یک رویکرد چندهدفه جدید برای برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو قدرت با بهره‌گیری از الگوریتم جستجوی ملودی و روش رضایت‌مندی فازی

محمد کیانی‌مقدم[1]، احمد سالم‌نیا[1]، مجتبی شیوایی[1]، محمدتقی عاملی[1]

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی- تهران- ایران.
m.kiani.moghaddam@gmail.com, a_salemnia@sbu.ac.ir, m_shivaie@sbu.ac.ir, m_ameli@sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، با یک دیدگاه جدید، یک رویکرد چندهدفه خلاقانه برای برنامه‌ریزی نصب فیلترهای اکتیو قدرت در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی ارائه می‌شود. در رویکرد پیشنهادی، اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ، تابع تلفات موتورهای الکتریکی، تلفات هارمونیکی خط انتقال و مجموع جریان‌های فیلترهای اکتیو قدرت به‌عنوان شاخص‌های در نظر گرفته‌شده در مسئله بهینه سازی چندهدفه می‌باشند، درحالی‌که اعوجاج هارمونیکی کل و تکی ولتاژ و حداکثر اندازه مجاز فیلترهای اکتیو قدرت به‌عنوان قیود مسئله در نظر گرفته شده‌اند. رویکرد پیشنهادی یک مسئله بهینه‌سازی غیر محدب است که دارای ماهیت غیرخطی و آمیخته با اعداد صحیح می‌باشد. از این رو، جهت دستیابی به مجموعه جواب بهینه پارتو از الگوریتم جستجوی ملودی، و به‌منظور انتخاب جواب بهینه نهایی از روش رضایت‌مندی فازی استفاده می‌گردد. امکان‌سنجی و اثربخشی رویکرد چندهدفه پیشنهادی در برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو قدرت توسط چندین سناریو و مورد مطالعه‌ای مختلف بر روی شبکه آزمون ۱۸-باس IEEE نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی به دست آمده بیانگر قابلیت و سودمندی رویکرد جدید پیشنهادی در برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو قدرت در مقایسه با روش‌های دیگر است.

واژه‌های کلیدی: اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ، الگوریتم جستجوی ملودی، تابع تلفات موتورهای الکتریکی، تلفات هارمونیکی خط انتقال، روش رضایت‌مندی فازی، فیلترهای اکتیو قدرت، مجموع جریان‌های فیلترهای اکتیو قدرت.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۴/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۵/۰۱/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر احمد سالم‌نیا

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تهران– فلکه چهارم تهرانپارس- بلوار وفادار شرقی- بلوار بهار- پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور- دانشگاه شهید بهشتی.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

۱- مقدمه

۱-۱- سابقه و انگیزه

در سال‌های اخیر، گسترش روزافزون تجهیزات مبتنی بر الکترونیک قدرت و بارهای غیرخطی (منابع مولد هارمونیک) منجر به افزایش سطح اعوجاج‌های هارمونیکی ولتاژ و جریان در شبکه‌های توزیع توان الکتریکی[۱] گردیده است [۱]. جریان‌های هارمونیکی ناشی از این بارهای غیرخطی می‌توانند منجر به اعوجاج شدید شکل موج ولتاژ در نقطه اتصال مشترک[۲]، نوسانات گشتاور، افزایش تلفات، کاهش عمر مفید ادوات و سایر موارد گردند [۱]. به‌طور سنتی، فیلترهای قدرت پسیو[۳] R-L-C به‌منظور کاهش هارمونیک‌ها در EPDNs بکار گرفته می‌شوند [۲]. به‌طورکلی، PPFs دارای معایبی از قبیل، اندازه بزرگ، رزونانس‌های سری و موازی، جبران‌سازی ثابت و کاربرد تنها برای هارمونیک خاص می‌باشند [۳]. بنابراین، به‌منظور غلبه بر مشکلات PPFs فیلترهای قدرت اکتیو[۴] توسعه داده‌شده‌اند [۴]. به‌طورکلی، APFs جریان‌هایی با اندازه برابر ولی مخالف به داخل PCC از EPDNs تزریق می‌کنند، که با مؤلفه‌های هارمونیکی کل به‌منظور از بین بردن مؤلفه‌های غیر سینوسی بارهای غیرخطی جمع می‌شوند [۶-۴]. هدف از به‌کارگیری APFs در EPDNs، جبران‌سازی هارمونیک‌ها، توان راکتیو، فلیکر، توالی منفی و سایر موارد است. با توجه به قابلیت‌ها و توانایی‌های APFs، به‌ویژه در حذف هارمونیک‌ها مطالعات زیادی در دهه‌های اخیر بر روی APFs متمرکزشده است [۱۲-۴].

۱-۲- پیشینه تحقیق

مدل‌های ریاضی بسیاری برای حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در منابع سیستم‌های قدرت وجود دارند. مدل‌های ارائه‌شده می‌توانند به‌عنوان دو نوع از توابع هدف و دو نوع از محدودیت‌ها طبقه‌بندی شوند [۱۲-۷]. نوع اول توابع هدف سعی در مینیمم کردن اعوجاج‌های ولتاژ به‌منظور کاهش اثرات نامطلوب اعوجاج‌های هارمونیکی در EPDNs می‌باشند. نوع دیگر از توابع هدف استفاده از استانداردهای هارمونیکی بر روی اعوجاج هارمونیکی ولتاژ و سطوح THD به‌منظور مینیمم کردن ظرفیت APFs می‌باشند. مسئله برنامه‌ریزی APFs در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی اساساً یک مسئله بهینه‌سازی پیچیده است که توابع هدف مختلفی از قبیل، اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ[۵]، اعوجاج هارمونیکی کل جریان[۶]، تلفات هارمونیکی خط انتقال[۷]، مجموع جریان‌های فیلترهای اکتیو قدرت[۸]، تابع تلفات موتورهای الکتریکی[۹] و سایر موارد در آن می‌توانند موردمطالعه قرار گیرند [۱۲-۷]. قیود نیز به دودسته تقسیم می‌گردند. دسته اول، محدودیت‌های مرتبط با استانداردهای هارمونیکی اعمال‌شده بر سطوح هارمونیک‌های ولتاژ مطابق با استاندارد IEEE-۵۱۹ و دسته دوم، محدودیت‌های مرتبط با حداکثر جریان APFs می‌باشند [۱۲-۷].

از سوی دیگر، بهینه‌سازی مسئله برنامه‌ریزی APFs در EPDNs یک مسئله بهینه‌سازی بسیار پیچیده است که در دهه‌های اخیر، تعداد زیادی از تکنیک‌های بهینه‌سازی تکاملی به‌منظور حل مسئله برنامه‌ریزی APFs از قبیل الگوریتم ژنتیک[۱۰] [۸]، الگوریتم ازدحام ذرات گسسته[۱۱] [۱۳،۱۰،۷]، الگوریتم ازدحام ذرات گسسته اصلاح‌شده[۱۲] [۹]، الگوریتم کرم شب‌تاب گسسته بهبودیافته[۱۳] [۱۲] و سایر موارد مورداستفاده قرارگرفته است. مقایسه ویژگی‌های برخی از انتشارات گزارش‌شده درزمینه برنامه‌ریزی APFs در EPDNs و رویکرد پیشنهادی در این مطالعه به‌طور خلاصه در جدول (۱) ارائه‌شده است.

جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های برخی از انتشارات فنی گزارش‌شده در مراجع و رویکرد پیشنهادی در این مطالعه درزمینه برنامه‌ریزی APFs

مرجع / ویژگی	[۷]	[۸]	[۱۰]	[۱۲]	رویکرد پیشنهادی
ساختار APFs	3 APFs	1 APFs	1 APFs	1 APFs	4 APFs
تک هدفه یا چندهدفه	تک هدفه	تک هدفه	تک هدفه	چندهدفه	چندهدفه
اهداف	THDV MLLF HTLL I_{af}	THDV I_{af}	THDV I_{af}	THDV Vdev I_{af}	THDV MLLF HTLL I_{af}
حداکثر اندازه مجاز APF	بله	بله	خیر	بله	بله
رویکرد حل	DPSO	GA	MPSO	IDFA	MSA
تصمیم‌گیری چند معیاره	خیر	خیر	خیر	خیر	FSM

این مطالعات نشان می‌دهد که برخی نقاط ضعف در جبهه مدل‌سازی— از قبیل استفاده از رویکردهای تک هدفه، در نظر نگرفتن قیود فنی و اقتصادی و در جبهه تکنیک‌های بهینه‌سازی تکاملی— از قبیل دقت ناکافی، همگرایی زودرس، عدم انعطاف‌پذیری و عدم بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره[۱۴] وجود دارد.

۱-۳- نوآوری ها و سهم مشارکت

این مقاله بر یک رویکرد چندهدفه جدید به‌منظور حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در EPDNs متمرکزشده است. در رویکرد پیشنهادی، THDV، MLLF، HTLL و I_{af} به‌عنوان شاخص‌های مسئله و اعوجاج‌های هارمونیکی فردی و کلی ولتاژ و همچنین حداکثر اندازه مجاز APFs به‌عنوان محدودیت‌های مسئله در نظر گرفته‌شده‌اند. علاوه بر این، چهار نوع از APFs با مقدار جریان نامی که می‌توانند انعطاف‌پذیری در کنترل هارمونیک‌ها را افزایش بدهند در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن مجموعه جواب بهینه پارتو[۱۵]، الگوریتم جستجوی ملودی[۱۶] و برای انتخاب جواب نهایی، روش رضایت‌مندی فازی[۱۷] به کار گرفته‌شده است. نوآوری‌ها و سهم مشارکت مطالعه فوق درزمینه برنامه‌ریزی APFs در EPDNs به شرح زیر بیان می‌گردد:

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

۱) یک رویکرد چندهدفه جدید مبتنی بر THDV، MLLF، HTLL و I_{af} به‌منظور مقابله با مشکلات هارمونیک‌ها و افزایش کیفیت توان تحویلی به مشترکین در EPDNs ارائه‌شده است.

۲) انعطاف‌پذیری رویکرد پیشنهادی توسط استفاده از چهار نوع مختلف از APFs با توان نامی متفاوت درروند حل مسئله برنامه‌ریزی APFs بهبودیافته است.

۳) یک الگوریتم بهینه‌سازی بهبودیافته قدرتمند به همراه رویکرد رضایت‌مندی فازی برای غلبه بر مشکلات ماهیت غیر محدب، غیرخطی و مختلط صحیح از مسئله برنامه‌ریزی APFs و تعیین جواب بهینه نهایی استفاده‌شده است.

ادامه این مقاله در هفت بخش سازماندهی‌شده است. بخش ۲ مدل‌سازی EPDNs و APFs را توصیف می‌کند. توابع هدف و قیود مسئله برنامه‌ریزی APFs در بخش ۳ ارائه‌شده است. علاوه بر این، الگوریتم حل پیشنهادی در بخش ۴ گزارش‌شده است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۵ ارائه‌شده است. مقایسه رویکرد پیشنهادی با روش‌های بکار گرفته شده در برخی مراجع در بخش ۶ نشان داده شده است. در نهایت، بخش ۷ به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲- مدل‌سازی شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی و فیلترهای اکتیو قدرت در رویکرد پیشنهادی

۲-۱- مدل‌سازی شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی

به‌منظور مدل کردن کل سیستم، یک شبکه EPDNs با B باس را در نظر بگیرید که، هر باس می‌تواند شامل یک یا چند بار غیرخطی و همچنین می‌تواند یک باس کاندید برای نصب یک یا چند APFs باشد. همچنین، بارهای غیرخطی به‌عنوان منابع تولیدکننده هارمونیک و EPDNs به‌عنوان عناصر ادمیتانس مدل می‌شوند. ولتاژ در EPDNs با B باس برای هارمونیک مرتبه h در حضور بارهای غیرخطی و فیلترهای اکتیو می‌تواند با استفاده از روابط (۴)- (۱) محاسبه شود.

$$V^{(h)} = \left[Y^{(h)}\right]^{-1}.\left[I_{\text{nl}}^{(h)} - I_{\text{af}}^{(h)}\right]; \forall h = 1,\dots,H \quad (۱)$$

$$V^{(h)} = \left[V_{(1),r}^{(h)} + jV_{(1),i}^{(h)},\dots,V_{(B),r}^{(h)} + jV_{(B),i}^{(h)}\right]^{\text{T}}; \quad \forall h = 1,2,\dots,H; \forall b = 1,2,\dots,B \quad (۲)$$

$$I_{\text{nl}}^{(h)} = \left[I_{\text{nl},(1),r}^{(h)} + jI_{\text{nl},(1),i}^{(h)},\dots,I_{\text{nl},(B),r}^{(h)} + jI_{\text{nl},(B),i}^{(h)}\right]^{\text{T}}; \quad \forall h = 1,2,\dots,H, \forall b = 1,2,\dots,B \quad (۳)$$

$$I_{\text{af}}^{(h)} = \left[I_{\text{af},(1),r}^{(h)} + jI_{\text{af},(1),i}^{(h)},\dots,I_{\text{af},(B),r}^{(h)} + jI_{\text{af},(B),i}^{(h)}\right]^{\text{T}}; \quad \forall h = 1,2,\dots,H, \forall b = 1,2,\dots,B \quad (۴)$$

در روابط (۱) الی (۴) داریم:

h شاخصی برای مرتبه هارمونیک.

H مجموعه‌ای از مرتبه هارمونیک‌های در نظر گرفته‌شده.

b شاخصی برای شماره باس.

B مجموعه‌ای از باس‌های کاندید در نظر گرفته‌شده.

$V^{(h)}$ ماتریس ولتاژ شبکه برای هارمونیک مرتبه h.

$Y^{(h)}$ ماتریس ادمیتانس شبکه برای هارمونیک مرتبه h.

$I_{\text{nl}}^{(h)}$ ماتریس جریان بارهای غیرخطی برای هارمونیک مرتبه h.

$I_{\text{af}}^{(h)}$ ماتریس جریان APFs برای هارمونیک مرتبه h.

$V_{(b),r}^{(h)}$ بخش حقیقی ولتاژ در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

$V_{(b),i}^{(h)}$ بخش موهومی ولتاژ در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

$I_{\text{nl},(b),r}^{(h)}$ بخش حقیقی جریان بار غیرخطی در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

$I_{\text{nl},(b),i}^{(h)}$ بخش موهومی جریان بار غیرخطی در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

$I_{\text{af},(b),r}^{(h)}$ بخش حقیقی جریان APF در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

$I_{\text{af},(b),i}^{(h)}$ بخش موهومی جریان APF در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

۲-۲- مدل‌سازی فیلترهای اکتیو قدرت

در این مقاله، مدل پیشنهادی برای APFs، یک منبع جریان است که جریان هارمونیکی به داخل PCC از EPDNs تزریق می‌کند [۱۲-۷]. مدل فازور از APFs با استفاده از رابطه (۵) ارائه‌شده است.

$$I_{\text{af},(b)}^{(h)} = I_{\text{af},(b),r}^{(h)} + jI_{\text{af},(b),i}^{(h)}; \quad \forall h = 2,3,\dots,H, \forall b = 1,2,\dots,B \quad (۵)$$

در رابطه (۵) داریم:

$I_{\text{af},(b)}^{(h)}$ جریان APF در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

$I_{\text{af},(b),r}^{(h)}$ بخش حقیقی جریان APF در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

$I_{\text{af},(b),i}^{(h)}$ بخش موهومی جریان APF در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

میزان جریان RMS از APF می‌تواند توسط رابطه (۶) تعریف شود.

$$I_{\text{af},(b)} = \sqrt{\sum_{h=1}^{H}\left(I_{\text{af},(b),r}^{(h)}\right)^2 + \left(I_{\text{af},(b),i}^{(h)}\right)^2}; \quad \forall h = 2,3,\dots,H, \forall b = 1,2,\dots,B \quad (۶)$$

۳- مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو قدرت در شبکه‌های توزیع الکتریکی

رویکرد چندهدفه پیشنهادی در این مقاله، به‌طور همزمان چهار هدف THDV، MLLF، THLL و I_{af} را کمینه خواهد کرد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

۳-۱- اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ

در این مطالعه، تابع وابسته THDV یک فرمول رایج استفاده‌شده در بسیاری از مراجع در این زمینه است [۱۲-۷]. بنابراین، شاخص THDV با استفاده از رابطه (۷) تعریف‌شده است.

$$\mathrm{OF}_{\mathrm{THDV}} = \sum_{b=1}^{B} THDV_{(b)}; \forall b = 1,2,...,B \qquad (۷)$$

درجایی که:

$$THDV_{(b)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H} \left|V_{(b)}^{(h)}\right|^2}}{\left|V_{(b)}^{(1)}\right|}; \qquad (۸)$$
$$\forall h = 2,3,...,H, \forall b = 1,2,...,B$$

در روابط (۷) و (۸) داریم:

THDV اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ.

$THDV_{(b)}$ اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ در باس b.

$\left|V_{(b)}^{(h)}\right|$ دامنه ولتاژ در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

$\left|V_{(b)}^{(1)}\right|$ دامنه ولتاژ در باس b برای فرکانس اصلی.

۳-۲- تابع تلفات موتورهای الکتریکی

هارمونیک‌های ولتاژ اثرات نامطلوبی بر موتورهای القایی از قبیل افزایش تلفات، افزایش درجه حرارت کاری، کاهش عمر و سایر موارد دارند [۷]. از نتایج پیش‌بینی‌شده و اندازه‌گیری شده، رابطه بین تلفات موتور و هارمونیک‌های ولتاژ می‌تواند به‌صورت زیر خلاصه شود:

۱) تلفات تقریباً با عکس مرتبه هارمونیک متناسب است.

۲) تلفات تقریباً با مربع دامنه هارمونیک متناسب است.

ازاین‌رو، در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیرات فوق، شاخص MLLF با استفاده از رابطه (۹) توصیف‌شده است.

$$\mathrm{OF}_{\mathrm{MLLF}} = \sum_{b=1}^{B} MLLF_{(b)}; \forall b = 1,2,...,B \qquad (۹)$$

درجایی که:

$$MLLF_{(b)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H} \left(\left|V_{(b)}^{(h)}\right|^2 / h\right)}}{\left|V_{(b)}^{(1)}\right|}; \qquad (۱۰)$$
$$\forall h = 2,3,...,H, \forall b = 1,2,...,B$$

در روابط (۹) و (۱۰) داریم:

MLLF تابع تلفات موتورهای الکتریکی.

$MLLF_{(b)}$ تابع تلفات موتورهای الکتریکی در باس b.

۳-۳- تلفات هارمونیکی خطوط انتقال

هارمونیک‌ها همچنین دارای تأثیرات زیان‌آوری از قبیل اشغال ظرفیت انتقال، افزایش تلفات و سایر موارد بر روی سیستم‌های قدرت می‌باشند [۷]. ازاین‌رو، در این بخش، به‌منظور بررسی این تأثیرات شاخص HTLL بر اساس رابطه (۱۱) تعریف‌شده است.

$$\mathrm{OF}_{\mathrm{HTLL}} = \sum_{h=2}^{H} \mathrm{HTLL}_{(h)}; \forall h = 1,2,...,H \qquad (۱۱)$$

درجایی که:

$$HTLL_{(h)} = \sum_{h=2}^{H} \left(\sum_{b=1}^{B} \sum_{\substack{b'=1 \\ b'>b}}^{B} \frac{R_{(b),(b')}^{(h)}}{\left(Z_{(b),(b')}^{(h)}\right)^2} \left|V_{(b)}^{(h)} - V_{(b')}^{(h)}\right|^2 \right); \qquad (۱۲)$$
$$\forall b,b' = 1,2,...,B, \forall h = 2,3,...,H$$

در روابط (۱۱) و (۱۲) داریم:

HTLL تلفات هارمونیکی خطوط انتقال.

$HTLL_{(h)}$ تلفات هارمونیکی خطوط انتقال برای هارمونیک h

b' شاخصی از شماره باس.

$R_{(b),(b')}^{(h)}$ مقاومت اهمی بین باس b و b' برای هارمونیک مرتبه h.

$Z_{(b),(b')}^{(h)}$ امپدانس بین باس b و b' برای هارمونیک مرتبه h.

۳-۴- مجموع جریان‌های فیلترهای اکتیو قدرت

در این مطالعه، یکی از اهداف اصلی پاسخگویی به سطوح استاندارد هارمونیکی است، درحالی‌که، مجموع جریان‌های تزریقی توسط APFs کمینه گردد. بنابراین، شاخص I_{af} با استفاده از رابطه (۱۳) تعریف‌شده است [۱۲-۷]. شایان‌ذکر است که، هزینه‌های یک APF متناسب با جریان‌های تزریقی توسط آن است. ازاین‌رو، شاخص فوق هزینه‌های APFs نصب‌شده در EPDNs را کمینه خواهد کرد.

$$\mathrm{OF}_{\mathrm{I_{af}}} = \sum_{b=1}^{B} (I_{\mathrm{af}})_{(b)}; \forall b = 1,2,...,B \qquad (۱۳)$$

درجایی که:

$$\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)} = \sum_{b=1}^{B} \sqrt{\sum_{h=2}^{H} \left|(I_{\mathrm{af}})_{(b)}^{(h)}\right|^2}; \qquad (۱۴)$$
$$\forall h = 2,3,...,H, \forall b = 1,2,...,B$$

در روابط (۱۳) و (۱۴) داریم:

I_{af} مجموع جریان‌های APFs.

$\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}$ مجموع جریان‌های APFs در باس b.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

۳-۵- قیود مسئله برنامه‌ریزی فیلترهای اکتیو قدرت

رویکرد پیشنهادی مقید به قیودی از قبیل اعوجاج‌های هارمونیکی کل و فردی ولتاژ و حداکثر اندازه مجاز APFs به شرح زیر است.

$$I_{\mathrm{af},(b)}^{(a)} \le \overline{I_{\mathrm{af},(b)}};\ \forall b=1,2,\ldots,B,\forall a=1,2,\ldots,A \qquad (۱۵)$$

$$I_{\mathrm{af},(b)}^{(a)} \in D;\ \forall b=1,2,\ldots,B,\forall a=1,2,\ldots,A \qquad (۱۶)$$

$$\left|V_{(b)}^{(h)}\right| \le \overline{V_{(b)}^{(h)}};\ \forall b=1,2,\ldots,B,\forall h=2,3,\ldots,H \qquad (۱۷)$$

$$THDV_{(b)} \le \overline{THDV_{(b)}};\ \forall b=1,2,\ldots,B \qquad (۱۸)$$

در روابط (۱۸)-(۱۵) داریم:

a شاخصی از APFs.

A مجموعه‌ای از APFs.

$I_{\mathrm{af},(b)}^{(a)}$ جریان APF a در باس b.

$\overline{I_{\mathrm{af},(b)}}$ حداکثر جریان APF در باس b.

D مجموعه‌ای از انواع مختلف APFs در نظر گرفته‌شده.

$\overline{V_{(b)}^{(h)}}$ حداکثر مقدار مجاز ولتاژ در باس b برای هارمونیک مرتبه h.

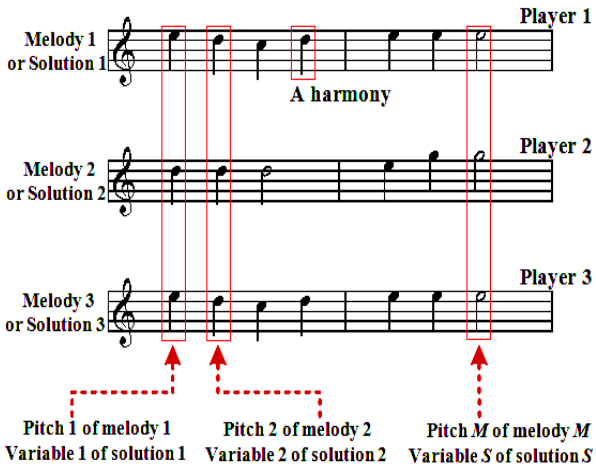
$\overline{THDV_{(b)}}$ حداکثر مقدار مجاز اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ در باس b.

معادله (۱۵) حداکثر اندازه مجاز APF a در باس b از شبکه توزیع انرژی الکتریکی را نشان می‌دهد. اندازه APFs می‌تواند به‌صورت پیوسته یا گسسته باشد. با توجه به اینکه منبع DC در ساختار APFs توسط سلف‌ها و/یا خازن‌ها که ادوات گسسته می‌باشند پیاده‌سازی می‌شود، نادیده گرفتن این محدودیت منجر به نتایج غیرعملی می‌شود. مقدار اندازه‌های APFs با کوچک‌ترین مقدار از مجموعه D، با توجه به معادله (۱۶) برابر است، D یک مجموعه از مقادیر گسسته با مقادیر صفر و مجاز است، هرزمانی که اندازه‌های APFs گسسته باشند، و همچنین D یک مجموعه از مقادیر حقیقی و غیر منفی است، مشروط بر اینکه اندازه‌های APFs پیوسته در نظر گرفته شود. روابط (۱۷) و (۱۸) به ترتیب محدودیت مرتبط با اعوجاجات هارمونیکی تکی و کلی ولتاژ در باس b از شبکه توزیع انرژی الکتریکی را تشریح می‌کنند.

۴- الگوریتم حل

۴-۱- الگوریتم جستجوی ملودی

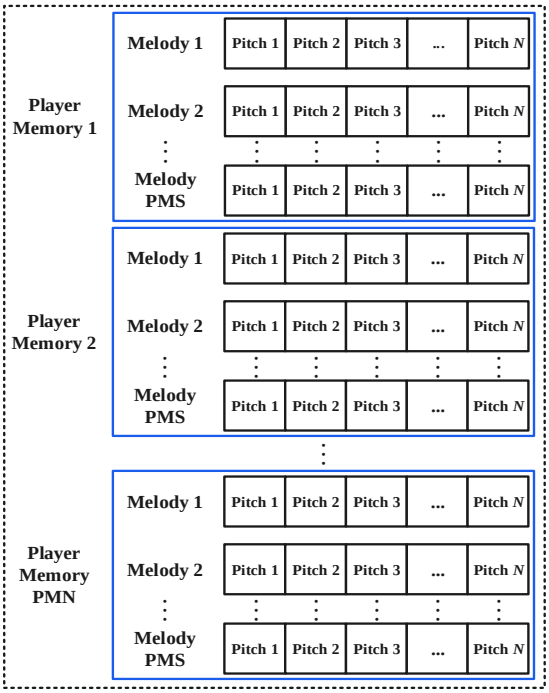
الگوریتم جستجوی ملودی یک الگوریتم فرا ابتکاری است که از پدیده‌های موسیقی الهام گرفته‌شده است، و بر اساس مفاهیم اصلی الگوریتم جستجوی هارمونی[۱۸] پایه‌گذاری شده است [۱۴]. الگوریتم جستجوی هارمونی از یک تک حافظه هارمونی استفاده می‌کند [۱۵]، درحالی‌که، الگوریتم جستجوی ملودی یک‌روند بداهه‌نوازی گروهی (به‌عنوان‌مثال، چندین حافظه که حافظه نوازنده[۱۹] نامیده می‌شود) را به‌طور همزمان برای پیدا کردن بهترین جانشینی گام‌ها در یک ملودی بکار می‌گیرد. در موسیقی، هارمونی استفاده از صدادهی‌ها یا زه‌های همزمان است و اغلب به جنبه‌های عمودی از فضای موسیقی اشاره دارد. درحالی‌که، خط ملودی اشاره به جنبه‌های افقی دارد. الگوریتم جستجوی ملودی به‌عنوان یک تکنیک بهینه‌سازی بهبودیافته جدید به‌منظور افزایش بهره‌وری الگوریتم جستجوی هارمونی پیشنهادشده است. این الگوریتم فرآیندهای اجرای موسیقی و روابط تعاملی رخداده بین اعضای گروه نوازندگان را تقلید می‌کند، درحالی‌که، آن‌ها در جستجوی بهترین مجموعه صدادهی درون یک خط ملودی می‌باشند. در چنین گروهی، وجود چندین نوازنده موسیقی باسلیقه‌ها، ایده‌ها، سبک‌ها و تجربیات مختلف می‌تواند منجر به دست‌یابی و رسیدن به بهترین توالی از سریع‌ترین صدادهی شود. شکل (۱)، نشان‌دهنده تفاوت بین ساختار هارمونی و ملودی و قیاس بین ملودی‌هایی که توسط نوازندگان موسیقی اجرا می‌شود و اجزاء و مؤلفه‌های مسئله بهینه‌سازی است. الگوریتم جدید مفاهیم اصلی الگوریتم جستجوی هارمونی را بکار گرفته اما در ساختار کاملاً متفاوت است.



شکل (۱): مقایسه بین ملودی و هارمونی و مؤلفه‌های بهینه‌سازی

برخلاف الگوریتم HSA که از یک حافظه هارمونی استفاده می‌کند، الگوریتم MSA چندین حافظه به نام حافظه نوازنده به کار می‌گیرد. حافظه‌ها با یکدیگر مانند عملکرد نوازندگان در یک گروه موسیقی ارتباط برقرار می‌کنند. علاوه بر این، در الگوریتم MSA محدوده امکان‌پذیر هر صدادهی برای انتخاب تصادفی می‌تواند از طریق تکرارهای مختلف تغییر کند. شکل (۲) ساختار حافظه ملودی[۲۰] در الگوریتم MSA را نشان می‌دهد. در MSA بردار حل "ملودی" نامیده می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، هر ملودی یک برداری است که اجزای آن مقادیر اختصاص داده‌شده به متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله بهینه‌سازی می‌باشند. درصورتی‌که مسئله بهینه‌سازی دارای N متغیر باشد، درنتیجه بردار ملودی نیز دارای N جزء خواهد بود. ارتباط متناظر بین مفاهیم موسیقی و پارامترهای الگوریتم MSA در جدول (۲) مشخص‌شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]



شکل (۲): ساختار حافظه ملودی در الگوریتم MSA

جدول (۲): ارتباط متناظر بین مفاهیم موسیقی و پارامترهای الگوریتم MSA

شماره	MSA	مفاهیم موسیقی
۱	متغیر تصمیم‌گیری	ابزار موسیقی (ساز)
۲	محدوده متغیرها	محدوده نت موسیقی (آهنگ)
۳	بردار جواب	ملودی
۴	تابع هدف	معیار زیبایی
۵	تکرار	تمرین
۶	حافظه ملودی	تجربه

بدنه اصلی الگوریتم MSA شامل دو فاز محاسباتی مختلف است. در فاز ابتدایی، هر نوازنده می‌تواند ملودی خود را بدون تأثیر دیگران بداهه‌نوازی کند، درحالی‌که در فاز دوم، الگوریتم به‌صورت یک عملکرد گروهی عمل می‌کند. ملودی‌های مختلف موجود در گروه نوازندگان می تواند نوازندگان را برای انتخاب بهتر صدادهی‌های تصادفی هدایت کند، و احتمال آهنگ‌سازی و نواختن یک ملودی بهتر در مرحله بعدی افزایش می‌یابد. مراحل اصلی الگوریتم MSA به شرح زیر است.

۴-۱-۱- فاز اول: تعیین اولیه مسئله بهینه‌سازی و اتخاذ پارامترهای الگوریتم

در این مرحله مسئله بهینه‌سازی و پارامترهای MSA مشخص می شوند، که شامل، تعداد حافظه‌های نوازنده[۲۱]، اندازه حافظه نوازنده[۲۲]، تعداد بداهه‌نوازی فاز دوم[۲۳] (معیار توقف فاز دوم)، تعداد بداهه‌نوازی فاز سوم[۲۴] (معیار توقف فاز سوم)، فاصله پهنای باند[۲۵]، نرخ ملاحظه حافظه نوازنده[۲۶]، و نرخ تنظیم صدادهی[۲۷] می‌باشند.

۴-۱-۲- فاز دوم: بداهه‌نوازی فردی

- **تعیین اولیه حافظه نوازنده‌ها:**

در این بخش، حافظه‌های نوازنده‌ها با ملودی‌های اولیه تصادفی پر می شوند. فرآیند فوق با استفاده از معادلات (۲۱)-(۱۹) توصیف‌شده است.

$$\mathrm{MM} = \left[PM_{(1)}, PM_{(2)}, \ldots, PM_{(i)} \right]^{\mathrm{T}}; \quad \forall i = 1, 2, \ldots, \mathrm{PMN} \tag{۱۹}$$

$$PM_{(i)} = \begin{bmatrix} X_{(1)}^{(1)} & \ldots & X_{(N-1)}^{(1)} & X_{(N)}^{(1)} \\ X_{(1)}^{(2)} & \ldots & X_{(N-1)}^{(2)} & X_{(N)}^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{(1)}^{(\mathrm{PMS})} & \ldots & X_{(N-1)}^{(\mathrm{PMS})} & X_{(N)}^{(\mathrm{PMS})} \end{bmatrix} \tag{۲۰}$$

$$X_{(n)}^{(j)} = LB_{(n)} + rand\left(0,1\right) * \left(UB_{(n)} - LB_{(n)}\right); \quad \forall n = 1, \ldots, N, \forall j = 1, \ldots, \mathrm{PMS} \tag{۲۱}$$

- **بداهه‌نوازی یک ملودی جدید برای هر نوازنده:**

در این بخش، برای هر نوازنده یک ملودی جدید، $x_{(i),\mathrm{new}} = \left(x_{(1)}^{(i)}, x_{(2)}^{(i)}, \ldots, x_{(N)}^{(i)}\right)$، با استفاده از روش بداهه‌نوازی جایگزین جدید[۲۸] مبتنی بر مفاهیم اصلی بداهه‌نوازی در HSA تولید می‌شود.

- **به‌روزرسانی حافظه هر نوازنده:**

در این بخش، اگر بردار ملودی جدید از بدترین بردار ملودی در حافظه نوازنده متناظر بر مبنای تابع هدف انتخابی بهتر باشد، بردار ملودی جدید داخل $\mathrm{PM}_{(i)}$ قرارگرفته و بدترین بردار ملودی موجود از مجموعه $\mathrm{PM}_{(i)}$ کنار گذاشته می‌شود. روند این فرآیند توسط رابطه (۲۲) بیان می‌شود.

$$x_{(i),\mathrm{worst}} = x_{(i),\mathrm{new}}; if\ f\left(x_{(i),\mathrm{new}}\right) < f\left(x_{(i),\mathrm{worst}}\right); \quad \forall i = 1, 2, \ldots, \mathrm{PMN} \tag{۲۲}$$

- **بررسی معیار توقف فاز دوم:**

اگر معیار توقف فاز دوم (حداکثر تعداد بداهه‌نوازی) برآورده شود، محاسبات فاز دوم پایان‌یافته و در غیر این صورت بخش‌های دوم و سوم از فاز دوم تکرار می‌گردند.

۴-۱-۳- فاز سوم: بداهه‌نوازی گروهی

- **بداهه‌نوازی یک ملودی جدید برای هر نوازنده با توجه به محدوده امکان‌پذیر صدادهی‌ها:**

در این بخش، یک ملودی جدید با استفاده از روش AIP برای هر نوازنده با توجه به محدوده امکان‌پذیر صدادهی‌ها بداهه‌نوازی می‌شود. شایان‌ذکر است که، محدوده امکان‌پذیر صدادهی‌ها می‌تواند از طریق تکرارهای مختلف متفاوت باشد.

- **به‌روزرسانی حافظه هر نوازنده:**

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

در این بخش، مجدداً درصورتی‌که بردار ملودی جدید بداهه‌نوازی شده برای نوازنده i از بدترین بردار ملودی در $PM_{(i)}$ بر مبنای تابع هدف انتخابی بهتر باشد، بردار ملودی جدید داخل $PM_{(i)}$ قرارگرفته و بدترین ملودی از مجموعه $PM_{(i)}$ کنار گذاشته می‌شود (رابطه (۲۲)).

- **تعیین محدوده‌های امکان‌پذیر صدادهی برای بداهه‌نوازی بعدی (فقط برای تصادفی):**

یک تفاوت عمده بین الگوریتم‌های MSA و HSA در این بخش وجود دارد. در فاز دوم، بهترین متغیرهای ملودی از هر نوازنده ذخیره می‌شوند، و محدوده‌های امکان‌پذیر جدید برای هر متغیر تصمیم‌گیری می‌تواند برای تصادفی سازی بعدی به شرح زیر محاسبه شوند.

شبه کد برای تعیین محدوده‌های امکان‌پذیر صدادهی برای بداهه‌نوازی بعدی

Input: $x_{(n),(i),\text{best}}; \forall i = 1,\ldots,\text{PMN}$

1: **for** each $n \in [1,2,\ldots,N]$ **do**

2: $LB_{(n)} = \min\left(x_{(n),(i),\text{best}}; \forall i = 1,\ldots,\text{PMN}\right)$

3: $UB_{(n)} = \max\left(x_{(n),(i),\text{best}}; \forall i = 1,\ldots,\text{PMN}\right)$

4: **end for**

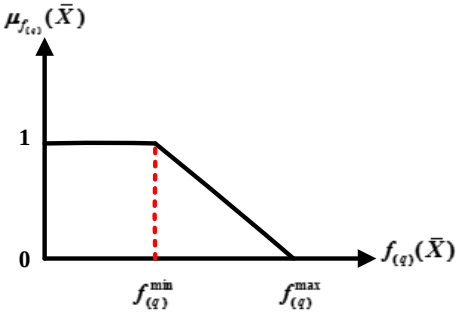
Output: $UB_{(n)}$, $LB_{(n)}$

- **برآورده شدن معیار توقف فاز سوم:**

در این بخش، بخش‌های اول، دوم و سوم از فاز سوم تکرار می‌شوند تا معیار توقف الگوریتم برآورده شود.

۴-۲- تصمیم‌گیری چندمعیاره

پس از تعیین مجموعه جواب‌های بهینه پارتو، مناسب است که یک جواب انعطاف‌پذیر و واقع‌بینانه که نشان‌دهنده یک مصالحه بین توابع هدف مختلف است تعیین شود. روش‌های زیادی برای انتخاب یک جواب سازشکارانه بین مجموعه جواب‌های بهینه پارتو وجود دارد. روش رضایت‌مندی فازی به دلیل سادگی و شباهت به منطق انسان یکی از روش‌های مناسب است [۱۶]. هر یک از مجموعه‌های فازی توسط معادلاتی که تابع عضویت نام دارند، نمایش داده می‌شوند. مقدار بالاتر این تابع بیانگر سطح ارضاء بالاتری است. به‌بیان‌دیگر، برای هر راه‌حل در جبهه بهینه پارتو، مانند $\bar{X}$، یک تابع عضویت مانند $\mu_{f(q)}(\bar{X})$ تعریف می‌شود. این مقدار نشان‌دهنده سطحی از $\bar{X}$ می‌باشد که متعلق است به مجموعه‌ای که تابع هدف q را کمینه می‌کند. مقدار تابع عضویت بین ۰ تا ۱ متفاوت است. ارزش عضویت (۰) نشان‌دهنده ناسازگاری با مجموعه است. درحالی‌که، ارزش (۱) به معنای سازگاری کامل با مجموعه است. انواع مختلفی از توابع عضویت مانند توابع عضویت خطی، نمایی و سایر موارد پیشنهادشده‌اند. در این مطالعه، از تابع عضویت خطی استفاده‌شده است. این تابع دارای یک حد پایین و یک حد بالا است و به‌صورت یک تابع یکنواخت نزولی نمایش داده می شود. شکل (۳) چنین تابع عضویتی را نشان می‌دهد [۱۶].



شکل (۳): تابع عضویت متناظر با تابع هدف q

تابع عضویت در نظر گرفته‌شده برای تابع هدف q با استفاده از رابطه (۲۳) تعریف‌شده است.

$$\mu_{f(q)}(\bar{X}) = \begin{cases} 0 & ; f_{(q)}(\bar{X}) \geq f_{(q)}^{\max} \\ \dfrac{f_{(q)}^{\max} - f_{(q)}(\bar{X})}{f_{(q)}^{\max} - f_{(q)}^{\min}} & ; f_{(q)}^{\min} \leq f_{(q)}(\bar{X}) \leq f_{(q)}^{\max} \\ 1 & ; f_{(q)}(\bar{X}) \leq f_{(q)}^{\min} \end{cases} \quad (۲۳)$$

$$\forall q = 1,\ldots,Q$$

در رابطه (۲۳) داریم:

q	شاخصی برای شماره تابع هدف.
Q	مجموعه‌ای از توابع هدف در نظر گرفته‌شده.
$\mu_{f(q)}(\bar{X})$	تابع عضویت در نظر گرفته‌شده برای تابع هدف q.
$f_{(q)}^{\max}$	حداکثر مقدار تابع هدف q.
$f_{(q)}^{\min}$	حداقل مقدار تابع هدف q.
$f_{(q)}(\bar{X})$	مقدار تابع هدف q درراه حل $\bar{X}$.

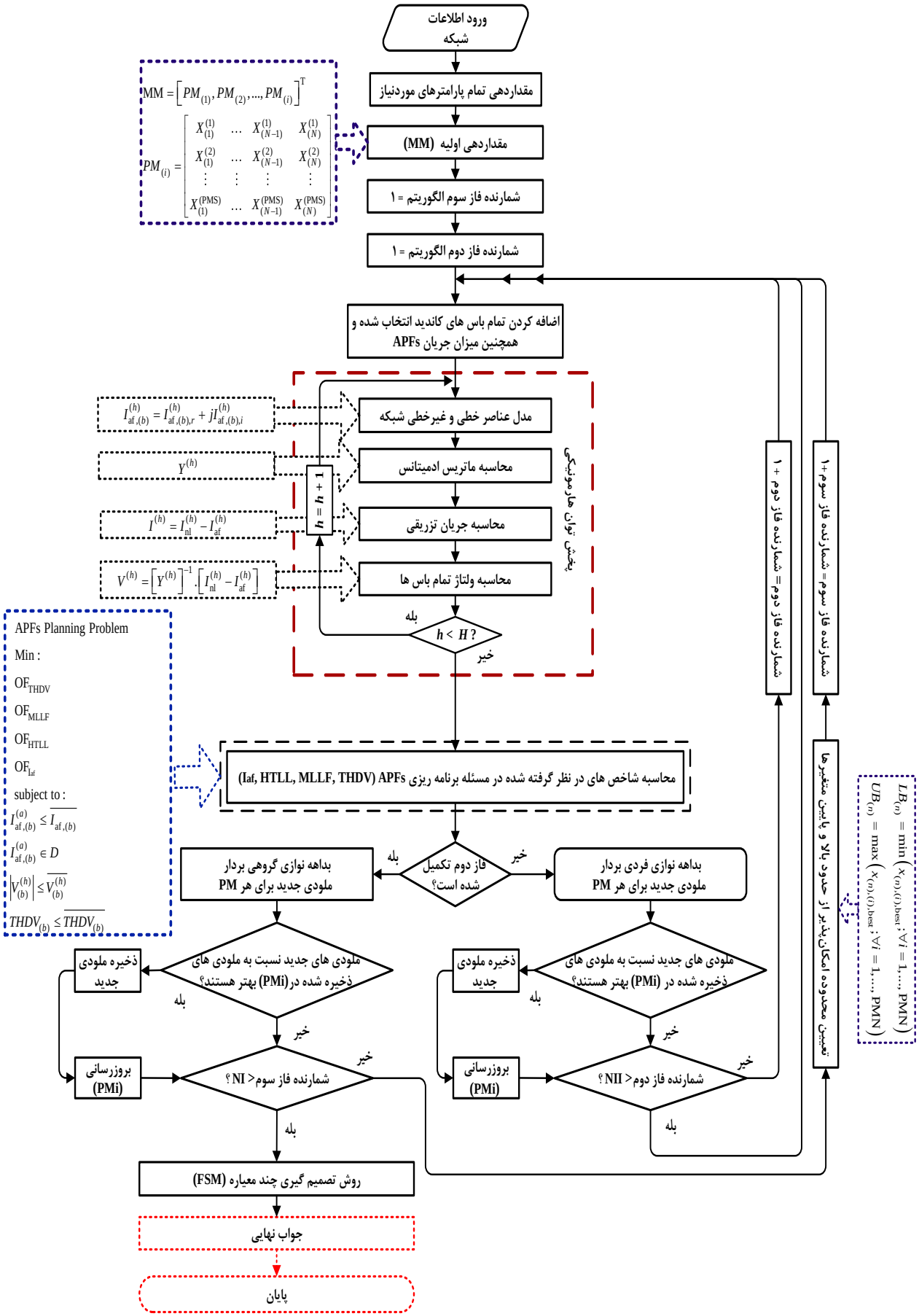
پس از تعریف توابع عضویت، راه‌های مختلفی برای انتخاب راه‌حل نهایی وجود دارد. هر روش یک فلسفه متفاوتی را در نظر می‌گیرند. در این مطالعه، از رویکرد محافظه‌کارانه به‌منظور انتخاب راه‌حل نهایی در میان راه‌حل‌های بهینه پارتو استفاده‌شده است. در رویکرد محافظه‌کارانه یک تصمیم‌گیری محافظه‌کارانه می‌تواند با تلاش برای یافتن راه‌حلی که مینیمم آن ماکزیمم تمامی توابع هدف را برآورده سازد به دست آید. با استفاده از فرمول حداقل-حداکثر، راه‌حل نهایی می‌تواند با استفاده از رابطه (۲۴) به دست آید.

$$\max_{(q)}\left\{\min_{\bar{X}}\left\{\mu_{f(q)}(\bar{X})\right\}\right\}; \forall q = 1,2,\ldots,Q \quad (۲۴)$$

۴-۳- الگوریتم حل پیشنهادی

در رویکرد پیشنهادی، قسمت‌های حقیقی و موهومی از جریان APF در هر مرتبه هارمونیک به‌عنوان متغیر تصمیم‌گیری (بردار ملودی) در نظر گرفته می‌شوند. در ساختار ارائه‌شده، هر قسمت از بردار ملودی (یک باس) نمایانگر $\left[(I_{\text{af}})_{(b)}^{(h)}\right]_r$ و $\left[(I_{\text{af}})_{(b)}^{(h)}\right]_i$ است. روند نمای مرتبط با الگوریتم حل پیشنهادی در شکل (۴) ترسیم‌شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]



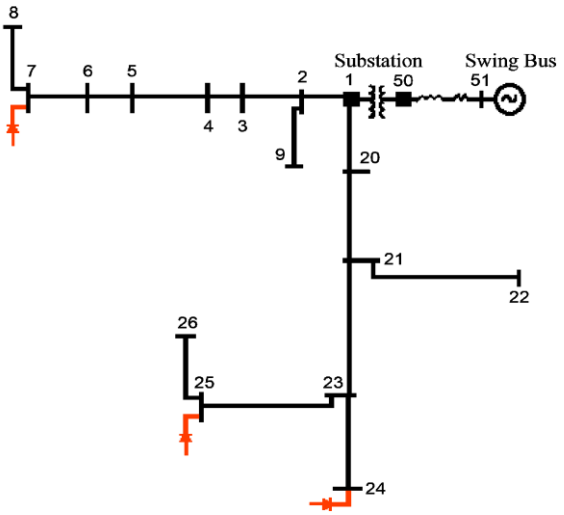
شکل (۴): روند نمای الگوریتم پیشنهادی به‌منظور حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در شبکه آزمون تحت مطالعه

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

۵- شبیه‌سازی

مدل پیشنهادی مسئله برنامه‌ریزی APFs بر روی شبکه آزمون ۱۸-باس IEEE نشان داده‌شده در شکل (۵) پیاده‌سازی گردیده است. شبکه فوق در بسیاری از تحقیقات درزمینه برنامه‌ریزی فیلترهای قدرت مورداستفاده قرارگرفته شده است [۷، ۸، ۱۱]. اطلاعات کامل مربوط به شبکه فوق در مرجع [۷] موجود است. این شبکه دارای چندین بار خطی و سه بار غیرخطی به‌صورت مبدل‌های ۶ پالس ۲/۵MW در باس‌های ۷، ۲۴ و ۲۵ است، که هارمونیک‌های مرتبه ۵، ۷، ۱۱، ۱۳، ۱۷، ۱۹، ۲۳ و ۲۵ در شبکه ایجاد می‌کنند. محتویات هارمونیکی بارهای غیرخطی (منابع جریان‌های هارمونیکی) برحسب پریونیت در جدول (۳) ارائه‌شده است. همچنین، به‌منظور توضیح بیشتر این محتویات در شکل (۶) ترسیم شده است.

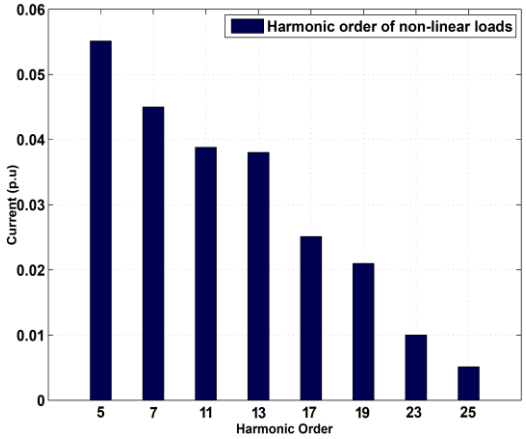


شکل (۵): شبکه آزمون ۱۸-باس IEEE تحت مطالعه

جدول (۳): محتویات هارمونیکی بارهای غیرخطی

شماره	مرتبه هارمونیک	جریان (P.U)
۱	۵	۰/۰۵۵۱
۲	۷	۰/۰۴۵۰
۳	۱۱	۰/۰۳۸۸
۴	۱۳	۰/۰۳۸۰
۵	۱۷	۰/۰۲۵۱
۶	۱۹	۰/۰۲۱۰
۷	۲۳	۰/۰۱۰۰
۸	۲۵	۰/۰۰۵۱

اعوجاج ولتاژ در تمام باس‌ها و برای تمام مرتبه هارمونیک‌های در نظر گرفته‌شده، THDV، MLLF و HTLL قبل از حل مسئله برنامه‌ریزی APFs با اجرای برنامه پخش توان هارمونیکی در شبکه آزمون تحت مطالعه محاسبه می‌شوند، این مقادیر برای هر شاخص مطابق با جدول (۴) به‌دست‌آمده است. شایان‌ذکر است که، تمامی مقادیر ارائه‌شده در جدول فوق تا ۳ رقم اعشار گرد شده است.



شکل (۶): محتویات هارمونیکی بارهای غیرخطی

نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۴) نشان‌دهنده آلودگی هارمونیکی بیش‌ازحد در شبکه آزمون تحت مطالعه است. به‌عبارت‌دیگر، سطوح اعوجاجات هارمونیکی به‌دست‌آمده از محدودیت‌های ارائه‌شده توسط استاندارد IEEE ۵۱۹ بیشتر است. در جدول فوق در باس‌هایی که اعوجاج هارمونیکی کل و تکی ولتاژ از حد مجاز استاندارد بیشتر است بارنگ قرمز مشخص‌شده است. همچنین، به‌منظور نشان دادن توانایی و نیرومندی الگوریتم حل پیشنهادی، مسئله برنامه‌ریزی APFs در سه سناریو موردبررسی قرار خواهد گرفت. مشخصات سناریوهای در نظر گرفته‌شده در جدول (۵) ارائه‌شده است.

جدول (۵): سناریوهای مسئله برنامه‌ریزی APFs

شماره	سناریو	باس‌های کاندید برای نصب APFs
۱	اول	{۷،۲۳،۲۴،۲۵،۲۶}
۲	دوم	{۱،۲،۵،۷،۸،۲۱،۲۳،۲۴،۲۵،۲۶}
۳	سوم	تمام باس‌ها: {۱،۲،۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹،۲۰،۲۱،۲۲،۲۳،۲۴،۲۵،۲۶}

علاوه بر این، به‌منظور افزایش انعطاف‌پذیری درروند حل مسئله از ۴ نوع APF مطابق با جدول (۶) استفاده‌شده است.

جدول (۶): انواع APFs (میزان جریان بر اساس ۱۰MVA و ۱۲kV)

شماره	نوع APFs	حداکثر جریان APFs (٪)
۱	نوع α	۷
۲	نوع β	۶
۳	نوع δ	۵
۴	نوع σ	۴

مسئله برنامه‌ریزی APFs در ۲ موردمطالعه‌ای با فرضیات زیر موردبررسی قرار خواهد گرفت.

۱) در مورد اول، الگوریتم محدودیت جریان APF (اندازه APF) را در نظر نمی‌گیرد.

۲) در مورد دوم، الگوریتم محدودیت جریان APF (اندازه APF) را در نظر می‌گیرد.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

جدول (۴): ولتاژهای هارمونیکی در تمام باس‌ها و شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی در شرایط اولیه (قبل از حل مسئله)

شماره	باس	THDV	MLLF	HTLL	اعوجاج ولتاژ برای هر مرتبه هارمونیک (٪)							
					۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵
۱	۱	۸/۴۵۶	۳/۱۰۶	۰/۵۰۴	۵/۵۹۷	۲/۲۰۸	۲/۴۱۶	۵/۱۰۲	۰/۵۰۴	۱/۸۰۸	۰/۳۸۰	۰/۲۳۴
۲	۲	۸/۶۷۶	۳/۲۳۶	۰/۵۹۳	۶/۰۵۶	۲/۰۵۸	۲/۲۸۴	۴/۶۰۲	۰/۷۴۵	۲/۶۹۸	۰/۵۰۸	۰/۳۳۴
۳	۳	۷/۷۴۶	۳/۱۳۶	۰/۱۳۵	۶/۴۶۵	۱/۷۱۲	۱/۶۳۶	۲/۵۵۰	۱/۰۱۳	۲/۲۴۵	۰/۲۰۳	۰/۰۷۲
۴	۴	۷/۲۷۶	۳/۰۸۶	۰/۲۸۴	۶/۶۱۶	۱/۵۱۴	۱/۱۶۹	۱/۳۳۲	۱/۰۶۷	۱/۵۹۰	۰/۰۳۰	۰/۰۹۰
۵	۵	۷/۷۳۶	۳/۲۰۶	۰/۴۱۲	۶/۸۰۶	۱/۰۱۸	۰/۳۹۶	۲/۹۸۹	۱/۰۱۵	۱/۴۰۸	۰/۶۱۸	۰/۴۹۴
۶	۶	۷/۸۰۶	۳/۱۷۶	۰/۳۷۴	۶/۶۴۶	۰/۸۷۹	۰/۷۹۵	۳/۵۰۵	۰/۶۸۷	۱/۵۵۸	۰/۳۴۰	۰/۱۵۳
۷	۷	۸/۸۳۶	۳/۲۶۶	۰/۲۲۷	۶/۲۱۶	۰/۸۸۸	۱/۹۲۶	۵/۲۵۲	۱/۰۴۵	۲/۳۹۹	۰/۴۵۸	۰/۵۶۷
۸	۸	۸/۷۸۶	۳/۲۴۶	۰/۳۴۴	۶/۱۹۶	۰/۸۷۹	۱/۹۲۳	۵/۲۸۹	۱/۰۳۵	۲/۳۹۸	۰/۴۴۸	۰/۵۶۷
۹	۹	۸/۶۵۶	۳/۲۲۶	۰/۴۶۵	۶/۰۲۶	۲/۰۴۸	۲/۲۸۶	۴/۵۹۲	۰/۷۴۳	۲/۶۸۸	۰/۵۰۶	۰/۲۹۷
۱۰	۲۰	۱۳/۲۶۷	۴/۶۱۶	۰/۴۲۶	۷/۲۹۷	۳/۹۵۸	۴/۰۸۶	۹/۳۶۲	۱/۶۶۵	۰/۶۶۳	۰/۲۰۸	۰/۱۹۷
۱۱	۲۱	۱۴/۸۳۷	۵/۱۲۶	۰/۳۲۴	۸/۳۵۹	۵/۰۰۸	۴/۵۴۳	۹/۷۹۹	۱/۹۹۵	۱/۵۴۳	۰/۱۱۸	۰/۰۹۰
۱۲	۲۲	۱۴/۷۱۷	۵/۲۱۶	۰/۱۱۶	۸/۲۵۸	۴/۸۹۸	۴/۵۲۶	۹/۹۲۲	۱/۹۸۹	۱/۵۳۸	۰/۱۳۰	۰/۰۹۰
۱۳	۲۳	۱۱/۰۱۷	۴/۶۴۶	۰/۵۰۷	۹/۱۰۹	۵/۴۳۸	۲/۰۲۶	۱/۵۴۴	۰/۹۵۵	۰/۸۴۸	۰/۳۹۹	۰/۱۱۳
۱۴	۲۴	۱۲/۶۶۷	۵/۱۳۶	۰/۳۳۴	۹/۷۶۰	۵/۹۷۸	۱/۷۷۰	۴/۹۳۴	۱/۲۵۵	۰/۷۶۷	۰/۲۷۸	۰/۱۴۴
۱۵	۲۵	۱۱/۴۰۶	۴/۶۵۶	۰/۲۵۴	۹/۲۵۸	۵/۲۴۸	۰/۷۸۵	۳/۰۴۶	۳/۲۹۵	۱/۶۵۷	۰/۵۱۰	۰/۲۴۳
۱۶	۲۶	۱۱/۷۰۷	۴/۷۵۶	۰/۲۵۵	۹/۲۴۴	۵/۲۴۸	۰/۷۸۶	۳/۱۰۳	۳/۲۹۵	۱/۶۵۸	۰/۵۱۸	۰/۲۴۳
میانگین		۱۰/۲۲۵	۱/۹۲۷	۰/۳۴۷	۷/۳۶۹	۳/۰۶۱	۲/۰۸۴	۴/۸۰۷	۱/۳۹۳	۱/۷۱۶	۰/۳۵۳	۰/۲۴۵

رویکرد پیشنهادی با استفاده از الگوریتم MSA پیاده‌سازی و اجراشده است. پارامترهای تنظیمی الگوریتم MSA در جدول (۷) ارائه‌شده است. پارامترهای فوق، بهترین مقادیر به‌دست‌آمده پس از چندین اجرا می‌باشند.

جدول (۷): پارامترهای تنظیمی الگوریتم MSA

شماره	پارامتر الگوریتم MSA	مقدار
۱	BW_{min}	۰/۴
۲	BW_{max}	۰/۹
۳	PAR_{min}	۰/۰۱
۴	PAR_{max}	۰/۹۹
۵	PMN	۵
۶	PMS	۱۵۰
۷	PMCR	۰/۹۸
۸	NI	۵۰۰
۹	NII	۵۰۰

۵-۱- مورد مطالعه‌ای اول

در موردمطالعه‌ای اول، محدودیت جریان APF در نظر گرفته نشده است. به‌عبارت‌دیگر، اندازه یک APF به‌صورت پیوسته در نظر گرفته‌شده است. این فرض غیرعملی و غیراقتصادی است، زیرا اندازه APFs به دلیل ماهیت گسسته سلف‌ها و خازن‌ها دارای ماهیت گسسته می‌باشند. نتایج بهینه مرتبط با اندازه APFs طراحی‌شده در مسئله برنامه‌ریزی APFs در شبکه آزمون تحت مطالعه بر مبنای موردمطالعه‌ای اول در جدول (۸) ارائه‌شده است.

جدول (۸): نتایج بهینه مرتبط با اندازه APFs طراحی‌شده در مسئله برنامه‌ریزی APFs بر مبنای موردمطالعه‌ای اول

شماره	نوع APFs	جریان تزریقی:{شماره باس APFs نصب‌شده}		
		سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم
۱	نوع α	{۷}:۰/۰۷۰۰۰۰ {۲۳}:۰/۰۶۸۳۴۷ {۲۴}:۰/۰۷۰۰۰۰	{۷}:۰/۰۶۰۰۱۰ {۲۶}:۰/۰۵۴۷۱۵ {۲۴}:۰/۰۷۰۰۰۰	{۷}:۰/۰۷۰۰۰۰ {۲۴}:۰/۰۶۶۰۷۷ {۲۵}:۰/۰۷۰۰۰۰
۲	نوع β	{۲۵}:۰/۰۶۰۰۰۰	{۲۳}:۰/۰۳۷۴۰۰	{۸}:۰/۰۵۳۶۸۰
۳	نوع δ	—	{۲۵}:۰/۰۶۴۸۰۰ {۸}:۰/۰۳۶۰۱۰	{۲۵}:۰/۰۴۲۳۰۱ {۸}:۰/۰۳۴۱۰۱
۴	نوع σ	{۲۶}:۰/۰۴۰۰۰۰	—	{۵}:۰/۰۳۰۰۵۷

شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها برای موردمطالعه‌ای اول در جدول (۹) ارائه‌شده است.

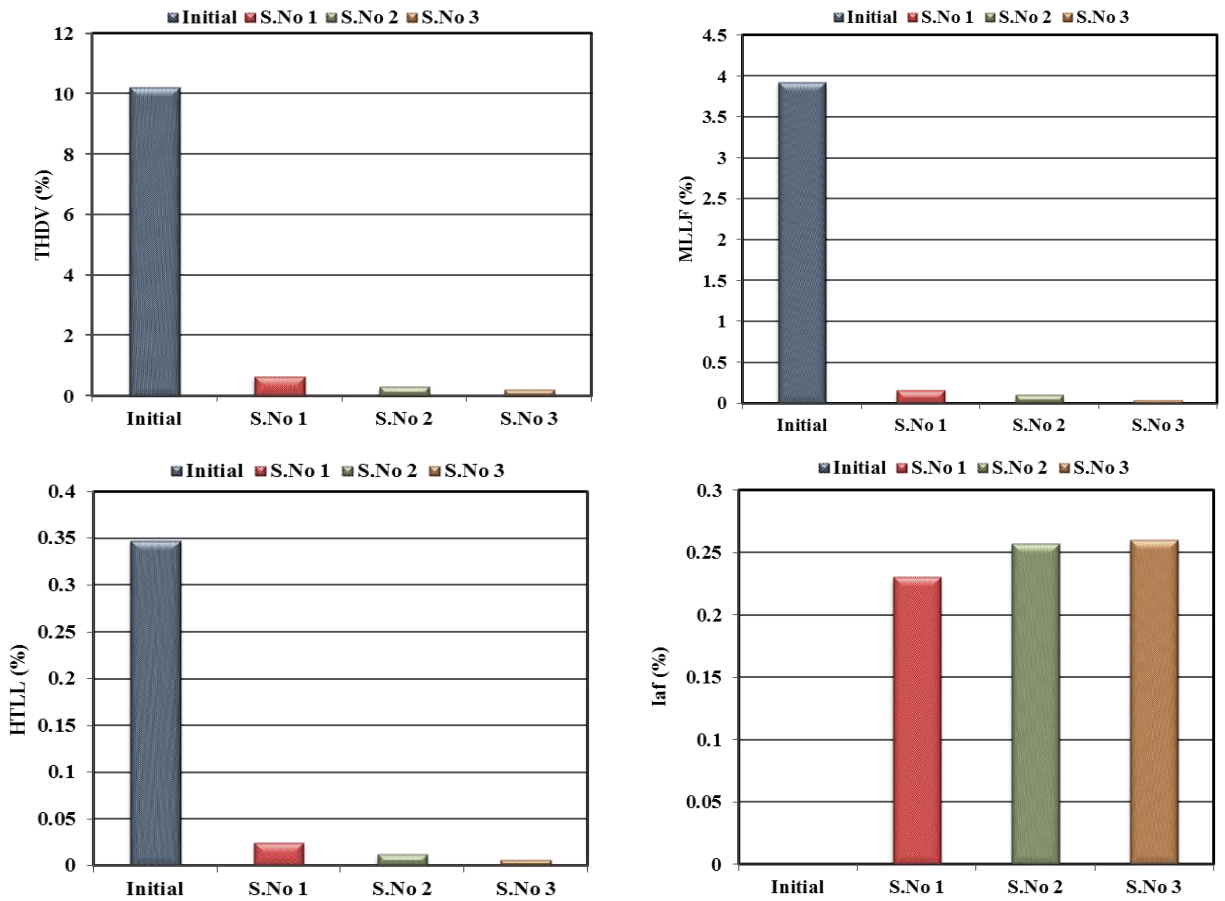
جدول (۹): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs، قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها بر مبنای موردمطالعه‌ای اول

سناریو		شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی (٪)			
		THDV	MLLF	HTLL	I_{af}
قبل از حل		۱۰/۲۲۵	۳/۹۲۷	۰/۳۴۷	۰
بعد از حل	۱	۰/۶۴۸۳	۰/۱۶۲۸	۰/۰۲۴۲	۰/۳۰۹۵۸۱
	۲	۰/۳۱۸۹	۰/۱۰۳۰	۰/۰۱۲۲	۰/۳۲۸۱۰۴
	۳	۰/۲۱۸۴	۰/۰۳۸۷	۰/۰۰۵۶	۰/۳۷۲۸۸۰

همچنین به‌منظور مقایسه بهتر، شاخص‌های ارائه شده در جدول (۹) به تفکیک سناریو و قبل و بعد از حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در شکل (۷) ترسیم‌شده‌اند.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]



شکل (۷): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs، قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها بر مبنای موردمطالعه‌ای اول

نتایج ارائه‌شده در جدول (۹) و ترسیم شده در شکل (۷) بیانگر این واقعیت است که، شاخص‌های THDV، MLLF و HTLL در هر سه سناریو از موردمطالعه‌ای اول در محدوده مجاز تعیین شده توسط استاندارد IEEE ۵۱۹ قرارگرفته‌اند. همچنین، با افزایش باس‌های کاندید به‌منظور جایابی APFs در شبکه آزمون تحت مطالعه، الگوریتم درروند حل مسئله برنامه‌ریزی APFs دارای آزادی عمل بیشتری است. درنتیجه، برای شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs مقادیر مطلوب‌تری حاصل‌شده است.

۵-۲- مورد مطالعه‌ای دوم

در این بخش، الگوریتم محدودیت‌هایی برای جریان APFs (اندازه APFs) در نظر می‌گیرد. اندازه یک APF به‌عنوان یک متغیر گسسته در نظر گرفته می‌شود. مسئله برنامه‌ریزی APFs با در نظر گرفتن محدودیت برای جریان APF یک مسئله عملی و کاربردی است. در این حالت، الگوریتم از اعداد صحیح از اندازه APFs استفاده می‌کند که اندازه آن‌ها به مقادیر ارائه‌شده در جدول (۶) محدودشده است. به‌منظور اعمال این فرضیات، بخش‌های حقیقی و موهومی از جریان‌های هارمونیکی در بردارهای ملودی بداهه‌نوازی شده با استفاده از روابط (۲۵) و (۲۶) اصلاح می‌شوند.

$$\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r = \left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r \times \eta_{(b)}; \quad \forall h = 2,3,\ldots,H, \forall b = 1,2,\ldots,B \tag{۲۵}$$

$$\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i = \left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i \times \eta_{(b)}; \quad \forall h = 2,3,\ldots,H, \forall b = 1,2,\ldots,B \tag{۲۶}$$

در معادلات (۲۵) و (۲۶)، $\eta_{(b)}$ ضریب اصلاح برای اصلاح بخش‌های حقیقی و موهومی جریان APF واقع‌شده در باس b است. این ضریب به‌عنوان یک مضرب صحیح از جریان APF واقع شده در باس b تعریف می‌شود. ضریب اصلاح در نظر گرفته شده با استفاده از رابطه (۲۷) بیان شده است [۵]. در نتیجه، به‌منظور در نظر گرفتن حداکثر جریان APF واقع شده در باس b بایستی تغییراتی در بردارهای ملودی بداهه‌نوازی شده مطابق با روابط (۲۸) و (۲۹) اعمال شود [۵]. در روابط (۲۸) و (۲۹) داریم:

$\max\left(I_{\mathrm{af}}\right)$ حداکثر جریان مجاز APF در باس b مرتبه h.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

$$\eta_{(b)} = \frac{round\left(100\times\left(\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r^2+\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}\right)}{100\times\left(\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r^2+\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}};\forall h=2,3,...,H,\forall b=1,2,...,B \tag{۲۷}$$

$$\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r = \begin{cases} \left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r;\left(\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r^2+\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}\le \max\left(I_{\mathrm{af}}\right) \\ \dfrac{\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r\times\max\left(I_{\mathrm{af}}\right)}{\left(\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r^2+\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}};\left(\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r^2+\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}>\max\left(I_{\mathrm{af}}\right) \end{cases} \tag{۲۸}$$

$$;\forall h=2,3,...,H,\forall b=1,2,...,B$$

$$\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i = \begin{cases} \left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i;\left(\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r^2+\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}\le \max\left(I_{\mathrm{af}}\right) \\ \dfrac{\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i\times\max\left(I_{\mathrm{af}}\right)}{\left(\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r^2+\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}};\left(\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_r^2+\left[\left(I_{\mathrm{af}}\right)_{(b)}^{(h)}\right]_i^2\right)^{1/2}>\max\left(I_{\mathrm{af}}\right) \end{cases} \tag{۲۹}$$

$$;\forall h=2,3,...,H,\forall b=1,2,...,B$$

نتایج مرتبط با اندازه APFs طراحی‌شده در تمام سناریوهای در نظر گرفته‌شده بر مبنای موردمطالعه‌ای دوم در جدول (۱۰) ارائه‌شده است. شایان‌ذکر است که، مسئله برنامه‌ریزی APFs در EPDNs با در نظر گرفتن محدودیت‌های APFs یک مسئله کاربردی و اقتصادی است.

جدول (۱۰): نتایج مرتبط با اندازه APFs طراحی‌شده در مسئله برنامه‌ریزی APFs بر مبنای موردمطالعه‌ای دوم

شماره	نوع APFs	جریان تزریقی: {شماره باس APFs نصب‌شده}		
		سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم
۱	نوع α	{۷}:۰/۰۶۲۰۰۱	{۲۴}:۰/۰۵۰۲۷۱ {۲۵}:۰/۰۵۱۵۰۶	{۷}:۰/۰۶۰۰۷۹ {۲۴}:۰/۰۵۱۱۰۱
۲	نوع β	{۲۴}:۰/۰۵۰۱۵۶ {۲۵}:۰/۰۴۵۰۶۸	{۷}:۰/۰۵۰۹۳۰	{۲۶}:۰/۰۵۷۲۱۶
۳	نوع δ	{۲۳}:۰/۰۴۳۲۵۱	{۲۶}:۰/۰۳۴۱۰۰ {۵}:۰/۰۴۱۰۴۷	{۲۵}:۰/۰۴۶۰۰۷ {۵}:۰/۰۴۴۶۰۰
۴	نوع σ	{۲۶}:۰/۰۳۷۱۶۰	{۲۳}:۰/۰۳۳۵۰۰	——

اعوجاج ولتاژ در تمام باس‌ها و برای تمام مرتبه هارمونیک‌های در نظر گرفته‌شده، شاخص‌های THDV، MLLF و HTLL بعد از حل مسئله برنامه‌ریزی APFs بر مبنای سناریوی سوم در موردمطالعه‌ای دوم مطابق با جدول (۱۱) به‌دست‌آمده است. شایان‌ذکر است که، تمامی مقادیر ارائه‌شده در جدول فوق تا ۳ رقم اعشار گرد شده‌اند. نتایج ارائه‌شده در جدول (۱۱) نشان‌دهنده این است که، پس از جایابی و اندازه‌یابی بهینه APFs در شبکه آزمون، اعوجاج‌های هارمونیکی فردی و کل ولتاژ در تمام باس‌های شبکه و همچنین شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs در محدوده‌های مجاز تعیین‌شده توسط استاندارد IEEE ۵۱۹ قرارگرفته‌اند. به‌عبارت‌دیگر، شبکه آزمون تحت بررسی در حضور APFs ازلحاظ آلودگی هارمونیکی در وضعیت بسیار مطلوبی قرار دارد. همچنین، شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs در موردمطالعه‌ای دوم و تمام سناریوها قبل و بعد از حل مسئله به‌منظور مقایسه بهتر در جدول (۱۲) ارائه و در شکل (۸) ترسیم شده‌اند.

جدول (۱۲): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs، قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها بر مبنای موردمطالعه‌ای دوم

سناریو		شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی (٪)			
		THDV	MLLF	HTLL	I_{af}
قبل از حل		۱۰/۲۲۵	۳/۹۲۷	۰/۳۴۷	۰
بعد از حل	۱	۱/۲۶۰۵	۰/۲۷۰۶	۰/۰۱۰۰	۰/۲۳۰۲۵۸
	۲	۰/۶۷۸	۰/۱۸۰۵	۰/۰۲۲۱	۰/۲۵۷۴۱۴
	۳	۰/۴۷۸۳	۰/۱۸۴۷	۰/۰۱۱۶	۰/۲۶۰۱۳۷

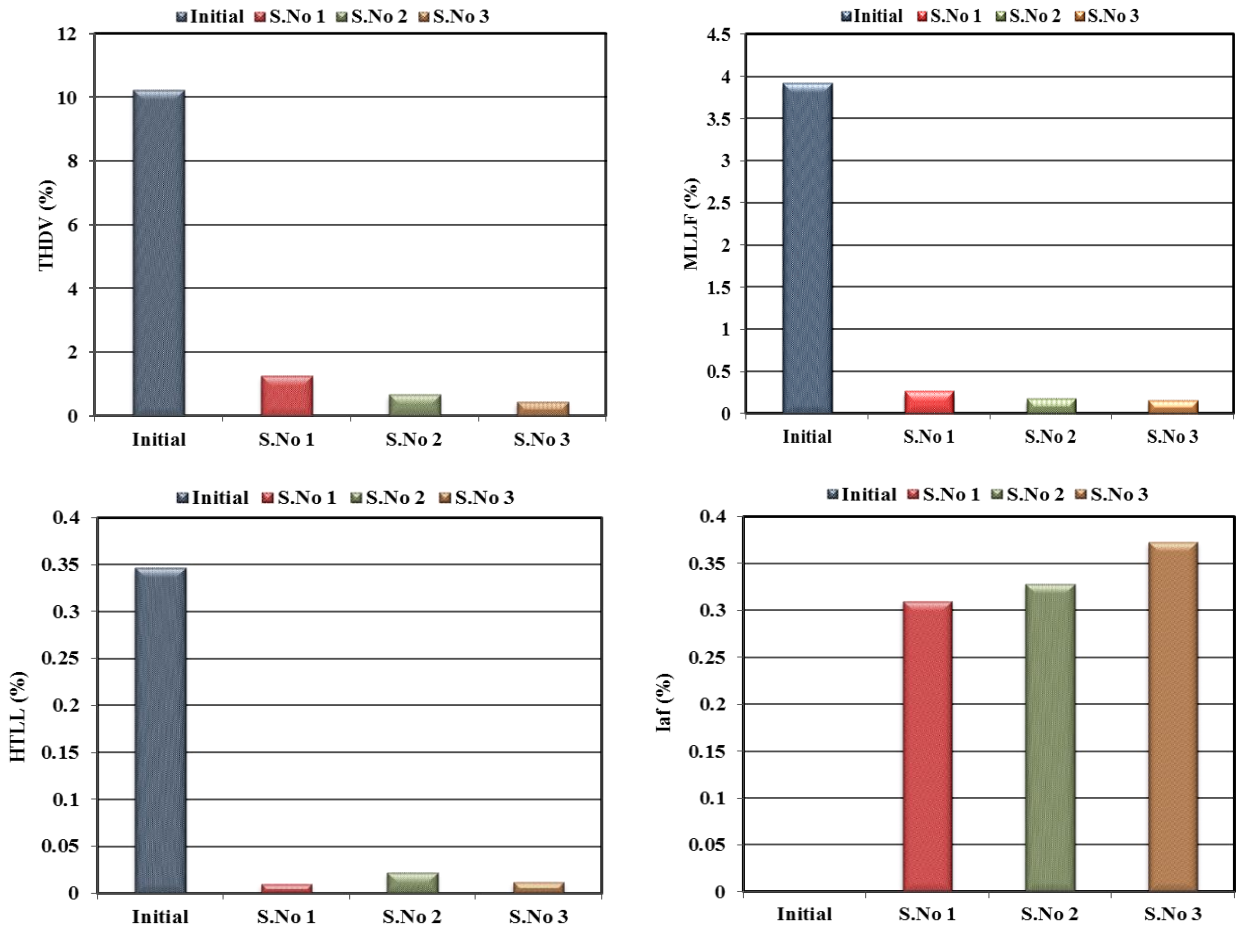
از نتایج ارائه‌شده در جدول (۱۲) و ترسیم شده در شکل (۸) مشاهده می‌شود که، شاخص‌های THDV، MLLF و HTLL در هر سه سناریو از موردمطالعه‌ای دوم در محدوده مجاز قرارگرفته‌اند، و مقادیر به‌دست آمده، محدودیت‌های مشخص شده توسط استاندارد ۵۱۹ IEEE را برآورده می‌کنند. همچنین، به منظور مقایسه شاخص‌های مسئله به تفکیک باس‌های شبکه، شاخص‌های فوق در تمام باس‌های شبکه آزمون تحت مطالعه، قبل و بعد از حل مسئله مبتنی بر سناریو سوم از مورد مطالعه‌ای دوم در شکل (۹) ارائه شده است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

جدول (۱۱): ولتاژهای هارمونیکی در تمام باس‌ها و شاخص‌های مسئله بر مبنای سناریو سوم از موردمطالعه‌ای دوم (پس از حل مسئله)

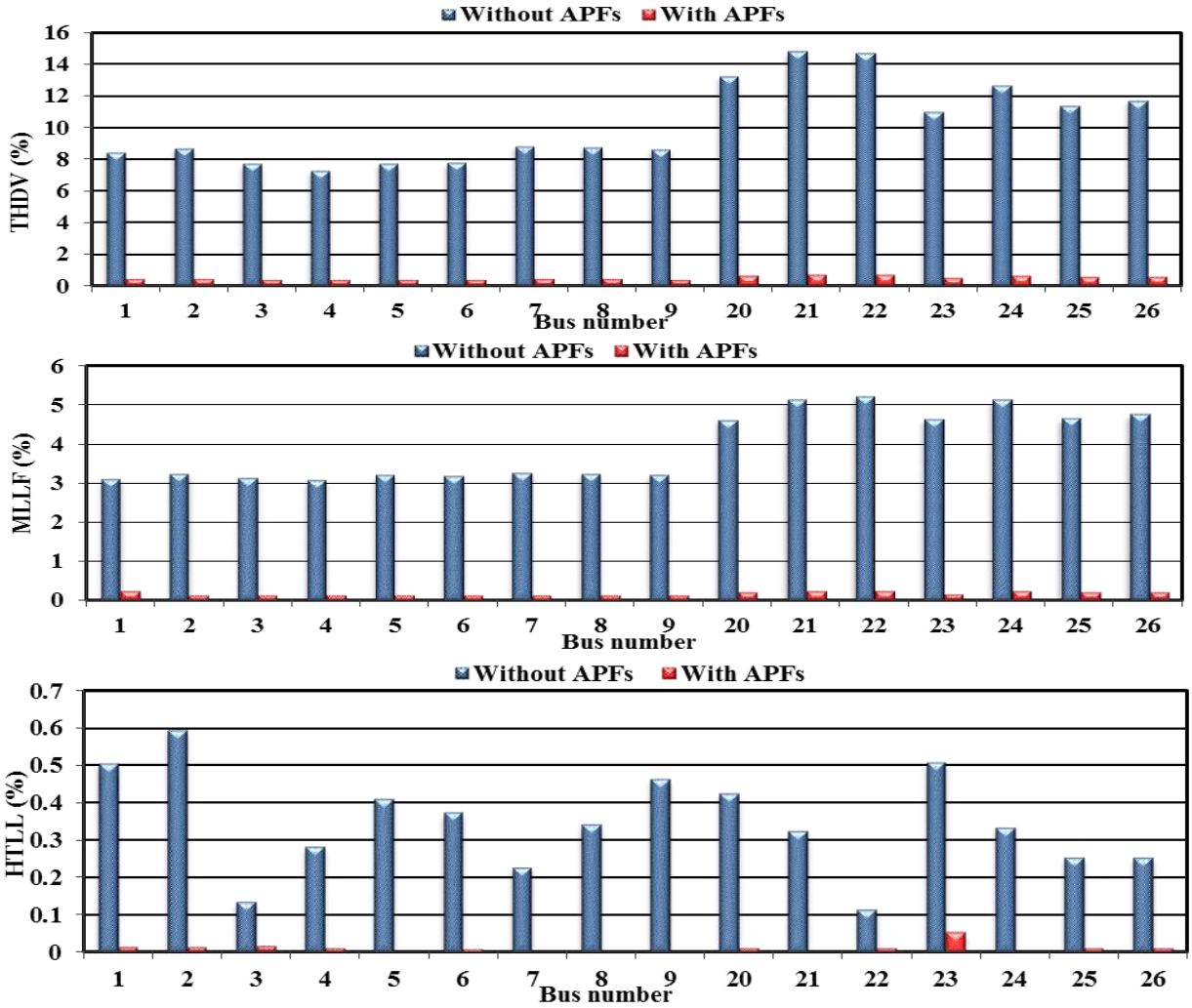
شماره	باس	THDV	MLLF	HTLL	اعوجاج ولتاژ برای هر مرتبه هارمونیک (٪)						
					۵	۷	۱۱	۱۳	۱۷	۱۹	۲۳	۲۵
۱	۱	۰/۳۹۶	۰/۲۳۴	۰/۰۱۶	۰/۲۶۵	۰/۱۰۳	۰/۲۱۸	۰/۵۷۳	۰/۲۵۰	۰/۹۰۵	۰/۱۷۸	۰/۱۱۱
۲	۲	۰/۴۱۰	۰/۱۵۲	۰/۰۱۵	۰/۲۸۷	۰/۹۸۰	۱/۱۴۲	۰/۳۱۲	۰/۳۹۰	۱/۳۳۶	۰/۲۵۱	۰/۱۶۷
۳	۳	۰/۳۶۳	۰/۱۴۶	۰/۰۱۷	۰/۳۰۶	۰/۸۰۵	۰/۸۱۸	۱/۲۸۱	۰/۵۱۳	۱/۱۰۲	۰/۱۰۰	۰/۰۳۴
۴	۴	۰/۳۴۳	۰/۱۴۴	۰/۰۱۱	۰/۳۱۱	۰/۷۲۰	۰/۵۸۴	۰/۶۶۹	۰/۵۴۰	۰/۷۸۷	۰/۰۲۴۷	۰/۰۴۲
۵	۵	۰/۳۶۵	۰/۱۵۰	۰/۰۰۷	۰/۳۲۳	۰/۴۸۵	۰/۲۰۷	۰/۵۰۱	۰/۵۰۴	۰/۶۹۷	۰/۳۰۵	۰/۲۳۴
۶	۶	۰/۳۶۹	۰/۱۴۹	۰/۰۱۰	۰/۳۱۵	۰/۴۱۸	۰/۳۹۷	۰/۷۶۱	۰/۳۵۱	۰/۷۸۱	۰/۱۶۸	۰/۰۷۲
۷	۷	۰/۴۱۸	۰/۱۵۳	۰/۰۰۶	۱/۲۹۴	۰/۴۲۳	۰/۹۷۳	۱/۶۳۸	۰/۵۱۹	۱/۱۸۸	۰/۲۲۶	۰/۲۶۹
۸	۸	۰/۴۱۲	۰/۱۵۲	۰/۰۰۱	۰/۲۹۳	۰/۴۱۸	۰/۹۶۱	۰/۶۵۷	۰/۵۲۴	۱/۱۹۸	۰/۲۲۱	۰/۲۶۹
۹	۹	۰/۳۹۰	۰/۱۵۱	۰/۰۰۳	۰/۲۸۶	۰/۹۵۵	۰/۱۴۳	۱/۰۳۷	۰/۳۶۹	۰/۳۳۱	۰/۲۶۰	۰/۱۴۱
۱۰	۲۰	۰/۶۲۸	۰/۲۱۲	۰/۰۱۱	۰/۳۴۵	۱/۸۷۵	۰/۲۴۳	۰/۷۱۴	۰/۸۲۸	۰/۳۲۸	۰/۱۰۲	۰/۰۹۳
۱۱	۲۱	۰/۶۷۶	۰/۲۴۲	۰/۰۰۴	۰/۳۹۶	۰/۲۳۸	۰/۲۷۱	۱/۹۲۴	۰/۹۹۲	۰/۷۶۴	۰/۰۶۷	۰/۰۵۲
۱۲	۲۲	۰/۶۹۲	۰/۲۴۶	۰/۰۱۱	۰/۳۹۲	۰/۲۳۲	۰/۲۲۵	۰/۹۸۶	۰/۹۹۹	۰/۷۶۲	۰/۰۶۴	۰/۰۴۲
۱۳	۲۳	۰/۴۹۷	۰/۱۵۹	۰/۰۰۴	۰/۴۳۱	۰/۲۵۸	۰/۱۱۳	۰/۷۷۴	۰/۴۸۵	۰/۴۳۰	۰/۱۹۷	۰/۰۵۳
۱۴	۲۴	۰/۶۰۰	۰/۲۴۳	۰/۰۱۱	۰/۴۶۲	۰/۲۸۳	۰/۸۸۵	۱/۴۷۸	۰/۶۲۴	۰/۳۹۰	۰/۱۴۷	۰/۰۶۸
۱۵	۲۵	۰/۵۴۰	۰/۲۱۴	۰/۰۵۳	۰/۴۳۹	۰/۲۴۸	۰/۴۰۲	۱/۵۴۰	۱/۶۳۸	۰/۸۲۰	۰/۲۵۲	۰/۱۱۵
۱۶	۲۶	۰/۵۵۴	۰/۲۰۹	۰/۰۰۷	۰/۴۳۸	۰/۲۴۸	۰/۴۰۳	۰/۵۵۸	۰/۶۳۸	۰/۸۲۱	۰/۲۵۶	۰/۱۱۵
میانگین		۰/۴۷۹	۰/۱۸۵	۰/۰۱۲	۰/۴۱۱	۰/۵۴۳	۰/۴۹۹	۰/۹۶۳	۰/۶۳۵	۰/۷۹۰	۰/۱۷۶	۰/۱۱۷



شکل (۸): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs، قبل و بعد از حل مسئله در تمام سناریوها بر مبنای موردمطالعه‌ای دوم

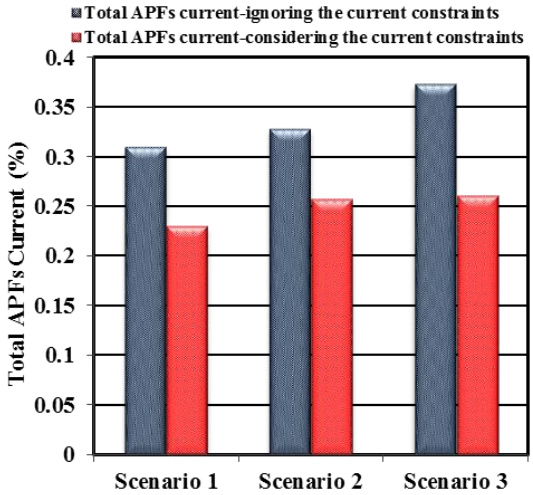
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]



شکل (۹): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs در تمام باس‌ها، قبل و بعد از حل مسئله مبتنی بر سناریو سوم از مورد مطالعه‌ای دوم

جریان APFs با و بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های جریان در هر دو موردمطالعه‌ای و تمام سناریوها در شکل (۱۰) نشان داده‌شده است.



شکل (۱۰): جریان APFs با و بدون در نظر گرفتن محدودیت جریان در تمام سناریوها

۵-۳- ارزیابی ورود و خروج المان‌های شبکه توزیع انرژی الکتریکی

در این بخش، جهت ارزیابی ورود و خروج المان‌های شبکه توزیع انرژی الکتریکی، شش حالت مختلف مبتنی بر مورد مطالعه‌ای دوم و سناریو سوم تعریف و پیاده‌سازی شده است. این شش حالت عبارتند از:

- حالت اول: یک منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژی از نوع پیل سوختی با ظرفیت ۲ مگاوات در باس ۲۱ با بار خطی نصب شده است.
- حالت دوم: یک منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژی از نوع پیل سوختی با ظرفیت ۲ مگاوات در باس ۲۵ با بار غیرخطی نصب شده است.
- حالت سوم: دو منبع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژی از نوع پیل سوختی با ظرفیت ۲ مگاوات در باس‌های ۲۱ و ۲۵ نصب شده است.

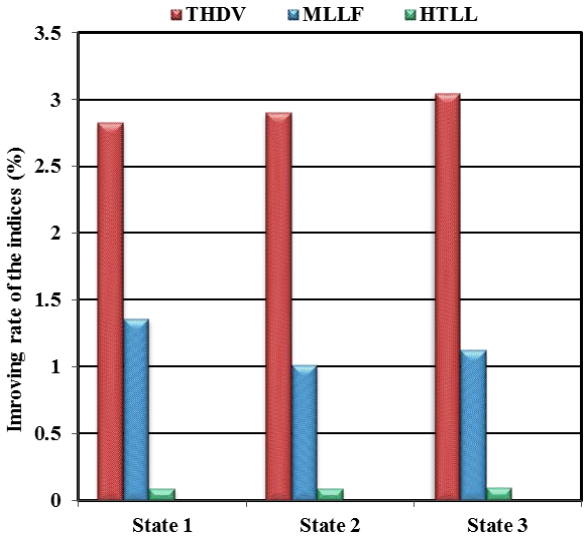
[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

- حالت چهارم: خروج فیدر ۲۳–۲۱ در انشعاب عمودی شبکه توزیع انرژی الکتریکی مورد مطالعه.
- حالت پنجم: خروج فیدر ۲۳–۲۱ در انشعاب افقی شبکه توزیع انرژی الکتریکی مورد مطالعه.
- حالت ششم: ورود یک بار غیرخطی جدید در باس ۹ شبکه توزیع انرژی الکتریکی مورد مطالعه.

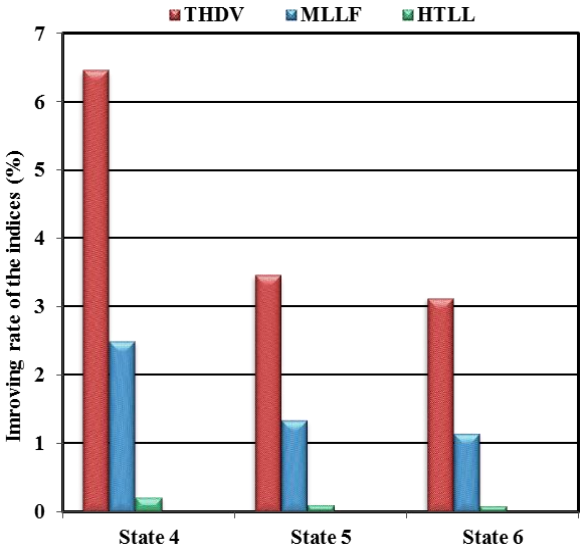
شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs بدست آمده از پیاده‌سازی شش حالت فوق‌الذکر قبل و بعد از حل مسئله در جدول (۱۳) ارائه شده است. همچنین، نرخ بهبود شاخص‌های مسئله مذکور به ازای 0.1 p.u تزریق جریان توسط APFs برای حالت‌های مرتبط با ورود منابع تولید پراکنده و حالت‌های خروج فیدر و ورود بارغیرخطی به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ترسیم شده‌اند.

جدول (۱۳): شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs قبل و بعد از حل مسئله بدست آمده از پیاده‌سازی شش حالت تعریف شده

حالت		شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی (٪)			
		THDV	MLLF	HTLL	I_{af}
۱	قبل از حل	۱۱/۰۲۳	۳/۹۹۵	۰/۳۶۱	۰
	بعد از حل	۰/۲۲۳۹	۰/۰۳۹۹	۰/۰۰۶۴	۰/۳۸۱۶۵۰
۲	قبل از حل	۱۱/۴۷۶	۴/۰۰۱	۰/۳۸۷	۰
	بعد از حل	۰/۲۳۵۱	۰/۰۴۰۵	۰/۰۰۶۷	۰/۳۸۶۹۲۹
۳	قبل از حل	۱۲/۴۲۹	۴/۵۵۲	۰/۴۱۰	۰
	بعد از حل	۰/۲۶۳۰	۰/۰۴۱۱	۰/۰۰۶۹	۰/۳۹۹۳۶۷
۴	قبل از حل	۱۰/۲۲۵	۳/۹۲۷	۰/۳۴۷	۰
	بعد از حل	۰/۰۹۲۹	۰/۰۱۰۵	۰/۰۰۱۰	۰/۱۵۶۷۲۳
۵	قبل از حل	۱۰/۲۲۵	۳/۹۲۷	۰/۳۴۷	۰
	بعد از حل	۰/۱۹۵۸	۰/۰۲۹۹۶	۰/۰۰۳۷	۰/۲۸۸۵۲۰
۶	قبل از حل	۱۲/۸۴۷	۴/۶۸۳	۰/۴۹۲	۰
	بعد از حل	۰/۲۸۴۶	۰/۰۴۵۲۹	۰/۰۰۷۱	۰/۴۰۱۱۳۷



شکل (۱۱): نرخ بهبود شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs به ازای 0.1 p.u جریان تزریقی APFs در حالت‌های مرتبط با ورود منابع تولید پراکنده



شکل (۱۲): نرخ بهبود شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs به ازای 0.1 p.u جریان تزریقی APFs در حالت‌های مرتبط با خروج فیدر و ورود بارغیرخطی

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول (۱۳) و ترسیم شده در شکل (۱۱) مبتنی بر حالت‌های مرتبط با ورود منابع تولید پراکنده، می‌توان نتایج ذیل را استنباط نمود:

- ورود منابع تولید پراکنده، اعوجاج هارمونیکی شبکه توزیع انرژی الکتریکی را افزایش داده است. بر این اساس، جریان تزریقی فیلترهای اکتیو افزایش می‌یابد تا شاخص‌های مدل پیشنهادی در سطوح استاندارد قرار بگیرند.
- ورود منابع تولید پراکنده در باس با بار غیرخطی در مقایسه با ورود آن‌ها در باس‌ها با بار خطی، شرایط نامناسب‌تری را به لحاظ هارمونیکی ایجاد نموده است.

بعلاوه، نتایج ذیل برای حالت‌های خروج فیدر و ورود بارغیرخطی بر اساس جدول (۱۳) و شکل (۱۲)، قابل بیان است:

- بطور کلی، خروج یک فیدر، به دلیل اینکه می‌تواند سبب خروج بار غیرخطی در انشعاب مرتبط با آن در شبکه توزیع انرژی الکتریکی شود، شرایط بهتری را به لحاظ هارمونیکی ایجاد نموده است.
- خروج فیدر ۲۳-۲۱ به دلیل خارج نمودن ۲ بار غیرخطی در مقایسه با خروج فیدر ۲-۱ که منجر به خارج شدن ۱ بار غیرخطی می‌شود، شرایط قابل قبول‌تری را از نظر هارمونیکی فراهم نموده است.
- در انتها، ورود یک بار غیرخطی در باس ۹، به دلیل تزریق جریان‌های هارمونیکی، منجر به تخطی محدودیت‌ها از استانداردهای مجاز شده است. بنابراین، به منظور قرارگیری شرایط در محدوده‌های قابل قبول، جریان تزریقی فیلترهای اکتیو افزایش یافته است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

۶- صحت‌سنجی نتایج

به‌منظور صحت سنجی مطالعات عددی، مقایسه شاخص‌های مسئله برنامه‌ریزی APFs پس از حل مسئله در سناریو سوم و بر مبنای موردمطالعه‌ای دوم با [۷] و [۸] در جدول (۱۴) ارائه‌شده است. شایان‌ذکر است که، در [۷]، شاخص‌های THDV، MLLF، HTLL و I_{af} به‌صورت یک مدل بهینه‌سازی تک هدفه و مبتنی بر ضرایب وزنی پیاده‌سازی و اجراشده است. همچنین برای به دست آوردن جواب بهینه از الگوریتم DPSO استفاده‌شده است. در مدل پیشنهادی [۷] از سه نوع مختلف APFs استفاده‌شده است که حداکثر جریان آن‌ها به ۰/۰۷ P.U محدودشده است. در [۸]، تنها شاخص‌های THDV و I_{af} به‌صورت مدل بهینه‌سازی تک هدفه پیاده‌سازی و اجراشده است. درروند حل مسئله بهینه‌سازی نیز تنها یک نمونه فیلتر برای جبران سازی هارمونیک‌ها بکار گرفته‌شده است. همچنین، برای به دست آوردن جواب بهینه از الگوریتم GA استفاده‌شده است.

جدول (۱۴): مقایسه نتایج مدل پیشنهادی در موردمطالعه‌ای دوم و سناریو سوم با مراجع [۷] و [۸]

شماره	شاخص مسئله	الگوریتم حل		
		MSA	DPSO [7]	GA [8]
۱	THDV (%)	۰/۴۵۶۳۰۰	۰/۵۹۰۰۰۰	۰/۲۲۰۰۰۰
۲	MLLF (%)	۰/۱۶۳۷۰۰	۰/۱۸۰۰۰۰	——
۳	HTLL (%)	۰/۰۱۲۰۰۰	۰/۰۱۳۴۰۰	——
۴	I_{af} (%)	۰/۲۶۰۱۳۷	۰/۲۹۰۰۰۰	۰/۳۹۲۸۰۰

نتایج ارائه شده در جدول (۱۴) بیانگر این واقعیت است که، رویکرد پیشنهادی در این مقاله در مقایسه با روش‌های ارائه شده در مراجع [۷] و [۸] با میزان جریان APFs کمتری (هزینه کمتر) به نتایج مطلوب‌تری دست یافته است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک رویکرد چندهدفه جدید درزمینه برنامه‌ریزی APFs به‌منظور افزایش کیفیت توان تحویلی به مشترکین در EPDNs پیشنهاد گردید. در رویکرد چندهدفه ارائه‌شده، شاخص‌های THDV، MLLF، HTLL و I_{af} به‌عنوان چهار هدف مسئله برنامه‌ریزی APFs در نظر گرفته‌شده‌اند. اعوجاج‌های هارمونیکی کل و فردی ولتاژ و حداکثر اندازه مجاز APFs نیز به‌عنوان محدودیت‌های مسئله مدل شده‌اند. مسئله برنامه‌ریزی APFs تحت سناریوهای مختلف و موارد مطالعه‌ای متفاوت بر روی شبکه آزمون تحت مطالعه اجرا و پیاده‌سازی گردید. تفاوت سناریوها در تعداد باس‌های کاندید در نظر گرفته‌شده به‌منظور جایابی APFs است. همچنین، تفاوت موارد مطالعه‌ای در نادیده گرفتن یا در نظر گرفتن محدودیت‌های مرتبط با جریان APFs است. رویکرد چندهدفه پیشنهادی با موفقیت بر روی شبکه آزمون تحت مطالعه پیاده‌سازی شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که شاخص‌های THDV، MLLF و HTLL پس از حل مسئله و در حضور APFs در محدوده مجاز قرارگرفته‌اند و شبکه ازلحاظ آلودگی هارمونیکی در شرایط مطلوب قرار دارد. علاوه بر این، با افزایش باس‌های کاندید به‌منظور جایابی APFs الگوریتم از آزادی عمل بیشتری برخوردار است، و نتایج محاسبه‌شده برای شاخص‌ها دارای مقادیر کمتر و مطلوب‌تری می‌باشند. همچنین، مشاهده می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده از رویکرد پیشنهادی در این مقاله با بهره‌گیری از الگوریتم قدرتمند MSA در مقایسه با نتایج حاصل از GA و DPSO مؤثرتر و کارآمدتر می‌باشند. به‌بیان‌دیگر، رویکرد پیشنهادی با تزریق جریان کمتری از APFs در مقایسه با GA و DPSO به مقادیر مطلوب‌تری از شاخص‌ها دست‌یافته است. بنابراین، رویکرد چندهدفه پیشنهادی ممکن است یک روش مناسب برای بهبود شاخص‌های کیفیت توان در EPDNs محسوب گردد. راه‌های مختلفی برای دنبال کردن و بهبود رویکرد پیشنهادی وجود دارد از قبیل استفاده همزمان از APFs و PPFs به‌منظور طراحی یک رویکرد با انعطاف‌پذیری بالاتر و کاهش هزینه‌ها و/یا در نظر گرفتن ماهیت تصادفی منابع هارمونیکی در فرآیند حل مسئله برنامه‌ریزی APFs در EPDNs که تحت توسعه و پیاده‌سازی توسط نویسندگان قرار دارد.

مراجع

[1] Fuchs E.F., Masoum M.A.S, *Power quality in power systems and electrical machines*, Elsevier Academic Press: Burlington, USA, 2008, ISBN: 978-0-12-369536-9.

[2] Arif M.R., Mahmood F., Hashmi M., Hanninen S. *"Application of passive filters to mitigate power quality problems caused by induction furnaces"*, 2012 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Bali، Indonesia, 23–27 September 2012: 1227–1230.

[3] Das J.C. *"Passive filters–potentialities and limitations"*, IEEE Transactions on Industrial Applications, 2004, Vol. 40, pp. 232-241.

[4] Kumar A., Singh J. *"Harmonic mitigation and power quality improvement using shunt active power filter"*, International Journal of Electrical, Electronics and Mechanicals Controls (IJEEMC) 2013, Vol. 2, pp. 1–13.

[5] Mulla M.A., Chudamani R., Chowdhury A. *"Series hybrid active power filter for mitigating voltage unbalance and harmonics under unbalanced non–sinusoidal supply conditions"*, 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECON), Kota Kinabalu, Malaysia, 2–5 December 2012, pp. 671–676.

[6] Angulo M., Ruiz–Caballero D.A., Lago J., Heldwein M.L. *"Active power filter control strategy with implicit closed–loop current control and resonant controller"*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, Vol. 60, pp. 2721-2730.

[7] Ziari I., Jalilian A. *"A new approach for allocation and sizing of multiple active power–line conditioners"*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, Vol. 25, pp. 1026-1035.

[8] Keypour R., Seifi H., Yazdian-Varjani A. *"Genetic based algorithm for active powerfilter allocation and sizing"*, Electric Power Systems Research, 2004, vol. 71, pp. 41–49.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]

[9] Ziari I., Jalilian A. *"Optimal placement and sizing of multiple APLCs using a modified discrete PSO"*, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, Vol. 43, pp. 630–639.

[10] Ziari I., Jalilian A. *"Optimal allocation and sizing of active power line conditioners using a new particle swarm optimization–based approach"*, Electric Power Components and Systems, 2012, Vol. 40, pp. 273–291.

[11] Moradifar A., Soleymanpour H.R. *"A fuzzy based solution for allocation and sizing of multiple active power filters"*, Journal of Power Electronics, 2012, Vol. 12, pp. 830–841.

[12] Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayanderodi H. *"Optimum placement of active power conditioner in distribution systems using improved discrete firefly algorithm for power quality enhancement"*, Applied soft computing, 2014, Vol. 23, pp. 249–258.

[13] He N., Xu D., Huang L. *"The application of particle swarm optimization to passive and hybrid active power filter design"*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, Vol. 56, pp. 2841–2851.

[14] Ashrafi S.M, Dariane A.B. *"Performance evaluation of an improved harmony search algorithm for numerical optimization: melody search (MS)"* Engineering Application of Artificial Intelligence. 26 (2013) 1301-1321.

[15] Geem Z.W, Kim J.H, Loganathan G.V. *"Harmony search optimization: applica-tion to pipe network design, Int. J. Model "* Simul. 22 (2002) 125–133.

[16] Shivaie M, Sepasian M.S, Sheikh-El-Eslami M.K. *"Multi-objective transmission expansion planning using fuzzy-genetic algorithm"*. Iranian Journal of Science and Technology, Trans. Electr. Eng. 35 (2011) 141–159.

زیرنویس‌ها

[1] Electrical power distribution networks (EPDNs)
[2] Point of common coupling (PCC)
[3] Passive power filters (PPFs)
[4] Active power filters (APFs)
[5] Total harmonic distortion of voltage (THDV)
[6] Total harmonic distortion of current (THDI)
[7] Harmonic transmission line loss (HTLL)
[8] Total current of the active power filters (I_{af})
[9] Motor load loss function (MLLF)
[10] Genetic algorithm (GA)
[11] Discrete particle swarm optimization (DPSO)
[12] Modified discrete particle swarm optimization (MDPSO)
[13] Improved discrete firefly algorithm (IDFA)
[14] Multi-criteria decision-making (MCDM)
[15] Pareto Optimal Set Solutions
[16] Melody search algorithm (MSA)
[17] Fuzzy satisfying method (FSM)
[18] Harmony search algorithm (HSA)
[19] Player memory (PM)
[20] Melody memory (MM)
[21] Player memory number (PMN)
[22] Player memory size (PMS)
[23] Number of solution vector generations in second phase (NII)
[24] Number of solution vector generations in third phase (NI)
[25] Band width (BW)
[26] Player memory considering rate (PMCR)
[27] Pitch adjustment rate (PAR)
[28] Alternative improvisation procedure (AIP)

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-02-03]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1395.5.1.3.3]