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

امین سعادت[۱]، کارشناسی ارشد؛ رحمت‌الله هوشمند[۲]، استاد؛ مهدی تدین[۳]، دانشجوی دکتری؛ آرش کیومرثی[۴]، دانشیار؛ مهدی ترابیان[۵]، 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- kiyoumarsi@eng.ui.ac.ir

۵- شرکت برق منطقه‌ای اصفهان- دفتر تحقیقات و استانداردها- اصفهان- ایران- torabian_m20@yahoo.com

**چکیده:** افزایش آلودگی‌های هارمونیکی یکی از دغدغه‌های موجود در سیستم‌های قدرت بوده که بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. ازطرفی هزینه‌ی زیاد جبران‌سازی، امکان جبران‌سازی در سرتاسر شبکه را از بین برده‌است. باتوجه‌به تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، این امکان به‌وجود آمده‌است که هزینه‌ی جبران‌سازی ازطریق مشترکین آلوده‌کننده تأمین شود. در این مقاله، روشی جدید برای کنترل هارمونیک شبکه با استفاده از قیمت‌گذاری هارمونیکی ارائه شده‌است. مبنای قیمت‌گذاری در این روش، تعیین سهم هارمونیکی در ولتاژ نقطه‌ی اتصال مشترک می‌باشد. همچنین، اندیسی جدید به‌منظور تعیین سهم هارمونیکی مشترک (مصرف‌کننده) و شبکه بالادست در آلودگی هارمونیکی نقطه‌ی اتصال مشترک ارائه شده است. با استفاده از این اندیس، می‌توان برداشت صحیحی از سهم مشترک و شبکه در کلیه‌ی مرتبه‌های هارمونیکی غالب به دست آورد. نتایج شبیه‌سازی برروی شبکه استاندارد ۱۴ باسه IEEE بیان‌گر کارآیی روش پیشنهادی برای قیمت‌گذاری برمبنای تعیین سهم عادلانه مشترک و شبکه می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تعیین عادلانه سهم هارمونیکی، می‌توان مشترک را به کاهش و یا کنترل هارمونیک تشویق کرد. در غیراین‌صورت از جمع اعتبارات ناشی از جریمه‌ی مشترک، می‌توان فیلتر هارمونیکی در محل موردنظر نصب نمود و نسبت به کنترل هارمونیک اقدام نمود.

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

# Harmonic Control in Power System Using of Harmonic Pricing

Amin Saadat[1], MSc; Rahmat-Allah Hooshmand[2], Profesor; Mahdi Tadayon[3], PhD student; Arash Kiyoumarsi[4], Associate Professor; Mahdi Torabian[5], 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: kiyoumarsi@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: ۱۳۹۷/۰۴/۲۵و 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 عمل‌کرد هر سیستمی معیارهایی وجود دارد. این معیارها در سیستم‌های قدرت تحت‌عنوان 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 سینوسی‌بودن 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 گرم‌شدن بیش‌ازحد هسته ماشین‌های گردان الکتریکی، نوسانات گذرا، فلیکر و اضافه‌بارشدن فیلترها اشاره کرد[۲]. بررسی‌های اخیر سیستم‌های قدرت گویای این واقعیت است که اعوجاج هارمونیکی قابل‌ملاحظه‌ای در شکل موج ولتاژ و جریان وجود دارد[۳]. نصب فیلترهای هارمونیکی 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 موردنیاز، اقدام به نصب فیلتر کند. با تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، این امکان وجود دارد که با قیمت‌گذاری هارمونیکی، اعتبارات لازم برای نصب فیلتر از خود مشترکین دریافت شود. آن‌چه در این روند اهمیت دارد، شفافیت و عادلانه‌بودن روند قیمت‌گذاری می‌باشد. باتوجه‌به این‌که ولتاژ شبکه در حالت عادی عاری از هارمونیک نیست، بارهای خطی نیز ممکن است دارای جریان هارمونیکی باشند. حال این‌که مقصر جریان هارمونیکی تولیدی، مشترک نمی‌باشد و در این حالت نبایستی هزینه‌ای از مشترک دریافت شود. تشخیص این مسئله با استفاده از تعیین سهم هارمونیکی ممکن می‌باشد. بنابراین لازم است که قبل از قیمت‌گذاری، سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی اتصال (PCC[1]) تعیین شود.

تاکنون کارهای مختلفی برای تعیین سهم هارمونیکی در نقطه‌ی اتصال مشترک به شبکه صورت گرفته‌است. کلیه‌ی روش‌های تعیین سهم به دو دسته‌ی هجومی[2][۴-۷] و غیرهجومی[3][۸-۱۷] تقسیم‌بندی می‌شوند. کلیه‌ی روش‌های هجومی از اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته 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 واردشده 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 بیش‌تر است، اما این روش ممکن است باعث آسیب‌رسانی به تجهیزات شبکه شود. بنابراین بیشتر مطالعات برروی روش‌های غیرهجومی متمرکز شده‌است. از مهم‌ترین روش‌های غیرهجومی در تعیین سهم هارمونیکی، می‌توان به تحلیل شبکه‌های عصبی[۸-۱۰]، تحلیل مؤلفه‌های مستقل[۱۱-۱۳] و هم‌بستگی اطلاعات[۱۴-۱۶] اشاره نمود.

در تحلیل شبکه‌های عصبی، از آموزش شبکه‌های عصبی برای تعیین سهم هارمونیکی در آلودگی جریان نقطه‌ی PCC استفاده می‌شود. در تحلیل مؤلفه‌های مستقل، یک روش تجزیه و تحلیل سیگنال به‌منظور تعیین سهم هارمونیکی در نقطه‌ی PCC مورد استفاده قرار گرفته‌است. در روش هم‌بستگی اطلاعات، پس از دسته‌بندی داده‌های اندازه‌گیری شده، بین ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC تخمین خطی زده و با استفاده از رابطه‌ی تخمین‌زده‌شده، نسبت به تعیین سهم هارمونیکی در آلودگی هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی PCC اقدام می‌شود.

ازطرف‌دیگر، در بحث قیمت‌گذاری هارمونیکی نیز کارهایی صورت گرفته‌است که از لحاظ کمی و کیفی در مقایسه با تعیین سهم بسیار کمتر می‌باشد. از روش‌های قیمت‌گذاری هارمونیکی که در مراجع مختلف به آن‌ها اشاره شده‌است می‌توان به قیمت‌گذاری براساس اندازه ولتاژ هارمونیکی باس‌های شبکه[۱۸]، قیمت‌گذاری برمبنای هزینه دیماند درخواستی و هزینه‌ی انرژی مصرفی[۱۹]، قیمت‌گذاری براساس محاسبات احتمالاتی[۲۰] و استفاده از روش نقطه‌ی خارجی[۲۱] اشاره نمود. در قیمت‌گذاری با استفاده از اندازه ولتاژ هارمونیکی باس‌های شبکه، به حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی به‌منظور کمینه‌کردن خسارات ناشی از ولتاژ هارمونیکی باس‌ها پرداخته می‌شود. در قیمت‌گذاری برمبنای هزینه دیماند درخواستی و انرژی مصرفی، خسارات ناشی از هارمونیک را با استفاده از روابط مختلف برمبنای دیماند درخواستی و انرژی مصرفی محاسبه می‌شود. در استفاده از روش نقطه‌ی خارجی نیز، یک مسئله‌ی بهینه‌سازی به‌منظور کمینه‌کردن خسارات ناشی از هارمونیک، با استفاده از این الگوریتم حل می‌شود. هیچ‌کدام از روش‌های قیمت‌گذاری براساس تعیین سهم نبوده‌است و این خود نشان از ناعادلانه بودن روش‌های معرفی‌شده می‌باشد.

در این مقاله، به‌منظور کنترل هارمونیک شبکه از قیمت‌گذاری هارمونیکی و پاسخ تقاضای هارمونیکی مشترکین آلوده‌کننده استفاده شده‌است. روش پیشنهادی در قیمت‌گذاری هارمونیکی براساس تعیین سهم عادلانه مشترکین ارائه شده‌است. تفاوت روند قیمت‌گذاری پیشنهادی با کارهای قبلی در این است که در این روند از تعیین سهم هارمونیکی استفاده شده‌است که باعث می‌شود جریمه‌ی درنظرگرفته‌شده برای مشترکین به‌صورت عادلانه باشد و پاسخ تقاضای مناسب مشترکین را در پی داشته‌باشد. با عادلانه‌بودن قیمت‌گذاری، رضایت مشترکین جلب می‌شود. براین‌اساس، مشترکین ملزم به پرداخت جریمه عادلانه تولید هارمونیک خواهندبود تا متولی شبکه اقدام به نصب فیلتر کند. درغیراین‌صورت، 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 شده‌است. هم‌چنین، به منظور تحلیل مناسب از سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیکی نقطه‌ی اتصال، اندیس جدیدی معرفی شده‌است که با استفاده از آن می‌توان نسبت به تعیین سهم هارمونیکی در کلیه‌ی مرتبه‌های غالب اقدام نمود. به‌گونه‌ای‌که سهم هارمونیکی مشترک و شبکه در کل آلودگی هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی اتصال به دست آید و با یک نگاه بتوان برداشتی

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

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

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

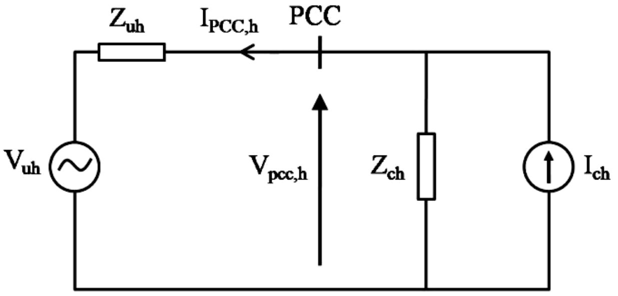
## ۲- تعیین سهم هارمونیکی مشترکین و شبکه

تعیین سهم هارمونیکی بدین مفهوم است که سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیکی 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 نقطه ی PCC انجام می‌شود. جریان هارمونیکی یک نقطه می‌تواند در شاخه‌های مختلف پخش شود و تأثیرگذاری کمی داشته‌باشد؛ اما آلوده شدن ولتاژ یک ناحیه، کل آن ناحیه را تحت‌تأثیر 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 هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی اتصال ناشی از جریان هارمونیکی مشترک می‌باشد و چه مقدار از آن ناشی از آلودگی هارمونیکی پس‌زمینه‌ی شبکه می‌باشد. گام اول برای تعیین سهم در یک نقطه‌ی مشخص، تعیین مدار معادل هارمونیکی در آن نقطه است. مدار معادل هارمونیکی در نقطه‌ی اتصال مشترک برای هر مرتبه‌ی هارمونیکی به‌صورت مجزا محاسبه می‌شود و باتوجه‌به روش حل مسئله، به یکی از صورت‌های مدار معادل تونن یا نورتن و یا حتی ترکیبی از آن‌ها درنظر گرفته می‌شود. در شکل ۱، مدار معادل هارمونیکی شبکه و مشترک در نقطه‌ی PCC برای مرتبه‌ی هارمونیکی $h$اُم نشان داده شده‌است[۱۷].

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

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

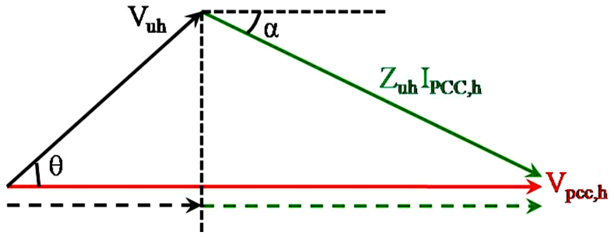
$$V_{pcc,h} = Z_{uh}.I_{pcc,h} + V_{uh} \quad (۱)$$




**شکل ۱: مدار معادل هارمونیکی در نقطه‌ی PCC برای مرتبه‌ی هارمونیکی hاُم[۱۷]**

$$V_{pcc,h} = Z_{uh}.I_{pcc,h} + V_{uh} \quad (۲)$$

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 به‌صورت شکل ۲ درنظر گرفت.




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

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

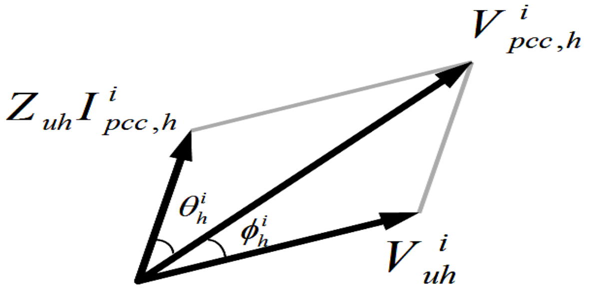
$$HC_u = \frac{|V_{uh}|.\cos\theta}{|V_{pcc,h}|} \quad (۳)$$

$$HC_c = \frac{|Z_{uh}.I_{pcc,h}|.\cos\alpha}{|V_{pcc,h}|} \quad (۴)$$

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

برای تعیین امپدانس هارمونیکی، 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 به‌صورت شکل ۳ نیز نمایش داد. در این شکل بالانویس $i$ به نمونه‌ی اندازه‌گیری $i$اُم اشاره دارد.

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




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

$$\left|V_{pcch}^i\right| = \left|Z_{uh}\right|\left|I_{pcch}^i\right|\cos(\theta_h^i) + \left|V_{uh}^i\right|\cos(\phi_h^i) \quad (۵)$$

$$\left|Z_{uh}\right|\left|I_{pcch}^i\right|\sin(\theta_h^i) = -\left|V_{uh}^i\right|\sin(\phi_h^i) \quad (۶)$$

با بازنویسی روابط (۴) و (۵)، به‌ترتیب روابط (۶) و (۷) به‌دست‌خواهدآمد[۱۷].

$$\left|V_{pcch}^i\right| = \left|Z_{uh}\right|\left|I_{pcch}^i\right|\cos(\overbrace{\angle Z_{uh}}^{\alpha_{uh}} + \overbrace{\angle I_{pcch}^i - \angle V_{pcch}^i}^{\beta_h^i}) + \left|V_{uh}^i\right|\cos(\overbrace{\angle V_{uh}^i - \angle V_{pcch}^i}^{\gamma_h^i}) \quad (۷)$$

$$\left|Z_{uh}\right|\left|I_{pcch}^i\right|\sin(\overbrace{\angle Z_{uh}}^{\alpha_{uh}} + \overbrace{\angle I_{pcch}^i - \angle V_{pcch}^i}^{\beta_h^i}) = -\left|V_{uh}^i\right|\sin(\overbrace{\angle V_{uh}^i - \angle V_{pcch}^i}^{\gamma_h^i}) \quad (۸)$$

در این روابط، نماد $\angle$ نمایش‌گر زاویه‌ی یک عدد مختلط می‌باشد. $\alpha_{uh}$ زاویه‌ی امپدانس هارمونیکی سمت شبکه می‌باشد و $\beta_h^i$ و $\gamma_h^i$ نیز به‌ترتیب 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، معادله ی (۸) به‌دست‌خواهدآمد[۱۷]:

$$\left|V_{uh}^i\right|^2 = \left|V_{pcch}^i\right|^2 + \left|Z_{uh}\right|^2\left|I_{pcch}^i\right|^2 - 2\left|V_{pcch}^i\right|\left|I_{pcch}^i\right|\left|Z_{uh}\right|\cos(\alpha_{uh})\cos(\beta_h^i) + 2\left|V_{pcch}^i\right|\left|I_{pcch}^i\right|\left|Z_{uh}\right|\sin(\alpha_{uh})\sin(\beta_h^i) \quad (۹)$$

به‌منظور تخمین امپدانس و منبع سمت شبکه فرض می‌شود نوسانات |Vuh| کم و قابل‌صرفنظرکردن است[۱۷]. این فرض باتوجه‌به این‌که سیستم‌های قدرت، بزرگ و به‌هم‌پیوسته 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 خواهدبود.

$$\begin{aligned}
&\left|V_{uh}^1\right|^2 = \left|V_{pcch}^1\right|^2 + \left|Z_{uh}\right|^2\left|I_{pcch}^1\right|^2 - 2\left|V_{pcch}^1\right|\left|I_{pcch}^1\right|R_{uh}\cos(\beta_h^1) + 2\left|V_{pcch}^1\right|\left|I_{pcch}^1\right|X_{uh}\sin(\beta_h^1)\\
&\left|V_{uh}^2\right|^2 = \left|V_{pcch}^2\right|^2 + \left|Z_{uh}\right|^2\left|I_{pcch}^2\right|^2 - 2\left|V_{pcch}^2\right|\left|I_{pcch}^2\right|R_{uh}\cos(\beta_h^2) + 2\left|V_{pcch}^2\right|\left|I_{pcch}^2\right|X_{uh}\sin(\beta_h^2)\\
&\left|V_{uh}^3\right|^2 = \left|V_{pcch}^3\right|^2 + \left|Z_{uh}\right|^2\left|I_{pcch}^3\right|^2 - 2\left|V_{pcch}^3\right|\left|I_{pcch}^3\right|R_{uh}\cos(\beta_h^3) + 2\left|V_{pcch}^3\right|\left|I_{pcch}^3\right|X_{uh}\sin(\beta_h^3)
\end{aligned} \quad (۱۰)$$

که $R_{uh}$ و $X_{uh}$ به‌ترتیب مقادیر حقیقی و موهومی امپدانس هارمونیکی 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 ذکرشده مشخص می‌گردند و با استفاده از مقادیر تعیین‌شده و نمونه‌هایی اندازه‌گیری‌شده می‌توان $\measuredangle V_{uh}$ را نیز به‌دست آورد. با تعیین این مقادیر، محاسبه‌ی سهم شبکه و مشترکین با تصویرسازی بردارهای $V_{uh}^i$ و $Z_{uh}I_{pcc,h}^i$ بر $V_{pcc,h}^i$ و مطابق با روابط (۲) و (۳) امکان‌پذیر خواهدبود.

## ۳- معرفی اندیس جدید THC[۴]

تاکنون، اندیسی به‌منظور تخمین سهم مشترک و شبکه در کل آلودگی هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی PCC ارائه نشده‌است. درحقیقت، آنچه تاکنون درباره تعیین سهم هارمونیکی در مراجع به آن پرداخته شده‌است، تعیین سهم هارمونیکی در IHD[۵] نقطه‌ی PCC می‌باشد و هیچ دیدی نسبت به THD[۶] آن نقطه ندارند. در این‌صورت به‌منظور بررسی کلی وضعیت سهم هارمونیکی در یک نقطه، بایستی کلیه‌ی مرتبه‌های هارمونیکی بررسی شوند. همچنین، ممکن است سهم مشترک در یک مرتبه‌ی هارمونیکی زیاد باشد، حال‌آن‌که میزان IHD در آن مرتبه در مقایسه با سایر مرتبه‌ها، بسیار کوچک باشد و منجربه تصمیم‌گیری غلط شود. بدین‌منظور باید یک اندیس کلی برای تعیین سهم هارمونیکی معرفی شود تا در یک نگاه، کل وضعیت سهم مشترک و شبکه را با درنظرگرفتن مرتبه‌های غالب معرفی کند و نیازی به بررسی همه‌ی مرتبه‌ها نباشد. اندیس‌های معرفی شده در روابط (۱۰) و (۱۱)، مرتبه‌های هارمونیکی غالب را شامل می‌شوند و در یک نگاه، سهم مشترک در کل آلودگی هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی PCC را از سهم شبکه تفکیک می‌کند.

$$THC_c = \frac{\sum_h (IHD_h .HC_{ch})}{\sum_h IHD_h} \quad (۱۱)$$

$$THC_u = \frac{\sum_h (IHD_h .HC_{uh})}{\sum_h IHD_h} \quad (۱۲)$$

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

## ۴- روش پیشنهادی در قیمت‌گذاری هارمونیکی

باتوجه‌به تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، می‌توان از خود مشترکین برای بهبود وضعیت هارمونیکی شبکه استفاده نمود. بدین‌منظور باید برنامه‌هایی مشابه با برنامه‌های تشویقی در حوزه‌ی انرژی، برای هارمونیک نیز اجرا نمود. روش پیشنهادی، استفاده از قیمت‌گذاری هارمونیکی به‌منظور دریافت پاسخ تقاضای صحیح از سمت مشترکین می‌باشد. با قیمت‌گذاری هارمونیکی، 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 هزینه ی تعیین‌شده 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 کند. با این سازوکار، شبکه از لحاظ هارمونیکی وضعیت بسیار بهتری پیدا خواهدکرد. نوآوری این مقاله، استفاده از پاسخ تقاضای هارمونیکی به‌منظور کنترل سطح هارمونیک شبکه با استفاده از قیمت‌گذاری هارمونیکی می‌باشد. آنچه در این‌جا اهمیت دارد، عادلانه‌بودن روند قیمت‌گذاری می‌باشد که در این مقاله بادرنظرگرفتن سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی اتصال، این مهم نیز برآورده شده‌است. لازم به ذکر است که این موضوع با وجود اهمیت زیاد، در هیچ یک از کارهای قبلی مورد توجه قرار نگرفته‌است و به‌عنوان ایده اصلی در روند قیمت‌گذاری هارمونیکی مورد استفاده قرار گرفته‌است.

با دانستن وضعیت آلودگی هارمونیکی در نقطه‌ی PCC، فیلتر موردنیاز برای کاهش میزان THD به مقدار مجاز قابل طراحی خواهدبود. بنابراین، پیش‌بینی صحیح میزان بار هارمونیکی مشترک، در تعیین ظرفیت مناسب فیلتر مؤثر است. باتوجه‌به 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. علاوه‌براین، 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. براین‌اساس، با نصب فیلتر مناسب، هزینه‌ی سالیانه فیلتر طبق رابطه‌ی زیر قابل محاسبه خواهدبود[۲۶]:

$$F_{it} = F_{it0}\left[\frac{i_r(1+i_r)^{D_y}}{(1+i_r)^{D_y}-1}\right] \quad (۱۳)$$

که $F_{it}$ هزینه‌ی سالیانه‌ی فیلتر(سال/$)، $i_r$ نرخ سالیانه‌ی رشد پول، $Dy$ عمر فیلتر بر سحب سال و $F_{it0}$ هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه فیلتر($) می‌باشد. با فرض این‌که مقدار بار هارمونیکی در طول سال، ثابت و برابر با $a$ MVA باشد، انرژی هارمونیکی مصرفی مشترک در طول سال برابر با $a$×8760 MVAh می‌باشد. بنابراین هزینه‌ی فیلتر هارمونیکی برای هر MVAh انرژی هارمونیکی(FCE[۷]) مصرفی طبق معادله (۱۴) خواهدبود.

$$FCE = \frac{F_{it}}{a \times 8760} \left(\frac{\$}{MVAh}\right) \quad (۱۴)$$

که $FCE$ برحسب $/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 هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی اتصال، کمتر از ٪ ۱۰۰ می‌باشد. بنابراین قسمتی از این هزینه باید برعهده متولی شبکه یا سایر مشترکین باشد. بنابراین معادله‌ی (۱۳) باید در سهم هارمونیکی مشترک که معمولاً عددی بین ۰ تا ۱ است ضرب شود. هزینه‌ی واقعی پرداختی توسط مشترک به‌ازای هر MVAh انرژی هارمونیکی(CCFC[۸]) برابر خواهدبود با:

$$CCFC = \frac{F_{it}}{a \times 8760} \times HC_c \left(\frac{\$}{MVAh}\right) \quad (۱۵)$$

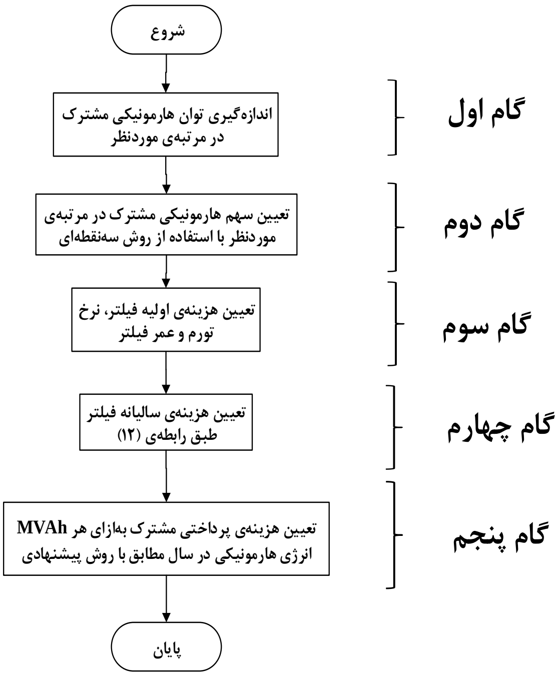
که $HC_c$ سهم متوسط مشترک در آلودگی هارمونیکی نقطه اتصال مشترک در طول یک سال می‌باشد که از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود. همچنین $CCFC$ هزینه‌ی $/MVAh در هر سال برای مشترک می‌باشد.

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

فلوچارت قیمت‌گذاری هارمونیکی طبق روش پیشنهادی ارائه‌شده در بخش‌های قبلی در شکل ۴ نشان داده شده‌است. روند کار در این فلوچارت به چند گام به‌صورت زیر تقسیم شده‌است:

- **گام اول:** اندازه‌گیری‌های لازم به‌منظور ثبت ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC انجام می‌شود.
- **گام دوم:** با استفاده از روش سه‌نقطه‌ای، تعیین سهم هارمونیکی انجام می‌شود و سهم مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی اتصال مشخص می‌گردد.
- **گام سوم:** باتوجه‌به میزان آلودگی هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی اتصال، فیلتر موردنیاز طراحی‌شده و هزینه‌ی سرمایه‌گذاری فیلتر به همراه نرخ تورم سالیانه و عمر فیلتر تعیین می‌شود.
- **گام چهارم:** هزینه‌ی سالیانه‌ی فیلتر محاسبه می‌گردد.

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




**شکل ۴: فلوچارت روش پیشنهادی قیمت‌گذاری هارمونیکی**

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

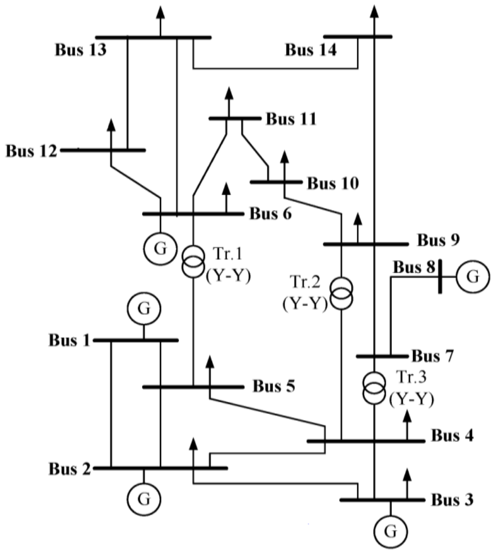
در این قسمت، نتایج شبیه‌سازی به‌منظور قیمت‌گذاری هارمونیکی و بررسی اندیس پیشنهادی ارائه شده‌است. برای بررسی عمل‌کرد الگوریتم پیشنهادی، دو سناریو به‌صورت زیر تعریف شده‌است:

۱- **سناریوی ۱:** بارهای هارمونیکی شبکه، دارای نوسانات جزئی حول مقدار متوسط خود می‌باشند و به‌جز مؤلفه‌ی اصلی، تنها هارمونیک مؤلفه پنجم در شبکه وجود دارد.

۲- **سناریوی ۲:** علاوه‌بر هارمونیک مرتبه پنجم، هارمونیک مرتبه هفتم نیز به شبکه تزریق شده‌است و اندیس THC مدنظر قرار گرفته شده‌است.

### ۵-۱- شبکه موردمطالعه

به‌منظور بررسی روش پیشنهادی برای تعیین سهم، مطالعات شبیه‌سازی برروی شبکه‌ی استاندارد ۱۴ باسه IEEE انجام شده‌است. نمایی از این شبکه در شکل ۵ نشان داده شده‌است. اطلاعات شبکه از [۲۷] اقتباس شده‌است. در این شبکه باس‌های شماره۷ و ۸ دارای سطح ولتاژ ۱۱ kV می‌باشند، باس‌های شماره۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ در سطح ولتاژ ۱۳۲ kV می‌باشند و سایر باس‌های شبکه در سطح ولتاژ ۳۳ kV کار می‌کنند. مطالعات شبیه‌سازی به‌وسیله نرم‌افزارهای Digsilent و Matlab انجام شده‌است. همانطورکه قبلاً نیز به آن اشاره شد، تعیین سهم هارمونیکی در هر مرتبه‌ی هارمونیکی به‌صورت جداگانه صورت می‌گیرد. بدین‌منظور و به‌عنوان نمونه، بارهای غیرخطی با هارمونیک پنجم درنظر گرفته شده است. همچنین، باس۲ به عنوان نقطه‌ی PCC درنظر گرفته شده‌است. درنهایت باس‌های شماره ۴ و ۹ به عنوان باس‌های تزریق‌کننده‌ی هارمونیکی شبکه انتخاب شده‌اند.




**شکل ۵: نمایی از شبکه استاندارد ۱۴ باسه IEEE**

در این مقاله، جریان‌های هارمونیکی اضافه‌شده به باس‌های ۲، ۴ و ۹، به صورت یک نسبت $I_5/I_1$ درنظر گرفته شده‌است که $I_1$ و $I_5$ در این نسبت، به‌ترتیب 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 هارمونیکی |
|---|---|---|---|
| باس شماره ۲ | ۱۰۹ | ۳۰ | ۱۰ |
| باس شماره ۴ | ۲۰۹ | ۲۰ | ۰/۵ |
| باس شماره ۹ | ۵۹۲ | ۱۰ | ۰/۵ |

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

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

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

به‌منظور محاسبه‌ی امپدانس هارمونیکی سمت شبکه با استفاده از روش سه‌نقطه‌ای، به داده‌های ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC نیاز است. بدین منظور با استفاده از زبان برنامه‌نویسی نرم‌افزار Digsilent (DPL[۹])، تعدادی نمونه‌ی ولتاژ و جریان هارمونیکی در مرتبه پنجم، برای باس شماره ۲ تولید شده‌است. این نمونه‌ها باتوجه‌به نوسانات بارها طبق جدول ۱، دارای اختلافات اندکی هستند. تعداد نمونه‌های ولتاژ و جریان تولید شده ۳۵۴ نمونه می‌باشد. به‌عبارت‌دیگر، باتوجه‌به این‌که در روش سه‌نقطه‌ای از هر ۳ نمونه‌ی اندازه‌گیری‌شده، یک امپدانس محاسبه می‌شود، تعداد نمونه‌های امپدانس محاسبه‌شده برابر با ۱۱۸ نمونه می‌باشد. باتوجه‌به این‌که متوسط جریان هارمونیکی بارها ثابت فرض شده‌است، این نتایج قابل‌تعمیم 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 سه‌نقطه‌ای به دست آمده‌است ترسیم شده‌است. در این شکل، اندازه و فاز امپدانس سمت شبکه باتوجه‌به تغییرات درنظر گرفته‌شده برای بارها، تغییرات کمی خواهدداشت. در جدول ۲ اطلاعات بیشتری درباره اندازه و فاز محاسبه‌شده با استفاده از روش سه‌نقطه‌ای آمده‌است. مطابق با این جدول، اندازه و زاویه‌ی امپدانس هارمونیکی معادل سمت شبکه از دید باس ۲، به‌ترتیب 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 هارمونیکی درنظر گرفته شده‌است.

**جدول ۲: اطلاعاتی درباره اندازه و فاز امپدانس هارمونیکی سمت شبکه محاسبه‌شده با استفاده از روش سه‌نقطه‌ای**

| | میانگین | واریانس | مقدار کمینه | مقدار بیشینه |
|---|---|---|---|---|
| اندازه (اهم) | 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 هارمونیکی سمت شبکه از دید باس شماره۲**

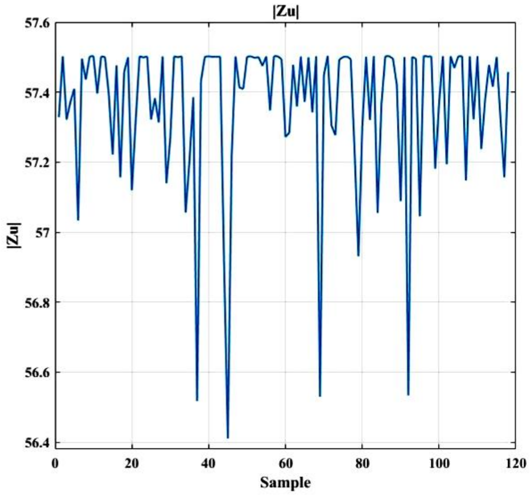
| میانگین(V) | واریانس(V) | مقدار کمینه(V) | مقدار بیشینه(V) |
|---|---|---|---|
| ۲۵۴/۳۴۰۳ | ۱/۳۴۳۲ | ۲۵۳/۵۶۳۶ | ۲۵۴/۳۸۶۸ |

با داشتن امپدانس هارمونیکی سمت شبکه، اندازه‌ی منبع هارمونیکی 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 هارمونیکی سمت شبکه از دید باس شماره۴ نشان داده شده‌است.

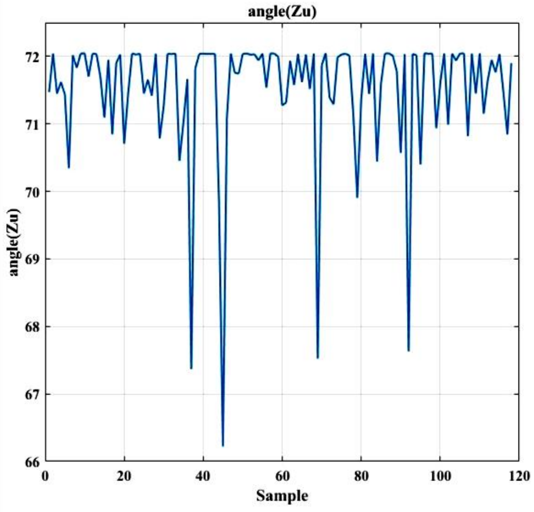
## ۵-۳- صحت‌سنجی نتایج تعیین امپدانس

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

نتایج مقایسه روش سه‌نقطه‌ای با نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار Digsilent در جدول ۴ نشان داده شده‌است.

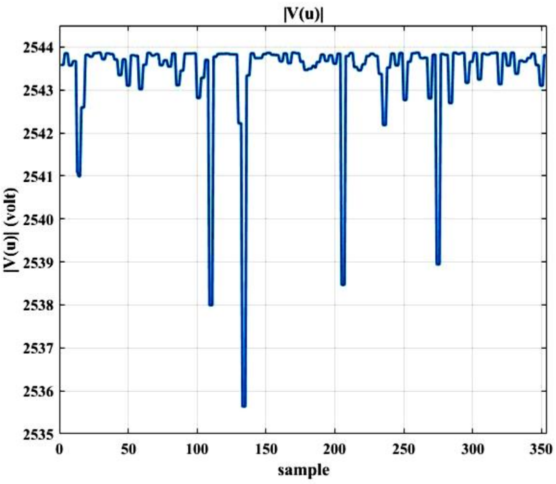



(الف)

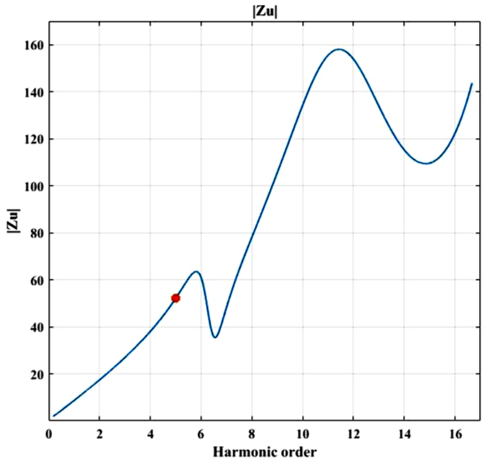



(ب)

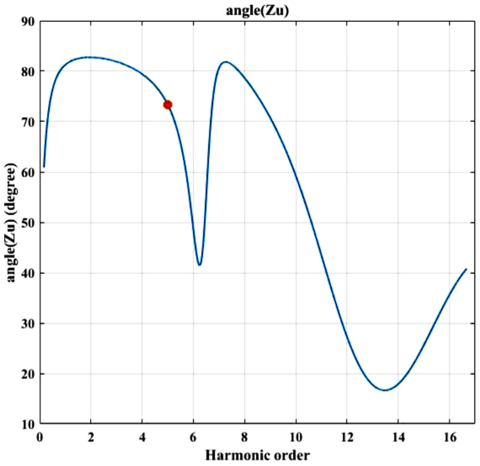
**شکل ۶: امپدانس هارمونیکی سمت شبکه محاسبه‌شده با استفاده از روش سه‌نقطه‌ای الف: اندازه(اهم) ب: زاویه(درجه)**




**شکل ۷: اندازه‌ی منبع ولتاژ هارمونیکی سمت شبکه از دید باس شماره۲**




**(الف)**




**(ب)**

**شکل ۸: منحنی مشخصه امپدانسی شبکه از دید باس شماره۲**
**الف: منحنی اندازه(اهم)  ب: منحنی فاز(درجه)**

**جدول ۴: مقایسه‌ی اندازه و فاز امپدانس هارمونیکی سمت شبکه**

| | مقدار واقعی (مشخصه امپدانسی) | روش سه‌نقطه‌ای |
|---|---|---|
| اندازه | ۵۲/۱۶۴۱ | ۵۷/۳۶۳۵ |
| درصد خطا(٪) | - | ۹/۹۶۷۳ |
| فاز(درجه) | ۷۳/۳۳۲۴ | ۷۱/۵۱۵۲ |
| درصد خطا(٪) | - | ۲/۴۷۸۰ |

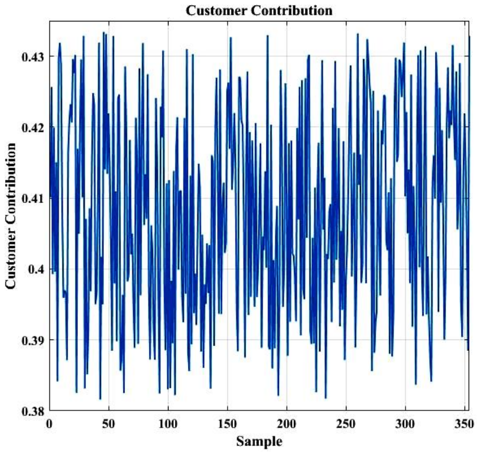
همان‌طورکه در این جدول مشاهده می‌شود، میزان خطای روش سه‌نقطه‌ای در محاسبه‌ی اندازه‌ی امپدانس هارمونیکی سمت شبکه، حدود ۱۰ درصد است. باتوجه‌به این‌که در اندازه‌گیری‌های ولتاژ و جریان استفاده شده در روش سه‌نقطه‌ای، تغییراتی به بارهای هارمونیکی اضافه شده‌است، این مقدار خطا قابل قبول است. همچنین، در روش سه‌نقطه‌ای مقدار به‌دست‌آمده برای امپدانس هارمونیکی تنها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری بوده‌است. در عمل باتوجه‌به این‌که مدل دقیق و کاملی از شبکه دردسترس نمی‌باشد، استفاده از روش سه‌نقطه‌ای که تنها به داده‌های اندازه‌گیری نیاز دارد، مطلوب می‌باشد.

## ۵-۴- تعیین سهم هارمونیکی

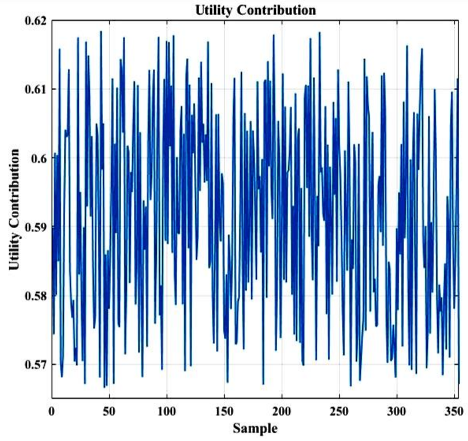
با به‌دست‌آمدن امپدانس و منبع هارمونیکی معادل سمت شبکه، و با داشتن مقادیر ولتاژ و جریان نقطه‌ی اتصال مشترک، تعیین سهم هارمونیکی مشترک و شبکه امکان‌پذیر خواهدبود. در شکل ۹ به‌ترتیب سهم هارمونیکی مشترک و شبکه در این مورد مطالعه نشان داده شده‌است. همچنین، اطلاعات بیشتر درباره سهم هارمونیکی از دید باس شماره ۴ و برای هر یک از طرفین مشترک و شبکه در جدول ۵ ذکر شده‌است. باتوجه‌به این‌که سطح بار هارمونیکی مشترک و شبکه تقریباً ثابت است و نوسانات کمی دارد، میزان سهم هارمونیکی 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 آمده‌است، آن را تأیید می‌کند.

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

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




(الف)




(ب)

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

## ۵-۵- تعیین قیمت‌گذاری هارمونیکی

با مشخص‌شدن سهم هارمونیکی مشترک و شبکه در آلودگی هارمونیکی ولتاژ نقطه‌ی اتصال، شرایط برای قیمت‌گذاری هارمونیکی بر اساس یک سطح بار به‌صورت عادلانه برقرار است.

به‌منظور تخمین توان فیلتر برای قیمت‌گذاری، ابتدا توان هارمونیکی نقطه‌ی PCC مطابق زیر محاسبه می‌شود.

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

که اندیس‌های *، $ph$ و $h$ به‌ترتیب به عمل‌گر مزدوج مختلط، فاز به زمین و مرتبه‌ی هارمونیکی اشاره دارند. با استفاده از این رابطه، اندازه متوسط توان ظاهری هارمونیکی باس شماره۲ در مرتبه‌ی هارمونیکی پنجم، ۰/۳۶۹۱۲۴ MVA می‌باشد.

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

هزینه تقریبی فیلترها برای دو نوع فیلتر Fixed Passive Filter وPassive Switched Filter به‌ازای هر kVA به‌ترتیب برابر ۲۹ $\frac{\$}{kVA}$ و ۴۰/۶ $\frac{\$}{kVA}$ در نظر گرفته شده‌است.

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

**جدول ۶: نتایج قیمت‌گذاری هارمونیکی در باس شماره۲**

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

بنابراین با استفاده از فیلتر Fixed Passive Filter، مشترک باید به ازای مصرف هر MVAh انرژی هارمونیکی در سال، مبلغ ۰/۱۳۳۳$ را به متولی شبکه پرداخت نماید. درصورتی‌که از فیلترهای Passive Switched Filter استفاده شود، این مبلغ به ۰/۱۸۶۶$ افزایش می‌یابد. لذا باتوجه‌به شفافیت روند قیمت‌گذاری، أخذ هزینه‌ی فیلتر از مشترکین باتوجه‌به سهم آن‌ها ممکن خواهدبود. با اجرای طرح، مشترکین به دو صورت واکنش نشان خواهندداد. یک سری از مشترکین در محل اتصال خود به شبکه، اقدام به نصب فیلتر می‌کنند که باعث کاهش هارمونیک منتشرشده در شبکه می‌شود. بعضی از مشترکین نیز به پرداخت هزینه ی انتشار هارمونیک رضایت می‌دهند. دراین‌صورت متولی شبکه از محل جمع اعتبارات ناشی از پرداخت جریمه‌ها، اقدام به نصب فیلتر هارمونیکی خواهدنمود. درنتیجه با اجرای این طرح، یک پاسخ بار هارمونیکی[۱۰] از سمت مشترکین دریافت می‌شود که به بهبود وضعیت هارمونیکی شبکه منجر می‌شود.

## ۵-۶- بررسی اندیس پیشنهادی THC

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

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

| مکان | جریان بار خطی(A) | نسبت $I_5/I_1$ اضافه شده (درصد) | نسبت $I_7/I_1$ اضافه شده (درصد) |
|---|---|---|---|

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

به‌منظور محاسبه‌ی اندیس THC لازم است که در گام اول برای مرتبه‌های هارمونیکی موجود، تعیین سهم به‌صورت 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 هارمونیکی در این مورد مطالعه به‌ترتیب در جدول‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌است.

**جدول ۸: نتایج پخش بار هارمونیکی در باس شماره۲**

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

**جدول ۹: اندیس THC در باس شماره۲**

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

همان‌طورکه در جدول ۹ آمده است، باتوجه‌به این‌که IHD5 بیشتراز IHD7 است، اندیس THC به سهم‌های به‌دست‌آمده برای مرتبه‌ی پنجم نزدیک‌تر است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی برای کنترل هارمونیک شبکه با استفاده از قیمت‌گذاری هارمونیکی ارائه شده‌است. باتوجه‌به استفاده از تعیین سهم هارمونیکی برای قیمت‌گذاری، مسئله کاملاً شفاف بوده و رضایت مشترکین را درپی خواهدداشت. روش تعیین سهم براساس روش سه‌نقطه‌ای می‌باشد که از اندازه‌گیری ولتاژ و جریان نقطه‌ی PCC استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی، کارآیی روش سه‌نقطه‌ای در محاسبه ی امپدانس سمت شبکه و تعیین سهم هارمونیکی را نشان می‌دهد. همچنین قیمت‌گذاری هارمونیکی براساس تعیین سهم هارمونیکی، نشان‌گر رعایت عدالت در روند قیمت‌گذاری می‌باشد که پاسخ مناسب مشترک مبنی‌بر کنترل هارمونیک را در پی خواهدداشت. درنتیجه با پیاده‌سازی این طرح و با توجه به پاسخ مشترکین، وضعیت هارمونیکی شبکه در مدت کوتاهی بهبود پیدا خواهدکرد و هزینه‌ی مربوطه توسط مشترکین پرداخت می‌شود. همچنین، اندیس جدید معرفی‌شده به‌خوبی سهم هارمونیکی مشترک و شبکه را در کل آلودگی هارمونیکی نقطه‌ی اتصال نشان می‌دهد. به‌منظور ادامه کار می‌توان نسبت به ارائه روندی برای تعیین سهم مشترکین در سایر نقاط شبکه و همچنین، شناسایی نقطه‌ی بهینه برای شروع فیلترگذاری 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.

[۲] میلاد دلالی، علیرضا جلیلیان، «محاسبه آلودگی هارمونیکی و میان‌هارمونیکی ژنراتورهای القائی 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، «خازن‌گذاری بهینه در شبکه توزیع دارای اغتشاش هارمونیکی 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. Esmaeili, 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. Esmaeili, 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.

[20] Z. Lin, et al., “Economic evaluation of harmonic cost” in IEEE 8th international conference on Power Electronics and Motion Control(IPEMC-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.

[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.

## زیرنویس‌ها

1 Point of Common Coupling
2 invasive
3 noninvasive
4 Total Harmonic Contribution
5 Individual Harmonic Distortion
6 Total Harmonic Distortion
7 Filter Cost for Each MWh
8 Customer Contribution of Filter Cost for each MVAh
9 Digsilent Programming Language
10 Harmonic Demand Response