



## تحلیل اعوجاج هارمونیک در سیستم های توزیع

حسین عسکریان ایبانه<sup>\*\*</sup> احمد مختاری لاله<sup>\*</sup> مهندس الله مرادی<sup>+</sup>

مهندس سجادی<sup>++</sup> مهندس احمدیان<sup>++</sup>

**واژه های کلیدی:** کیفیت برق، اعوجاج هارمونیک، سیستم های توزیع

### چکیده

با بزرگتر شدن سیستم های الکتریکی و افزایش بارهای غیرخطی لازم است که شکل موجهای ولتاژ و جریان در نقاط PCC، هم بصورت تک به تک و هم در قالب سیستم با هم مورد ارزیابی قرار گیرند. در این مقاله سعی شده است شاخصهای هارمونیک سیستم توزیع که دارای گستردگی خاصی می باشد، مورد تحلیل قرار گیرد. با استفاده از این شاخصها، می توانیم از نظر هارمونیک به سیستم نیز دید پیدا کنیم. در ادامه به نتایج حاصل از پروژه ای که در ایالات متحده انجام شده است، نگاهی اجمالی خواهیم انداخت. [1]

### مقدمه

با گذشت زمان بر میزان اعوجاج هارمونیک در سیستم قدرت افزوده می شود. علت این امر بخاطر افزایش استفاده از وسایل غیرخطی و نیز بکارگیری خازنها می باشد. در این میان وسایل الکترونیک قدرت به خاطر انعطاف پذیری و نیز بازده خوب آنها، به میزان زیادی مورد استفاده قرار می گیرند. این وسایل از یک طرف خود تولیدکننده هارمونیک بوده که باعث اعوجاج شکل موج ولتاژ می شود و از طرف دیگر نسبت به سایر وسایل قدیمی موجود در سیستم قدرت به این اعوجاجها حساس می باشند.

\* دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، \*\* دانشگاه زنجان، + شرکت توزیع برق منطقه ای زنجان، ++ برق منطقه ای تهران،

بر این اساس، میزان کیفیت برق تحویلی به مشتریها بسیار مهم می‌باشد. در اوایل، کیفیت برق با شاخصهای مانند SAIFI و CAIDI ارزیابی می‌شد. این شاخصها بر اساس قطعی‌های که در سیستم رخ می‌داد بیان می‌شد. می‌شد. ولی با افزایش وسایل الکترونیکی، دیگر این شاخصها نمی‌توانند معیار مناسبی برای کیفیت برق باشند. چرا که در آنها از اعوجاج هارمونیکی خبری نیست. این مقاله به تعریف شاخصهای هارمونیکی برای سیستم توزیع می‌پردازد که امید است در صنعت توزیع ایران نیز این شاخصها مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه اول به روشهای نمونه‌برداری خواهیم پرداخت. انتخاب فیدر برای مونیتورینگ از جمله مواردی است که در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرد. و بعد به مشخصه‌بندی اندازه‌گیری‌ها خواهیم پرداخت. ارایه انواع نمودارها در این بخش خواهد بود. تعاریف شاخصها بخش بعدی را تشکیل خواهد داد. در ادامه شاخص دیگری بنام فاکتور پیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش پایانی نیز نگاهی مختصر به پروژه در حال انجام کیفیت توان در شمالغرب تهران خواهد انداخت..

## 2- روشهای اندازه‌گیری

برای تخمین اعوجاج هارمونیکی باید از شکل موجهای ولتاژ و جریان در بازه‌های مشخص نمونه‌برداری کرد. در حال حاضر، دستگاههای اندازه‌گیری دارای این قابلیت می‌باشند که می‌توانند در محل اندازه‌گیری نصب شده و به مدت مشخصی به ذخیره کردن داده‌ها بپردازند. در بیشتر موارد این داده‌ها شامل دامنه و زاویه مولفه‌های هارمونیکی و نیز مقدار THD می‌باشد.

گام اول در اندازه‌گیری انتخاب محل اندازه‌گیری می‌باشد. سیستم توزیع به چندین بخش تقسیم می‌گردد که هر بخش دارای یک نقطه اندازه‌گیری بوده و دارای kVA مشخصی می‌باشد. با توجه به بزرگی سیستم توزیع نمی‌توان در تمامی نقاط مونیتورینگ انجام داد. بهمین خاطر لازم است که از این میان و با توجه به تعداد دستگاههای اندازه‌گیری، تعدادی باس برای اندازه‌گیری انتخاب گردد [2] از جمله این معیارها می‌توان به میزان بار، تعداد مصرف‌کننده‌ها، تنوع بارها، نامتعادلی و ... اشاره کرد.

بهترین مدت طول اندازه‌گیری، با توجه به تعداد محدود دستگاههای اندازه‌گیری و نیز زیادی باسها، یک هفته در هر فصل و چهار هفته در سال و با فاصله‌های زمانی 15 دقیقه پیشنهاد می‌گردد که تقریباً می‌تواند تمام شرایط کاری یک شبکه را شامل گردد.

## 3- مشخصه‌بندی داده‌ها

برای جمع‌بندی داده‌ها، نیازمند به استفاده از شاخصها می‌باشیم. اساسی‌ترین شاخصها در این مورد، اعوجاج هارمونیکی کل می‌باشد که بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_L} \quad (1)$$

نکته‌ای که در این شاخص نسبت به تعریف قدیمی THD مورد توجه قرار می‌گیرد مخرج کسر می‌باشد. در تعریف جدید THD مخرج  $V_1$  (مولفه اصلی) بوده که این امر به این خاطر که  $V_1$  می‌توانست دارای مقادیر متفاوت باشد، (حتی مقدار صفر) دیگر مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. بجای آن  $V_L$  که ماکزیمم ولتاژ نقطه اندازه‌گیری در طول مونیتورینگ حاصل شده است، قرار می‌گیرد.

در شکل یک، روند تغییرات THD در طول یک هفته برای یکی از باسهای مورد مونتورینگ در پروژه EPRI نشان داده شده است. این شکل برای تحلیل تغییرات THD زیاد مفید نمی‌باشد. یک روش مفید برای جمع‌بندی سری‌های زمانی THD استفاده از هیستوگرام می‌باشد. شکل 2 - هیستوگرام یک روند تغییرات THD می‌باشد. با توجه به این هیستوگرام مشخص می‌شود که چه تعدادی از اندازه‌گیری‌ها دارای چه مقدار THD می‌باشد. برای مثال 250 دفعه از کل نمونه‌برداری‌ها دارای THD، 2/6٪ می‌باشد.

یکی از محاسباتی که می‌توانیم از روی توزیع (هیستوگرام) بدست آوریم توزیع تجمعی می‌باشد. این امر بصورت خطی، در شکل 2 - مشخص شده است. شکل 3 - بطور واضح توزیع تجمعی هیستوگرام شکل 2 - را نشان می‌دهد. در این شکل نیز بصوت گرافیکی چگونگی محاسبه شاخص CP95 نشان داده شده است. عددی که برای این شاخص بدست می‌آید نشان می‌دهد که در 95٪ اندازه‌گیری‌ها میزان THD از 3/17٪ کوچکتر یا مساوی می‌باشد. این مقدار در مقایسه با مقدار ماکزیمم THD دارای حساسیت کمتری نسبت به اندازه‌گیری‌های غلط می‌باشد [1].

با توجه به اینکه تعداد محل اندازه‌گیری به یکی محدود نیست بهمین خاطر ما برای هر سایت چنین شکلی را خواهیم داشت. که این امر منجر به تولید مقادیر مختلف CP95 می‌گردد. شکل 4 - هیستوگرام CP95 مربوط به 54 سایت اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. که با این شکل ما می‌توانیم تصویری کلی از دیدگاه هارمونیک از کل شبکه توزیع بدست آوریم.

#### 4- تعریف شاخصهای هارمونیک برای سیستم توزیع:

همان طور که دیدید حال ما با تعداد زیادی از داده‌ها که از نقاط مختلف سیستم بدست آمده است طرف هستیم. عمدتاً ویژگی که این نقاط داخل سیستم دارند این است که کاملاً از هم مستقل نمی‌باشند و تا حدود زیادی بهم وابسته هستند. بهمین خاطر تحلیل مجزای این نقاط به ما در بررسی ساختار کلی سیستم زیاد کمک نخواهد کرد. بهمین خاطر ما نیازمند شاخصهای هستیم که کل سیستم را با هم مورد تحلیل قرار دهد. در زیر به تعریف سه‌تا از شاخصهای توزیع هارمونیک خواهیم پرداخت:

#### شاخص STHD95

#### (System Total Harmonic Distortion CP95)

این شاخص از روی توزیع وزنی مقادیر CP95 بخشهای مختلف سیستم توزیع بدست می‌آید که برابر CP95 دوباره بخشهای مختلف سیستم می‌باشد. تعریف ریاضی این شاخص بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\sum_{i=-\infty}^{CP95_s} f_s(x_i)}{\sum_{i=-\infty}^{\infty} f_s(x_i)} = 0.95 \quad (2)$$

$$\frac{\sum_{s=-\infty}^{STHD95} f_i(CP95_s) \times L_s}{\sum_{s=-\infty}^{\infty} f_i(CP95_s) \times L_s} = 0.95 \quad (3)$$

که در آن :

$s$  : شماره یک تکه از مدار،  $x_i$  مقدار  $i$  ام THD اندازه‌گیری شده،  $L_s$  : مقدار kVA وصل شده به تکه  $s$  ام  
 $f_s(x_i)$  : تابع توزیع احتمال برای مقادیر THD تکه  $s$  ام، CP95 : مقدار احتمال تجمعی 95%  
 $f_i(CP95_s)$  : تابع توزیع احتمال CP95 ، THD تکه‌های تکی با هم

در آخر فلوچارت‌های طریقه محاسبه STHD95 آورده شده است. مقدار CP95 داده‌های THD توزیع، از مقادیر بسیار بزرگ اعوجاج صرفه‌نظر می‌کند. بدین طریق، 5% از داده‌ها می‌تواند از مقدار مجاز تجاوز کنند. بر اساس استاندارد IEEE 519 مقدار THD می‌تواند بمدت یک ساعت در هر شبانه‌روز از مقدار مجاز تجاوز کند. که تقریباً 5 درصد کل زمان اندازه‌گیری می‌شود. بدین ترتیب STHD95 محدوده مجاز قابل قبول بر اساس استاندارد IEEE را برآورده می‌کند.

شکل 5 نمونه‌ای از خروجی این محاسبات را نشان می‌دهد. در این شکل توزیع مقدار 95 درصدی THD ولتاژ در سایتهای مختلف را نشان می‌دهد. مقدار میانگین CP95 برای THD ولتاژ 2/18% می‌باشد. محاسبه CP95 هیستوگرام به ما STHD95 را ارایه می‌دهد که برابر 4/03% می‌باشد. این شکل همچنین تعداد سایتهای را که از مقدار مجاز استاندارد IEEE 519 تجاوز کرده است را نشان می‌دهد. با توجه با این استاندارد 13/3% از سایتهای از مقدار مجاز 5% تجاوز کرده‌اند.

## شاخص SATHD

### (System Average Total Harmonic Distortion)

این شاخص براساس مقدار میانگین توزیع مقادیر اندازه‌گیری شده THD بجای CP95 برای هر تکه از مدار می‌باشد. SATHD میانگین THD در طول پریود اندازه‌گیری می‌باشد که با تقسیم بر کل kVA آن تکه از مدار، بصورت نرمال درآمده است. این شاخص از لحاظ ریاضی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$SATHD = \frac{\sum_{s=1}^k L_s \times MEANTHD_s}{L_T} \quad (4)$$

$$MEANTHD_s = \frac{\sum_{i=1}^{N_{MW}} THD_i}{N_{MW}} \quad (5)$$

که در آن :

$s$  : شماره تکه مدار،  $k$  : تعداد کل تکه‌های مدار ،  $L_s$  : مقدار kVA وصل شده به تکه  $s$  ام ،  $L_T$  : مقدار کل kVA وصل شده به سیستم،  $i$  : شماره اندازه‌گیری،  $THD_i$  : مقدار اعوجاج هارمونیک هر اندازه‌گیری،  $N_{MW}$  : تعداد کل اندازه‌گیری‌های انجام شده برای هر تکه،  $MEANTHD_s$  : میانگین آماری مقادیر THD حاصل از تمام اندازه‌گیری‌های تکه  $s$  ام

این شاخص دو میانگین را نشان می‌دهد. یکی از لحاظ زمانی و دیگر از لحاظ مکانی. بطور کلی، SATHD میانگین مقادیر میانگین THD هر سایت را نشان می‌دهد.

همانطور که از روابط دیده می‌شود شاخصهای اعوجاج هارمونیکی توسط kVA وزندار شده است. ما می‌توانستیم برای محاسبه شاخصها از وزنهاى متفاوت دیگری نیز استفاده بکنیم. این وزنها می‌تواند براساس تعداد مصرف‌کنندها، میزان بار مصرفی، حساسیت بارها و غیره مطرح گردد. که در این جا برای راحتی کار فقط از یک وزن (میزان توان مصرفی) استفاده شده است.

شکل - 6 یک خروجی نمونه از این محاسبات را برای یک شبکه نمونه را نشان می‌دهد. در این شکل لازم به گفتن می‌باشد که، ارتفاع ستونها در این هیستوگرام به صورت درصدی از کل سایتها می‌باشد. برای مثال می‌توان گفت که 18 درصد از سایتها دارای میانگین 1/2 درصد THD می‌باشد. مقادیر میانگین و انحراف معیار را نیز می‌توان در این شکل دید.

### شاخص SAETHDRI<sub>THD</sub>

(System Average Excessive Total Harmonic Distortion Ratio Index<sub>THD Level</sub>)

محاسبه اینکه T چه مدت زمانی سیستم، مقدار خاصی از اعوجاج را شامل بوده است، کاری دشوار می‌باشد. چرا که این امر مستلزم آن است که ما بصورت پیوسته از سیستم نمونه‌برداری کنیم. ولی برای اینکه بتوانیم تقریبی صحیح از زمان داشته باشیم می‌توانیم از هیستوگرام شکل 2 استفاده بکنیم. بطوری که با تقسیم تعداد نمونه‌های که دارای THD مشخصی هستند بر کل نمونه‌برداری‌ها، می‌توانیم بصورت تقریبی به مدت زمانی که یک THD خاص در سیستم بوده است، را بدست آوریم.

شاخص SAETHDRI<sub>THD</sub> تعداد اندازه‌گیری‌های را که از یک THD خاص بالاتر بوده است را نشان می‌دهد. برای هر تکه از سیستم توزیع این تعداد با تقسیم بر کل تعداد اندازه‌گیری‌ها نرمال می‌گردد. میانگین سیستمی این تعداد با ضرب در میزان kVA هر بخش از سیستم و تقسیم بر کل kVA شبکه بدست می‌آید.

SAETHDRI<sub>THD</sub> به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$SAETHDRI_{THD} = \frac{\sum_{s=1}^k L_s \times \left( \frac{N_{THD_s}}{N_{MW_s}} \right)}{L_T} \quad (6)$$

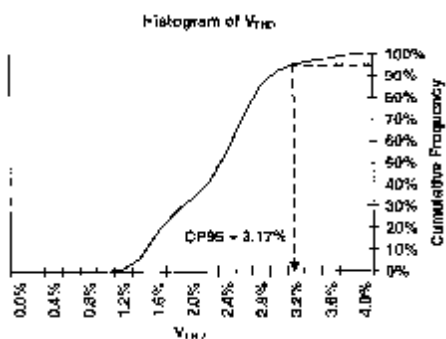
که در آن:

$s$ : شماره تکه مدار،  $k$ : تعداد کل تکه‌های مدار،  $L_s$ : مقدار kVA وصل شده به تکه  $s$  ام،  $L_T$ : مقدار کل kVA وصل شده به سیستم،  $i$ : شماره اندازه‌گیری،  $THD_i$ : مقدار اعوجاج هارمونیکی اندازه‌گیری  $i$  ام  
 $N_{THD_s}$ : تعداد کل اندازه‌گیری‌های انجام شده برای هر تکه،  $N_{MW_s}$ : تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر تکه که از یک مقدار خاص تجاوز کرده است.

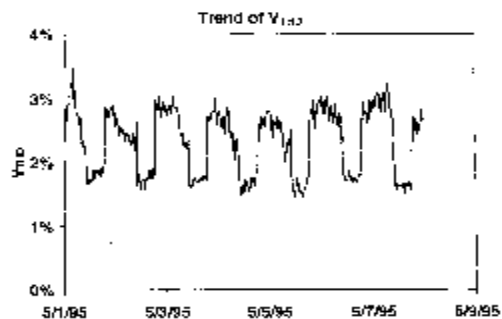
### 5- نتیجه‌گیری و پیشنهاد ادامه کار

در این مقاله سعی شد که سیستم قدرت از لحاظ هارمونیکی مورد تحلیل قرار گیرد. با انجام دادن اینگونه تحلیلها می‌توانیم به یک داده‌های آماری برسیم. شاخصهای آماری که در اینجا بیان شده است هر کدام می‌تواند بصورت محدودیتی برای سیستمهای قدرت اعمال گردد. شاخصهای STHD95 ، SATHD و SAETHDRI هر کدام از مقادیر THD بدست می‌آید بیان کننده چگونگی رفتار سیستم در طول مدت اندازه‌گیری می‌باشد که طبیعت سیستم را نشان می‌دهد. در ادامه شاخص دیگری بنام فاکتور پیک معرفی شد. با توجه به این شاخص ما می‌توانیم تاثیر زاویه هارمونیکی را در المانهای مختلف الکتریکی را ببینیم. بطوری که این شاخص در عمر عناصر تاثیر فراوانی دارد. که می‌تواند بعنوان یک محدودیت در سیستمهای توزیع اعمال گردد. در آخر، با توجه به این شاخصها می‌توان سیستمهای مختلف را با هم از لحاظ هارمونیکی مقایسه کرد.

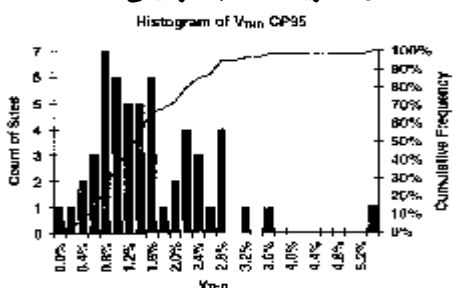
در حال حاضر این کار در شرکت توزیع شمالغرب تهران در حال انجام می‌باشد. در این پروژه سعی خواهد شد شاخصهای کیفیت توان و بخصوص شاخصهای هارمونیکی مورد مطالعه قرار گیرد. در این پروژه از دو دستگاه اندازه‌گیری استفاده خواهد شد. بطوری که از میان فیدرهای خروجی، تعدادی انتخاب شده و برای یک هفته مورد نمونه‌برداری قرار می‌گیرند. در مرحله اول انتخاب فیدرها بر اساس تنوع بار، میزان مصرف، حساسیت بار و ... می‌باشد. که سعی خواهد شد که فیدرهای خروجی مورد مطالعه در هر فصل از سال مونیتورینگ شوند.



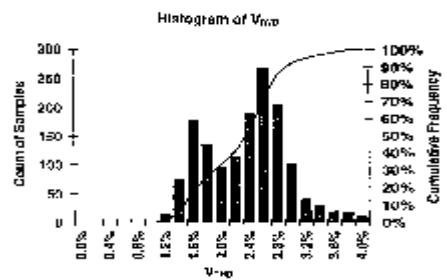
شکل 3: طریقه محاسبه گرافیکی CP95



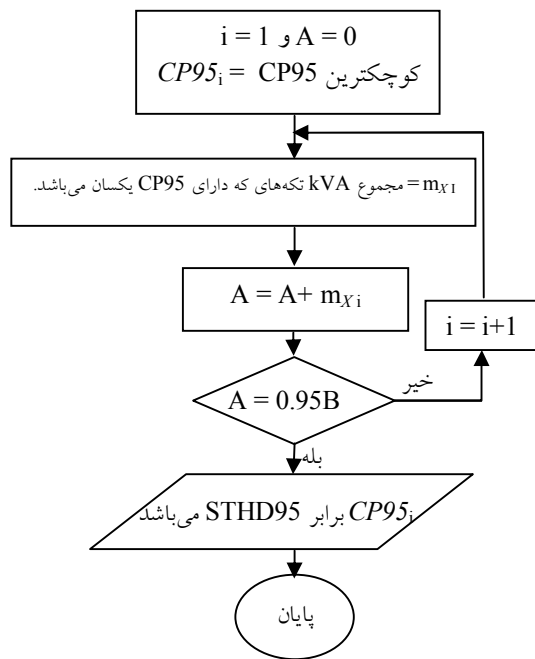
شکل 1. روند تغییرات THD در طول یک هفته



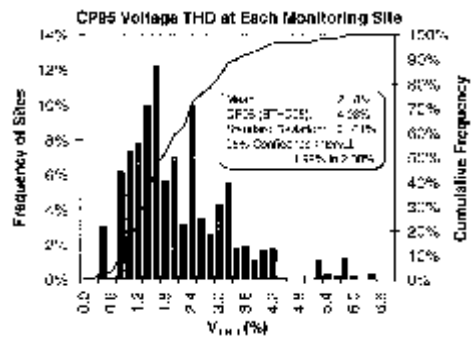
شکل 4: هیستوگرام CP95 54 سایت



شکل 2. هیستوگرام تغییرات THD

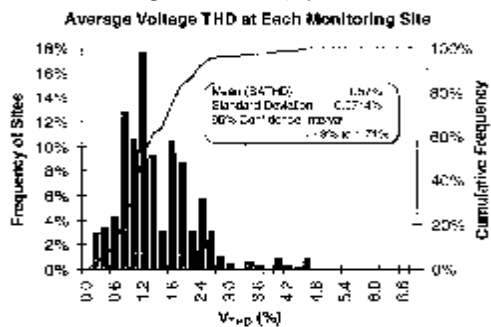


فلو چارت محاسبه STHD95

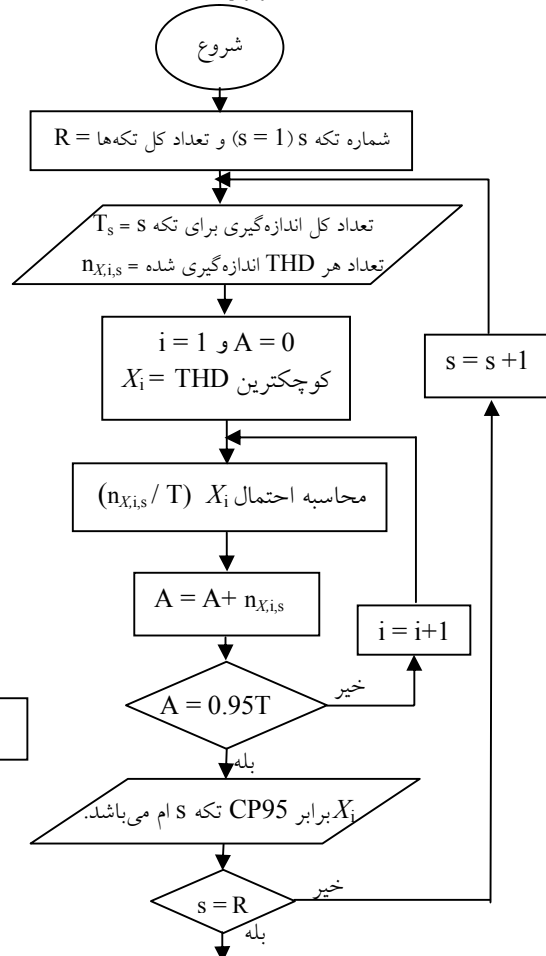
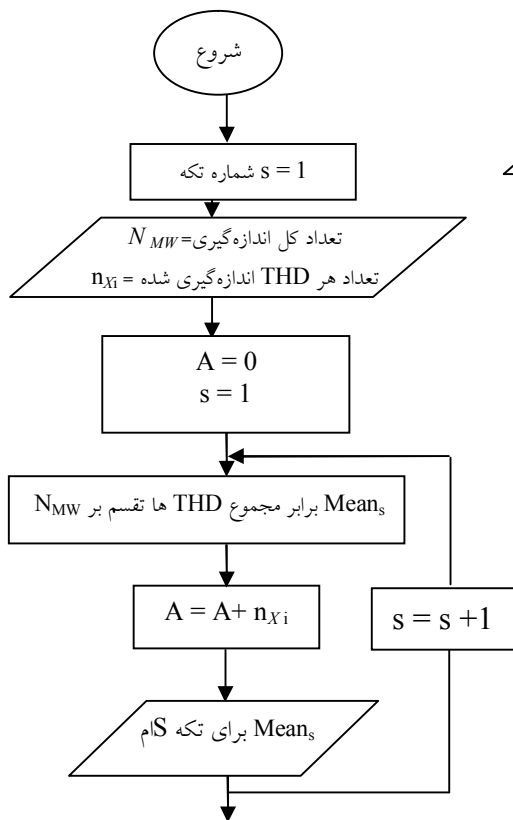


شکل 5: هیستوگرام CP95 و STHD95 کل شبکه

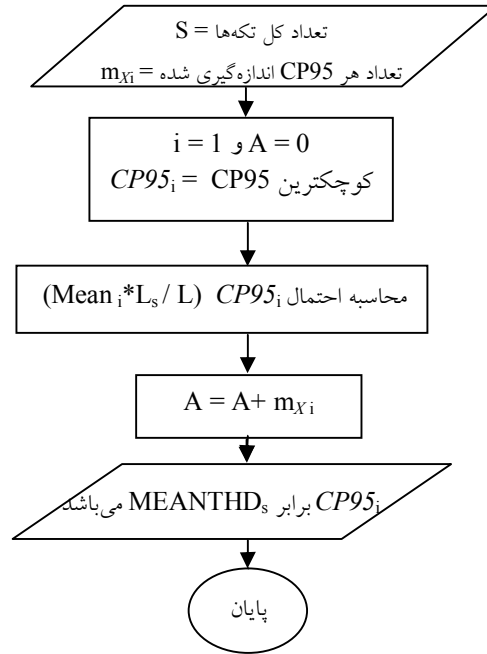
شکل 6: هیستوگرام میانگین THD شبکه



شروع



## فلوچارت محاسبه SATHD



## مراجع

- [1] D. Daniel Sabin , Daniel L. Brooks and Ashok Sundaram, "Indices for Assessing Harmonic Distortion from Power Quality Measurements: Definitions and Benchmark Data" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, no.1, January 1998, pp. 340-347.
- [2] IEEE Std. 1159-1992 *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (ANSI)*.
- [3] Electric Power Research Institute, *An Assessment of Distribution System Power Quality, Volume 2: Statistical Summary Report*. Palo Alto, EPRI TR-106294-V2, 1996.
- [4] G. Heydt and W. T. Jewell, "Pitfalls of Electric Power Quality Indices," IEEE PE-193-PWRD-0-01-1997, Presented at 1997 IEEE PES WM in New York, New York.
- [5] E. W. Gunther and H. Mehta, "A Survey of Distribution System PowerQuality - Preliminary Results," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, no. 1, January 1995, pp. 322-329.
- [6] D. L. Brooks, R. C. Dugan, M. Waclawiak, A. Sundaram. "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance," *IEEE Trans. Power Delivery*, PE-920-PWRD-1-04-1997.