تغییرات شدت انرژی برق منوط به تغییرات تکنولوژی در هر یک از صنایع است و تغییرات تکنولوژی نیز در بلند مدت صورت می‌گیرد لذا اختلاف چهار ساله بین داده‌های ایران (۱۳۸۰ ه.ش.) و داده‌های آمریکا (۱۹۹۷ میلادی) تأثیر چندانی بر نتایج نخواهد داشت) (که به عنوان شاخص استاندارد در نظر گرفته شده است) و نیز نسبت شدت برق صنایع ایران به آمریکا در جدول (۱) آمده است. آمارهای ارزش افزوده و میزان برق مصرفی صنایع آمریکا از سایت اداره سرشماری این کشور استخراج شده است [۹].

که به عنوان یکی از کشورهای توسعه یافته مطرح است، برای مقایسه انتخاب شده است.

## محاسبه شاخص شدت برق صنایع مختلف و مقایسه آن با شاخص استاندارد

شدت برق هر صنعت در ایران از تقسیم میزان انرژی الکتریکی مصرف شده بر حسب کیلو وات ساعت بر میزان ارزش افزوده آن صنعت بر حسب ریال و به قیمت ثابت سال ۱۳۷۶ محاسبه شده است. با توجه به اینکه میزان بهره‌وری فعلی صنایع برای مطالعه و مقایسه مورد نیاز است، شدت انرژی برق صنایع در سال ۱۳۸۰ (در هنگام تهیه این گزارش، سال ۱۳۸۰ آخرین سالی است که آمار آن توسط مرکز آمار ایران منتشر شده است) در شکل (۱) به صورت نمودار نشان داده شده است.

همان‌طور که در نمودار نیز مشاهده می‌شود شاخص شدت برق در صنایع مختلف متفاوت است. به عنوان مثال شدت برق در صنایع فلزات اساسی، کاغذ، مواد کانی غیرفلزی، منسوجات، و چوب بالا و در صنایع زغال کک و پالایشگاه‌های نفت، ماشین‌آلات حمل و نقل، رادیو و تلویزیون و مواد شیمیایی پایین است. این تفاوت ناشی از



شکل ۱: شدت انرژی برق سال ۱۳۸۰ به تفکیک صنایع.

جدول ۱: شدت برق صنایع ایران و آمریکا.

نسبت شدت برق صنایع ایران به آمریکا	شدت برق صنایع ایران (5-E کیلو وات ساعت به ریال)	شدت برق صنایع ایران (5-E کیلو وات ساعت به ریال)	شرح فعالیت
۹/۱۹	۳/۳۲	۳۰/۴۷	صنایع غذایی
۷/۹۴	۱/۶۹	۱۳/۴۵	صنایع آشامیدنی و توتون و تنباکو
۶/۴۱	۱۱/۱۵	۷۱/۴۳	منسوجات
۵/۷۰	۲/۶۱	۱۴/۸۹	پوشاک غیر از کفش
۸/۶۰	۲/۱۷	۱۸/۶۵	چرم و کفش
۷/۳۸	۸/۱۶	۶۰/۱۸	چوب
۶/۵۴	۱۲/۴۶	۸۱/۴۰	کاغذ
۴/۸۷	۳/۰۶	۱۴/۹۰	انتشار
۱/۲۶	۳/۳۹	۴/۲۷	زغال کک و پالایشگاههای نفت
۶/۰۲	۷/۶۶	۴۶/۱۷	لاستیک و پلاستیک
۱/۱	۸/۷۴	۹/۶۰	مواد شیمیایی
۸/۲۷	۹/۵۲	۷۸/۶۵	مواد کانی غیر فلزی
۷/۱۳	۲۴/۱۱	۱۷۱/۹۵	فلزات اساسی
۳/۵۲	۳/۸۹	۱۳/۶۸	فلزی فابریکی
۸/۹۸	۲/۴۴	۲۱/۹۳	ماشین آلات
۳/۶۶	۱/۸۷	۶/۸۵	رادیو و تلویزیون و ...
۳/۶۵	۳/۵۹	۱۳/۱۲	ماشین آلات تولید و انتقال برق
۱/۴۹	۲/۹۲	۴/۳۶	ماشین آلات حمل و نقل
۴/۸۳	۳/۰۲	۱۴/۵۷	مبلمان

گرفت. پس از راجر نایل نیز افراد دیگری نظیر استرمن، ریچاردسون، دیویدسن، فیدامن و اندرو فورد نیز هر یک در بخشهای مختلف انرژی از این تکنیک استفاده نمودند [۱۴].

### ساختار مدل

مدلسازی تقاضای برق در صنعت بر مبنای عوامل تأثیرگذار بر آن انجام شده است. برای مدلسازی تقاضای برق مصارف برق در صنعت به دو بخش عمده به شرح زیر تقسیم شده است:

### روش تحقیق و پیشینه مرتبط

سیستم داینامیک برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ توسط فارستر در دانشگاه MIT ابداع شد [۱۱، ۱۲]. این روش بر پایه ساختار مدار کنترلی بنا شده است و امکان مطالعه ساختار و رفتار سیستم‌های پیچیده اقتصادی، اجتماعی، زیستی و فنی را فراهم می‌کند [۱۳].

مدلسازی با استفاده از سیستم داینامیک در زمینه برنامه‌ریزی استراتژیک انرژی و تحلیل سیاست‌ها از دهه ۱۹۷۰ آغاز شد. اولین مدل در زمینه انرژی با عنوان COAL توسط راجر نایل ساخته شد. بعدها مدل وی توسعه یافت و با نام تجاری IDEAS مورد استفاده قرار

برق در سرمایه‌ش و گرمایش و یا از طریق تعمیرات و نگهداری قابل کاهش است. زمانی که قیمت برق صنایع افزایش می‌یابد، شدت برق مستقل از تولید صنایع با توجه به میزان کشش شدت برق صنایع نسبت به تغییر قیمت ممکن است کاهش یابد که البته همان‌گونه که در جدول (۲) آمده است، تقریباً مصرف برق نیمی از صنایع نسبت به تغییرات قیمت کشش‌پذیر نیست و در سایر صنایع نیز میزان کشش‌پذیری بسیار پایین است. برای محاسبه کشش قیمتی تقاضای برق، تابع تقاضای برق در صنایع مختلف محاسبه شده و با استفاده از آن، کشش تقاضای برق نسبت به تغییرات قیمت بدست آمده است. لازم به ذکر است برای برآورد تابع تقاضا در هر صنعت، تقاضای برق به صورت تابعی از قیمت برق و ارزش افزوده صنعت در نظر گرفته شده است و بسته به شرایط صنعت از متغیرهای موهومی در مواقعی که مدل دچار شکست ساختاری بوده، استفاده شده است [۱، ۳، ۷، ۸]. به منظور برآورد تابع تقاضا روش اقتصادسنجی و بسته نرم‌افزاری Eviews مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به توضیحات ارائه شده، روابط علی و معلولی تقاضای برق برای دو نوع مصرف ذکر شده تشریح گردیده است.

• مصارف متغیر با تولید که معمولاً برای تأمین نیروی محرکه ماشین آلات است.

• مصارف مستقل از میزان تولید که بیشتر برای تأمین سرمایه‌ش، گرمایش، روشنایی و تهویه و غیره است. به طوری که می‌توان نوشت:

$$\text{مصرف برق در صنعت} = \text{مصرف برق مستقل از تولید} + \text{مصرف برق متغیر با تولید} \quad (۱)$$

با توجه به تعریف شدت برق در صورت تقسیم طرفین رابطه (۱) به میزان ارزش افزوده صنعت خواهیم داشت:

$$\text{شدت برق در صنعت} = \text{شدت برق مستقل از تولید} + \text{شدت برق متغیر با تولید} \quad (۲)$$

از آنجا که مصارف متغیر با تولید آن قسمت از مصرف است که مربوط به تجهیزات تولید است، بهره‌وری تجهیزات در مصرف برق بر میزان مصرف برق اثرگذار است و از آنجا که تجهیزات جدیدتر و با تکنولوژی بالاتر دارای بهره‌وری بیشتری هستند، سرمایه‌گذاری‌هایی که در تجهیزات جدید صورت می‌گیرد موجب افزایش بهره‌وری و کاهش شدت برق می‌گردد. و مصارف مستقل از تولید نیز با صرفه‌جویی از طریق عایق‌بندی برای بهره‌وری بیشتر

جدول ۲: کشش تقاضای برق نسبت به تغییرات قیمت به تفکیک صنایع.

کشش قیمتی تقاضا	صنایع	کشش قیمتی تقاضا	صنایع
۰	لاستیک و پلاستیک	-۰/۲	غذایی
-۰/۵۱	مواد و محصولات شیمیایی	۰	آشامیدنی
-۰/۳۸	مواد کانی غیر فلزی	-۰/۸۳	منسوجات
۰	فلزات اساسی	$-۹۰۱/۹۹ * \frac{p}{q}$	پوشاک غیر از کفش
۰	فلزی فابریکی	-۰/۳۵	چرم
-۰/۷۱	سایر ماشین آلات	-۰/۴۶	چوب
۰	ماشین آلات حمل و نقل	۰	کاغذ
۰	ماشین آلات تولید و انتقال برق	۰	انتشار
-۰/۳۶	مبلمان	۰	نفت

## روابط علت و معلولی

همان طور که ذکر شد شدت برق متغیر با تولید در حقیقت آن قسمت از شدت برق است که مربوط به مصرف برق توسط تجهیزات می‌باشد. تمام تجهیزات یک صنعت دارای شدت برق یکسانی نیستند؛ زیرا تجهیزات با فناوری جدیدتر شدت برق کمتر و تجهیزات قدیمی‌تر شدت برق بیشتری دارند بدین معنی که برای ایجاد یک واحد ارزش افزوده، تجهیزات با فناوری جدیدتر به دلیل بهره‌وری بالاتر در مصرف برق، میزان برق کمتری مصرف می‌کنند. بنابراین درصد تجهیزات با فناوریهای مختلف (جدید و قدیمی) در میزان شدت برق تأثیرگذار است؛ یعنی هرچه درصد تجهیزات با فناوری قدیمی بیشتر باشد، شدت برق بالاتر خواهد بود. بنابراین تجهیزات در صنعت به دو بخش تجهیزات با فناوری جدید و قدیمی تقسیم شده‌اند و نحوه تشکیل این دو نوع تجهیزات نیز مدل شده است.

همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، سرمایه‌گذاری در تجهیزات، میزان تجهیزات با فناوری جدید را افزایش می‌دهد (فرض شده است که سرمایه‌گذار بهای جدیدی که در صنایع صورت می‌پذیرد، سرمایه‌گذاری در تجهیزاتی است که دارای فناوری جدید بوده و از بهره‌وری بالاتری برخوردارند).

از طرفی استهلاک تجهیزات، موجب افزایش تجهیزات با فناوری قدیمی می‌شود. میزان تجهیزات با فناوری جدید و قدیمی تعیین کننده درصد این دو نوع تجهیزات است. در صورتی که درصد تجهیزات با فناوری جدید بیشتر شود،

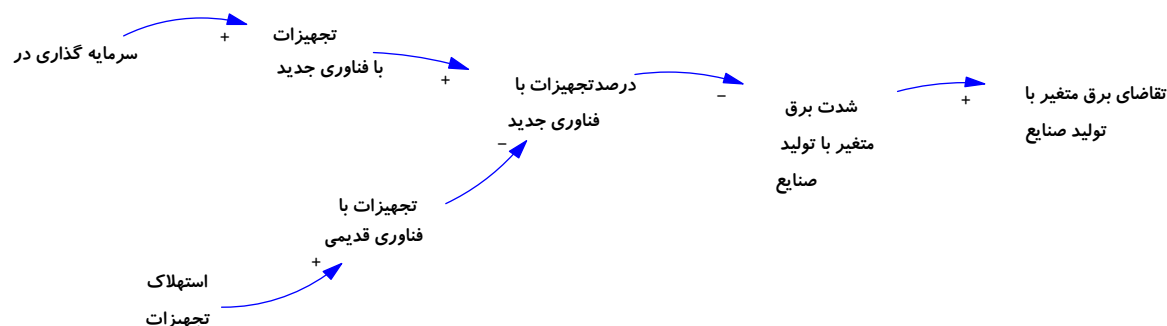
شدت برق متغیر با تولید، به واسطه بهره‌وری بالاتر تجهیزات با فناوری جدید در مصرف برق، کاهش می‌یابد و در نتیجه تقاضای برق صنایع کاهش می‌یابد.

از آنجا که مصرف برق ثابت صنایع شامل مصارفی چون سرمایش، گرمایش، روشنایی و تهویه است، شدت برق ثابت صنایع بسیار متأثر از میزان مصرف برق سرمایه‌ساختمانی در صنعت است. با توجه به شکل (۳) ملاحظه می‌شود با افزایش تعرفه برق و با توجه به کششی که تقاضای برق نسبت به تعرفه برق دارد، مصرف برق سرمایه‌ساختمانی صنایع از طریق صرفه‌جویی در مصرف کاهش می‌یابد. باید توجه داشت در مورد مصرف برق متغیر با تولید صنایع چنین صرفه‌جویی صورت نمی‌گیرد. زیرا که این امر مستلزم تعویض و یا اصلاح و نوسازی تجهیزات است و با توجه به تغییرات اندک در تعرفه برق صرفه اقتصادی ندارد.

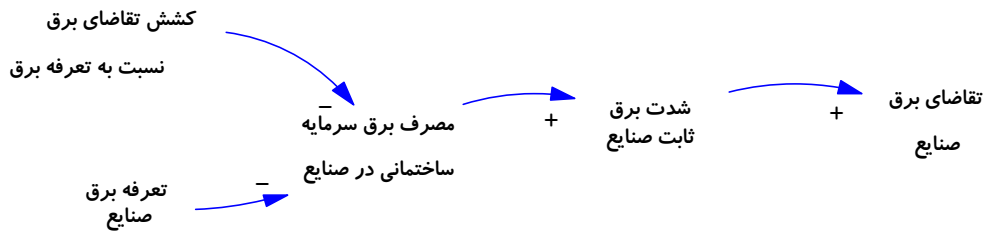
## نمودارهای حالت - جریان

برای بدست آوردن تقاضای برق صنعت کافی است شدت برق صنعت مدل شود و در میزان ارزش افزوده صنعت ضرب شود که مقدار بدست آمده همان تقاضای برق صنعت خواهد.

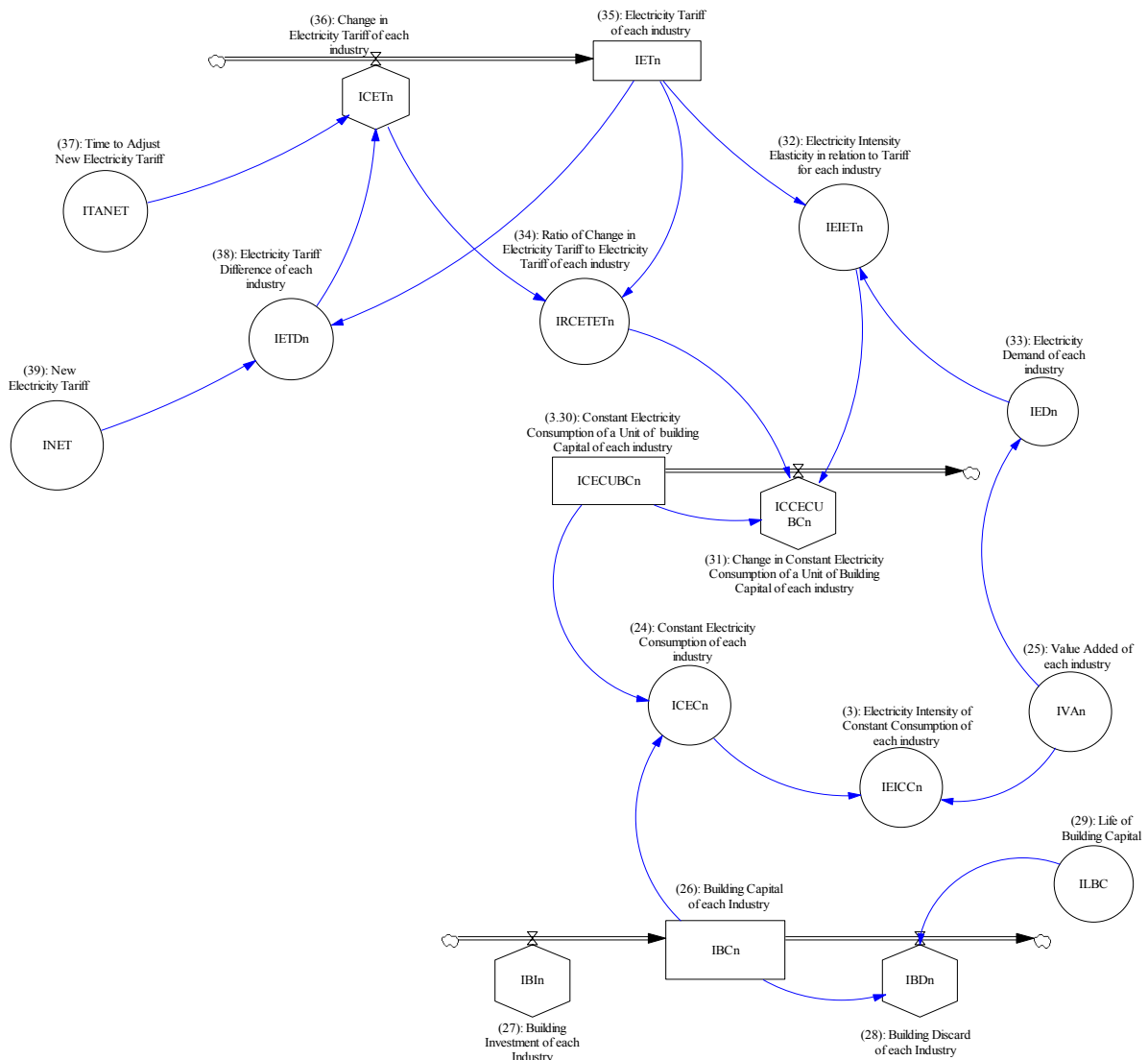
همان طور که قبلاً نیز ذکر شد، شدت برق صنایع برابر با حاصل جمع شدت برق متغیر و ثابت صنایع است. در ادامه، نحوه مدل‌سازی شدت برق متغیر با تولید و شدت برق ثابت صنایع آورده شده است.



شکل ۲: روابط علت و معلولی تقاضای برق متغیر با تولید صنایع.



شکل ۳: روابط علت و معلولی شدت برق مستقل از تولید صنایع.



شکل ۴: نمودار حالت- جریان شدت برق متغیر با تولید صنایع.

### شدت برق متغیر با تولید

با توجه به روابط علی و معلولی، شدت برق متغیر هر صنعت تحت تأثیر میزان سرمایه‌گذاری در تجهیزات جدید و استهلاک و فرسایش تجهیزات موجود است. لذا برای محاسبه شدت برق متغیر با تولید، ابتدا نحوه

سرمایه‌گذاری در تجهیزات و استهلاک آنها تشریح شده است.

با توجه به شکل (۴) موجودی «تجهیزات با فناوری جدید» (INTECn) در هر صنعت با «سرمایه‌گذاری» (IEIUcn) در آن صنعت افزایش و به مرور زمان و با

۴۰ تا ۵۰ درصد کل شدت برق است [۱۰] که مقدار آن برای هر صنعت با بکارگیری کالیبراسیون محاسبه شده است.

### شدت برق مستقل از تولید (ثابت)

همان طور که در شکل (۵) نشان داده شده است و با توجه به تعریف شدت برق، «شدت برق ثابت» هر صنعت برابر است با «مصرف برق ثابت» (ICECn) آن صنعت تقسیم بر «ارزش افزوده» (IVAn). همان گونه که در روابط علی و معلولی نیز ذکر شد، «مصرف برق ثابت» بسیار متأثر از موجودی «سرمایه ساختمان» (IBCn) صنایع است؛ یعنی هرچه موجودی ساختمان در صنعتی بیشتر باشد مصرف برق ثابت آن صنعت نیز بیشتر خواهد بود، به طوری که می توان گفت «مصرف برق ثابت» هر صنعت برابر است با موجودی «سرمایه ساختمان» آن صنعت ضرب در «مصرف برق ثابت هر واحد سرمایه ساختمان» (ICECUBCn). موجودی «سرمایه ساختمان» نیز مانند تجهیزات با «سرمایه گذاری» (IBIn) افزایش یافته و به مرور زمان مستهلک شده و کاهش می یابد.

$$IBCn(t) = \int (IBIn - IBDn)d_t + IBCn(0) \quad (5)$$

نرخ «استهلاک ساختمان» (IBDn) مانند نرخ «استهلاک تجهیزات» از تقسیم «سرمایه ساختمان» بر «طول عمر ساختمان» (ILBC) بدست می آید. «مصرف برق ثابت هر واحد سرمایه ساختمان» نیز خود با نرخی که متأثر از «تعرفه برق»، میزان «تغییر در تعرفه برق» و «کشش تقاضای برق نسبت به تعرفه برق» است تغییر می کند.

$$ICECUBCn(t) = \int (ICECUBCn)d_t + ICECUBCn(0) \quad (6)$$

تعرفه برق صنایع خود با «نرخ تغییر در تعرفه برق» تغییر می کند.

$$IETn(t) = \int (ICETn)d_t + IETn(0) \quad (7)$$

حال که شدت برق متغیر و ثابت صنایع محاسبه شد، کل شدت برق هر صنعت از مجموع شدت برق متغیر و ثابت بدست آمده و با ضرب آن در ارزش افزوده، تقاضای برق هر صنعت به دست می آید. در نهایت تقاضای برق کل صنعت برابر خواهد بود با مجموع تقاضای برق هر یک از صنایع.

فرسوده شدن و تبدیل آنها به تجهیزات با فناوری قدیمی کاهش می یابد.

$$INTECn(t) = \int (IEIU_n - ITNOEn)d_t + INTECn(0) \quad (3)$$

نرخ «تبدیل تجهیزات با فناوری جدید به قدیمی» (ITNOEn) از تقسیم میزان «تجهیزات با فناوری جدید» بر «مدت زمان تبدیل به فناوری قدیمی» (ITTNOEn) به دست می آید؛ بدین معنی که اگر مثلاً مدت زمانی که طول می کشد که تجهیزات قدیمی شوند پنج سال در نظر گرفته شود سالانه یک پنجم تجهیزات قدیمی می شوند.

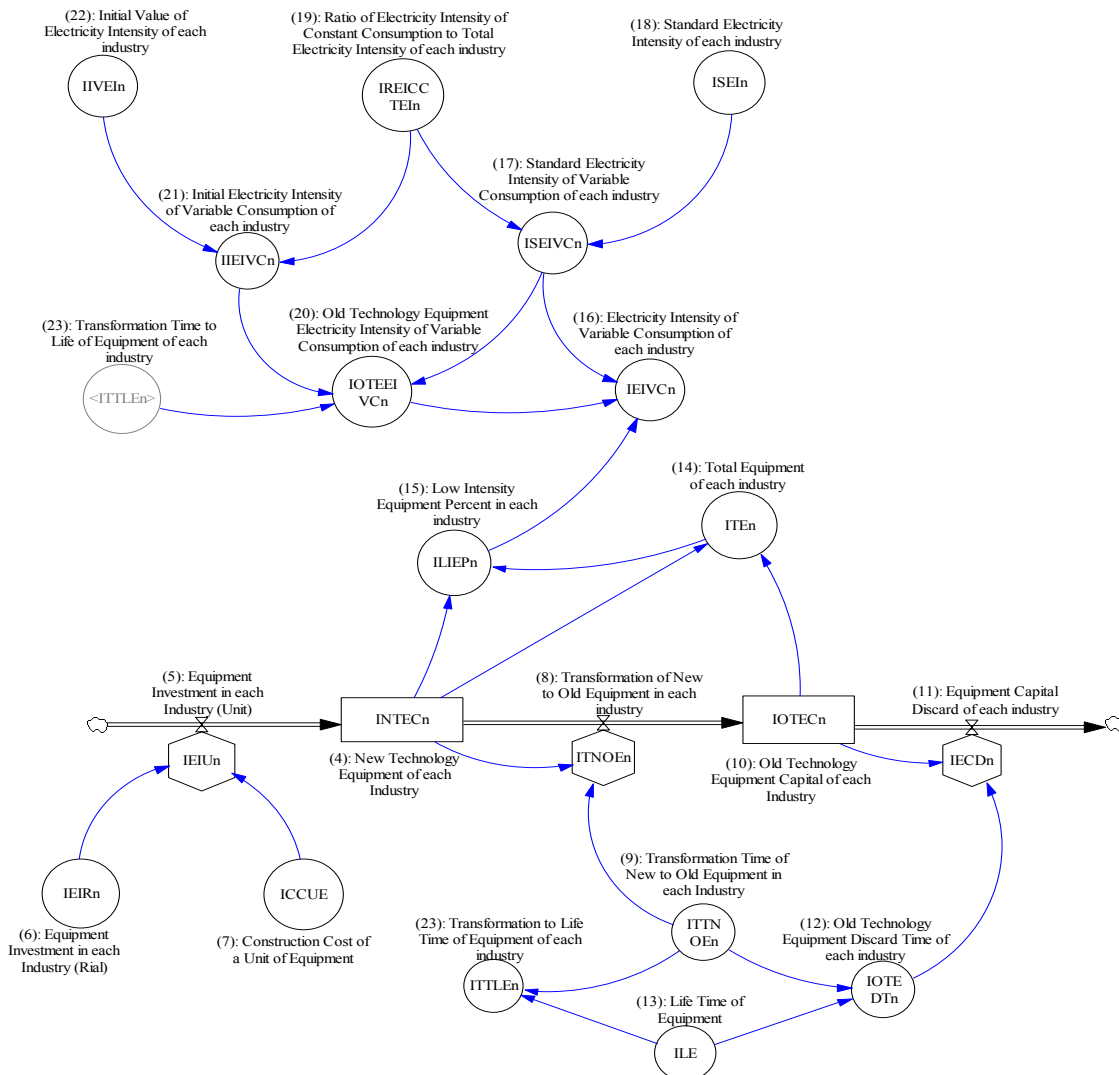
به مرور زمان که تجهیزات با فناوری جدید، قدیمی می شوند به موجودی «تجهیزات با فناوری قدیمی» (IOTECn) افزوده می شود. این تجهیزات نیز خود به مرور زمان مستهلک می شوند.

$$IOTECn(t) = \int (ITNOEn - IECDn)d_t + IOTECn(0) \quad (4)$$

«نرخ استهلاک» (IECDn) تجهیزات مانند نرخ تبدیل آنها، از تقسیم میزان «تجهیزات با فناوری قدیمی» بر «مدت زمان استهلاک» (IOTEDTn) آنها بدست می آید. حال، از آنجا که مقداری از تجهیزات، دارای فناوری قدیمی بوده و مابقی تجهیزات، تجهیزات با فناوری جدید هستند و با فرض این که «تجهیزات با فناوری جدید در هر صنعت، شدتی برابر با «شدت برق استاندارد» (ISEIn) آن صنعت دارند، می توان «شدت برق متغیر» هر صنعت را از متوسط وزنی «شدت برق متغیر استاندارد» (ISEIVCn) و «شدت برق متغیر تجهیزات با فناوری قدیمی» (IOTEEIVCn) بدست آورد؛ یعنی «شدت برق متغیر» هر صنعت، برابر است با حاصلضرب «درصد تجهیزات با فناوری جدید» (ILIEPn) در «شدت برق متغیر استاندارد» به علاوه حاصلضرب درصد تجهیزات با فناوری قدیمی در «شدت برق متغیر تجهیزات با فناوری قدیمی». «درصد تجهیزات با فناوری جدید» (ILIEEn) را می توان از تقسیم «تجهیزات با فناوری جدید» بر «کل تجهیزات» (ITEn) یک صنعت بدست آورد. «کل تجهیزات» هر صنعت مجموع «تجهیزات با فناوری جدید» و «تجهیزات با فناوری قدیمی» آن صنعت است.

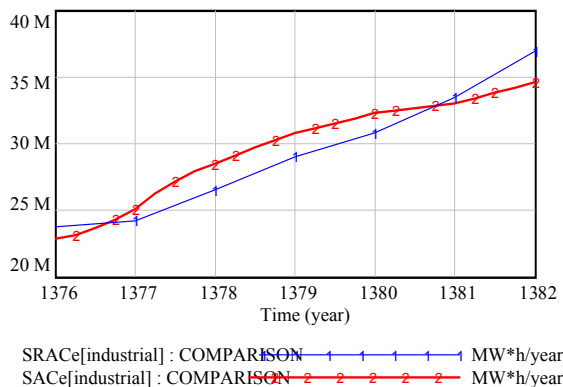
«شدت برق متغیر استاندارد» برابر است با «شدت برق استاندارد» ضرب در نسبت شدت برق متغیر به کل شدت برق. شدت برق مستقل از تولید (ثابت) صنایع، در حدود





شکل ۵: نمودار حالت- جریان شدت برق مستقل از تولید صنایع.

کل صنعت تعمیم داده شده و با مقدار واقعی مصرف برق صنایع مقایسه شده است.



شکل ۶: نمودار مقایسه مصرف برق بخش صنعت در مدل با مقدار واقعی.

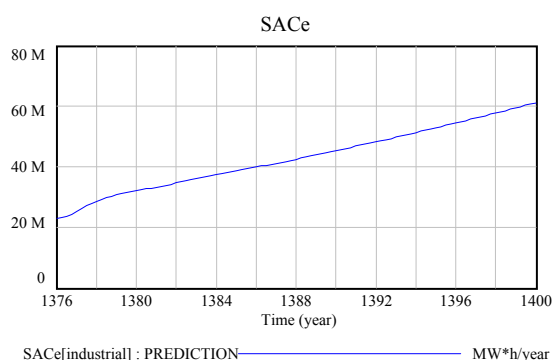
## اعتبارسنجی مدل

برای تعیین میزان اعتبار مدل، مدل برای سال‌های ۸۲-۱۳۷۶ توسط نرم افزار Vensim اجرا شده است و میزان مصرف بدست آمده از مدل طی این سال‌ها با مقادیر واقعی مقایسه شده است. نتایج بدست آمده در شکل (۶) نشان داده شده است. SACe منحنی پیش‌بینی مصرف برق و SRACe منحنی مصرف برق واقعی است. مصرف برق، با میانگین خطای ۴/۴ درصد، رفتار واقعی را تولید می‌نماید. همچنین حداکثر خطای مدل ۷/۳ درصد است. علت خطای فوق را تا حدی می‌توان به دلیل عدم وجود آمار و اطلاعات کافی در زمینه صنایع دانست. در مدل ایجاد شده با توجه به آمار و اطلاعات موجود، مصرف برق کارگاه‌های صنعتی بیش از ده نفر بدست آمده و به

همچنین با مطالعه دقیق آمار ارزش افزوده و مصرف برق به تفکیک صنایع ۱۹ گانه، در برخی از سال ها مثلاً با اینکه ارزش افزوده یک و نیم برابر شده ولی مصرف برق کاهش یافته است، لذا به نظر می‌رسد داده های آماری موجود نیز دارای خطا می‌باشند.

### پیش‌بینی میزان تقاضای برق

پس از تعیین اعتبار مدل، از آن برای پیش‌بینی تقاضای برق تا سال ۱۴۰۰ استفاده شده است که نتایج آن در شکل (۷) آورده شده است.



شکل ۷: پیش‌بینی میزان تقاضای برق تا سال ۱۴۰۰.

این پیش‌بینی نشان می‌دهد که تقاضای برق در سال ۱۴۰۰ در مقایسه با مقدار فعلی آن تقریباً ۱/۶ برابر شده است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به بررسی تأثیرات متقابل عوامل تأثیرگذار بر تقاضای برق در بخش صنعت پرداخته شده و این تأثیرات با نگرش سیستمی تحلیل گردیده است که نتایج زیر حاصل شده است:

۱. عوامل تأثیرگذار بر تقاضای برق در بخش صنعت، ارزش افزوده، تعرفه برق و بهره‌وری

### مراجع

- 1 - Kazemi, A. (1996). *Electricity demand analysis and estimation in household and industrial sectors*, MSc thesis, Faculty of Economy, University of Tehran.
- 2 - Fakhraei, S. H. (1992). *Final report on energy demand forecasting of various energy carriers of different consumer sectors*.
- 3 - Tabrizian, B. (1997). *Estimation of electricity consumption in Iran and comparing it with that of OECD countries*, MSc thesis, Faculty of Economy, University of Tehran.

۲. نسبت شدت برق صنایع ایران به آمریکا بین ۱/۱ و ۹/۱۹ بدست آمده است که نشان دهنده عدم بهره‌وری صنایع ایران در مصرف برق است.
۳. با توجه به این‌که بیشتر مطالعاتی که تا کنون صورت گرفته به روش اقتصادسنجی بوده و در روش اقتصادسنجی امکان بررسی سیاستهای مختلف وجود ندارد در این مقاله به مدلسازی تقاضای برق با استفاده از روش سیستم دینامیک پرداخته شده است که این امکان را بوجود می‌آورد.
۴. با استفاده از مدل ایجاد شده توسط روش سیستم دینامیک تقاضای برق صنایع برای سالهای ۱۳۷۶-۱۳۸۲ تخمین زده شده و با مقادیر واقعی آن مقایسه شده است که متوسط میزان خطای بدست آمده ۴/۴ درصد محاسبه شده است. این میزان نشانگر قابلیت مدل ایجاد شده برای پیش‌بینی تقاضای برق است. تقاضای برق صنایع تا سال ۱۴۰۰ پیش‌بینی شده است، این پیش‌بینی نشان می‌دهد که تقاضای برق در سال ۱۴۰۰ در مقایسه با مقدار فعلی آن تقریباً ۱/۶ برابر شده است.

### تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت‌های معاونت محترم انرژی وزارت نیرو انجام شده است که بدین وسیله مراتب قدردانی محققین ابراز می‌گردد.

- 
- 4 - Sadeghi, N. (2003). *Forecasting Electricity consumption through economics models*, MSc thesis, Faculty of Economy, University of Tehran.
  - 5 - Hadian, M. (1997). *Estimating price elasticity and income of electricity demand in household and industrial sectors of province of Hamedan*, MSc thesis, Faculty of Economy, University of Tehran.
  - 6 - Zamani, M. (1998). *Estimating electricity demand functions of economical sectors of province of Lorestan*, MSc thesis, Faculty of Economy, University of Tehran.
  - 7 - Asgari, A. (2000). *Assessing electricity demand of different consuming sectors and investigating its pricing policy*, PhD thesis, Faculty of Economy, University of Tehran.
  - 8 - Bolandi, Sh. (2000). *Pricing in electricity power industry*, MSc thesis, Faculty of Economy, University of Tehran.
  - 9 - <http://www.census.gov>
  - 10 - <http://www.bayareacouncil.org> Electricity Management Initiatives for Commercial and Industrial Customers
  - 11 - Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Productivity Press, Cambridge.
  - 12 - Forrester, J. W. (1971). *Principles of systems*. Productivity Press, Cambridge.
  - 13 - Lembo, A. J. *Creating models*. Cornell University, Doubleday.
  - 14 - <http://www.hubberty.com/hubberty/> SystemDynamicsEnergyModeling
-