

# کنترل میزان هارمونیک موجود در سیستم‌های قدرت با استفاده از قیمت‌گذاری عادلانه‌ی هارمونیک

امین سعادت<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد؛ رحمت‌الله هوشمند<sup>۲</sup>، استاد؛ مهدی تدین<sup>۳</sup>، دانشجوی دکتری؛ آرش کیومرثی<sup>۴</sup>، دانشیار؛ مهدی ترابیان<sup>۵</sup>، دکتری

- ۱- دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - amin.saadat1390@yahoo.com  
 ۲- دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - hooshmand\_r@eng.ui.ac.ir  
 ۳- دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - mahdi.tadayon@gmail.com  
 ۴- دانشکده فنی مهندسی - گروه مهندسی برق - دانشگاه اصفهان - اصفهان - ایران - kiyoumars@eng.ui.ac.ir  
 ۵- شرکت برق منطقه‌ای اصفهان - دفتر تحقیقات و استانداردها - اصفهان - ایران - torabian\_m20@yahoo.com

**چکیده:** افزایش آلودگی‌های هارمونیک یکی از دغدغه‌های موجود در سیستم‌های قدرت بوده که بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی هزینه‌ی زیاد جبران‌سازی، امکان جبران‌سازی در سرتاسر شبکه را از بین برده است. با توجه به تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، این امکان به وجود آمده است که هزینه‌ی جبران‌سازی از طریق مشترکین آلوده‌کننده تأمین شود. در این مقاله، روشی جدید برای کنترل هارمونیک شبکه با استفاده از قیمت‌گذاری هارمونیک ارائه شده است. مبنای قیمت‌گذاری در این روش، تعیین سهم هارمونیک در ولتاژ نقطه‌ی اتصال مشترک می‌باشد. همچنین، اندیسی جدید به منظور تعیین سهم هارمونیک مشترک (مصرف‌کننده) و شبکه بالادست در آلودگی هارمونیک نقطه‌ی اتصال مشترک ارائه شده است. با استفاده از این اندیس، می‌توان برداشت صحیحی از سهم مشترک و شبکه در کلیه‌ی مرتبه‌های هارمونیک غالب به دست آورد. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه استاندارد ۱۴ باس IEEE بیان‌گر کارایی روش پیشنهادی برای قیمت‌گذاری بر مبنای تعیین سهم عادلانه مشترک و شبکه می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تعیین عادلانه سهم هارمونیک، می‌توان مشترک را به کاهش و یا کنترل هارمونیک تشویق کرد. در غیراین صورت از جمع اعتبارات ناشی از جریمه‌ی مشترک، می‌توان فیلتر هارمونیک در محل مورد نظر نصب نمود و نسبت به کنترل هارمونیک اقدام نمود.

**واژه‌های کلیدی:** هارمونیک، تعیین سهم هارمونیک، قیمت‌گذاری هارمونیک، سیستم‌های قدرت تجدیدساختاریافته، بازار برق

## Harmonic Control in Power System Using of Harmonic Pricing

Amin Saadat<sup>1</sup>, MSc; Rahmat-Allah Hooshmand<sup>2</sup>, Profesor; Mahdi Tadayon<sup>3</sup>, PhD student; Arash Kiyoumars<sup>4</sup>, Associate Professor; Mahdi Torabian<sup>5</sup>, PhD

- 1- Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: amin.saadat1390@yahoo.com  
 2- Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: hooshmand\_r@eng.ui.ac.ir  
 3- Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: mahdi.tadayon@gmail.com  
 4- Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, Email: kiyoumars@eng.ui.ac.ir  
 5- Isfahan Regional Electric Company, Research unit and standards, Isfahan, Iran, Email: torabian\_m20@yahoo.com

**Abstract:** Increasing harmonic contamination is one of the concerns in power systems that has been more considered. On the other hand, the high cost of compensation can eliminate the possibility of compensation across the network. Regarding the restructuring of power systems, it is possible to provide the compensation cost by contaminating subscribers. In this paper, a new method for controlling the network harmonic level is presented using harmonic pricing. Determining the fair harmonic contribution at the point of common coupling voltage is the base of pricing method. In addition, a new index has been proposed to determine the harmonic contribution of the customer and utility to the harmonic contamination of the point of common coupling. By using this index, an accurate impression of the customer and utility contribution in all of the dominant harmonic levels is obtained. The simulation results on the IEEE 14-bus standard network illustrate the effectiveness of the proposed method for pricing based on fair contribution of customer and network. Also, the results show that by justly determining the harmonic contribution, the customers can be encouraged to reduce or control their harmonic level. Otherwise, by aggregating the penalty fees, harmonic filters can be installed at the desired location to control the network harmonic control.

**Keywords:** Harmonic, harmonic contribution, harmonic pricing, restructured power systems, power market.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۳۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۵ و ۱۳۹۷/۰۷/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۰۷

نام نویسنده مسئول: رحمت‌الله هوشمند

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

## ۱- مقدمه

برای سنجش کیفیت عمل کرد هر سیستمی معیارهایی وجود دارد. این معیارها در سیستم‌های قدرت تحت عنوان معیارهای کیفیت توان تعریف می‌شوند. یکی از معیارهای کیفیت توان، سینوسی بودن شکل موج ولتاژ شبکه می‌باشد. مهم‌ترین عامل اعوجاج شکل موج ولتاژ، هارمونیک‌ها می‌باشند که منشأ تولید آن‌ها بارهای غیرخطی و ادوات الکترونیک قدرت می‌باشد [۱]. این بارها با وجود سینوسی بودن ولتاژ، جریان هارمونیکی مصرف می‌کنند و باعث انتشار هارمونیک در شبکه می‌شوند. هارمونیک‌ها می‌توانند سبب ایجاد مشکلاتی در شبکه‌های قدرت گردند، که از آن جمله می‌توان به گرم شدن بیش از حد هسته ماشین‌های گردان الکتریکی، نوسانات گذرا، فلیکر و اضافه بار شدن فیلترها اشاره کرد [۲]. بررسی‌های اخیر سیستم‌های قدرت گویای این واقعیت است که اعوجاج هارمونیک قابل ملاحظه‌ای در شکل موج ولتاژ و جریان وجود دارد [۳]. نصب فیلترهای هارمونیک در نقاط آلوده از انتشار هارمونیک‌ها در شبکه جلوگیری می‌کند. اما هزینه‌ی زیاد فیلترها این امکان را به متولی شبکه نمی‌دهد که در همه‌ی نقاط مورد نیاز، اقدام به نصب فیلتر کند. با تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، این امکان وجود دارد که با قیمت گذاری هارمونیک، اعتبارات لازم برای نصب فیلتر از خود مشترکین دریافت شود. آن چه در این روند اهمیت دارد، شفافیت و عادلانه بودن روند قیمت گذاری می‌باشد. با توجه به این که ولتاژ شبکه در حالت عادی عاری از هارمونیک نیست، بارهای خطی نیز ممکن است دارای جریان هارمونیک باشند. حال این که مقصر جریان هارمونیک تولیدی، مشترک نمی‌باشد و در این حالت نایبستی هزینه‌ای از مشترک دریافت شود. تشخیص این مسئله با استفاده از تعیین سهم هارمونیک ممکن می‌باشد. بنابراین لازم است که قبل از قیمت گذاری، سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال (PCC) تعیین شود. تاکنون کارهای مختلفی برای تعیین سهم هارمونیک در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه صورت گرفته است. کلیه‌ی روش‌های تعیین سهم به دو دسته‌ی هجومی<sup>۲</sup> [۴-۷] و غیرهجومی<sup>۲</sup> [۸-۱۷] تقسیم‌بندی می‌شوند. کلیه‌ی روش‌های هجومی از اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در قبل و بعد از ایجاد یک اغتشاش دستی برای تعیین سهم استفاده می‌کنند. تنها تفاوت در مراجعی که از روش هجومی استفاده کرده‌اند، در نوع اغتشاش وارد شده می‌باشد. اما در روش‌های غیرهجومی هیچ‌گونه اغتشاش دستی به شبکه وارد نمی‌شود و از اندازه‌گیری‌های معمول شبکه استفاده می‌شود. اگر چه دقت کار در روش‌های هجومی بیش تر است، اما این روش ممکن است باعث آسیب‌رسانی به تجهیزات شبکه شود. بنابراین بیشتر مطالعات بر روی روش‌های غیرهجومی متمرکز شده است. از مهم‌ترین روش‌های غیرهجومی در تعیین سهم هارمونیک، می‌توان به تحلیل شبکه‌های عصبی [۱۰-۸]، تحلیل مؤلفه‌های مستقل [۱۳-۱۱] و هم‌بستگی اطلاعات [۱۶-۱۴] اشاره نمود.

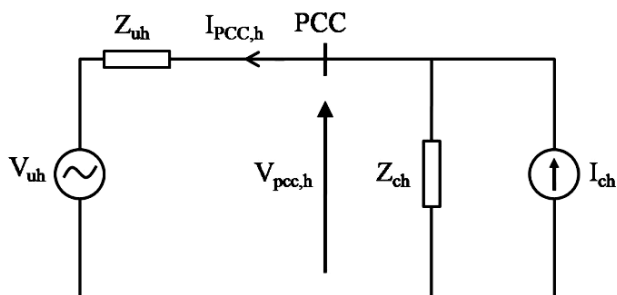
در تحلیل شبکه‌های عصبی، از آموزش شبکه‌های عصبی برای تعیین سهم هارمونیک در آلودگی جریان نقطه‌ی PCC استفاده می‌شود. در

تحلیل مؤلفه‌های مستقل، یک روش تجزیه و تحلیل سیگنال به منظور تعیین سهم هارمونیک در نقطه‌ی PCC مورد استفاده قرار گرفته است. در روش هم‌بستگی اطلاعات، پس از دسته‌بندی داده‌های اندازه‌گیری شده، بین ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC تخمین خطی زده و با استفاده از رابطه‌ی تخمین زده شده، نسبت به تعیین سهم هارمونیک در آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی PCC اقدام می‌شود.

از طرف دیگر، در بحث قیمت گذاری هارمونیک نیز کارهایی صورت گرفته است که از لحاظ کمی و کیفی در مقایسه با تعیین سهم بسیار کمتر می‌باشد. از روش‌های قیمت گذاری هارمونیک که در مراجع مختلف به آن‌ها اشاره شده است می‌توان به قیمت گذاری براساس اندازه ولتاژ هارمونیک باس‌های شبکه [۱۸]، قیمت گذاری بر مبنای هزینه دیماندرخواستی و هزینه‌ی انرژی مصرفی [۱۹]، قیمت گذاری براساس محاسبات احتمالاتی [۲۰] و استفاده از روش نقطه‌ی خارجی [۲۱] اشاره نمود. در قیمت گذاری با استفاده از اندازه ولتاژ هارمونیک باس‌های شبکه، به حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی به منظور کمینه کردن خسارات ناشی از ولتاژ هارمونیک باس‌ها پرداخته می‌شود. در قیمت گذاری بر مبنای هزینه دیماندرخواستی و انرژی مصرفی، خسارات ناشی از هارمونیک را با استفاده از روابط مختلف بر مبنای دیماندرخواستی و انرژی مصرفی محاسبه می‌شود. در استفاده از روش نقطه‌ی خارجی نیز، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی به منظور کمینه کردن خسارات ناشی از هارمونیک، با استفاده از این الگوریتم حل می‌شود. هیچ کدام از روش‌های قیمت گذاری براساس تعیین سهم نبوده است و این خود نشان از ناعادلانه بودن روش‌های معرفی شده می‌باشد.

در این مقاله، به منظور کنترل هارمونیک شبکه از قیمت گذاری هارمونیک و پاسخ تقاضای هارمونیک مشترکین آلوده کننده استفاده شده است. روش پیشنهادی در قیمت گذاری هارمونیک براساس تعیین سهم عادلانه مشترکین ارائه شده است. تفاوت روند قیمت گذاری پیشنهادی با کارهای قبلی در این است که در این روند از تعیین سهم هارمونیک استفاده شده است که باعث می‌شود جریمه‌ی در نظر گرفته شده برای مشترکین به صورت عادلانه باشد و پاسخ تقاضای مناسب مشترکین را در پی داشته باشد. با عادلانه بودن قیمت گذاری، رضایت مشترکین جلب می‌شود. بر این اساس، مشترکین ملزم به پرداخت جریمه عادلانه تولید هارمونیک خواهند بود تا متولی شبکه اقدام به نصب فیلتر کند. در غیر این صورت، مشترک می‌تواند با نصب فیلتر در محل PCC، سطح هارمونیک خود را کنترل کند. در هر دو حالت، میزان هارمونیک شبکه کاهش می‌یابد و نکته‌ی مهم این است که هزینه‌ی کنترل هارمونیک توسط مشترکین پرداخت شده است. هم چنین، به منظور تحلیل مناسب از سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیک نقطه‌ی اتصال، اندیس جدیدی معرفی شده است که با استفاده از آن می‌توان نسبت به تعیین سهم هارمونیک در کلیه‌ی مرتبه‌های غالب اقدام نمود. به گونه‌ای که سهم هارمونیک مشترک و شبکه در کل آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال به دست آید و با یک نگاه بتوان برداشتی

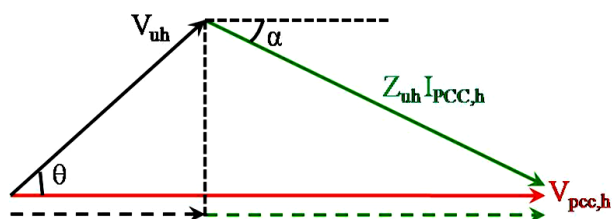
$$V_{pcc,h} = Z_{uh} \cdot I_{pcc,h} + V_{uh} \quad (1)$$



شکل ۱: مدار معادل هارمونیک در نقطه‌ی PCC برای مرتبه‌ی هارمونیک  $h$  ام [۱۷]

$$V_{pcc,h} = Z_{uh} \cdot I_{pcc,h} + V_{uh} \quad (2)$$

متغیرها در این رابطه مطابق با نام‌گذاری‌های شکل ۱ می‌باشد. باتوجه‌به این‌که معادله (۱)، یک رابطه‌ی برداری را نشان می‌دهد، دیاگرام فازوری این رابطه را می‌توان به صورت شکل ۲ در نظر گرفت.



شکل ۲: دیاگرام برداری رابطه‌ی (۱) [۲۳]

مطابق با شکل ۲، سهم شبکه و مشترک در آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال مشترک، از روابط زیر به دست می‌آید.

$$HC_u = \frac{|V_{uh}| \cdot \cos \theta}{|V_{pcc,h}|} \quad (3)$$

$$HC_c = \frac{|Z_{uh} \cdot I_{pcc,h}| \cdot \cos \alpha}{|V_{pcc,h}|} \quad (4)$$

که  $HC_u$  و  $HC_c$  به ترتیب سهم هارمونیک شبکه و مشترک را نشان می‌دهند و سایر متغیرها مطابق با شکل ۲ می‌باشد. بنابراین با معلوم بودن امپدانس‌های هارمونیک و منبع هارمونیک پس‌زمینه، می‌توان سهم شبکه و مشترک را در آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال را جداسازی نمود.

برای تعیین امپدانس هارمونیک، یکی از روش‌های ساده و درعین‌حال با دقت، روش سه‌نقطه‌ای می‌باشد [۱۷]. برای پیاده‌سازی این روش، اندازه‌گیری فازورهای ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC کفایت می‌کند. دیاگرام برداری شکل ۲ را می‌توان به صورت شکل ۳ نیز نمایش داد. در این شکل بالانویس  $i$  به نمونه‌ی اندازه‌گیری نام اشاره دارد.

صحیح از سهم هارمونیک مشترک و شبکه به دست آورد. نتایج شبیه‌سازی توانایی الگوریتم پیشنهادی در قیمت‌گذاری عادلانه برای سهم مشترکین در تولید هارمونیک را به‌خوبی نشان می‌دهد. همچنین، نتایج حاصل از بررسی اندیس معرفی شده نشان می‌دهد که با استفاده از این اندیس می‌توان برداشت صحیحی از سهم هارمونیک مشترک و شبکه در کل مرتبه‌های غالب به دست آورد.

به طور خلاصه می‌توان نوآوری‌های این مقاله را به صورت زیر بیان نمود:

۱. استفاده از مفهوم پاسخ تقاضای هارمونیک مشابه با طرح‌های پاسخ تقاضای انرژی، جهت کنترل سطح هارمونیک شبکه
۲. استفاده از تعیین سهم در قیمت‌گذاری هارمونیک به منظور رعایت عدالت در جریمه‌کردن مشترکین.
۳. ارائه اندیس جدید به منظور برداشت صحیح از سهم هارمونیک مشترک و شبکه در یک نگاه و در تمام مرتبه‌های هارمونیک غالب به صورت تجمیع شده.

## ۲- تعیین سهم هارمونیک مشترکین و شبکه

تعیین سهم هارمونیک بدین مفهوم است که سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیک نقطه‌ی اتصال مشترک مشخص شود. تعیین سهم روی ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC انجام می‌شود. اما باتوجه‌به این‌که اهمیت ولتاژ در شبکه بیشتر است، معمولاً تعیین سهم روی ولتاژ نقطه‌ی PCC انجام می‌شود. جریان هارمونیک یک نقطه می‌تواند در شاخه‌های مختلف پخش شود و تأثیرگذاری کمی داشته‌باشد؛ اما آلوده شدن ولتاژ یک ناحیه، کل آن ناحیه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. این موضوع در ریزشبکه‌ها که امروزه در حال گسترش هستند بیش‌تر تأثیرگذار است. چرا که در ریزشبکه‌ها منابع تولیدی و مصرف‌کننده‌ها از لحاظ مکانی به هم نزدیک هستند [۲۲]. تعیین سهم بدین مفهوم است که چه مقدار از آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال ناشی از جریان هارمونیک مشترک می‌باشد و چه مقدار از آن ناشی از آلودگی هارمونیک پس‌زمینه‌ی شبکه می‌باشد. گام اول برای تعیین سهم در یک نقطه‌ی مشخص، تعیین مدار معادل هارمونیک در آن نقطه است. مدار معادل هارمونیک در نقطه‌ی اتصال مشترک برای هر مرتبه‌ی هارمونیک به صورت مجزا محاسبه می‌شود و باتوجه‌به روش حل مسئله، به یکی از صورت‌های مدار معادل تونن یا نورتن و یا حتی ترکیبی از آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۱، مدار معادل هارمونیک شبکه و مشترک در نقطه‌ی PCC برای مرتبه‌ی هارمونیک  $h$  ام نشان داده شده است [۱۷].

در این شکل،  $h$  اندیس مرتبه‌ی هارمونیک،  $Z_{uh}$  و  $Z_{ch}$  به ترتیب امپدانس هارمونیک سمت شبکه و سمت مشترک می‌باشند. همچنین، منبع  $V_{uh}$  هارمونیک پس‌زمینه و  $I_{ch}$  منبع هارمونیک سمت مشترک را نشان می‌دهد.

مطابق با شکل ۱، معادله‌ی (۲) برقرار می‌باشد.

به منظور تخمین امپدانس و منبع سمت شبکه فرض می‌شود نوسانات  $|V_{uh}|$  کم و قابل صرف نظر کردن است [۱۷]. این فرض با توجه به این که سیستم‌های قدرت، بزرگ و به هم پیوسته می‌باشند و همچنین اندازه‌گیری‌ها در فواصل زمانی مناسبی صورت می‌گیرد، برقرار است. با بازنویسی معادله (۸) برای سه نمونه‌ی اندازه‌گیری ۱، ۲ و ۳، مجموعه روابط (۹) برقرار خواهد بود.

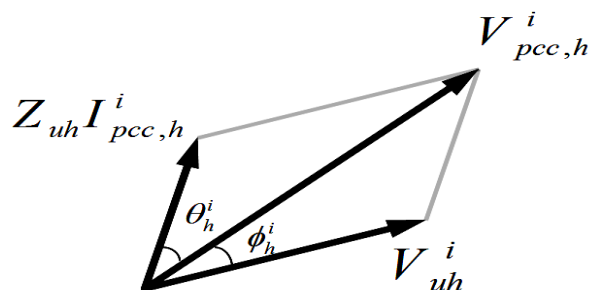
$$\begin{aligned} |V_{uh}^1|^2 &= |V_{pcc}^1|^2 + |Z_{uh}^1|^2 |I_{pcc}^1|^2 - 2|V_{pcc}^1| |I_{pcc}^1| |R_{uh} \cos(\beta_h^1)| + \\ & 2|V_{pcc}^1| |I_{pcc}^1| |X_{uh} \sin(\beta_h^1)| \\ |V_{uh}^2|^2 &= |V_{pcc}^2|^2 + |Z_{uh}^2|^2 |I_{pcc}^2|^2 - 2|V_{pcc}^2| |I_{pcc}^2| |R_{uh} \cos(\beta_h^2)| + \\ & 2|V_{pcc}^2| |I_{pcc}^2| |X_{uh} \sin(\beta_h^2)| \\ |V_{uh}^3|^2 &= |V_{pcc}^3|^2 + |Z_{uh}^3|^2 |I_{pcc}^3|^2 - 2|V_{pcc}^3| |I_{pcc}^3| |R_{uh} \cos(\beta_h^3)| + \\ & 2|V_{pcc}^3| |I_{pcc}^3| |X_{uh} \sin(\beta_h^3)| \end{aligned} \quad (10)$$

که  $R_{uh}$  و  $X_{uh}$  به ترتیب مقادیر حقیقی و موهومی امپدانس هارمونیک شبکه را نشان می‌دهند. در این روابط، سه متغیر  $R_{uh}$ ،  $X_{uh}$  و  $|V_{uh}|$  مجهول هستند. بنابراین با حل سه معادله و سه مجهول، مقادیر ذکر شده مشخص می‌گردند و با استفاده از مقادیر تعیین شده و نمونه‌هایی اندازه‌گیری شده می‌توان  $V_{uh}$  را نیز به دست آورد. با تعیین این مقادیر، محاسبه‌ی سهم شبکه و مشترکین با تصویرسازی بردارهای  $V_{uh}^i$  بر  $Z_{uh}^i I_{pcc,h}^i$  و  $V_{pcc,h}^i$  مطابق با روابط (۲) و (۳) امکان پذیر خواهد بود.

### ۳- معرفی اندیس جدید $THC^f$

تاکنون، اندیسی به منظور تخمین سهم مشترک و شبکه در کل آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی PCC ارائه نشده است. درحقیقت، آنچه تاکنون درباره تعیین سهم هارمونیک در مراجع به آن پرداخته شده است، تعیین سهم هارمونیک در IHD نقطه‌ی PCC می‌باشد و هیچ دیدی نسبت به  $THD^f$  آن نقطه ندارند. در این صورت به منظور بررسی کلی وضعیت سهم هارمونیک در یک نقطه، بایستی کلیه‌ی مرتبه‌های هارمونیک بررسی شوند. همچنین، ممکن است سهم مشترک در یک مرتبه‌ی هارمونیک زیاد باشد، حال آن که میزان IHD در آن مرتبه در مقایسه با سایر مرتبه‌ها، بسیار کوچک باشد و منجر به تصمیم‌گیری غلط شود. بدین منظور باید یک اندیس کلی برای تعیین سهم هارمونیک معرفی شود تا در یک نگاه، کل وضعیت سهم مشترک و شبکه را با در نظر گرفتن مرتبه‌های غالب معرفی کند و نیازی به بررسی همه‌ی مرتبه‌ها نباشد. اندیس‌های معرفی شده در روابط (۱۰) و (۱۱)، مرتبه‌های هارمونیک غالب را شامل می‌شوند و در یک نگاه، سهم مشترک در کل آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی PCC را از سهم شبکه تفکیک می‌کند.

با توجه به دیاگرام برداری شکل ۳، زاویه‌ی بین فازورهای  $Z_{uh}^i I_{pcc}^i$  و  $V_{pcc}^i$  تعریف می‌شود. همچنین،  $\phi_h^i$  نیز به عنوان زاویه‌ی بین  $V_{uh}^i$  و  $V_{pcc}^i$  تعریف می‌شود. با تصویر کردن بردارهای  $Z_{uh}^i I_{pcc}^i$  بر  $V_{uh}^i$  بر معادلات (۵) و (۶) به دست می‌آید [۱۷].



شکل ۳: دیاگرام برداری متغیرهای سیستم در نقطه‌ی اتصال مشترک [۱۷]

$$|V_{pcc}^i| = |Z_{uh}^i| |I_{pcc}^i| \cos(\theta_h^i) + |V_{uh}^i| \cos(\phi_h^i) \quad (5)$$

$$|Z_{uh}^i| |I_{pcc}^i| \sin(\theta_h^i) = -|V_{uh}^i| \sin(\phi_h^i) \quad (6)$$

با بازنویسی روابط (۴) و (۵)، به ترتیب روابط (۶) و (۷) به دست خواهد آمد [۱۷].

$$|V_{pcc}^i| = |Z_{uh}^i| |I_{pcc}^i| \cos(\underbrace{\angle Z_{uh} + \angle I_{pcc}^i - \angle V_{pcc}^i}_{\alpha_{uh}}) + \quad (7)$$

$$|V_{uh}^i| \cos(\underbrace{\angle V_{uh}^i - \angle V_{pcc}^i}_{\gamma_h^i})$$

$$|Z_{uh}^i| |I_{pcc}^i| \sin(\underbrace{\angle Z_{uh} + \angle I_{pcc}^i - \angle V_{pcc}^i}_{\alpha_{uh}}) = \quad (8)$$

$$-|V_{uh}^i| \sin(\underbrace{\angle V_{uh}^i - \angle V_{pcc}^i}_{\gamma_h^i})$$

در این روابط، نماد  $\angle$  نمایش گر زاویه‌ی یک عدد مختلط می‌باشد.  $\alpha_{uh}$  زاویه‌ی امپدانس هارمونیک سمت شبکه می‌باشد و  $\beta_h^i$  و  $\gamma_h^i$  نیز به ترتیب به اختلاف زاویه‌ی بین جریان و ولتاژ نقطه‌ی PCC و اختلاف زاویه‌ی بین ولتاژ نقطه‌ی PCC و ولتاژ پس‌زمینه اشاره دارند [۱۷].

با مربع کردن معادلات (۶) و (۷) و جمع کردن آن‌ها با هم، معادله‌ی (۸) به دست خواهد آمد [۱۷]:

$$\begin{aligned} |V_{uh}^i|^2 &= |V_{pcc}^i|^2 + |Z_{uh}^i|^2 |I_{pcc}^i|^2 - 2|V_{pcc}^i| |I_{pcc}^i| |Z_{uh}^i| \cos(\alpha_{uh}) \cos(\beta_h^i) + \\ & 2|V_{pcc}^i| |I_{pcc}^i| |Z_{uh}^i| \sin(\alpha_{uh}) \sin(\beta_h^i) \end{aligned} \quad (9)$$

مناسب، هزینه‌ی سالیانه فیلتر طبق رابطه‌ی زیر قابل محاسبه خواهد بود [۲۶]:

$$F_{it} = F_{it0} \left[ \frac{i_r(1+i_r)^{D_y}}{(1+i_r)^{D_y} - 1} \right] \quad (13)$$

که  $F_{it}$  هزینه‌ی سالیانه‌ی فیلتر (سال/ \$)،  $i_r$  نرخ سالیانه‌ی رشد پول،  $D_y$  عمر فیلتر بر حسب سال و  $F_{it0}$  هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه فیلتر (\$) می‌باشد. با فرض این‌که مقدار بار هارمونیک در طول سال، ثابت و برابر با  $a$  MVA باشد، انرژی هارمونیک مصرفی مشترک در طول سال برابر با  $a \times 8760$  MVAh می‌باشد. بنابراین هزینه‌ی فیلتر هارمونیک برای هر MVAh انرژی هارمونیک ( $FCE^V$ ) مصرفی طبق معادله (۱۴) خواهد بود.

$$FCE = \frac{F_{it}}{a \times 8760} \left( \frac{\$}{MVAh} \right) \quad (14)$$

که  $FCE$  بر حسب \$/MVAh در سال می‌باشد. البته معادله (۱۳) در شرایطی صحیح است که پرداخت کل هزینه فیلتر برعهده مشترک باشد. این درحالی است که معمولاً سهم مشترک در آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال، کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. بنابراین قسمتی از این هزینه باید برعهده متولی شبکه یا سایر مشترکین باشد. بنابراین معادله‌ی (۱۳) باید در سهم هارمونیک مشترک که معمولاً عددی بین ۰ تا ۱ است ضرب شود. هزینه‌ی واقعی پرداختی توسط مشترک به‌ازای هر MVAh انرژی هارمونیک ( $CCFC^A$ ) برابر خواهد بود با:

$$CCFC = \frac{F_{it}}{a \times 8760} \times HC_c \left( \frac{\$}{MVAh} \right) \quad (15)$$

که  $HC_c$  سهم متوسط مشترک در آلودگی هارمونیک نقطه اتصال مشترک در طول یک سال می‌باشد که از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود. همچنین  $CCFC$  هزینه‌ی \$/MVAh در هر سال برای مشترک می‌باشد.

#### ۴-۱- الگوریتم پیشنهادی در قیمت‌گذاری هارمونیک

فلوجارت قیمت‌گذاری هارمونیک طبق روش پیشنهادی ارائه شده در بخش‌های قبلی در شکل ۴ نشان داده شده است. روند کار در این فلوجارت به چند گام به صورت زیر تقسیم شده است:

- **گام اول:** اندازه‌گیری‌های لازم به منظور ثبت ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC انجام می‌شود.
- **گام دوم:** با استفاده از روش سه نقطه‌ای، تعیین سهم هارمونیک انجام می‌شود و سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال مشخص می‌گردد.
- **گام سوم:** با توجه به میزان آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال، فیلتر موردنیاز طراحی شده و هزینه‌ی سرمایه‌گذاری فیلتر به همراه نرخ تورم سالیانه و عمر فیلتر تعیین می‌شود.
- **گام چهارم:** هزینه‌ی سالیانه‌ی فیلتر محاسبه می‌گردد.

$$THC_c = \frac{\sum_h (IHD_h \cdot HC_{ch})}{\sum_h IHD_h} \quad (11)$$

$$THC_u = \frac{\sum_h (IHD_h \cdot HC_{uh})}{\sum_h IHD_h} \quad (12)$$

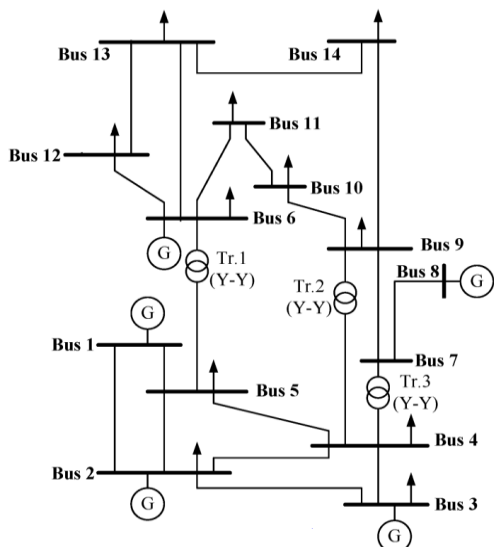
که  $THC_c$  و  $THC_u$  به ترتیب سهم هارمونیک مشترک و شبکه در کل آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال را نشان می‌دهند،  $HC_{ch}$  و  $HC_{uh}$  به ترتیب سهم هارمونیک مشترک و شبکه در یک مرتبه‌ی خاص را نشان می‌دهد و اندیس  $h$  نیز به مرتبه‌های هارمونیک غالب اشاره دارد.

#### ۴- روش پیشنهادی در قیمت‌گذاری هارمونیک

باتوجه به تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، می‌توان از خود مشترکین برای بهبود وضعیت هارمونیک شبکه استفاده نمود. بدین منظور باید برنامه‌هایی مشابه با برنامه‌های تشویقی در حوزه‌ی انرژی، برای هارمونیک نیز اجرا نمود. روش پیشنهادی، استفاده از قیمت‌گذاری هارمونیک به منظور دریافت پاسخ تقاضای صحیح از سمت مشترکین می‌باشد. با قیمت‌گذاری هارمونیک، مشترکین سعی می‌کنند هارمونیک خود را کاهش دهند. این موضوع می‌تواند با تغییر بارهای غیرخطی به بارهای خطی یا با نصب فیلتر در محل اتصال به شبکه صورت گیرد. اگر مشترکین، هیچ‌کدام از این کارها را انجام ندهند مجبور می‌شوند هزینه‌ی تعیین شده را پرداخت کند. پس از گذشت زمان کوتاهی و از جمع اعتبارات حاصل از جریمه‌ها، شرکت‌های متولی شبکه می‌توانند اقدام به نصب فیلتر در محل‌های آلوده‌ی شبکه کنند. با این سازوکار، شبکه از لحاظ هارمونیک وضعیت بسیار بهتری پیدا خواهد کرد. نوآوری این مقاله، استفاده از پاسخ تقاضای هارمونیک به منظور کنترل سطح هارمونیک شبکه با استفاده از قیمت‌گذاری هارمونیک می‌باشد. آنچه در این‌جا اهمیت دارد، عادلانه بودن روند قیمت‌گذاری می‌باشد که در این مقاله با در نظر گرفتن سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال، این مهم نیز برآورده شده است. لازم به ذکر است که این موضوع با وجود اهمیت زیاد، در هیچ یک از کارهای قبلی مورد توجه قرار نگرفته است و به عنوان ایده اصلی در روند قیمت‌گذاری هارمونیک مورد استفاده قرار گرفته است.

با دانستن وضعیت آلودگی هارمونیک در نقطه‌ی PCC، فیلتر موردنیاز برای کاهش میزان THD به مقدار مجاز قابل طراحی خواهد بود. بنابراین، پیش‌بینی صحیح میزان بار هارمونیک مشترک، در تعیین ظرفیت مناسب فیلتر مؤثر است. باتوجه به این‌که مشترکین مدنظر، مشترکین بزرگ صنعتی می‌باشند، معمولاً دارای سیکل مصرفی مشخصی در طول سال هستند و با یک دوره اندازه‌گیری می‌توان کل مصرف سالیانه را با دقت مناسبی تخمین زد. علاوه بر این، روش‌های مختلفی برای تخمین بارهای غیرخطی در مراجع مختلف مطرح شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های رگرسیون چندمتغیره [۲۴] و استفاده از شبکه‌های عصبی [۲۵] اشاره نمود. براین اساس، با نصب فیلتر

و به عنوان نمونه، بارهای غیرخطی با هارمونیک پنجم در نظر گرفته شده است. همچنین، باس ۲ به عنوان نقطه‌ی PCC در نظر گرفته شده است. در نهایت باس‌های شماره ۴ و ۹ به عنوان باس‌های تزریق کننده‌ی هارمونیک شبکه انتخاب شده‌اند.



شکل ۵: نمایی از شبکه استاندارد ۱۴ باسه IEEE

در این مقاله، جریان‌های هارمونیک اضافه شده به باس‌های ۲، ۴ و ۹، به صورت یک نسبت  $I_5/I_1$  در نظر گرفته شده است که  $I_5$  و  $I_1$  در این نسبت، به ترتیب به جریان مؤلفه‌ی اصلی و جریان هارمونیک پنجم اشاره دارد. جزئیات بیشتر از بار باس‌های شماره ۲، ۴ و ۹ در جدول ۱ ذکر شده است.

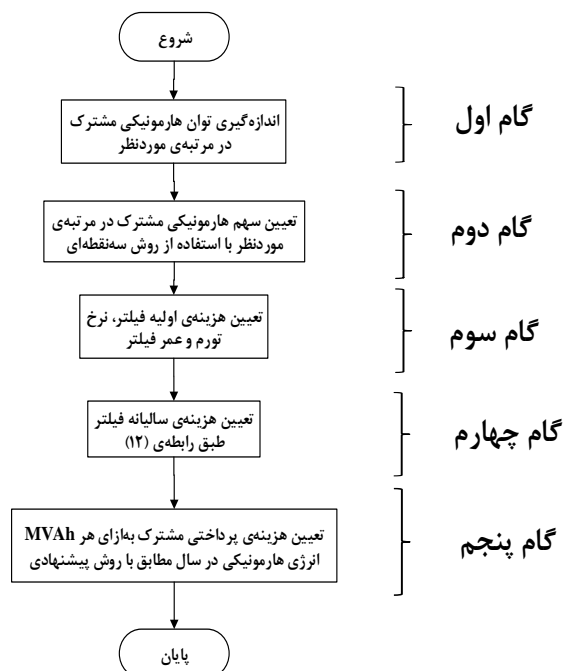
جدول ۱: جزئیات بارهای غیرخطی در باس‌های ۲، ۴ و ۹

مکان	جریان بار خطی (A)	نسبت $I_5/I_1$ اضافه شده (درصد)	درصد نوسان جریان هارمونیک
باس شماره ۲	۱۰۹	۳۰	۱۰
باس شماره ۴	۲۰۹	۲۰	۰/۵
باس شماره ۹	۵۹۲	۱۰	۰/۵

باتوجه به این که بارها در سیستم قدرت دارای تغییرات می‌باشند، در این جا نیز لازم است که جریان بارها دارای نوسان‌هایی باشند. باتوجه به این که در تعیین سهم، جریان هارمونیک مهم است و از جریان مؤلفه‌ی اصلی استفاده نمی‌شود، فقط به بارهای ۲، ۴ و ۹ در مرتبه‌ی هارمونیک پنجم نوسان داده می‌شود. این نوسانات به صورت درصد کمی از جریان، مطابق جدول ۱ به آن اضافه یا از آن کم می‌شود.

لازم به ذکر است که تغییرات زیاد در جریان هارمونیک باس‌های ۹ و ۴ به معنای تغییرات زیاد در هارمونیک پس‌زمینه برای باس ۲ (باس PCC) می‌باشد که صحت نتایج را زیر سؤال می‌برد. باتوجه به این که در حالت واقعی شبکه‌ها بزرگ هستند، معمولاً نوسانات ناگهانی در پس‌زمینه‌ی شبکه رخ نمی‌دهد و فرض فوق صحیح است.

- **گام پنجم:** هزینه‌ی پرداختی مشترک باتوجه به نتایج مراحل قبل و روش پیشنهادی مشخص می‌شود.



شکل ۴: فلوچارت روش پیشنهادی قیمت‌گذاری هارمونیک

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی به منظور قیمت‌گذاری هارمونیک و بررسی اندیس پیشنهادی ارائه شده است. برای بررسی عمل کرد الگوریتم پیشنهادی، دو سناریو به صورت زیر تعریف شده است:

- ۱- **سناریوی ۱:** بارهای هارمونیک شبکه، دارای نوسانات جزئی حول مقدار متوسط خود می‌باشند و به جز مؤلفه‌ی اصلی، تنها هارمونیک مؤلفه پنجم در شبکه وجود دارد.
- ۲- **سناریوی ۲:** علاوه بر هارمونیک مرتبه پنجم، هارمونیک مرتبه هفتم نیز به شبکه تزریق شده است و اندیس THC مدنظر قرار گرفته شده است.

### ۵-۱- شبکه مورد مطالعه

به منظور بررسی روش پیشنهادی برای تعیین سهم، مطالعات شبیه‌سازی بر روی شبکه‌ی استاندارد ۱۴ باسه IEEE انجام شده است. نمایی از این شبکه در شکل ۵ نشان داده شده است. اطلاعات شبکه از [۲۷] اقتباس شده است. در این شبکه باس‌های شماره ۷ و ۸ دارای سطح ولتاژ ۱۱ kV می‌باشند، باس‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ در سطح ولتاژ ۱۳۲ kV می‌باشند و سایر باس‌های شبکه در سطح ولتاژ ۳۳ kV کار می‌کنند. مطالعات شبیه‌سازی به وسیله نرم‌افزارهای Digsilent و Matlab انجام شده است. همانطور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، تعیین سهم هارمونیک در هر مرتبه‌ی هارمونیک به صورت جداگانه صورت می‌گیرد. بدین منظور

## ۵-۲- تعیین مدار معادل هارمونیکي سمت شبکه

به منظور محاسبه‌ی امپدانس هارمونیکي سمت شبکه با استفاده از روش سه نقطه‌ای، به داده‌های ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC نیاز است. بدین منظور با استفاده از زبان برنامه‌نویسی نرم‌افزار Digsilent (DPL<sup>۱</sup>)، تعدادی نمونه‌ی ولتاژ و جریان هارمونیکي در مرتبه پنجم، برای باس شماره ۲ تولید شده‌است. این نمونه‌ها با توجه به نوسانات بارها طبق جدول ۱، دارای اختلافات اندکی هستند. تعداد نمونه‌های ولتاژ و جریان تولید شده ۳۵۴ نمونه می‌باشد. به عبارت دیگر، با توجه به این که در روش سه نقطه‌ای از هر ۳ نمونه‌ی اندازه‌گیری شده، یک امپدانس محاسبه می‌شود، تعداد نمونه‌های امپدانس محاسبه شده برابر با ۱۱۸ نمونه می‌باشد. با توجه به این که متوسط جریان هارمونیکي بارها ثابت فرض شده‌است، این نتایج قابل تعمیم به کل سال می‌باشد و مشکلی با افزایش داده‌های اندازه‌گیری وجود ندارد. در شکل ۶ اندازه و فاز امپدانس سمت شبکه که با استفاده از روش سه نقطه‌ای به دست آمده‌است ترسیم شده‌است. در این شکل، اندازه و فاز امپدانس سمت شبکه با توجه به تغییرات در نظر گرفته شده برای بارها، تغییرات کمی خواهد داشت. در جدول ۲ اطلاعات بیشتری درباره اندازه و فاز محاسبه شده با استفاده از روش سه نقطه‌ای آمده‌است. مطابق با این جدول، اندازه و زاویه‌ی امپدانس هارمونیکي معادل سمت شبکه از دید باس ۲، به ترتیب حدود ۵۷ اهم و ۷۱ درجه می‌باشد. همچنین میزان تغییرات آن در طول دوره ی اندازه‌گیری، بسیار کم است و نشان می‌دهد که سطح بار شبکه ثابت بوده‌است. نوساناتی هم که در نتایج مشاهده می‌شود، ناشی از نوساناتی است که برای بارهای هارمونیکي در نظر گرفته شده‌است.

### جدول ۲: اطلاعاتی درباره اندازه و فاز امپدانس هارمونیکي سمت

شبکه محاسبه شده با استفاده از روش سه نقطه‌ای

اندازه (اهم)	میانگین	واریانس	مقدار کمینه	مقدار بیشینه
۵۷/۳۶۳۵	۰/۰۴۷۰	۵۶/۴۱۰۳	۵۷/۵۰۳۶	
فاز (درجه)	۷۱/۵۱۵۲	۰/۰۱۶۳	۶۶/۲۲۲۲	۷۲/۰۴۷۹

### جدول ۳: میانگین، واریانس، کمینه و بیشینه اندازه منبع ولتاژ

هارمونیکي سمت شبکه از دید باس شماره ۲

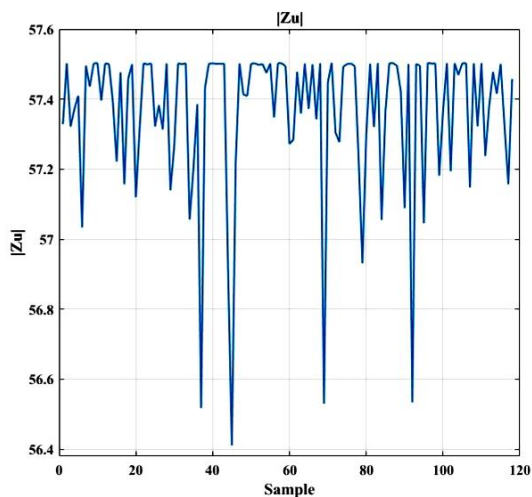
میانگین (V)	واریانس (V)	مقدار کمینه (V)	مقدار بیشینه (V)
۲۵۴/۳۴۰۳	۱/۳۴۳۲	۲۵۳/۵۶۳۶	۲۵۴/۳۸۶۸

با داشتن امپدانس هارمونیکي سمت شبکه، اندازه‌ی منبع هارمونیکي سمت شبکه از دید باس ۴ قابل محاسبه است که در شکل ۷ نشان داده شده‌است. همچنین، در جدول ۳ اطلاعات بیشتری درباره اندازه‌ی منبع ولتاژ هارمونیکي سمت شبکه از دید باس شماره ۴ نشان داده شده‌است.

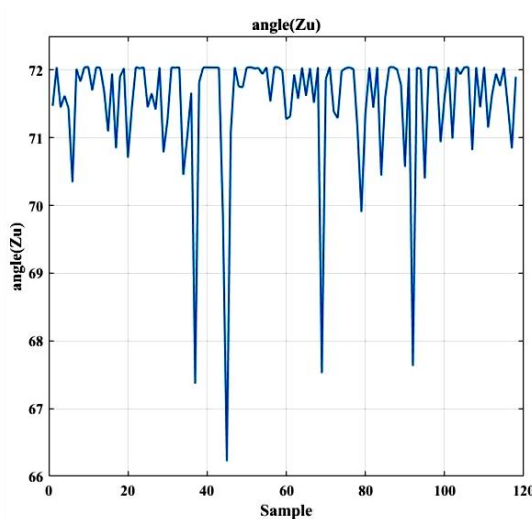
## ۵-۳- صحت‌سنجی نتایج تعیین امپدانس

به منظور اطمینان از صحت نتایج روش سه نقطه‌ای، با استفاده از نرم‌افزار Digsilent نیز امپدانس سمت شبکه محاسبه شده شده‌است. برای این کار از جعبه ابزار مشخصه امپدانس استفاده شده است و اندازه و فاز مشخصه امپدانس از دید باس شماره ۲ در شکل ۸ ارائه شده‌است.

نتایج مقایسه روش سه نقطه‌ای با نتایج به دست آمده از نرم‌افزار Digsilent در جدول ۴ نشان داده شده‌است.



(الف)



(ب)

شکل ۶: امپدانس هارمونیکي سمت شبکه محاسبه شده با استفاده از

روش سه نقطه‌ای الف: اندازه (اهم) ب: زاویه (درجه)

روش سه نقطه‌ای	مقدار واقعی (مشخصه امپدانس)	
۵۷/۳۶۳۵	۵۲/۱۶۴۱	اندازه
۹/۹۶۷۳	-	درصد خطا(%)
۷۱/۵۱۵۲	۷۳/۳۳۲۴	فاز(درجه)
۲/۴۷۸۰	-	درصد خطا(%)

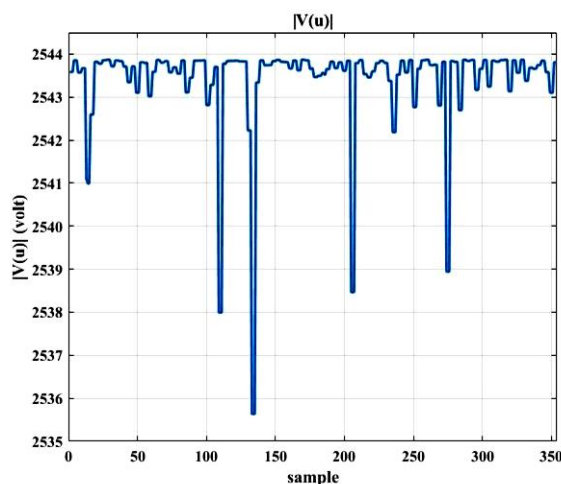
همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، میزان خطای روش سه نقطه‌ای در محاسبه‌ی اندازه‌ی امپدانس هارمونیک سمت شبکه، حدود ۱۰ درصد است. با توجه به این که در اندازه‌گیری‌های ولتاژ و جریان استفاده شده در روش سه نقطه‌ای، تغییراتی به بارهای هارمونیک اضافه شده است، این مقدار خطا قابل قبول است. همچنین، در روش سه نقطه‌ای مقدار به دست آمده برای امپدانس هارمونیک تنها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری بوده است. در عمل با توجه به این که مدل دقیق و کاملی از شبکه در دسترس نمی‌باشد، استفاده از روش سه نقطه‌ای که تنها به داده‌های اندازه‌گیری نیاز دارد، مطلوب می‌باشد.

#### ۵-۴- تعیین سهم هارمونیک

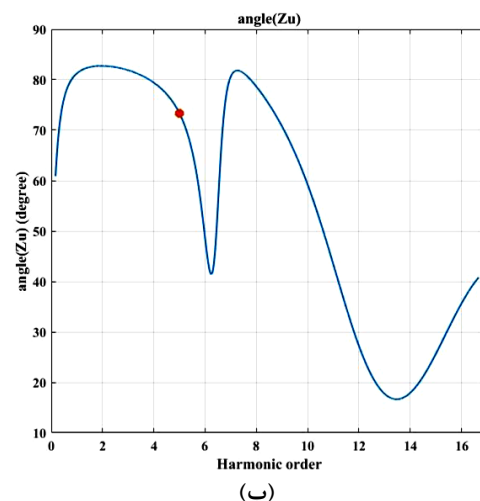
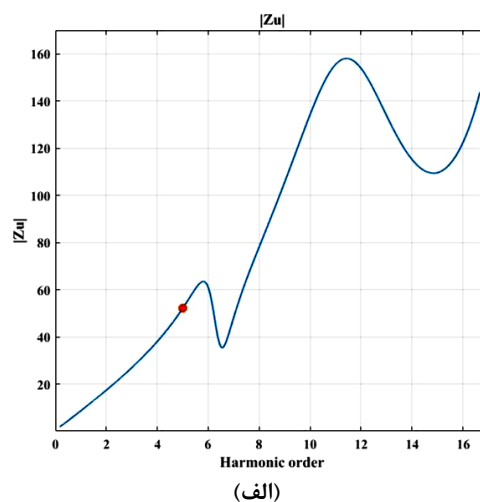
با به دست آمدن امپدانس و منبع هارمونیک معادل سمت شبکه، و با داشتن مقادیر ولتاژ و جریان نقطه‌ی اتصال مشترک، تعیین سهم هارمونیک مشترک و شبکه امکان پذیر خواهد بود. در شکل ۹ به ترتیب سهم هارمونیک مشترک و شبکه در این مورد مطالعه نشان داده شده است. همچنین، اطلاعات بیشتر درباره سهم هارمونیک از دید باس شماره ۴ و برای هر یک از طرفین مشترک و شبکه در جدول ۵ ذکر شده است. با توجه به این که سطح بار هارمونیک مشترک و شبکه تقریباً ثابت است و نوسانات کمی دارد، میزان سهم هارمونیک مشترک و شبکه نیز تغییر چندانی نخواهد کرد. این موضوع در شکل ۹ مشخص است و واضح است و میزان واریانس تغییرات نیز که در جدول ۵ آمده است، آن را تأیید می‌کند.

**جدول ۵: اطلاعاتی درباره سهم هارمونیک مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیک مرتبه پنجم ولتاژ نقطه‌ی اتصال مشترک**

میانگین(%)	واریانس	مقدار کمینه(%)	مقدار بیشینه(%)	
۴۰/۸۳۰۴	۰/۰۰۰۲	۳۸/۱۵۸۵	۴۳/۳۴۲۹	سهم مشترک
۵۹/۱۶۹۵	۰/۰۰۰۲	۵۶/۶۵۷۰	۶۱/۸۴۱۴	سهم شبکه



شکل ۷: اندازه‌ی منبع ولتاژ هارمونیک سمت شبکه از دید باس شماره ۲



شکل ۸: منحنی مشخصه امپدانس شبکه از دید باس شماره ۲  
الف: منحنی اندازه (اهم) ب: منحنی فاز (درجه)

جدول ۴: مقایسه‌ی اندازه و فاز امپدانس هارمونیک سمت شبکه



هزینه تقریبی فیلترها برای دو نوع فیلتر Fixed Passive Filter و Passive Switched Filter به ازای هر kVA به ترتیب برابر  $\frac{\$}{kVA}$  ۲۹ و  $\frac{\$}{kVA}$  ۴۰/۶ در نظر گرفته شده است.

در ادامه عمر فیلتر و نرخ تورم به ترتیب ۲۰ سال و ۳ درصد انتخاب می‌گردد و قیمت‌گذاری مطابق با روابط (۱۳) تا (۱۵) انجام می‌شود. نتایج به دست آمده مطابق با جدول ۶ می‌باشد.

جدول ۶: نتایج قیمت‌گذاری هارمونیک در باس شماره ۲

Passive Switched Filter	Fixed Passive Filter	نوع فیلتر
۱۶۰۸۲/۶۴۷۹	۱۱۴۸۷/۶۰۵۶	C (\$)
۱۰۸۱/۰۰۶۵	۷۷۲/۱۴۷۵	Ac (\$/year)
۰/۳۱۱۵	۰/۲۲۲۵	FCE ( $\frac{\$}{MVAh \cdot year}$ )
۰/۱۸۶۶	۰/۱۳۳۳	CCFC ( $\frac{\$}{MVAh \cdot year}$ )

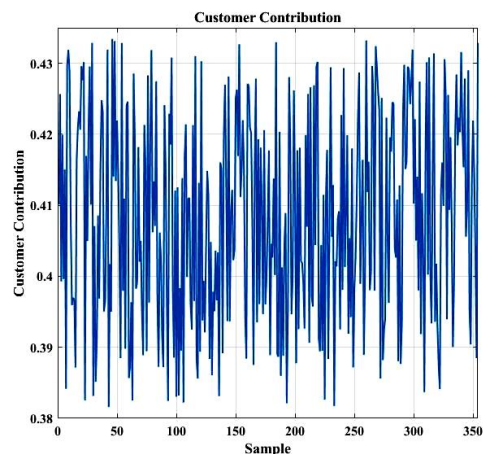
بنابراین با استفاده از فیلتر Fixed Passive Filter، مشترک باید به ازای مصرف هر MVAh انرژی هارمونیک در سال، مبلغ  $\$0/1333$  را به متولی شبکه پرداخت نماید. در صورتی که از فیلترهای Passive Switched Filter استفاده شود، این مبلغ به  $\$0/1866$  افزایش می‌یابد. لذا با توجه به شفافیت روند قیمت‌گذاری، أخذ هزینه‌ی فیلتر از مشترکین با توجه به سهم آن‌ها ممکن خواهد بود. با اجرای طرح، مشترکین به دو صورت واکنش نشان خواهند داد. یک سری از مشترکین در محل اتصال خود به شبکه، اقدام به نصب فیلتر می‌کنند که باعث کاهش هارمونیک منتشر شده در شبکه می‌شود. بعضی از مشترکین نیز به پرداخت هزینه‌ی انتشار هارمونیک رضایت می‌دهند. در این صورت متولی شبکه از محل جمع اعتبارات ناشی از پرداخت جریمه‌ها، اقدام به نصب فیلتر هارمونیک خواهد نمود. در نتیجه با اجرای این طرح، یک پاسخ بار هارمونیک<sup>۱۰</sup> از سمت مشترکین دریافت می‌شود که به بهبود وضعیت هارمونیک شبکه منجر می‌شود.

#### ۵-۶- بررسی اندیس پیشنهادی THC

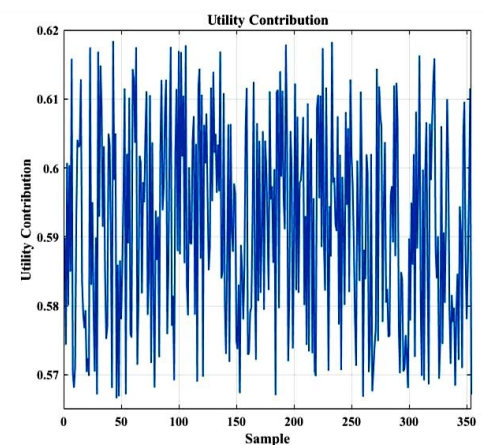
در این بخش، اندیس پیشنهادی THC بررسی می‌شود. با توجه به این که این اندیس از تجمیع سهم مرتبه‌های هارمونیک غالب به دست می‌آید، لازم است که مرتبه‌های هارمونیک مختلف به شبکه تزریق شود. بنابراین، لازم است که تغییراتی در شبکه ایجاد شود. وضعیت بارهای هارمونیک شبکه در این حالت در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷: جزئیات بارهای غیرخطی در باس‌های ۲، ۴ و ۹ در حالت دوم

مکان	جریان بار خطی (A)	نسبت I <sub>5</sub> /I <sub>1</sub> اضافه شده (درصد)	نسبت I <sub>7</sub> /I <sub>1</sub> اضافه شده (درصد)



(الف)



(ب)

شکل ۹: سهم هارمونیک مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیک مرتبه پنجم ولتاژ نقطه‌ی اتصال الف: سهم مشترک ب: سهم شبکه

#### ۵-۵- تعیین قیمت‌گذاری هارمونیک

با مشخص شدن سهم هارمونیک مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیک ولتاژ نقطه‌ی اتصال، شرایط برای قیمت‌گذاری هارمونیک بر اساس یک سطح بار به صورت عادلانه برقرار است. به منظور تخمین توان فیلتر برای قیمت‌گذاری، ابتدا توان هارمونیک نقطه‌ی PCC مطابق زیر محاسبه می‌شود.

$$S = 3 \times V_{pcc,h}^{ph} \times I_{pcc,h}^* \quad (۱۶)$$

که اندیس‌های  $ph$  و  $h$  به ترتیب به عمل‌گر مزدوج مختلط، فاز به زمین و مرتبه‌ی هارمونیک اشاره دارند. با استفاده از این رابطه، اندازه متوسط توان ظاهری هارمونیک باس شماره ۲ در مرتبه‌ی هارمونیک پنجم، MVA ۰/۳۶۹۱۲۴ می‌باشد.

با داشتن توان ظاهری هارمونیک در باس موردنظر، می‌توان تخمینی از قیمت فیلتر را به دست آورد. لذا با انتخاب نوع فیلتر و تعیین ظرفیت، می‌توان هزینه‌ی سرمایه‌گذاری تقریبی فیلتر را به دست آورد [۲۸].

[۲] میلاد دلای، علیرضا جلیلیان، «محاسبه آلودگی هارمونیک و میان هارمونیک ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه بادی با استفاده از یک روش ترکیبی»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۲، شماره ۲، صفحه ۲۵-۳۷، ۱۳۹۱.

[۳] عباس کارگر، فهیمه صیادی شهرکی، جعفر سلطانی، «خازن گذاری بهینه در شبکه توزیع دارای اغتشاش هارمونیک برای تنظیم ولتاژ و کاهش تلفات با استفاده از PSO»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۱، شماره ۱، صفحه ۳۳-۴۳، ۱۳۹۰.

- [4] D. Serfontein, et al., "Continuous Event-Based Harmonic Impedance Assessment Using Online Measurements" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 65, no. 10, pp. 2214-2220, 2016.
- [5] M.O. Prates, et al. "Power system impedance measurement based on wavelet voltage imposed" in 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 798-802, Bucharest, Romania, 2014.
- [6] H.L.M. Monteiro, et al. "A real time implementation of an harmonic impedance estimator" in 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 333-337, Belo Horizonte, Brazil, 2016.
- [7] W. Xu, et al., "Measurement of network harmonic impedances: practical implementation issues and their solutions" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no.1, pp. 210-216, 2002.
- [8] A. Murugan and V.S. Kumar, "Determining true harmonic contributions of sources using neural network" Neurocomputing, pp. 72-80, 2016.
- [9] J. Mazumdar, R.G. Harley, and F. Lambert, "System and method for determining harmonic contributions from non-linear loads using recurrent neural networks" in International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), pp. 366-371, Montreal, Canada, 2005.
- [10] J. Mazumdar, et al., "Intelligent tool for determining the true harmonic current contribution of a customer in a power distribution network" IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no.5, pp. 1477-1485, 2008.
- [11] F. Karimzadeh, S. Esmaili, and S.H. Hosseinian, "A novel method for noninvasive estimation of utility harmonic impedance based on complex independent component analysis" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 30, no. 4, pp. 1843-1852, 2015.
- [12] F. Karimzadeh, S. Esmaili, and S.H. Hosseinian, "Method for determining utility and consumer harmonic contributions based on complex independent component analysis" IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 2, pp. 526-534, 2016.
- [13] X. Zhao, and H. Yang, "A New Method to Calculate the Utility Harmonic Impedance Based on FastICA" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 1, pp. 381-388, 2016.
- [14] E.O. de Matos, et al., "Using linear and non-parametric regression models to describe the contribution of non-linear loads on the voltage harmonic distortions in the electrical grid" IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 8, pp. 1825-1832, 2016.
- [15] M. Shojaie, and H. Mokhtari, "A method for determination of harmonics responsibilities at the point of common coupling using data correlation analysis" IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 8, no. 1, p.p. 142-150, 2014.
- [16] W. Xu, et al. "A method to determine the harmonic contributions of multiple loads" in IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-6, Calgary, Canada, 2009.
- [17] A. Zebardast, and H. Mokhtari, "Technique for online tracking of a utility harmonic impedance using by synchronising the measured samples" IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 5, pp. 1240-1247, 2016.
- [18] P.J. Talacek, and N.R. Watson, "Marginal pricing of harmonic injections: An analysis of the resulting payments" IEEE Transactions on Power Systems, vol. 17, no. 3, pp. 640-645, 2002.
- [19] Y. Peng, et al., "Harmonic pricing model based on harmonic costs and harmonic current excessive penalty" in 2nd international conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), pp. 4011-4014, Dengleng, China, 2011.

باس شماره ۲	۱۰۹	۱۵	۱
باس شماره ۴	۲۰۹	۱۰	۲
باس شماره ۹	۵۹۲	۵	۲

به منظور محاسبه‌ی اندیس THC لازم است که در گام اول برای مرتبه‌های هارمونیک موجود، تعیین سهم به صورت جداگانه انجام شود. بنابراین تغییرات لازم مطابق با جدول ۷ در شبکه انجام شده و تعیین سهم صورت می‌پذیرد. نتایج پخش بار و تعیین سهم هارمونیک در این مورد مطالعه به ترتیب در جدول‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌است.

جدول ۸: نتایج پخش بار هارمونیک در باس شماره ۲

پارامتر	THD (%)	IHD5 (%)	IHD7 (%)
مقدار	۲/۶۵	۲/۶۰	۰/۵۲

جدول ۹: اندیس THC در باس شماره ۲

سهم مشترک	IHD5 (%)	IHD7 (%)	THC (%)
سهم مشترک	۴۰/۸۳۵۱	۱۰/۴۴۳۷	۳۵/۷۶۹۸
سهم شبکه	۵۹/۱۶۴۸	۸۹/۵۵۶۲	۶۴/۲۳۰۰

همان‌طور که در جدول ۹ آمده است، باتوجه به این که IHD5 بیشتر از IHD7 است، اندیس THC به سهم‌های به دست آمده برای مرتبه‌ی پنجم نزدیک‌تر است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی برای کنترل هارمونیک شبکه با استفاده از قیمت گذاری هارمونیک ارائه شده‌است. باتوجه به استفاده از تعیین سهم هارمونیک برای قیمت گذاری، مسئله کاملاً شفاف بوده و رضایت مشترکین را در پی خواهد داشت. روش تعیین سهم براساس روش سه نقطه‌ای می‌باشد که از اندازه‌گیری ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی، کارایی روش سه نقطه‌ای در محاسبه‌ی امیدانس سمت شبکه و تعیین سهم هارمونیک را نشان می‌دهد. همچنین قیمت گذاری هارمونیک براساس تعیین سهم هارمونیک، نشان‌گر رعایت عدالت در روند قیمت گذاری می‌باشد که پاسخ مناسب مشترک مبنی بر کنترل هارمونیک را در پی خواهد داشت. در نتیجه با پیاده‌سازی این طرح و با توجه به پاسخ مشترکین، وضعیت هارمونیک شبکه در مدت کوتاهی بهبود پیدا خواهد کرد و هزینه‌ی مربوطه توسط مشترکین پرداخت می‌شود. همچنین، اندیس جدید معرفی شده به خوبی سهم هارمونیک مشترک و شبکه را در کل آلودگی هارمونیک نقطه‌ی اتصال نشان می‌دهد. به منظور ادامه کار می‌توان نسبت به ارائه روندی برای تعیین سهم مشترکین در سایر نقاط شبکه و همچنین، شناسایی نقطه‌ی بهینه برای شروع فیلتر گذاری اقدام نمود.

مراجع

- [1] D. Seeto, S.-D. He, and C.-K. Woo, "Pricing electric harmonics. Energy, vol. 20, no. 7, pp. 617-621, 1995.

- [25] J. Mazumdar, et al., "Neural network based method for predicting nonlinear load harmonics" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 3, pp. 1036-1045, 2007.
- [26] H. Mohkami, R. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "Fuzzy optimal placement of capacitors in the presence of nonlinear loads in unbalanced distribution networks using BF-PSO algorithm" Applied Soft Computing, vol. 11, no. 4, pp. 3634-3642, 2011.
- [27] S. Ghosh, S.P. Ghoshal, and S. Ghosh, "Optimal sizing and placement of distributed generation in a network system" International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 32, no. 8, p.p. 849-856, 2010.
- [28] D.J. Carnovale, T.J. Dionise, and T.M. Blooming. "Price and performance considerations for harmonic solutions" in Power Systems World, Power Quality 2003 Conference, Long Beach, California, 2003.
- [20] Z. Lin, et al., "Economic evaluation of harmonic cost" in IEEE 8th international conference on Power Electronics and Motion Control (PEMC-ECCE Asia), pp. 668-673, Hefei, China, 2016.
- [21] L. Wei, et al., "Study on harmonic marginal pricing in power system" in IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, pp. 1-4, Tianjin, China, 2012.
- [22] M. Tavakoli, et al., "CVaR-based energy management scheme for optimal resilience and operational cost in commercial building microgrids" International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 100, p.p. 1-9, 2018.
- [23] Y.-M. Liu, et al., "Complex blind source separation based harmonic contribution assessment" in 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 176-180, Belo Horizonte, Brazil, 2016.
- [24] M. Lamich, et al., "Nonlinear loads model for harmonics flow prediction, using multivariate regression". IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 6, pp. 4820-4827, 2017.

## زیر نویس ها

<sup>7</sup> Filter Cost for Each MWh

<sup>8</sup> Customer Contribution of Filter Cost for each MV Ah

<sup>9</sup> Digsilent Programming Language

<sup>10</sup> Harmonic Demand Response

<sup>1</sup> Point of Common Coupling

<sup>2</sup> invasive

<sup>3</sup> noninvasive

<sup>4</sup> Total Harmonic Contribution

<sup>5</sup> Individual Harmonic Distortion

<sup>6</sup> Total Harmonic Distortion