پنجمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق

پیش‌بینی بار در شبکه‌های توزیع
به روش رگرسیون بهبود یافته

شمس الدین قرشی ـ حسین حسینی
شرکت مهندسی مشاور غرب نیرو

چکیده:

یکی از مراحل مهم در طراحی سیستمهای توزیع انرژی الکتریکی پیش‌بینی بار و سیر تغییرات آن از زمان حال تا پایان سال مورد نظر برای طراحی می‌باشد. پیش‌بینی بار صحیح علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری، امکان برنامه‌ریزی زمانی مناسب جهت اجرای پروژه را نیز فراهم می‌نماید. (طراحی دینامیک)

استفاده از رگرسیون در پیش‌بینی بار یکی از روشهای متداول و مفید بوده و کارآیی آن به اثبات رسیده است. با این حال وجود مشکلاتی از قبیل انتقال بار، وجود نواحی خالی از بار که در سالهای آینده باردار می‌شوند و انتخاب تابع ریاضی مناسب برای برازش منحنی، استفاده از آن را دچار محدودیت می‌نماید. در مقاله ارائه شده ضمن رفع مشکلات فوق الگوریتم کامپیوتری روش جدید نیز ارائه شده و مقایسه‌ای نیز بین روش جدید و روشهای قدیمی صورت گرفته و افزایش دقت در روش جدید مورد تأکید قرار گرفته است.

شرح مقاله :

در یک تقسیم‌بندی کلی پیش‌بینی بار به دو روش انجام می‌گیرد:

۱ ـ شبیه‌سازی چند متغیره که برای سیستمهای بزرگ و با داشتن داده‌های متعدد و متنوعی انجام گرفته و نتایج دقیقی را نیز ارائه می‌دهد.

۲ ـ برازش و برونیابی رشدبار از گذشته تا آینده که روش عمومی‌تری نسبت به روش قبل می‌باشد.

روش دوم علاوه بر دارا بودن محاسبات ساده‌تر، با امکانات و اطلاعات کمتری نسبت به روش اول قابل انجام بوده و از نظر اقتصادی نیز به صرفه‌تر می‌باشد هر چند که نتایج حاصله ضعیف‌تر از نتایج بدست آمده از روش شبیه‌سازی هستند. در تخمین‌بار سیستمهای توزیع معمولاً ناحیه تحت پوشش به بخشهای کوچکی تقسیم شده و بار آینده هر یک از این بخشها پیش‌بینی می‌شود. برای تقسیم‌بندی ناحیه تحت پوشش دو روش را می‌توان بکار برد: تقسیم‌بندی منظم و تقسیم‌بندی نامنظم.

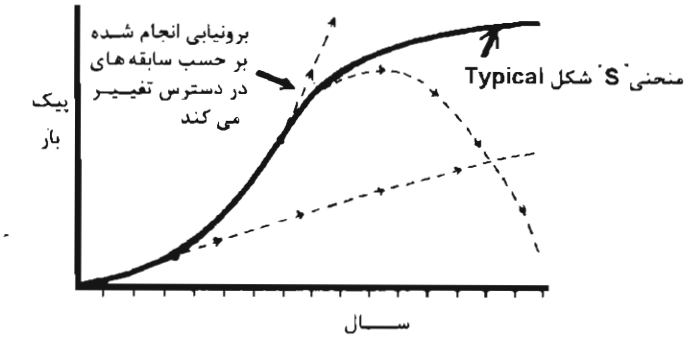
در تقسیم‌بندی منظم کل ناحیه تحت پوشش به مربعات کوچکی با اندازه‌های یکسان که می‌توانند دارای مساحت متغیری از چند متر تا چند کیلومترمربع باشند تقسیم می‌شود. و در تقسیم‌بندی نامنظم ناحیه با توجه به ناحیه تحت پوشش فیدرها به بخشهای نامنظم قسمت می‌گردد.

روش کلاسیک تمایل‌یابی بار در هر ناحیه کوچک که از این پس سلول نامیده می‌شود، برازش منحنی با رگرسیون multiple در رابطه با بارهای گذشته در هر سلول است. به این صورت که با داشتن پیک‌بار در هر سلول و در سال t و با اعمال روش حداقل مربعات پیک‌بار تخمینی برای سالهای $t>T$ بدست می‌آید. (T زمان حال می‌باشد)

از نقطه نظر برونیابی، رشدبار در سلولها مشخصه پیچیده‌ای را ارائه می‌دهد و فرم منظم و پیوسته‌ای ندارد اما معمولاً پیک رشدبار و شیب تغییرات آن برای سالهای آینده مشخص می‌شود. برای آنکه حالت پایدارتری به تمایل‌یابی داده شود، تخمین‌بار سال انتهای دوره پیش‌بینی (سال افق) نیز صورت گرفته و جزو اطلاعات ورودی قرار داده می‌شود. (شکل ۱)

در روش رگرسیونی معمول داده‌های مورد نیاز همانگونه که گفته شد محدود به پیک‌بار سالهای گذشته و سال افق برنامه است در حالی که برای رسیدن به نتایج واقعی‌تر و رها شدن از خطاهایی که در نتیجه مسائلی چون انتقال‌بار از فیدری به فیدر دیگر یا وجود نواحی خالی که در سالهای آینده یا حال باردار می‌شوند. و یا پایین آوردن زمان محاسبه و تعداد برازش

منحنی‌ها و یافتن تابع مناسب برای برازش در مواردی که تعداد سلولها زیاد باشند لزوم وجود اطلاعات بیشتر و همچنین ایجاد تغییراتی در روش پیش‌بینی احساس می‌شود که در زیر به آنها اشاره می‌شود.



شکل ۱: رشدبار در هر سلول دارای مشخصه "S" شکل است که به سختی برونیابی داده‌ها با این مشخصه انجام می‌گیرد. همچنانکه اینجا نیز دیده می‌شود نتیجه برونیابی و برازش بطور مؤثری وابسته به قسمتی از منحنی است که برای برازش منحنی انتخاب می‌شود.

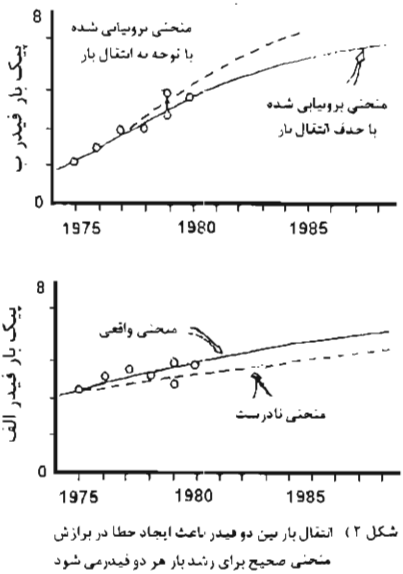
اصلاح روش پیش‌بینی بار رگرسیونی

اصلاح اوّل : حل مشکل انتقال‌بار (Load Transfer Coupling) :

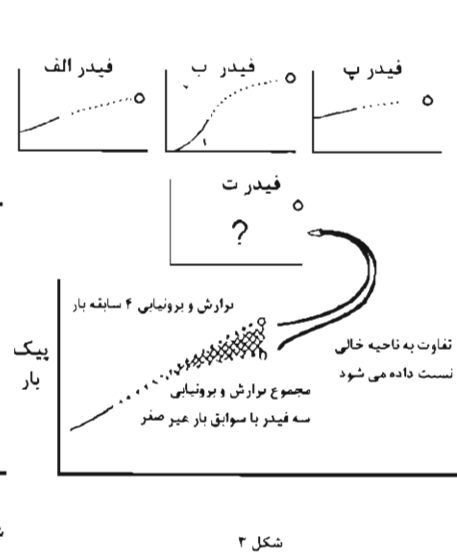
در شبکه‌های توزیع برای متعادل نمودن یا برداشتن اضافه‌بار پستها یا فیدرها و یا کاهش تلفات در آنها اغلب انتقال‌بار از فاز یا فیدری به فاز یا فیدر دیگر انجام می‌گیرد و از آنجا که حین برونیابی و برازش رشدبار، تغییرات ناشی از کلیدزنی نیز همزمان در نظر گرفته می‌شوند خطاهای بزرگی در نتایج وارد می‌شوند (شکل ۲). این ایراد با توجه به این نکته که زمان و مقدار انتقال‌بارها به راحتی قابل جمع‌آوری نیستند شکل پیچیده‌تری بخود می‌گیرد.

اعمال روش مارکف (Markov) یا رگرسیون خاصی که به آن LTC Reg گفته می‌شود می‌تواند ما را در حل این مشکل یاری نماید.

رگرسیون LTC با انجام رگرسیون همزمان روی دو فیدری که بین آنها ممکن است انتقال‌بار اتفاق بیافتد و با توجه به اطلاعاتی که در ماتریسی بنام "ماتریس کویلینگ" نگهداری می‌شوند صورت می‌گیرد. در نتیجه نیازی به مشخص کردن مقدار و جهت انتقال‌بار بطور



شکل ۲) انتقال بار بین دو فیدر باعث ایجاد خطا در برازش منحنی صحیح برای رشد بار هر دو فیدرمی شود



شکل ۳

قطعی نیست و تنها تعیین این موضوع که انتقالی بین دو فیدر یا دو پست احتمالاً در سال مورد نظر انجام می‌شود کافی است و اگر انتقال هم صورت نگیرد روش LTC مشکلی ایجاد نکرده و روش رگرسیون معمولی اعمال می‌گردد.

مفهوم حل همزمان دو سلول برای هر چند سلول مهم قابل تعمیم است. و تنها موضوع مورد تأمل آن است که زمان محاسبه با مربع تعداد سلولهایی همزمان افزایش می‌یابد. لذا بندرت بیش از پنج فیدر با یکدیگر بطور همزمان برازش می‌شوند.

اصلاح دوّم : حل مشکل استنتاج سطح خالی (Vacant Area Infrence) :

در پیش‌بینی بار مناطق شهری می‌توان قسمتهایی را یافت که در آنها بار قبلاً وجود نداشته و از سال آغاز پیش‌بینی یا در سالهای میانی تا سال افق، رشدبار در آنها آغاز می‌گردد. در اینگونه موارد روشهای برازش استاندارد نمی‌توانند از عهده انجام برازش برآیند چرا که هیچ سابقه قبلی از بار در دسترس نیست و روش زیر که اختصاراً VAI گفته می‌شود در حل مشکل، کمک زیادی بما می‌نماید. (مطابق شکل ۳)

در این روش ابتدا گروههایی که در آنها تنها یک سلول خالی موجود می‌باشند مشخص شده سپس در هر یک از این گروهها مجموع‌بار سلولها برونیابی می‌شود که سلول خالی را نیز

در برمی‌گیرد. بعد از آن بارهای موجود هر سلول به تنهایی برونیابی شده و در نهایت تفاضل مجموع این بارها از تخمین کلی، تغییرات بار را در ناحیه خالی مشخص می‌کند.

در نواحی بزرگ که چندین سلول خالی موجود باشد مراحل زیر دنبال می‌گردند:

۱ ـ سوابق بارهای همه فیدرها در یک منحنی جمع و برونیابی می‌شوند.

۲ ـ سوابق بارهای فیدرها به چهار ناحیه تقسیم و هر ناحیه جداگانه برونیابی می‌شود.

۳ ـ گروههای برونیابی شده در بند قبل مجدداً به چهار قسمت تقسیم و برونیابی می‌شوند.

۴ ـ این تقسیم‌بندی ادامه می‌یابد تا زمانی که امکان تقسیم نمودن مجدد وجود نداشته باشد.

اصلاح سوّم : حل مشکل گروه‌بندی (Clustering) :

با آنکه مشخصه رشدبار در نواحی مختلف تقریباً دارای شکل مشابهی می‌باشند (S شکل)، تفاوتهای موجود در آنها لزوم بکار بردن توابع مختلفی را برای انجام رگرسیون نمایان می‌کند، برای کاهش زمان و تعداد توابع پایه‌ای که از آنها برای برازش بر داده‌ها استفاده می‌شود گروه‌بندی (Clustering) روش مناسبی می‌باشد.

برای گروه‌بندی روشهای مختلفی وجود دارد و همه آنها تکنیکهای ریاضی هستند که یک دسته از داده‌ها را به گروههایی تقسیم می‌کنند که هر یک از داده‌های این گروهها از جهاتی مشابهند، در این مقاله الگوریتم K-means انتخاب شده است و در ضمیمه ب نیز این الگوریتم آورده شده است، در الگوریتم K-means گروه‌بندی سلولها به حداکثر ۶ دسته که هر یک مشابه یک منحنی هستند انجام و برای هر گروه یک منحنی متوسط که cluster mean گفته می‌شود محاسبه و مراحل لازم برای رگرسیون روی این منحنی انجام و نتیجه حاصله مجدداً هر یک از منحنی‌ها بسط داده می‌شود.

توابع مورد استفاده برای برازش منحنی‌ها، توابع توصیه شده IEEE می‌باشند که در ضمیمه پ لیست شده‌اند.

Clustering انجام شده از جهتی با آنچه که در کارهای عملی بکار می‌رود متفاوت است. به این ترتیب که بار در سال افق را ۱ فرض کرده و همه مقادیر قبلی این بار سال افق براساس آن نرمالیزه شده و از آنها بجای مقادیر واقعی استفاده می‌شود. این کار با توجه به این موضوع صورت می‌گیرد که تقسیم‌بندی سلولها به صورت نامنظم انجام شده و هر سلول نماینده ناحیه تحت پوشش یک فیدر می‌باشد و در نتیجه یک فیدر با مثلاً ۱۰MW ممکن است چگالی‌باری کمتر از فیدری با بار ۵MW در ناحیه تحت پوشش خود داشته باشد و این موضوع برای اینکه

فرض کنیم در Clustering تفاوت مقادیر بارهای فیدرها ناشی از تفاوت موجود در نوع و مشخصات بارها است صحیح نیست و نرمالیزه نمودن بارها باعث می‌شود که Clustering تنها با حالت منحنی و نه با مقدار آن مواجه باشد و این کار تحلیل داده‌های فیدرها را امکان‌پذیر می‌نماید. البته در مواردی که از سلول‌بندیهای منظم صحیح‌تر استفاده می‌شود این کار لزومی ندارد.

با توجه به موارد گفته شده اطلاعات مورد لزوم به شرح زیر خواهند بود:

اطلاعات مورد نیاز :

عبارتنداز :

۱ ـ پیک‌بار قبلی سالانه سلولها و داده‌های مربوط به سال یا سالهای افق.

۲ ـ لیستی از انتقال‌بارها که انتقال بین فیدرهای i و j را در سال t به صورت احتمالی نشان می‌دهد.

۳ ـ یک مختصات x و y برای هر فیدر یا سلول در نظر گرفته می‌شود. این مختصات محل تقریبی هر ناحیه را تعیین می‌نماید و در مرحله VAI برای محاسبه اینکه کدام بلوک‌ها در یک دسته واقع می‌شوند استفاده می‌شود.

۴ ـ تعیین طول داده‌های لازم در هر قسمت از مراحل انجام کار این مرحله با توجه به این نکته انجام می‌شود که در انجام گروه‌بندی بزرگترین طول داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد در حالی که رگرسیون از کوتاه‌ترین پریود استفاده می‌کند.

آزمایشهای انجام شده روی داده‌ها نشان داده است که با در نظر گرفتن انتقال‌بارهای ممکنه در هر فیدر طول داده‌های مورد نیاز برای آن در مراحل رگرسیون از فرمول تجربی زیر قابل استخراج است:

(۱) (تعداد انتقالها در هر سلول و در هر فیدر - ۱) /۵ = تعداد سالهای مورد استفاده برای برازش سوابق داده‌ها

اعمال روش بهبود یافته :

با ترکیب سه روش یاد شده الگوریتم کلی پیش‌بینی بار به فرم نشان داده شده در ضمیمه الف درمی‌آید. در این ترکیب‌بندی جدید همه مراحل را می‌توان در دو استپ خلاصه نمود:

۱ـ گروه‌بندی (Clustering) :

همانگونه که توضیح داده شد این مرحله برای تعیین دسته‌هایی از اطلاعات که به یک گروه نسبت داده می‌شوند و معادله‌ای که بهترین پوشش را روی آنها داشته باشد انجام می‌گردد. روش اعمال آن مطابق با آنچه ذکر گردید با استفاده از الگوریتم K-means می‌باشد و تمامی داده‌ها را به حداکثر ۶ دسته نسبت می‌دهد. همین روال برای بلوکهایی با مجموع چهار فیدر که با در نظر گرفتن مختصات x و y آنها در یک گروه قرار گرفته‌اند تکرار می‌گردد. این گروه‌بندی محاسبه می‌کند که کدام معادله به هر بلوک حین انجام محاسبات VAI وقتی با گروههای چهارتایی کار می‌کنیم باید نسبت داده شود. مشابهاً Clustering روی گروههای ۱۶ تایی نیز انجام شده و اگر تعداد نواحی بیشتری موجود باشند گروههای ۶۴ تایی یا بیشتر نیز قابل دسته‌بندی و Cluster شدن هستند.

۲ـ برازش منحنی (Trending) :

در این مرحله روش VAI مطابق با آنچه که توضیح داده شده است مورد استفاده قرار می‌گیرد. سوابق مورد نیاز دارای طولهای تقریبی بوده و با جمع سوابق کار همه سلولها و برازش آنها VAI شروع می‌شود. سپس عمل تقسیم کل ناحیه به چهار بخش انجام می‌گیرد.

این تقسیم‌بندی براساس مقیاس مشخصی نیست زیرا نواحی از نظر اندازه و شکل غیر یکنواختند. در هر مرحله از آنالیز، رگرسیون LTC برای برازش بکار می‌رود. موقعی که یک سلول یا بلوکی از سلولها برازش می‌شود لیستی از انتقال‌بارها برای تشخیص سلولها یا بلوکهایی از سلولها که بین آنها انتقال‌بار وجود دارد تعیین و رگرسیون LTC مطابق مرجع ۱۰ برای برازش بلوک یا سلولهای مورد نظر بکار می‌رود.

آزمایش و نتیجه‌گیری :

روش ترکیبی جدید در مقایسه با سایر روشهای برازش روی دو دسته از اطلاعات مورد آزمایش قرار گرفته است. اولی اطلاعات مربوط به یک سیستم شهری بزرگ و دیگری یک سیستم گسترده روستایی، این تستها در مجموع برای تجزیه و تحلیل روش جدید و کامل نمودن اطلاعات مربوط به آن با انجام مقایسه نسبت به سایر روشهای برازش می‌باشد.

در این آزمایشها خطا به صورت قدر مطلق متوسط خطاها که با درصدی از متوسط

رشدبار تعیین می‌گردد به فرم زیر تعریف می‌شود:

$$\left(\left(\text{سال ابتدا}_{n} L - \text{سال افق}_{n} L(n\right)\right) \Big/ \sum_{n=1}^{N} \left(\text{سال افق}_{n} L(n - \text{سال افق}_{n} \hat{L}(n\right)\right) \Big| \times 100$$

که در آن $L(n,t)$ بار واقعی سلول n در سال t و $\hat{L}(n,t)$ مقدار پیش‌بینی شده برای آن است.

وقتی که هر سلول یا بلوک برازش می‌شود، داده‌ها چک شده و تعداد داده‌های مربوط به سوابق‌بار براساس رابطه تجربی (۱) محاسبه می‌شوند. جدول ۱ خطاهای پیش‌بینی ناشی از این روش و سایر متدهای برازش را با تست روی هر دو سیستم نشان می‌دهد که روش جدید واضحاً بهترین نتایج را ارائه داده است.

« جدول ۱ »

مقایسه خطا و زمان انجام محاسبات روشهای مختلف با روش ترکیبی جدید

سیستم (ب)		سیستم (الف)		
زمان	خطا	زمان	خطا	نام روش
۶	۲۲	۱۰	۲۷	رگرسیون ناحیه به ناحیه
۱۹	۱۷	۳۱	۲۱	روش L.T.C
۸	۱۵	۱۴	۱۹	اعمال VAI در رگرسیون
۱۶	۱۷	۳۰	۲۵	استفاده از گروه‌بندی
۱۸۵	۱۲	۳۸۲	۱۴	ترکیب روشهای فوق

نتایج آزمایش روی هر دو سیستم بطور دقیق‌تری نیز بررسی شده تا میزان بهبود دقت و روشهای رسیدن به این هدف مشخص شوند.

جدول ۲ دقت موجود در روش جدید را نسبت به سایر روشهای برازش منحنی با در نظرگرفتن طولهای مختلف برای سوابق‌بار نشان می‌دهد.

در نهایت مزایای روش جدید را می‌توان در سه بند زیر خلاصه نمود:

۱ ـ روش جدید قادر است بار را در فیدرهایی پیش‌بینی کند که در حال حاضر وجود ندارند. هر چند که دارای خطای بیشتر (۲۸٪) نسبت به زمانی هستیم که سوابق‌بار طولانی وجود دارد. (۱۰٪)

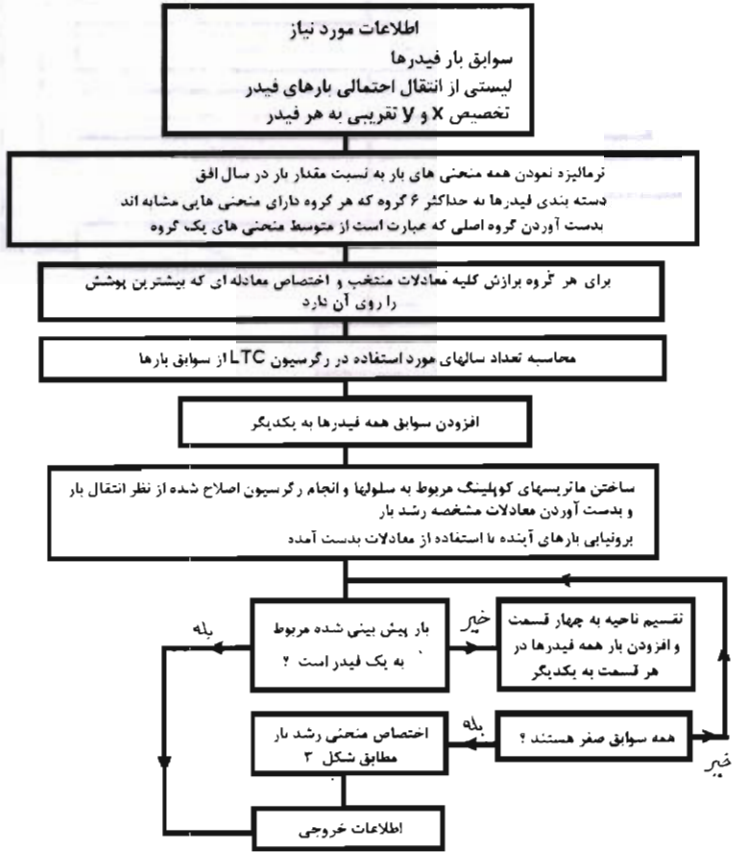
۲ ـ روش جدید این توانایی را دارد که نسبت به روشهای قبل پیش‌بینی دقیق‌تری را برای بارهایی که سابقه کمی دارند انجام دهد.

۳ ـ این روش به انتقال‌بار حساس نیست.

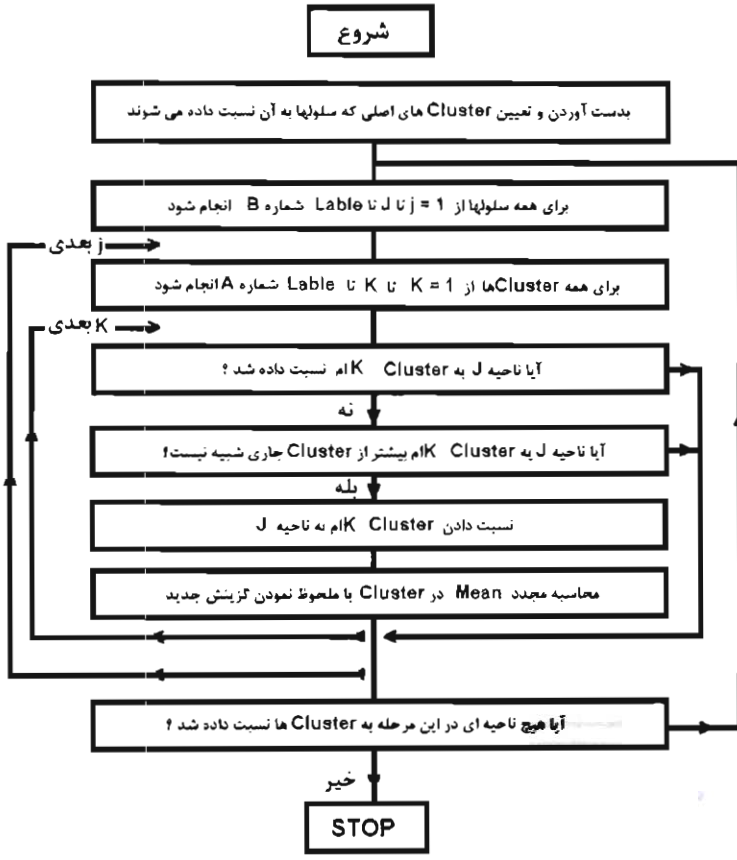
« جدول ۲ »

مقایسه دقت روش جدید با روش رگرسیون معمولی با در نظر گرفتن سوابق‌بار با طولهای مختلف

طول سوابق بارها	خطای روش جدید	خطای روش معمول
بیش از ۱۰ سال سابقه	۸	۱۲
۴ تا ۹ سال سابقه	۱۰	۱۳
۱ تا ۳ سال سابقه	۱۲	۱۸
بدون سابقه موجود	۲۸	۵۹



ضمیمه الف : الگوریتم روش بهبود یافته



ضمیمه ب : الگوریتم روش گروه‌بندی K-means

$$a_o + a_1 t + a_2 t^2$$
$$a_o + a_1 (\log t) + a_2 (\log t)^2$$
$$a_o + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$
$$a_o + a_1 \log t + a_2 (\log t)^2 + a_3 (\log t)^3$$
$$a_o + a_1/t + a_2/t^2 + a_3/t^3$$
$$a_o + a_1/(\log t) + a_2/(\log t)^2 + a_3/(\log t)^3$$
$$a_o + a_1/t + a_2/t^2$$
$$a_o + a_1/(\log t) + a_2/(\log t)^2$$
$$a_o + a_1 t^{1.2} + a_2 t + a_3 t^{1.5}$$

ضمیمه پ : معادلات مناسب برای برازش منحنی روی سوابق‌بار مطابق با استاندارد IEEE

مراجع :

1. H.L.Willis and J.E.D Northcote-Green, "Spatial Flectric Lond Forecasting: A Tutorial Review, "Proccedings lf the IEEE. Feb. 1981.
   P. 232
2. V.F.Wilreker. et al., "Spatially Regressnc Small Arca Flectric lond Forecassing. "in Proc. Joint Automatic Control Pllterecce 1977.
   (Sanfrancisco. Ca July 1977).
3. E.E. Monge. et al., "Electric Lands Can Be Forec for Dist Planning" in proc. American Power Conferewa 1977).
4. H.L.Willis, J. Gregg, and Y. Chambers. "Spatial llad Forecastin for System Plannig", in Proc. American Power Fonference
   April 1977).
5. "Research into Load Forecasting and Distribution Pleasing, Power Research Institute, Pala Alto.CA. FPRI Rep. Dec 1979.
6. "Final Report on CEA Project 0290186". Canadian Electric Association, 1982.
7. H.L.Willis and J.E.D. Northcote-Green, "A Hierarchical Recursive Metbod for Substantially lmproving the Trending of Area load Forecasts. IEEE Trans. PAS.P. 1976, June 1982.
8. H.L. Willis, et al., "Forecasting Distribution Loads Using Curve Shape Clustering. "IEEE Trans. PAS.P. 893.
9. H.L.Willis and H.N.Tram, "A Cluster Based VA1 Metbod for Distribution Planning, "Presented at the IEEE Winter Power Mecting. January 1983. New York.
10. H.L.Willis, et al., "Load Transfer Coupling Regression Curve Fitting For Distribrtion Load Forecastion, "Presented at the IEEE Summer Power Meeting, July 1983, Los Angeles.