

الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی کنترل کننده برای دنبال کردن نقطه حداکثر توان در سیستم های فتوولتائیک با

در نظر گرفتن تغییرات تابش

نگارنده: تینا سموات

استاد راهنما

دکتر مصطفی نظری

خرداد ۱۴۰۰

شماره: ۰۱۲۹۹/۱۸۳
تاریخ: ۱۴۰۲/۰۷/۰۶

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

پایه علمی: عالی
فرمهای ارزیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
موسسه علمی و فرهنگی ۹۲ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم تینا سموات با شماره دانشجویی ۹۷۰۹۳۱۴ رشته مکترونیک تحت عنوان طراحی کنترل کننده برای دنبال کردن نقطه حداکثر توان در سیستم های فتوولتائیک با در نظر گرفتن تغییرات تابش که در تاریخ ۱۴۰۲/۰۳/۱۷ با حضور هیأت داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒ (ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸ ☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶ ☐ (د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴ ☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐ نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مصطفی نظری	استادیار	
۲- استاد داور اول	دکتر حبیب احمدی	دانشیار	
۳- استاد داور دوم	دکتر سید مجتبی واردی کولایی	استادیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر ناصرالدین سپهری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده

۱۴۰۲/۰۶/۳۰

تقدیم بہ اسطورہ زندگیم، پناہ محبتیم و امید بودنم...

مادر عزیزم...

تشکر قلبی و لسانی خود را

از استاد عالی قدر جناب آقای دکتر مصطفی نظری که زحمات راهنمایی این

پایان نامه را عهده دار گردیدند و در تمامی مراحل انجام رساله از راهنمایی های مدبرانه

ایشان استفاده نمودم ابراز می دارم و توفیقات روز افزون ایشان را توأم با

صحت و سعادت خواستارم.

تعهدنامه

اینجانب **تینا سموات** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکترونیک** دانشکده مهندسی مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **طراحی کنترل کننده برای دنبال کردن نقطه بیشینه توان در سیستم های فتوولتائیک با در نظر گرفتن تغییرات تابش** تحت راهنمایی **دکتر مصطفی نظری** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

چکیده

در کنار تمام مزایای سیستم‌های فتوولتائیک، راندمان پایین غیرقابل چشم‌پوشی است و علت آن، مشخصه غیرخطی و وابسته به شرایط محیطی پنل است. برای این مشکل نیازمند کنترل‌کننده‌ای هستیم تا در هر لحظه، با وجود تغییرات در محیط اطراف، بیشینه توان در خروجی دریافت شود. در این بررسی کنترل‌کننده فازی جدید برای ردیابی پیوسته نقطه بیشینه توان در شرایط مختلف تابش و دما ارائه شده است. در این طراحی دو موضوع مهم موردتوجه قرار گرفته است که اصلی‌ترین آن‌ها حداقل‌سازی پارامترهای کنترلی، با حفظ قدرت تحلیل منطق فازی است. مسئله دیگر، پیچیدگی و زمان‌بر بودن طراحی یک کنترل‌کننده فازی و وابستگی شدید آن‌ها به سیستم اصلی است. در این بررسی روشی پیشنهاد گردیده که یک ساختار کنترل‌کننده طراحی شود که قدرت سازگاری با سیستم‌های دیگر را با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراابتکاری داشته باشد. ابتدا سیستم‌های فازی ممدانی و سوگنو بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند و بهینه‌ترین کنترل‌کننده برای ادامه فعالیت‌ها برگزیده شده است. این سیستم فازی دارای توابع عضویت کمتر و ورودی‌های فازی آن بهنجارسازی شده است. جهت تطبیق سریع با هر پنل خورشیدی دیگری از دو ضریب ثابت استفاده گردیده است که بخشی مهم در ساختمان این نوع کنترل‌کننده‌ها به حساب می‌آید. همچنین، پارامترهای مهم کنترلی این سیستم فازی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری رقابت استعماری و علف‌های هرز مهاجم، که الگوریتم‌های نوظهوری به حساب می‌آیند، تعیین شده است و موجب طراحی هوشمندانه و خلاقانه کنترل‌کننده فازی می‌شود. این عمل به دلیل سرعت بالا و کم‌هزینه بودن بسیار موردتوجه قرار گرفته است. عملکرد سیستم کنترلی طراحی شده با روش تپه‌نوردی به عنوان یک روش کلاسیک و همچنین سیستم فازی بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک به عنوان روش شناخته‌شده مقایسه گردیده است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که کنترل‌کننده ارائه‌شده علاوه بر سادگی بسیار نسبت به پژوهش‌های قبل از دقت بالایی نیز در دنبال کردن نقطه‌ی بیشینه توان بهره‌مند است.

کلمات کلیدی : فتوولتائیک، ردیابی بیشینه توان، کنترل‌کننده فازی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم رقابت استعماری، الگوریتم علف‌های هرز مهاجم

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه	۱
۱-۱ سابقه‌ی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان	۲
۲-۱ انرژی خورشیدی	۷
۳-۱ سلول‌های خورشیدی	۷
۴-۱ صفحات خورشیدی	۱۰
۱-۴-۱ عملکرد صفحات خورشیدی	۱۱
۵-۱ دست یابی به بیشینه توان در سیستم‌های خورشیدی	۱۳
فصل ۲ مدلسازی سیستم فتوولتائیک	۱۵
۱-۲ مقدمه	۱۶
۲-۲ مدل‌های شبیه‌سازی رفتار سلول خورشیدی	۱۶
۱-۲-۲ مدل ایده‌آل	۱۷
۲-۲-۲ مدل تک‌دیود	۱۷
۳-۲-۲ مدل دو دیود	۱۹
۳-۲ مشخصه پنل	۲۱
۴-۲ انتقال توان بیشینه	۲۴
۵-۲ مبدل بوست	۲۴
۱-۵-۲ مدولاسیون پهنای پالس	۲۷
۲-۵-۲ تأثیر تغییرات در چرخه‌کاری مبدل بر ولتاژ بار	۲۸
۶-۲ انواع روش‌های دنبال کردن نقطه بیشینه توان	۳۰
۷-۲ جمع‌بندی	۳۹

فصل ۳ طراحی کنترل کننده.....	۴۱
۱-۳ مقدمه.....	۴۲
۲-۳ کنترل کننده تپه نوردی.....	۴۲
۳-۳ کنترل کننده فازی.....	۴۴
۴-۳ کنترل کننده فازی برای سیستم خورشیدی.....	۴۶
۱-۴-۳ نوع سیستم فازی.....	۴۶
۳-۴-۳ ورودی فازی.....	۴۶
۳-۴-۳ خروجی فازی.....	۴۷
۴-۴-۳ قواعد فازی.....	۴۷
۵-۳ بهینه سازی کنترل کننده فازی.....	۴۸
۱-۵-۳ الگوریتم ژنتیک.....	۴۹
۲-۵-۳ الگوریتم رقابت استعماری.....	۵۲
۳-۵-۳ الگوریتم علف های هرز مهاجم.....	۵۸
۶-۳ جمع بندی.....	۶۲
فصل ۴ طراحی کنترل کننده.....	۶۵
۱-۴ مقدمه.....	۶۶
۲-۴ بررسی نوع سیستم و تعداد توابع عضویت ورودی.....	۶۶
۱-۲-۴ توابع عضویت ورودی.....	۶۷
۲-۲-۴ توابع عضویت خروجی.....	۶۸
۳-۲-۴ پایگاه قواعد.....	۶۹
۴-۲-۴ ضرایب ورودی.....	۶۹
۵-۲-۴ الگوریتم بهینه سازی ژنتیک.....	۷۰
۶-۲-۴ نتایج.....	۷۰
۳-۴ طراحی کنترل کننده فازی ممدانی ۹ قاعده.....	۷۵
فصل ۵ نتایج بهینه سازی سیستم فازی ممدانی ۹ قاعده.....	۷۷
۱-۱-۵ جدول قواعد فازی و ضرایب ورودی.....	۷۸
۲-۱-۵ مقایسه خروجی سیستم در شرایط پایدار و متغیر.....	۷۹

۵-۲ جمع بندی ۹۰

فصل ۶ جمع بندی ۹۱

فهرست جداول

جدول ۱-۱	میزان بازده پنل‌های مختلف در شرایط آزمایشگاهی (clean energy review 2020).....	۱۰
جدول ۲-۱	بازده بهترین پنل‌های موجود در بازار (clean energy review 2020).....	۱۰
جدول ۱-۲	روند تغییر چرخه کاری کانورتر بوست در وضعیت‌های مختلف توان و ولتاژ.....	۳۰
جدول ۱-۳	پایگاه قواعد فازی یک سیستم نمونه.....	۴۸
جدول ۱-۴	جدول قواعد فازی ممدانی ۹ قاعده بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک.....	۷۱
جدول ۲-۴	جدول قواعد فازی ممدانی ۲۵ قاعده بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک.....	۷۱
جدول ۳-۴	جدول قواعد فازی سوگنو ۹ قاعده بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک.....	۷۱
جدول ۴-۴	جدول قواعد فازی سوگنو ۲۵ قاعده بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک.....	۷۲
جدول ۵-۴	ضرایب ورودی‌های فازی بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک K2.....	۷۳
جدول ۱-۵	جدول قواعد فازی بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری.....	۷۸
جدول ۲-۵	جدول قواعد فازی بهینه‌شده توسط الگوریتم علف‌های هرز مهاجم.....	۷۸
جدول ۳-۵	ضرایب بهینه‌شده ورودی کنترل‌کننده فازی.....	۷۹
جدول ۴-۵	زمان رسیدن به حالت مانا در تابش ۹۰۰ وات بر متر مربع و دما ۳۰ درجه سانتیگراد.....	۸۰
جدول ۵-۵	مقایسه عددی توان کنترل‌کننده‌های فازی در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و تابش متغیر.....	۸۵
جدول ۶-۵	مقایسه عددی توان خروجی کنترل‌کننده‌های فازی در تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و دما متغیر.....	۸۸
جدول ۷-۵	مقایسه عددی توان خروجی کنترل‌کننده‌های فازی در وضعیت تغییر بار.....	۸۹

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ سهم منابع سوخت در تولید برق مناطق مختلف جهان در سال ۲۰۱۹ [۱]..... ۳
- شکل ۱-۲ روند تغییر استفاده از منابع مختلف سوخت برای تولید برق در سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ [۱]..... ۴
- شکل ۱-۳ روند تغییر استفاده از منابع تجدیدپذیر مختلف برای تولید برق در سال های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۹ [۱]..... ۴
- شکل ۱-۴ میزان انرژی تولید شده توسط منابع تجدید پذیر در سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ [۱]..... ۵
- شکل ۱-۵ میزان مصرف انرژی تولید شده توسط منابع تجدید پذیر در نقاط مختلف دنیا در سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ [۱]..... ۶
- شکل ۱-۶ کریستال های سیلیکون-برم ، سیلیکون-فسفر و سیلیکون خالص..... ۱۲
- شکل ۲-۱ مدار معادل مدل ایده آل سلول خورشیدی..... ۱۷
- شکل ۲-۲ مدار معادل مدل تک دیود سلول خورشیدی..... ۱۸
- شکل ۲-۳ مدار معادل مدل دو دیود..... ۲۰
- شکل ۲-۴ مشخصه ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان موجود در کاتالوگ پنل kyocera..... ۲۲
- شکل ۲-۵ الف- مشخصه ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان برای دمای ۳۰ درجه سانتی گراد و تابش متغیر؛ ب- مشخصه ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان برای تابش ثابت ۱۰۰۰ وات بر مترمربع و دما متغیر..... ۲۳
- شکل ۲-۶ مدار معادل مبدل بوست..... ۲۵
- شکل ۲-۷ مدار معادل مبدل بوست زمانی که ارتباط پایه های گیت و دریت وصل است..... ۲۶
- شکل ۲-۸ مدار معادل مبدل بوست زمانی که ارتباط پایه های گیت و دریت قطع است..... ۲۶
- شکل ۲-۹ دوره تناوب پالس..... ۲۷
- شکل ۲-۱۰ نمایش وضعیت نقاط کار مختلف بر روی نمودار توان-ولتاژ..... ۲۹
- شکل ۳-۱ فلوچارت روش تپه نوردی..... ۴۳
- شکل ۳-۲ اجزا اصلی یک کنترل کننده فازی..... ۴۵
- شکل ۳-۳ بازترکیب تک نقطه ای..... ۵۱
- شکل ۳-۴ بازترکیب دو نقطه ای..... ۵۱
- شکل ۳-۵ جهش..... ۵۱
- شکل ۳-۶ فلوچارت الگوریتم ژنتیک..... ۵۲
- شکل ۳-۷ ۲ کشور و ۵ ویژگی در الگوریتم رقابت استعماری..... ۵۳
- شکل ۳-۸ استعمارگرها (ستاره) و مستعمرات (دایره)..... ۵۴
- شکل ۳-۹ روند جذب مستعمرات توسط استعمارگرها..... ۵۵
- شکل ۳-۱۰ فلوچارت رقابت استعماری..... ۵۸
- شکل ۳-۱۱ فلوچارت الگوریتم علف های هرز مهاجم..... ۶۳
- شکل ۴-۱ توابع عضویت ورودی های فازی ۹ قاعده..... ۶۷
- شکل ۴-۲ توابع عضویت ورودی های فازی ۲۵ قاعده..... ۶۷
- شکل ۴-۳ توابع عضویت خروجی فازی ممدانی ۹ و ۲۵ قاعده..... ۶۸

شکل ۴-۴ توان خروجی سوگنو و ممدانی با ۹ و ۲۵ قاعده تحت تابش های ۸۰۰،۵۰۰،۱۰۰۰،۹۰۰،۶۰۰ وات
 بر مترمربع ۷۴

شکل ۵-۴ توابع عضویت مربوط به متغیرهای ورودی ۷۶

شکل ۶-۴ توابع عضویت مربوط به متغیرهای خروجی ۷۶

شکل ۵-۱ توان خروجی در دما ۳۲ درجه سانتیگراد و تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع ۸۰

شکل ۵-۲ ولتاژ خروجی در دما ۳۲ درجه سانتیگراد و تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع ۸۱

شکل ۵-۳ جریان خروجی در دما ۳۲ درجه سانتیگراد و تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع ۸۲

شکل ۵-۴ توان خروجی برای تابش متغیر ۱۰۰۰ (۰.۰۱-۰) ۸۰۰ (۰.۰۲-۰.۰۱) ۹۰۰ (۰.۰۳-۰.۰۲) وات بر
 مترمربع و دما ۳۰ درجه سانتیگراد ۸۳

شکل ۵-۵ ولتاژ خروجی برای تابش متغیر ۱۰۰۰ (۰.۰۱-۰) ۸۰۰ (۰.۰۲-۰.۰۱) ۹۰۰ (۰.۰۳-۰.۰۲) وات بر
 مترمربع و دما ۳۰ درجه سانتیگراد ۸۴

شکل ۵-۶ جریان خروجی برای تابش متغیر ۱۰۰۰ (۰.۰۱-۰) ۸۰۰ (۰.۰۲-۰.۰۱) ۹۰۰ (۰.۰۳-۰.۰۲) وات بر
 مترمربع و دما ۳۰ درجه سانتیگراد ۸۴

شکل ۵-۷ توان خروجی برای دما متغیر ۳۲ (۰.۰۱-۰) ۲۷ (۰.۰۲-۰.۰۱) ۳۷ (۰.۰۳-۰.۰۲) سانتیگراد و
 تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع ۸۶

شکل ۵-۸ ولتاژ خروجی برای دما متغیر ۳۲ (۰.۰۱-۰) ۲۷ (۰.۰۲-۰.۰۱) ۳۷ (۰.۰۳-۰.۰۲) سانتیگراد و
 تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع ۸۶

شکل ۵-۹ جریان خروجی برای دما متغیر ۳۲ (۰.۰۱-۰) ۲۷ (۰.۰۲-۰.۰۱) ۳۷ (۰.۰۳-۰.۰۲) سانتیگراد و
 تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع ۸۷

شکل ۵-۱۰ توان خروجی برای دما متغیر ۳۰ (۰.۰۱-۰) ۴۰ (۰.۰۲-۰.۰۱) ۴۵ (۰.۰۳-۰.۰۲) اهم ۸۹

فهرست علائم

I_{PV}	جریان نهایی تولیدشده در خروجی ($I_s =$) برحسب آمپر
I_{ph}	جریان حاصل از تابش نور برحسب آمپر
$I_{ph,ref}$	جریان نامی حاصل از تابش نور در وضعیت نرمال برحسب آمپر
I_0	جریان عبوری از دیود برحسب آمپر
$I_{0,ref}$	جریان نامی اشباع دیود برحسب آمپر
$I_{sc,ref}$	جریان اتصال کوتاه در وضعیت نرمال برحسب آمپر
T	دمای سلول برحسب کلوین
T_{ref}	دمای نامی سلول برحسب کلوین
G	مقدار تابش برحسب وات بر مترمربع
G_{ref}	مقدار نامی تابش برحسب وات بر مترمربع
q	بار الکتریکی الکترون برحسب کولن (1.602×10^{-19})
E_g	انرژی باند گپ
k	ثابت بولتزمن برحسب ژول بر کلوین (1.381×10^{-23})
$K_{I,sc}$	نسبت جریان اتصال کوتاه به ضریب حرارتی
α	ضریب ایده‌آلی دیود
V_t	ولتاژ حرارتی ($= \frac{nKT}{q}$)
V_{PV}	ولتاژ نهایی تولیدشده برحسب ولت
$V_{oc,ref}$	ولتاژ مدارباز نامی برحسب ولت
R_s	مقاومت معادل سری برحسب اهم
R_{sh}	مقاومت معادل موازی برحسب اهم
E_g	گاف انرژی ماده

h

ثابت پلانک

v

فرکانس فوتون

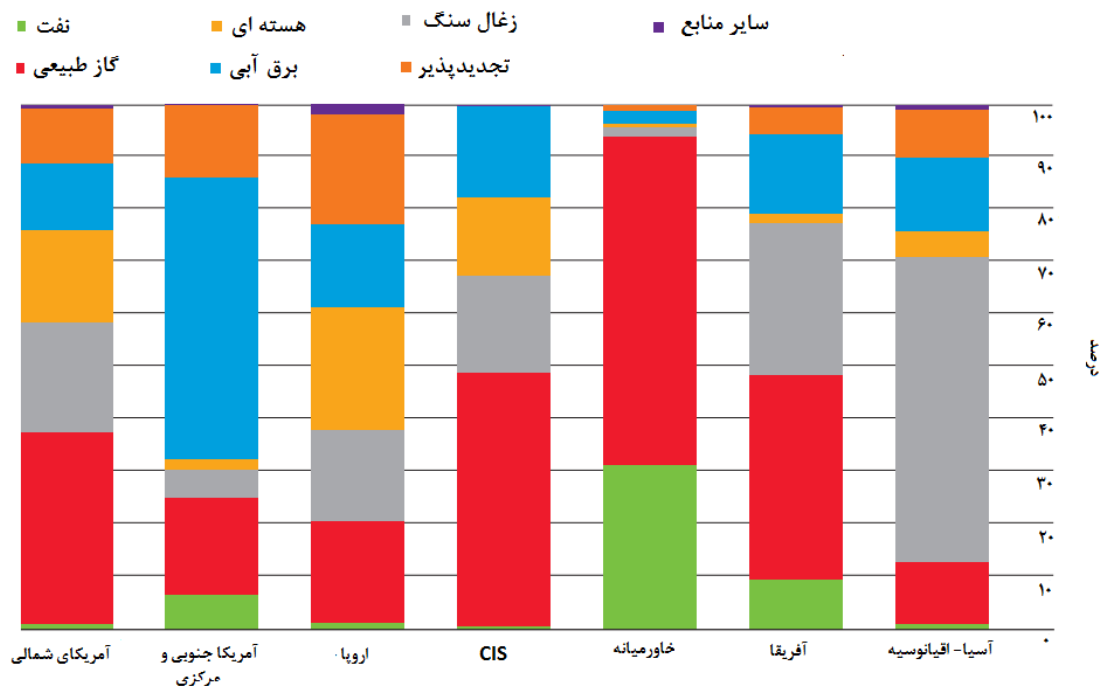
فصل ۱ مقدمه

۱-۱ سابقه‌ی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان

امروزه یکی از شاخصه‌های سنجش میزان رفاه کشورها، در دسترس بودن میزان انرژی مورد نیاز و باکیفیت است که در چهار دهه اخیر روزبه‌روز در حال افزایش است. در پی پاسخ به این نیاز اساسی که با تمام جوانب زندگی بشر گره خورده است، سال‌هاست سوزاندن سوخت‌های فسیلی پررنگ‌ترین نقش را بازی می‌کند. این منابع که به شکل‌های مختلف همچون زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، تأثیرات مخربی بر محیط‌زیست بر جای گذاشته‌اند. باران اسیدی یکی از مشکلات زیست‌محیطی و شناخته‌شده‌ترین عامل تخریب محیط‌زیست و حتی سازه‌های بشری است که امروزه بیشتر در مناطقی نظیر شمال شرقی ایالات متحده، اروپای شرقی و به‌طور فزاینده‌ای در مناطقی از چین و هند رخ می‌دهد. آلاینده‌های شیمیایی با ترکیب شدن اکسیدهای نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد با آب و اکسیژن، در جو شکل گرفته و به‌صورت قطران باران بر مراتع، جنگل‌ها و شهرها وارد می‌شوند. همچنین بارش باران اسیدی بر دریاچه‌ها و آب‌های جاری، موجب آلودگی زیستگاه آبزیان شده است. دی‌اکسید کربن، یکی دیگر از گازهای ورودی به جو، به دلیل قابلیت جذب پرتوهای فروسرخ خورشید باعث گرم‌تر شدن دمای کره‌ی زمین شده است. این اتفاق که با نام اثر گلخانه‌ای شناخته می‌شود، باعث ذوب یخچال‌های طبیعی و بالا آمدن سطح آب‌ها می‌گردد. افزایش سطح این گاز در شهرهای بزرگ و استنشاق آن توسط شهروندان که عمدتاً به دلیل فعالیت نیروگاه‌ها و خودروها رخ می‌دهد، جان انسان‌ها را تهدید می‌کند. تأثیرات منفی که به‌اختصار به آن‌ها اشاره شد، در کنار پایان این منابع، اهمیت یافتن جایگزین پاک‌تر و تمام‌نشدنی را دوجندان می‌کند و گسترش به‌کارگیری و افزایش بازده منابع تجدیدپذیر به مرکز توجهات بدل شده است.

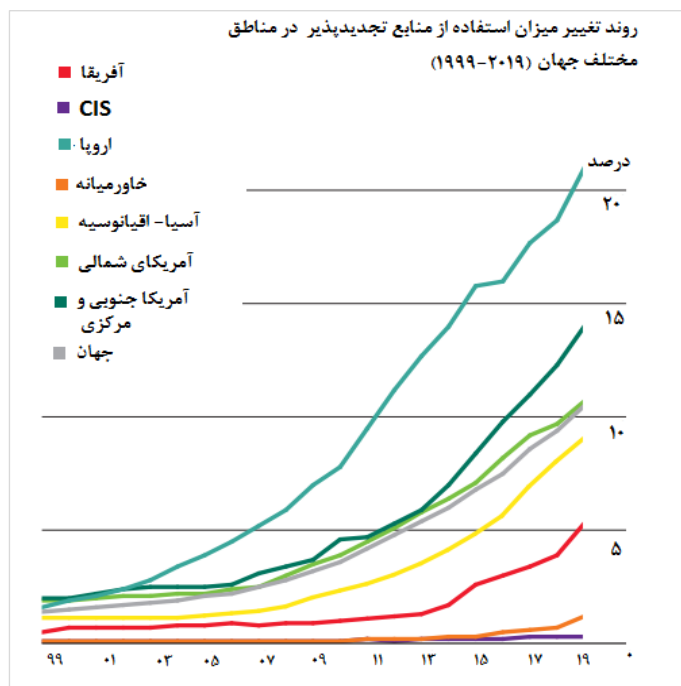
طبق گزارش‌های آماری منتشرشده توسط BP در ژانویه ۲۰۲۰ (شکل‌های ۱-۱ تا ۱-۵) [۱]، در سال ۲۰۱۹ گاز طبیعی سوخت غالب مورد استفاده برای تولید برق در آمریکای شمالی، کشورهای مستقل مشترک‌المنافع، خاورمیانه و آفریقا است. آمریکای جنوبی و مرکزی بیش از نیمی از انرژی خود را از

طریق برق آبی تأمین می کند، درحالی که زغال سنگ سوخت غالب آسیا محسوب می گردد و در اروپا، انرژی هسته ای منبع اصلی تولید برق است (شکل ۱-۱).

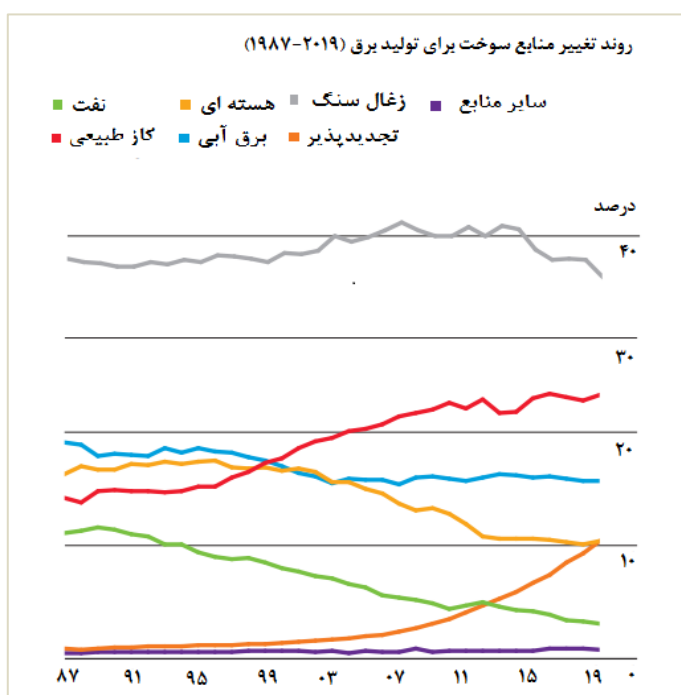


شکل ۱-۱ سهم منابع سوخت در تولید برق مناطق مختلف جهان در سال ۲۰۱۹ [۱]

به منظور داشتن نگاهی بر تغییرات سهم هر منبع انرژی در طول سال های ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۹، نمودار موجود در شکل ۲-۱ ارائه شده است. بر اساس این داده ها، سوخت غالب برای تأمین انرژی در دنیا زغال سنگ است و با تلاش های فراوان به منظور حذف آن، شاهد کاهش ۱.۵ درصدی در سال ۲۰۱۹ بوده ایم. در مقابل به کارگیری منابع تجدیدپذیر با رشد روبرو بوده است و برای اولین بار از منبع هسته ای پیشی گرفته است که بیشتر این میزان بهره برداری در اروپا، آمریکا جنوبی و مرکزی بوده است. در شکل ۳-۱ روند تغییر میزان بهره گیری از منابع تجدیدپذیر در جهان نشان داده شده است.

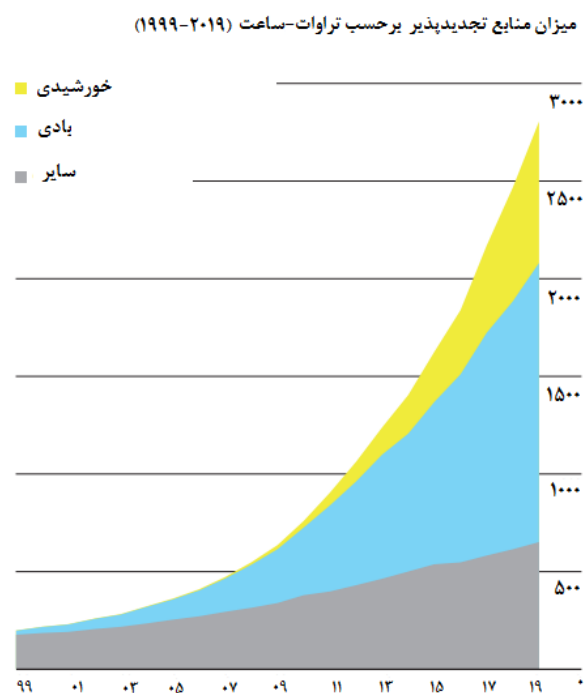


شکل ۲-۱ روند تغییر استفاده از منابع مختلف سوخت برای تولید برق در سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ [۱]



شکل ۱-۱ روند تغییر استفاده از منابع تجدیدپذیر مختلف برای تولید برق در سال های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۹ [۱]

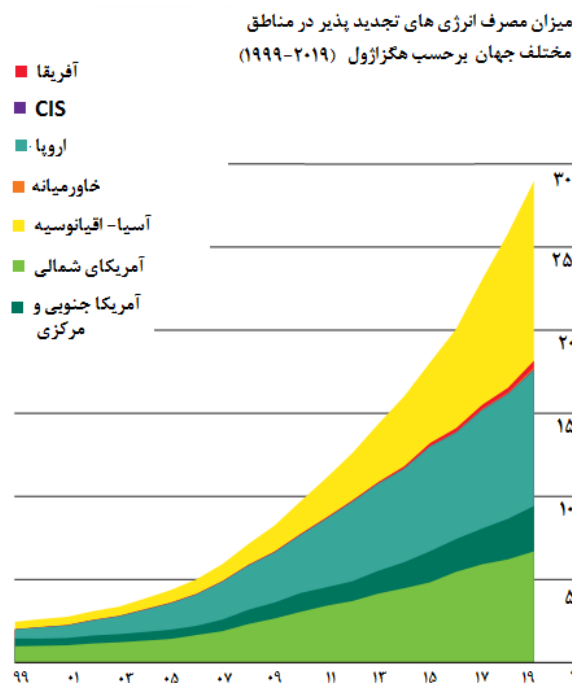
در زمینه کاهش وابستگی صنعت برق به سوخت‌های فسیلی تلاش‌های زیادی در حال انجام است. برای مثال یکی از بحث‌های این حوزه انقلاب انرژی است و با تمرکز بر کاهش میزان دی‌اکسید کربن تولیدی، نگاه خوش‌بینانه‌ای به منابع تجدیدپذیر دارد و استفاده از آن‌ها را بهترین روش برای دستیابی به هدف خود می‌داند. در سال‌های اخیر دولت‌ها با بررسی شرایط اقلیمی خود، نیروگاه‌های تجدیدپذیر بیشتری همچون باد، خورشید، زمین‌گرمایی را احداث نموده‌اند و نتیجه آن رشد ۱۲.۱ درصدی سهم این منابع است. همان‌طور که در نمودار ۱-۴ مشخص است، انرژی بادی و پس از آن انرژی خورشید بیشترین میزان تولید برق را در بین سایر منابع تجدیدپذیر، به خود اختصاص داده‌اند. در میان کشورها نیز به



شکل ۱-۱ میزان انرژی تولید شده توسط منابع تجدید پذیر در سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ [۱]

ترتیب چین و ژاپن در آسیا و ایالات متحده در آمریکای شمالی بیشترین سهم را در پررنگ شدن این دسته از منابع به خود اختصاص داده‌اند که مقدار آن برحسب هگزا ژول در شکل ۱-۵ به تفکیک منطقه جغرافیایی در بازه زمانی ۲۰ ساله ارائه شده است. لازم به ذکر است که خاورمیانه و کشورهای مستقل

مشترک‌المنافع، به دلیل استفاده بسیار کم از منابع تجدیدپذیر نسبت به سایر مناطق، در این نمودار دیده نمی‌شوند.



شکل ۵-۱ میزان مصرف انرژی تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر در نقاط مختلف دنیا در سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ [۱]

نرخ رشد بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در سال‌های اخیر نشان از محبوبیت روزافزون آن در میان منابع انرژی تجدیدپذیر دارد و در سراسر جهان به سرعت در حال گسترش است. این منبع جایگزینی امیدوارکننده برای سوخت‌های فسیلی است که تأثیرات منفی آن بر محیط‌زیست روزبه‌روز مشهودتر می‌گردد. این منبع که از انرژی بی‌پایان خورشید ناشی می‌شود، در اکثر نواحی کره زمین قابل بهره‌برداری است و همین امر موجب گردیده تا در مقایسه با سایر منابع، محبوبیت جهانی بیشتری پیدا کند. در سال‌های اول معرفی این نوع انرژی، بهره‌برداری از آن بسیار پرهزینه بوده است و تنها در صنایع فضایی همچون تأمین انرژی الکتریکی فضاپیماها مورد استفاده قرار می‌گرفت؛ اما به دلیل تولید گسترده و بهبود فناوری، اکنون به عنوان روشی ارزان و مقرون به صرفه شناخته می‌شود و نیاز مصرف‌کننده‌های

متنوعی در مقیاس‌های خانگی و صنعتی را تأمین می‌کند. اخیراً برای رسیدگی به مسائل مالی و هزینه‌های فناوری، ۶۰ کشور جهان توافقنامه اتحاد بین‌المللی خورشیدی (ISA) را در ۱۱ مارس ۲۰۱۸ در دهلی‌نو امضا کرده‌اند. این اتحاد، همکاری متقابل را برای استفاده از انرژی خورشیدی در بیش از ۱۲۱ کشور تسهیل می‌کند.

۲-۱ انرژی خورشیدی

انرژی دریافتی خورشید را عمدتاً به دو صورت می‌توان استفاده کرد. از گرمای دریافتی که با نام انرژی حرارتی خورشیدی شناخته می‌شود، در تأسیساتی همچون آب‌گرم‌کن‌های خورشیدی به‌منظور افزایش دمای آب مصرفی استفاده می‌شود و یا توسط نیروگاه‌های حرارتی خورشید به الکتریسیته تبدیل می‌گردد. در نیروگاه‌های حرارتی متعارف، بخار موردنیاز جهت چرخاندن توربین‌ها به‌وسیله سوزاندن سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود، اما در نیروگاه‌های خورشیدی، بخار به‌وسیله انرژی گرمایی دریافتی از خورشید ایجاد می‌شود.

روش دیگری برای استفاده از این منبع، نصب سیستم‌های فتوولتائیک است که در ادامه بیشتر به آن پرداخته می‌شود. در این روش فوتون‌ها توسط اتصالات $p-n$ موجود در ساختار پنل جریان الکتریکی تولید می‌کند. این روش به دلیل عدم نیاز به تجهیزات گسترده و امکان نصب در اکثر مکان‌ها، بسیار موردتوجه قرار گرفته است. از دیگر مزیت‌های این روش امکان استفاده به‌صورت مستقل، متصل به شبکه و سیستم‌های ترکیبی (که در آن‌ها سیستم‌های فتوولتائیک با انواع دیگر منابع انرژی ادغام می‌شوند) است که آزادی عمل بیشتری در طراحی فراهم می‌کند.

۳-۱ سلول‌های خورشیدی

سلول‌های فتوولتائیک بازده تبدیل ضعیفی دارند و این عیب باعث شده تا تلاش‌های زیادی در این

زمینه صورت گیرد. در این راستا فناوری‌های جدیدی در ساخت صفحات جاذب و سلول‌های خورشیدی معرفی و وارد بازار شده‌اند.

سلول‌های منوکریستال^۱ و پلی‌کریستال^۲ از شناخته‌شده‌ترین انواع سلول‌های خورشیدی هستند که در بازار ایران نیز بسیار به چشم می‌خورند. سلول‌های منوکریستال که از ظاهرشان به‌خوبی قابل‌شناسایی هستند از یک کریستال سیلیس ساخته شده‌اند و این کار باعث افزایش بازدهی این پنل‌ها تا ۲۶.۱ درصد می‌شود. اما ایجاد یک کریستال بزرگ نیازمند تکنولوژی ساخت بهتر است که تأثیر این موضوع بر قیمت انکارناپذیر است. درحالی‌که یک سلول پلی‌کریستال از پیوند چند کریستال تشکیل شده است و این ساختار بیشینه بازده ۲۲.۸ درصد را دارد. در مورد میزان بازده لازم به ذکر است که در شرایط جوی مشابه بازده هر دو پنل برابر است، با این تفاوت که در توان‌های یکسان، پنل‌های منوکریستال فضای کمتری را اشغال می‌کنند. به دلیل اهمیت کمتر فضا برای مصرف‌کنندگان خانگی و با هدف کاهش هزینه، سلول‌های پلی‌کریستال محبوب‌تر است. همچنین به دلیل رنگ روشن‌تر سلول‌های پلی‌کریستال، در مناطق گرمسیری پیشنهاد می‌گردد.

سلول‌های فیلم نازک^۳ دسته‌ی دیگری از سلول‌های پرکاربرد هستند. در این سلول‌ها لایه‌نازکی از مواد فتوولتائیک بر روی پلاستیک، فلز یا شیشه قرار می‌گیرد که بسته به نوع تکنولوژی این مواد می‌توانند ساختاری همچون تلورید کادمیوم (CdTe)، سلناید گالیوم ایندیوم مس (CIGS) داشته باشند. یکی از برتری‌های این پنل‌ها، انعطاف‌پذیری است که به مصرف‌کنندگان امکان استفاده در محیط‌های مختلف را می‌دهد. سلول‌های فیلم نازک به دلیل سادگی تولید قیمت کمتری دارند و بیشترین بازدهی ثبت‌شده برای این پنل‌ها ۲۳.۴ درصد است. همچنین تأثیرات نامطلوب افزایش دما و سایه بر این دسته کمتر است؛ بنابراین در صورتی که فضا محدود نباشد، یکی از بهترین انتخاب‌ها هستند؛ زیرا در مقایسه با

¹ Mono crystalline cells

² Poly crystal cells

³ Thin film cells

مونوکریستال‌ها، برای دستیابی به توان برابر به فضایی ۴ برابر بیشتر نیاز دارند.

ترکیب دو عنصر گالیم و آرسنید گران‌قیمت‌ترین سلول خورشیدی را شکل می‌دهند و بانام سلول‌های آرسنید گالیم^۱ شناخته می‌شوند. یکی از مزایا استفاده از سلول‌های این‌چنینی می‌تواند تنوع در طراحی آلیاژهای مختلف و مختص کاربری خاص باشد. از دیگر مزایای آن می‌توان به قدرت جذب بیشتر و حساسیت کمتر نسبت به دما و بازده بالایی در حدود ۳۰ درصد اشاره کرد که این سلول‌ها را به انتخاب اول صنایع فضایی مبدل کرده است.

بهره‌گیری از کریستال‌هایی از پروسکایت^۲ نسل سوم سلول‌های خورشیدی را ایجاد کرد. ساختار پروسکایت غالباً ترکیبی به‌صورت هیبرید آلی-معدنی هالید سرب یا قلع است. قیمت کم و سادگی ساخت مواد پروسکایت همچون متیل‌آمونیم سرب‌یدید و یا ماده معدنی سزیم‌سرب‌یدید، از ویژگی‌های آن است. این سلول‌ها ضخامتی کمتر از یک میکرومتر دارند و پروسه ساخت بسیار ساده آن‌ها باعث کاهش قیمت می‌گردد. بیشترین بازده ثبت‌شده این پنل برابر با ۲۵.۲ درصد است. یکی از معایب این روش ناپایداری ساختار در تماس با رطوبت و اکسیژن است که پیشرفت این تکنولوژی همچنان ادامه دارد. نوع دیگری از سلول‌های پروسکایت نیز هستند که در ساختارشان لایه از مواد فتوولتائیک دیگری همچون سیلیکون به کار می‌رود. تاکنون ۲۸ درصد بیشترین بازده ثبت‌شده این سلول‌ها است.

در مسیر بهره‌گیری از چند تکنولوژی در کنار هم و ارائه به‌عنوان یک سلول با بازده بالاتر، دسته دیگری از سلول‌های خورشیدی با بازده تقریباً ۴۰ درصد که بالاترین مقدار در بین تمام روش‌هاست وجود دارد. این روش امکان استفاده از انرژی طیف‌های مختلف تابش دریافتی خورشید را به کمک مواد جاذب گوناگون میسر می‌سازد. این کار به دلیل استفاده از تکنولوژی ساخت بالا سهم زیادی در بازار ندارد.

در جدول ۱-۱ فناوری‌های مختلفی که در ساخت پنل‌ها به کار می‌روند بر اساس بیشترین بازده دست‌یافته شده در شرایط آزمایشگاهی در سال ۲۰۲۰ معرفی و باهم مقایسه شده‌اند؛ و جدول ۱-۲

¹ Gallium arsenide cells

² perovskite cells

بهترین شرکت‌های سازنده پنل به تفکیک تکنولوژی ساخت و توان پنل موجود در بازار اشاره شده است.

جدول ۱-۱ میزان بازده پنل‌های مختلف در شرایط آزمایشگاهی (clean energy review 2020)

تکنولوژی به کاررفته	بازدهی
Poly crystal	22.8
Thin film (CIGS cells)	23.4
Unstablized perovskite cells	25.2
Mono crystalline cells	26.1
Gallium arsenide cells	30
Tandem perovskite cells	28
Multi junction solar cells	39.2

جدول ۱-۱ بازده بهترین پنل‌های موجود در بازار (clean energy review 2020)

تکنولوژی به کاررفته	شرکت سازنده	بازده (درصد)
Thin film CdTe	First solar	18.2
Poly crystalline	REC	18.52
Mono crystalline	LG	22
	Solar power	21.5
Bi facial panel	Canadian solar	23.8
Gallium arsenide cells	Alta devices	30
Multi junction cells	spectrolab	37

۴-۱ صفحات خورشیدی

صفحات خورشیدی^۱ برای تبدیل انرژی فوتون‌های دریافتی از خورشید به انرژی الکتریکی مورد استفاده

¹ Solar Panel

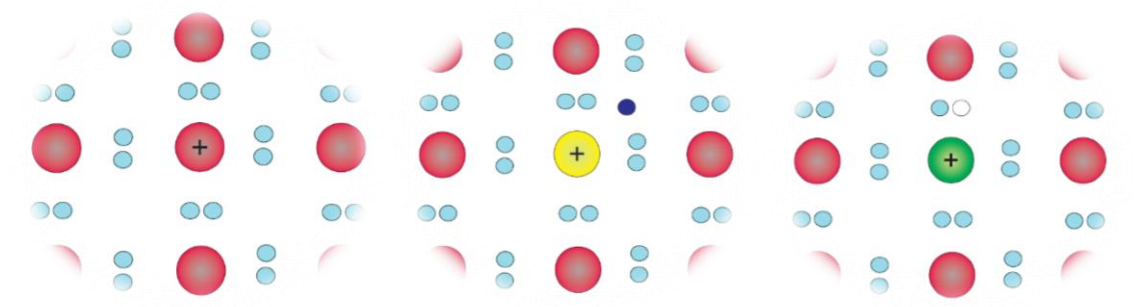
قرار می گیرند که امروزه در مصاف خانگی و صنعتی بسیار پر کاربرد هستند. همان طور که قبلاً اشاره شد، این صفحات عموماً از جنس سیلیکون ساخته می شوند و کوچک ترین جزشان، سلول خورشیدی^۱ نام دارد و با کنار هم قراردادن آن ها، یک صفحه یا ماژول خورشیدی ایجاد می گردد. ولتاژ تولیدی یک سلول بین ۰.۵ تا ۰.۸ ولت است که این میزان برای استفاده عملی، مفید و کافی نیست. برای دستیابی به ولتاژهای بالا، علاوه بر تغییر ساختار آن می توان تعدادی سلول را به صورت سری و موازی به یکدیگر متصل نمود تا با ایجاد ماژول، جریان و ولتاژ تولیدی را به میزان مورد نیاز افزایش داد. لازم به ذکر است که با فرض سلول ها به صورت منبع جریان در اتصال موازی، جریان افزایش می یابد. در حالی که در اتصال سری سلول ها، می توان آن ها را همچون منبع ولتاژ تصور کرد و ولتاژ را افزایش داد. در ادامه به نحوه تبدیل انرژی در سلول خورشیدی و اجزا سیستم خورشیدی پرداخته شده است.

۱-۴-۱ عملکرد صفحات خورشیدی

سلول خورشیدی اساساً یک اتصال p-n است که در یک ویفر یا لایه نیمه رسانای نازک ساخته می شود و قادر است تابش الکترومغناطیسی انرژی خورشیدی را مستقیماً از طریق اثر فتوولتائیک به برق تبدیل کند. سلول خورشیدی مانند قلب سیستم است و میزان الکتریسیته تولیدی به شدت به این مواد و نحوه ساخت سلول ها وابسته است. لایه های یک پنل از دو لایه ی سیلیکون که یکی دارای حفره و دیگری دارای الکترون است تشکیل شده است. به منظور ایجاد ساختار حفره-الکترون عناصری به سیلیکون اضافه می شوند. عنصر سیلیکون خود دارای ۴ الکترون در مدار آخر است که مطابق شکل ۱-۶ پیوند محکمی در کریستال آن ها ایجاد می گردد. با اضافه کردن عنصر بور که دارای سه الکترون در مدار آخر خود است، پیوند ایجاد شده یک الکترون کم دارند. این دقیقاً برعکس اتفاقی است که با اضافه کردن فسفر که ۵ الکترون در آخرین مدار دارد، رخ می دهد. با قرارگیری فسفر در بین اتم های

¹ Solar cell

سیلیکون، یک الکترون اضافه در پیوند باقی می‌ماند. به این ترتیب سیلیکون‌های نوع p-n ایجاد می‌گردند.



شکل ۱-۱ کریستال‌های سیلیکون-برم، سیلیکون-فسفر و سیلیکون خالص

بسته به نوع ساختار سلول خورشیدی، سیلیکون نوع n یا نوع p به عنوان بستر انتخاب می‌گردند که اکثریت قریب به اتفاق سلول‌های یک و چند کریستالی که امروزه استفاده می‌شوند، از نوع p استفاده می‌کنند. در حال حاضر تنها چند تولیدکننده مانند LG، Panasonic و SunPower از ویفرهای سیلیکونی نوع p که گران‌تر اما کارآمدتر هستند، استفاده می‌کنند. در ادامه، این دولایه سیلیکون بین دو صفحه دیگر قرار می‌گیرد که امکان ایجاد جریان الکترون‌ها بین دولایه را فراهم می‌کنند و روی چهار لایه ذکر شده، یک لایه شیشه‌ای به منظور حفاظت قرار دارد.

برای ایجاد جریان‌های انتشاری و نفوذی در اتصالات p-n نیاز به انتقال در بین حفره‌ها و الکترون‌ها است. برای تولید آن‌ها باید فوتون‌های دریافتی دارای حداقل انرژی برابر با گاف انرژی^۱ ماده (E_g) سازنده پنل باشند. این انرژی از رابطه ۱-۲ قابل محاسبه است.

$$E_g = h\nu \quad (1-2)$$

h ثابت پلانک و ν فرکانس فوتون دریافتی است.

¹ Band gap

زمانی که سلول در معرض نور خورشید قرار می‌گیرد، فوتون انرژی خود را به الکترون اطراف پسوندها منتقل کرده و در صورت کافی بودن میزان این انرژی، الکترون از سد انرژی گاف ماده عبور می‌کند و به تراز هدایت^۱ می‌رسد، ترازى که در آن الکترون‌های منتقل شده دیگر آرایش منظم قبل را نداشته و به همین دلیل ناپایدار هستند که این امر منجر به ایجاد جفت‌های حفره و الکترون می‌شود. در صورت وجود مسیر رسانای بسته، الکترون‌ها قادرند با آزادی بیشتری حرکت کنند و جریان الکتریکی در آن مسیر ایجاد کنند.

۵-۱ دستیابی به بیشینه توان در سیستم‌های خورشیدی

توان استخراج شده از مولد شدیداً به سه عامل تابش، دمای سلول (دمای محیط) و مشخصات بار (امپدانس بار) بستگی دارد. جریان تولیدی تابع تغییرات تابش است، درحالی که تغییرات دما بر ولتاژ خروجی سیستم تأثیر می‌گذارد. با این حال، سیستم‌های فتوولتائیک به گونه‌ای طراحی شده‌اند که بیشینه عملکرد خود را داشته باشند و این تلاش تا به امروز ادامه دارد. با توجه به اینکه شرایط محیطی و تابش خورشید به طور ناگهانی با گذشت زمان تغییر می‌کند، ولتاژ و جریان خروجی به طور مداوم در حال تغییر است. برای رفع این مشکل ابتدا سیستم‌های مکانیکی ایجاد شد که صفحات را به گونه‌ای حرکت دهد که بیشینه تابش خورشید را دریافت کنند و نهایتاً توان بیشتری از پنل دریافت شود؛ اما این روش به تنهایی کافی نیست، زیرا کاری برای نوسانات دما انجام نمی‌داد. نوع دیگری از ردیاب، تعقیب نقطه بیشینه توان^۲ نام دارد. این ردیاب بر پایه نوسانات ولتاژ یا جریان کار می‌کند. اساس کار این ردیاب، قضیه مداری انتقال توان بیشینه^۳ است. نوسانات موجود که به واسطه تغییر تابش و دما در هر لحظه رخ می‌دهند، باعث تغییر ولتاژ و جریان تولیدی و نهایتاً امپدانس منبع می‌گردد. به همین دلیل تطبیق

¹ Conduction bands

² Maximum Power Point Tracking (MPPT)

³ Maximum power transfer theorem

امپدانس منبع و بار باید به‌طور مداوم در مدار برقرار گردد. برای غلبه بر این اثرات نامطلوب غیرقابل کنترل محیطی، می‌توان یک تعقیب‌کننده توان بیشینه را بین صفحه و بار قرارداد، تا جستجوی نقطه کار بهینه را کنترل کند. استفاده از این بخش برای اطمینان از این است که ولتاژ و جریان کاری همیشه بر روی قله منحنی مشخصه $V-P$ پنل باقی بماند. طبق این مشخصه، ولتاژ باید در مقداری که بین ۷۵ تا ۸۰ درصد ولتاژ مدارباز است کار کند و در هر لحظه این مقدار باید تعقیب گردد. به این دلیل یک مبدل DC / DC وجود دارد تا سطح ولتاژ تولیدی را به مقدار مطلوب تبدیل کند. ورودی مبدل به آرایه خورشیدی و خروجی به باتری‌ها و بارها متصل می‌شود. یک سیستم محاسباتی، چرخه کار مبدل و امپدانس ورودی مبدل را تغییر می‌دهد تا زمانی که سیستم به نقطه توان بیشینه برسد و اعمال دستور به مبدل توسط یک مدولاسیون پهنای پالس^۱ تغییر می‌کند. پس از سنجش ولتاژ و جریان خروجی، الگوریتم از تعقیب‌کننده توان بیشینه بسته به نوع عملکرد دستوری با هدف تنظیم ولتاژ در سطح مناسب به مدولاسیون پهنای پالس اعمال می‌کند تا توسط مبدل اجرا شود. این مقدار که سیگنال گیت مبدل است، پارامتر مهمی برای رسیدن به نقطه توان بیشینه است. اگر این سیگنال به‌درستی اعمال نشود، توان خروجی زیر سطح نقطه بهینه نوسان می‌کند.

¹ Pulse-width modulation (PWM)

فصل ۲ مـدلسازی سیستم فتوولتائیک

۱-۲ مقدمه

یکی از مهم‌ترین مراحل کار بر روی تمامی سیستم‌ها، به‌خصوص در زمینه طراحی کنترل‌کننده، ایجاد مدلی با حداقل تفاوت از سیستم اصلی است. مدل مورد استفاده باید دارای ویژگی‌هایی باشد تا تمام عوامل مؤثر بر سیستم فیزیکی را بتوان بر آن اعمال کرد. در صورت وجود چنین پلتفرمی، به‌سادگی می‌توان پیش از اعمال کنترل‌کننده به سیستم، رفتار آن را بررسی کرد. این کار به کمک قوانین حاکم بر سیستم و یا بهره‌گیری از داده‌های تجربی صورت می‌پذیرد. به این منظور ابتدا لازم است موضوع مورد تحقیق را به‌طور تئوری بررسی کرد و به شناختی جامع و کافی دست‌یافت که در این فصل به آن پرداخته شده است.

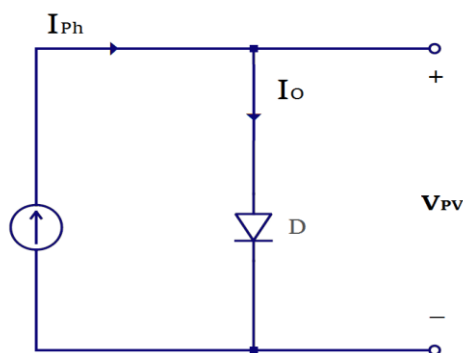
ابتدا در راستای ایجاد مدلی از یک سیستم فتوولتائیک، مدل‌های متعارف شبیه‌سازی یک سلول خورشیدی به همراه قوانین و معادلات حاکم بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس اجزا دیگر معرفی و بررسی می‌شوند. در نهایت نگاهی اجمالی به انواع کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده برای تعقیب توان بیشینه شده است.

۲-۲ مدل‌های شبیه‌سازی رفتار سلول خورشیدی

سیستم‌های خورشیدی نیز همچون سایر سیستم‌ها به عوامل متعددی وابسته هستند و برای اعمال هر نوع تغییر یا پیاده‌سازی طرحی نو، بهتر است ابتدا از مدلی مجازی که رفتاری مشابه سیستم در دنیای واقعی دارد استفاده گردد. این اصل در مورد هدف ما که طراحی و مقایسه چند کنترل‌کننده است نیز صادق است. به همین منظور، در ادامه به سه مدل شبیه‌ساز رفتار سلول خورشیدی اشاره شده است تا کنترل‌کننده‌های طراحی‌شده را بتوان بر روی آن پیاده کرد.

۱-۲-۲ مدل ایده آل

شکل ۱-۲ ساده ترین مدار معادل یک سلول خورشیدی را نشان می دهد و به نام مدل ایده آل سلول شناخته می شود. همان طور که در شکل مشخص است، این مدل از یک منبع جریان ایده آل و یک دیود ایده آل که همچون سلول یک اتصال n-p است تشکیل شده است. مقدار جریان منبع برابر با جریان تولیدی سلول است و هدف از قرارگیری دیود، شبیه سازی رفتار اتصال p-n سیلیکون است. در حقیقت، سلول های خورشیدی، یک دیود بزرگ، تخت و حساس به نور هستند و زمانی که در معرض نور خورشید قرار می گیرد به یک باتری تبدیل می شوند [۲].



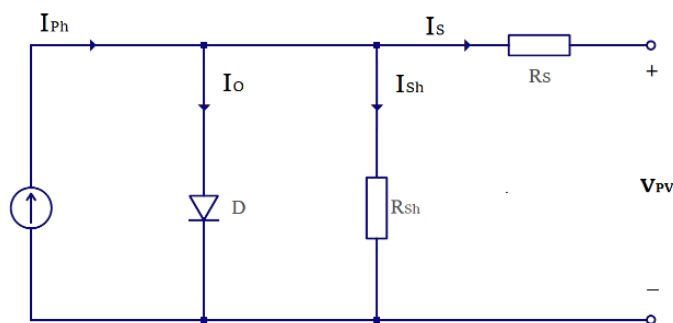
شکل ۲-۲ مدار معادل مدل ایده آل سلول خورشیدی

۲-۲-۲ مدل تک دیود

شکل ۲-۲ نشان دهنده یک مدل تک دیود است. همان طور که در شکل مشخص است یک دیود به صورت موازی با منبع جریان قرار گرفته شده است و دو مقاومت در سمت مصرف کننده وجود دارد. مقاومت سری در یک سلول خورشیدی سه دلیل دارد: اول، حرکت جریان از طریق گسیل کننده و پایه سلول خورشیدی. ثانیاً، مقاومت موجود بین سطح تماس فلز و سیلیکون؛ و در آخر مقاومت

کنتاکت‌های فلزی بالا و پایین سلول.

مقاومت موازی به کاررفته معمولاً به دلیل نقص در تولید و طراحی ضعیف سلول خورشیدی است و با ایجاد بستری مناسب برای جریان تولیدشده، باعث از بین رفتن بخشی از توان در سلول‌های خورشیدی می‌شود. این مسئله میزان جریان عبوری از محل اتصال سلول خورشیدی را کاهش می‌دهد و درنهایت ولتاژ تولیدی به وسیله سلول کاهش می‌یابد. اثر این مقاومت در شرایطی که میزان تابش کم است بیشتر احساس می‌شود، زیرا همان‌طور که اشاره شد میزان تابش بر میزان جریان تولیدی اثر می‌گذارد و در این شرایط که به دلیل کاهش میزان تابش بر سطح پنل جریان کمتری تولید می‌شود، از دست دادن بخشی از جریان محسوس‌تر است. علاوه بر این، در ولتاژهای پایین که مقاومت سلول خورشیدی زیاد است، اثر وجود یک مقاومت به صورت موازی بیشتر احساس می‌گردد [۳].



شکل ۱-۲ مدار معادل مدل تک دیود سلول خورشیدی

با فرض مدار معادل این مدل به شکل ۲-۲، جریان تولیدشده را با اعمال kcl به صورت زیر می‌توان

نشان داد:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_o - I_{sh} \quad (۱-۲)$$

که داریم:

$$I_{ph} = (I_{ph,ref} + (K_{I,sc} \times (T - T_{ref}))) \frac{G}{G_{ref}} \quad (2-2)$$

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{q \times E_g}{\alpha \times k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3-2)$$

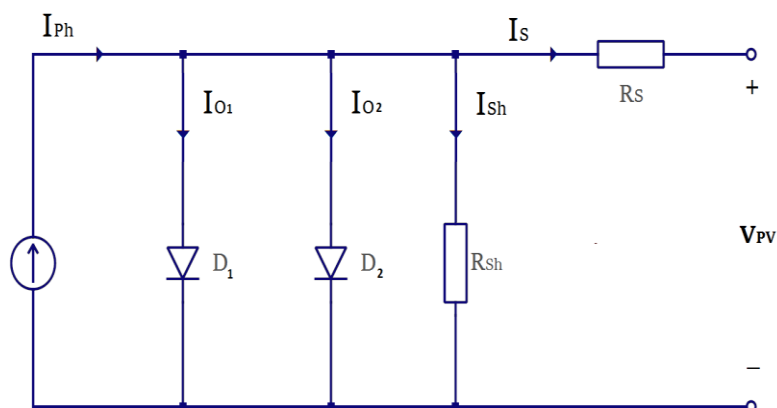
$$I_{0,ref} = \frac{I_{sc,ref}}{\exp \left(\frac{V_{oc,ref}}{V_{t,ref} \times \alpha} \right) - 1} \quad (4-2)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \frac{(V_{pv} + (R_s \times I_s))}{V_t \times \alpha} \right] - \frac{(V_{pv} + (R_s \times I_s))}{R_{sh}} \quad (5-2)$$

در این معادلات I_{ph} جریان تولیدشده ناشی از فوتون‌هایی است که به دلیل تابش نور ایجاد می‌شود، I_0 ، جریان اشباع معکوس دیود است، V_t ولتاژ حرارتی دیود و α ضریب ایده‌آلی دیود است. پارامترهای دیگر R_s (مقاومت سری) و R_{sh} (مقاومت موازی) بر اساس نیاز تنظیم می‌شوند.

۳-۲-۲ مدل دو دیود

معادله تک دیود یک مقدار ثابت را برای ضریب ایده‌آلی دیود در نظر می‌گیرد؛ اما در واقعیت ضریب ایده‌آلی تابعی از ولتاژ در قطعه است. در ولتاژ بالا، هنگامی که ترکیب در سطوح و مناطقی با حامل‌های بالا رخ دهد، فاکتور ایده‌آلی نزدیک به یک است. در حالی که در ولتاژهای پایین‌تر، ترکیب در محل اتصالات صورت می‌گیرد و عامل ایده‌آلی نزدیک به دو می‌شود. این تفاوت به دلیل نشت جریان تولیدشده در پیوند است که در تابش‌های پایین مشهود است. برای رفع این مشکل، مدل دو دیود ارائه شده است (شکل ۳-۲) که در آن ترکیب در محل اتصالات با افزودن دیود دوم به موازات دیود اول مدل می‌شود و فاکتور ایده‌آلی آن نزدیک به دو در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۲ مدار معادل مدل دو دیود

تنها تفاوت این روش شبیه‌سازی با مدل قبل در تعداد دیودهای موازی و نتیجتاً در ظهور دو جریان در معادلات است. همچون مدل قبل، جریان تولیدی به کمک نوشتن kcl در مدار معادل شکل ۲-۳ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{O1} - I_{O2} - I_{sh} \quad (۶-۲)$$

$$I_{ph} = (I_{ph,ref} + (K_{I,sc} \times (T - T_{ref}))) \frac{G}{G_{ref}} \quad (۷-۲)$$

$$I_{O1} = I_{0,ref1} \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{q \times E_g}{\alpha_1 \times k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (۸-۲)$$

$$I_{O2} = I_{0,ref2} \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{q \times E_g}{\alpha_2 \times k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (۹-۲)$$

$$I_{PV} = I_{ph} - I_{O1} \left[\exp \frac{(V_{pv} + (R_s \times I_s))}{V_{t1} \times \alpha_1} \right] - I_{O2} \left[\exp \frac{(V_{pv} + (R_s \times I_s))}{V_{t2} \times \alpha_2} \right] - \frac{(V_{pv} + (R_s \times I_s))}{R_{sh}} \quad (۱۰-۲)$$

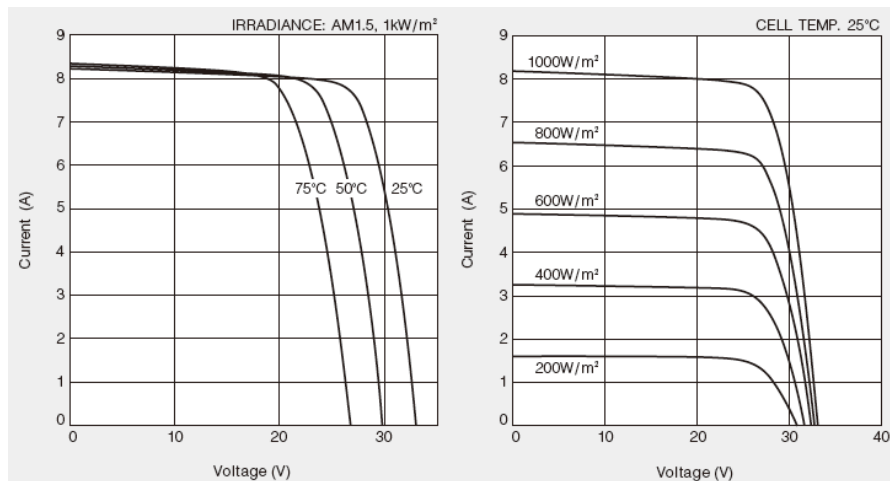
در قطعات سیلیکونی واقعی، عمل ترکیب تابعی پیچیده از میزان حامل‌ها است. به عنوان مثال افزایش تعداد حامل‌ها به دلیل افزایش ولتاژ اعمال شده، میزان رخداد ترکیب را به طور چشمگیری تغییر

می‌دهد. به دلیل وجود چنین مواردی که در قطعات سیلیکونی کاملاً رایج است، مدل دو دیود خطای بیشتری را به همراه دارد؛ بنابراین با در نظر گرفتن همه جوانب، تا آنجا که به محاسبات ریاضی مربوط می‌شود، به دلیل پیچیدگی و محاسبات کمتر در مدل تک‌دیود، نتایج سریع‌تر حاصل می‌شوند و همچنین خطاهای محاسباتی کمتر از مدل دودیود است؛ اما مدل دودیود در شرایط مختلف آب و هوایی با تکرارهای طولانی‌تر و محاسبات پارامترها، مشخصات واضح‌تر و دقیق‌تری را ارائه می‌دهد [۴]. در مقالات متعددی اشاره شده که تفاوت فاحشی در نتایج وجود ندارد. لازم به ذکر است که مدل دیگری به نام سه‌دیود [۵] نیز موجود است که با افزایش محاسبات به نتایج دقیق‌تری می‌انجامد [۶]. در مطالعات مربوط به توان بیشینه که میزان دقیق جریان تولیدی که به ساختار پنل مربوط می‌شود اهمیت چندانی ندارد و بیشتر تمرکز بر سایر بخش‌هاست، استفاده از مدل ساده‌تر پیشنهاد شده است؛ بنابراین در این بررسی به‌منظور کاهش پیچیدگی مدل تک‌دیود مرجع طراحی قرار گرفته است.

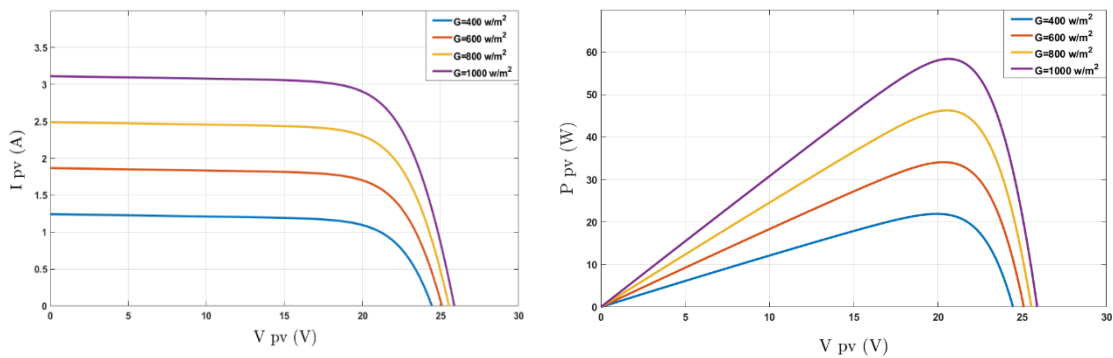
۲-۳ مشخصه پنل

به‌طور طبیعی، سیستم فتوولتائیک به دلیل ویژگی‌های ساختاری، توانی تولید می‌کنند که به‌طور غیرخطی با شدت تابش نور خورشید بر سطح جاذب و دمای سلول تغییر می‌کند. در کاتالوگ تمام پنل‌های موجود در بازار دو نمودار به چشم می‌خورد که بانام مشخصه‌های پنل شناخته می‌شوند (شکل ۲-۴). این نمودارها مقادیر جریان و توان را که با آزمودن پنل در شرایط استاندارد به‌دست آمده‌اند را به ازای تمام مقادیر ولتاژ (از صفر تا ولتاژ مدار باز) نمایش می‌دهند. این نمودارهای $I-V$ و $P-V$ برای مقادیر مختلف تابش و دما رسم می‌شوند و به خوبی وابستگی توان تولیدشده توسط یک آرایه با تغییر شرایط جوی را نشان دهند. شکل ۲-۴ مشخصه موجود در کاتالوگ پنل KC200GT شرکت KYOCERA را نشان می‌دهد و مشخصه‌های بدست آمد از پنل طراحی شده در شکل ۲-۵ ارائه شده است. با مقایسه این نمودارها می‌توان به شباهت رفتار پنل واقعی و طراحی شده پی‌برد و از صحت مدل اطمینان حاصل

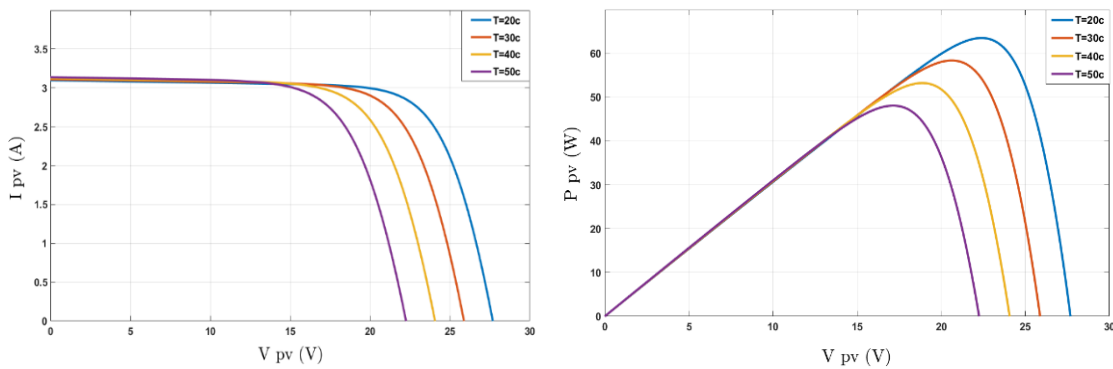
کرد.



شکل ۲-۲ مشخصه ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان موجود در کاتالوگ پنل kyocera



((الف))



((ب))

شکل ۲-۲ الف- مشخصه ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان برای دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و تابش متغیر؛ ب- مشخصه ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان برای تابش ثابت ۱۰۰۰ وات بر مترمربع و دما متغیر

ماهیت غیرخطی سیستم‌های فتوولتائیک در شکل ۲-۵ مشخص است. لازم به ذکر است که جریان و توان آرایه به میزان ولتاژ پایانه آرایه بستگی دارد. در قسمت ((الف)) شکل، وابستگی مشخصه‌ها به تابش و در قسمت ((ب))، مشخصه‌ها تحت دمای متغیر برای یک ماژول نمونه نمایش داده شده‌اند. با مقایسه نمودارها به وضوح می‌توان دید که افزایش شدت تابش و کاهش دما منجر به افزایش توان تولیدی، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز می‌شود. روند مشهود در نمودارهای ارائه شده برای سایر ماژول‌ها مشابه است [۷].

۲-۴ انتقال توان بیشینه

مطابق معادله ۲-۵، جریان تولیدشده توسط پنل وابسته به ولتاژ دو سر پنل وابسته است. از طرفی بر اساس قضیه انتقال توان بیشینه، در تمامی مدارات الکتریکی برای انتقال بیشینه توان به بار باید مقاومت بار با مقاومت داخلی منبع برابر باشد که در سیستم‌های خورشیدی، پنل جایگزین منبع می‌باشد و توان آن را میتوان با معادله ۲-۱۱ محاسبه کرد.

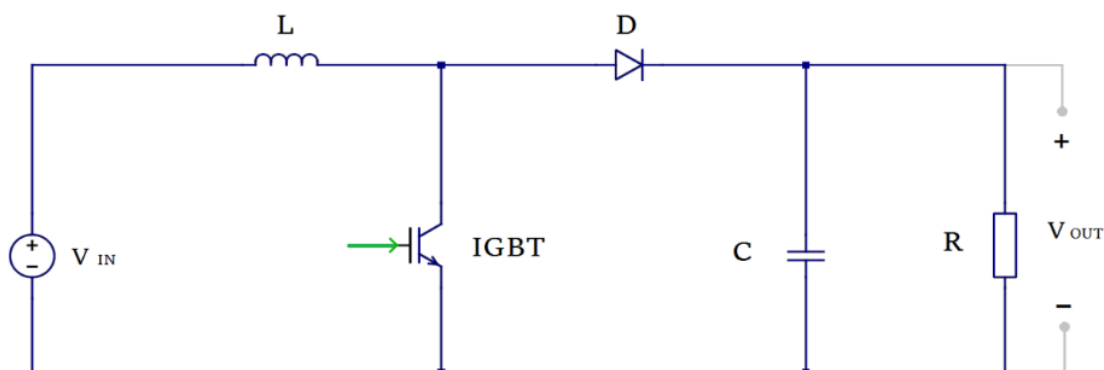
$$P_{PV} = V_{PV} \times I_{PV} \quad (2-11)$$

با تغییر شرایط محیطی، ولتاژ و جریان به‌طور مداوم تغییر می‌کند که این امر سبب تغییر مقاومت منبع می‌شود؛ بنابراین باید در هر لحظه مقاومت بار و منبع باهم برابر شود. این کار را می‌توان با روش‌های گوناگونی که به نام "روش‌های تطبیق امپدانس" شناخته می‌شوند، در مدار برقرار کرد. یکی از ساده‌ترین روش‌ها استفاده از مبدل است و نوع بوست^۱ آن به‌منظور تطبیق امپدانس در این مطالعه استفاده شده است [۸].

۲-۵ مبدل بوست

مبدل بوست مداری کوچک است که با قطع و وصل کردن مداوم اتصال بار و منبع به‌وسیله یک سوئیچ، ولتاژ سمت خروجی را تغییر می‌دهد. شکل ۲-۶ مدار معادل یک مبدل بوست را نشان می‌دهد [۹، ۱۰].

¹ Boost converter

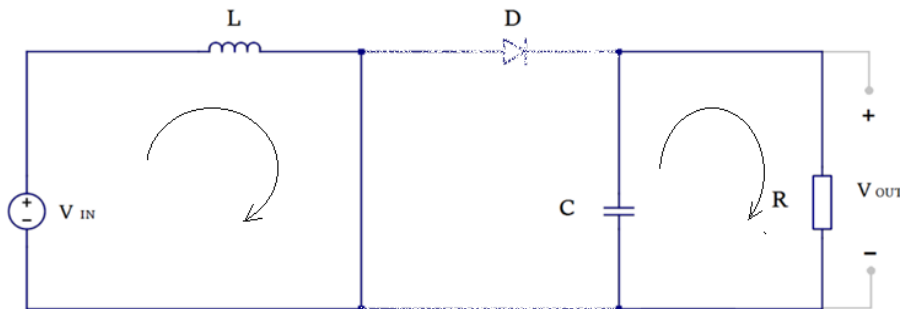


شکل ۲-۲ مدار معادل مبدل بوست

همان‌طور که در شکل مشخص است، منبع با یک سلف سری شده است. یک سوئیچ که با توجه به مداری که مبدل در آن به کاررفته است می‌تواند mosfet یا IGBT باشد، با آن‌ها موازی شده است. این کلید به وسیله یک مدولاسیون پهنای پالس که در اینجا بر مبنای زمان است، روشن و خاموش می‌شود. در سمت بار که یک مقاومت اهمی در نظر گرفته شده است با یک خازن موازی شده است. دو بخش سمت منبع و بار به وسیله یک دیود به هم متصل‌اند.

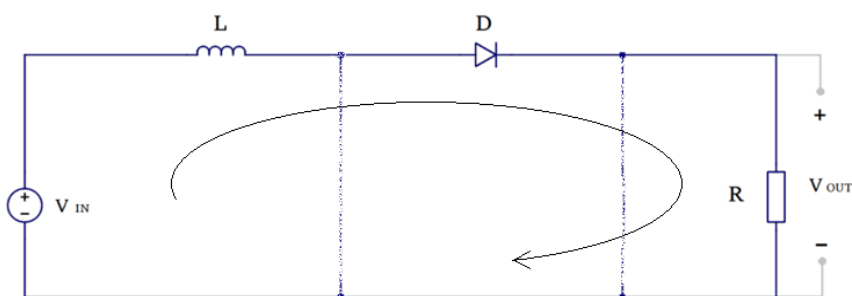
برای بررسی طرز کار مبدل، بازه کاری را بر اساس باز یا بسته بودن سوئیچ به دو بخش تقسیم گردیده که نتیجه آن ایجاد دو مد کاری است. در یک مد کاری، با فرض بسته بودن کلید، ارتباط سمت منبع (شامل منبع و سلف) و سمت بار (شامل مقاومت شبیه ساز بار و خازن موازی با آن) از هم جدا می‌شوند و دیود باعث ایجاد دو مدار مستقل می‌گردد. در مدار سمت منبع، جریان تولیدی پس از عبور از سلف و شارژ کردن آن به دلیل کم بودن مقاومت در شاخه‌ای که کلید در آن قرار دارد نسبت به شاخه دیود، مسیر کلید را انتخاب کرده و هیچ جریانی به سمت بار نمی‌رود. در مدار سمت مصرف کننده، با فرض شارژ بودن خازن، بار از خازن تغذیه می‌گردد و ولتاژ خروجی برابر با ولتاژ خازن است. لازم به ذکر است که دلیل وجود دیود، جلوگیری از جاری شدن جریان به سمت منبع است؛ یعنی همان مسیری که توسط دیود بسته می‌گردد. مدار در شکل ۲-۷ نشان داده شده است و مسیر حرکت جریان‌ها در مدار با

دو فلش مشخص گردیده است.



شکل ۲-۲ مدار معادل مبدل بوست زمانی که ارتباط پایه‌های گیت و دریت وصل است

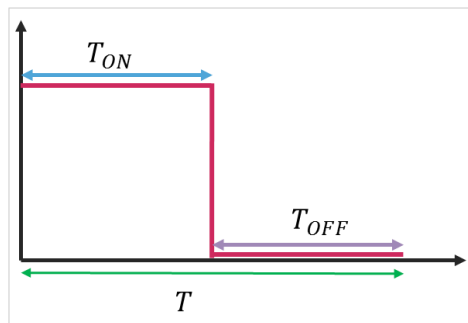
با باز شدن کلید، مبدل وارد مد کاری دوم می‌شود. جریان تولیدی منبع به همراه جریان سلف به سمت بار هدایت‌شده و علاوه بر تغذیه بار، خازن به سرعت دوباره شارژ‌شده و به وضعیت مدار باز منتقل می‌شود و به دلیل موازی بودن با بار به‌طور موقت و تا شروع مد کاری بعد حذف می‌گردد تا در زمان قرارگیری در مد کاری اول به مدار برگشته و بار را تغذیه کند. شکل مدار این مد کاری در ۸-۲ نشان داده شده است و مسیر حرکت جریان به کمک فلش قابل‌شناسایی است.



شکل ۲-۲ مدار معادل مبدل بوست زمانی که ارتباط پایه‌های گیت و دریت قطع است.

با فرض دوره تناوب به شکل ۹-۲ و رابطه ۱۲-۲:

$$T = T_{ON} + T_{OFF} \quad (۱۲-۲)$$



شکل ۹-۲ دوره تناوب پالس

پارامتری به نام چرخه وظیفه^۱ (D) را به صورت رابطه ۱۳-۲ می توان تعریف کرد و با تعیین صحیح مقدار D می توان ولتاژ خروجی را طبق رابطه ۱۴-۲ تنظیم و توان بیشینه را به بار منتقل کرد.

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \quad (۱۳-۲)$$

$$V_{OUT} = \frac{1}{1-D} V_{IN} \quad (۱۴-۲)$$

با توجه به این موضوع که ولتاژ و جریان تولیدی پل ثابت نبوده و به صورت غیرخطی به دما و تابش وابسته است، در نتیجه مقاومت منبع دائماً تغییر می کند. به همین علت، نیاز است تا بخش دیگری در سیستم قرار گیرد تا متناسب با شرایط هر لحظه پل، با تعیین چرخه کاری مناسب، این تساوی را برقرار نگه دارد. این بخش که تعقیب کننده توان بیشینه نامیده می شود به کمک روش های متفاوت این کار را انجام می دهد که در فصل ۴ مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۵-۱ مدولاسیون پهنای پالس

مدولاسیون پهنای پالس به قطاری از پالس های مربعی گفته می شود که اغلب به وسیله IC تولید می شوند. مدت زمانی که سیگنال در وضعیت بالا قرار دارد، "زمان روشن" و مدت زمانی که سیگنال در

¹ Duty Cycle

وضعیت پایین است، "زمان خاموش" نامیده می‌شود. مقدار زمان بالا بودن سیگنال نسبت به مدت یک دوره تناوب به کمک چرخه کاری تعریف می‌شود (معادله ۲-۱۵) (شکل ۲-۹):

$$T_{ON} = T \times D \quad (۲-۱۵)$$

به این ترتیب که اگر سیگنال همواره بالا باشد، چرخه کاری آن ۱۰۰ درصد و هنگامی که کاملاً پایین باشد، مقدار چرخه کاری صفر است.

۲-۵-۲ تأثیر تغییرات در چرخه کاری مبدل بر ولتاژ بار

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، برای دستیابی به توان بیشینه نیاز است مقاومت بار و منبع برابر شوند. این کار به وسیله تنظیم چرخه کاری مبدل انجام می‌شود و به دلیل تغییر دائمی مقاومت منبع، نیاز به کنترل‌کننده‌ای است تا به‌طور مداوم این پارامتر را تنظیم و به مدولاسیون پهنای پالس اعمال کند و سیگنال تولیدی توسط آن به پایه گیت ماسفت یا IGBT ارسال شود. با فرض به کارگیری مبدل بوست و تمرکز بر رابطه‌ی بیان‌شده میان ولتاژ ورودی و خروجی و چرخه کار مبدل می‌توان دریافت که ولتاژ با میزان تغییرات بازه کلیدزنی رابطه مستقیم دارد؛ یعنی با افزایش D ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد و برعکس؛ اما لازم به تأکید است که ولتاژ خروجی هرگز از ولتاژ ورودی کمتر نمی‌شود و با قرار دادن چرخه کاری برابر با صفر، طبق معادله، ولتاژ خروجی برابر با ولتاژ ورودی می‌شود و این امر با باز بودن دائمی کلید صورت می‌گیرد [۱۱، ۱۲].

برای درک بهتر تأثیر تغییرات چرخه‌ی کلیدزنی بر یافتن نقطه بیشینه توان پنل خورشیدی، نمودار توان-ولتاژ را در تمام حالت‌های ممکن بررسی می‌کنیم:

مطابق شکل ۲-۱۰ پنج وضعیت امکان‌پذیر است که در جدول ۲-۱ نیز آورده شده است.

حالت اول: اگر تغییر ولتاژ و تغییر توان هر دو مثبت باشند، برای رسیدن به قله باید ولتاژ افزایش یابد.

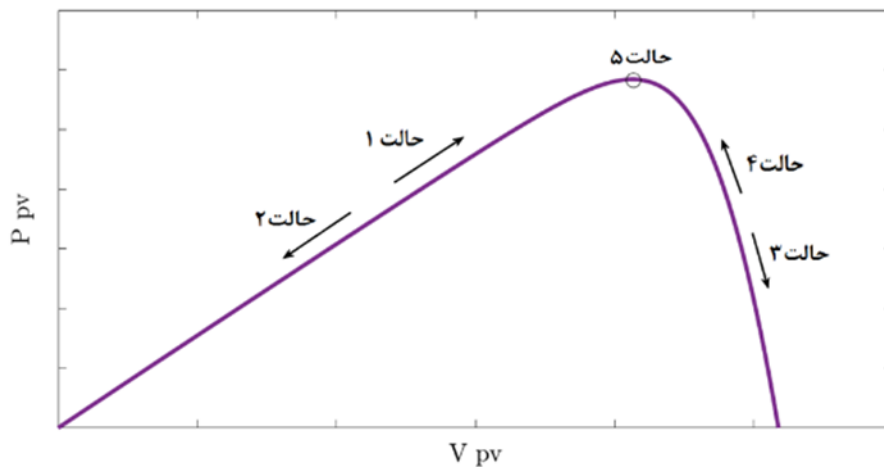
پس باید تغییرات D مثبت باشد.

حالت دوم: اگر تغییرات ولتاژ و توان هر دو منفی باشد، یعنی در جهت دور شدن از قله هستیم و باید ولتاژ افزایش یابد، یعنی تغییرات D برای رسیدن به قله باید مثبت باشد.

حالت سوم: اگر تغییر ولتاژ مثبت اما تغییر توان منفی باشد برای رسیدن به قله باید ولتاژ را کاهش داد و برای این کار باید تغییرات D منفی باشد.

حالت چهارم: اگر تغییرات ولتاژ منفی و تغییرات توان مثبت باشد باید ولتاژ کاهش یابد و این به معنی نیاز به منفی بودن تغییرات D است.

حالت پنجم: اگر با تغییرات جزئی در ولتاژ تغییرات توان صفر باشد یعنی در قله هستیم و D باید ثابت بماند.



شکل ۲-۱۰ نمایش وضعیت نقاط کار مختلف بر روی نمودار توان-ولتاژ

جدول ۱-۲ روند تغییر چرخه کاری کانورتر بوست در وضعیت‌های مختلف توان و ولتاژ

	$\Delta P > 0$	$\Delta P = 0$	$\Delta P < 0$
$\Delta V > 0$	$\Delta D > 0$ (حالت اول)	$\Delta D = 0$ (حالت پنجم)	$\Delta D < 0$ (حالت سوم)
$\Delta V < 0$	$\Delta D < 0$ (حالت چهارم)	$\Delta D = 0$ (حالت پنجم)	$\Delta D > 0$ (حالت دوم)

۶-۲ انواع روش‌های دنبال کردن نقطه بیشینه توان

تاکنون تعداد زیادی الگوریتم و طرح در منابع معرفی و بررسی گردیده است که هر یک از این روش‌ها مشخصات، محدودیت‌ها و کاربردهای خاص خود را دارد و معایب آن‌ها باید به اندازه کافی کم باشد تا کارایی سیستم در حد قابل قبول قرار گیرد. لازم به ذکر است که این روش نه تنها برای استخراج انرژی الکتریکی از پنل‌ها استفاده می‌شود، بلکه برای انواع مختلفی از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند سلول‌های سوختی، دستگاه‌های ترموالکتریک و غیره نیز استفاده می‌شود.

روش‌های سنتی را می‌توان به دو نوع زیر تقسیم کرد: روش‌های کنترل بر اساس تخمین پارامتر و الگوریتم‌های کنترل مستقیم نقطه بیشینه توان بر اساس داده‌های نمونه‌گیری شده [۱۳].

الگوریتم‌های کنترل مبتنی بر انتخاب پارامتر سعی دارند با استفاده از دستیابی به شناخت مکفی سیستم و تخمین پارامترهای یک پنل، ردیابی نقطه بیشینه توان را انجام دهند. برای این کار پارامترهای فیزیکی یک پنل و مقادیر مربوط به میزان تابش و دمای کاری اندازه‌گیری و تحلیل می‌شوند که این کار امکان ایجاد یک مدل ریاضی بهینه را فراهم می‌کند. چنین مدل‌هایی پیش‌بینی منحنی‌های مشخصه P-V و I-V پنل را در شرایط عملیاتی داده شده امکان‌پذیر می‌کنند و از این‌رو نقطه بیشینه توان براساس

نمودارهای ترسیم شده تخمین زده می شود. استفاده از یک مدل تقریبی و تخمین نقطه بهینه باعث می شود که دقت این روش به شدت وابسته به دقت شبیه سازی باشد که این امر تأثیر چشمگیری در عملکرد و بازده سیستم اصلی دارد [۱۴، ۱۵].

روش جستجوی جدول^۱ مبتنی بر مقایسه مقادیر ازپیش ذخیره شده برای تمام شرایط آب و هوایی ممکن است. در هر مرحله، ولتاژ عملیاتی جدید، توسط کنترل کننده سیستم و بر اساس مقایسه مقادیر اندازه گیری شده تابش و دما با اطلاعات موجود در پایگاه داده های موجود در پایگاه بر اساس مشخصات داده شده توسط سازنده، مدل سازی ریاضی مازول یا از طریق آزمایش های تجربی ایجاد می شود؛ بنابراین، سیستم برای ذخیره این حجم عظیم از داده که به ازای تمام ورودی های ممکن است، به ظرفیت زیادی نیاز دارد و برای هر پنل و موقعیت جغرافیایی باید اطلاعات مربوط به همان موقعیت در اختیار الگوریتم قرار گیرد. این کار عملاً ممکن نبوده و سیستم مجبور به درونیابی برخی داده ها می شود و نتیجه این کار کاهش دقت این روش است [۱۶، ۱۷].

از دیگر الگوریتم های این دسته می توان به روش های مبتنی بر معادلات ریاضی حاکم بر سیستم اشاره کرد که یکی از آن ها تطبیق منحنی^۲ است. ایده اصلی این روش تهیه یک چندجمله ای است که می تواند مشخصه P-V سلول را به طور تقریبی محاسبه کند. این هدف را می توان با آزمایش سلول در شرایط مختلف، جمع آوری داده های تجربی (همچون توان و ولتاژ) و استفاده از تکنیک های تحلیل منحنی به دست آورد. متداول ترین تقریب برای مشخصه P-V سلول چندجمله ای مکعب است. این روش امکان ارتقا معادله به مراتب بالاتر همچون مرتبه ۴ است که باعث افزایش دقت در یافتن نقطه ی مدنظر می شود. این روش بسیار ساده است اما نقاط ضعف آن همچون نیاز به دانش قبلی، حافظه با ظرفیت بالا به دلیل تعداد زیاد محاسبات، سرعت کم، وابستگی ضرایب به شرایط محیط، وابستگی دقت الگوریتم به تعداد نمونه های آزمایشی مانع از کاربرد گسترده آن شده است [۱۴].

¹ Lookup table

² Curve fitting

ولتاژ ثابت^۱[۱۸] ساده‌ترین روش انتخاب پارامتر است. این روش ولتاژ ترمینال مازول را بر اساس مقدار مرجعی که از پیش و به‌صورت تقریبی تعیین‌شده است تنظیم می‌کند. در این الگوریتم فرض می‌شود که حتی در نوسانات دما و تابش مقدار ولتاژ مطلوب حول یک عدد است. پس از نصب پنل مقدار ولتاژ که به تولید توان بیشینه می‌انجامد، ثبت و به الگوریتم اعمال می‌گردد و آن مقدار ثابت، اساس کار الگوریتم قرار می‌گیرد. این روش در شرایط جوی نزدیک به شرایطی که پنل در آن تست‌شده است، پاسخ نسبتاً نزدیکی به ولتاژ نقطه توان بیشینه ارائه می‌کند. هرچه اختلاف دما و تابش از میزانی که آزمودن انجام شد بیشتر شود، دقت کاهش می‌یابد. از آنجاکه ولتاژ مرجع به‌عنوان مقدار ثابت انتخاب می‌شود و برای تغییرات گسترده‌ای از دما ثابت فرض می‌شوند و فرسوده‌شدن آرایه‌ها که باعث تغییر عمده‌ای در عملکرد سیستم می‌شود، نادیده گرفته می‌شود؛ بنابراین، مقدار ولتاژ محاسبه‌شده عمدتاً از ولتاژ صحیح فاصله دارد که باعث می‌شود این روش به‌عنوان روش‌های جستجوی واقعی در نظر گرفته نشود.

روش دیگری به نام روش ولتاژ مدارباز^۲ وجود دارد [۱۹] که در اصل مشابه ولتاژ ثابت است، با این تفاوت که روش قبل ولتاژ داده‌شده به الگوریتم ردیابی می‌شد، اما این روش از ولتاژ مدارباز شروع می‌شود و آن قدر کاهش می‌یابد تا بیشترین توان به‌دست آید. از مشخصات خروجی آرایه خورشیدی نیز می‌توان دریافت که وقتی ولتاژ مدارباز تحت تابش و دمای مختلف تغییر می‌کند، ولتاژ نقطه توان بیشینه تقریباً متناسب ولتاژ مدارباز تغییر می‌کند. این به معنی به‌کارگیری یک رابطه تقریبی و خطی بین این دو مقدار است که با اندازه‌گیری ولتاژ مدارباز، ولتاژ بیشینه توان محاسبه می‌گردد. از سوی دیگر برای یافتن ولتاژ مدارباز نیاز به قطع اتصال پنل از مدار داریم که عملکرد سیستم در این وضعیت در هنگام پایش کل محدوده کنترل، تلفات توان را به همراه دارد. چنین تلفاتی موجب می‌شود که این روش کنار گذاشته شود.

¹ Constant voltage

² Open-circute voltage

روشی مشابه روش فوق اما با استفاده از جریان اتصال کوتاه [۲۰] قابل اجراست که در آن رابطه برقرار شده نسبتی خطی، بین جریان اتصال کوتاه و جریان نقطه بهینه را مورد بررسی قرار می دهد. همانند روش قبلی، ضریب ثابتی که دو مقدار را به هم مربوط می کند به طور عمده به عوامل متعددی همچون فناوری ساخت سلول های خورشیدی و شرایط محیطی بستگی دارد که باعث کاهش دقت در تعیین ولتاژ مطلوب می گردد [۲۱، ۲۲]. به منظور بهبود دو روش قبل و رفع مشکل قطع اتصال پنل باهدف محاسبه ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه، طراحان استفاده از سلولی که در کنار پنل قرار می گیرد^۱ را پیشنهاد می کنند. در این حالت دیگر اتصال سیستم اصلی قطع نمی شود و سلول مقادیر مورد نیاز را تعیین می کند؛ اما در این روش نیز کماکان مشکل دقت کم محاسبات پابرجاست [۲۳، ۲۴].

روش هایی که تاکنون اشاره شد، تماماً وابسته به مقادیر تقریبی و آفلاین بودند که این امر مانع از یافتن مقدار دقیق ولتاژ می شود. روش هایی که در ادامه اشاره خواهد شد، مقادیر را به صورت آنلاین و بر اساس شرایط همان لحظه محاسبه می کنند.

دسته دیگر تحت عنوان روش های کنترل مستقیم با نمونه گیری پارامترهایی مانند ولتاژ، جریان و توان از یک آرایه، نقطه بیشینه توان را ردیابی می کنند. روش های مستقیم به هیچ مدلی از پنل متکی نیستند و اجرای آن ها در عمل ساده است و از این رو بسیار مورد استفاده قرار می گیرند. این دسته با نام روش های نمونه گیری نیز شناخته می شوند. در این الگوریتم ها، یک نمونه از ولتاژ و جریان تولید شده در لحظات مختلف با فاصله ی منظم اندازه گیری و ذخیره می شود؛ بنابراین، توان لحظه T محاسبه می شود. در مرحله دوم توان لحظه T+1 دوباره اندازه گیری می شود. پس از جمع آوری اطلاعات گذشته و حال، کنترل کننده بسته به موقعیت کاری تصمیم گیری می کند. این فرآیند ردیابی تا زمان رسیدن به نقطه اوج توان به طور نامحدود تکرار می شود. این روش ها شامل انحراف و مشاهده، هدایت افزایشی، خازن پارازیتی و ... هستند و اغلب با الگوریتم های جستجوی هوشمند ترکیب می شوند تا دقت و سرعت ردیابی

¹ Pilot cell

را بیشتر بهبود بخشند.

انحراف و مشاهده^۱ [۲۵] که به آن روش تپه‌نوردی نیز می‌گویند، یکی از متداول‌ترین روش‌های این دسته است. اصل انحراف و مشاهده افزایش یا کاهش ولتاژ یا چرخه کار مبدل متصل به ترمینال آرایه در فواصل منظم و مشاهده جهت تغییر توان و پس‌از آن تعیین سیگنال کنترل بعدی است. انحراف و مشاهده ساده و قابل‌اعتماد است و اجرای آن آسان است؛ به همین دلیل بیشتر توسط اکثر نویسندگان و طراحان استفاده می‌شود [۲۶] و در این بررسی به‌منظور معیار مقایسه‌ای روش‌های ارائه‌شده با روش‌های کلاسیک مورد استفاده گرفته و در فصل ۳ بیشتر به آن پرداخته شده است. این یک روش تکراری برای به دست آوردن نقطه توان بیشینه است. با این حال، الگوریتم با تغییر دائمی ولتاژ پایانه آرایه، نقطه بهینه را ردیابی می‌کند که می‌تواند به راحتی باعث نوسان توان خروجی شود. بعلاوه با تغییر شرایط محیطی، این نوسانات دائمی می‌تواند منجر به اتلاف توان سیستم شود. برای غلبه بر این مسئله، اصلاحات زیادی بر این روش اعمال شده است [۲۷-۲۹].

یکی دیگر از روش‌های این دسته بازخورد ولتاژ^۲ است که با بازخورد جریان نیز قابل اجراست. این روش از یک بازخورد برای مقایسه ولتاژ و یا جریان هر لحظه با لحظه قبل استفاده و چرخه کاری را در جهت رسیدن به توان بیشینه تغییر می‌دهد [۳۰].

هدایت افزایشی^۳ [۳۱، ۳۲] الگوریتم معمول دیگری است که برای تعقیب نقطه‌ی کار بهینه استفاده می‌شود و با مقایسه هدایت لحظه‌ای با منفی هدایت شیب عمل می‌کند، به‌طوری‌که این دو مقدار در نقطه بیشینه توان برابر می‌شوند. وقتی شرایط محیطی تغییر می‌کند، این روش بدون در نظر گرفتن ویژگی‌ها و پارامترهای مازول می‌تواند تغییر در توان را هموار دنبال کند. با این حال، روند کنترل این الگوریتم نسبتاً پیچیده است و دقت و سرعت اندازه‌گیری تا حدی بر عملکرد ردیابی تأثیر می‌گذارد.

¹ Perturb and Observe (P&O)

² Voltage/Current feedback

³ Incremental Conductance

روش بهبود یافته هدایت افزایشی نیز پیشنهاد شده است [۳۳-۳۵] که در مقایسه با روش مرسوم، می‌تواند به سرعت افزایش یا کاهش تابش را تشخیص دهد و تصمیم صحیحی اتخاذ کند، به این ترتیب نوسانات خروجی کاهش یافته و قدرت الگوریتم در یافتن و پایدار ماندن در نقطه بهینه افزایش یابد.

خازن پارازیتی^۱ روشی مشابه هدایت افزایشی است [۳۶]. این روش ظرفیت پارازیتی اتصالات p-n در سلول و القا ناخواسته موجود در بین سلول‌ها را در نظر می‌گیرد. وجود خازن پارازیتی می‌تواند سیگنال خطا را در مواقعی که در نقطه توان بیشینه نیستیم کاهش دهد و توانایی ضد تداخل سیستم را افزایش دهد. این مزایا با وجود افزایش پیچیدگی در اجرا در کاربردهای عملی برتری چشمگیری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

روشی قدیمی به نام ترکیب آرایه فتوولتائیک نیز قابل اشاره است که عملکرد ضعیف اما متفاوتی دارد. این روش با توجه به میزان بار تعداد آرایه‌های سری و موازی را به نحوی تغییر می‌دهد که انرژی مورد نیاز بارهای مختلف برآورده گردد؛ اما از معایب این روش می‌توان گفت که در صورت تغییر شرایط خارجی سرعت و قدرت کافی را در تطبیق سیستم ندارد و به همین دلیل در کاربردهای عملی قابل استفاده نیست [۳۷].

روش بازخورد توان، برخلاف روش قبل بر روی ولتاژ و جریان آرایه تمرکز دارد و با جمع‌آوری این مقادیر و انجام یک سری محاسبات توان خروجی را محاسبه می‌کند؛ سپس با بررسی اختلاف توان در بازه‌های متوالی، توان خروجی جدید تعیین می‌گردد. علت عدم محبوبیت این الگوریتم استفاده آن از سمت چپ نمودار توان-ولتاژ است که این کار باعث تک‌بعدی کار کردن کنترل‌کننده می‌گردد. به عبارت دیگر تنها می‌تواند با افزایش ولتاژ توان را افزایش دهد. به همین دلیل پایداری و قدرت کافی برای کنترل سیستم در شرایط مختلف را ندارد که این موضوع باعث حذف این روش در کارهای عملی می‌گردد [۳۸، ۳۹]. با افزایش سیستم‌های پیچیده و غیرخطی، تکنیک‌های معمولی به اندازه کافی برای اداره آن‌ها قدرتمند

¹ Parasitic Capacitance

نبودند و نیاز به ایجاد و به کارگیری کنترل کننده های معتبر و سریع تر در آینده احساس شد. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد، مشخصه های پنل ها کاملاً غیرخطی هستند و در شرایط خاصی امکان دارد بیش از یک قله داشته باشند. در چنین شرایطی الگوریتم هایی که تا اینجا اشاره شد، قدرت عملکرد قابل قبولی ندارند و عملاً در پیدا کردن قله اصلی موفق نیستند. به همین دلیل متخصصان الگوریتم های هوشمند نظیر شبکه عصبی مصنوعی^۱ و کنترل کننده های غیرخطی همچون کنترل کننده مود لغزشی^۲ را به کار گرفته اند [۴۰-۴۲]. این کنترل کننده ها علاوه بر خطای کمتر از سرعت بیشتری نیز برخوردارند و منجر به تحولی عظیم شدند. در همان زمان، پیچیدگی فزاینده ساختار که باعث تغییر بنیادی و بهبود سیستم های کنترل گردید، از سوی دیگر به یکی از ایرادات این دسته تبدیل شد. در ادامه به چند نمونه از آن ها نگاهی مختصر شده است.

شبکه عصبی مصنوعی نوع جدیدی از فناوری پردازش اطلاعات است که بر اساس الگوریتم یادگیری ماشین^۳ عمل می کند. ورودی های مورد نیاز این روش می تواند پارامترهای فیزیکی همچون دما و تابش و یا مقادیر الکتریکی اندازه گیری شده مانند توان و ولتاژ باشد. در برخی مقالات ادغام دو نوع ورودی نام برده نیز به جواب قابل قبولی انجامیده است [۴۳]. آموزش ممکن است زمان بر باشد و تعداد نوروهای لایه های در نظر گرفته شده، تأثیر زیادی در زمان آموزش شبکه و صحت نتایج دارد. در حال حاضر، بسیاری از محققان شبکه عصبی مصنوعی را با الگوریتم های هوشمند دیگر ترکیب می کنند تا نتایج بهتری کسب کنند [۴۴-۴۶].

منطق فازی^۴ نوع متداول الگوریتم های هوش مصنوعی^۵ است که بر اساس مجموعه ای از قوانین فازی ساخته شده است. با مطالعه و بررسی مقالاتی که به تازگی منتشر شده است، بدیهی است که کنترل کننده منطق فازی در کاربردهای عملی بسیار محبوب بوده و به شکل گسترده و متنوع کاربرد

¹ Artificial neural network

² Sliding Mode

³ machine learning

⁴ Fuzzy Logic

⁵ Artificial intelligence

دارد. اجرای آن را می‌توان به چهار بخش فازی‌سازی^۱، پایگاه قاعده^۲، موتور استنتاج^۳ و غیرفازی‌سازی^۴ تقسیم کرد. ویژگی اصلی منطق فازی، گنجاندن تجربه و دانش فردی متخصص در قوانین موجود در پایگاه قواعد برای کنترل سیستم است [۴۷]. همچنین، این روش می‌تواند توان بیشینه را به سرعت ردیابی کند و در شرایط جوی ثابت پس از رسیدن به توان مدنظر، برخلاف روش‌هایی همچون انحراف و مشاهده، مانع از بروز نوسان دائمی در خروجی گردد که به معنی پایداری بهتر سیستم است [۴۸]. به عنوان مثال، از آنجاکه طراحی کنترل‌کننده‌های فازی باید توسط متخصصان انجام شود، در مرجع [۴۹]، با دستیابی به شناختی دقیق از سیستم و مشاهده و بررسی رفتار کنترل‌کننده‌هایی مانند انحراف و مشاهده، پایگاه قواعد سیستم فازی ایجاد شده است. همچنین، از روش انحراف و مشاهده برای تحلیل و برنامه‌ریزی سیستم فازی در [۵۰] استفاده شده است. در مرجع [۵۱]، کنترل‌کننده فازی با بررسی وضعیت سیستم و تقسیم آن به پنج بخش مختلف و براساس قرارگیری سیستم در هر یک از این بخش‌ها، ولتاژ را افزایش یا کاهش می‌دهد؛ به‌طوری‌که سیستم را برای یافتن و پایداری‌بودن در نقطه کاری مطلوب هدایت کند. در کنترل‌کننده پیشنهادی، هر یک از ورودی‌ها پنج تابع عضویت دارند و خروجی سیستم مقداری بین -۰.۲ تا ۰.۲ است که به مقدار ولتاژ اضافه می‌شود. این تغییر ولتاژ تا رسیدن به حداکثر توان ادامه می‌یابد. همچنین کنترل‌کننده را می‌توان به‌طوری طراحی کرد که به‌جای تغییر چرخه کار، مقدار دقیق آن مستقیماً تعیین شود؛ همچون طراحی معرفی‌شده در مرجع [۵۲]. مرجع [۵۳] در شرایط محیطی مختلف اقدام به آزمودن کنترل‌کننده فازی خود کرده است. در این طراحی ۵ تابع عضویت برای هر ورودی که به‌صورت مقادیر شیب مشخصه توان پنل و میزان تغییرات آن در فواصل زمانی ثابت فرض شده است تعریف شده است. همچنین بازه ورودی نیز بهنجارسازی نشده و بین ۲۵۰- تا ۲۵۰ تعریف گردیده است. همچنین در مرجع [۵۴] تعداد هفت تابع

¹ Fuzzification

² Rule base

³ Inference Engine

⁴ Defuzzification

عضویت برای هر ورودی و در بازه‌های ۲- و ۲ و نیز ۱۰- تا ۱۲ طراحی شده است. مرجع [۵۵] به موضوع پیچیدگی تعیین پایگاه قواعد و اهمیت طراحی سیستم‌های فازی توسط افرادی خبره با دانش کافی از سیستم اشاره شده است. باهدف کاهش نیاز به دانش قبلی از سیستم و اطمینان از صحت و طراحی بهترین پایگاه قواعد این کار توسط الگوریتم‌های فراابتکاری انجام گرفته است. با در نظر قرار دادن این موضوع پژوهش‌های بسیاری صورت گرفته است. دو موضوع موجب پررنگ شدن این دسته طراحی‌ها می‌گردد: اولاً تنوع بسیار بالای سیستم‌های فازی و انگیزه‌ی بررسی، پیاده‌سازی و تحلیل نتایج هریک؛ دوماً وجود الگوریتم‌های فراابتکاری که با روش‌های گوناگون اقدام به بهینه‌سازی می‌کنند. درنهایت کنترل‌کننده‌های طراحی شده در زمینهٔ سرعت دقت و پایداری باهم مقایسه می‌شوند [۵۶، ۵۷]. در پژوهش انجام شده، این کنترل‌کننده با الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیب شده تا نیاز به شناخت سیستم توسط طراح به حداقل برسد [۵۸، ۵۹]. برای مثال در مراجع [۵۵]، [۶۰] و [۶۱] به ترتیب الگوریتم‌های قورباغه، گرگ خاکستری و کلونی زنبور به کاررفته است. علاوه بر تمام تلاش‌های انجام شده در زمینه طراحی کنترل‌کننده برتر برای دستیابی به حداکثر توان و بازنگری و بهبود روش‌های مختلف طراحی سیستم‌های فازی، مسئله‌ای که کمتر مورد توجه قرار گرفته است نوع سیستم فازی است. در بیشتر مقالات، نوع ممدانی سیستم فازی انتخاب می‌شود و پس از تعیین تعداد توابع عضویت ورودی و خروجی، قوانین فازی توسط یک طراح متخصص یا الگوریتم‌های مختلف ایجاد می‌شود. در نتیجه، بهینه‌ترین طراحی انتخاب شده و سیستم خورشیدی قرار می‌گیرد.

سیستم‌های ممدانی و سوگنو بسیار شبیه به هم هستند [۶۲]، و تنها تفاوت در قسمت غیرفازی‌سازی است. در آخر مرحله از نحوه کار سیستم فازی، مقدار خروجی با روش‌های مختلفی تعیین می‌شود. در نوع ممدانی از توابع عضویتی استفاده می‌شود مانند توابع عضویت ورودی استفاده شده و با فازی‌سازهای مختلف همچون فازی‌ساز نوع مرکز مقدار عددی خروجی تعیین می‌شود. اما در سوگنو این مرحله به شکلی کامل متفاوت صورت می‌گیرد، غیرفازی‌ساز مقدار خروجی را با استفاده از مفهوم

میانگین وزنی تعیین می‌کند [۶۳]. سطوح مختلفی برای خروجی در این سیستم‌ها تعیین می‌شود و برای هر یک مقداری تعیین می‌شود که می‌تواند یک عدد ثابت یا یک معادله خطی ورودی باشد [۶۴-۶۷].

با نگاه دقیق به مراجع ۶۲ تا ۶۷ درک این نوع ویژگی‌های که باعث تفاوت این دو نوع سیستم می‌شود و داشتن دید واضح نسبت به آن‌ها می‌تواند منجر به انتخاب صحیح شود. به‌منظور مقایسه، مهم‌ترین مسئله وجود تابع عضویت خروجی است. در ممدانی، توابع عضویت در حین طراحی وجود دارند و نمایش داده می‌شوند. همچنین انواع مختلفی دارد و می‌توان آن را به اشکال مختلف مثل مثلثی، دوزنقه و گوسی طراحی کرد. درحالی‌که در سوگنو مشاهده و طراحی توابع عضویت به‌صورت شماتیک امکان‌پذیر نیست. همچنین، سطح خروجی ممدانی ناپیوسته است، درحالی‌که در مورد سوگنو، پیوسته است. نکته دیگر این است که در ممدانی، خروجی با تحلیل قوانین به‌طور مستقیم و اعمال نتایج به یک نوع غیرفازی‌ساز حاصل می‌شود. با این حال، در سوگنو، از میانگین وزن قوانین استفاده می‌شود که کل روند غیرفازی‌سازی را تغییر می‌دهد. "تفسیرپذیری" نکته دیگری است که باید هنگام انتخاب سیستم‌های استنتاج موردتوجه قرار گیرد، که در ممدانی به‌راحتی حاصل می‌شود، اما در سوگنو امکان‌پذیر نیست. درنهایت می‌توان گفت، سیستم‌های ممدانی انعطاف‌پذیری کمتری دارند و سوگنو در بین انواع دیگر از انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار است.

۷-۲ جمع‌بندی

در این فصل چند مدار معرفی گردید که قادر هستند رفتار یک سلول خورشیدی را شبیه‌سازی کنند. از میان آن‌ها مدل تک دیود به دلیل سادگی و دقت کافی برای شبیه‌سازی انتخاب شد. در ادامه مبدل بوست معرفی گردید و نحوه افزایش ولتاژ خروجی آن نسبت به ولتاژ ورودی به‌طور تئوری تشریح شد. این مبدل برای افزایش ولتاژ دریافتی نیازمند سوئیچ‌زنی سریع بود که این کار با وسیله یک IGBT یا

MOSFET انجام می‌شود. برای آنکه بتوان سوئیچ را قطع و وصل کرد از یک مدولاسیون پهنای پالس استفاده گردید و چرخه کاری آن توسط الگوریتم‌هایی که معرفی و دسته‌بندی شد، تعیین شده و تغییر می‌کند. این پرسه به منظور تطبیق امپدانس منبع و بار در سیستم‌های فتوولتائیک استفاده می‌گردد تا با قرارگیری در ولتاژ مناسبی که از مشخصه‌ها قابل استخراج هستند به بیشینه توان دست یافت. در آخر نگاهی به الگوریتم‌های مختلف به کاررفته در این مسائل شده است. با بررسی مقالات جدید اهمیت به کارگیری یارگیری ماشین به وضوح بیان شده است که از میان آن‌ها کنترل کننده فازی از محبوب‌ترین روش‌ها است. همچنین باهدف کاهش نیاز به شناخت سیستم در طراحی یک سیستم فازی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی پایگاه قواعد را تعریف می‌کنند که به برخی از جدیدترین الگوریتم‌های به کاررفته همچون قورباغه و گرگ خاکستری اشاره شد. موضوع دیگر در مورد طراحی یک سیستم فازی انتخاب نوع آن است که اشاره‌ای به نوع ممدانی و سوگنو شد و تفاوت این دو به اختصار بیان گردید.

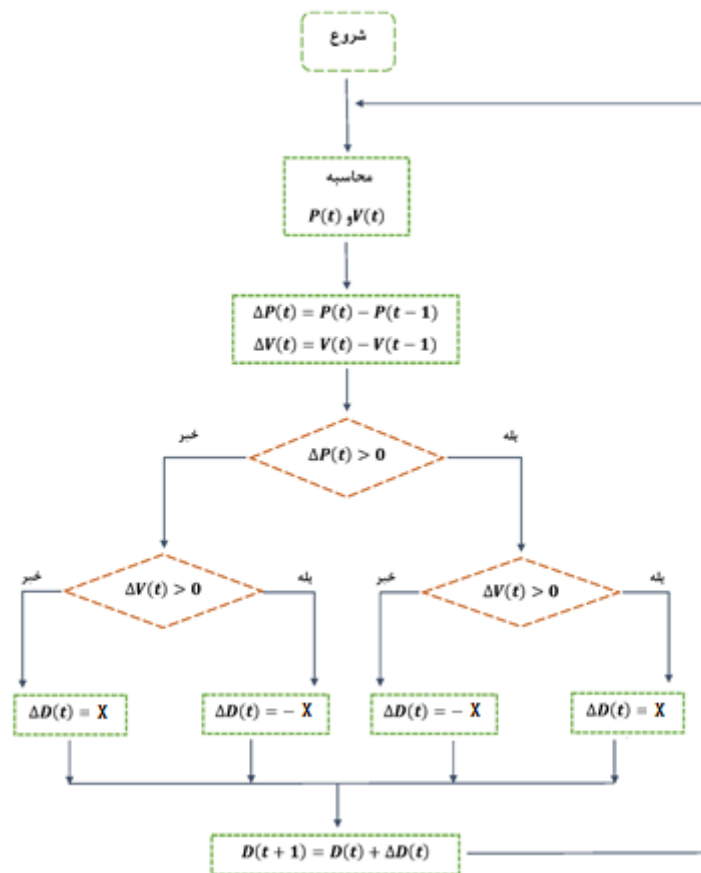
فصل ۳ طراحی کنترل کننده

۳-۱ مقدمه

در فصل قبل اجزا یک سیستم فتوولتائیک شرح داده شد. با تغییر چرخه کاری مبدل تنظیم ولتاژ در نقطه کاری مطلوب اتفاق می‌افتد؛ اما یافتن ولتاژ مناسب نیازمند بخش کنترلی است که علاوه بر تعیین ولتاژ موردنظر، دستورات لازم به منظور دستیابی به آن مقدار را به سایر اجزا سیستم اعمال کند. در این فصل ابتدا کنترل کننده تپه‌نوردی معرفی گردیده است که معیاری برای مقایسه‌ی الگوریتم‌های هوشمند با الگوریتم‌های ساده‌تر و کلاسیک است. در بخش بعد اجزاء یک کنترل کننده فازی مورد بحث قرار می‌گیرد. در ادامه، سه الگوریتم فراابتکاری معرفی و مراحل آن‌ها بررسی می‌شود که وظیفه بهینه‌سازی و تبدیل سیستم فازی اولیه به کنترل کننده‌هایی کارآمدتر را برعهده دارند.

۳-۲ کنترل کننده تپه‌نوردی

در کاربردهای تجاری بیشتر از الگوریتم تپه‌نوردی استفاده می‌شود زیرا می‌توان آن را به‌سادگی پیاده‌سازی کرد و به سیستم تطبیق داد. این روش با تغییر چرخه کار در فواصل منظم و اندازه‌گیری جریان و ولتاژ تولیدی کار می‌کند و مراحل این روش در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. ابتدا اغتشاش کوچکی به سیستم اعمال می‌شود. این اغتشاش به صورت تغییر ولتاژ است که به وسیله تغییر در بازه سوئیچ‌زنی مبدل اعمال می‌گردد و باعث تغییر در مقدار توان تولیدی پنل می‌شود. مرحله بعد مقایسه میزان توان تولیدی در لحظات قبل و بعد از اعمال تغییر است. اگر این تغییر در جهت بهبود خروجی و افزایش توان بوده باشد، کنترل کننده به اعمال تغییر ادامه می‌دهد در غیر این صورت تغییر در خلاف جهت قبل اعمال می‌گردد. این اعمال تغییرات که به صورت افزودن یا کاستن مقدار معینی از چرخه کاری است، تا زمانی ادامه می‌یابد که به نقطه بیشینه دست یافته شود [۶۸-۷۰].



شکل ۳-۱ فلوجارت روش تپه نوردی

این الگوریتم را می‌توان با کمک روابط ریاضی زیر شرح داد:

در سمت چپ نقطه بیشینه توان:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \rightarrow V_{pv}(t) = V_{pv}(t-1) + K \quad (۱-۳)$$

در سمت راست نقطه بیشینه توان:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \rightarrow V_{pv}(t) = V_{pv}(t-1) - K \quad (۲-۳)$$

در نقطه بیشینه توان:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \rightarrow V_{pv}(t) = V_{pv}(t-1) \quad (۳-۳)$$

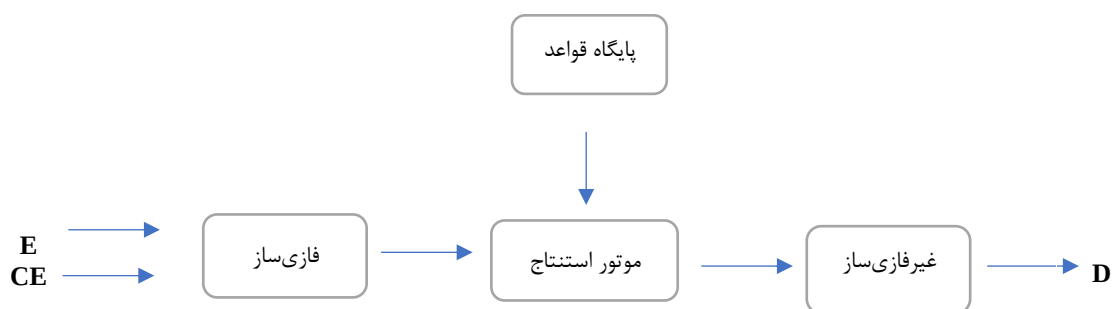
در روابط فوق K اندازه گام ولتاژ را برای اجرای الگوریتم تپه‌نوردی نشان می‌دهد و با افزودن یا کاستن مقدار X از چرخه‌کاری به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که در قله نمودار ولتاژ-توان به ازای اعمال اغتشاش در هر جهت با کاهش توان مواجه می‌گردد. به همین دلیل در نقطه بیشینه توان، مقدار معینی از D کاسته و در مرحله بعد به آن اضافه می‌گردد. این موضوع باعث نوسان در نقطه مطلوب می‌گردد که یکی از عیب‌های این الگوریتم به حساب می‌آید. یکی دیگر از معایب این روش سرعت پایین در یافتن توان بیشینه است. علت این رخ داد میزان تغییرات اعمالی به چرخه‌کاری است که با X نشان داده شده است. در صورتی که این مقدار کوچک در نظر گرفته شود، دفعات تکرار بیشتری نیاز است تا به نقطه بیشینه توان دست‌یافت. برای افزایش سرعت نیز اگر این مقدار بزرگ در نظر گرفته شود، میزان نوسان در قله افزایش می‌یابد؛ بنابراین انتخاب درست این مقدار تأثیر قابل توجهی بر سرعت و دقت این الگوریتم دارد.

۳-۳ کنترل کننده فازی

در میان روش‌های مختلف هوش مصنوعی، منطق فازی در کاربردهای تجاری تاکنون از موفق‌ترین روش‌ها بوده است. چنین موفقیتی را مدیون بهره‌گیری از روش فهم و تحلیل انسان و به‌کارگیری آن در حل مسائل است. با افزایش سیستم‌های غیرخطی و افزایش تقاضا برای کنترل خودکار و تمایل بشر به ساده‌سازی پروسه‌های کنترلی، در کنار افزایش دقت آن‌ها و همچنین حذف اپراتور انسانی به دلیل میزان خطا بیشتر و سرعت پایین‌تر نسبت به ماشین، روش‌هایی همچون منطق فازی ظهور کردند. فازی نوعی منطق است که به‌جای بهره‌گیری از قواعد ساده ماشین‌ها، الگوهای تصمیم‌گیری پیچیده مغز انسان را اساس کار خود قرار می‌دهد تا بتواند در مواجهه با مسئله همچون یک اپراتور انسانی اما سریع‌تر و با خطای کمتر موضوع را تحلیل کرده و بهترین راه‌حل را ارائه دهد. یکی از ویژگی‌های این روش که آن را از سایر کنترل‌کننده‌ها متمایز می‌کند، درک وضعیت عدم قطعیت است که باعث تعلق

یک عضو به صورت هم‌زمان به چند مجموعه می‌شود و این یعنی به جای پاسخ به سؤالات با دو وضعیت درست و غلط، یک بازه برای جواب ارائه می‌کند.

همان‌طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، سیستم‌های فازی به‌طور کلی از چهار بخش تشکیل شده‌اند. در اولین بخش ورودی‌ها مستقیماً از سیستم به کنترل‌کننده اعمال می‌شوند و لازم است به زبانی قابل درک برای کنترل‌کننده تبدیل شوند. مقادیر ورودی با توابع عضویتی که برایش از پیش تعیین شده است ارزش‌گذاری می‌شوند. به این کار فازی‌سازی گفته می‌شود و ورودی‌ها را برای مرحله بعد، یعنی پردازش آماده می‌کند. قواعد فازی و موتور استنتاج دو بخش مهم دیگر کنترل‌کننده است که با گزاره‌های اگر-آنگاه پایگاه قواعد و مقدار ورودی‌هایی که فازی‌سازی شده‌اند، موتور استنتاج خروجی مناسب را تولید می‌کند. در صورت طراحی صحیح این بخش ارتباطی جامع و دقیق میان تمام وضعیت‌های ممکن برای ورودی‌ها با خروجی مطلوب برقرار می‌شود. در بخش آخر لازم است تصمیمات اتخاذ شده توسط کنترل‌کننده به دستوری قابل درک برای سیستم تبدیل شود و این اتفاق به کمک غیرفازی‌ساز ممکن می‌شود. ممکن است خروجی سیستم فازی ترکیبی خطی از ورودی‌ها و یا عددی ثابت باشد که با نام سیستم‌های فازی سوگینو شناخته می‌شوند [۶۳، ۷۱]



شکل ۲-۳ اجزا اصلی یک کنترل‌کننده فازی

۳-۴ کنترل کننده فازي برای سیستم خورشیدی

حال که اجزا کنترل کننده فازي بررسی شدند، کنترل کننده‌ای برای سیستم خورشیدی طراحی می‌گردد که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۴-۱ نوع سیستم فازي

به طور کلی سیستم‌های فازي از لحاظ نوع داده‌های ورودی و خروجی تولید شده به دو دسته تقسیم می‌شوند و عبارتند از: سیستم‌های فازي سوگینو و سیستم‌های فازي ممدانی. این دو نوع سیستم شباهت زیادی در بخش فازي‌سازی و عملگرهای فازي دارند؛ اما تنها تفاوت در خروجی آنهاست. در ممدانی خروجی توسط یک غیرفازی‌ساز مانند متوسط مراکز از مجموعه‌ی فازي با توابع عضویت تعیین می‌گردد. اما در سیستم‌های سوگینو، خروجی غیرفازی است [۷۲، ۷۳].

۳-۴-۲ ورودی فازي

دومین مرحله در طراحی یک سیستم فازي، تعریف ورودی‌ها و طراحی توابع عضویت آنهاست. از آنجایی که هدف قرارگیری در قله مشخصه ولتاژ-توان است، می‌توان با بررسی شیب این نمودار و تغییرات آن در بازه‌های زمانی مناسب و یا بررسی روند تغییرات ولتاژ و توان، موقعیت لحظه‌به‌لحظه را بر روی نمودار مذکور تشخیص داد و تعیین کرد که چگونه باید به سمت قله حرکت کرد. برای مثال در نزدیکی قله، شیب و تغییرات شیب به صفر نزدیک شود (بدون توجه به مثبت منفی بودن آن)، اما با افزایش فاصله از قله شیب افزایش می‌یابد و سپس ثابت می‌ماند. بنابراین، با تشخیص موقعیت فعلی سیستم بر روی نمودار و داشتن درک مناسب از منطق کاری سیستم، به سادگی می‌توان با تغییر چرخه کاری در نقطه بهینه قرار گرفت.

پس از مشخص کردن نوع و تعداد ورودی، به تعریف و ایجاد توابع عضویت پرداخته می‌شود. قدم بعد تعیین بازه ورودی است که نیازمند شناخت مناسب از سیستم است. همچنین در صورت تغییر این بازه به دلایلی همچون تغییر پنل یا محل نصب، طراحی باید اصلاح گردد. به‌منظور جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی در طراحی انجام‌شده، ورودی‌ها به‌نچارسازی شده‌اند؛ یعنی توابع عضویت در بازه ۱- تا ۱ تعیین می‌گردند. ورودی‌های سیستم پیش از اعمال به کنترل‌کننده در دو عدد k_1 و k_2 ضرب می‌شوند که این عمل ورودی‌ها را در بازه مناسب قرار می‌دهد. با این کار نیاز به طراحی مجدد برطرف شده و تنها با اصلاح دو ضریب k_1 و k_2 کنترل‌کننده با سیستم جدید منطبق می‌گردد.

۳-۴-۳ خروجی فازی

همانطور که در فصل قبل بیان شد، خروجی سیستم فازی که به دنبال طراحی آن هستیم، چرخه‌کاری مدولاسیون پهنای پالس است که منجر به سوئیچ‌زنی در مبدل بوست می‌گردد. خروجی کنترل‌کننده و بازه‌ای که برای غیرفازی‌ساز در نظر گرفته می‌شود ۰ تا ۱ است.

۳-۴-۴ قواعد فازی

پایگاه قواعد، مغز یک سیستم فازی است. در طراحی این بخش لازم است شناخت دقیقی از سیستم وجود داشته باشد تا بتوان برای هر ترکیب ممکن از ورودی‌ها، خروجی صحیحی تعیین گردد و سیستم را به سمت هدف مطلوب هدایت کند. این بخش به‌صورت جدولی تعریف می‌شود که برای تمام شرایط که به‌صورت ترکیبی از ورودی‌ها است، یک تابع عضویت خروجی اختصاص می‌یابد و نهایتاً با عبور از بخش غیرفازی‌ساز عددی در بازه تعیین‌شده برای خروجی تولید می‌شود که در اینجا همان چرخه‌کاری مدولاسیون پهنای پالس است.

برای مثال جدول ۱-۳ پایگاه قواعد فازی یک سیستم فازی با دو ورودی و سه تابع عضویت برای هر ورودی را نشان می‌دهد. همچنین با فرض حضور تمام توابع عضویت خروجی در جدول، دو تابع عضویت خروجی تعریف شده است. برای چنین جدولی می‌توان گفت که اگر ورودی اول mf2 و ورودی دوم mf1 باشد، آنگاه خروجی mf2 خواهد بود.

جدول ۱-۳ پایگاه قواعد فازی یک سیستم نمونه

ورودی ۱ \ ورودی ۲			
	Mf1	Mf2	Mf3
Mf1	Mf1	Mf2	Mf2
Mf2	Mf2	Mf1	Mf1
Mf3	Mf1	Mf1	Mf2

۳-۵ بهینه‌سازی کنترل کننده فازی

به دلیل حساسیت بالا و نیاز به شناخت دقیق سیستم، امروزه متخصصان تمایل به استفاده از الگوریتم‌های مختلف برای طراحی دارند. یکی از محبوب‌ترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم ژنتیک اشاره کرد. روش‌های دیگری از زیرمجموعه الگوریتم‌های فراابتکاری نیز به کار گرفته می‌شوند که در ادامه به آن‌ها خواهیم پرداخت.

۳-۵-۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک از نظریه تکاملی داروینی الهام گرفته است و در آن شروط بقای موجودات و اصل ژن‌های برتر شبیه‌سازی شده است. الگوریتم ژنتیک یکی از اولین الگوریتم‌های تصادفی مبتنی بر جمعیت است و با سه عملگر اصلی انتخاب، ترکیب و جهش کار می‌کند. هر پاسخ مربوط به یک کروموزوم است و هر پارامتر از پاسخ‌های پیشنهادی نشان‌دهنده یک ژن است. برتری هر یک از افراد با استفاده از محاسبه تابع هزینه بررسی می‌شود. آنچه این الگوریتم را قابل اعتماد و قادر به تخمین پاسخ بهینه برای یک مسئله می‌کند، روند حفظ بهترین راه‌حل‌ها در هر نسل و استفاده از آن‌ها برای بهبود راه‌حل‌های بعد است. به همین ترتیب، کل جمعیت نسل به نسل بهتر می‌شوند. با ترکیب ژن‌های برتر و ایجاد نسل جدید فضای بین دو راه‌حل اصلی نیز جستجو می‌شود. این اپراتور به‌طور تصادفی ژن‌های کروموزوم‌ها را تغییر می‌دهد و تنوع افراد در جمعیت را حفظ می‌کند که موجب رفتاری اکتشافی می‌شود. مشابه طبیعت، ممکن است عملگر جهش یک راه‌حل بهتر ارائه دهد و راه‌حل‌های دیگر را به سمت بهترین پاسخ هدایت کند.

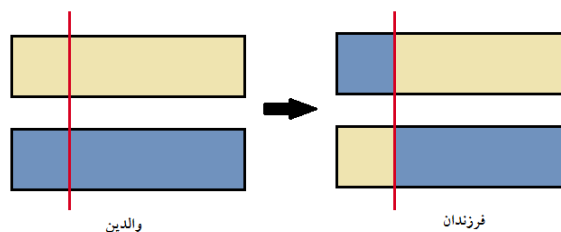
الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت تصادفی شروع می‌شود. این جمعیت را می‌توان از یک توزیع تصادفی گوسی تولید کرد تا تنوع را افزایش دهد. هدف اصلی در مرحله مقدماتی گسترش هرچه بیشتر فضای جستجو به صورت یکنواخت است که با این کار امکان کشف راه‌حل‌های متنوع در فضای مورد بررسی ایجاد می‌شود که خود باعث یافتن نواحی که شانس بیشتری برای حضور پاسخ ایده‌آل را دارند، است. در بخش‌های بعدی، بهبود کروموزوم‌ها در جمعیت مورد بحث قرار می‌گیرد. این الگوریتم با استفاده از سه عملگر که در ادامه معرفی می‌شوند جمعیت را بهبود می‌بخشد. بهترین راه‌حل در آخرین جمعیت به عنوان بهترین پاسخ برای مسئله برگزیده می‌شود [۷۴، ۷۵] (شکل ۳-۶).

۳-۵-۱-۱ انتخاب

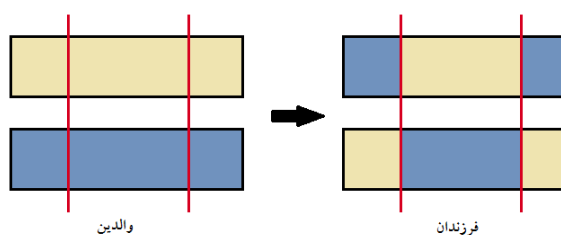
در طبیعت، افراد با توانمندی بیشتر شانس بیشتری برای تهیه غذا و جفت‌گیری دارند. این امر باعث می‌شود که ژن‌های آن‌ها در بوجود آمدن نسل بعدی تأثیر بیشتری داشته باشند. این مسئله که به نام انتخاب در طبیعت دائماً در جریان است، اساس کار الگوریتم ژنتیک قرار دارد. با الهام از این ایده ساده و در پیش گرفتن آن برای اختصاص دادن میزان شانس به افراد برای تأثیرگذاری مثبت بر نسل بعد، ژن آن‌ها برای تولید فرزندان برتر برگزیده و به نسل بعد منتقل می‌شود. روش‌های انتخاب گوناگونی معرفی شده‌اند که می‌توان به روش‌های انتخاب بولتزمن، مسابقات رتبه حالت پایدار و محلی اشاره کرد. انتخاب را می‌توان ساده‌ترین و بنیادی‌ترین متد ایجاد نسل بعدی معرفی کرد.

۳-۵-۱-۲ باز ترکیب

پس از انتخاب افراد با استفاده از یک روش انتخاب برای ایجاد نسل جدید باید از آن‌ها استفاده شود. در طبیعت، کروموزوم‌های موجود در ژن‌های یک زن و مرد باهم ترکیب شده و یک کروموزوم جدید تولید می‌کنند. این روش با ترکیب دو راه‌حل (راه‌حل‌های اصلی) که در مرحله قبل برگزیده شده‌اند برای تولید پاسخ جدید در الگوریتم شبیه‌سازی شده است. برای ترکیب کروموزوم والدین دو روش محبوب وجود دارد که عبارتند از تصادفی، یک نقطه‌ای و دونقطه‌ای. همانطور که از نام روش تصادفی مشخص است، در این روش کروموزوم والدین به صوت تصادفی باهم ادغام می‌شوند. در تلاقی تک نقطه‌ای، کروموزوم‌های دو مولد اصلی قبل و بعد از یک نقطه واحد عوض می‌شوند (شکل ۳-۳). در ترکیب دونقطه‌ای، هر کروموزوم از دو ناحیه مشابه جدا شده و به صورت ضربدری باهم تعویض شده و به هم وصل می‌گردند (شکل ۳-۴).



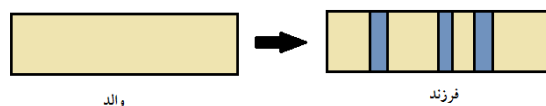
شکل ۳-۱ باز ترکیب تک نقطه‌ای



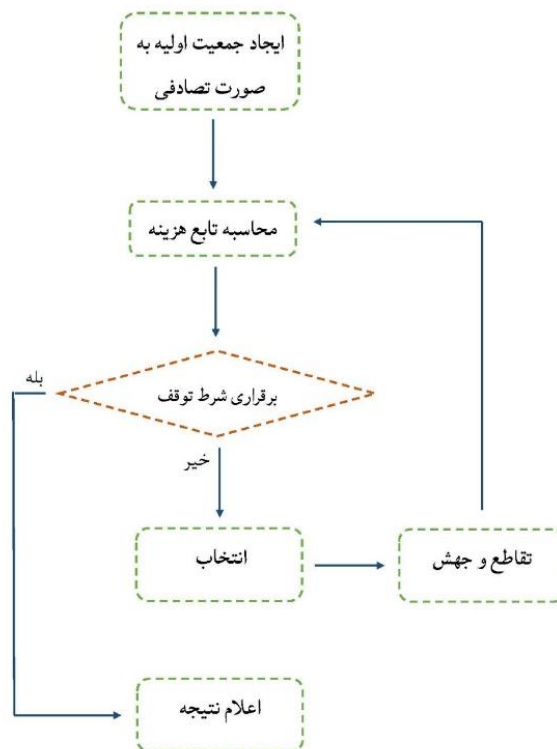
شکل ۳-۴ باز ترکیب دو نقطه‌ای

۳-۱-۵-۳ جهش

اپراتور جهش با معرفی سطح دیگری از تصادفی بودن، تنوع جمعیت را حفظ می‌کند. در واقع، این اپراتور از شبیه شدن راه‌حل‌ها جلوگیری می‌کند و احتمال گیر کردن در نقاط بهینه محلی در الگوریتم را کاهش می‌دهد. این راهکار دقیقاً مشابه جهش‌های ژنتیکی در طبیعت است. مطابق شکل ۳-۵، این الگوریتم تغییرات تصادفی در کروموزم ایجاد می‌کند که گاهی نتیجه بهتری حاصل می‌گردد؛ همچنین این کار می‌تواند نتیجه مطلوبی به همراه نداشته باشد که در این صورت در روش انتخاب حذف می‌گردد.



شکل ۳-۵ جهش



شکل ۳-۶ فلوجارت الگوریتم ژنتیک

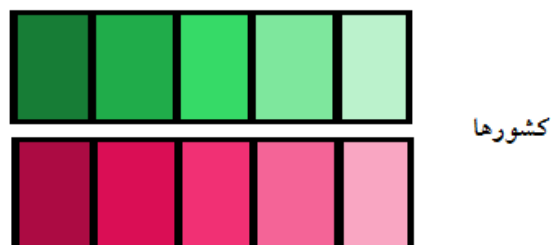
۲-۵-۳ الگوریتم رقابت استعماری

مشابه سایر الگوریتم‌های تکاملی و ژنتیک که مورد بحث قرار گرفت، رقابت استعماری نیز با یک جمعیت اولیه تصادفی آغاز می‌شود که در آن هر فرد از جمعیت نماینده یک کشور است. ویژگی کشورها مشابه کروموزوم‌ها هستند. در مرحله مقدماتی، برخی از بهترین کشورها که با داشتن تابع هزینه کمتر تعیین می‌گردند به عنوان کشورهای استعمارگر انتخاب می‌شوند و باقی کشورها نیز مستعمرات آن‌ها محسوب می‌شوند. سپس مستعمرات بر اساس قدرت کشورهای استعمارگر بین آن تقسیم می‌شوند. سپس مستعمرات به سمت امپریالیست‌های مربوطه خود در فضای دولت‌ها حرکت می‌کنند. این اتفاق را می‌توان به صورت تأثیر کشورهای استعمارگر بر اقتصاد، دین، فرهنگ و میزان پیشرفت یک مستعمره در دنیای واقعی فرض کرد. مجموعه‌ای از یک استعمارگر و چند مستعمره یک

امپراتوری را تشکیل می‌دهند. حال یک رقابت میان امپراتوری‌ها ایجاد می‌شود و یکدیگر را تخریب می‌کنند. بقای یک امپراتوری به قدرت آن در تصرف کردن و تحت سلطه درآوردن مستعمرات دیگر رقبا بستگی دارد و با افزایش مستعمرات، قدرت امپراتوری‌های بزرگ‌تر افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که امپراتوری‌های با قدرت کمتر سقوط می‌کنند. به دنبال تکرارهای متعدد رقابت در بین امپراتوری‌ها، مستعمرات به کشورهای استعمارگر نزدیک می‌شود و این نشان‌دهنده وجود همگرایی در الگوریتم است. رقابت شدید زمانی اتفاق می‌افتد که فقط یک استعمارگر همراه با برخی مستعمرات که از نظر موقعیتی به کشور استعمارگر نزدیک هستند باقی بماند. شرح گام به گام این الگوریتم در ادامه بیان شده است [۷۶، ۷۷].

به منظور شروع الگوریتم نیازمند شکل‌گیری کشورها هستیم که هر یک نشانگر جوابی ممکن برای مسئله است. کشورها به صورت یک آرایه $1 \times n$ و به شکل زیر معرفی می‌شود (شکل ۳-۷).

$$Country = [p_1, p_2, \dots, p_{Nvar}] \quad (3-4)$$



شکل ۳-۷ کشور و ۵ ویژگی در الگوریتم رقابت استعماری

که در آن N_{var} تعداد متغیرهایی است که باید در مورد یک کشور مورد توجه قرار گیرد. در شکل ۳-۷ پنج ویژگی در نظر گرفته شده است و p_i ویژگی‌های یک کشور همچون زبان، فرهنگ، دین و اقتصاد است که متناسب با وضعیت مستعمره و استعمارگر یک مقدار عددی به آن اختصاص می‌یابد و در شکل برای هر کشور بارنگ‌های مختلف مشخص شده است.

در مرحله بعدی، تابع هزینه‌ای مانند الگوریتم ژنتیک که در بخش انتخاب معرفی شد، تعریف می‌شود و هزینه هر کشور محاسبه می‌گردد. با مشخص شدن هزینه هر کشور، تعدادی از کم‌هزینه‌ترین کشورها به‌عنوان استعمارگر انتخاب می‌شوند و بقیه کشورها در دسته مستعمره خواهد بود. برای تشکیل امپراتوری‌ها، مستعمرات بر اساس قدرت استعمارگرها بین آن‌ها تقسیم می‌شوند. هزینه عادی هر امپریالیست توسط رابطه ۳-۵ تعیین می‌گردد که بر طبق آن کشور با هزینه بیشتر ضعیف‌تر محسوب می‌شوند.

$$C_n = \max\{c_i\} - c_n \quad (۵-۳)$$

در معادله فوق $\max\{c_i\}$ نشانگر بیشترین هزینه در بین تمام کشورهاست و به کشور i -ام تعلق دارد. همچنین c_n هزینه کشور n ام و C_n هزینه بهنجارسازی‌شده کشور n ام است. در نهایت قدرت بهنجارسازی‌شده هر کشور برابر است با:

$$P_n = \left| \frac{c_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} c_i} \right| \quad (۶-۳)$$

حال با دانستن قدرت هر امپریالیست تعداد مستعمرات اولیه آن‌ها از رابطه ۳-۷ به‌دست می‌آید.

$$NC_n = \text{round}\{P_n, N_{col}\} \quad (۷-۳)$$

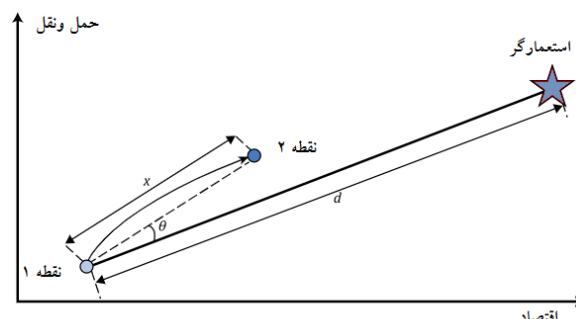
حال به‌صورت تصادفی برابر با NC_n به استعمارگر n ام، مستعمره تعلق می‌گیرد (شکل ۳-۸).



شکل ۳-۸ استعمارگرها (ستاره) و مستعمرات (دایره)

۳-۵-۲-۱ روند جذب (انتقال مستعمرات به سمت امپریالیست)

به عنوان بخشی از جنبش استعماری، کشورهای استعمارگر زیرساخت‌هایی مانند سیستم‌های حمل‌ونقل را در داخل مستعمرات خود ایجاد می‌کنند. بدین ترتیب سعی در جذب کلنی‌ها دارد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، استعمارگر، مستعمره خود را در فضای حمل‌ونقل-اقتصاد از نقطه ۱ به نقطه ۲ تغییر می‌دهد و به سمت خود می‌کشد. مستعمره فاصله x را به سمت استعمارگر خود حرکت می‌کند (شکل ۹-۴).



شکل ۹-۳ روند جذب مستعمرات توسط استعمارگرها

لازم به اشاره است که جهت حرکت به سمت استعمارگر، صرفاً بردار مستقیم نیست. تاریخ نشان داده است که مستعمرات به‌طور جزئی جذب کشور استعمارگر خود می‌شوند، نه کاملاً. برای شبیه‌سازی این اصل نیازمند تعریف میزانی انحراف در روند جذب هستیم. به این منظور یک پارامتر انحراف (θ) در این فرایند اضافه می‌گردد که به افزایش توانایی جستجوی راه‌حل بیشتر در اطراف نواحی تحت سلطه کمک می‌کند. انتخاب خوب θ تأثیر زیادی در متنوع‌سازی فضای جستجو دارد. مقدار θ معمولاً برحسب رادیان بیان می‌شود و در بیشتر موارد، مقداری حدود $\frac{\pi}{4}$ منجر به همگرایی مناسب می‌شود.

$$x \sim U(0, d \times \gamma) \quad \gamma > 1 \quad (۸-۳)$$

در رابطه ۳-۸ مستعمره به اندازه x به سمت استعمارگر حرکت می‌کند؛ در جایی که x یک متغیر تصادفی است که از توزیع یکنواخت پیروی می‌کند و d فاصله بین مستعمره و امپریالیست است. همچنین γ باعث می‌شود که مستعمره از هر دو طرف به امپریالیست نزدیک شود.

۳-۲-۵-۲ انقلاب

در طول تاریخ، مستعمرات یک امپراتوری از نظر خصوصیات اجتماعی، فرهنگی، اقتصادی و سیاسی توسط امپریالیست جذب شده‌اند. با این حال، ممکن است برخی از مستعمرات در برابر این اتفاق مقاومت کنند. در واقع، این مستعمرات نوعی اصلاحات را در خصوصیات خود انجام می‌دهند که انقلاب نامیده می‌شود. در اصل، انقلاب تغییرات ناگهانی را در موقعیت برخی از مستعمرات در فضای جستجو ایجاد می‌کند. عملیات انقلابی در الگوریتم رقابت استعماری با عملکرد جهش در الگوریتم ژنتیک قابل مقایسه است که اکتشاف را افزایش می‌دهد و از همگرایی جواب‌ها و گیر کردن در نقاط بهینه محلی جلوگیری می‌کند.

۳-۲-۵-۳ مبادله مواضع یک مستعمره و یک امپریالیست

هنگامی که عملیات جذب و انقلاب بر روی مستعمرات یک امپراتوری انجام شد، هزینه همه کشورها مجدداً محاسبه می‌گردد و هزینه جدید مستعمرات با هزینه امپریالیست مقایسه می‌شود. اگر مستعمره‌ای یافت شود که هزینه آن کمتر از هزینه استعمارگر باشد، مستعمره و استعمارگر باهم تعویض می‌شود. لازم به ذکر است که اگر هیچ مستعمره‌ای که طی فرایند جذب و انقلاب موقعیت جدیدی را یافته است، با هزینه کمتر پیدا نگردد، امپریالیست موقعیت خود را از دست نمی‌دهد.

۳-۵-۲-۴ قدرت کل یک امپراتوری

قدرت یک امپراتوری بر اساس قدرت امپریالیست آن و کسری از قدرت مستعمرات آن مطابق رابطه ۳-۹ محاسبه می‌شود.

$$TC_n = cost(imp_n) + \alpha \text{ mean } \{cost(colonies \text{ of } empire_n)\} \quad (۳-۹)$$

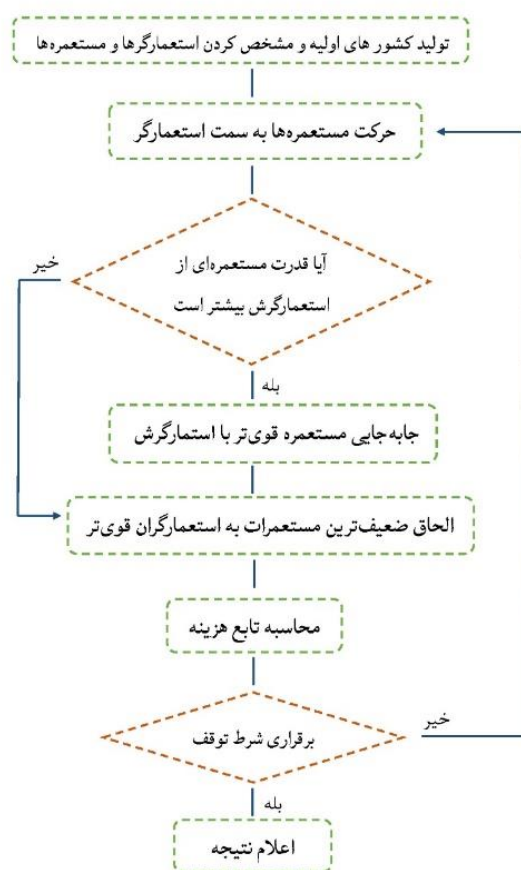
TC_n نشان‌دهنده هزینه کل امپراتوری n است و α یک عدد غیر منفی بین ۰ و ۱ است. جایی که TC_n نشان‌دهنده کل هزینه امپراتوری n است و f یک عدد غیر منفی بین ۰ و ۱ است. مقدار کمتری از α باعث می‌شود که هزینه کل یک امپراتوری به هزینه امپریالیست نزدیک‌تر باشد، درحالی‌که افزایش مقدار α تأثیرات مستعمرات امپریالیستی را در تعیین هزینه کل امپراتوری بیشتر می‌کند.

۳-۵-۲-۵ فروپاشی امپراتوری‌های ضعیف‌تر

در طی رقابت بین کشورهای استعمارگر، امپراتوری‌های ضعیف به تدریج سقوط خواهند کرد. این بدان معناست که امپراتورهای شکست‌خورده، به مرور زمان مستعمرات خود را از دست خواهند داد، درحالی‌که امپراتوری‌های قوی‌تر مستعمرات امپراتوری‌های ضعیف‌تری را در اختیار خواهند داشت، در نتیجه قدرت آن‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین، یک یا برخی از ضعیف‌ترین مستعمرات متعلق به ضعیف‌ترین امپراتوری، به یک رقابت متفاوت دیگر در بین امپراتوری‌ها منتقل می‌شود. به‌طوری‌که امپراتوری‌های قوی‌تر شانس بیشتری برای داشتن ضعیف‌ترین مستعمره را دارند. این امر باعث می‌شود به دلیل ضعف یک امپراتوری شانس مستعمرات برای رسیدن به جواب بهتر از بین نرود و کماکان امکان جستجوی آن نواحی وجود داشته باشد.

۳-۵-۲ همگرایی

مشابه سایر الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم رقابت استعماری تا زمان برآورده شدن معیارهای توقف، مانند زمان اجرای از پیش تعیین شده یا تعداد مشخص تکرار، ادامه می‌یابد. معیار توقف ایده‌آل این است که همه امپراتوری‌ها فروپاشیده باشند و فقط یک (امپراتوری بزرگ) باقی بماند. فلوچارت این الگوریتم در شکل ۳-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰ فلوچارت رقابت استعماری

۳-۵-۳ الگوریتم علف‌های هرز مهاجم

اخیراً، استفاده از الگوریتم‌های الهام گرفته شده از طبیعت به منظور حل مشکلات بهینه‌سازی توجهات

را به خود جلب کرده است. در میان این الگوریتم‌ها، علف‌های هرز مهاجم عضو جدیدی است که منشأ آن پدیده‌ای معمول در کشاورزی، یعنی استعمار علف‌های هرز مهاجم است. به‌طور کلی، تهاجم بیولوژیکی پدیده‌ای است که در آن گروه‌های افراد (مانند علف‌های هرز) به محیط‌های جدید مهاجرت می‌کنند و با جمعیت بومی رقابت می‌کنند. در حقیقت، این یک پدیده بدیع نیست، اما یکی از مهم‌ترین تأثیرات آن بر اکوسیستم‌های زمین است. همچنین، می‌تواند به‌عنوان یک چارچوب اساسی در طراحی الگوریتم‌های بهینه‌سازی مؤثر مورد استفاده قرار گیرد. اگرچه این یک روش تازه معرفی شده است، اما شاهد گسترش سریع آن در زمینه‌های مختلف هستیم. علف‌های هرز یکی از گیاهان مقاوم و مشکل‌ساز در کشاورزی است. در میان کشاورزان از قدیم گفته شده است که علف‌های هرز همیشه پیروز می‌شوند؛ این به دلیل برخی از ویژگی‌های این گیاهان مانند سازگاری، استحکام، قدرت و حمله است. علف‌های هرز با پراکنده شدن در یک سیستم (مزرعه) و اشغال فرصت‌ها که در طبیعت عواملی چون منابع غذایی هستند، به محصول حمله می‌کنند. هر علف هرز مهاجم منابع بلااستفاده مزرعه را می‌گیرد و رشد می‌کند و به‌طور مستقل علف‌های هرز جدید تولید می‌کند. تعداد علف‌های هرز جدید تولیدشده توسط هر علف هرز مولد، تناسب با برتری و قدرت آن در کلنی است. آن دسته از علف‌های هرز که همگام‌سازی بهتری با محیط‌زیست داشته و منابع بلااستفاده بیشتری را تحت تصرف خود می‌گیرند، سریع‌تر رشد می‌کنند و طبیعتاً بذر بیشتری تولید می‌کنند. علف‌های هرز جدید تولیدشده به‌طور تصادفی در مزارع پخش شده و به علف‌های هرز شکوفا تبدیل می‌شوند. این روند تا رسیدن به بیشینه تعداد علف‌های هرز در مزرعه به دلیل منابع محدود ادامه دارد. اکنون، تنها علف‌های هرز با ویژگی‌های برتر نسبت به هم‌نوعان خود بهتر می‌توانند زنده بمانند و علف‌های هرز جدید تولید کنند. این مسابقه رقابتی بین علف‌های هرز باعث می‌شود که آن‌ها در طول زمان به‌خوبی سازگار شده و بهبود یابد. برای این اساس، یک الگوریتم جدید بهینه‌سازی تصادفی عددی به نام علف‌های هرز مهاجم توسط مهربان و لوکاس (۲۰۰۶) ارائه شده است که بر اساس انتخاب طبیعی در جهان بیولوژیکی در

کنار نحوه رشد و تکثیر علف‌های هرز است.

یکی از ویژگی‌های مهم این روش که باعث برتری این روش به سایر روش‌های بهینه‌سازی تصادفی می‌شود این است که به همه عوامل که به‌عنوان علف شناخته می‌شوند اجازه می‌دهد در فرآیند تولیدمثل شرکت کنند؛ اما گیاهان برتر دانه‌های بیشتری نسبت به گیاهان ضعیف‌تر تولید می‌کنند که این امر موجب نوعی همگرایی در روند الگوریتم می‌شود. بعلاوه، ممکن است برخی از گیاهان با ویژگی‌های ضعیف‌تر، اطلاعات مفیدتری را در مقایسه با گیاهان مناسب‌تر داشته باشند که این الگوریتم با اجازه دادن به تولیدمثل و بررسی بذر آن‌ها کمترین احتمالات را هم دریافتن پاسخ مناسب در نظر می‌گیرد.

ویژگی مهم دیگر این است که علف‌های هرز بدون جفت‌گیری تولید مثل می‌کنند و هر علف هرز می‌تواند به طور مستقل بذر جدید تولید کند. این خاصیت ویژگی جدیدی را به الگوریتم اضافه می‌کند که ممکن است در طول فرآیند بهینه‌سازی، هر عضو ویژگی‌های متفاوتی داشته باشد؛ بنابراین، می‌توان تعداد متغیرها را به‌عنوان یکی از پارامترهای بهینه‌سازی در این الگوریتم انتخاب کرد. در ادامه به‌طور مختصر به مراحل این الگوریتم اشاره شده است [۷۸، ۷۹].

۳-۵-۳ مقداردهی اولیه

منظور از مقدار اولیه تعداد علف‌هایی است که برای اولین بار به یک سیستم حمله کرده و در آن پراکنده می‌شوند. جمعیتی از علف‌های هرز اولیه، هرکدام نشان‌دهنده یک راه‌حل آزمایشی از مسئله بهینه‌سازی موجود است، که به‌صورت تصادفی و یکنواخت در منطقه موردنظر پخش می‌شوند. همانطور که در معادله ۳-۱۰ مشخص است هر علف هرز که با W نشان داده شده است دارای m ویژگی متمایز است که تعیین‌کننده برتری آن علف نسبت به سایرین در سیستم است.

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$$

(۱۰-۳)

۳-۳-۵-۲ تولیدمثل

پس از پخش شدن دسته اول علف‌ها، هر عضو از جمعیت مجاز به تولید تعداد مشخصی بذر، بسته به قدرت و برتری خودش در کلونی دارد؛ به‌طوری‌که هرچه علف مولد در کلونی خود برتر باشد، اجازه دارد تعداد بذر بیشتری تولید کند. به این ترتیب که تعداد بذر تولیدشده توسط علف‌های هرز به‌طور خطی از کمترین بذر ممکن برای ضعیف‌ترین علف، به بیشینه تعداد دانه برای گیاه با بهترین قدرت در کلونی افزایش می‌یابد (که بیشترین قدرت مربوط به پاسخی است که منجر به کمترین مقدار تابع هزینه برای یک مسئله گردد). هدف این کار شبیه‌سازی بقای طبیعی بهترین عضو است.

۳-۳-۵-۳ توزیع فضایی

بذرهای تولیدشده به‌طور تصادفی در فضای جستجوی d بعدی توسط اعداد تصادفی که به‌طور نرمال توزیع شده‌اند و میانگین آن‌ها برابر صفر است پخش می‌شوند؛ اما پارامتر واریانس نسبت به تعداد تکرار متغیر بوده و با افزایش دفعات تکرار، کاهش می‌یابد. دلیل این امر، تضمین تولید بذرهای تولیدشده با فاصله مناسب در اطراف علف مولد است. این کاهش غیر خطی منجر به گروه‌بندی گیاهان مناسب‌تر در کنار هم می‌شود و گیاهان نامناسب باگذشت زمان از بین می‌روند.

معادله ۳-۱۱ میزان انحراف را نسبت به تعداد دفعات یا همان تکرارها تعیین می‌کند. هرچه الگوریتم بیشتر تکرار شود انحراف مجاز کمتر شده و نتیجه این اتفاق به‌وجود آمدن نوعی همگرایی در جواب هاست.

$$\sigma_{iter} = \frac{(iter_{max} - iter)^n}{(iter_{max})^n} (\sigma_{initial} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (۱۱-۳)$$

انحراف معیار (σ) تابع تصادفی برای کاهش میزان انحراف در هر مرحله است و از یک مقدار

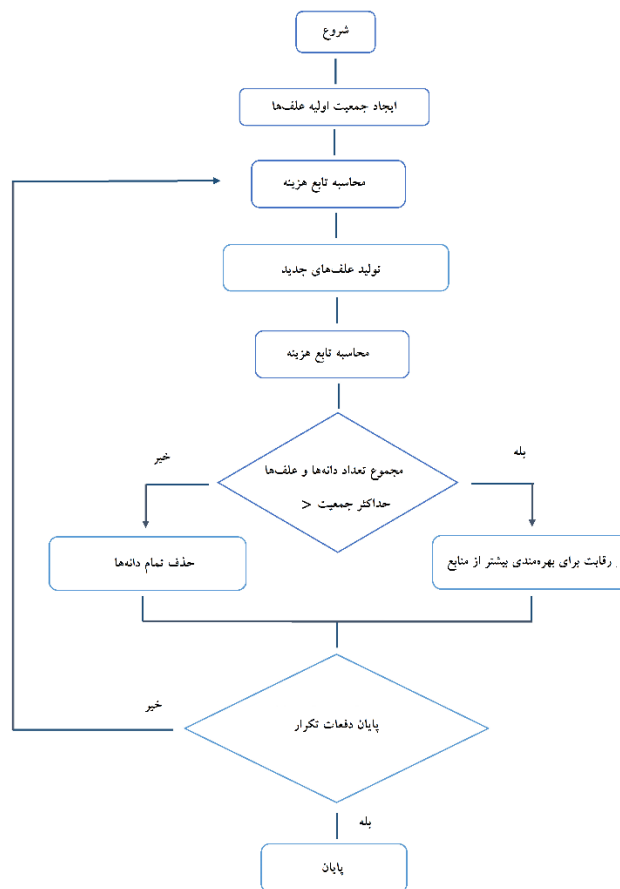
اولیه $\sigma_{initial}$ ، به مقدار نهایی σ_{final} تغییر می‌کند. جایی که $iter_{max}$ بیشینه تعداد تکرار است ، σ_{iter} انحراف در مرحله زمانی و n شاخص تبدیل غیرخطی است که معمولاً برابر با ۲ تنظیم می‌شود.

۳-۵-۴ محرومیت رقابتی

پس از گذراندن چندین مرحله، به دلیل تولید مثل سریع، تعداد گیاهان تولیدشده در یک کلنی به بیشینه می‌رسد. در این مرحله، یک رقابتی میان گیاهان آغاز می‌شود. هدف از این رقابت از بین بردن گیاهان نامطلوب و ضعیف و اجازه‌دادن به گیاهان مناسب‌تر برای تولیدمثل بیشتر است. این فرآیند تا رسیدن به بیشینه تکرارها یا برخی از معیارهای توقف ادامه می‌یابد و گیاه برتر که موفق به بقا شدند به‌عنوان راه حل مطلوب انتخاب می‌شود. مراحل این الگوریتم در شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است.

۳-۶ جمع بندی

در این فصل با الگوریتم‌های تپه‌نوردی و فازی که باهدف پیدا کردن نقطه توان بیشینه استفاده شده‌اند آشنا شدیم. در ادامه سه الگوریتم فراابتکاری ژنتیک، رقابت استعماری و علف‌های هرز مهاجم ارائه شد که پارامترهای کنترل‌کننده فازی را بهینه خواهند کرد.



شکل ۳-۱۱ فلوجارت الگوریتم علف‌های هرز مهاجم

فصل ۴: طراحی کنترل کننده

۴-۱ مقدمه

پس از معرفی کامل سیستم و اجزای آن و ایجاد مدل شبیه‌ساز رفتار پنل، به طراحی و ایجاد کنترل‌کننده در محیط متلب پرداخته شده است. در این فصل دو آزمایش باهدف ایجاد بهترین کنترل‌کننده فازی انجام شده است. در آزمون اول، با هدف انتخاب بهترین نوع سیستم فازی و بررسی تاثیر تعداد توابع عضویت بر دقت کنترل‌کننده فازی، سوگنو ۹ و ۲۵ قاعده و ممدانی ۹ و ۲۵ قاعده ایجاد می‌شود که در آغاز، قدرت کنترل سیستم را ندارند. سپس سیستم‌های فازی توسط الگوریتم ژنتیک بهینه می‌شود. در آزمایش دوم، برترین کنترل‌کننده از آزمون قبل توسط الگوریتم‌های رقابت استعماری، علف‌های هرز مهاجم و ژنتیک بهینه‌سازی شده و نتایج مقایسه می‌گردد. همچنین به‌منظور مقایسه روش‌های کلاسیک و هوشمند کنترل، نتایج کنترل‌کننده‌های فازی با روش تپه نوردی نیز مقایسه گردیده است. در این بخش، آزمون اول بررسی می‌شود و سیستم فازی برای آزمون دوم آماده می‌گردد.

۴-۲ بررسی نوع سیستم و تعداد توابع عضویت ورودی

باهدف مقایسه و انتخاب یکی از دو نوع سیستم فازی ممدانی و سوگینو، دو دسته کنترل‌کننده فازی اولیه ایجاد می‌گردد. همچنین برای بررسی میزان تاثیر توابع عضویت بر دقت خروجی، کنترل‌کننده‌ها با ۳ و ۵ توابع عضویت ورودی ایجاد گردید. بنابراین چهار کنترل‌کننده فازی را بایکدیگر مقایسه می‌کنیم که دو نوع از آن‌ها ممدانی با ۹ (M9) و ۲۵ (M25) قاعده و دو نوع دیگر سوگنو با ۹ (S9) و ۲۵ (S25) قاعده هستند.

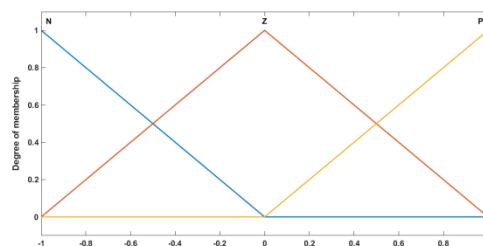
۱-۲-۴ توابع عضویت ورودی

ورودی‌ها به صورت تغییرات ولتاژ (ΔV) و تغییرات توان (ΔP) که در بازه‌های منظم نمونه‌برداری می‌شوند، تعریف شده‌اند. که در رابطه ۱-۴ و ۲-۴ نشان داده شده‌اند:

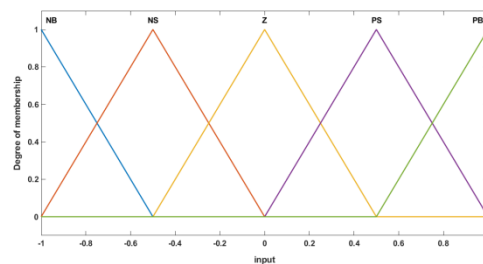
$$\Delta V = V(t) - V(t - 1) \quad (1-4)$$

$$\Delta P = P(t) - P(t - 1) \quad (2-4)$$

از آنجایی که بخش ورودی دو کنترل‌کننده ممدانی و سوگنو باهم تفاوتی ندارند، توابع عضویت ورودی زیر برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. برای کنترل‌کننده‌های ۹ قاعده، دو ورودی با توابع عضویت شکل ۱-۴ و برای ۲۵ قاعده، دو ورودی با توابع شکل ۲-۴ ایجاد شده‌اند.



شکل ۱-۴ توابع عضویت ورودی‌های فازی ۹ قاعده



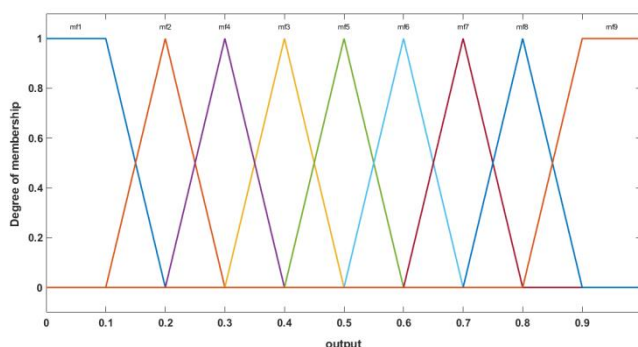
شکل ۲-۴ توابع عضویت ورودی‌های فازی ۲۵ قاعده

۲-۲-۴-۲-۴ توابع عضویت خروجی

در قسمت خروجی و غیرفازی‌ساز، این دو کنترل‌کننده باهم متفاوت هستند. اما هر دو در بازه ۰ و ۱ می‌باشند.

۱-۲-۲-۴-۴ توابع عضویت خروجی سیستم فازی ممدانی

در فازی نوع ممدانی توابع عضویت به شکل مجموعه‌های فازی قابل‌تعریف است. بنابراین توابع عضویت خروجی در شکل ۳-۴ تعریف شده‌اند و برای کنترل‌کننده‌های ۹ و ۲۵ قاعده یکسان فرض شده‌اند.



شکل ۳-۴ توابع عضویت خروجی فازی ممدانی ۹ و ۲۵ قاعده

۲-۲-۲-۴-۴ توابع عضویت خروجی سیستم فازی سوگنو

در فازی سوگنو می‌توان خروجی را به صورت چندجمله‌ای از ورودی‌ها طراحی کرد. از آنجایی که هدف از این فعالیت طراحی کنترل‌کننده در بهینه‌ترین وضعیت است، از سوگینو با مرتبه صفر استفاده شده است و در نتیجه مقادیری ثابت به عنوان توابع خروجی ایجاد شده‌اند. می‌توان گفت به تعداد قواعد هر کنترل‌کننده عددی ثابت در بازه ۰ و ۱ به شکل تصادفی در نظر گرفته شده است. هریک از این اعداد

توسط الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک اصلاح خواهد شد و مقادیر اولیه اهمیتی در نتیجه نهایی نخواهد داشت.

۴-۲-۳ پایگاه قواعد

در قدم بعد پایگاه قواعدی ایجاد می‌گردد. این بخش عموماً به شکل یک جدول نمایش داده می‌شود که به ازای هر ترکیب از ورودی‌ها یک تابع عضویت خروجی مشخص شده است.

۴-۲-۳-۱ پایگاه قواعد سیستم فازی ممدانی

در سیستم ممدانی مقادیر خانه‌های جدول توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین می‌شود. اعداد صحیح بین ۱ تا ۹ که هر یک نشانگر یکی از توابع عضویت هستند، برای هر خانه مشخص می‌گردد. به این ترتیب ارتباط میان هر ترکیب ممکن از ورودی‌ها با یک عضو خروجی برقرار خواهد شد.

۴-۲-۳-۲ پایگاه قواعد سیستم فازی سوگنو

برخلاف ممدانی، در این سیستم به هر ترکیب از ورودی (هر خانه‌ی جدول) یک تابع عضویت خروجی اختصاص می‌یابد و الگوریتم بهینه‌سازی یک مقدار بین ۰ و ۱ برای هر تابع عضویت خروجی مشخص می‌کند.

۴-۲-۴ ضرایب ورودی

ضرایب ورودی که دو پارامتر بسیار مهم برای عملکرد صحیح کنترل‌کننده می‌باشند نیز توسط الگوریتم بهینه‌سازی تعیین می‌گردند. بازه‌ای که برای این دو ضریب در نظر گرفته شده است ۰ تا ۲۰۰ می‌باشد که به صورت سعی و خطا و شناخت نسبی از بازه تغییرات ورودی بدست آمده است. باید

توجه داشت که بازه طوری تعیین گردد که پس از انجام عملیات ضرب، مقادیر حاصل فاصله زیادی از بازه توابع عضویت ورودی نداشته باشند.

۴-۲-۵ الگوریتم بهینه سازی ژنتیک

الگوریتمی که در این بخش انتخاب گردید، الگوریتم استاندارد نرم افزار متلب با جمعیت ۱۵۰ و تعداد نسل ۴۰ است. تابع هزینه در رابطه ۴-۳ ارائه شده است.

$$cost = \frac{1}{p} \times 100 \quad (4-3)$$

بنابراین معیار انتخاب کنترل کننده ی برتر، دستیابی به توان بیشتر با بازه نوسانات کمتر است. همچنین باتوجه به هدف پژوهش که حداقل سازی پارامترهای طراحی است، سادگی کنترل کننده نیز باید مدنظر قرار بگیرد.

۴-۲-۶ نتایج

پایگاه قواعد فازی و ضرایب ورودی به کمک الگوریتم ژنتیک بهینه سازی شدند و نتیجه آن در جدول های ۴-۱ تا ۴-۵ ارائه گردید. همچنین توان منتقل شده به بار تحت تابش متغیر (به ترتیب ۸۰۰ در بازه اول، ۵۰۰ در بازه دوم، ۱۰۰۰ در بازه سوم، ۹۰۰ در بازه چهارم، ۶۰۰ در بازه پنجم بر حسب وات بر مترمربع) نیز در شکل ۴-۴ مقایسه شده است.

براساس نتایج موجود در شکل ۴-۴، ضعیف ترین عملکرد متعلق به M25 است. این کنترل کننده علاوه بر عدم توانایی در کنترل نوسانات، سرعت کافی در یافتن نقطه بهینه را نیز نداشته است. به دلیل پیچیدگی و تعداد پارامترهای بیشتر کنترل کننده S25 نسبت به سایر روش ها، عملکرد بهتری انتظار می رفت اما در بازه ی اول ضعف این کنترل کننده به وضوح قابل مشاهده است. در بازه دوم دقت کنترل کننده های S25 و M9 برابر هستند؛ به طوری که نمودار مربوط به آن ها برهم منطبق است.

در بازه سوم بیشترین توان توسط کنترل کننده M9 به دست آمده است. در دو بازه نهایی، توان منتقل شده توسط M9 و S25 مقدار برابری است، اما کنترل کننده نوع سوگینو سریع تر نقطه بیشینه توان را تشخیص داده و در آن قرار گرفته است؛ بنابراین بهترین عملکرد متعلق به S25 و M9 است و به دلیل سادگی کنترل کننده نوع ممدانی این کنترل کننده در ادامه مورد استفاده و بهینه سازی بیشتر قرار گرفته است.

جدول ۴-۱ جدول قواعد فازی ممدانی ۹ قاعده بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک

E CE	N	Z	P
N	Mf6	Mf2	Mf3
Z	Mf2	Mf5	Mf1
P	Mf1	Mf1	Mf4

جدول ۴-۲ جدول قواعد فازی ممدانی ۲۵ قاعده بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک

E CE	NB	NS	Z	PS	PB
NB	Mf6	Mf6	Mf6	Mf6	Mf6
NS	Mf4	Mf7	Mf4	Mf1	Mf1
Z	Mf7	Mf8	Mf1	Mf4	Mf3
PS	Mf4	Mf4	Mf1	Mf1	Mf2
PB	Mf9	Mf2	Mf5	Mf1	Mf8

جدول ۴-۳ جدول قواعد فازی سوگینو ۹ قاعده بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک

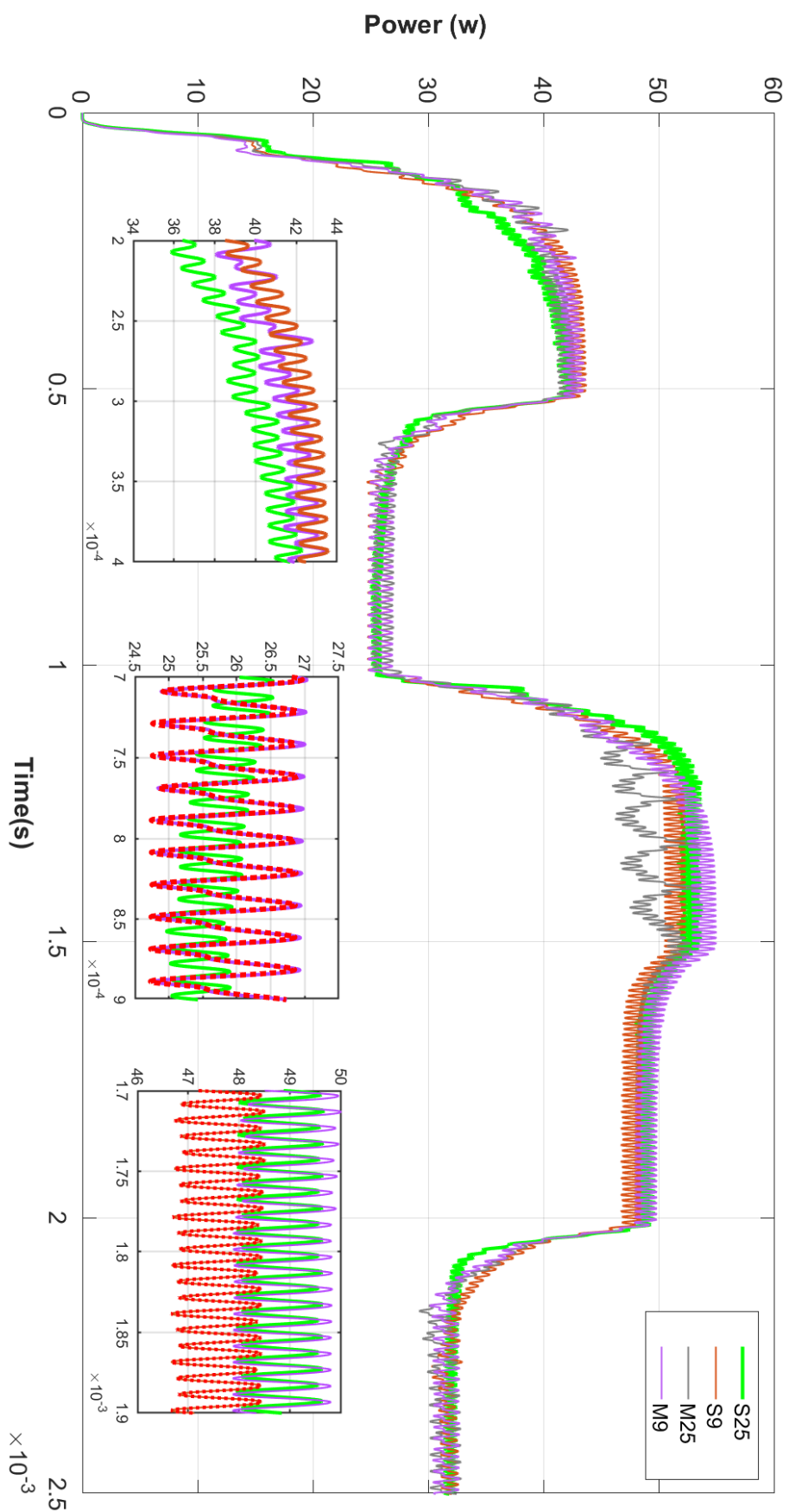
E CE	N	Z	P
N	0.57	0.42	0.03
Z	0.69	0.6	0.18
P	0.78	0.01	0.28

جدول ۴-۱ جدول قواعد فازی سوگنو ۲۵ قاعده بهینه شده توسط الگوریتم ژنتیک

E CE	NB	NS	Z	PS	PB
NB	0.46	0.51	0.76	0.35	0.2
NS	0.48	0.75	0.43	0.91	0.88
Z	0.78	0.19	0.11	0.33	0.74
PS	0.84	0.15	0.008	0.06	0.91
PB	0.65	0.41	0.05	0.08	0.16

جدول ۴-۵ ضرایب ورودی‌های فازی بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک K2

<i>K1</i>		
<i>M25</i>	5.5	34.8
<i>M9</i>	146.85	48.86
<i>S25</i>	38.67	149.23
<i>S9</i>	178.81	35.75



شکل ۴-۱ توان خروجی سوگنو و ممدانی با ۹ و ۲۵ قاعده تحت تابش های ۸۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۹۰۰، ۶۰۰ وات بر مترمربع

در ادامه کنترل کننده فازی ممدانی با ۹ قاعده با الگوریتم های بهینه سازی دیگر طراحی می گردد و نتایج مقایسه می شود.

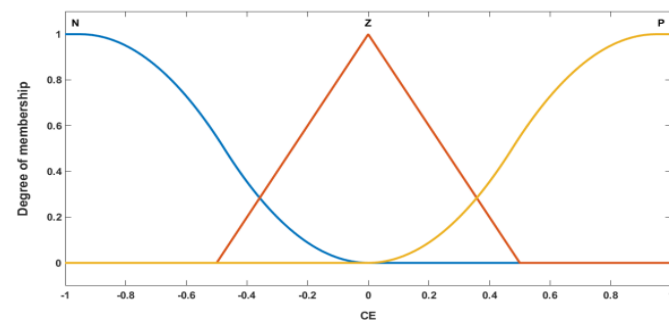
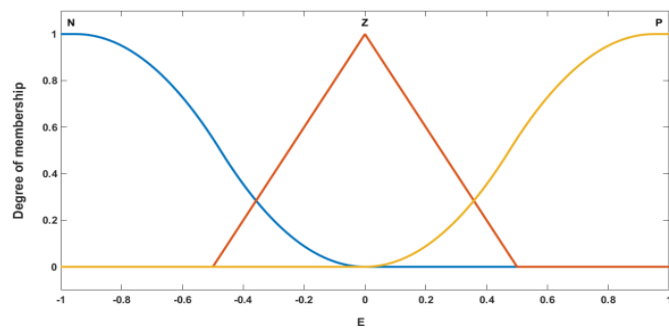
۳-۴ طراحی کنترل کننده فازی ممدانی ۹ قاعده

پس از بررسی و مقایسه سیستم های ارائه شده در بخش قبل، با مدنظر قراردادن نتایج بدست آمده اقدام به طراحی کنترل کننده فازی جهت اعمال به الگوریتم های فراابتکاری می گردد. این کنترل کننده از نوع ممدانی با دو ورودی برابر با شیب نمودار ولتاژ-توان و تغییرات آن است که در رابطه ۴-۴ و ۵-۴ بیان شده اند.

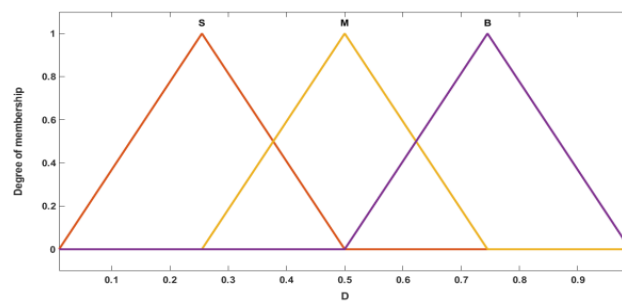
$$E = \frac{P(t) - P(t-1)}{V(t) - V(t-1)} \quad (4-4)$$

$$CE = E(t) - E(t-1) \quad (5-4)$$

با نگاهی دوباره به مشخصه توان می توان دریافت که در فضاهای دور از قله، شیب نمودار در هر دو طرف ثابت است؛ درحالی که با نزدیک شدن به قله شیب تغییر کرده و به صفر نزدیک می شود. با درنظر گرفتن این رفتار، توابع عضویت را مطابق شکل ۵-۴ تعریف می شود. توابع عضویت خروجی نیز در شکل ۶-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۵ توابع عضویت مربوط به متغیرهای ورودی



شکل ۴-۶ توابع عضویت مربوط به متغیرهای خروجی

فصل ۵ نتایج بهینه‌سازی سیستم فازی ممدانی، قاعده

۵-۱-۱ جدول قواعد فازی و ضرایب ورودی

پس از اتمام مراحل بهینه‌سازی، جدول‌های قواعد مطابق زیر ایجاد گردید. جدول ۵-۱ مربوط به بهینه‌سازی با الگوریتم‌های ژنتیک (Fuzzy-GA) و رقابت استعماری (Fuzzy-ICA) است که نشان می‌دهد هر دو الگوریتم به نتایج مشابهی است یافته‌اند، ولی جدول ۵-۲ قواعدی که الگوریتم علف‌های هرز مهاجم (Fuzzy-IWO) به آن دست‌یافته است. در جدول ۵-۳ ضرایب ورودی تعیین‌شده برای هر کنترل‌کننده آورده‌شده است که اعداد به هم نزدیک هستند، اما باهم تفاوت دارند.

جدول ۵-۱ جدول قواعد فازی بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک و رقابت استعماری

E CE	N	Z	P
N	M	S	S
Z	S	M	B
P	B	M	M

جدول ۵-۲ جدول قواعد فازی بهینه‌شده توسط الگوریتم علف‌های هرز مهاجم

E CE	N	Z	P
N	M	B	M
Z	B	M	B
P	B	M	B

جدول ۳-۵ ضرایب بهینه شده ورودی کنترل کننده فازی

	<i>K1</i>	<i>K2</i>
<i>Fuzzy-GA</i>	0.4	90
<i>Fuzzy-ICA</i>	0.7	100
<i>Fuzzy-IWO</i>	0.15	70

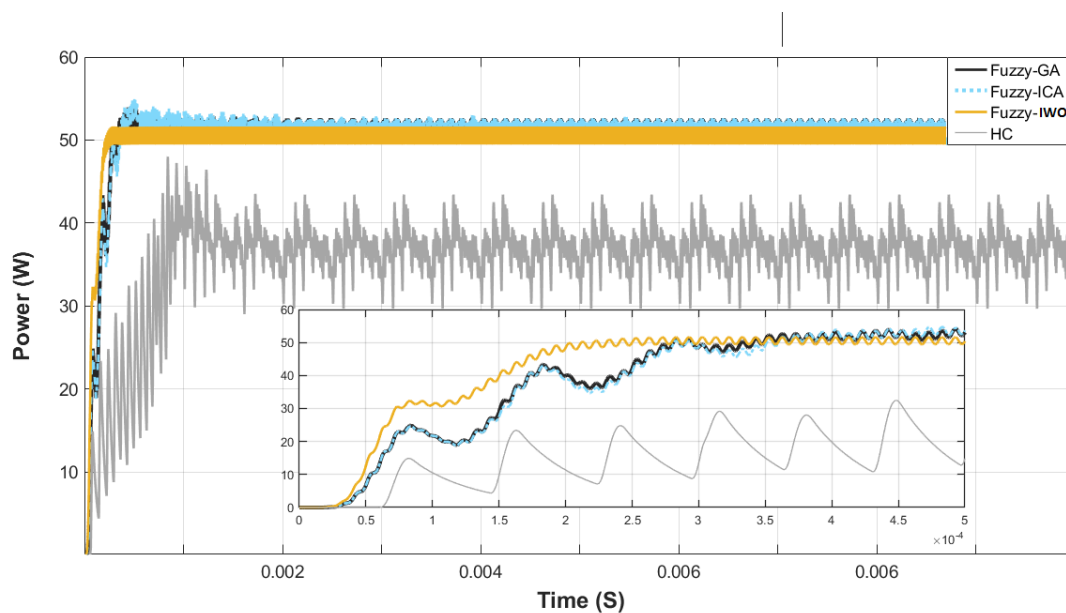
به عنوان مثال، در مورد استفاده از کنترل کننده Fuzzy-IWO، که قواعد آن در جدول ۲-۵ است، اگر ورودی های کنترل کننده به تابع عضویت N تعلق داشته باشند، تابع عضویت خروجی M به دست می آید. برای سیگنال های ورودی مثبت که نقطه ای با شیب مثبت روی نمودار ولتاژ-توان را نشان می دهند، تابع عضویت خروجی به تابع عضویت M تعلق دارد. همانطور که در فصل ۲ اشاره شد، اگر شیب نمودار منفی باشد، ولتاژ باید کاهش می یابد و اگر شیب مثبت باشد، ولتاژ باید افزایش یابد که به ترتیب به صورت کاهش و افزایش در مقدار چرخه کاری ایجاد می گردد.

۲-۱-۵ مقایسه خروجی سیستم در شرایط پایدار و متغیر

۱-۲-۱-۵ مقایسه خروجی در شرایط پایدار دما و تابش

شکل ۱-۵ توان خروجی سیستم را تحت تابش $900 \frac{W}{m^2}$ و دمای $30^\circ C$ نشان می دهد. در این حالت، توان خروجی سیستم با کنترل کننده Fuzzy-GA و Fuzzy-ICA تقریباً یکسان است. در ابتدا، کنترل کننده Fuzzy-IWO عملکرد خوبی در رسیدن به حالت پایدار از خود نشان می دهد در حالی که دو کنترل کننده فازی دیگر قادر به جلوگیری از بالازدگی در لحظات اولیه نیستند؛ اما هر دو کنترل کننده

Fuzzy-GA و Fuzzy-ICA می‌توانند توان بیشتری نسبت به روش Fuzzy-IWO و Hill-Climbing به دست آورند. با این حال، الگوریتم Hill-Climbing علاوه بر نوسانات بیشتر و سرعت کمتر در رسیدن به وضعیتی مانا، توان کمتری را به بار منتقل می‌کند و نمی‌تواند نقطه بهینه را پیدا کند. این نتایج به وضوح نشان‌دهنده برتری کامل کنترل‌کننده‌های فازی نسبت به Hill-Climbing است؛ بنابراین، از این پس، تمرکز بحث بر روی الگوریتم‌های مبتنی بر فازی خواهد بود.



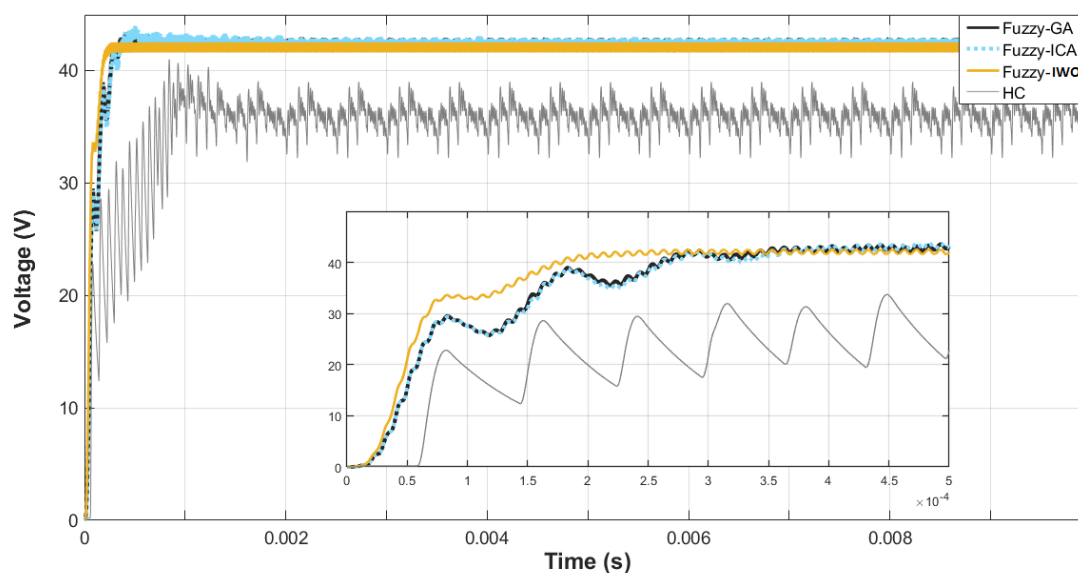
شکل ۵-۱ توان خروجی در دما ۳۲ درجه سانتیگراد و تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع

زمانی که برای رسیدن هر الگوریتم به حالت ثابت طول کشید در جدول ۵-۴ آورده شده است. همان طور که در این جدول نشان داده شده است، کنترل‌کننده Fuzzy-IWO سریع‌تر پاسخ می‌دهد و کنترل‌کننده‌های Fuzzy-ICA و Fuzzy-GA زمان برابری را برای رسیدن به این وضعیت سپری کردند.

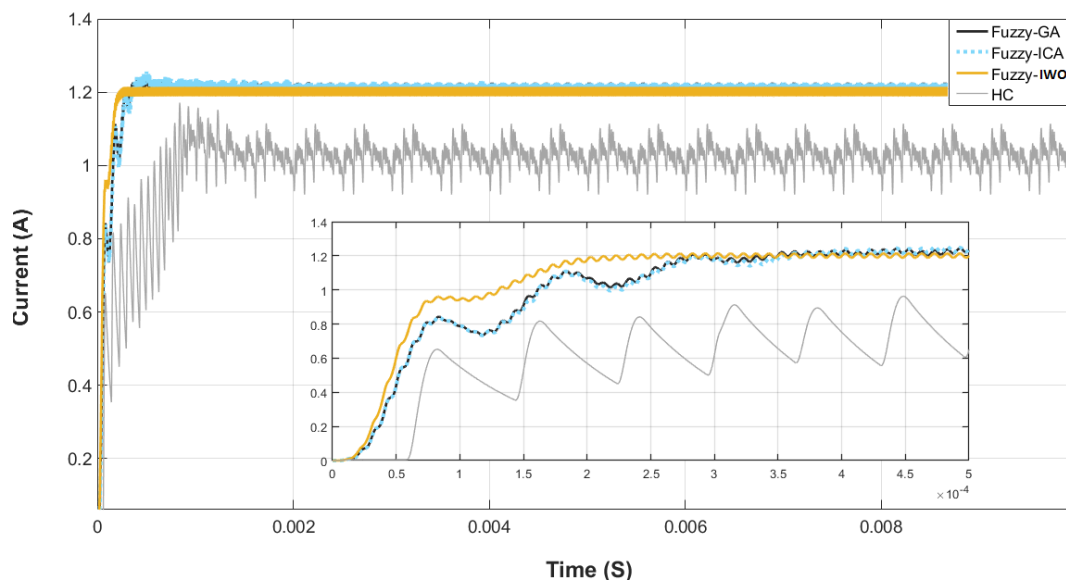
جدول ۵-۴ زمان رسیدن به حالت مانا در تابش ۹۰۰ وات بر متر مربع و دما ۳۰ درجه سانتیگراد

توان	ولتاژ	جریان	زمان رسیدن به وضعیت مانا (ms)
0.35	0.35	0.35	<i>Fuzzy-GA</i>
0.35	0.35	0.35	<i>Fuzzy-ICA</i>
0.21	0.2	0.21	<i>Fuzzy-IWO</i>

شکل ۵-۲ مربوط به ولتاژ خروجی و روند تغییرات آن است. نمودار جریان خروجی نیز در شکل ۵-۳ نمایش داده شده است. روند تغییرات ولتاژ و جریان از ابتدا تا رسیدن به حالت پایدار و پس از آن، همانند نتایج توان در شکل ۵-۱ است که برتری کنترل کننده Fuzzy-IWO در دستیابی به حالت پایدار را نشان می‌دهند. علاوه بر این، کنترل کننده‌های Fuzzy-GA و Fuzzy-ICA در انتقال ولتاژ و جریان بیشتر به بار موفقیت‌تر عمل کرده‌اند.



شکل ۵-۲ ولتاژ خروجی در دما ۳۲ درجه سانتیگراد و تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع

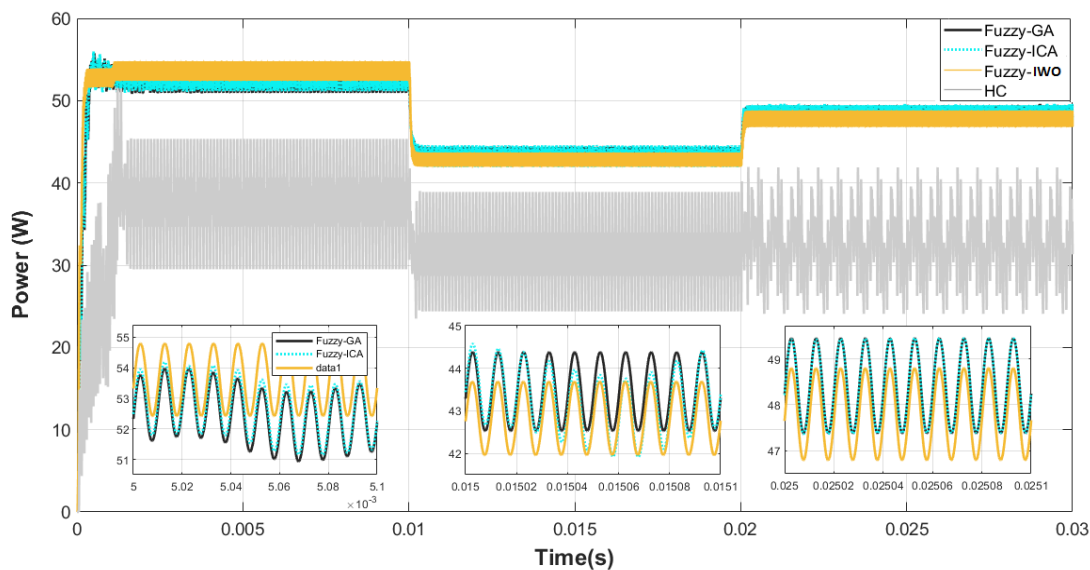


شکل ۳-۵ جریان خروجی در دما ۳۲ درجه سانتیگراد و تابش ۱۰۰۰ وات بر مترمربع

با توجه به نتایج و تشابه خروجی‌های به‌دست‌آمده، آشکار است که حتی با ساده‌سازی که شامل کاهش قوانین از ۲۵ به ۹ و توابع عضویت در خروجی از ۵ و ۹، به ۳ است، کنترل‌کننده پیشنهادی می‌تواند به‌درستی کار کنند که این موضوع قدرت کنترل‌کننده‌های فازی پیشنهادی را نشان می‌دهد، اما واضح است که با توابع عضویت بیشتر، دستورات دقیق‌تری اعمال خواهد شد، اما در راستای هدف این بررسی (که ارائه کنترل‌کننده‌ای است که علاوه بر دقت لازم تا حد امکان ساده‌شده باشد) نتیجه‌ای مطلوب است [۸۰، ۸۱].

۵-۱-۲-۲ تابش متغیر

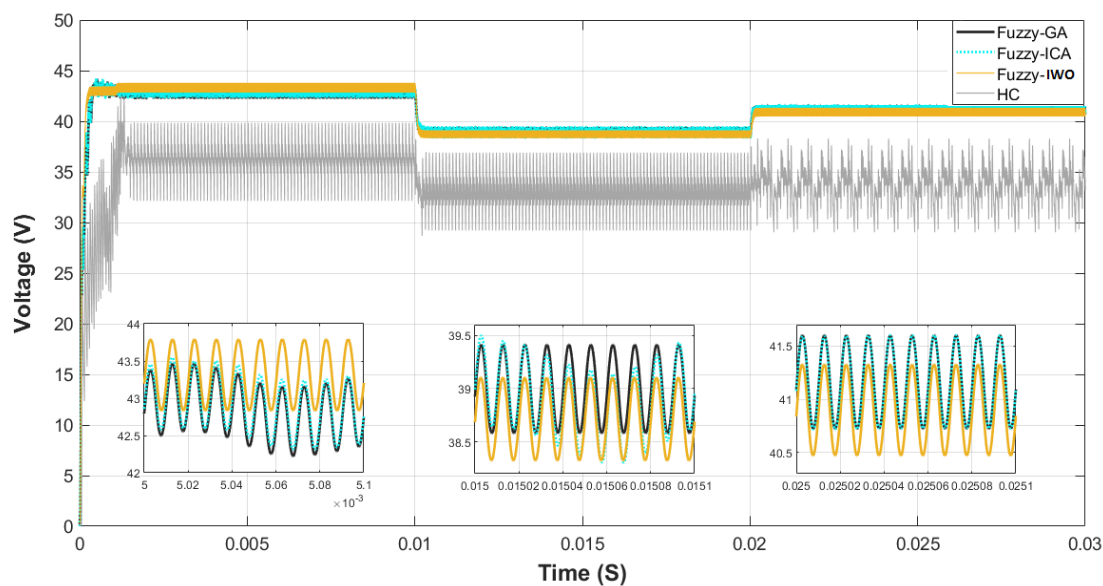
باهداف ایجاد شرایطی مشابه محیط پیرامون یک پنل، در این بخش میزان تابش دریافتی پنل متغیر فرض شده است. شکل ۴-۵ نتایج توان خروجی چهار کنترل‌کننده را در شرایط متغیر بودن شدت نور خورشید بر روی صفحه نشان می‌دهد، که قدرت تغییر بازه سوئیچ‌زنی مبدل و یافتن مقادیر جدید و بهینه برای D را نشان می‌دهد.



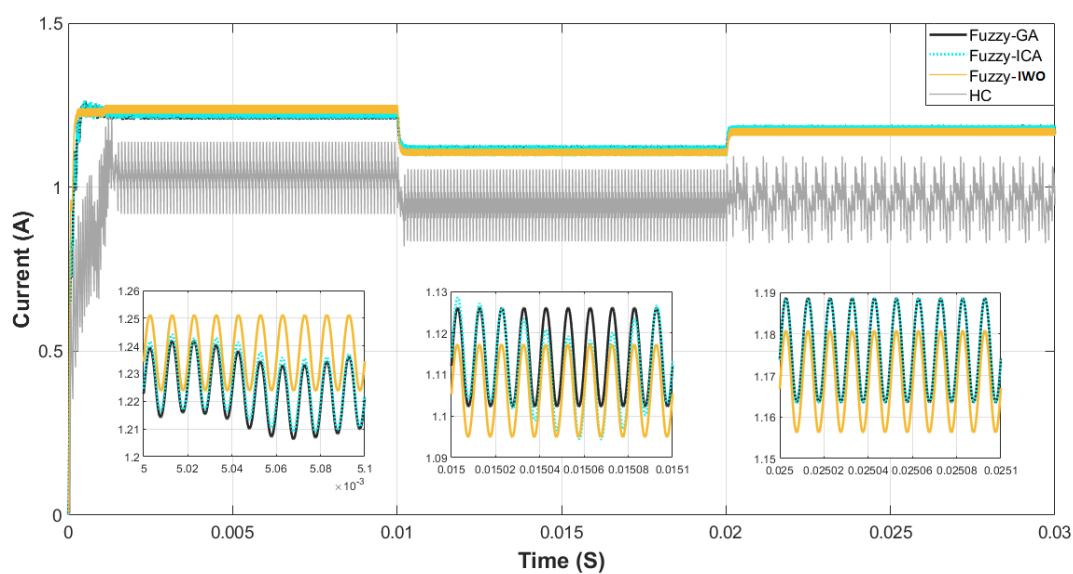
شکل ۵-۴ توان خروجی برای تابش متغیر ۱۰۰۰ (۰-۰.۰۱) ۸۰۰ (۰.۰۱-۰.۰۲) ۹۰۰ (۰.۰۲-۰.۰۳) وات بر مترمربع و دما ۳۰ درجه سانتیگراد

بر اساس خروجی‌های چهار کنترل‌کننده نشان داده‌شده، خروجی سیستم‌هایی که بر اساس منطق فازی کنترل می‌شوند، نه تنها می‌توانند نقطه توان بیشینه را پیدا کنند و در آن شرایط پایدار بمانند، بلکه می‌توانند تغییرات خارجی را نیز تشخیص دهند و سیستم را دوباره متناسب با شرایط محیطی جدید تنظیم کنند.

در دوره اول (۰ تا ۰.۰۱ ثانیه)، هنگامی که تابش معادل $1000 \frac{W}{m^2}$ است، با استفاده از کنترل‌کننده‌های Fuzzy-GA و Fuzzy-ICA، یک بالا زدگی قابل توجه وجود دارد. همچنین نوسانات با استفاده از Fuzzy-ICA و Fuzzy-GA بیشتر از Fuzzy-IWO است. وقتی تابش برابر با $800 \frac{W}{m^2}$ در بازه زمانی ۰.۰۱ تا ۰.۰۲ ثانیه باشد، Fuzzy-GA به مقدار توان بیشتری دست می‌یابد. وقتی تابش در دوره سوم $900 \frac{W}{m^2}$ باشد (۰.۰۲ تا ۰.۰۳ ثانیه)، هر دو کنترل‌کننده Fuzzy-GA و Fuzzy-ICA بالاترین توان را منتقل می‌کنند. در مورد ولتاژ و جریان منتقل‌شده، همان‌طور که در شکل ۵-۵ و ۵-۶ نشان داده‌شده است روند تغییرات شبیه توان است که قبلاً بحث شد.



شکل ۵-۱ ولتاژ خروجی برای تابش متغیر $1000 (0.01-0.01)$ $800 (0.02-0.01)$ $900 (0.03-0.02)$ وات بر مترمربع و دما 30° درجه سانتی گراد



شکل ۵-۶ جریان خروجی برای تابش متغیر $1000 (0.01-0.01)$ $800 (0.02-0.01)$ $900 (0.03-0.02)$ وات بر مترمربع و دما 30° درجه سانتی گراد

به منظور مقایسه عددی بین کنترل کننده های مبتنی بر منطق منطق فازی، جدول ۵-۵ ارائه شده است.

این جدول دامنه توان تولید شده را برای سه تابش مختلف مقایسه می کند. در تابش $800 \frac{W}{m^2}$ و $900 \frac{W}{m^2}$ ،

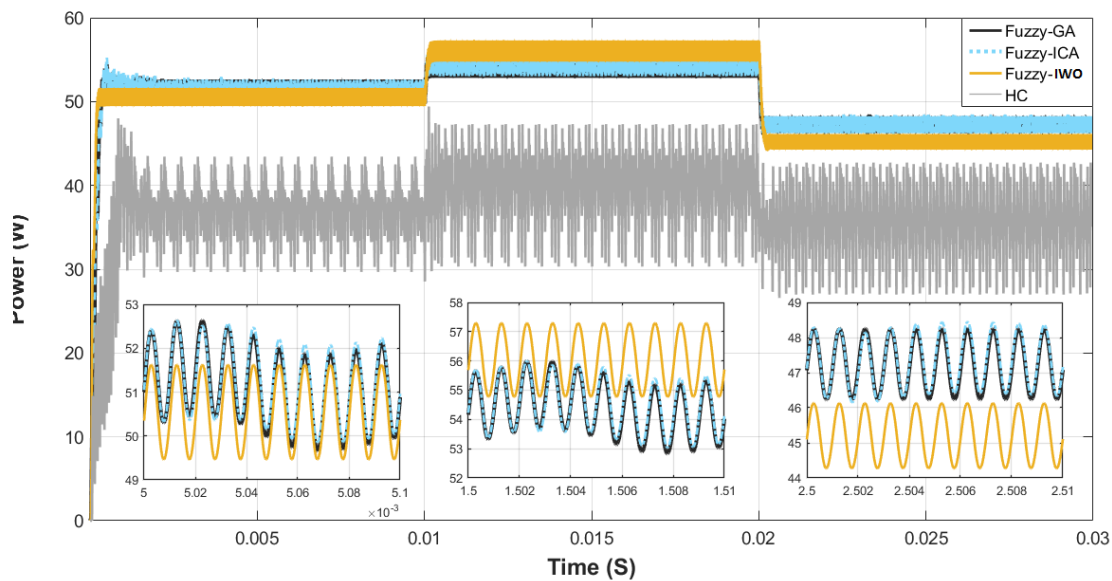
بیشینه توان با استفاده از کنترل کننده Fuzzy-ICA بیش از دیگران است؛ اما، با شدت $1000 \frac{w}{m^2}$ ، کنترل کننده Fuzzy-IWO بهتر از بقیه است. Fuzzy-GA در تابش های $800 \frac{w}{m^2}$ و Fuzzy-ICA در تابش $900 \frac{w}{m^2}$ به توان متوسط بیشتری دست می یابد. با این وجود، در تابش $1000 \frac{w}{m^2}$ ، کنترل کننده Fuzzy-IWO عملکرد بهتری دارد.

جدول ۱-۵ مقایسه عددی توان کنترل کننده های فازی در دمای ۳۰ درجه سانتی گراد و تابش متغیر

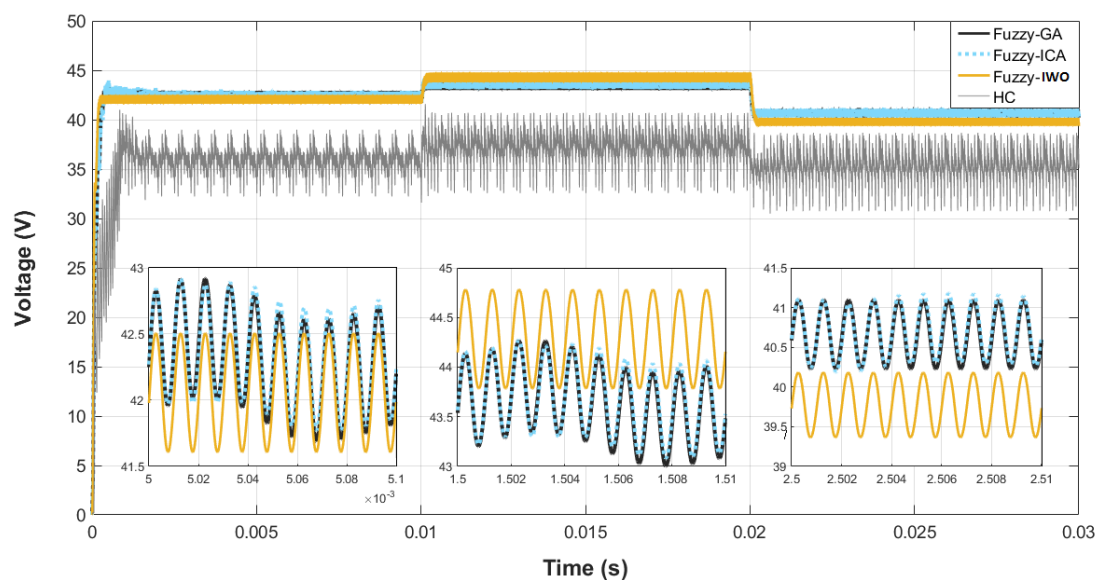
توان (w)	$800 \frac{w}{m^2}$			$900 \frac{w}{m^2}$			$1000 \frac{w}{m^2}$		
	mean	Max	Min	Mean	Max	min	mean	max	min
Fuzzy-GA	43.46	44.39	42.52	48.42	49.61	47.29	52.47	54.36	50.82
Fuzzy-ICA	43.28	44.59	41.91	48.43	49.62	47.27	52.58	54.66	51.05
Fuzzy-IWO	42.82	43.69	41.96	47.8	48.8	46.79	53.62	54.79	52.42

۵-۱-۲-۳ دمای متغیر

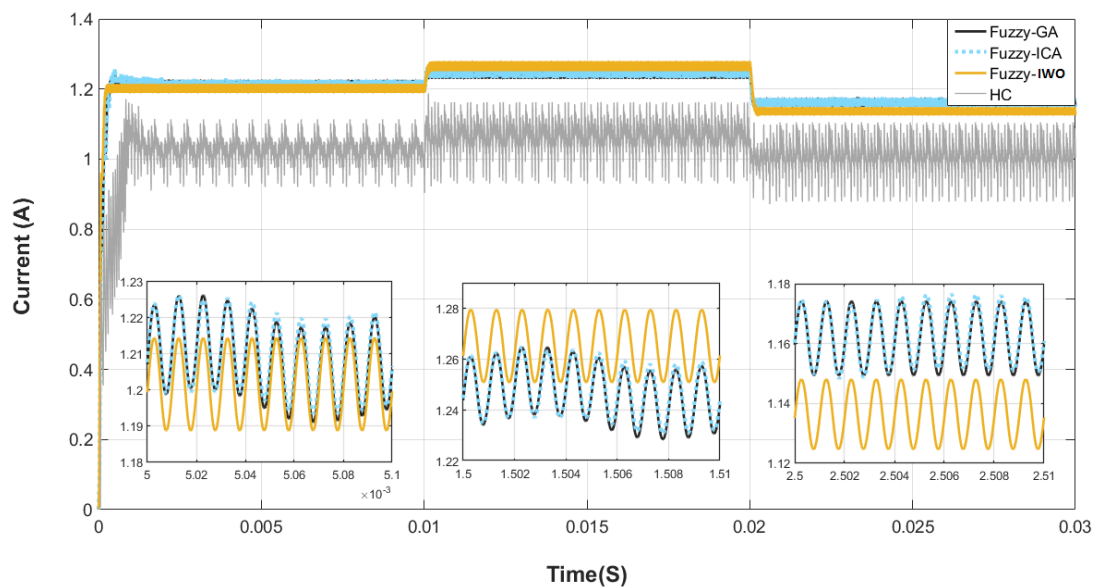
شکل های ۵-۷، ۵-۸ و ۵-۹ توان خروجی را در دماهای متغیر نشان می دهد و به وضوح، بهترین آن ها مربوط به کنترل کننده های فازی است. کنترل کننده های Fuzzy-GA و Fuzzy-ICA در بازه های اول و سوم به مقادیر بالاتری رسیده اند، اما از نظر میزان بالازدگی و پایداری، عملکرد Fuzzy-IWO عملکرد بهتری دارد اما در بازه دوم، Fuzzy-IWO به توان بیشتری دست می یابد. جدول ۵-۶ مقایسه عددی این عبارت را ارائه می دهد. در زمینه میزان نوسانات، بهترین عملکرد مربوط به سیستمی است که توسط الگوریتم Fuzzy-IWO کنترل می شود.



شکل ۵-۷ توان خروجی برای دما متغیر ۳۲ (۰-۰.۰۱) ۲۷ (۰.۰۱-۰.۰۲) ۳۷ (۰.۰۲-۰.۰۳) سانتی گراد و تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع



شکل ۵-۸ ولتاژ خروجی برای دما متغیر ۳۲ (۰-۰.۰۱) ۲۷ (۰.۰۱-۰.۰۲) ۳۷ (۰.۰۲-۰.۰۳) سانتی گراد و تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع



شکل ۵-۹ جریان خروجی برای دما متغیر ۳۲ (۰-۰.۰۱) ۲۷ (۰.۰۱-۰.۰۲) ۳۷ (۰.۰۲-۰.۰۳) سانتی‌گراد و تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع

مقادیر بیشینه، حداقل و متوسط توان انتقال یافته هر کنترل کننده در جدول ۵-۶ نشان داده شده است. واضح است که با افزایش توان سیستم، کنترل کننده Fuzzy-IWO می‌تواند در مقایسه با سایر موارد به توان بالاتری برسد. به عنوان مثال، در طول ۰.۰۲ تا ۰.۰۳ ثانیه، کنترل کننده‌های Fuzzy-ICA و Fuzzy-GA توان متوسط حدود ۴۷.۲ وات انتقال می‌دهند، در حالی که برای کنترل کننده Fuzzy-IWO توان متوسط حدود ۴۵.۲ وات بود که تفاوت آن‌ها در حدود ۲ وات است. با افزایش دما، این اختلاف حدود ۱ وات شد و سرانجام، در طول بازه سوم، توان تولید شده کنترل کننده Fuzzy-IWO به طور متوسط ۱.۵ وات بیشتر از سایر کنترل کننده‌ها است.

جدول ۵-۶ مقایسه عددی توان خروجی کنترل‌کننده‌های فازی در تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و دما متغیر

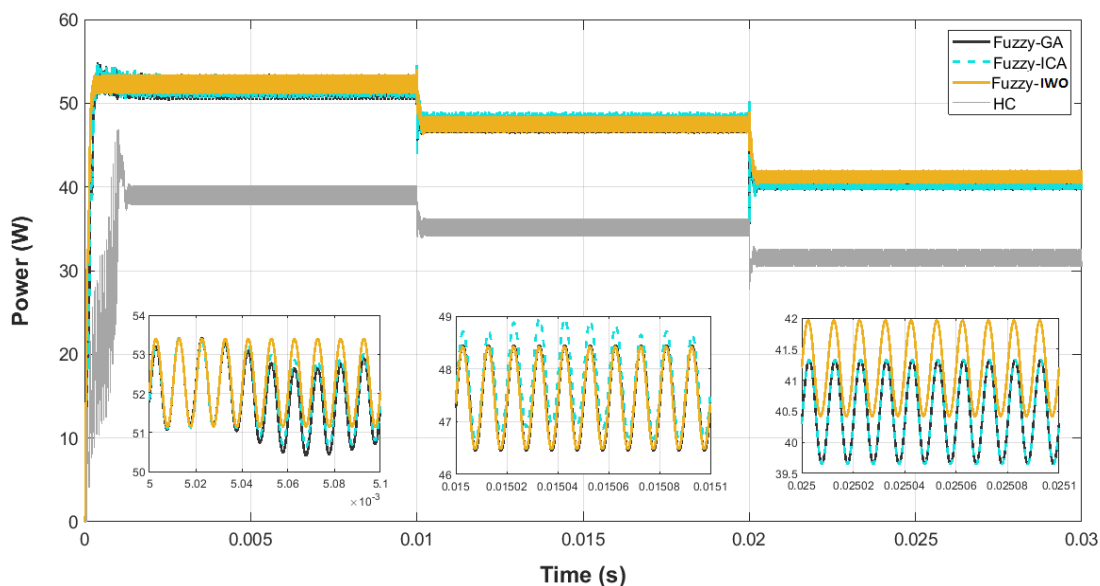
توان (W)	37°C			32°C			27°C		
	Mean	max	min	mean	Max	min	mean	max	Min
Fuzzy-GA	47.25	48.47	46.15	51.15	52.72	49.61	54.42	55.99	52.83
Fuzzy-ICA	47.27	48.47	46.15	51.25	52.99	49.77	54.51	56	53.3
Fuzzy-IWO	45.2	46.15	44.27	50.55	51.62	49.46	56.05	57.3	54.76

۵-۱-۲-۴ بار متغیر

در این بخش، رفتار کنترل‌کننده در بار متغیر مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. برای شبیه‌سازی این وضعیت، به جای مقاومت ثابت که نقش مصرف‌کننده را دارد، از یک مقاومت متغیر استفاده می‌شود. در دوره اول برابر 30 ohm (۰ تا 0.01)، در دوره دوم 40 ohm (0.01 تا 0.02) و در دوره آخر 45 ohm (0.02 تا 0.03) است. همان‌طور که در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است، هر چهار کنترل‌کننده می‌توانند تغییرات را دنبال کنند، اما همان‌طور که انتظار می‌رود، تپه‌نوردی نمی‌تواند بالاترین قدرت را داشته باشد و نوسانات بزرگ قابل‌مشاهده است. با این حال، کنترل‌کننده‌های مبتنی بر فازی رفتارهای قابل‌قبولی از خود نشان می‌دهند. توان خروجی کنترل‌کننده‌های Fuzzy-GA و Fuzzy-ICA مشابه است. با استفاده از کنترل‌کننده‌های Fuzzy-GA و Fuzzy-ICA در هر تغییر شرایط یک بالازدگی یا پایین‌زدگی وجود دارد. در حالی که، کنترل‌کننده Fuzzy-IWO این‌گونه نبوده و به اوج می‌رسد.

بر اساس داده‌های ارائه شده در شکل ۵-۱۰، به راحتی می‌توان دریافت که با افزایش مقاومت خروجی، توان کاهش یافته است. توان انتقال یافته هر کنترل‌کننده در جدول ۵-۷ است. در بار 30 اهم و 45 اهم ، کنترل‌کننده Fuzzy-IWO توان متوسط بیشتری منتقل کرده است. در بار 40 اهم ، Fuzzy-ICA به توان متوسط بیشتری رسیده است. بیشینه توان در 30 اهم ، 40 اهم و 45 اهم به ترتیب با استفاده از

کنترل کننده‌های Fuzzy-GA، Fuzzy-ICA و Fuzzy-IWO به دست آمده است.



شکل ۵-۱۰ توان خروجی برای دما متغیر ۳۰ (۰-۰.۰۱) ۴۰ (۰.۰۱-۰.۰۲) ۴۵ (۰.۰۲-۰.۰۳) اهم

جدول ۵-۷ مقایسه عددی توان خروجی کنترل کننده‌های فازی در وضعیت تغییر بار

Power(w)	30 ohm			40 ohm			45 ohm		
	mean	Max	Min	Mean	Max	min	mean	max	Min
Fuzzy-GA	51.8	53.5	50.3	47.5	48.52	46.47	40.45	41.3	39.6
Fuzzy-ICA	51.7	53.45	50.3	48	49.2	47	55.40	41.31	39.6
Fuzzy-IWO	52.2	53.3	51.1	47.44	48.4	46.48	41.2	42	40.4

۵-۲ جمع بندی

در این بررسی، دو موضوع مهم مورد بحث قرار گرفت. ابتدا یک کنترل کننده فازی طراحی شد، در نتیجه باعث کاهش زمان طراحی، کاهش پیچیدگی و به حداقل رساندن نیاز به شناخت انسان در طراحی و از همه مهم تر ایجاد یک کنترل کننده مستقل از سیستم می شود. ساده سازی بر اساس این واقعیت است که شیب نمودار P-V تقریباً از آغاز ثابت است و تنها در مجاورت قله سریع تغییر می کند. سپس، کنترل کننده فازی با سه الگوریتم فراابتکار (GA، IWO و ICA) در مقایسه با یکی از روش های کلاسیک در MPPT (الگوریتم Hill-Climbing) بهینه سازی شد. کنترل کننده Fuzzy-IWO پاسخ سریع تری به دیگران نشان می دهد. علاوه بر این، در تابش و دما متغیر، کنترل کننده Fuzzy-IWO در بالاترین توان نتایج بهتری می گیرد. عملکرد کنترل کننده های Fuzzy-GA و کنترل کننده های Fuzzy-ICA تقریباً در همه موارد مشابه هستند. به طور کلی، در بار متغیر، عملکرد کنترل کننده Fuzzy-IWO هم در سرعت پاسخ و هم در انتقال توان، بیشتر از دیگران است. این نتایج اهمیت تحقیق در مورد سایر روش ها و تغییر جهت فعالیت های تحقیق را نشان می دهد. این روش ها نه تنها در مسئله ردیابی بیشینه توان نقطه ای بلکه در زمینه های دیگر نیز قابل گسترش هستند.

فصل ۶ جمع بندی

در این بررسی به طراحی و مقایسه کنترل‌کننده‌های فازی که به کمک الگوریتم‌های فرا ابتکاری طراحی و بهینه‌سازی شده بودند، پرداخته شد. برای این کار بخش اول طراحی و پیاده‌سازی یک مدل از سیستم خورشیدی در نرم‌افزار متلب بود تا به کمک آن بتوان رفتار کنترل‌کننده‌ها را بررسی کرد. بنابراین ابتدا نحوه تبدیل انرژی در یک سلول خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت و فناوری‌هایی که امروزه در ساخت سلول‌ها به کار می‌رود با یکدیگر مقایسه شد. سپس به بررسی انواع مدل‌هایی که در مقالات به‌منظور شبیه‌سازی رفتار یک سلول خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد پرداخته شد که شامل مدل ایده‌آل تک‌دیود، دودیود و سه‌دیود بود. مدل ایده‌آل به دلیل سادگی دقت کافی و عملکرد مورد نظر را نداشت، مدل سه‌دیود نیز به دلیل دقت بالا در شبیه‌سازی پیچیدگی‌های زیادی را به همراه داشت؛ اما مدل دودیود و تک‌دیود جواب‌های قابل‌قبولی ارائه دادند که به دلیل سادگی و دقت کافی، مدل تک‌دیود در این بررسی مورد استفاده قرار گرفت. این مدل با دریافت ورودی‌های که برابر با مقادیر دما و تابش دریافتی در سطح پنل بودند، مقدار ولتاژ و جریان را تعیین می‌کردند. به‌منظور شبیه‌سازی رفتار بار نیز از یک مقاومت استفاده شده بود.

به دلیل رفتار کاملاً غیرخطی پنل و باهدف دریافت بیشینه توان در دما و تابش ثابت که با برابر کردن مقاومت بار و منبع امکان‌پذیر است، یک مبدل افزایشنده بین این‌رو قرار گرفت. هدف این مبدل تنظیم ولتاژ پنل بر مقداری بود که بیشینه توان خروجی از پنل به بار منتقل شود که همان قرارگیری در قله موجود در مشخصه $P-V$ است. در مبدل بوست با تغییر چرخه‌کاری کلید موجود در آن می‌توان ولتاژ را برابر با مقدار مورد نظر تنظیم کرد.

از آنجا که مشخصه پنل به شدت وابسته به مقدار دما و تابش است و بنابراین آنچه گفته شد، با تغییر دما و تابش باید مقدار چرخه‌کاری مجدداً تعیین گردد، یک بخش کنترلی به سیستم اضافه می‌گردد. بخش کنترل‌کننده در این سیستم وظیفه دارد به صورت هوشمند مقدار ولتاژی که منجر به تولید توان بیشینه و قرارگیری نقطه کار سیستم در قله مشخصه می‌شود را پیدا کرده و چرخه‌کاری کلید موجود

در مبدل را طوری تنظیم کند که ولتاژ بهینه به دست آید.

در این بررسی از کنترل کننده های فازی استفاده شده است و دو نوع سیستم فازی سوگینو و ممدانی باهم مقایسه شد؛ اما لازم به ذکر است که طراحی یک کنترل کننده فازی نیازمند داشتن شناخت کافی و بالا از سیستم است. به منظور حذف طراحی متخصص، تعیین پارامترهای اساسی کنترل کننده توسط الگوریتم های فرا ابتکاری صورت گرفت. الگوریتم های ژنتیک، رقابت استعماری و علف های هرز مهاجم که به طور مفصل به آن ها پرداخته شد، جدول قواعد فازی و ضرایب ورودی را تعیین کردند. جدول قواعدی که توسط الگوریتم های ژنتیک و رقابت استعماری مشخص شد کاملاً مشابه هم بودند، اما به دلیل متفاوت بودن ضرایبی که در ورودی اعمال شد، تأثیر چندانی بر توان خروجی نداشت اما میزان قدرت کنترل کننده در جلوگیری از نوسانات توان بسیار تأثیرگذار بود.

کنترل کننده ای که توسط علف های هرز مهاجم تعریف شد، هم از نظر ضرایب ورودی و همچنین جدول قواعد با دو کنترل کننده دیگر متفاوت بود. این تفاوت باعث شد این کنترل کننده برخلاف دو نوع دیگر در بازه ثابتی نوسان کند و سریع تر به وضعیت مانا برسد. همچنین به خوبی مانع رخ دادن بالازدگی لحظات اولیه و قبل از رسیدن به وضعیت پایدار در سیستم شد. در بخش های قبل اشاره شد که افزایش تابش یا کاهش دما توان خروجی سیستم افزایش می یابد. در سیستمی که این کنترل کننده اداره می کرد، با افزایش توان خروجی به دلیل نوسانات دما و تابش عملکرد کنترل کننده نسبت به دو روش دیگر بهتر می شد.

بر اساس نتایج، کنترل کننده Fuzzy_IWO دارای بهترین عملکرد در کنترل بازه نوسان خروجی سیستم، جلوگیری از بالازدگی و رسیدن به وضعیت مانا بود و با افزایش تابش و کاهش دما که توان نامی افزایش می یافت عملکرد کنترل کننده در دستیابی به میزان توان بیشتر بهتر می شد.

1. Looney, B., *Statistical Review of World Energy*, 2020. 2020, Bp.
2. Alsadi, S. and B. Alsayid, *Maximum power point tracking simulation for photovoltaic systems using perturb and observe algorithm*. 2012.
3. Ma, J., et al., *Approximate single-diode photovoltaic model for efficient IV characteristics estimation*. The Scientific World Journal, 2013. **2013**.
4. Chin, V.J., Z. Salam, and K. Ishaque, *Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review*. Applied Energy, 2015. **154**: p. 500-519.
5. Rana, K., *Mathematical Analysis of Three-Diode Model with P&O MPPT using MATLAB/Simulink*.
6. Ahmad, T., S. Sobhan, and M.F. Nayan, *Comparative analysis between single diode and double diode model of PV cell: concentrate different parameters effect on its efficiency*. Journal of Power and Energy Engineering, 2016. **4**(3): p. 31-46.
7. Bugała, A. and G. Frydrychowicz-Jastrzębska, *Assessment of convergence between current-voltage characteristics of photovoltaic modules from mathematical calculations and measurements in real conditions*. Przegląd Elektrotechniczny, 2014. **90**(3): p. 169--171.
8. Ba, A., et al., *Comparative study of different DC/DC power converter for optimal PV system using MPPT (P&O) method*. Applied Solar Energy : (٤)٥٤ .٢٠١٨ ,p. 235-245.
9. Hasaneen, B. and A.A.E. Mohammed. *Design and simulation of DC/DC boost converter*. in *2008 12th International Middle-East Power System Conference*. 2008. IEEE.
10. Zhioua, M., et al., *Modeling, dynamics, bifurcation behavior and stability analysis of a DC-DC boost converter in photovoltaic systems*. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2016. **26**(10): p. 1650166.
11. Yadav, A.P.K., et al., *Comparison of mppt algorithms for dc-dc converters based pv systems*. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2012. **1**(1): p. 18-23.
12. Tan, N.V., et al., *A Proposal for an MPPT Algorithm Based on the Fluctuations of the PV Output Power, Output Voltage, and Control Duty Cycle for Improving the Performance of PV Systems in Microgrid*. Energies, 2020. **13**(17): p. 4326.
13. Joshi, P. and S. Arora, *Maximum power point tracking methodologies for solar PV systems-A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **70**: p. 1154-١١٧٧.
14. Salas, V., et al., *Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems*. Solar energy materials and solar cells, 2006. **90**(11): p. 1555-1578.

15. Ahmad, R., A.F. Murtaza, and H.A. Sher, *Power tracking techniques for efficient operation of photovoltaic array in solar applications—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. **101**: p. 82-102.
16. Kota, V.R. and M.N. Bhukya. *A simple and efficient MPPT scheme for PV module using 2-dimensional lookup table*. in *2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*. 2016. IEEE.
17. Udavalakshmi, J. and M.S. Sheik. *Comparative study of perturb & observe and look-up table maximum power point tracking techniques using MATLAB/Simulink*. in *2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)*. 2018. IEEE.
18. Lasheen, M., et al., *Adaptive reference voltage-based MPPT technique for PV applications*. IET Renewable Power Generation, 2017. **11**(5): p. 715-722.
19. Veerapen, S., H. Wen, and Y. Du. *Design of a novel MPPT algorithm based on the two stage searching method for PV systems under partial shading*. in *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia)*. 2017. IEEE.
20. Sher, H.A., et al., *A single-stage stand-alone photovoltaic energy system with high tracking efficiency*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016. **8**(2): p. 755-762.
21. Sher, H.A., et al., *A new sensorless hybrid MPPT algorithm based on fractional short-circuit current measurement and P&O MPPT*. IEEE Transactions on sustainable energy, 2015. **6**(4): p. 1426-1434.
22. Vijayakumari, A., *A non-iterative MPPT of PV array with online measured short circuit and open circuit quantities*. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2021. **33**(3): p. 176-185.
23. Thangavelu, A., S. Vairakannu, and D. Parvathyshankar, *Linear open circuit voltage-variable step-size-incremental conductance strategy-based hybrid MPPT controller for remote power applications*. IET Power Electronics, 2017. **10**(11): p. 1363-1376.
24. Nadeem, A., H.A. Sher, and A.F. Murtaza, *Online fractional open-circuit voltage maximum output power algorithm for photovoltaic modules*. IET Renewable Power Generation, 2020. **14**(2): p. 188-198.
25. Sharma, R.S. and P. Katti. *Perturb & observation MPPT algorithm for solar photovoltaic system*. in *2017 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*. 2017. IEEE.
26. Abdel-Salam, M., M.T. El-Mohandes, and M. El-Ghazaly, *An efficient tracking of MPP in PV systems using a newly-formulated P&O-MPPT method under varying irradiation levels*. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020. **15**(1): p. 501-513.
27. Zain, A.O.M., et al., *Matlab Design and Power Analysis of MPPT Controller for Solar PV Using Perturb and Observation Algorithm*. Advanced Science Letters, 2018. **24**(11): p. 9001-9005.

28. Kamran, M., et al., *Implementation of improved Perturb & Observe MPPT technique with confined search space for standalone photovoltaic system*. Journal of King Saud University-Engineering Sciences, 2020. **32**(7): p. 432-441.
29. Ali, Z.M., et al., *Variable step size perturb and observe MPPT controller by applying θ -modified krill herd algorithm-sliding mode controller under partially shaded conditions*. Journal of Cleaner Production, 2020. **271**: p. 122243.
30. Villalva, M., T. De Siqueira, and E. Ruppert, *Voltage regulation of photovoltaic arrays: small-signal analysis and control design*. IET Power Electronics, 2010. **3**(6): p. 869-880.
31. Ilyas, A., et al., *Realisation of incremental conductance the MPPT algorithm for a solar photovoltaic system*. International Journal of Ambient Energy, 2018. **39**(8): p. 873-884.
32. Patel, R.N. and S.K. Sinha. *Comparison of ANN-based MPPT controller and incremental conductance for photovoltaic system*. in *Proceeding of the Second International Conference on Microelectronics, Computing & Communication Systems (MCCS 2017)*. 2019. Springer.
33. Chawda, G.S., et al., *Incremental conductance based particle swarm optimization algorithm for global maximum power tracking of solar-pv under nonuniform operating conditions*. Applied Sciences, 2020. **10**(13): p. 4575.
34. Anowar, M.H. and P. Roy. *A modified incremental conductance based photovoltaic MPPT charge controller*. in *2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*. 2019. IEEE.
35. Chauhan, U., A. Rani, and B. Kumar. *A modified incremental conductance maximum power point technique for standalone PV system*. in *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. 2020. IEEE.
36. Ganvir, P. and R. Shaha, *Grid Connected Solar Photovoltaic Array with MPPT Matlab Simulation*. 2019.
37. Nguyen, D. and B. Lehman, *An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008. **55**(7): p. 2644-2654.
38. Hua, C., J. Lin, and C. Shen, *Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking*. IEEE transactions on industrial electronics, 1998. **45**(1): p. 99-107.
39. Xiao, W. and W.G. Dunford. *A modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems*. in *2004 IEEE 35th annual power electronics specialists conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)*. 2004. Ieee.
40. Zhong, Z., et al. *Reachable set boundedness and fuzzy sliding mode control of MPPT for nonlinear photovoltaic systems*. in *2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. 2020. IEEE.
41. Miqui, S., A. El Ougli, and B. Tidhaf, *Adaptive fuzzy sliding mode based MPPT controller for a photovoltaic water pumping system*. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2019. **10**(1): p. 414.

42. Ahmad, F.F., et al., *Application of sliding mode control for maximum power point tracking of solar photovoltaic systems: A comprehensive review*. Annual Reviews in Control, 2020.
43. Elobaid, L.M., A.K. Abdelsalam, and E.E. Zakzouk, *Artificial neural network-based photovoltaic maximum power point tracking techniques: a survey*. IET Renewable Power Generation, 2015. **9**(8): p. 1043-1063.
44. Ali, A., B. Twala, and T. Marwala, *Performance of MPPT in Photovoltaic Systems Using GA-ANN Optimization Scheme*, in *Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems*. 2018, Springer. p. 39-49.
45. Ngan, M.S. and C.W. Tan, *Photovoltaic multiple peaks power tracking using particle swarm optimization with artificial neural network algorithm*, in *Advances in solar Photovoltaic power plants*. 2016, Springer. p. 107-138.
46. Farayola ,A.M., Y. Sun, and A. Ali. *ANN-PSO Optimization of PV Systems Under Different Weather Conditions*. in *2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. 2018. IEEE.
47. Li, X., et al., *A novel beta parameter based fuzzy-logic controller for photovoltaic MPPT application*. Renewable energy, 2019. **130**: p. 416-427.
48. Chamanpira, M., et al., *A novel MPPT technique to increase accuracy in photovoltaic systems under variable atmospheric conditions using Fuzzy Gain scheduling*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2019: p. 1-23.
49. Kim, J.-C., J.-H. Huh, and J.-S. Ko, *Optimization design and test bed of fuzzy control rule base for PV system MPPT in micro grid*. Sustainability, 2020. **12** :(⁹)p. 3763.
50. Nath, D. and T. Boruah. *P&O and Fuzzy based MPPT for PV System*. in *2020 International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE)*. 2020. IEEE.
51. Moghassemi, A., S. Ebrahimi, and J. Olamaei, *MPPT and current mode control methods for PV modules: A review and a new multi-loop integrated method*. Signal Processing and Renewable Energy, 2020. **4**(2): p. 1-22.
52. Kumar, M., et al., *Fuzzy Logic Based MPPT Controller for PV Panel*, in *Advances in Machine Learning and Computational Intelligence*. 2021, Springer. p. 501-510.
53. Abdullah, M.Z., I. Sudiharto, and R.P. Eviningsih. *Photovoltaic System MPPT using Fuzzy Logic Controller*. in *2020 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (iSemantic)*. 2020. IEEE.
54. Yilmaz, U., A. Kircay, and S. Borekci, *PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **81**: p. 994-1001.
55. Aldosary, A., et al., *A modified shuffled frog algorithm to improve MPPT controller in PV System with storage batteries under variable atmospheric conditions*. Control Engineering Practice, 2021. **112**: p. 104831.
56. Attyah, B.T., et al. *Enhancement of Maximum Power Point Traking of Solar Energy Conversion Using a Newly Designed High-Sensitive Fuzzy PID Controller*. in *2018 IEEE 7th International Conference on Power and Energy (PECon)*. 2018. IEEE.

57. Refaat, M.M., et al. *Maximum power point tracking of photovoltaic system using adaptive fuzzy controller*. in *2017 Intl Conf on Advanced Control Circuits Systems (ACCS) Systems & 2017 Intl Conf on New Paradigms in Electronics & Information Technology (PEIT)*. 2017. IEEE.
58. Kumar, N.K. and V.I. Gandhi, *Implementation of fuzzy logic controller in power system applications*. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2019. **36**(5): p. 4115-4126.
59. Merchaoui, M., et al., *Fuzzy logic adaptive particle swarm optimisation based MPPT controller for photovoltaic systems*. *IET Renewable Power Generation*, 2020 . **14**(10): p. 2933-2945.
60. Laxman, B., A. Annamraju, and N.V. Srikanth, *A grey wolf optimized fuzzy logic based MPPT for shaded solar photovoltaic systems in microgrids*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. **46**(18): p. 10653-10665.
61. Nikolić ,M., et al., *Bee colony optimization metaheuristic for fuzzy membership functions tuning*. *Expert Systems with Applications*, 2020. **158**: p. 113601.
62. Saepullah, A. and R.S. Wahono, *Comparative analysis of mamdani, sugeno and tsukamoto method of fuzzy inference system for air conditioner energy saving*. *None*, 2015. **1**(2): p. 143-147.
63. Zadeh, L.A., *Fuzzy logic*. *Computer*, 1988. **21**(4): p. 83-93.
64. Saleh, A., et al. *A comparison of Mamdani and Sugeno method for optimization prediction of traffic noise levels*. in *2017 5th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*. 2017. IEEE.
65. Topaloglu, F. and H. Pehlivan. *Comparison of Mamdani type and Sugeno type fuzzy inference systems in wind power plant installations*. in *2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security (ISDFS)*. 2018. IEEE.
66. Givargis, S., et al., *Comparing Mamdani and Sugeno hierarchical fuzzy systems for environmental impact assessment: a pipeline project case study*. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 2018. **17**(9)
67. Tabbussum, R. and A.Q. Dar, *Comparison of fuzzy inference algorithms for stream flow prediction*. *Neural Computing and Applications*, 2021. **33**(5): p. 1643-1653.
68. Motsoeneng, P., J. Bamukunde, and S. Chowdhury. *Comparison of Perturb & Observe and Hill Climbing MPPT schemes for pv plant under cloud cover and varying load*. in *2019 10th International Renewable Energy Congress (IREC)*. 2019. IEEE.
69. Bahari, M.I., et al. *Modeling and simulation of hill climbing MPPT algorithm for photovoltaic application*. in *2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*. 2016. IEEE.
70. El Mentaly, L., A. Amghar, and H. Sahseh. *Comparison between HC, FOCV and TG MPPT algorithms for PV solar systems using buck converter*. in *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*. 2017. IEEE.
71. Kalogirou, S.A., *Solar energy engineering: processes and systems*. 2013: Academic Press.

72. Dhimish, M., et al., *Comparing Mamdani Sugeno fuzzy logic and RBF ANN network for PV fault detection*. Renewable energy, 2018. **117**: p. 257-274.
73. Hamam, A. and N.D. Georganas. *A comparison of Mamdani and Sugeno fuzzy inference systems for evaluating the quality of experience of Hapto-Audio-Visual applications*. in *2008 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games*. 2008. IEEE.
74. Abdelhalim, B., et al. *Optimization of the fuzzy MPPT controller by GA for the single-phase grid-connected photovoltaic system controlled by sliding mode*. in *AIP Conference Proceedings*. 2019. AIP Publishing LLC.
75. Whitley, D., *A genetic algorithm tutorial*. Statistics and computing, 1994. **4**(2): p. 65-85.
76. Razmjooy, N., M. Ramezani, and N. Ghadimi, *Imperialist competitive algorithm-based optimization of neuro-fuzzy system parameters for automatic red-eye removal*. International Journal of Fuzzy Systems, 2017. **19**(4): p. 1144-1156.
77. Bobdey, S., A. Jain, and G. Balasubramaniam, *Epidemiological review of laryngeal cancer: An Indian perspective*. Indian journal of medical and paediatric oncology: official journal of Indian Society of Medical & Paediatric Oncology, 2015. **36**(3): p. 154.
78. Bennaoui, A., S. Slami, and A. Aissa, *Invasive Weed Optimization Algorithm for Tuning Transitioning from Type-1 to Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller for Boost DC-DC Converters*. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 2020. **53**(2): p. 195-202.
79. Zaher, H., et al., *An Alternative Algorithm to Invasive Weed Optimization Based Global Maximum Power Point Tracking for PV Array Under Partial Shading Conditions*. International Journal, 2020. **9**(°)
80. Farajdadian, S. and S.H. Hosseini, *Design of an optimal fuzzy controller to obtain maximum power in solar power generation system*. Solar Energy, 2019. **182**: p. 161-178.
81. Farajdadian, S. and S.H. Hosseini, *Optimization of fuzzy-based MPPT controller via metaheuristic techniques for stand-alone PV systems*. International Journal of Hydrogen Energy, 2019. **44**(47): p. 25457-25472.

Abstract

Researchers have suggested several choices, the cardinal of solar energy, looking for alternatives to fossil fuels as a primary electricity source. To implement this proposal, features like productivity must be facilitated. One of the most critical challenges in this field is the nonlinear and environmental characteristics of the panel. Reaching an apposite operating point is noted as one of the various ways of achieving this goal known as Maximum Power Point Tracking (MPPT), an attractive topic to experts. This research presents a new fuzzy-based method for continuous tracking of maximum power points in different radiations, temperatures, and loads. This method contains a fuzzy logic controller, which is simplified and optimized with three different metaheuristic algorithms. The results are compared with a classic method (Hill Climbing), which is gradient base. Also, among optimization algorithms, two unwell-known algorithms, which are Imperialist Competitive Algorithm (ICA) and Invasive weed Algorithm (IWO), are compared with the Genetic Algorithm (GA), one of the algorithms that experts frequently use. In designing the fuzzy controller system, two significant issues have been considered: the most important of them is the minimization of control parameters while maintaining the output power at the apex. Another issue is the complexity of designing a fuzzy controller, which is closely related and unique for each system. An adaptable fuzzy controller is represented to overcome this difficulty, which can work properly with all PV systems with minimum changes.

Keywords: Photovoltaic, Maximum power point tracking, Fuzzy logic controller, Invasive weed Algorithm, Imperialist Competitive Algorithm.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical engineering

M.Sc. Thesis in Mechatronics Engineering

Design of a maximum power point tracking controller for photovoltaic systems In variable radiation

By: Tina Samavat

Supervisor:
Dr. Mostafa Nazari

May, 2021