

ارائه یک ابزار بهینه‌سازی نوین در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ مبتنی بر

الگوریتم MOGSA

مریم‌ده‌باشیان^۱، سیدحمید‌ظهیری^۲

۱- دانشجوی دکتری الکترونیک، دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی - مشهد - ایران

m.dehbashian@gmail.com

۲- دانشیار گروه مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه بیرجند - بیرجند - ایران

hzahiri@birjand.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک ابزار بهینه‌سازی جدید در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ مبتنی بر الگوریتم MOGSA ارائه می‌شود. ابزار بهینه‌سازی پیشنهادی در ابتدا با استفاده از یک نرم‌افزار شبیه‌ساز مدار مورد نظر را شبیه‌سازی نموده، نتایج شبیه‌سازی را به وسیله الگوریتم MOGSA تحت بهینه‌سازی قرار می‌دهد. سپس تا حصول نتیجه مطلوب این روند را ادامه خواهد داد. برنامه‌های اصلی این ابزار در Matlab پیاده‌سازی و شبیه‌سازی مدارات به وسیله نرم‌افزار Hspice انجام می‌شود. در این مقاله، به منظور بررسی توانایی ابزار پیشنهادی در بهینه‌سازی طراحی مدارات مجتمع آنالوگ عملکرد آن سنجش می‌شود. برای نمونه، یک مسأله سایزبندی مطرح می‌شود: «طراحی یک تقویت کننده عملیاتی مستقل از دما با استفاده از منبع جریان ویدلر کسکود». نتایج به دست آمده نه تنها مشخصات مورد نظر در طراحی را برآورده می‌سازد، بلکه با ارائه مجموعه جواب‌های متنوع، حق انتخاب بیشتری را برای طراح با توجه به معیارهای مختلف طراحی فراهم می‌نماید. الگوریتم پیشنهادی MOGSA روش نوینی را در بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم جستجوی گرانشی معرفی می‌کند که در آن از «بهینگی پرتو» برای شناسایی موقعیت‌های «غیر غالب» و از یک «مخزن بیرونی» برای نگهداری این موقعیت‌ها استفاده می‌شود. برای اطمینان از صحت عملکرد روش MOGSA، این الگوریتم به وسیله چندین تابع معتبر چند هدفه آزمایش قرار می‌شود. نتایج نهایی نشان دهنده رقابت تنگاتنگ روش پیشنهادی با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه رایج است.

واژه های کلیدی: الگوریتم جستجوی گرانشی، بهینه‌سازی چندهدفه، جبهه پرتو، ابزار بهینه‌سازی، سنتز مدارات مجتمع آنالوگ، طراحی خودکار.

۱- مقدمه

مقایسه با قسمت‌های دیجیتال از پیچیدگی بالاتری برخوردار بوده، علاوه بر هزینه بالا و زمان بر بودن، به مهارت بالایی نیز در طراحی نیاز دارد. از این رو، طراحی بهینه مدارات مجتمع آنالوگ را گلوگاه طراحی مدارات مجتمع الکترونیک می‌نامند.

طراحی مدارات آنالوگ فقط شامل طراحی توپولوژی و طرح اولیه^۲ نیست، بلکه سایزبندی و مقداردهی المان‌ها را نیز شامل می‌شود. از این جهت، آن را فرایندی پیچیده و چالش برانگیز می‌دانند. روش سایزبندی المان‌ها اغلب فرایندی کند، خسته‌کننده و تکرار شونده است که میزان موفقیت آن به دانش، فراست و تجربه طراح بستگی دارد. به

مدارات مجتمع الکترونیک با معرفی سیستم‌های متمرکز بر روی یک تراشه^۱، سیستم‌های آنالوگ و دیجیتال را در کنار هم ارائه کرده‌اند. با اینکه بخش آنالوگ درصد کمی از کل مدار را شامل می‌شود، اما جزو بخش‌های حیاتی مدارات مجتمع محسوب می‌شود. طراحی مدارات بخش آنالوگ در

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۹/۱۰/۵

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۲/۱۳

نام نویسنده مسئول : مریم‌ده‌باشیان

نشانی نویسنده مسئول : ایران - مشهد - دانشگاه

فردوسی مشهد - دانشکده مهندسی - گروه الکترونیک

همین علت روش‌های متفاوتی در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ از سوی محققین مطرح شده است.

روش‌های طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ دارای دو جنبه مهم هستند: از دیدگاه جنبه اول با به کارگیری این روش‌ها دیگر به روش‌های مکرر دستی، کند و خسته‌کننده گذشته نیازی نیست و به راحتی می‌توان از آنها در طراحی مدارات آنالوگ در مقیاس بزرگ استفاده نمود. همچنین دقت بالا، استفاده آسان، عمومیت، انعطاف پذیری و زمان قابل قبول طراحی از دیگر مزایای آن است. اما از دیدگاه جنبه دوم میزان پیشرفت به کارگیری روش‌های طراحی خودکار مدارات آنالوگ و ابزارهای CAD موجود در این زمینه در مقایسه با مدارات دیجیتال عقب‌تر است و تعداد بسیار کمی از این روش‌ها تجاری شده‌اند. از این رو توسعه ابزارها و ابزارهای CAD جدید برای افزایش بهره‌وری طراحی، کاهش زمان عرضه به بازار^۳ و کنترل هزینه‌های طراحی مدارات مجتمع آنالوگ و سیگنال مختلط امری ضروری می‌باشد.

ابزارهای جدید طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ از دو بخش اساسی تشکیل شده‌اند: بخش سنتز^۴ و بخش بهینه‌سازی. در بخش سنتز پاسخ یا پاسخ‌هایی به عنوان خروجی معرفی می‌شود، اما معمولاً پاسخ ارائه شده بهترین پاسخ ممکن نبوده، ممکن است با اندکی تغییرات در آن، نتایج بهتری به دست آید. از این رو، در بخش بهینه‌سازی، پاسخ‌های به دست آمده از بخش قبل تا حد امکان به بهترین پاسخ ممکن نزدیک می‌شوند.

امروزه محققان از روش‌های بهینه‌سازی متفاوتی در ابزارهای طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ استفاده می‌کنند. رویکرد جدید محققین در سال‌های اخیر استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری، بویژه الگوریتم‌های هوش جمعی است.

بارزترین مشخصه الگوریتم‌های هوش جمعی رفتارهای اجتماعی آنهاست. این الگوریتم‌ها از اعضای تشکیل شده‌اند که رفتارهای ساده‌ای از خود بروز می‌دهند، اما اثر جمعی این رفتارها به گونه‌ای است که هوشمندی جمعی^۵ را نتیجه می‌دهد. در الگوریتم‌های هوش جمعی اعضای گروه برای رسیدن به یک هدف نهایی با یکدیگر همکاری می‌کنند. به

طور قطع، این روش مؤثرتر از زمانی است که اعضا به صورت جداگانه عمل می‌کنند. به‌تازگی روش‌های بهینه‌سازی هوش جمعی، به دلیل مشخصات عملکردی کارآمد و دارا بودن زمینه‌های بکر فراوان در کاربردهای طراحی مدار با استقبال فزاینده‌ای مواجه شده‌اند. از جمله جدیدترین الگوریتم‌های هوش جمعی می‌توان به الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) اشاره کرد. این الگوریتم، با الهام از مفاهیم جرم و نیروی جاذبه و با شبیه‌سازی قوانین مربوطه ارائه شده است.

اما از آنجا که طراحی آنالوگ یک مسأله چندهدفه بوده و شاخص‌های مختلف مدارات همچون بهره، پهنای باند، حاشیه فاز و توان مصرفی با یکدیگر در تعارض هستند، به آسانی نمی‌توان از میان جواب‌های به دست آمده، بهترین پاسخ را یافت. از این رو، باید میان جواب‌های موجود مصالحه‌ای شایسته برقرار نمود که این مصالحه با کمک چند هدفه ساختن الگوریتم بهینه‌سازی میسر می‌شود.

در این مقاله، روش نوینی در بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر الگوریتم جستجوی گرانشی به نام الگوریتم جستجوی گرانشی چند هدفه (MOGSA) ارائه می‌شود. در الگوریتم MOGSA از روش «بهینگی پرتو»^۶ برای شناسایی موقعیت‌های «غیر غالب»^۷ و از یک «مخزن بیرونی»^۸ به عنوان حافظه‌ای برای نگهداری این موقعیت‌ها استفاده می‌شود. برای بررسی صحت عملکرد الگوریتم MOGSA در بهینه‌سازی توابع چند هدفه آن را به برخی توابع آزمون استاندارد که در مقالات معتبر مورد استفاده واقع شده‌اند، اعمال نموده، نتایج حاصل از آن را با سه الگوریتم بسیار پرکاربرد در بهینه‌سازی چند هدفه مقایسه می‌کنیم.

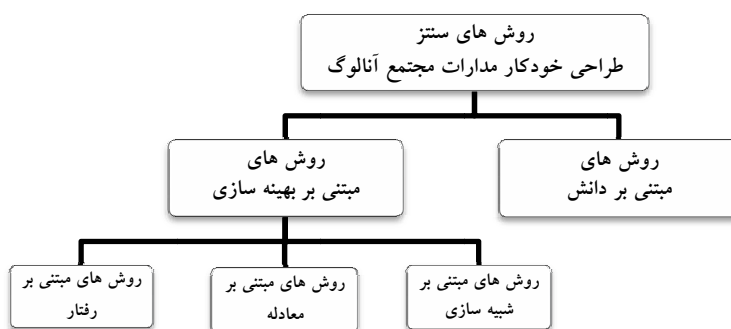
در این مقاله یک ابزار بهینه‌سازی جدید در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ مبتنی بر الگوریتم نوین MOGSA پیشنهاد می‌شود. این ابزار قابلیت جستجوی گسترده‌ای در بازه‌های از پیش تعیین شده، برای هر یک از معیارهای طراحی دارد. ابزار فوق در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز Hspice مدار مورد نظر را شبیه‌سازی می‌کند. سپس نتایج شبیه‌سازی به وسیله الگوریتم بهینه‌سازی MOGSA تحت بهینه‌سازی قرار می‌گیرند و تا حصول نتیجه مطلوب این روند ادامه می‌یابد.

پیشنهادی با طرح یک مسأله طراحی ارزیابی می‌شود. در نهایت، بخش نهم ضمن بحث و نتیجه‌گیری درباره نتایج به دست آمده مقاله را به پایان می‌رساند.

۲- روش‌های سنتز در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ

پیشینه طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ به حدود ۲۳ سال قبل باز می‌گردد [۱]. ابزارهای طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ با توجه به نوع کاربرد به سه گروه: ابزارهای طراحی توپولوژی، ابزارهای طراحی طرح اولیه و ابزارهای طراحی ساینزبندی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ ممکن است شامل یک، دو یا هر سه گروه فوق باشد.

با بررسی تحقیقات انجام شده تا به امروز می‌توان روش‌های متفاوت در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ را برحسب روش‌های سنتز مورد استفاده مطابق شکل (۱) دسته‌بندی نمود.



شکل (۱): نمایش دسته‌بندی روش‌های سنتز مورد استفاده در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ

را دارد تا از میان توپولوژی‌های تعریف شده در برنامه، توپولوژی مورد نظر خود را انتخاب نماید. سپس IDAC مقادیر پارامترهای طراحی توپولوژی فوق را ارائه می‌دهد و کاربر می‌تواند بهترین مدار ساینزبندی شده را انتخاب نماید، اما OASYS بر اساس کتابخانه‌ای از توپولوژی‌های طراحی به شکل سلسله مراتبی ساخته شده است. در ابتدا یک توپولوژی مداری بر مبنای قوانین ابتکاری تعیین می‌شود، سپس توسط ابزار طراحی ساینزبندی می‌گردد. چنانچه ابزار طراحی قادر نباشد با طراحی مدار فوق به مشخصات

برای بررسی توانایی ابزار پیشنهادی در بهینه‌سازی طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ عملکرد آن موردسنجش قرار می‌گیرد. برای نمونه، یک مسأله ساینزبندی مطرح می‌شود: «طراحی یک تقویت کننده عملیاتی مستقل از دما با استفاده از منبع جریان ویدلر کسکود و با تکنولوژی CMOS افزایشی». هدف از طراحی یافتن ساینزها و مقادیر المان‌های مدار، با شرط بیشینه نمودن پارامترهای خروجی بهره ولتاژ، پهنای باند و حاشیه فاز و درعین حال، کمینه نمودن توان مصرفی است.

در بخش دوم مقاله روش‌های سنتز و در بخش سوم روش‌های بهینه‌سازی در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ معرفی می‌شود. بخش چهارم مروری کوتاه بر الگوریتم جستجوی گرانشی دارد، سپس در بخش پنجم الگوریتم MOGSA معرفی می‌شود. در بخش ششم توابع استاندارد آزمون برای ارزیابی عملکرد MOGSA معرفی و نتایج مقایسات انجام شده بیان می‌شوند. ابزار بهینه‌سازی پیشنهادی در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ در بخش هفتم معرفی می‌شود و در بخش هشتم توانایی ابزار

۲-۱- روش‌های مبتنی بر دانش

روش مبتنی بر دانش^۹ نخستین بار در برنامه‌هایی همچون BLADES [۲]، IDAC [۳]، OASYS [۴]، MDAC/ALSC [۵-۶] ارائه شد. روش مبتنی بر دانش با توجه به توپولوژی‌های از پیش ذخیره شده در حافظه برنامه، چگونگی ساینزبندی اجزای مداری را برای رسیدن به پاسخ بهینه مسأله طراحی، توصیف می‌کند. برای مثال ابزار IDAC یک ابزار طراحی متعامل^{۱۰} است که در آن کاربر این امکان

زمان محاسبات وابستگی شدیدی به طبیعت موتور ارزیابی دارد. در روش‌های مبتنی بر دانش، با توجه به اینکه نقشه طراحی از قبل تعریف شده، سرعت اجرای آن از دیگر روش‌ها بیشتر است. روش‌های مبتنی بر مدل‌سازی که از معادلات عددی یا برخی روش‌های یادگیری ماشین مصنوعی مشتق می‌شوند، قادرند خیلی سریع به پاسخ برسند اما کیفیت نتایج تخمین زده شده فقط به دقت مدل‌ها وابسته است. در روش‌های مبتنی بر شبیه‌سازی که از شبیه‌سازی‌های مداری خیلی دقیقی استفاده می‌کنند، نتایج با کیفیت بسیار خوبی ارائه می‌شود، اما زمان اجرا طولانی‌تر است [۲۱].

۳- روش‌های بهینه‌سازی در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ

پس از سنتز مدارات مجتمع آنالوگ به وسیله ابزارهای طراحی خودکار، پاسخ یا مجموعه پاسخ‌هایی به عنوان خروجی ارائه می‌شود، اما معمولاً پاسخ ارائه شده بهترین پاسخ ممکن نبوده، ممکن است با اندکی تغییرات در آن، نتایج بهتری به دست آید. از این رو، در سال‌های اخیر محققان به این سو متمایل شدند تا با ورود روش‌های بهینه‌سازی به ابزارهای طراحی خودکار، پاسخ‌های به دست آمده را تا حد امکان به بهترین پاسخ ممکن نزدیک نمایند. امروزه محققان از روش‌های بهینه‌سازی متفاوتی در ابزارهای طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ استفاده می‌کنند. با توجه به مطالعات فراوان انجام شده در این زمینه می‌توان آنها را به سه دسته کلی تقسیم‌بندی نمود [۲۲]: روش‌های ریاضی، روش‌های ابتکاری و روش‌های فازی. در شکل (۲) روش‌های بهینه‌سازی که تاکنون در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ استفاده شده، نمایش داده شده‌اند. در اینجا به فراخور موضوع بر روی روش‌های ابتکاری که تاکنون در طراحی مدارات مجتمع آنالوگ استفاده واقع شده‌اند، متمرکز و برخی از انجام شده معرفی می‌شوند (برای مطالعه جامع‌تر در این زمینه می‌توانید به مرجع [۲۲] رجوع کنید)

خواسته شده مدار دست یابد، برنامه توپولوژی دیگری را آزمایش می‌کند.

۲-۲- روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی

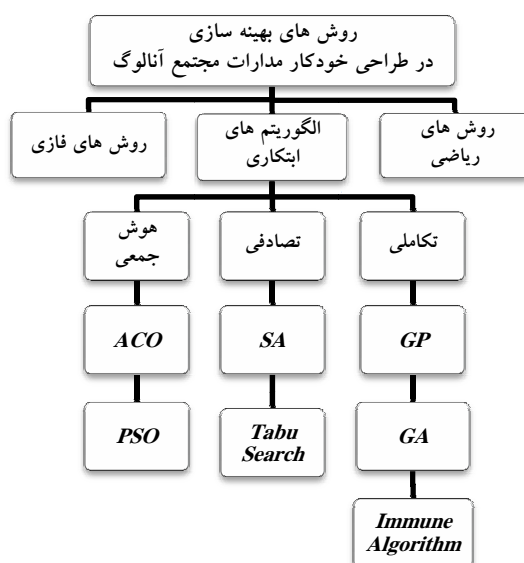
روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی^{۱۱} برای سنتز طراحی خودکار از یک موتور بهینه‌سازی به جای یک توپولوژی طراحی استفاده می‌کند. فرآیند بهینه‌سازی روالی تکرار شونده است که در هر تکرار متغیرهای طراحی برورسانی می‌شوند. این فرآیند تا زمانی که آنها به یک نقطه تعادل برسند، ادامه می‌یابد. در باب ارزیابی عملکرد نیز، موتور ارزیابی معمولاً با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر معادله، بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی یا بهینه‌سازی مبتنی بر رفتار پیاده‌سازی می‌شود.

روش‌های مبتنی بر معادله از معادلات طراحی تحلیلی برای ارزیابی عملکرد مدارات استفاده می‌کنند. این معادلات به صورت دستی یا خودکار توسط ابزارهای تحلیل نمادین^{۱۲} ایجاد می‌شوند. سپس مسأله به عنوان یک مسأله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده و معمولاً با استفاده از روش الگوریتم عددی حل می‌شود. از معروفترین برنامه‌های طراحی خودکار مدارات آنالوگ که از روش مبتنی بر معادله در آنها استفاده شده است، می‌توان به [۷] Opasyn، [۸] Stalk، [۹] Maulik، [۱۰] Astrx/Oblx، [۱۱] Amgie، [۱۲-۱۳] GPCAD و [۱۴] Sd-Opt اشاره نمود.

روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، همچون [۱۵] Fridge، [۱۶] Delight.Spice، [۱۷] FASY، [۱۸] Anaconda، [۱۹] Maelstrom و [۲۰] Darwin از اشکال مختلف شبیه‌سازی برای ارزیابی عملکرد مدار استفاده می‌کنند. به طور کلی، این دسته از روش‌ها در تعیین عملکرد بهینه مدار، از نوعی ابزار تحلیلی مدار در حلقه داخلی پروسه بهینه‌سازی، استفاده می‌کنند.

۲-۳- مقایسه انواع روش‌های سنتز

با توجه به نوع روش سنتز به کار رفته در ابزارهای طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ، می‌توان آنها را از نظر کیفیت و کمیت معیارهای مورد نظر مقایسه کرد.



شکل (۲): نمایش تقسیم‌بندی روش‌های بهینه‌سازی مورد استفاده در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ

الگوریتم بازیخت شبیه‌سازی شده ارائه شد. از آن زمان به بعد، این الگوریتم به عنوان یک روش بهینه‌سازی در ابزارهای طراحی مدارات مجتمع آنالوگ استفاده شد. برنامه‌های Yang [۳۹]، Gbopcad [۴۰]، Girardi [۴۱] و Severo [۴۲] از آن جمله هستند.

برای نخستین بار در سال ۱۹۹۰ مقاله‌ای به نام «جستجوی تابو و بهینه‌سازی طراحی» ارائه شد [۴۳] که مکانیسم جستجوی تابو را با استفاده از مثال‌های ساده توضیح داده و یک مسأله طراحی مدار الکترونیک ساده را بیان کرده است، اما پس از آن استفاده از الگوریتم جستجوی تابو در طراحی مدارات الکترونیک با استقبال بسیار کمی روبه‌رو شد.

۳-۳- الگوریتم‌های هوش جمعی در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ

سال ۲۰۰۱ برنامه‌ای به نام جعبه ابزار MatlabTM ارائه شد که در آن از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها برای طراحی مدارات آنالوگ ساده استفاده می‌شد [۴۴]. پس از آن، محققان تمایل چندانی به استفاده از الگوریتم ACO در طراحی مدارات آنالوگ از خود نشان ندادند.

سابقه اولین استفاده از PSO در طراحی مدارات مجتمع آنالوگ به سال ۲۰۰۳ بر می‌گردد و از آن زمان برای

۳-۱- الگوریتم‌های تکاملی در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ

در ابتدا از الگوریتم ژنتیک فقط برای بهینه‌سازی مدارات خطی آنالوگ استفاده می‌شد، اما پس از مدتی الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه‌سازی کارآمد در ابزارهای طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ استفاده شد که از آن جمله می‌توان به Darwin [۲۰]، Menozzi [۲۳]، Rajagopal [۲۴]، DELIGHT.SPICE [۱۶]، Puhan [۲۵] در گذشته و از جمله جدیدترین آنها می‌توان به Nicosia [۲۶]، Popuri [۲۷]، Liu [۲۸]، Li [۲۹]، Barros [۲۱]، گلمکانی [۳۰] و بابایان [۳۱] اشاره کرد.

از برنامه‌نویسی ژنتیک نیز در بهینه‌سازی ابزارهایی چون Koza [۳۲]، Ryose [۳۳]، Wang [۳۴] و Streeter [۳۵] استفاده شده است. از دیگر الگوریتم‌های تکاملی که در بهینه‌سازی طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ استفاده شده‌اند، الگوریتم ایمنی مصنوعی است که از آن جمله می‌توان به Kalinli [۳۶] و Norihiro [۳۷] اشاره نمود.

۳-۲- الگوریتم‌های تصادفی در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ

نخستین بار در سال ۱۹۹۰ برنامه بهینه‌سازی طراحی مدارات آنالوگ به نام Optiman [۳۸] با استفاده از

مطابق قانون نیوتن هر جسم به جسم دیگر نیرویی وارد می‌کند که این نیرو با جرم خود جسم و معکوس مجذور فاصله تا جسم دیگر متناسب است. بنابراین، جرم‌های بزرگتر نیروی بیشتری بر جرم‌های کوچکتر وارد می‌کنند و برعکس جرم‌های کوچکتر نیروی کمتری بر جرم‌های بزرگتر وارد می‌کنند.

با توجه به قوانین فیزیکی هر جسم بر اثر نیرویی که به آن وارد می‌شود، دارای شتاب و در نتیجه سرعتی هم جهت با آن نیرو می‌شود. بنابراین، جرم‌های کوچکتر به علت آنکه نیروی اعمالی بر آنها بسیار بیشتر است، به سمت جرم‌های بزرگتر حرکت می‌کنند. بدین ترتیب، اگر نقاط بهینه را محل اجرام بزرگتر در نظر بگیریم، با استفاده از قانون گرانش می‌توانیم این اطلاعات را به بقیه اجرام منتقل کنیم و آنها را به سمت نقاط بهینه سوق دهیم.

ویژگی‌های مثبت الگوریتم GSA همچون همگرایی سریع، عدم توقف در بهینه‌های محلی، کاهش حجم محاسباتی نسبت به الگوریتم‌های تکاملی و عدم نیاز به حافظه در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های خانواده هوش جمعی، بستر جدیدی از تحقیقات را فرا روی محققان قرار داده است. از این‌رو، با توجه به زمینه‌های کاربردی مورد استفاده، نسخه‌های متفاوتی از الگوریتم GSA ارائه شده است که می‌توان به الگوریتم جستجوی گرانشی باینری^{۱۳} (BGSA) [۵۱] و الگوریتم جستجوی گرانشی نخبه‌گرای پیشرفته^{۱۴} (AEGSA) [۵۲] اشاره کرد. از این الگوریتم در حوزه‌های مختلف بهینه‌سازی از جمله طراحی فیلتر [۵۳]، انتخاب ویژگی [۵۴]، جبران سازی توان راکتیو [۵۵]، فشرده‌سازی تصاویر [۵۶]، طبقه‌بندی داده‌ها [۵۷] و ... استفاده شده است. با توجه به مزایای الگوریتم GSA که در بالا به آن اشاره شد، بر آن شدیم تا از قابلیت‌های این الگوریتم در بهینه‌سازی مسائل چند هدفه نیز استفاده نماییم. در ادامه الگوریتم MOGSA معرفی می‌شود.

۵- معرفی الگوریتم MOGSA

در الگوریتم MOGSA از بهینه‌سازی پرتو برای شناسایی موقعیت‌های «غیر غالب» و از یک «مخزن بیرونی» برای نگهداری این موقعیت‌ها استفاده می‌شود.

بهینه‌سازی جنبه‌های مختلف طراحی مدارات مجتمع RF, VLSI, تقویت کننده های CMOS با باند گسترده و ... در طراحی مدارات مجتمع مورد توجه قرار گرفته است، از آن جمله می‌توان به [۴۵] Park, [۴۶] Min Chu, [۴۷] Mandal Fakhfakh, [۴۸] Thakker Rajesh و [۴۹] اشاره نمود.

۳-۴- مقایسه انواع الگوریتم‌های ابتکاری

در سال‌های اخیر از میان الگوریتم‌های ابتکاری، الگوریتم‌های تکاملی و بخصوص الگوریتم ژنتیک و نسخه‌های ارتقا یافته آن به طور گسترده‌ای در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ به کار رفته است. حجم وسیع تحقیقات انجام گرفته، پاسخ‌های قانع کننده و تجاری شدن برخی از این تحقیقات سندی گویا بر ادعای کارآمدی استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی طراحی مدارات مجتمع آنالوگ است.

اما به علت پیچیدگی‌های ساختاری الگوریتم ژنتیک، طراح به سادگی نمی‌تواند از آن استفاده نماید و گاه در تنظیم برخی پارامترهای آن دچار سردرگمی می‌شود. از این رو، ترجیح می‌دهد از الگوریتم‌هایی با ساختار داخلی ساده‌تر اما در عین حال کارا بهره گیرد.

تحقیقات جدید محققان در زمینه طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ نشان می‌دهد که تمایل به استفاده از الگوریتم‌های هوش جمعی در حال افزایش است. ساختار ساده، همگرایی سریع و وجود زمینه‌های تحقیقی فراوان در این حوزه را شاید بتوان از جمله دلایل استقبال محققان از این نوع الگوریتم‌ها دانست. از جمله جدیدترین الگوریتم‌های هوش جمعی می‌توان به الگوریتم جستجوی گرانشی (GSA) اشاره نمود.

۴- الگوریتم جستجوی گرانشی

الگوریتم جستجوی گرانشی در سال ۲۰۰۹ از سوی خانم راشدی [۵۰] معرفی شد. این الگوریتم با شبیه‌سازی قوانینی شبیه به قانون گرانش و حرکت نیوتن در محیطی با زمان گسسته در فضای جستجو، طراحی شده است.

iv. نسبت دادن سنگین‌تر به عامل‌های با شایستگی بیشتر به تفکیک هر یک از توابع هدف.

$$m_{j_i} = (m_{j_1}, m_{j_2}, \dots, m_{j_F}); \quad (6)$$

v. نرمالیزاسیون اجرام به تفکیک هر یک از توابع هدف و تشکیل ماتریس اجرام.

$$M_{j_i} = [M_{j_{i1}}, M_{j_{i2}}, \dots, M_{j_{iF}}]; \quad (7)$$

vii. محاسبه ماتریس شتاب اجرام.

viii. بروزرسانی سرعت اجرام: R_1 یک عدد تصادفی در بازه $[0-1]$ است.

$$V_i(t+1) = R_1 \times V_i(t) + a_i(t); \quad (8)$$

ix. موقعیت‌یابی جدید اجرام.

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1); \quad (9)$$

x. ذرات باید به گونه‌ای در فضای جستجو نگهداری شوند تا خارج از حدود مرزهای فضای جستجو قرار نگیرند.

xi. بروزرسانی محتویات مخزن: این بروزرسانی‌ها شامل جادادن همه موقعیت‌های غیرغالب فعلی در مخزن است. به طور همزمان «هر موقعیت مغلوب شده در فرایند از مخزن حذف می‌شود».

xii. کنترل حجم مخزن: از آنجایی که ظرفیت مخزن محدود است، هر زمان که ظرفیت مخزن به حد نصاب رسید، لازم است «ابرمکعب‌هایی» در مناطق مرور شده فضای پاسخ تولید شوند و اجرام با توجه به مختصاتشان درون این ابرمکعب‌ها قرار گیرند. سپس ابرمکعب حاوی بیشترین تعداد اجرام شناسایی شده و نقاط مازاد بر ظرفیت مخزن به طور تصادفی حذف می‌شوند.

xiii. پایان حلقه

۶- سنجش عملکرد الگوریتم MOGSA و

مقایسه نتایج

برای بررسی توانایی MOGSA در بهینه‌سازی توابع چندهدفه، آن را به برخی توابع آزمون استاندارد اعمال

در این الگوریتم، ابتدا جمعیت اولیه‌ای از اجرام به شکل تصادفی انتخاب می‌شود. در هر مرحله پس از محاسبه توابع برازندگی، بهترین اجرام در یک مخزن بیرونی شامل جواب‌های پرتو نگهداری می‌شوند. سپس با توجه به موقعیت بهترین و بدترین اجرام در هر تکرار، موقعیت اجرام برای تکرار بعدی الگوریتم بروزرسانی می‌شود. این الگوریتم با نرم‌افزار Matlab پیاده‌سازی شده است.

الگوریتم MOGSA شامل مراحل زیر است:

۱) مشخص نمودن ابعاد مسأله (n) و تعداد اجرام موجود در فضای پاسخ (m)

۲) ایجاد جمعیت اولیه (X_i)

در این مرحله جمعیت اولیه‌ای شامل موقعیت m جرم، به طور کاملاً تصادفی ایجاد می‌شود:

$$X_i = rand(m, n) \quad (1)$$

$$X_i = (X_i^1, \dots, X_i^d, \dots, X_i^n), \quad \text{for } i=1, 2, \dots, m$$

۳) تعیین سرعت اولیه هر یک از اجرام: در این قسمت سرعت اولیه صفر برای هر یک از اجرام تعیین می‌شود:

$$V_i(m, n) = 0; \quad (2)$$

۴) مقداردهی پارامترهای ثابت گرانش (α و β).

۵) ایجاد حلقه جستجو for برای T مرتبه تکرار:

این حلقه مهمترین بخش اجرایی الگوریتم MOGSA است و به مدت T مرتبه تکرار اجرا می‌شود. شایان ذکر است در صورتی که بدترین موقعیت یک جرم با بهترین موقعیت آن برابر شود، اجرای این حلقه متوقف می‌شود.

i. ارزیابی برازندگی هر یک از اجرام جمعیت توسط توابع برازندگی.

$$fit_i(X_i(t)); \quad (3)$$

تعداد اهداف مسأله $F = (fit_1, fit_2, \dots, fit_F)$

ii. اعمال شروط «بهینه‌سازی پرتو» و ذخیره‌سازی موقعیت‌های اجرام «غیر غالب» در یک مخزن.

iii. تعیین موقعیت بهترین و بدترین جرم برای هر یک از توابع هدف.

$$best_{f_i} = (best_{f_{i1}}, best_{f_{i2}}, \dots, best_{f_{iF}}); \quad (4)$$

$$worst_{f_i} = (worst_{f_{i1}}, worst_{f_{i2}}, \dots, worst_{f_{iF}}); \quad (5)$$

مجموعه بهینه پرتو می‌دهد. بنابراین، در بهینه‌سازی توابع چندهدفه در مواجهه با توابع آزمون، هدف مینیمم کردن این مقدار است. از دیدگاه معیار M_1^* الگوریتم MOGSA با سه الگوریتم بسیار پرکاربرد در بهینه‌سازی چند هدفه مقایسه شده است: الگوریتم MOPSO [۵۸]، الگوریتم NSGA-II [۶۰] و الگوریتم PAES [۶۱].^{۱۵} اما لازم است توضیح داده شود که در این مقاله از نظر زمان اجرا، الگوریتم‌ها با یکدیگر مقایسه نشده‌اند. چون الگوریتم MOGSA با کُد Matlab نوشته شده است، نمی‌توان آن را با الگوریتم‌های فوق که توسط کد C پیاده‌سازی شده‌اند، مقایسه نمود. مشخصات الگوریتم‌های مورد مقایسه در جدول (۱) آمده است.

می‌کنیم. توابع آزمونی که در اینجا معرفی می‌شوند، توابعی هستند که توسط آقای CoelloCoello برای ارزیابی عملکرد الگوریتم MOPSO به کار رفته‌اند [۵۸]. برای مقایسه الگوریتم‌ها با یکدیگر از معیاری استفاده می‌کنیم که توسط Zitzler معرفی شده است [۵۹]:

$$M_1^* = \frac{1}{|Y'|} \sum_{d' \in Y'} \min \{ \|d' - \bar{d}\|^* ; \bar{d} \in \bar{Y} \} \quad (10)$$

در رابطه بالا $Y', \bar{Y} \subseteq Y$ مجموعه بردارهای هدف هستند که با یک جفت از بردارهای تصمیم غیر غالب به ترتیب $X', \bar{X} \subseteq X$ نیز متناظر هستند. X نیز متناظر با متغیرهای تصمیم‌گیری مسأله است. M_1^* فاصله میانگین را برای

جدول (۱): مشخصات الگوریتم‌های مورد مقایسه

Algorithm	Specific	Value
NSGA-II	Population Size	200
	Crossover Rate	0.8
	Selection Type	tournament
	Mutation Rate	1/vars (vars=number of decision)
PAES	Depth	5
	Archive Size	200
	Mutation Rate	1/L (L=Length of the chromosomic string that encodes the decision variables)
MOPSO	Particles Population	40
	Repository Size	200
	Adaptive Grid	30 division
MOGSA	Masses Population	40
	Repository Size	200
	Adaptive Grid	30
	α, β	40, 100

• تابع آزمون ۱

نخستین تابع آزمون در زیر بیان شده است:

سومین تابع آزمون در زیر بیان شده است:

$$\text{Min } f_1(x_1, x_2) = x_1 \quad (17)$$

$$\text{Min } f_2(x_1, x_2) = g(x_1, x_2).h(x_1, x_2) \quad (18)$$

$$\text{Where } g(x_1, x_2) = 11 + x_2^2 - 10 \cos(2\pi x_2)$$

$$h(x_1, x_2) = \begin{cases} 1 - \sqrt{\frac{f_1(x_1, x_2)}{g(x_1, x_2)}} & \text{if } f_1(x_1, x_2) \leq g(x_1, x_2) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

$$\text{and } 0 \leq x_1 \leq 1, \quad -30 \leq x_2 \leq 30$$

این مسأله ۶۰ جبهه پرتو «محلی» دارد که به راحتی می‌تواند جمعیت عامل‌ها را جذب کند (یعنی یک مسأله‌ای چند جبهه‌ای است). میانگین معیار M_1^* حاصل از اجرای الگوریتم‌های فوق در ستون سوم جدول (۲) آمده است. در این آزمون تمام نتایج برای ۳۲۰۰ بار تکرار هر الگوریتم آورده شده است.

شکل‌های (۳-۵) جبهه پرتو تولید شده توسط الگوریتم‌های MOGSA، PAES، NSGA-II و MOPSO را بترتیب برای نخستین، دومین و سومین تابع آزمون نشان می‌دهند. این اشکال توانایی الگوریتم پیشنهادی MOGSA را در یافتن پاسخ‌های غیر غالب و در عین حال پراکندگی مناسب پاسخ‌ها را در کنار دیگر الگوریتم‌های چندهدفه پرکاربرد نشان می‌دهند. جدول (۲) نشان می‌دهد روش MOGSA از نظر میانگین معیار M_1^* در هر سه تابع آزمون عملکرد بسیار بهتری از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه NSGA-II و PAES و الگوریتم هوش جمعی MOPSO دارد. با توجه به تصادفی بودن الگوریتم‌های فوق، نتایج حاصل، میانگین ۲۰ بار تکرار هر الگوریتم است.

$$\text{Min } f_1(x_1, x_2) = x_1 \quad (11)$$

$$\text{Min } f_2(x_1, x_2) = (1 + 10x_2) \times \left[1 - \left(\frac{x_1}{1 + 10x_2} \right)^\alpha - \frac{x_1}{1 + 10x_2} \sin(2\pi q x_1) \right] \quad (12)$$

$$\text{Where } 0 \leq x_1, x_2 \leq 1 \text{ and } q = 4, \alpha = 2 \quad (13)$$

این مسأله جبهه پرتو ناپیوسته دارد و شامل چهار منحنی پرتو است. میانگین معیار M_1^* حاصل از اجرای الگوریتم‌های فوق در ستون اول جدول (۲) آمده است. در این آزمون تمام نتایج برای ۴۰۰۰ بار تکرار هر الگوریتم آورده شده است.

• تابع آزمون ۲

دومین تابع آزمون در زیر بیان شده است:

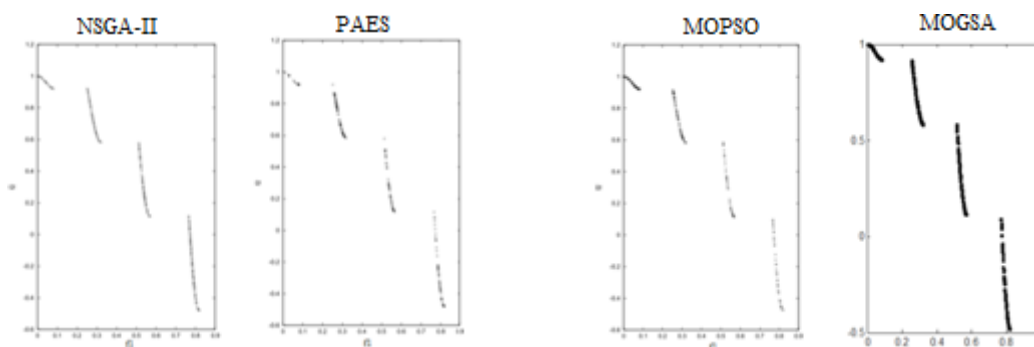
$$\text{Min } f_1(x) = \begin{cases} -x & \text{if } x \leq 1 \\ -2 + x & \text{if } 1 < x \leq 3 \\ 4 - x & \text{if } 3 < x \leq 4 \\ -4 + x & \text{if } x > 4 \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{Min } f_2(x) = (x - 5)^2 \quad (15)$$

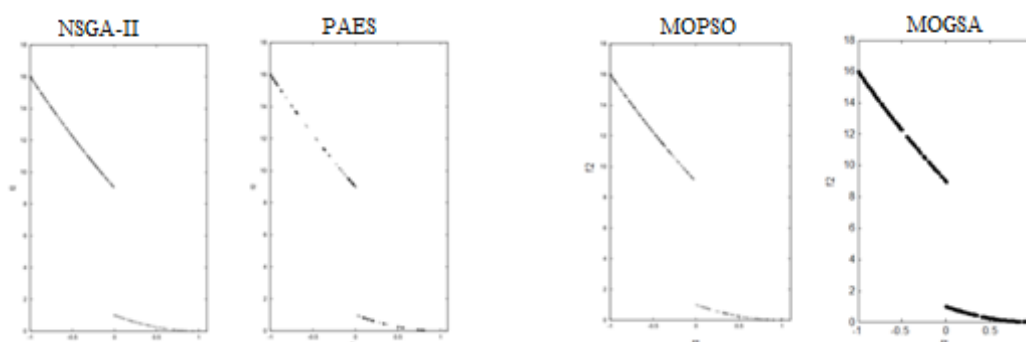
$$\text{Where } -5 \leq x \leq 10 \quad (16)$$

این مسئله نیز جبهه پرتو ناپیوسته دارد. میانگین معیار M_1^* حاصل از اجرای الگوریتم‌های فوق در ستون دوم جدول (۲) آمده است. در این آزمون تمام نتایج برای ۱۲۰۰ بار تکرار هر الگوریتم آورده شده است.

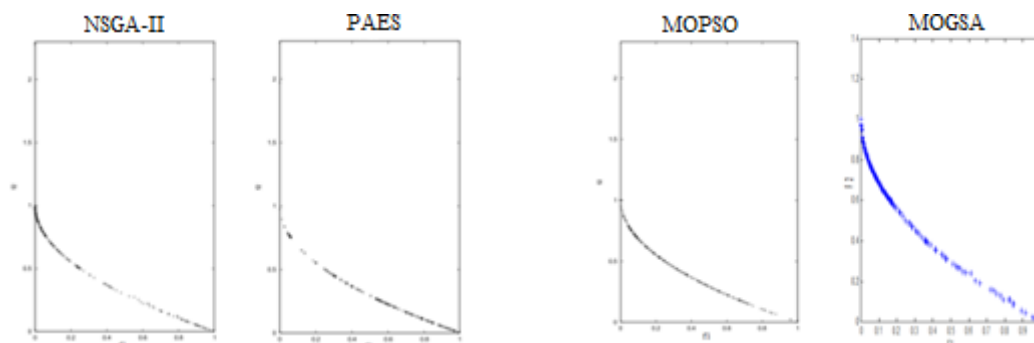
• تابع آزمون ۳



شکل (۳): جبهه پرتو تولید شده توسط الگوریتم‌های NSGA-II, PAES, MOPSO و MOGSA برای نخستین تابع آزمون



شکل (۴): جبهه پرتو تولید شده توسط الگوریتم‌های NSGA-II, PAES, MOPSO و MOGSA برای دومین تابع آزمون



شکل (۵): جبهه پرتو تولید شده توسط الگوریتم‌های NSGA-II, PAES, MOPSO و MOGSA برای سومین تابع آزمون

جدول (۲): مقایسه میانگین معیار M_1^* حاصل از اجرای

الگوریتم‌های NSGA-II, PAES, MOPSO و

MOGSA برای سه تابع آزمون

	تابع آزمون ۱	تابع آزمون ۲	تابع آزمون ۳
NSGA-II	۰/۰۰۲۵۳۶	۰/۰۰۱۵۹۴	۰/۰۹۴۶۴۴
PAES	۰/۰۰۲۸۸۱	۰/۰۷۰۰۰۳	۰/۲۵۹۶۶۴
MOPSO	۰/۰۰۲۰۵۷	۰/۰۰۱۴۷۳۹	۰/۰۰۱۱۶۱۱
MOGSA	۰/۰۰۱۶۱۳۸	۰/۰۰۰۲۱۵	۰/۰۰۱۱۱۲

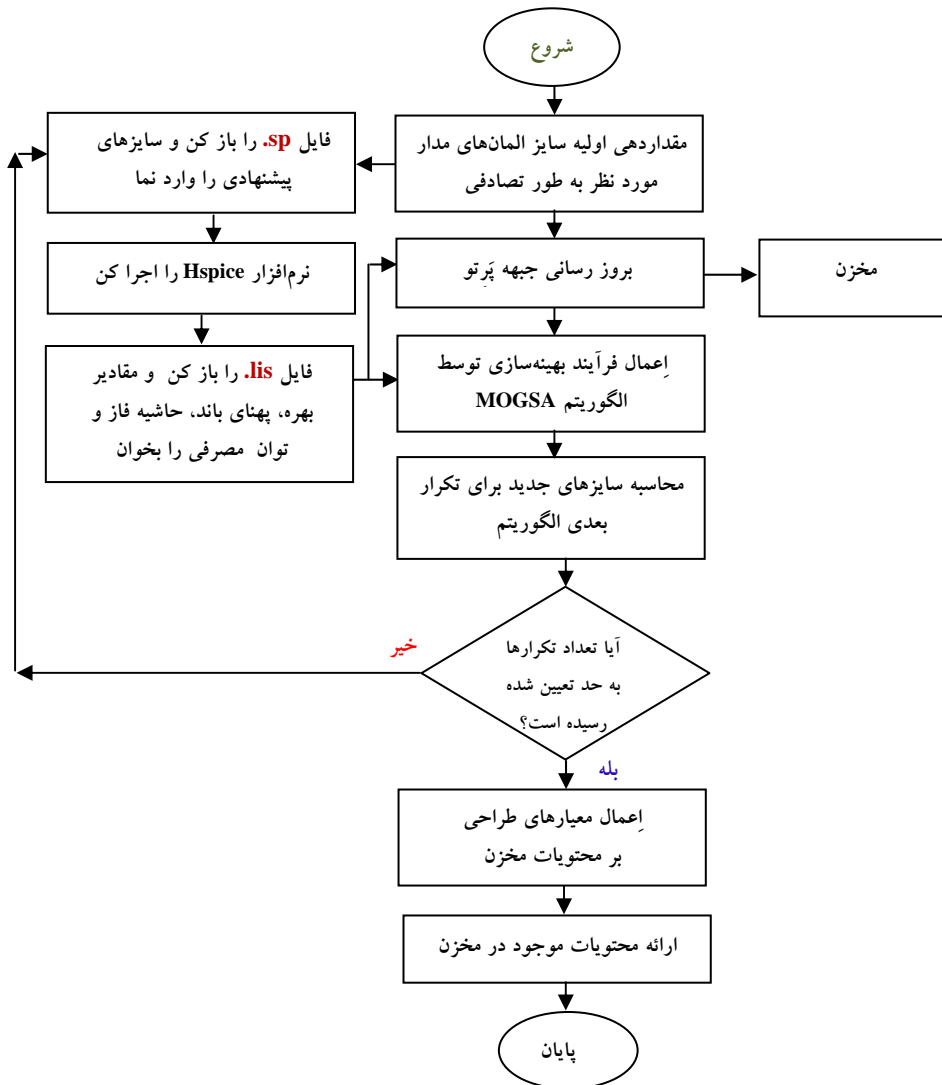
۷- معرفی ابزار بهینه‌سازی پیشنهادی در

طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ

در این مقاله یک ابزار بهینه‌سازی جدید در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ پیشنهاد می‌شود. در این ابزار، ابتدا پاسخ‌های مورد نظر از طریق شبیه‌سازی به دست آمده، سپس به وسیله الگوریتم MOGSA تحت بهینه‌سازی قرار می‌گیرند.

مورد نظر ارائه می‌شود. سپس پاسخ‌های پیشنهادی توسط نرم‌افزار Matlab به فایل ورودی sp. نرم‌افزار Hspice منتقل می‌شود. نرم‌افزار Hspice مدار مورد نظر را با توجه به پاسخ‌های پیشنهاد شده به آن شبیه‌سازی و مقادیر خروجی بهره، پهنای باند، حاشیه فاز و توان مصرفی را در فایل خروجی lis. ذخیره می‌کند. سپس نرم‌افزار Matlab این مقادیر خروجی را از فایل lis. استخراج می‌کند.

فلوچارت کلی این ابزار در شکل (۶) نشان داده شده است. برنامه‌های اصلی آن با نرم‌افزار Matlab نوشته شده و شبیه‌سازی مدارات توسط نرم‌افزار Hspice انجام شده است. در ابزار پیشنهادی ابتدا توسط الگوریتم MOGSA، به طور کاملاً تصادفی تعدادی پاسخ کاندید از میان بازه‌های از پیش تعیین شده طراحی انتخاب و برای سایزبندی مدار



شکل (۶): فلوچارت ابزار بهینه‌سازی پیشنهادی

MOGSA با اجرای فرآیند بهینه‌سازی بر روی پاسخ‌های اولیه، پاسخ‌های جدیدی را برای تکرار بعدی الگوریتم آماده می‌کند. این فرآیند برای تعداد معینی از تکرارها اجرا می‌شود

در ادامه، مقادیر خروجی حاصل از شبیه‌سازی Hspice که در شرایط بهینگی پرتو صدق می‌کنند انتخاب و در یک مخزن بیرونی نگهداری می‌شوند. سپس الگوریتم

نظر گرفته شده است، اما مقادیر بقیه المان‌ها جزو پارامترهای طراحی مدار هستند که توسط ابزار طراحی پیشنهادی به دست می‌آیند. این پارامترها عبارتند از:

* مقدار L و W/L ترانزیستورهای $M1$ و $M2$

* مقدار L و W/L ترانزیستورهای $M3$ و $M4$

ترانزیستورهای فوق دو به دو مشابه‌اند.

* مقدار L و W/L ترانزیستور $M5-M13$

* مقدار خازن جبران ساز CC

برای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی مناسب است که محدوده مجاز تغییرات پارامترها توسط طراح مشخص شود، زیرا در هنگام اجرای الگوریتم، پس از شبیه‌سازی مدار ابتدا بررسی می‌شود که تمام ترانزیستورها بجز $M11$ در ناحیه فعال حضور دارند. در غیر این صورت آن جواب در تکرارهای بعدی حذف می‌شود (ترانزیستور $M11$ در ناحیه Triode عمل می‌کند). پارامترهای خروجی مورد نظر عبارتند از: بهره ولتاژ، پهنای باند، حاشیه فاز و توان مصرفی که به عنوان توابع برازندگی در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شوند.

۸-۲- نتایج طراحی ابزار پیشنهادی

مشخصات الگوریتم MOGSA در ابزار پیشنهادی برای بهینه‌سازی فرایند طراحی مسأله نمونه در جدول (۴) آمده است.

پس از ۲۰۰ بار تکرار اجرای الگوریتم بهینه‌سازی، تعداد کل پاسخ‌هایی که توسط ابزار پیشنهادی بررسی شد، شامل ۴۰۰۰ پاسخ شد که از این میان ۱۶۳ پاسخ دارای شرایط بهینگی پرتو بوده، وارد مخزن می‌شوند. از میان پاسخ‌های درون مخزن نیز ۱۴۲ پاسخ محدودیت‌های موجود در طراحی مدار مورد نظر را برآورده می‌کنند. مدت زمان مورد نیاز برای عملکرد ابزار پیشنهادی فقط به تعداد اجراهای Hspice وابسته بوده، حدود ۱۱۷۴ ثانیه (کمتر از ۲۰ دقیقه) برآورد شد.

تا در نهایت با توجه به مقادیر خروجی بهره، پهنای باند، حاشیه فاز و توان مصرفی به دست آمده به بهترین سایز بندی ممکن برای المان‌های مدار مورد نظر دست یابیم.

۸-۱- ارزیابی ابزار پیشنهادی

برای بررسی توانایی ابزار پیشنهادی در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ عملکرد آن سنجش می‌شود. در اینجا برای نمونه، یک مسأله سایز بندی مطرح می‌شود: «طراحی یک تقویت کننده عملیاتی مستقل از دما با استفاده از منبع جریان ویدلر کسکود با تکنولوژی CMOS افزایشی». برنامه‌های ابزار پیشنهادی توسط لپ‌تاپ Core™ 2 Due 2.26 GHz اجرا شده است.

۸-۱- شرایط مسأله نمونه

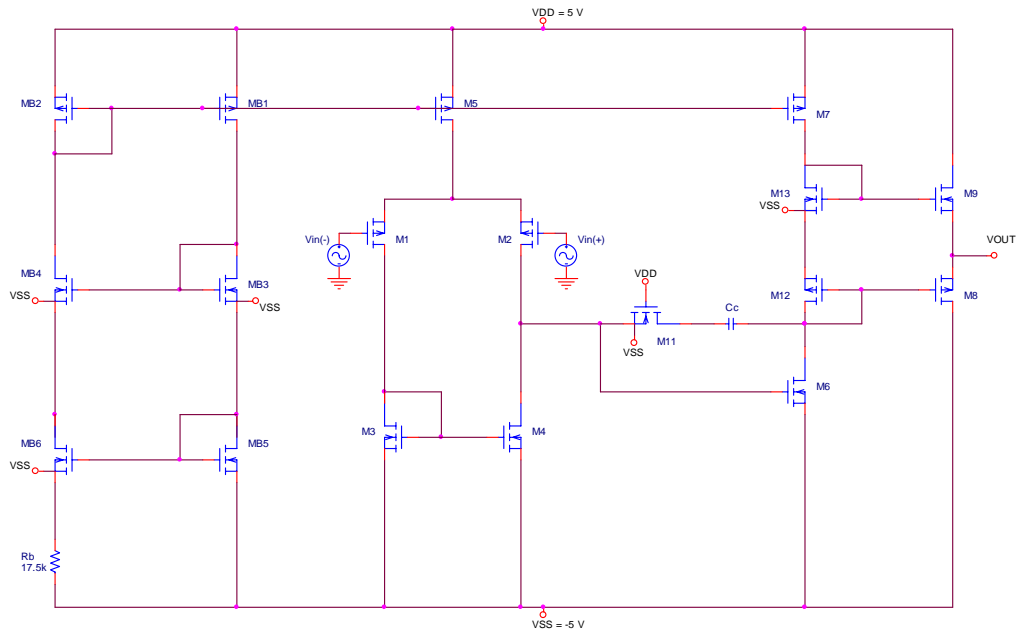
در مسأله نمونه طراحی، از ساختار پیشنهادی در شکل (۷) استفاده می‌شود. در این تقویت کننده از یک منبع جریان ویدلر کسکود به عنوان منبع جریان بایاس ورودی، یک ترانزیستور ($M11$) در ناحیه Triode برای افزایش فاز و پهنای باند، و خروجی کلاس AB برای افزایش ماکزیمم نوسان‌های متقارن در خروجی بهره گرفته شده است. مشخصات تقویت کننده عملیاتی مورد نظر در جدول (۳) آمده است.

جدول (۳): مشخصات طراحی تقویت کننده عملیاتی مسئله

نمونه

Specification	Required
Dc Gain	> 30K
Unity Gain Bandwidth	>10MHz
Phase Margin	>70
Power Dissipation	as low as possible
V_{DD} & V_{SS}	+5V & -5V

در طراحی مدار فوق فقط اندازه مقاومت و ترانزیستورهای مربوط به منبع جریان ویدلر کسکود ثابت در



شکل (۷): ساختار پیشنهادی تقویت کننده مسأله نمونه طراحی

پاسخ به ازای بزرگترین حاشیه فاز، پاسخ ۴ پاسخ به ازای کوچکترین توان مصرفی و پاسخ ۵ پاسخی به نسبت متناسب نسبت به تمام معیارها برای پارامترهای خروجی است.

۹- نتیجه گیری

در این مقاله یک ابزار بهینه‌سازی جدید در طراحی خودکار مدارات مجتمع آنالوگ مبتنی بر الگوریتم MOGSA پیشنهاد شده است. این ابزار توانایی جستجوی وسیع و مؤثری در بازه‌های از پیش تعیین شده طراحی دارد. ابزار فوق در ابتدا با استفاده از شبیه‌ساز Hspice مدار مورد نظر را شبیه‌سازی می‌کند، سپس نتایج شبیه‌سازی به وسیله الگوریتم MOGSA تحت بهینه‌سازی قرار می‌گیرند و تا حصول نتیجه مطلوب این روند ادامه می‌یابد.

برای بررسی توانایی ابزار پیشنهادی در بهینه‌سازی طراحی مدارات مجتمع آنالوگ عملکرد آن به عنوان نمونه در مسأله ساینزبندی «طراحی تقویت کننده عملیاتی مستقل از دما با استفاده از منبع جریان ویدلر کسکود» مورد سنجش قرار گرفت. پاسخ‌های نهایی از پراکندگی مناسبی برخوردارند، همچنین، تنوع جواب‌های ارائه شده که هر

جدول (۴): مشخصات پارامترها در ابزار بهینه‌سازی

پیشنهادی با الگوریتم MOGSA

Algorithm Setup	Value
Population of Masses	20
Number of Input Parameters	21
Number of Output Parameters	4
Number of Iterations	200
α	20
β	100
Content of Repository	200

نتایج نهایی حاصل از عملکرد ابزار بهینه‌سازی پیشنهادی در ساینزبندی خودکار المان‌های مدار مورد نظر در جدول (۵) آورده شده است. در شکل‌های (۸-۱۰)، مقادیر توابع برازندگی اعضای جبهه پرتو و تمام پاسخ‌های موجود دو به دو نسبت به هم رسم شده است.

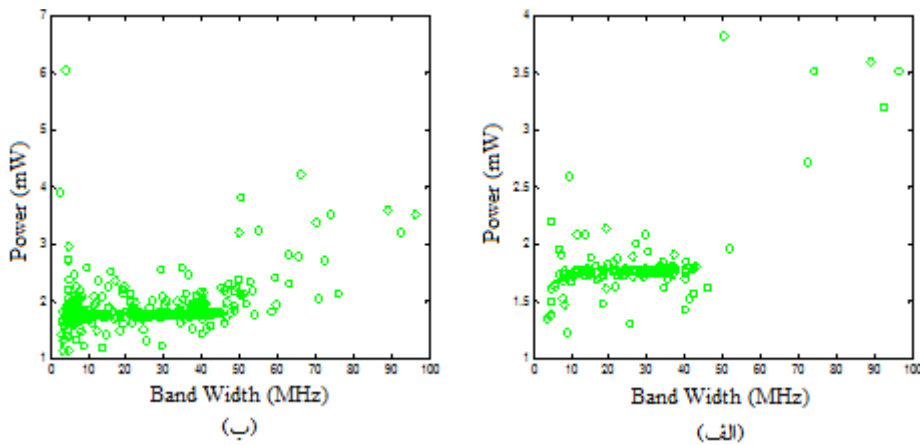
همان طور که ملاحظه می‌شود، جواب‌های با پهنای باند بیشتر توان بیشتری مصرف می‌کنند (شکل (۸)). تقابل میان پهنای باند و حاشیه فاز در شکل (۹) و در شکل (۱۰) نیز تقابل میان پهنای باند و بهره ولتاژ نشان داده شده است. شایان ذکر است که پاسخ ۱ پاسخ به ازای بزرگترین بهره ولتاژ، پاسخ ۲ پاسخ به ازای بزرگترین پهنای باند، پاسخ ۳

توابع هدف از سرعت همگرایی بسیار بالایی نیز برخوردار است. این الگوریتم برای مسائل بهینه‌سازی که محاسبه توابع هزینه آن زمانبر است (اکثر مسائل مبتنی بر شبیه‌سازی) روش مؤثرتری است. برای اطمینان از صحت عملکرد روش ارائه شده در مواجهه با مسائل بهینه‌سازی چند هدفه، به وسیله چندین تابع استاندارد معتبر آزمایش شده است. نتایج نهایی حاصل از مقایسه الگوریتم MOGSA با سه الگوریتم پرکاربرد نشان داد در تمام موارد الگوریتم پیشنهادی از توانایی بالاتری در بهینه‌سازی چند هدفه برخوردار است. از این رو، به جرأت می‌توان ادعا کرد در آینده الگوریتم MOGSA رقیب سرسختی برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی در کاربردهای چند هدفه خواهد بود.

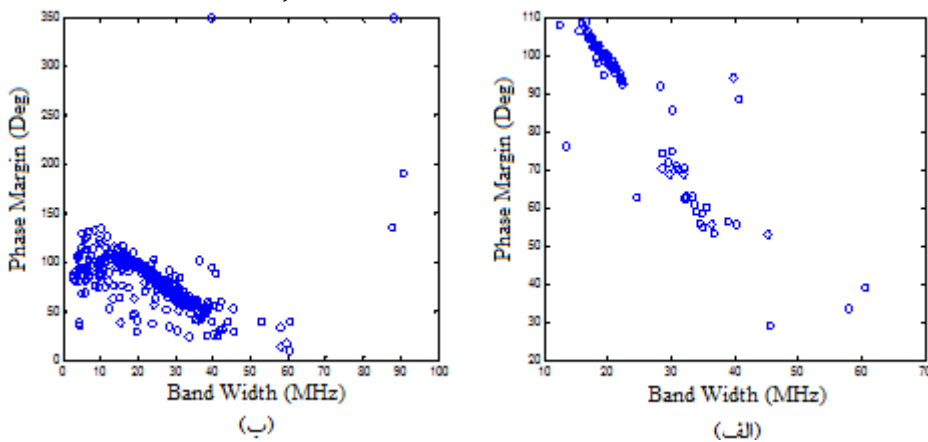
کدام از نظری بهینه هستند، دست طراح را در انتخاب گزینه مورد نظر باز خواهد گذاشت. یکی از ویژگی‌های فوق‌العاده الگوریتم MOGSA جستجوی همه جانبه فضای مسأله است. از این رو، در بین پاسخ‌های به دست آمده گاه با جواب‌هایی بسیار عالی مواجه می‌شویم که نسبت به دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی قابل مقایسه نیست. از دیگر ویژگی‌های منحصر به فرد الگوریتم بهینه‌سازی MOGSA مدت زمان اجرای آن است. مدت زمان اجرای این الگوریتم نسبت به دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در تحقیقات مشابه بسیار کوتاهتر است. الگوریتم پیشنهادی MOGSA روش نوینی را در بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم جستجوی گرانشی معرفی می‌کند که ضمن حفظ پراکندگی جواب‌ها در حوزه

جدول (۵): مقایسه میان محاسبات دستی و چند جواب ابزار بهینه‌سازی در ساینبدی خودکار مسأله نمونه

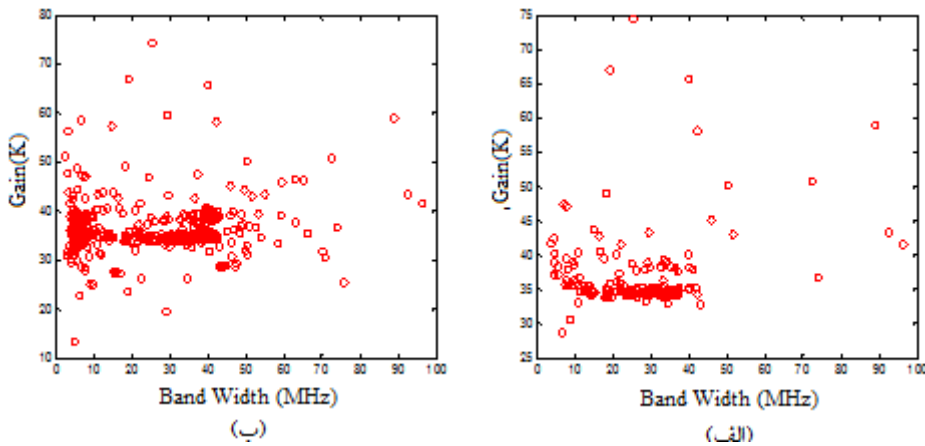
Specification	Handed Simulated	1 Solution	2 Solution	3 Solution	4 Solution	5 Solution
DC gain(K)	32.35	81.2918	62.1915	59.4492	67.0195	73.5625
Band Width(MHz)	7.2	13.384	40.573	16.584	28.361	30.095
Phase Margin	107.22	76.12	88.444	108.88	91.931	85.749
Power(mW)	1.546	1.5166	3.8115	1.448	1.128	1.4581
(W/L)-M1 (μm)	146.4/6.6	247.71/4.2	228.88/4	168.82/6.28	184.12/5.4	146.33/4
(W/L)-M2 (μm)	146.4/6.6	247.71/4.2	228.88/4	168.82/6.28	184.12/5.4	146.33/4
(W/L)-M3 (μm)	5.4/6.6	8.5/6.18	8.5/8	7.74/5.58	7.84/4	8.5/6.19
(W/L)-M4 (μm)	5.4/6.6	8.5/6.18	8.5/8	7.74/5.58	7.84/4	8.5/6.19
(W/L)-M5 (μm)	30/6.6	32.46/7.86	36.83/8	25.07/6.79	37.29/8	28.91/8
(W/L)-M6 (μm)	32.4/6.6	41.64/5.46	36.81/4	41.65/5.63	38.81/4.12	39.06/4.69
(W/L)-M7 (μm)	90/6.6	92.03/7.74	80/4	92.78/8	88.60/8	93.35/8
(W/L)-M8 (μm)	270/6.6	282.42/5.61	287.66/4	279.75/8	280.37/8	34.06/7.4
(W/L)-M9 (μm)	97.2/6.6	99.97/4	93.70/4	99.11/5.50	98.33/5.19	98.95/4.08
(W/L)-M11 (μm)	1/6.6	1.5/6.63	0.5/4	0.5/4.62	1.05/8	0.5/4.74
(W/L)-M12 (μm)	90/6.6	98.88/8	100/8	90.80/7.67	99.84/4.60	100/7.73
(W/L)-M13 (μm)	32.4/6.6	37.98/4	20/4	28.43/8	36.06/7.60	34.57/7.72
Cc(pF)	1	1.187	3.5	2.038	2.823	3.228



شکل (۸): تقابل میان پهنای باند و توان مصرفی در مسأله طراحی، اعضای جبهه پرتو (الف) تمام پاسخ‌های موجود (ب)



شکل (۹): تقابل میان پهنای باند و حاشیه فاز در مسأله طراحی، اعضای جبهه پرتو (الف) تمام پاسخ‌های موجود (ب)



شکل (۱۰): تقابل میان پهنای باند و بهره ولتاژ در مسأله طراحی، اعضای جبهه پرتو (الف) تمام پاسخ‌های موجود (ب)

circuit design”, IEEE Trans. Comput. Aided Des. 8, pp. 680–692, June 1989.

[3] Degrauwe, M., et al., “IDAC: an interactive design tool for analog CMOS circuits”, IEEE J. Solid-State Circuits 22, pp. 1106–1115, Dec. 1987.
 [4] Harjani, R., Rutenbar, R., Carley, L.R., “OASYS: a framework for analog circuit

مراجع

[1] Kuhn, J., “Analog module generators for silicon compilation”, in: Proceedings of the VLSI System Design, pp. 75–80, 1987.
 [2] El-Turky, F., Perry, E., “BLADES: an artificial intelligence approach to analog

- analysis of output from a computer code”, *Technometrics* 21, pp. 239–245, 1979.
- [16] Nye, W., Riley, D.C., Sangiovanni-Vincentelli, A., Tits, A.L., “DELIGHT.SPICE: an optimization-based system for the design of integrated circuits”, *IEEE Trans. Comput. Aided Des.* 7(4), pp. 501–519, April 1988.
- [17] Torralba, A., Chavez, J., Franquelo, L.G., “FASY: a fuzzy-logic based tool for analog synthesis”, *IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integrated Circuits* 15(7), pp. 705–715, 1996.
- [18] Phelps, R., Krasnicki, M., Rutenbar, R., Carley, L.R., Hellums, J., “ANACONDA: simulation-based synthesis of analog circuits via stochastic pattern search”, *IEEE Trans. CAD* 19(6), pp. 703–717, 2000.
- [19] Krasnicki, M., Phelps, R., Rutenbar, R., Carley, L.R., “MAELSTROM: efficient simulation-based synthesis for custom analog cells”, in: *Proceedings of the ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)*, pp. 945–950, 1999.
- [20] Kruiskamp, W., Leenaerts, D., “DARWIN: CMOS op-amp synthesis by means of a genetic algorithm”, in: *Proceedings of the ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC)*, pp. 550–553, 1995.
- [21] Barros, M., Guilherme, J., Horta, N., “Analog circuits optimization based on evolutionary computation techniques”, *INTEGRATION, the VLSI journal* 43, pp. 136–155, 2010.
- [۲۲] ده‌باشیان، مریم، “کاربرد روش‌های بهینه‌سازی در طراحی مدارات مجتمع آنالوگ و دیجیتال”، سمینار کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشگاه بیرجند، اردیبهشت ماه ۱۳۸۹.
- [23] Menozzi, R., Piazzzi, A., Contini, F., “Small-Signal Modeling for Microwave FET Linear Circuits Based on a Genetic Algorithm”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, pp. 839–847, Vol. 43, No.10, October 1996.
- [24] Rajagopal, C., Sridhar, K., Nunez, A., “RF CMOS Circuit Optimizing Procedure and Synthesis Tool”, *EECS Department, Syracuse University, NY -13244, GLSVLSI’03, Washington, DC, USA, 2003.*
- [25] Puhani, J., Fajfar, I., Tuma, T., Burmen, A., “Integration of Generic Optimization Algorithms in SPICE”, *Elektrotehniški vestnik* 68(1), *Electrotechnical Review, Slovenia*, 2001.
- [26] Nicosia, G., Rinaudo, S., Sciacca, E., “An evolutionary algorithm-based approach to synthesis”, *IEEE Trans. Comput. Aided Des.* 8, pp. 1247–1265, Dec.1989.
- [5] Leme, C., Horta, N.C., Franca, J.E., Yufera, A., Rueda, A., Huertas, J.L., Paris, L., Oses, T., “Flexible silicon compilation of charge redistribution data conversion systems”, in: *Proceedings of the IEEE /Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pp. 403–406, 1991.
- [6] Horta, N.C., Franca, J.E., Leme, C.A., “Framework for architecture synthesis of data conversion systems employing binary-weighted capacitor arrays”, in: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, pp.1789–1792, June 1991.
- [7] Koh, H.Y., Sequin, C.H., Gray, P.R., “OPASYN: a compiler for CMOS operational amplifiers”, *IEEE Trans. Comput. Aided Des.* 9 (2), pp. 113–125, Feb.1990.
- [8] Harvey, J.P., Elmasry, M.I., Leung, B., “STAIC: an interactive framework for synthesizing CMOS and BICMOS analog circuits”, *IEEE Trans. Comput Aided Des.* 11 (11), pp. 1402–1417, Nov. 1999.
- [9] Maulik, P.C., Carley, L.R., “Automating analog circuit design using constrained optimization techniques”, in: *Proc Aided Design IEEE International Conference on Computer-Aided Design*, pp.390–393, 1991.
- [10] Ochotta, E.S., Rutenbar, R.A., Carley, L.R., “Synthesis of high-performance analog circuits in ASTRX/OBLX”, *IEEE Trans. Comput. Aided Des.* 15(3), pp. 273–294, Mar.1996.
- [11] Gielen, G., et al. , “An analog module generator for mixed analog/digital ASIC design”, *Wiley Int. J. Circuit Theory Appl.* 23, pp. 269–283, July–Aug 1995.
- [12] Hershenson, M., Boyd, S., Lee, T., “GPCAD: a tool for CMOS op-amp synthesis”, in: *Proceedings of the IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD)*, pp.296–303, 1998.
- [13] del, M., Hershenson, M., Boyd, S.P., Lee, T.H., “Optimal design of a CMOS Op-Amp via geometric programming”, *IEEE Trans. Comput. Aided Des.* 20(1), pp. 1–21, Jan.2001.
- [14] Medeiro, F., Perez Verdu, B., Rodriguez Vazquez, A., Huertas, J.L., “Avertically integrated tool for automated design of modulators”, *IEEE J. Solid-State Circuits* 30(7), July1995.
- [15] McKay, M.D., Conover, W.J., Beckman, R.J., “A comparison of three methods for selecting values of input variables in the

- using immune algorithm”, Papers of Technical Meeting on Electronic Circuits, IEE Japan(2005), VOL. 05, NO. 38-47, pp .37-42, 2005.
- [38] Gielen, G.G.E., Walscharts, H.C.C., and Sansen, W.M.C., “Analog circuit design optimization based on symbolic simulation and simulated annealing”, IEEE Journal of SolidState Circuits, 25:707–713, June 1990.
- [39] Yang, H.Z., Fan, C.Z., Wang, H., Liu, R.S., “Simulated Annealing Algorithm with Multi-Molecule: An Approach to Analog Synthesis”, Proceedings of the 1996 European conference on Design and Test, Publisher by IEEE Computer Society, p. 571, 1996.
- [40] Yuan, J., Farhat, N.H., Van der Spiegel, J., “GBOPCAD: A Synthesis Tool for High-Performance Gain-Boosted Opamp Design”, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—I: REGULAR PAPERS, VOL. 52, NO. 8, AUGUST 2005.
- [41] Girardi, A., Bampi, S., “Power Constrained Design Optimization of Analog Circuits Based on Physical gm/ID Characteristics”, Journal Integrated Circuits and Systems, V.2 / No.1, pp. 22-28, 2007.
- [42] Severo, L. Girardi, C., A., “An Optimization-Based Tool For Circuit Level Synthesis Analog Integrated Circuits”, Federal University of Pampa, 2009.
- [43] Bland, J.A., Dawson, G.P., “Tabu search and design optimization”, Computer-Aided Design, Volume 23, Issue 3, pp. 195-201, April 1990.
- [44] Tamplin, M.R., Hamilton, A., “Ant circuit world: an Ant algorithm MATHLAB toolbox for the design, visualization and analysis of analogue circuits”, Proceedings of the International Conference on Evolvable Systems: From Biology to Hardware, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, PP. 151-158, Berlin, Heidelberg, New York, 2001.
- [45] Park, J., Choi, k., Allstot, J., "Parasitic-Aware RF Circuit Design and Optimization," IEEE Trans. on Circuits and Systems-I: Regular Papers, Vol. 51, No. 10, Oct. 2004.
- [46] Chu, M, Allstot, D.J., "An Elitist Distributed Particle Swarm Algorithm for RF IC Optimization," Proceedings of the 2005 conference on Asia South Pacific design automation, Shanghai, China, 2005.
- [47] Mandal, S.K., Sural, S., Patra, A., “ANN- and PSO-Based Synthesis of On-Chip Spiral Inductors for RF ICs”, IEEE Trans. on Computer-Aided Design of Integrated robust analog circuit design using constrained multi-objective optimization”, Knowledge-Based Systems 21, pp. 175–183, 2008.
- [27] Popuri, V., “Bias-driven Robust Analog Circuit Sizing Scheme”, Electrical Engineering Department, University of California, Los Angeles, 2009.
- [28] Liu, B., Wang, Y., Yu, Z., Liu, L., Li, M., Wang, Z., Lu, J., Fernandez, F.V., “Analog circuit optimization system based on hybrid evolutionary algorithms”, INTEGRATION, the VLSI journal 42, pp. 137–148, 2009.
- [29] Li, Y., “A simulation-based evolutionary approach to LNA circuit design optimization”, Applied Mathematics and Computation 209, PP. 57–67, 2009.
- [۳۰] گلمکانی، عباس، "ارائه یک CAD برای طراحی و بهینه‌سازی المان‌ها و مدارهای مجتمع RF"، پایان نامه دکتری الکترونیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، زمستان ۱۳۸۸.
- [۳۱] بابایان مشهدی، سمانه، "بهینه‌سازی طراحی مدارات مجتمع آنالوگ ولتاژ پایین با توان مصرفی کم بوسیله الگوریتم‌های ژنتیک چند هدفه"، پایان نامه کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشگاه فردوسی، مشهد، تابستان ۱۳۸۷.
- [32] Koza, J.R., Al-Sakran, S.H., Jones, L.W., “Cross-domain features of runs of genetic programming used to evolve designs for analog circuits”, in: Proceedings of 2005 NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware, pp. 205–212, 2005.
- [33] Ryose, H., Jin no, K., Hirose, H., “Automated Synthesis of Simple Nonlinear Analog Circuits by Means of Genetic Algorithm”, Journal of Signal Processing, Vol. 8, No. 6, pp. 529-535, November 2004.
- [34] Wang, F., Li, Y., Li, L., Li, K., “Automated analog circuit design using two-layer genetic programming”, Applied Mathematics and Computation 185, pp. 1087–1097, 2007.
- [35] Streeter, M.J., Keane, M.A., Koza, J.R., “Automatic synthesis using genetic programming of both the topology and sizing for five Post 2000 patented analog and mixed analog-digital circuits”, Southwest Symposium on Mixed-Signal Design, pp. 5–10, 2003.
- [36] Kalinli, A. , “Optimal Circuit Design Using Immune Algorithm”, Artificial Immune Systems, Springer Berlin/Heidelberg, Volume 3239/2004, pp. 42-52, 2004.
- [37] Norihiro, K., Nobukazu, T., “Optimizing method for analog circuit design

- [۵۷] ده‌باشیان، مریم، ظهیری، سیدحمید. آموزش شبکه عصبی MLP در طبقه‌بندی داده‌ها با استفاده از روش GSA، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، ۱۳۸۹.
- [58] Coello Coello, C.A., Lechuga, M.S., "MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization", In Congress on Evolutionary Computation (CEC'2002), IEEE Service Center, Vol. 2, pp.1051-1056, Piscataway, New Jersey, May2002.
- [59] Zitzler, E., Deb, K., Thiele, L., "Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms: Empirical Results", Evolutionary Computation, 8(2), pp.173-195, 2000.
- [60] Deb, K., Agrawal, S., Pratab, A., Meyarivan, T., "A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II", In Proceeding of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference, pp. 849-858. Springer, 2000.
- [61] Knowles, J.D. and Corne, D.W., "Approximating the Non-dominated Front Using the Pareto Archived Evolution Strategy", Evolutionary Computation, 8(2), pp. 149-172, 2000.
- Circuits and Systems, Vol. 27, NO. 1, pp. 188 – 192, Jan. 2008.
- [48] Fakhfakh, M., Cooren, Y., Sallem, A., Loulou, M., Siarry, P., "Analog circuit design optimization through the particle swarm optimization technique", Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Volume 63, Netherlands:Springer, pp.71-82, 2009.
- [49] Thakker Rajesh, A., Shojaei Baghini, M., Patil, M. B., "Automatic Design of Low-Power Low-Voltage Analog Circuits Using Particle Swarm Optimization with Re-Initialization", Journal of low power electronics, ISSN 1546-1998, vol. 5, pp. 154, 2009.
- [50] Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H., Saryazdi, S., "GSA: A Gravitational Search Algorithm", Information Sciences, Vol. 179, pp. 2232-2248, 2009.
- [۵۱] راشدی، عصمت؛ نظام‌آبادی پور، حسین و سریزدی سعید. الگوریتم جستجوی گرانشی باینری، هشتمین کنفرانس ابزارهای هوشمند، دانشگاه فردوسی مشهد ۱۳۸۶.
- [۵۲] ده‌باشیان، مریم، ظهیری، سیدحمید، الگوریتم جستجوی گرانشی نخبه‌گرای پیشرفته، اولین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران، دانشگاه بیرجند، ۱۳۸۸.
- [۵۳] راشدی، عصمت؛ نظام‌آبادی پور، حسین. طراحی فیلترهای IIR به وسیله الگوریتم جستجوی گرانشی، شانزدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۷.
- [۵۴] راشدی، عصمت؛ نظام‌آبادی پور، حسین. انتخاب ویژگی با استفاده از الگوریتم جستجوی گرانشی، سومین کنفرانس فناوری اطلاعات و دانش، دانشگاه فردوسی، مشهد، ۱۳۸۶.
- [55] Rashedi, E., Nezamabadi-pour, H., Saryazdi, S., "Allocation of static var compensator using gravitational search algorithm", First Joint Congress on Fuzzy and Intelligent Systems Ferdowsi University, Iran, 2007.
- [۵۶] ده‌باشیان، مریم؛ ظهیری، سیدحمید و مهرشاد، ناصر، آموزش شبکه عصبی MLP در فشرده‌سازی تصاویر با استفاده از روش GSA، ششمین کنفرانس ماشین بینایی و پردازش تصویر ایران، دانشگاه اصفهان، ۱۳۸۹.

زیر نویس‌ها

¹ System-on-Chip

² Layout

³ Time-to-Market

⁴ Synthesis

⁵ Swarm Intelligence

⁶ Pareto-Optimality

⁷ Non-Dominated Positions

⁸ External Repository

⁹ Knowledge-based Approach

¹⁰ Interactive

¹¹ Optimization-based Approach

¹² Symbolic Analysis

¹³ Binary Gravitational Search Algorithm

¹⁴ Advanced Elitist Gravitational Search Algorithm

^{۱۵} کد اصلی الگوریتم‌های MOPSO، NSGA-II و

PAES از نویسندگان اصلی را می‌توان از مخزن نرم‌افزاری

EMOO از آدرس زیر دانلود نمود:

<http://www.lania.mx/~ccoello/EM00/EM00software.html>