

نشریه علمی-تخصصی

پژوهش‌های نوین مهندسی

ISSN: 2538-3809

فصلنامه پژوهش‌های نوین علوم مهندسی
سال چهارم، بهار ۱۳۹۷، شماره ۲۴، جلد یک

بهینه‌سازی فرآیند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی
آلیاژ تیتانیوم Ti-6AL-4V با استفاده از الگوریتم اجتماع
ذرات چند هدفه
محمد رضا مرکی

مطالعه آزمایشگاهی حذف فلز جیوه از آب با استفاده
از غشای اولترافیلتراسیون ماتریس مرکب تیتانیوم
دی اکسید/ پلی سولفون
کیوان حسینی، محسن دهقانی قناتستانی

مدلسازی بهینه پاسخ فرکانسی اولیه در بازار برق با
تسویه همزمان انرژی و خدمات جانبی
محمد رضا نیک فرجام، عبدالرضا توکلی

تنظیم بهینه توان راکتیو احتمالی در بازار برق ترکیبی با
وجود عدم قطعیت بار با استفاده از الگوریتم رقابت
استعماری
محمد مهدی اسماعیلی، میلاد رضائی

مکانبایی بهینه سکشنلایزر، ریکلوزر و نشانگر خطا در
شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم NSGAII
حمید حیاتی

NRES.ir

پژوهش‌های نوین علوم مهندسی

فصلنامه پژوهش‌های نوین علوم مهندسی،
سال چهارم، شماره ۲ (پیاپی: ۲۴)، بهار ۱۳۹۸
ISSN: 2538-3809

صاحب امتیاز و مدیر مسئول:
امیرحسین یوسفی
سر دبیر: میلاد فتاحی
مدیر داخلی: منیژه ملائی

اعضای شورای علمی نشریه:

جناب آقای دکتر محمدعلی ارجمند، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی
جناب آقای دکتر شهروز اسدی، دانشگاه شهید بهشتی
جناب آقای دکتر رضا افضل، دانشگاه خواجه نصرالدین طوسی
جناب آقای دکتر علی جباری، دانشگاه اراک
سرکارخانم دکتر ساغر جارچی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی
جناب آقای دکتر چنگیز دهقانپان، دانشگاه تهران
جناب آقای دکتر نعمت حسینی، دانشگاه شهید بهشتی
سرکارخانم دکتر راحله خادمیان، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی
جناب آقای دکتر علی رحمانی، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی
سرکارخانم دکتر فائزه رحمانی، دانشگاه خواجه نصرالدین طوسی
جناب آقای دکتر قدرت الله رودینی، دانشگاه سیستان و بلوچستان
جناب آقای دکتر محبعلی رهدار، دانشگاه سیستان و بلوچستان
جناب آقای دکتر مرتضی زیودار، دانشگاه سیستان و بلوچستان
جناب آقای دکتر محمدحسین کاظمی، دانشگاه شاهد
جناب آقای دکتر علی فروغی، دانشگاه تبریز
جناب آقای دکتر علی لکی روحانی، دانشگاه زنجان
جناب آقای دکتر سیدحمید هاشمی، دانشگاه اراک

دفتر نشریه:

۰۲۱ ۳۳ ۲۰ ۲۴۸۷ ۰۲۱ ۴۳ ۸۵ ۷۱ ۲۴
۰۲۶ ۳۲ ۷۲ ۴۷۸۷ ۰۲۶ ۳۲ ۷۴ ۷۱ ۵۸
تهران: افسریه ۱۵، متری چهارم، کوچه ۳۸، پلاک ۲۸، واحد ۲

انتشارات هنر و علوم دانشگاهی

تهران، افسریه، ۱۵ متری اول، کوچه ۲۸، پلاک ۲۹۳
تلفن: ۰۲۱ ۳۳ ۸۴ ۵۷ ۹۲

۹۰
۳۰

فراخوان پذیرش مقاله

توسعه پرشتاب و گسترده علوم به ویژه در حوزه فنی و مهندسی، انجام اقدامات علمی برای معرفی دستاوردهای علمی را بیش از پیش ضروری کرده است. توسعه پایدار ایران اسلامی، مستلزم ایجاد زیرساخت‌های علمی به ویژه در حوزه علوم مهندسی است. موسسه مدیریت دانش شباک با همکاری اساتید برجسته دانشگاهی با هدف معرفی پژوهش‌های علوم مهندسی و ایجاد فرصتی برای تبادل مطالعات و تجارب در این حوزه، نشریه پژوهش‌های نوین علوم مهندسی را منتشر می‌کند.

تحریریه به منظور انتشار گسترده پژوهش‌های روزآمد از اساتید، صاحب‌نظران، مهندسان، دانشجویان، کارشناسان، پژوهشگران و علاقه‌مندان علوم مهندسی، دعوت می‌کند تا با ارائه مقالات علمی ارزشمند خود، از طریق وبسایت نشریه به نشانی www.nres.ir ضمن مشارکت فعال به غنای این نشریه کمک نمایند. برای ارسال مقاله به نشریه کافی است تا در وبسایت نشریه ثبت‌نام نموده و با ورود به پنل کاربری، مقاله خود را ثبت کنید. پس از بررسی اولیه و داوری علمی از طرف تحریریه جهت انتشار مقاله با نویسنده مسئول تماس گرفته می‌شود.

موضوعات نشریه پژوهش نوین علوم مهندسی:

- مهندسی صنایع
- مهندسی عمران
- مهندسی مکانیک
- مهندسی معدن
- مهندسی هوا فضا
- مهندسی مواد و متالورژی
- مهندسی برق و الکترونیک
- مهندسی انرژی و فیزیک
- مهندسی شیمی، نفت و پلیمر
- مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات
- مبانی علوم مهندسی
- مدیریت دانش در علوم مهندسی

فهرست مقالات

عنوان مقاله	صفحه
بهینه‌سازی فرآیند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی آلیاژ تیتانیم Ti-6AL-4V با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات چند هدفه محمد رضا مرکی	۱
مطالعه آزمایشگاهی حذف فلز جیوه از آب با استفاده از غشای اولترافیلتراسیون ماتریس مرکب تیتانیوم دی اکسید/پلی سولفون کیوان حسینی، محسن دهقانی قناتغستانی	۷
مدل‌سازی بهینه پاسخ فرکانسی اولیه در بازار برق با تسویه همزمان انرژی و خدمات جانبی محمد رضا نیک فرجام، عبدالرضا توکلی	۲۱
تنظیم بهینه توان راکتیو احتمالی در بازار برق ترکیبی با وجود عدم قطعیت بار با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری محمد مهدی اسماعیلی، میلاد رضائی	۳۹
مکان‌یابی بهینه سکشنلایزر، ریکلوزر و نشانه‌گر خطا در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم NSGAII حمید حیاتی	۴۹

بهینه‌سازی فرآیند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی آلیاژ تیتانیوم Ti-6AL-4V با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات چند هدفه

محمد رضا مرکی^۱

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۱/۱۷

چکیده

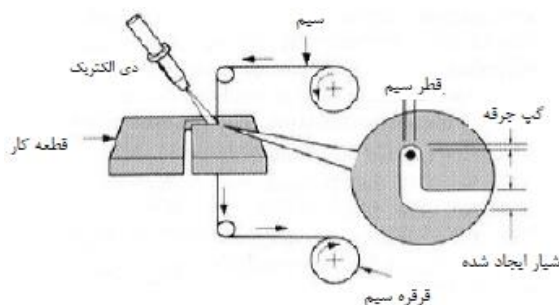
آلیاژ تیتانیوم Ti-6AL-4V به دلیل دارا بودن خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد از جمله وزن کم، استحکام بالا، مقاومت عالی در برابر خوردگی منجر به استفاده وسیع آن در صنایع هوافضا، خودروسازی، تجهیزات پزشکی شده است. این آلیاژ جزو مواد سخت برش بوده و برای ماشین‌کاری آن از روش‌های مدرن استفاده می‌شود. در این پژوهش جهت پیش‌بینی دقیق زبری سطح برش و نرخ براده برداری آلیاژ تیتانیوم برشکاری شده با فرآیند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و سرعت سیم با استفاده از منطق فازی اقدام به مدل‌سازی فرآیند گردید و سپس با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات چند هدفه مقدار زبری سطح و نرخ براده برداری بهینه سازی گردید. مقدار میانگین خطای بدست آمده در پیش‌بینی زبری سطح ۳/۴ درصد و در پیش‌بینی نرخ براده برداری ۱/۶۹ درصد بوده است. با استفاده از مدل فازی از الگوریتم اجتماع ذرات چند هدفه برای به دست آوردن مقدار بهینه زبری سطح و نرخ براده برداری استفاده گردید. مقدار بهینه به دست آمده برای زبری سطح برابر با ۲/۹۱۱ و برای نرخ براده برداری برابر با ۵/۶۹۱ می‌باشد که از بهترین مقدار به دست آمده توسط آزمایش‌های تجربی بیشتر می‌باشند. بررسی خطاهای ناشی از مدل فازی و مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده با نتایج تجربی نشان داد که مدل فازی قادر به پیش‌بینی زبری سطح و نرخ براده برداری با دقت قابل قبول می‌باشد. بهینه‌سازی انجام شده توسط الگوریتم اجتماع ذرات چند هدفه نشان داد که با انتخاب پارامترهای صحیح فرآیند امکان بهبود در مقادیر زبری سطح و نرخ براده برداری وجود دارد.

واژگان کلیدی: فرآیند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی، نرخ براده برداری، شبکه عصبی-فازی، الگوریتم اجتماع ذرات، آلیاژ تیتانیوم Ti-6AL-4V

۱- مقدمه

آلیاژهای تیتانیوم به علت دارا بودن خواص مکانیکی و متالورژیکی خاص از قبیل هدایت حرارتی ضعیف، تمایل شدید برای واکنش شیمیایی با ابزار برش و مدول الاستیسیته پایین، ماشین‌کاری آن به روش سنتی دشوار بوده و در برخی موارد باعث بروز مشکلاتی از قبیل مشکلات تلرانسی، تمایل به جوش خوردگی در سطح ابزار و تخریب سریع ابزار و وقوع پدیده چتر در قطعات بلند می‌شود [۱]. استفاده از ماشین‌کاری سنتی در ماشین‌کاری قطعات تیتانیومی باعث کاهش دقت ابعادی، کاهش کیفیت سطح و افزایش هزینه تمام شده می‌شود. به منظور رفع مشکلات ماشین‌کاری تیتانیوم از فرایندهای نوین ماشین‌کاری استفاده می‌شود که فرایند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی از جمله فرایندهای پیشرفته برشکاری است که برای برشکاری تیتانیوم استفاده می‌شود [۲].

برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی، فرایندی است که در آن از یک منبع با انرژی ترموالکتریکی به منظور برشکاری استفاده می‌شود. فرایند برشکاری به وسیله جرقه‌های متناوب و کنترل شده‌ای است که بین الکترود یعنی سیم و قطعه کار زده می‌شود. الکترود سیم نازکی است که از قرقره باز شده و از درون قطعه کار عبور کرده و از سمت دیگر توسط مکانیزم مربوطه خارج می‌شود. بین سیم و قطعه کار فاصله کوچکی به نام گپ وجود دارد که در حین انجام ماشین‌کاری مایع دی‌الکتریک آن را در بر می‌گیرد و در ولتاژ مناسب تخلیه الکتریکی بین سیم و قطعه کار اتفاق می‌افتد و جرقه‌های ایجاد شده قطعه کار را به صورت موضعی تبخیر کرده و مایع دی‌الکتریک آن‌ها را از محل شستشو می‌دهد و فرایند براده‌برداری انجام می‌گیرد. شماتیک فرایند تخلیه الکتریکی سیمی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- فرایند تخلیه الکتریکی سیمی

فرایند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی در چند سال اخیر با توجه به نیاز روز افزون در برخی از زمینه‌های ساخت و تولید بخصوص صنایع قالب‌سازی دقیق، بسیار پیشرفت کرده و مورد توجه قرار گرفته است. از آنجایی که نرخ براده برداری یکی از مهمترین پارامترها در ساخت و تولید محسوب می‌شود تحقیقات مختلفی به وسیله محققین به منظور بهینه‌سازی نرخ براده برداری به دست آمده در فرایند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی انجام پذیرفته است. این مطالعات نشان می‌دهد نرخ براده برداری در این فرایند ارتباط نزدیکی با پارامترهای ماشینکاری دارد. از آنجایی که برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی یک روش ماشینکاری غیر سنتی (مدرن) پر کاربرد و مورد نیاز با سرمایه گذاری اولیه بالاست، لازم است برای انجام این فرایند پارامترهای مناسب ماشینکاری به منظور اقتصادی کردن فرایند انتخاب گردند [۳ و ۴]. که هدف اصلی این تحقیق نیز قرار گرفته است. هیانگ و همکاران با استفاده از سطوح خاکستری پارامترهای برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی را مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار دادند و نشان دادند که میزان تغذیه و زمان روشنی پالس بیشترین تاثیر را بر نرخ براده‌برداری دارند و زمان روشنی پالس بیشترین تاثیر را در به دست آوردن زبری سطح مطلوب را دارد [۵]. جعفریان و همکارانشان در آزمایش تجربی نشان دادند که افزایش توان باعث افزایش انرژی تخلیه و تعداد جرقه‌های ساطع شده می‌گردد که موجب افزایش حرارت در سطح قطعه کار می‌شود که در نتیجه سرعت ماشینکاری و نرخ براده برداری بالا رفته ولی کیفیت سطح کاهش می‌یابد [۶]. جانگرا و همکاران با به کارگیری ترکیب روش تاگوچی، آنالیز سطوح خاکستری و اندازه‌گیری انتروپی اقدام به بهینه‌سازی همزمان نرخ براده‌برداری و زبری سطح نمودند. اندازه‌گیری انتروپی برای تعیین وزن‌های پارامترهای ماشین‌کاری مورد استفاده قرار گرفت [۷].

۲- منطق فازی

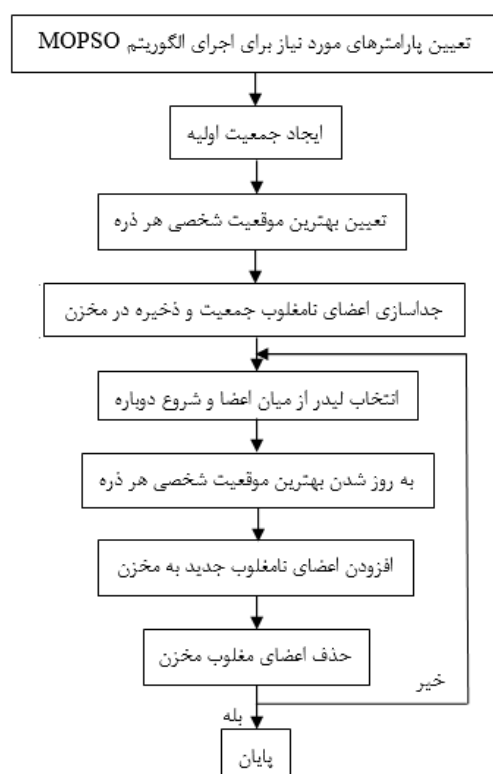
منطق فازی توسط لطفی‌زاده در مقاله‌ای با عنوان "سیستم‌های فازی" به صورت رسمی معرفی شد [۸]. لطفی‌زاده بیان کرد که تئوری کلاسیک بیش از حد بر روی دقت تاکید داشته و از این جهت با سامانه‌های پیچیده و دنیای واقعی چندان سازگاری ندارد. منطق کلاسیک، هر چیزی را بر اساس یک سامانه‌ی دوتایی نشان می‌دهد (درست یا غلط، صفر یا یک)، اما در منطق فازی، درستی یا نادرستی هر چیزی با درجه‌ی عضویت نشان داده می‌شود که مقدار آن بین صفر و یک است. منطق فازی برای طراحی و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده به کار می‌رود [۹]. در سیستم فازی طراحی شده، مقادیر ورودی، سرعت سیم، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس به مقادیر فازی تبدیل می‌شوند و با استفاده از توابع فازی، یک درجه‌ی عضویت را به خود اختصاص می‌دهند. به منظور دسته‌بندی مقادیر مختلف سرعت سیم، جریان، زمان روشنی پالس و زمان خاموشی پالس از تابع گوسی، استفاده شده است. همچنین تابع مورد استفاده در دسته‌بندی مقادیر زبری سطح تابع گوسی می‌باشد. توابع به کار رفته در دسته‌بندی پارامترهای ورودی و خروجی، بهترین عملکرد را در بین توابع موجود در جعبه ابزار منطق فازی نرم‌افزار متلب داشته‌اند. تعداد دسته‌های فازی به کار گرفته شده جهت دسته‌بندی زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و سرعت سیم با توجه به داده‌های جدول ۱ به سه دسته و تعداد دسته‌های در نظر گرفته شده جهت دسته‌بندی زبری سطح، هشت دسته و می‌باشند. تعداد قوانین به کار رفته جهت مدل‌سازی زبری سطح فرآیند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی، ۲۷ قانون می‌باشد. در این تحقیق، موتور استنتاج مددانی به کار گرفته شده است. مقادیر ورودی‌های فازی پس از ورود به موتور استنتاج و با اعمال قوانین فازی موجود، به خروجی‌های فازی تبدیل می‌شوند. در پایان نیز خروجی‌های فازی با استفاده از روش غیرفازی سازی محاسبه مرکز جرم، به مقادیر خروجی زبری سطح تبدیل می‌شوند.

جدول ۱- آزمایشات تجربی فرایند تخلیه الکتریکی سیمی آلیاژ تیتانیوم Ti-6AL-4V [۱۰]

شماره آزمایش	زمان روشنی پالس (T on)	زمان خاموشی پالس (T off)	سرعت سیم (WF)	زبری سطح (RA)	نرخ براده برداری (MRR)
۱	۶	۲	۱	۳/۱۴	۵/۲۱۲
۲	۱۰	۴	۱	۳/۶۲	۵/۶۲۲
۳	۱۰	۲	۵	۳/۳۸	۴/۹۱۴
۴	۶	۴	۵	۳/۰۸	۴/۵۵۶
۵	۸	۳	۳	۳/۰۲	۵/۲۴۲
۶	۸	۳	۳	۳/۰۰	۵/۱۳۰
۷	۱۰	۲	۱	۳/۶۲	۵/۴۹۴
۸	۸	۴	۱	۳/۰۸	۴/۷۹۶
۹	۶	۲	۵	۳/۱۰	۴/۸۹۳
۱۰	۱۰	۴	۵	۳/۲	۴/۹۱۴
۱۱	۸	۳	۳	۳/۱۰	۵/۰۳۹
۱۲	۶	۳	۳	۳/۰۶	۴/۶۸۲
۱۳	۱۰	۳	۳	۳/۴۴	۵/۱۴۱
۱۴	۸	۲	۳	۳/۰۶	۵/۰۶۷
۱۵	۸	۴	۳	۳/۱۲	۵/۰۵۶
۱۶	۸	۳	۱	۳/۳۲	۵/۳۸۴
۱۷	۸	۳	۵	۳/۱۰	۴/۹۸۹
۱۸	۸	۳	۳	۲/۹۸	۵/۲۱۲
۱۹	۸	۳	۳	۲/۹۰	۵/۰۴۵
۲۰	۸	۳	۳	۳/۰۴	۴/۹۳۶

۳- الگوریتم MOPSO

در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهات (Eberhard) و کندی (Kennedy) برای اولین بار الگوریتم (PSO بهینه‌سازی اجتماع ذرات) که الهام گرفته از حرکت پرندگان است معرفی شد [۱۲ و ۱۱]. در سال ۲۰۰۴ این الگوریتم توسط کوئلو (Coello) به (MOPSO الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه) تعمیم یافت که برای حل مسائل چند هدفه بکار می‌رود در الگوریتم PSO ابتدا یک سرعت اولیه به ذره داده می‌شود و در فضای پاسخ ذرات شروع به حرکت می‌کنند که به بهترین موقعیت شخصی هر ذره pbest و به بهترین موقعیت ذره موجود در بین جمعیت را gbest می‌گویند که بهترین مقدار بهینه می‌باشد. در الگوریتم MOPSO یک مفهومی به نام مخزن به PSO اضافه شده است و یک عضو از مخزن به عنوان لیدر انتخاب می‌شود این لیدر حتما باید عضو مخزن و نامغلوب باشد در الگوریتم MOPSO به جای gbest یکی از اعضای مخزن انتخاب می‌شود در این الگوریتم چند ذره به عنوان هدف می‌باشند و در مجموعه جواب قرار دارند. ترتیب اجرای الگوریتم به شرح زیر می‌باشد: [۱۲ و ۱۳]



شکل ۲ - چرخه الگوریتم MOPSO

۴- نتایج و بحث

با توجه به اهمیت نرخ براده برداری و زبری سطح در زمان فرآیند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی، در این پژوهش نسبت به مدل‌سازی فرایند توسط منطق فازی اقدام گردید. نرخ براده برداری در فرایند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی جزو پارامترهای کلیدی فرایند محسوب می‌شود و یکی از عوامل مهم در زمان ماشین کاری فرایند می‌باشد. با توجه به اهمیت پارامتر نرخ براده برداری در این پژوهش از منطق فازی برای مدل کردن نرخ براده برداری در فرایند تخلیه الکتریکی سیمی آلیاژ تیتانیوم استفاده گردید و همچنین الگوریتم اجتماع ذرات برای بهینه‌سازی نرخ براده برداری به کار برده شد. بررسی نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل فازی و مقایسه آن با نتایج تجربی نشان از قابلیت مناسب منطق فازی در مدل‌سازی این فرایند و همچنین نتایج بهینه توسط الگوریتم اجتماع ذرات نشان از کاربردی بودن این الگوریتم در بهینه‌سازی فرایند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی آلیاژ تیتانیوم دارد. در مدل ارائه شده پارامترهای زمان روشنی پالس، زمان خاموشی پالس و سرعت سیم به عنوان پارامترهای تاثیرگذار بر روی نرخ براده برداری در نظر گرفته شده و با پیاده سازی مدل منطق فازی نسبت به مدل کردن نرخ براده برداری اقدام گردید. مقدار میانگین خطای بدست آمده در پیش‌بینی زبری سطح ۳/۴ درصد و در پیش‌بینی نرخ براده برداری ۱/۶۹ درصد بوده است. مقدار کم خطای مدل پیشنهادی نشان از کاربردی بودن روش ارائه شده برای پیش‌بینی پارامتر زبری سطح و نرخ براده برداری دارد.

با استفاده از مدل فازی از الگوریتم اجتماع ذرات چند هدفه برای به دست آوردن مقدار بهینه زبری سطح و نرخ براده برداری استفاده گردید. مقدار بهینه به دست آمده برای زبری سطح برابر با $2/911$ و برای نرخ براده برداری برابر با $5/691$ می باشد که از بهترین مقدار به دست آمده توسط آزمایش های تجربی بیشتر می باشند. نرخ براده برداری و کیفیت سطوح برش خورده در فرایند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی جزو پارامترهای کلیدی فرایند محسوب می شود.

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر برای ارزیابی مدل فازی ایجاد شده از نتایج تجربی بدست آمده توسط نانداکومار و موهان استفاده گردید. مقدار میانگین خطای بدست آمده در پیش بینی زبری سطح $3/4$ درصد و در پیش بینی نرخ براده برداری $1/69$ درصد بوده است. مقدار کم خطای مدل پیشنهادی نشان از کابردی بودن روش ارائه شده برای پیش بینی پارامتر زبری سطح و نرخ براده برداری دارد. با استفاده از مدل فازی از الگوریتم اجتماع ذرات چند هدفه برای به دست آوردن مقدار بهینه زبری سطح و نرخ براده برداری استفاده گردید. مقدار بهینه به دست آمده برای زبری سطح برابر با $2/911$ و برای نرخ براده برداری برابر با $5/691$ می باشد که از بهترین مقدار به دست آمده توسط آزمایش های تجربی بیشتر می باشند.

منابع

- [۱] Ezugwu, E.O., and Wang, Z.M., (1997). Titanium alloys and their machinability a review. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 68, No. 3, pp. 262-274.
- [۲] Varun, A., and Venkaiah, V., (2015). Simultaneous optimization of WEDM responses using grey relational analysis coupled with genetic algorithm while machining EN 353., Int J Adv Manuf Technol, Vol. 76, pp.675-690.
- [۳] Spedding, T.A., and Wang, Z.Q., (1997). Study on modeling of wire EDM process'', Journal of Materials Processing Technology 69, pp. 18- 28.
- [۴] Saedon, J.B., Norkamal, j., Mohd Azman, Y., and NorHayati, H., (2014). Multi-objective optimization of titanium alloy through orthogonal array and grey relational analysis in WEDM. Procedia Technology 15, pp. 833 – 841.
- [۵] Huang, J.T., and Liao, Y.S., (2003). Optimization of machining parameters of Wire-EDM based on Grey relational and statistical analyses, International Journal of Production Research, vol. 41, no. 8, pp. 1707-1720.
- [۶]. جعفریان، مهدی، دهقان، غلامحسین، وفائی صفت، عباس، "بررسی پارامترهای ماشین کاری بر صافی سطح و سرعت ماشینکاری تنگستن کارباید در فرآیند تخلیه الکتریکی سیمی (WEDM)", مجله علمی -پژوهشی مهندسی مکانیک، ۱۳۸۷.
- [۷] Jangra K., Grover S., and Aggarwal A. "Optimization of multi machining characteristics in WEDM of WC-5.3%Co composite using integrated approach of Taguchi, GRA and entropy method". Front Mech Eng, Vol. 7, No. 3, pp. 288-299 (2012)
- [۸] Zadeh, A., (1965). Fuzzy sets. Information and control, pp. 338-353.
- [۹] Zadeh, A., (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Information sciences, pp. 199-249.
- [۱۰] Nandakumar, C., and Mohan, B., "Multi-Response Optimization of CNC WEDM Process Parameters for Machining Titanium alloy Ti 6Al-4V using Response Surface Methodology (RSM)". Applied Mechanics and Materials Vols, 541-542, pp. 354 – 358 (2014).
- [۱۱] RezaeeJordehi A. "Particle swarm optimisation (PSO) for allocation of FACTS devices in electric transmission systems: A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews 52, pp.1260-1267 (2015).
- [۱۲] Kennedy J, and Eberhart R. "Particle swarm optimization", Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. pp. 1942-1948 (1995).

- [۱۳] Shi, Y.,and Eberhart, R. "A modified particle swarm optimizer ", Proceedings of IEEE International Conferenceon Evolutionary Computation Proceedings, 1998.IEEE World Congress on Computational Intelligence., pp.69–73 (1998).

مطالعه آزمایشگاهی حذف فلز جیوه از آب با استفاده از غشای اولترافیلتراسیون ماتریس مرکب تیتانیوم دی اکسید، پلی سولفون

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۳/۱۲

کیوان حسینی^۱، محسن دهقانی قناتغستانی^۲

چکیده

مقدمه: فلزات سنگین از جمله رایج ترین آلاینده‌هایی هستند که معمولاً در غلظت های بالا در فاضلاب صنایع یافت می شوند و موجب آسیب به محیط های آبی و به مخاطره افتادن سلامت موجودات زنده به خصوص انسان می گردند. در این پژوهش مطالعه آزمایشگاهی حذف فلز جیوه از آب با استفاده از غشای اولترافیلتراسیون ماتریس مرکب تیتانیوم دی اکسید/پلی سولفون بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. روش: غشای نانوکامپوزیت پلی سولفون- دی اکسید تیتانیوم با استفاده از مقادیر ۰، ۵/۰، ۱ و ۲ درصد وزنی دی اکسید تیتانیوم به روش جدایش فازی ساخته شده است و مشخصات غشا شامل ضریب برخورد با آب، حضور نانوذرات در سطح غشا و عملکرد غشا برای عبور آب خالص بررسی گردید. نتایج: نتایج نشان داد که با افزایش مقدار pH محلول جیوه از ۲ تا ۸، درصد حذف جیوه افزایش می یابد. با افزایش بیشتر pH از ۸ تا ۱۰ میزان حذف با شیب کمتری روند کاهشی پیدا کرده است. با افزودن نانوذرات غیرآلی به غشای M1، M2، M3 و M4 جذب فلز سنگین جیوه مطلوبی دارد، در حالی که این توانایی بالا برای غشای M4 افزایش یافته است که مقدار جذب آن ۹۲/۴۵٪ می باشد. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه به وسیله غشاها در غلظت اولیه ۸۰ میلی گرم بر لیتر حاصل گردید. در این آزمایش بیشترین مقدار حذف جیوه مربوط به فلز سنگین جیوه با غلظت اولیه ۸۰ میلی گرم بر لیتر با غشای M4 است که این مقدار ۹۳/۴۹ درصد حاصل گردید. نتیجه گیری: حداکثر درصد حذف جیوه در غشای نانوکامپوزیت با حضور ۲ درصد وزنی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم ۹۳/۴۹٪ و در غشای پلی سولفون خالص ۵۶/۹۷٪ است که با افزودن نانوذرات دی اکسید تیتانیوم با غلظت ۲ درصد وزنی به غشا خالص ۶۴/۱ درصد افزایش حذف جیوه را از آب حاصل گردید.

واژگان کلیدی: جیوه، غشا، اولترافیلتراسیون، ماتریس مرکب، پلی سولفون، پساب

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی محیط زیست، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی محیط زیست، نویسنده مسئول، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران (آدرس پستی نویسنده مسئول: بندرعباس، بلوار آزادی، روبروی، هتل گوهرشاد، ساختمان مهندس، طبقه اول پلاک ۲، کدپستی: ۷۹۱۶۸۱۵۴۸۷)
dehghani933@gmail.com

به طور عام، فلزات سنگین سم های سیستمیک بوده با اثر اختصاصی روی اعصاب، کلیه، جنین و سرطان زایی می توانند سبب مرگ و میر شوند. فلزات سنگین با ایجاد اختلال در سیستم ذهنی و عصبی بدن و تحت تأثیر قرار دادن نوروترانس میتور ها و همچنین اثرات قلبی و عروقی و اثر روی سیستم ایمنی و تولید مثل رفتار انسان ها را تحت تأثیر قرار می دهد. براساس قوانین و استاندارد های ملی و بین المللی حد مجازی برای تخلیه پساب صنایع حاوی فلزات سنگین به محیط های آبی مطرح شده است، در صورتی که پساب صنعتی با غلظت بالاتر از این حدود وارد محیط شود سبب بروز آسیب ها و خطراتی برای سلامت انسان و محیط می شود (Perry and Green, 1997).

در طول دو دهه گذشته، توجه گسترده ای به آلودگی محیط زیست توسط مواد خطرناک مانند فلزات سنگین، پرداخته شده است. برخی از روش های متداول، برای حذف فلزات سنگین از زباله های مایع توسعه یافته اند که عبارتند از: ته نشینی شیمیایی، تبادل یونی، فرآیندهای غشایی، تصفیه الکتروشیمیایی و غیره. در طول چند دهه ی گذشته، کاربرد غشاها به طور قابل توجهی گسترش یافته است و اکنون آن ها در صنایع بسیار گوناگونی برای جداسازی گاز و مایع به کار گرفته می شوند. این محدوده وسیع کاربرد به علت سودمند بودن و ویژگی های خاص آن ها مانند کوچک بودن شان برای نواحی غشایی سطحی بزرگ، فشرددگی، راحتی ساخت، کارکرد و طراحی نمونه های پیش ساخته می باشد (Nath, 2008). با این وجود، چند اشکال وجود دارد که کاربرد غشا را با محدودیت روبرو می کند (Nath, 2008). رسوبی که باعث انسداد منافذ و خلل و فرج غشا در مدت فیلتراسیون می شود، یکی از مهمترین موانع برای توسعه غشا است به طوریکه باعث بدتر شدن عملکرد غشا و کاهش عمر مفید آن می شود (Norman et.al, 2008).

دو تکنیک اصلی برای به حداقل رساندن یا زدودن رسوب وجود دارد: بهینه کردن شرایط عملیات (کارکرد) و شستشوی مواد شیمیایی و هیدرولیکی (Al-Amoudi and Lovitt, 2007). با این وجود، توسعه یا اصلاح مواد غشا به منظور اینکه آن ها کمتر مستعد رسوب گیری شوند، پتانسیل بزرگی را برای کنترل و سبک کردن رسوبات نشان داده است (Charles Liu et.al, 2006).

اولترافیلتراسیون (UF)، یک فرآیند غشایی جهت تصفیه خانه آب با قابلیت حذف ذرات معلق، مواد کلوئیدی، باکتری ها، ویروس ها، پاتوژن های موجود، جهت تولید آب با خلوص بالا و SDI پایین می باشد. غشاء های اولترافیلتراسیون قادر به حذف ذرات بزرگتر از 5 μm می باشند. اندازه منافذ غشاء در فرآیند اولتراسیون حدود ۸ الی ۱۵ نانومتر بوده و اختلاف فشار اعمال شده در این سیستم بین ۰/۵ الی ۱۰ بار می باشد. حذف ذرات در اولترافیلتراسیون به میزان کمی به بار الکتریکی ذره و تا حد زیادی به سایز ذره بستگی دارد (Charles Liu et.al, 2006).

غشاء اولترافیلتراسیون جهت جداسازی و خالص سازی رنگ های کلوئیدی از پساب های صنعتی، پروتئین ها، جداسازی لیگنین در کاغذ سازی، بعضی از محلول های کلوئیدی، جداسازی روغن از پساب، تغلیظ پروتئین شیر و مشتقات آن، خالص سازی خون، تصفیه و شفاف سازی آب میوه و کلاً موادی که وزن مولکولی آن ها بیشتر از ۱۰۰۰ دالتون است به کار می رود. اولترافیلتراسیون معمولاً در جداسازی جریان مواد آلی مؤثر نمی باشد. کاربردهای سیستم اولترافیلتراسیون عبارت اند از:

- حذف روغنی / نفت از آب / پساب صنایع نفت و گاز و پتروشیمی بخصوص روغن موجود در سیکل آب برگشتی.
- بکارگیری به عنوان پیش تصفیه سیستم های اسمز معکوس و نانوفیلتراسیون در صنایع.
- پیش تصفیه سیستم های آب شیرین کن دریایی جهت حذف مواد معلق، کشند قرمز و جلوگیری از ورود روغن و لکه های نفتی ناشی از حوادث دریایی نظیر لکه های نفتی.
- گندزدایی و زلال سازی آب آشامیدنی.
- به کارگیری به صورت مستغرق جهت تصفیه فاضلاب در روش هایی نظیر بیور آکتورغشایی (MBR).
- حذف آنزیم ها، هورمون ها، آلبومین ها، انسولین و آمینو اسیدها در فرآیند های صنایع دارویی و داروسازی.
- سیستم های اولترافیلتراسیون دارای مزایای زیر می باشد:
- نرخ پایین گرفتگی ممبران ها.
- قابلیت شستشوی معکوس جهت بهبود عملکرد سیستم.
- افزایش طول عمر ممبران های سیستم اسمز معکوس به سبب کاهش میزان بالای ذرات ورودی به سیستم.
- تأمین آب با کیفیت بالا با کمترین انرژی.
- سرعت جریان بالا و مقاومت در برابر آلودگی.
- عملکرد موثر فیلتراسیون در حذف مواد معلق، پاتوژن ها، میکروارگانیسم ها، باکتری ها و ذرات کلوئیدی.
- مقاومت بالا در برابر حرارت، مواد شیمیایی و عوامل اکسید کننده.

در تحقیقی در سال ۲۰۱۲ کارایی سیستم اسمز معکوس در حذف فلز سنگین آرسنیک از آب آشامیدنی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش و اندازه گیری نشان داد پارامترهای غلظت، pH، دمای محلول ورودی و فشار در عملکرد غشا اسمز معکوس مدل TE 2521 تاثیر داشت و افزایش و یا کاهش هر کدام منجر به تغییر در راندمان و عملکرد آن گردید (Vatanpour et.al, 2012).

در سال ۲۰۱۲ در تحقیقی غشای جدید نانو کامپوزیت پلی اتروسولفون تهیه شده با نانوذرات PANI/Fe₃O₄ با افزایش عملکرد برای حذف Cu (II) از آب را مورد مطالعه قرار گرفت. روش معکوس. ساختار مغناطیسی نانوذرات PANI/Fe₃O₄ با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی انتقالی (TEM) و اسپکتروسکوپ مادون قرمز (FTIR) فوریه بررسی شد. جهت به دست آوردن مقدار بهینه، سه مقدار مختلف از نانوذرات به محلول های قالب ریزی وارد شدند. با توجه به تست عملکرد، غشاء با نانوذرات ۰/۱ درصد وزنی بالاترین میزان حذف یون Cu (II)، اما کمترین شار آب خالص را داشت. این مساله ناشی از نانوذراتی است که در طی زمان آماده سازی در حفره های سطحی غشا قرار گرفته اند، یعنی دچار انسداد سطحی سطحی گردید. آنالیز مورفولوژیکی شامل تصاویر میکروسکوپ الکترونی با گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و همچنین آزمایش های عملکرد غشا نشان داد که مکانیسم جذب محتمل ترین مکانیسم جداسازی توسط غشا است. برای بررسی بهتر مکانیسم جذب، چندین مدل ایزوترم مانند لانگمویر، فروندلیچ و ردلیچ پترسون آزمایش شدند. بر اساس نتایج ایزوترمال، مدل Redlich-Peterson عملکرد بهتری نسبتاً به مکانیسم پیچیده جذب نشان داد. قابلیت استفاده مجدد غشای نانوکامپوزیتی برای چندین فرآیند جذب-دفع متوالی با استفاده از EDTA به عنوان احیا کننده مورد تایید قرار گرفت (Daraei et.al, 2012).

در تحقیقی در سال ۲۰۱۳ ساخت و مشخصه بندی غشاء جدید ماتریس مخلوط اترافیلتراسیون اکسید دوتایی PES/Fe-Mn برای حذف جاذب As (III) از محلول آب آلوده را مورد مطالعه گرفت. در این مقاله، غشاهای ماتریس مخلوط اترافیلتراسیون (UF) جدید (MMMs) تشکیل شده از پلی اتروسولفون آلی (PES) و ذرات اکسید دوتایی (Fe-Mn) (FMBO) غیر آلی به روش فرآیند وارونگی فاز برای حذف جاذب As (III) از آب آلوده تهیه گردید. غشا توسط محلول های قالب ریزی که شامل نسبت وزنی مختلفی از FMBO به PES است، در حدود ۰-۱/۵ بود، تهیه شد. پس از آن غشا با توجه به میزان کریستاله شدن، زبری سطح و مورفولوژی به ترتیب با استفاده از تست های XRD، AFM، SEM مشخصه بندی شد. شار آب خالص، میزان آبدوستی، تخلخل و میزان جذب As (III) غشا نیز مورد بررسی قرار گرفت. افزایش نسبت مقدار FMBO / PES موجب افزایش شار جریان غشا شد که این قضیه به علت کاهش زاویه تماس، افزایش تعداد منافذ و زبری سطح بیشتر بود. اگر چه ضخامت لایه افزایش می یابد در حالی که با افزایش بارگذاری ذرات FMBO، اندازه ذرات کاهش می یابد، تعداد منافذ هم افزایش می یابد، که موجب برتری اثرات اندازه منافذ و ضخامت لایه پوستی می شود و موجب افزایش شار جریان آب می گردد. بهترین عملکرد غشاهای مربوط به غشای تهیه شده با نسبت 1: 1.5 FMBO/PES است که شار آب خالص آن تا 2.5 L/m².h در فشار عملیاتی ۱ بار و حداکثر میزان جذب As (III) در حدود 73 mg/g بود. انجام مداوم آزمایش UF نشان داد که غشای ماتریس مخلوط PES/FMBO می تواند به طور بالقوه برای حذف موثر As (III) از آب های زیرزمینی آلوده با میزان جریان عبوری حاوی As (III) > 10 lg/L استفاده شود. با استفاده از محلول NaOH و NaOCl، ظرفیت جذب غشا تا حدود ۸۷،۵٪ می تواند احیا گردد، که این امر قابلیت عملیاتی و استفاده مجدد غشاء برای حذف As (III) را نشان می دهد (Jamshidi et.al, 2013).

در تحقیقی در سال ۲۰۱۵ راندمان سیستم اسمز معکوس در حذف فلز سنگین آرسنیک از آب آشامیدنی در شرایط مختلف ورودی سیستم (فشار، دما و pH) بررسی گردید نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش فشار، درصد پس دهی آرسنیک و متوسط شار خروجی از غشا افزایش می یابد (Padaki et.al, 2015).

در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی حذف جیوه (Hg²⁺) از محیط های آبی توسط نانولوله های کربنی چند جداره پوشش داده شده با اکسید آهن را مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه از نانولوله های کربنی اکسید شده ی چند جداره ترکیب شده با اکسید آهن برای حذف جیوه استفاده شد. اثر متغیرهای غلظت اولیه جیوه، pH اولیه محلول، زمان تماس، سرعت اختلاط، مقدار نانوکامپوزیت و اثر مداخله گر (نیترات و کلراید) مورد بررسی قرار گرفت. شرایط بهینه برای هر یک از متغیرها با استفاده از نرم افزار Minitab تعیین و با روش آماری تاکوچی تجزیه و تحلیل شدند. یافته های این تحقیق نشان داد که pH خنثی نسبت به pH های اسیدی و قلیایی برای حذف جیوه مناسب تر است. همچنین نتایج نشان داد بهترین سرعت اختلاط، ۱۵۰ دور در دقیقه می باشد. زمان تماس ۶۰ دقیقه، زمان مناسبی است. در این مدت زمان، می توان به حذف ۹۳ درصدی جیوه بسته به نانو کامپوزیت اضافه شده دست یافت. بهترین مقدار نانوکامپوزیت برای رسیدن به حذف مطلوب جیوه، ۶۰ میلی گرم در لیتر می باشد. در ضمن در غلظت های پایین (زیر یک میلی گرم در لیتر) با این نانو کامپوزیت می توان به حذف ۸۷ درصدی جیوه دست یافت. در این تحقیق با افزودن عوامل مداخله گر (نیترات و کلراید)، میزان حذف جیوه ۱۰ درصد کاهش یافت. نتایج این مطالعه نشان می دهد که با کاربرد نانولوله های

پوشش داده شده با اکسید آهن در pH خنثی، زمان تماس ۶۰ دقیقه، میزان اختلاط ۱۵۰ دور در دقیقه، و مقدار نانوکامپوزیت ۶۰ میلی گرم، می توان به حذف ۹۳ درصد از جیوه بدون عوامل مداخله گر دست یافت. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده می توان این ترکیب را به عنوان یک جاذب آسان و قوی برای حذف سریع جیوه از آب آشامیدنی و فاضلاب صنعتی پیشنهاد نمود (Khodabakhshi et.al, 2016).

در سال ۲۰۱۷ حذف رنگ با استفاده از غشاء جدید الترافیلتراسیون نانوتیتانیوم اکسید ته نشین شده روی نگهدارنده های ارزان قیمت تهیه شده از بنتونیت طبیعی مراکش را مورد مطالعه قرار گرفت. در این مقاله به نحوه تهیه و مشخص بندی یک غشاء الترافیلتراسیون آغشته به نانوذرات تیتانیوم اکسید ارزان قیمت رسوب کرده بر پایه بنتونیت پرداخته شده است. لایه اولترافیلتراسیون با استفاده از نانوذرات تیتانیوم اکسید به روش پوشش دهی غوطه وری به دست آمده و سپس در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد پخت شد. آنالیز عکس میکروسکوپ الکترونی محیطی (SEM) از غشاء فوق الذکر تهیه شده نشان داد که یک لایه همگن رسوب ایجاد شده و چسبندگی خوبی را بر روی آن نشان می دهد و ضخامت متوسط آن 0.2 ± 0.4 میلی متر است. میانگین قطر حفره ها و نفوذپذیری آب غشاء ساخته شده به ترتیب 10 ± 0.5 نانومتر و $0.08/16$ L/m².h است. عملکرد غشاء نیز توسط فیلترکردن سه رنگ متفاوت مورد بررسی قرار گرفت: دو نمونه رنگ آبیونی (Direct red 80 و Acid orange ۷۴) و یک نمونه کاتیونی (متیلن آبی). اثر pH خوراک و غلظت رنگدانه ها بر میزان پس زنی غشا در فشار ۴ بار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تجربی فیلتراسیون نشان داد که میزان حذف نمونه رنگ Direct red 80، Acid orange 74 و متیلن آبی به ترتیب مقدار ماکزیمم ۹۸٪، ۸۵٪ و ۹۴٪ بسته به شرایط فیلتراسیون و هریک از خصوصیات رنگی به دست آمد (Bouazizi et.al, 2017). در پژوهش حاضر سعی بر آن است که حذف فلز جیوه از آب با استفاده از غشای اولترافیلتراسیون ماتریس مرکب تیتانیوم دی اکسید/ پلی سولفون بصورت آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

۲- مواد و روشها

بطور کلی آزمایش ها انجام گرفته در این تحقیق شامل موارد زیر می باشند.

۱) ساخت محلول پلیمری به روش حل کردن پلیمر پلی سولفون در حلال NMP و استفاده از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم به عنوان اضافه شونده به محلول پلیمری.

۲) ساخت غشای نانو کامپوزیت صفحه ای پلی سولفون- دی اکسید تیتانیوم.

۳) تعیین مشخصات غشاهای ساخته شده.

۴) بررسی عملکرد غشاهای ساخته شده جهت حذف جیوه از آب.

انتخاب مواد: برای ساخت غشای پلیمری از پلیمر پلی سولفون (PSf-Udel P-1700) استفاده شد. این پلیمر به دلیل پایداری مکانیکی خوب، مقاومت در گستره ی وسیع pH و مقاومت کلریدی مناسب به عنوان زیر لایه ی غشاهای نانوکامپوزیتی به کار می رود. از حلال ان - متیل - ۲- پیرولیدون^۱ (NMP>95%) ساخت شرکت سیگما آلد ریج به عنوان حلال استفاده شد. نانو ذرات دی اکساید تیتانیوم (TiO₂ <21 nm, Degussa P25, Evonik) به عنوان اضافه شونده به محلول پلیمری استفاده شد. برای تهیه محلول خوراک محتوی Hg(II)، نمک Hg(NO₃)₂.H₂O ساخت شرکت مرک تهیه شده و در آب مقطر حل شد.

ساخت غشای نانو کامپوزیت: محلول های پلیمری پلی سولفون در حلال ان - متیل - ۲- پیرولیدون (NMP)^۲ ساخته شد. ترکیب مواد موجود در محلول پلیمری در جدول ۱ داده شده است.

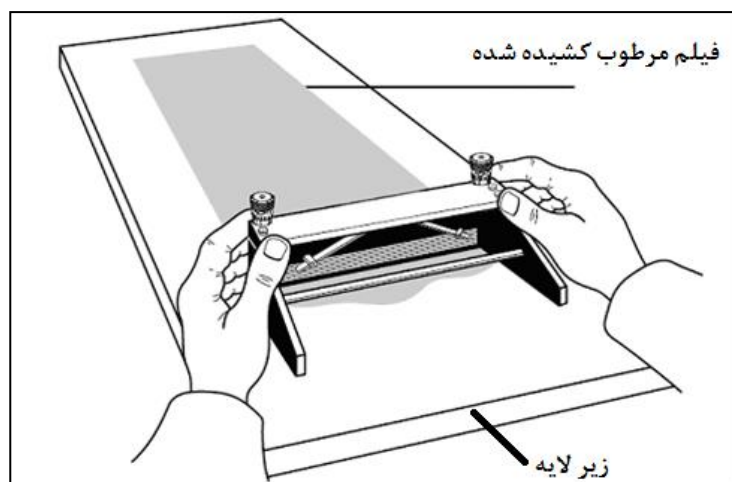
جدول ۱: ترکیب نسبی مواد در محلول های پلیمری

نام غشا	PSf (wt.%)	NMP (wt.%)	TiO ₂ (wt.%)
M1	۱۷/۵	۸۲/۵	۰
M2	۱۷/۵	۸۲	۰/۵
M3	۱۷/۵	۸۱/۵	۱
M4	۱۷/۵	۸۰/۵	۲

1 N-methyl-2-pyrrolidone

2 Normal methyl Pyrrolidone

برای ساخت محلول پلیمری ابتدا مقدار مشخصی از حلال NMP در یک بطری شیشه‌ای ریخته شد و سپس مقدار مشخص از نانوذرات تیتانیوم دی اکساید به حلال اضافه شد. حلال محتوی نانوذرات در یک دستگاه التراسونیک به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شد تا نانوذراتی که به هم چسبیده اند، جدا شده و کاملاً در حلال پخش شوند. پس از پخش شدن کامل نانوذرات در حلال، مقدار از پیش وزن شده پلیمر پلی سولفون به تدریج و تحت همزنندگی شدید بوسیله همزن مکانیکی به حلال اضافه شد تا از به هم چسپیدن و کلوخه شدن پلیمر جلوگیری شود. سپس محلول به مدت ۲۴ ساعت در دمای 25°C در دستگاه التراسونیک قرار داده شد تا گاززدایی شود و حباب‌های هوای موجود در محلول پلیمری حذف شوند (Emadzadeh et.al, 2014). جهت ساخت غشای صفحه‌ای، محلول پلیمری بر روی یک صفحه شیشه‌ای ریخته شد و توسط فیلم کش بر روی صفحه شیشه‌ای پهن گردید. پس از پهن شدن محلول پلیمری بر روی صفحه شیشه‌ای، صفحه شیشه‌ای در دمای محیط به درون حمام آب فرو برده شد تا فرآیند جدایش فازی رخ دهد. پس از اینکه غشا از صفحه شیشه‌ای جدا گردید، به مدت ۲۴ ساعت درون حمام آب دیگری قرار داده شد، تا حلال باقی مانده زدوده شود. غشاهای آماده شده به منظور انجام آزمایش‌ها آینده در آب مقطر نگهداری شد. شکل ۱ نحوه استفاده از فیلم کش را برای ساخت غشا نشان می‌دهد.



شکل ۱: ساخت غشای صفحه‌ای تحت با استفاده از فیلم کش (Baker, 2004)

تعیین مشخصات غشاهای ساخته شده: پیش از استفاده از غشاهای ساخته شده در فرآیند اولترافیلتراسیون برای حذف جیوه از آب، مشخصات غشاهای ساخته شده از جمله ساختار سطحی و عرضی، زبری سطح، زاویه تماس با آب، اندازه منافذ، تخلخل کلی و جهت گیری مولکولی مطالعه شدند. روش آزمایش‌ها انجام گرفته در زیر به طور مفصل توضیح داده شده است.

۱) میکروسکوپ الکترونی روبشی: مورفولوژی غشاها با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی روبشی مدل JEOL JSM-6390LV، مورد بررسی قرار گرفتند. تصاویر مقطع عرضی و سطح غشاهای ساخته شده با بزرگ نمایی‌های مختلف تهیه شدند. به این منظور قطعات کوچک با ابعاد 5×5 سانتی متر از غشاها برش داده شدند. سپس نمونه‌ها درون نیتروژن مایع قرار گرفتند تا نمونه به حالت ترد و شکننده درآید. برای حذف همه رطوبت احتمالی از منافذ غشا، قطعات آماده شده غشا به مدت ۲ ساعت در یک آون خلاء با دمای 60°C درجه سانتی گراد قرار گرفتند. سپس سطح غشا توسط پلاتین پوشش داده شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی روبشی نشر میدانی مدل Shimadzu، هیتاچی، ژاپن مورفولوژی غشا و نوع اتم‌های روی سطوح زیرلایه و لایه پسته ای ارزیابی شدند. شکل ۲ دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد.



شکل ۲: دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی

۲) میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM): میکروسکوپ نیروی اتمی دستگاهی است که برای مطالعه غیرمستقیم سطح اتم‌ها کاربرد دارد. در حقیقت میکروسکوپ نیروی اتمی می‌تواند برای ارزیابی زبری سطح غشاها به کار برده شود. این میکروسکوپ، با حرکت دادن یک پیمایش گر بر روی سطح ماده، نیروی مکانیکی بین کاوشگر و ماده را محاسبه می‌کند و از این داده‌ها برای نشان دادن تصویر سطح اتم استفاده می‌کند. نمونه‌های غشا به قطعات کوچک ابعاد 5×5 سانتی متر برش داده شدند و سطح غشاها توسط میکروسکوپ نیروی اتمی بررسی شد.

۳) زاویه تماس آب: آزمون زاویه تماس آب برای بررسی میزان آبدوستی یا آبگریزی غشا بکار برده می‌شود. معمولاً غشای دارای زاویه تماس بیشتر از 90° درجه آبگریز و غشای دارای زاویه تماس کمتر از 90° درجه آبدوست می‌باشد. زاویه تماس سطح فوقانی غشاها توسط روش قطره بی پایه اندازه‌گیری شد. در این آزمایش‌ها از زاویه‌یاب (دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس نوری DATA Physics, OCA15plus, Germany) استفاده شد و زاویه قطرات آب با سطح غشا اندازه‌گیری شد. برای به حداقل رساندن خطای اندازه‌گیری زاویه تماس در 10° نقطه از سطح غشا مورد بررسی قرار گرفت و میانگین آن‌ها به عنوان زاویه تماس با آب گزارش شد.

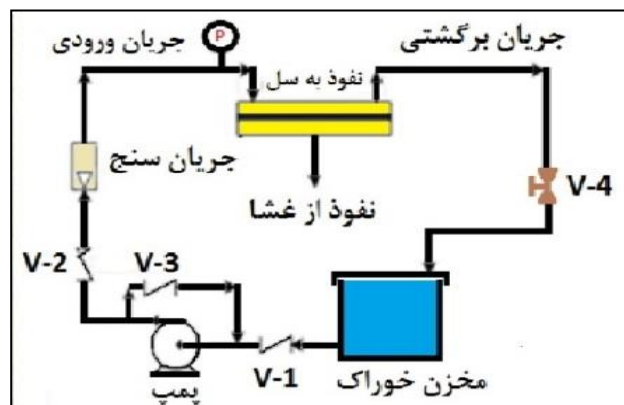
۴) تخلخل کلی غشا: تخلخل کلی غشا یک مشخصه مهم در غشاهای متخلخل نامتقارن است. تخلخل کلی غشا به صورت نسبت حجم منافذ به کل حجم غشای متخلخل تعریف می‌شود و با نماد ε نشان داده شده و بدین ترتیب محاسبه می‌شود (Emadzadeh et.al, 2014)

$$\varepsilon_m = \frac{(w_1 - w_2) / \rho_w}{(w_1 - w_2) / \rho_w + w_2 / \rho_p} \quad (1)$$

که در این رابطه w_1 وزن غشای خیس، w_2 وزن غشای خشک، ρ_w چگالی آب (1.0 g/cm^3) و ρ_p چگالی پلیمر (1.24 g/cm^3) می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری وزن غشای خشک، غشاها درون اون خلأ برای مدت ۲ ساعت و در دمای 120°C درجه سانتی گراد خشک شده و توسط یک ترازوی دیجیتال وزن شدند.

روش کار عملکرد غشاهای ساخته شده برای حذف جیوه از آب توسط سیستم اولترافیلتراسیون اندازه‌گیری شد. یک مدول غشایی با سطح 16 cm^2 تهیه شد و نفوذ آب خالص در آن فشار ۱ بار و دمای 25°C اندازه‌گیری شد. ابتدا محلول استوک 200 mg/L میلی گرم بر لیتر از جیوه (0.857 g/L) گرم از نیترات جیوه در 200 mL میلی لیتر آب مقطر) با انحلال $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ در آب مقطر تهیه گردید. سپس از محلول استوک ساخته شده غلظت‌های 20 ، 40 ، 60 و 80 mg/L میلی گرم بر لیتر ساخته شد. مقدار pH محلول‌ها در 10 – 12 تنظیم شد. برای این منظور از محلول‌های آبی NaOH (0.1 M) و HCl (0.1 M) استفاده شد. برای اندازه‌گیری شار عبور آب خالص، آب خالص به مدت 60 دقیقه از غشا عبور داده شد و شار عبوری اندازه‌گیری شد. سپس محلول حاوی نمک جیوه جایگزین آب خالص شد. آزمایش عبور محلول $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ نیز به مدت 60 دقیقه انجام شد. غلظت جیوه در فاز

نفوذ کننده توسط دستگاه جذب اتمی (Atomic Absorption Spectrophotometer, Shimadzu, AA680, Japan) اندازه گیری می شود. شماتیک سیستم اولترافیلتراسیون در شکل ۳ را نشان داده شده است.



شکل ۳: شماتیک سیستم اولترافیلتراسیون

در این پژوهش برای بدست آوردن درصد حذف جیوه از رابطه ۲ استفاده می کنیم.

$$\%R = \frac{(C_i - C_e)}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

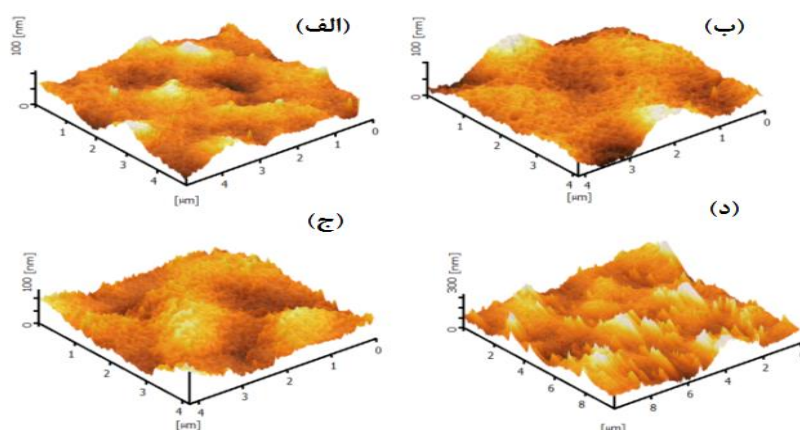
که در این رابطه R درصد حذف جیوه، C_i و C_e به ترتیب غلظت اولیه جیوه و غلظت جیوه جذب نشده برحسب g/mL در فاز مایع می باشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج تعیین خواص غشا

۱) میکروسکوپ نیروی اتمی

آنالیز میکروسکوپی نیروی اتمی جهت بررسی زبری سطح غشاها انجام شد. تصاویر AFM سطح غشاها ساخته شده در شکل ۴ و مقادیر مربوط به زبری متوسط (R_a) در جدول ۲ نشان داده شده اند.



شکل ۴: تصاویر AFM مربوط به غشاها، (الف) غشا M1، (ب) غشا M2، (ج) غشا M3، (د) غشا M4

همانگونه که جدول ۲ نشان می دهد با افزودن نانوذرات دی اکساید تیتانیوم به محلول پلیمری پلی سولفون زبری سطح افزایش یافته است. این امر بدلیل تجمع نانوذرات در سطح غشا می باشد. افزایش زبری سطح موجب افزایش سطح غشا می شود بنابراین می توان انتظار داشت که میزان جذب فلز در غشای نانوکامپوزیت افزایش یابد.

جدول ۲: مقادیر زبری متوسط غشاهای ساخته شده

نام غشا	زبری (R_a)
M1	۹/۴
M2	۱۱/۱
M3	۱۴/۶
M4	۲۲/۱

۲) تخلخل کلی و زاویه تماس با آب

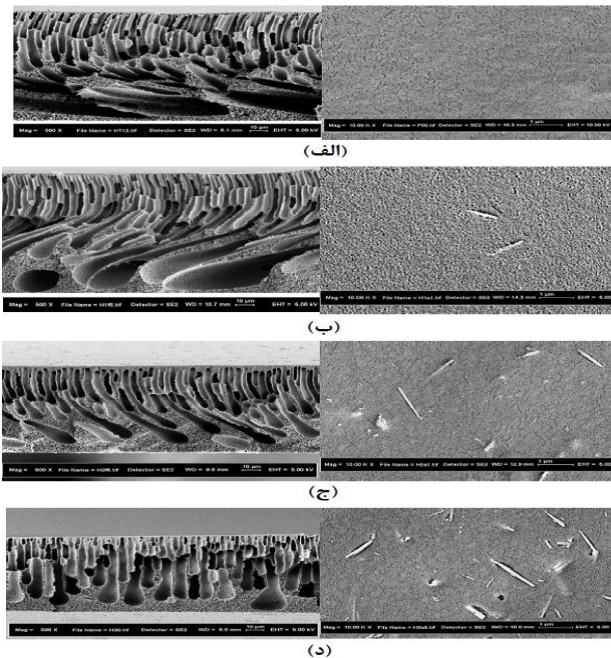
مقادیر تخلخل کلی و زاویه تماس سطح فوقانی غشاها اندازه‌گیری شد و نتایج در جدول ۳ گزارش شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با افزودن نانوذرات به محلول پلیمری، زاویه تماس سطح غشا با آب کاهش یافته است. کاهش زاویه تماس آب به معنی افزایش آب‌دوستی غشای نانوکامپوزیت می‌باشد. دلیل افزایش آب‌دوستی غشای نانوکامپوزیت وجود نانوذرات آب‌دوست دی اکسید تیتانیوم در سطح فوقانی و ساختار غشا می‌باشد. تخلخل زیاد غشاهای ساخته شده می‌تواند به دلیل غلظت کم پلیمر در محلول پلیمری باشد.

جدول ۳: زاویه تماس با آب غشاهای ساخته شده

نام غشا	زاویه تماس با آب (درجه)	تخلخل کلی (%)
M1	۷۳/۲۱	۷۹/۳۷
M2	۵۸/۸۳	۷۵/۶۱
M3	۵۱/۸۶	۷۲/۶۵
M4	۴۷/۶۲	۷۰/۴۳

۳) میکروسکوپ الکترونی روبشی

ساختار غشاهای ساخته شده توسط میکروسکوپی الکترونی روبشی مطالعه شد. تصاویر SEM ساختار مقطع عرضی و سطح غشاهای ساخته شده در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد که با اضافه کردن نانوذرات دی اکسید تیتانیوم به محلول پلیمری در زیر لایه غشای نانو کامپوزیت، حفره‌های درشت به ساختار اسفنجی شکل تغییر می‌کنند. این پدیده موجب کم شدن تعداد حفره‌های درشت در غشای نانوکامپوزیت می‌شود. گزارش شده است که با اضافه کردن نانوذرات غیر آلی به محلول پلیمری ویسکوزیته محلول افزایش می‌یابد (Lau et.al, 2015). افزایش ویسکوزیته محلول پلیمری موجب کاهش سرعت جدایش فازی در حمام انعقاد شده و در نتیجه ساختار اسفنج مانند تشکیل می‌گردد. علاوه، وجود لکه‌های سفید رنگ در سطح غشای نانو کامپوزیت وجود نانوذرات دی اکسید تیتانیوم در سطح غشا را تایید می‌کند. تجمع این نانوذرات در سطح غشا موجب مسدود شدن منافذ غشا و کاهش نرخ نفوذ در غشا می‌شود. وجود نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در سطح غشا با آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) بررسی شد. این آنالیز عناصر تشکیل دهنده نمونه را بصورت نیمه کمی مشخص می‌کند.



شکل ۵: تصاویر SEM سطح فوقانی و سطح مقطع غشاهای (الف) M1، (ب) M2، (ج) M3، (د) M4

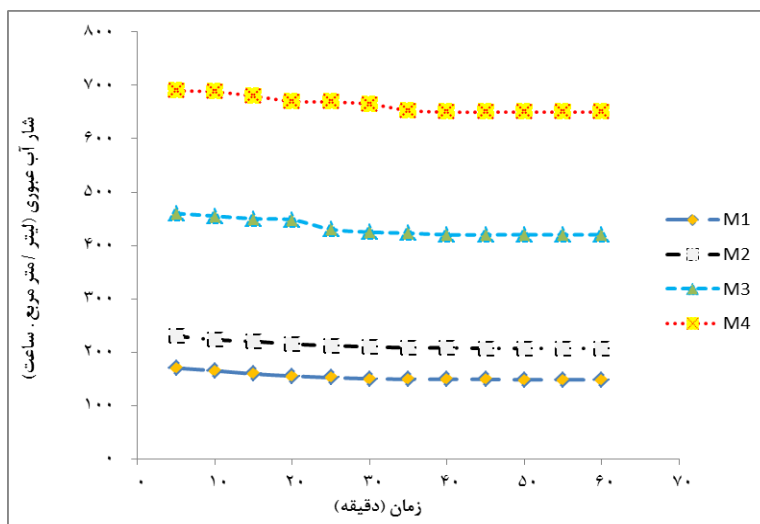
جدول ۴ نشان می‌دهد که در سطح غشای ساخته شده با پلی سولفون خالص اتم تیتانیوم وجود ندارد ولی در سطح غشای نانو کامپوزیت اتم تیتانیوم به میزان ۱/۱۸٪ اتمی در سطح وجود دارد که بیانگر حضور نانوذرات دی اکسید تیتانیوم در سطح این غشا می‌باشد.

جدول ۴: آنالیز EDAX غشاهای ساخته شده (الف) غشای پلی سولفون خالص، (ب) غشای نانوکامپوزیت

(الف)				
عنصر	AN	nn. C [wt.%]	C norm [wt.%]	Atom. C [at.%]
کربن	۶	۷۳/۶۲	۷۳/۶۲	۸۱/۸۲
اکسیژن	۸	۱۷/۲۴	۱۷/۲۴	۱۴/۳۸
سولفور	۱۶	۹/۱۴	۹/۱۴	۳/۸
کل		۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
(ب)				
کربن	۶	۳۴/۹۳	۷۲/۰۶	۸۲/۸۴
اکسیژن	۸	۶/۴۱	۱۳/۲۲	۱۱/۴۱
سولفور	۱۶	۵/۱۵	۱۰/۶۳	۴/۵۸
تیتانیوم	۲۲	۱/۹۸	۴/۰۹	۱/۱۸
کل		۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

۳-۲- نتایج شار آب خالص عبوری از غشاهای

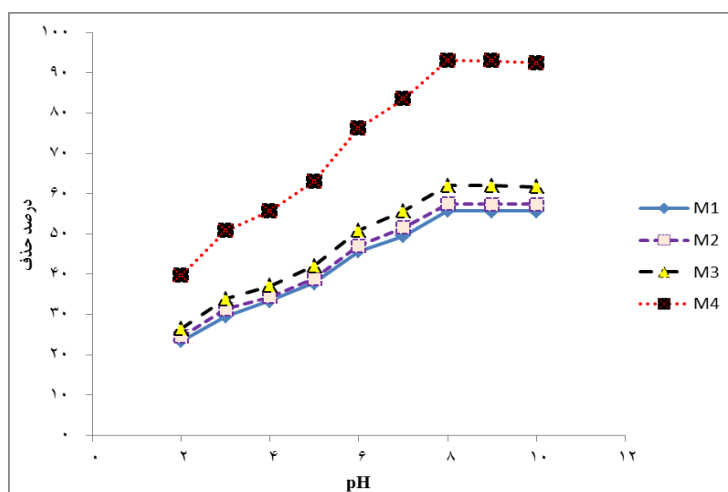
شکل ۶ شار عبور جریان آب خالص غشاهای ساخته شده برحسب زمان را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که شار عبور آب خالص از غشای نانوکامپوزیت از غشای پلی سولفون بیشتر است. که دلیل آن افزودن نانو ذرات آب دوست دی اکسید تیتانیوم به غشا می‌باشد. همانگونه که از شکل ۶ مشخص است روند شار عبور آب خالص از هر دو غشا در ابتدا با افزایش زمان کاهش یافته و بعد از مدتی تقریباً ثابت می‌شود. کاهش شار عبور آب در ابتدای فرآیند می‌تواند به دلیل ناپایدار بودن سیستم در زمان‌های ابتدایی فرآیند باشد. در انتهای فرآیند و بعد از گذشت زمان ۶۰ دقیقه شار عبور آب از غشای پلی سولفون خالص تقریباً ۱۴۸ ($Lm^{-2}h$) و شار عبور آب از غشاهای نانو کامپوزیت M1، M2، M3 و M4 به ترتیب ۲۰۷، ۴۲۰ و ۶۵۰ ($Lm^{-2}h$) می‌باشند.



شکل ۶: شار عبور آب خالص از غشاها بر حسب زمان آزمایش

۳-۳- نتایج حذف جیوه با استفاده از غشاها

شکل ۷ اثر pH محلول جیوه بروی میزان حذف جیوه برای غشاهای متفاوت در شرایط عملیاتی فشار ۱ بار، غلظت اولیه جیوه ۸۰ میلی گرم بر لیتر، زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش pH از ۲ تا ۸ درصد حذف جیوه با غشاهای متفاوت افزایش می‌یابد. با افزایش بیشتر pH از ۸ تا ۱۰ میزان حذف با شیب کم روند کاهشی پیدا می‌کند. میزان جذب کم جیوه در محیط اسیدی (pH پایین) اساساً به دلیل انتشار H^+ به وسیله حذف جیوه است. چون در pH پایین در اثر یونیزاسیون غشای پلی سولفون بار مثبت می‌شوند و چون جیوه هم دارای بار مثبت می‌باشد بنابراین همدیگر را دفع می‌کنند ولی در pH بالای ۷ غشای پلی سولفون دارای بار منفی می‌شوند. در اثر یون (OH^-) و چون جیوه هم دارای بار مثبت است بنابر این همدیگر را جذب می‌کنند. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه در pH برابر با ۸ بدست آمد که این مقدار برای غشاهای M1، M2، M3 و M4 به ترتیب برابر با ۵۵/۷۶، ۵۷/۴۳، ۶۲/۰۲ و ۹۲/۴۵ درصد بدست آمد.



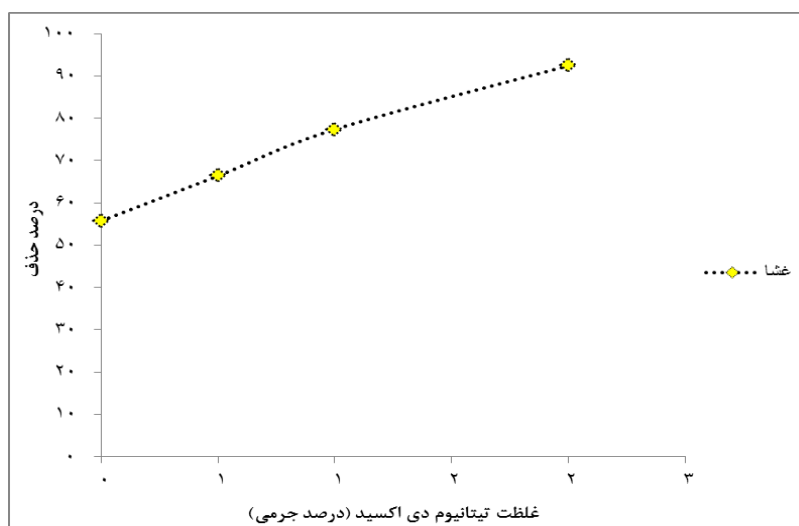
شکل ۷: اثر pH محلول بر روی درصد حذف جیوه برای غشا متفاوت

در تحقیقی در سال ۲۰۱۵ تخلیص بیودیزل تولیدی از روغن پسماند، با استفاده از غشای نانوکامپوزیتی با پایه پلی اتر سولفون را بررسی کردند. غشاهای نانوکامپوزیتی با درصدهای مختلف از دی اکسید تیتانیوم (۰، ۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶، ۰/۰۸ و ۱ درصد وزنی)، با استفاده از تکنیک قالب‌گیری محلول پلیمری و به کمک تغییر فاز تهیه گردید. نتایج به دست آمده نشان داد که غشای نانوکامپوزیتی اصلاح شده حاوی ۰/۰۶ درصد وزنی دی اکسید تیتانیوم، عملکرد مناسب تری در مقایسه با غشای بدون نانو ذره (اصلاح نشده) و نیز دیگر نمونه های نانوکامپوزیتی دارد (Kouzarian Farahani et.al, 2015)

در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی غشای نانوکامپوزیت پلی سولفون-دی اکسید تیتانیوم با استفاده از مقدار ۰ و ۱ درصد وزنی دی اکسید تیتانیوم به روش جدایش فازی تهیه کرد و مشخصات غشا شامل ضریب برخورد با آب، حضور نانوذرات در سطح غشا و عملکرد غشا برای عبور آب خالص بررسی شد. شار عبور جریان آب خالص از غشای نانوکامپوزیت به میزان قابل توجهی از غشای پلی سولفون خالص بیشتر می باشد. همچنین شار عبور آب در محلول آبی سرب سدیم از غشای نانو کامپوزیت از غشای پلی سولفون بیشتر می باشد. حداکثر میزان وازنی سرب در غشای نانوکامپوزیت ۹۶٪ و در غشای پلی سولفون خالص ۴۷٪ می باشد (Behrouzi Dehno, 2016).

عماد زاده و همکاران در سال ۲۰۱۴ در پژوهشی از نانوذرات دی اکسید تیتانیوم در ساخت غشای ماتریس ترکیبی پلی سولفون دی اکسید تیتانیوم استفاده کردند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که غشای ساخته شده پلی سولفون با ۵٪ وزنی از نانوذرات شار عبور آب به میزان ۲۹/۷ (L m-2 h-1) و شار برگشت نمک به میزان ۷/۳ (g m-2 h-1) بدست آمد (Emadzadeh et.al, 2014).

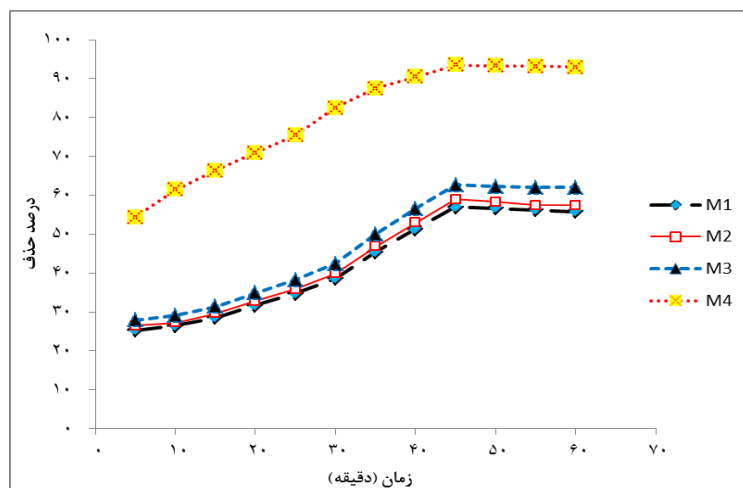
شکل ۸ درصد حذف فلز جیوه در غلظت‌های مختلف نانوذرات دی اکسید تیتانیوم در شرایط عملیاتی pH برابر با ۸ (بهینه)، فشار ۱ بار، غلظت اولیه جیوه ۸۰ میلی گرم بر لیتر، زمان ۶۰ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزودن نانوذرات غیرآلی به غشا اثر مثبت بر روی جذب آن‌ها می‌گذارد. این یک پدیده‌ی بسیار معمولی است و برای تمامی نانوذرات غیرآلی مشاهده می‌شود. همانگونه که مشاهده می‌شود، غشای M1، M2، M3 و M4 جذب مطلوبی دارند، در حالی که این توانایی بالا برای غشای M4 افزایش می‌یابد که مقدار جذب آن ۹۲/۴۵٪ می‌شود. افزودن ذرات اکسید فلزی شبیه دی اکسید تیتانیوم، حفره‌های سطحی را بزرگ می‌کند. عبور از حفره‌های بزرگ برای فلز جیوه راحت‌تر بوده و به همین دلیل غشاهایی که بارگذاری بیشتری شده اند دارای جذب قوی‌تری می‌باشند.



شکل ۸: درصد حذف جیوه در برای غشاهای با غلظت‌های مختلف نانوذرات دی اکسید تیتانیوم

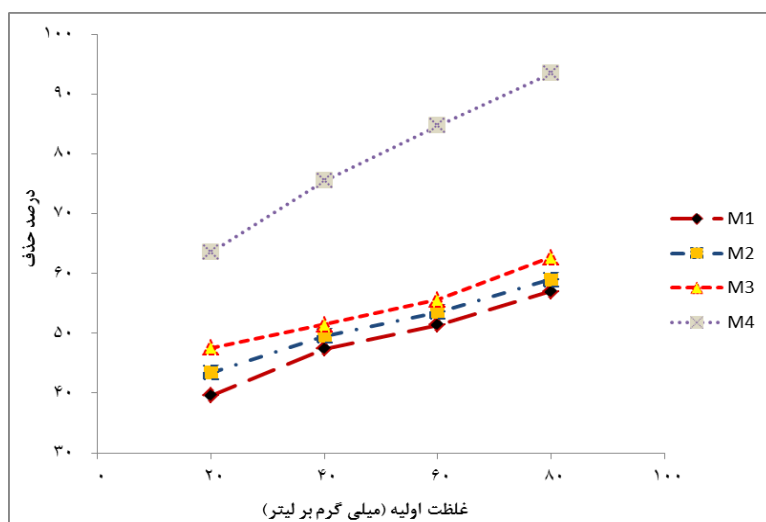
در تحقیقی در سال ۲۰۱۵ کاربرد غشای اسمز معکوس در حذف جیوه از پساب صنایع پالایشگاهی را مورد بررسی گرفت. بدین منظور تاثیر متغیرهای فشار (۵، ۷، ۹ و ۱۱ بار)، متغیرهای pH (۹، ۶، ۳ و ۱۱) و تغییرات غلظت فلز جیوه (۱، ۲، ۴، ۸ و ۱۶ میلی گرم در لیتر) بر راندمان حذف سیستم بررسی گردید و از میان این متغیرها در هر یک از مراحل فوق با توجه به راندمان حذف جیوه، و همچنین پارامترهای دی، EC، TDS، COD و کدورت شرایط عملکردی بهینه بدست آمد عملکرد غشای اسمز معکوس در فشار ۷ بار و همچنین در pH برابر ۹ از منظر کیفیت آب خروجی و همچنین مزایای اقتصادی سیستم بهینه بود. در این شرایط راندمان حذف برای جیوه برابر ۹۷/۵۰٪، برای COD برابر ۹۹/۷۵٪ و میزان راندمان حذف TDS نیز برابر ۹۳/۲۹٪ ثبت گردید (Ghadak et.al, 2015).

شکل ۹ درصد حذف فلز جیوه در زمان‌های مختلف برای غشاهای متفاوت در شرایط عملیاتی pH برابر با ۸ (بهینه)، فشار ۱ بار، غلظت اولیه جیوه ۸۰ میلی گرم بر لیتر و دمای ۲۵ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان فرآیند غشایی درصد حذف جیوه با غشاهای مختلف افزایش می‌یابد که البته برای غشا M4 روند افزایشی در سطح بالاتری قرار دارد. درصد حذف جیوه با گذشت زمان بالای ۴۵ دقیقه روند کاهشی می‌یابد. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه ۹۳/۴۹ در زمان ۴۵ دقیقه برای غشا M4 بدست آمد.



شکل ۹: تغییرات میزان حذف جیوه با گذشت زمان بوسیله غشاهای متفاوت

شکل ۱۰ درصد حذف فلز جیوه در غلظت‌های اولیه متفاوت به وسیله غشاهای مختلف در شرایط عملیاتی pH برابر با ۸، فشار ۱ بار، زمان ۴۵ دقیقه و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت اولیه محلول جیوه برای همه غشاهای مقدار درصد حذف جیوه افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار درصد حذف جیوه به وسیله غشاهای در غلظت اولیه ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر بدست می‌آید. در این آزمایش بیشترین مقدار حذف جیوه مربوط به غلظت اولیه ۸۰ میلی‌گرم بر لیتر با غشای M4 می‌باشد که این مقدار ۹۳/۴۹ درصد بدست آمد.



شکل ۱۰: تغییرات میزان حذف جیوه در غلظت‌های اولیه جیوه بوسیله غشاهای مختلف

در سال ۲۰۱۶ در پژوهشی حذف جیوه (Hg^{2+}) از محیط‌های آبی توسط نانولوله‌های کربنی چند جداره پوشش داده‌شده با اکسید آهن را مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌های این تحقیق نشان داد که pH خنثی نسبت به pH های اسیدی و قلیایی برای حذف جیوه مناسب‌تر است. همچنین نتایج نشان داد بهترین سرعت اختلاط، ۱۵۰ دور در دقیقه می‌باشد. زمان تماس ۶۰ دقیقه، زمان مناسبی است. در این مدت زمان، می‌توان به حذف ۹۳ درصدی جیوه بسته به نانو کامپوزیت اضافه‌شده دست یافت (Khodabakhshi et.al, 2016).

نتیجه گیری

غشای نانوکامپوزیت پلی سولفون- دی اکسید تیتانیوم با استفاده از ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی دی اکسید تیتانیوم به روش جدایش فازی ساخته شده است و مشخصات غشا شامل ساختار غشا، ضریب برخورد با آب، زبری سطح غشا، حضور نانوذرات در سطح غشا و عملکرد غشا برای عبور آب خالص بررسی و با غشای پلی سولفون خالص مقایسه گردیده است. غشای ساخته شده برای حذف جیوه از آب در فرآیند الترافیلتراسیون مورد استفاده قرار گرفت و عملکرد غشا با غشای پلی سولفون خالص مقایسه گردید. نتایج نشان داد که غشای نانوکامپوزیت دارای زبری سطح بیشتری نسبت به غشای پلی سولفون خالص می باشد که بدلیل تجمع نانوذرات در سطح غشا می باشد. همچنین بدلیل آبدوستی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم، زاویه تماس با آب غشای نانوکامپوزیت کمتر از غشای پلی سولفون خالص است. تصاویر SEM نشان داد که با افزودن نانوذرات به محلول پلیمری ضخامت ساختاراسفنجی غشای در لایه زیرین بیشتر شده است که بدلیل افزایش ویسکوزیته محلول پلیمری می باشد. همچنین حضور نانوذرات در سطح غشا با آزمون EDAX اثبات گردید.

- روند شار عبور آب خالص از هر دو غشا در ابتدا با افزایش زمان کاهش یافته و بعد از مدتی تقریباً ثابت می گردد. در انتهای فرآیند و بعد از گذشت زمان ۶۰ دقیقه شار عبور آب از غشای پلی سولفون خالص تقریباً $148 \text{ (Lm}^{-2}\text{h)}$ و شار عبور آب از غشاهای نانوکامپوزیت M1، M2، M3 و M4 به ترتیب ۲۰۷، ۴۲۰ و $650 \text{ (Lm}^{-2}\text{h)}$ می باشد.

- با افزایش pH از ۲ تا ۸ درصد حذف جیوه افزایش می یابد. با افزایش بیشتر pH از ۸ تا ۱۰ میزان حذف با شیب کم روند کاهشی پیدا می کند.

- با افزودن نانوذرات غیرآلی به غشای M1، M2، M3 و M4 جذب مطلوبی دارند، در حالی که این توانایی بالا برای غشای M4 افزایش می یابد که مقدار جذب آن ۹۲/۴۵٪ شده است. افزودن ذرات اکسید فلزی شبیه دی اکسید تیتانیوم، حفره های سطحی را بزرگ می کند. عبور از حفره های بزرگ برای فلز جیوه راحت تر بوده و به همین دلیل غشاهایی که بارگذاری بیشتری شده است دارای جذب قوی تری می باشند.

- با گذشت زمان فرآیند غشایی درصد حذف جیوه با غشا M4 روند افزایشی پیدا کرده است که درصد حذف جیوه با گذشت زمان بالای ۴۵ دقیقه روند کاهشی می یابد. بیشترین مقدار درصد حذف جیوه ۹۳/۴۹ در زمان ۴۵ دقیقه حاصل گردیده است.

- با افزایش غلظت اولیه محلول جیوه برای همه غشاها مقدار درصد حذف جیوه افزایش می یابد که بیشترین مقدار درصد حذف جیوه به وسیله غشاها در غلظت اولیه ۸۰ میلی گرم بر لیتر حاصل شده است. در این آزمایش بیشترین مقدار درصد حذف جیوه مربوط به غلظت اولیه ۸۰ میلی گرم بر لیتر با غشای M4 می باشد که این مقدار ۹۳/۴۹ درصد حاصل شده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس به خاطر حمایت هایی که در تمام زمینه ها انجام دادند، تشکر و قدردانی می کنند.

منابع

- Al-Amoudi, A, Lovitt, R.W. 2007. Fouling strategies and the cleaning system of NF membranes and factors affecting cleaning efficiency. *Journal of Membrane Science*, 303(4), 428 .
- Khodabakhshi, A, Asghareyan, H, Fdaei, A, Sedehi, M. 2016. Removal of mercury (Hg^{+2}) from aqueous solutions by Coating multiwalled carbon nanotubes with iron oxide. *Journal of Shahrekord University of Medical Sciences*, 17(6), 33-44 .
- Norman, A.G.H, Li, N, Winston Ho, W.S, Matsuura, T. 2008. *Advanced Membrane Technology and Applications*. John Wiley & Sons, 23(3), 23-31 .
- Bouazizi, A, Breida, M, Achiou, B, Ouammou, M, Ignacio, J, Abdelah, C, Saad, A, Younssi, A. 2017. Removal of dyes by a new nano-TiO₂ ultrafiltration membrane deposited on low-cost support prepared from natural Moroccan bentonite. *Applied Clay Science*, 149(4), 127-135 .
- Behrouzi Dehno, H. 2016. Removal of lead metal from water using titanium dioxide/polysulfone composite matrix ultrafiltration membrane, dissertation. Non-State,

- Islamic Azad University, (Gachsaran Branch- Faculty of Chemical Engineering), 1. (In persain).
- Emadzadeh, D, Lau, W.J, Matsuura, T, Rahbari-Sisakht, M, Ismail, A.F. 2014. A novel thin film composite forward osmosis membrane prepared from PSf-TiO₂ nanocomposite substrate for water desalination. *Chemical Engineering Journal*, 273(4), 70-80 .
 - Ghadak, G.H, Fardi, A, Mirbagheri, S.A. 2015. Application of reverse osmosis membrane for mercury removal from refinery wastewater. *Article 7*, 15(2), 91-101 .
 - Nath, K. 2008. *Membrane Separation Processes*, Prentice Hall of India Private Limited. New Delhi, 43(4), 34 .
 - Kouzarian Farahani, S, Hulk, Farah, S, Hosseini, S. M. 2015. Purification of biodiesel produced from waste oil using a polyether sulfone-based nano-composite membrane'. *Journal of Proceeding of New Processing*, 15(5), 192-200. (In persain) .
 - Parisa Daraei, Sayed Siavash Madaeni, Negin Ghaemi, Ehsan Salehi, Mohammad Ali Khadivi, Rostam Moradiand, Bandar Astinchap. (2012). Novel polyethersulfone nano composite membrane prepared by PANI/Fe₃O₄ nanoparticles with enhanced performance for Cu(II) removal from water. *Journal of Membrane Science*, 42(3), 250-259 .
 - R. Jamshidi Gohari, W.J. Lau, T. Matsuura, A.F. Ismail. (2013). Fabrication and characterization of novel PES/Fe-Mn binary oxide UF mixed matrix membrane for adsorptive removal of As(III) from contaminated water solution. *Separation and Purification Technology* 54(4), 64-72 .
 - R.H. Perry, D.W. Green. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, in, McGraw-Hill. 22-37 .
 - Baker., R.W. (2004). Overview of Membrane Science and Technology, in: *Membrane Technology and Applications*. John Wiley & Sons, 22(3), 1-14 .
 - S.C. Charles Liu. Jennifer Hayes, Tom Caothuy. (2006). *Membrane Chemical Cleaning: From Art to Science*. Pall Corporation, 21(3), 43 .
 - V Vatanpour, et al. (2012). TiO₂ embedded mixed matrix PES nanocomposite membranes: influence of different sizes and types of nanoparticles on antifouling and performance. *Desalination*, 4(3), 19-29 .
 - W.J. Lau, S. Gray, T. Matsuura, D. Emadzadeh, J. Paul Chen, A.F. Ismail. (2015). A review on polyamide thin film nanocomposite (TFN) membranes: History, applications, challenges and approaches. *Water Research*, 80(4), 306-324 .

مدل‌سازی بهینه پاسخ فرکانسی اولیه در بازار برق با تسویه همزمان انرژی و خدمات جانبی

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۱/۲۴

محمد رضا نیک فرجام^{*}، عبدالرضا توکلی^۱

چکیده

بعد از دست دادن رفتن ناگهانی واحد حرارتی از سیستم تولید عدم تعادل در بین تولید و بار سیستم ایجاد می شود که افت فرکانس شبکه می شود. ذخیره اینرشیال در واقع شیب منفی افت اولیه فرکانس بعد خروج واحد را محدود می کند و رزرو سریع اولیه و ثانویه شامل رزرو چرخان و غیرچرخان می باشد که وظیفه صفر نمودن شیب متحنی افت فرکانس و بازگرداندن به حالت پایدار زیر مقدار نامی و در نهایت به مقدار نامی بعد ۱۰ الی ۱۵ دقیقه را دارند. این مقاله در واقع مدل تحلیلی برای خدمات پاسخ فرکانسی نامبرده را بر اساس قابلیت گاورنر و اینرسی هر یک از واحدهای نیروگاهی تحت شرایط بازار اشتراکی با تسویه همزمان انرژی و رزرو ارائه می کند. بمنظور تایید کارایی و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی مطالعات شبیه سازی بر روی یک شبکه تست ۴-باسه بکار گرفته می شود. در نهایت، نتایج مفهومی حاصله از مطالعات ارائه می گردد.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی بهینه پاسخ فرکانسی، بازار برق، عدم قطعیت و ارزیابی قابلیت اطمینان تسویه همزمان انرژی و خدمات جانبی

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لاهیجان، گروه مهندسی برق، لاهیجان، ایران

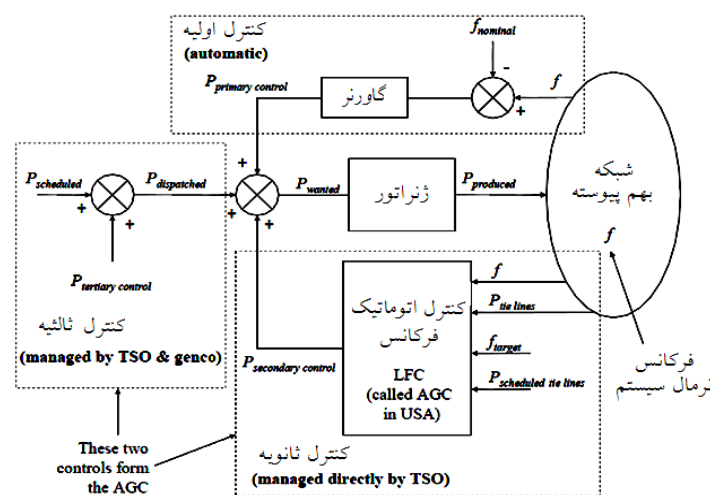
*mr.nikfarjam1983@gmail.com

فرکانس الکتریکی اتصالات سنکرون باید تا حد ممکن نزدیک به سطح برنامه ریزی شده (به طور نامی ۵۰ یا ۶۰ هرتز) برای اطمینان از قابلیت اطمینان و امنیت سیستم قدرت حفظ شود. پاسخ فرکانسی اولیه نیز همچنین به نام ذخیره کنترلی فرکانس اولیه [۱] و رزرو پاسخگو فرکانس [۲] شناخته می شود که در واقع ظرفیت موجود برای پاسخ اتوماتیک محلی به تخطی فرکانسی از طریق گاورنرهای سرعت توربین و تقاضای پاسخگو فرکانس است که برای مقابله با انحرافات فرکانس تنظیم می شود و پایداری فرکانس را فراهم می کند. اینرسی سنکرون برای کاهش دادن سرعت کاهش فرکانس مورد نیاز است. پاسخ سریع فرکانسی اولیه گاورنر ماشین و اینرسی سنکرون برای محدودسازی مقدار فرکانس قبل از عملکرد رله های فرکانس پایین قطع بار یا رله های محافظتی فرکانس بالا-پایین یا رسیدن به فرکانس های ناپایدار که به طور بالقوه منجر به خاموشی می شود، مورد نیاز است. یک جرم چرخشی، انرژی جنبشی را متناسب با ممان اینرسی و مجذور سرعت زاویه ای خود ذخیره می کند. اگر از دست دادن رفتن ناگهانی تولید از سیستم به وجود آید باعث ایجاد عدم تعادل در تولید و بار می شود، رفتار فیزیکی ذاتی ماشین های دوار این است که از این انرژی جنبشی مکانیکی برای بازگرداندن تعادل بین تولید و بار استفاده می کنند. معنی آن این است که این ثابت بر روی انرژی جنبشی ماشین آلات دوار منتج به کند شدن ژنراتورهای سنکرون و در نتیجه یک افت در فرکانس می شود. اینرسی توسط هم ژنراتورها و هم موتورهای فراهم می شود. گاورنر یک کنترل کننده بازخورد محلی است که فرکانس سیستم را حس می کند و بر روی دریچه بخار (آب، گاز) توربین ژنراتور عمل می کند. گین حلقه بازخورد به طور معمول مشخصه دروپ گاورنر نامیده می شود و کسری از ظرفیتی را مشخص می کند که گاورنر در پاسخ برای یک انحراف فرکانس داده شده در حالت پایدار استفاده می کند. تفاوت بین توان مکانیکی ورودی و الکتریکی خروجی ژنراتور در طول بهره برداری عادی کوچک است و فرکانس سیستم نزدیک به مقدار برنامه ریزی شده است اما اگر از دست دادن ناگهانی تولید رخ دهد، تفاوت بین آنها قابل توجه می شود، فرکانس شروع به کاهش می کند و گاورنرها با افزایش قدرت مکانیکی پاسخ می دهند و مجدداً قدرت دوباره به تعادل می رسد. از زمان تجدید ساختار صنعت برق، بازارهایی برای ارائه خدمات جانبی رقابتی مختلف نظیر پاسخ فرکانسی رزرو اولیه، ثانویه و ثالثیه طراحی شده اند که در این مقاله مدلسازی پاسخ فرکانسی تحت شرایط بازار اشتراکی با تسویه همزمان انجام خواهد شد. با توجه به اهمیت بحث تا کنون مطالعات زیادی در حوزه پاسخ اولیه فرکانسی و ثانویه و ذخیره چرخان به عنوان پشتوانه قابلیت اطمینان سیستم انجام شده است بعنوان مثال در مرجع [۳] یک معیار کفایت پاسخ اولیه را با توجه به اطلاعات زمان نادیر برای فرکانس به صورت تاریخی تعریف می کند. یک شبیه سازی نشان داد که پاسخ فرکانسی سازمان قابلیت اطمینان الکتریکی امریکای شمالی برای بار ۳۴ گیگاواتی مناسب است و تولید باد ۱۴ گیگاواتی کافی است. در مرجع [۴]، یک گزارش برای پاسخ فرکانسی سیستم انگلیس U.K. ارائه شده است. این گزارش تاثیر هم اینرسی و هم قابلیت گاورنر را بواسطه یکپارچه سازی باد با توجه به قابلیت سیستم باد برای فراهم آوردن ممان مصنوعی و پاسخ فرکانسی تست می کند و نتایج نشان می دهد که تعاریف فعلی پاسخ اولیه بر اساس الزامات ظرفیتی برای تضمین کفایت کافی نیستند. در مرجع [۵]، برنامه ریزی خطی پیچیده برای فرمولاسیون برنامه ریزی اشتراکی واحدها که بهره برداری سیستم را توسط برنامه ریزی تولید، ذخیره آماده به خدمت-چرخان و پاسخ فرکانسی سریع مستقل از اینرسی به هنگام عدم قطعیت های شبکه مربوط به تولید توربین بادی خروج واحدها بهینه میکند، پیشنهاد شده است. در مرجع [۶]، مجموعه ای از شرایط را برای اطمینان از کفایت PFR در همه زمانها (خصوصاً در طول دوره های با نفوذ بالای تولید بادی و تقاضای بار کم) از طریق دستورالعمل های دیسیپلینار ایجاد خواهد کرد. برای شرایط این اطمینان را ایجاد خواهد کرد که با توجه به حداکثر خروج تولید فرکانس پایین تر از حد معینی افت نخواهد کرد، مدلسازی مذکور بر اساسی یک تابع از رمپ ریت پاسخ گاورنر هر یک از واحدها و اینرسی سیستم انجام شده است. در مرجع [۷] انگیزه اجرای بازار پاسخ فرکانسی اولیه (PFR) را در بازارهای برق مبتنی بر حوضچه بازسازی شده و همچنین طراحی بازار که انگیزه های مناسب را برای ارائه پاسخ به صورت قابل اعتماد ایجاد می کند را مورد بحث قرار می دهد. اما تمرکز اصلی این مقاله در واقع ارائه مدل تحلیلی برای خدمات پاسخ فرکانسی نامبرده را بر اساس قابلیت گاورنر و اینرسی هر یک از واحدهای نیروگاههای حرارتی تحت شرایط بازار اشتراکی با تسویه همزمان انرژی و رزرو می باشد. سازماندهی مابقی مقاله به ترتیب ذیل می باشد: ابتدا در بخش دوم، مفهوم سرویس خدمات جانبی اولیه، ثانویه و ثالثیه برای کنترل فرکانس بحث می گردد. سپس، در بخش سوم، فرمولاسیون ریاضیاتی مدل پاسخ فرکانسی پیشنهادی تحت شرایط بازار برق با تسویه همزمان ارائه می گردد و در بخش چهارم، مطالعات شبیه سازی بمنظور اعتبارسنجی بر روی یک شبکه ۴-باسه بکار گرفته شده است و در بخش پنجم به ارائه حاصل از نتایج شبیه سازی خواهیم پرداخت.

۲- مفهوم سرویس خدمات جانبی اولیه، ثانویه و ثالثیه برای کنترل فرکانس

ژنراتورها و سیستم کنترلی آنها، ویژگی های متنوعی جهت مشارکت در بهره برداری ایمن از سیستم قدرت بهنگام وقوع اغتشاش در شبکه دارا می باشند. این ویژگی ها شامل تنظیم فرکانس، تنظیم ولتاژ بواسطه نگهداری ذخیره توان اکتیو و راکتیو می

باشد. با تجدید ساختار در صنعت برق و معرفی بازارهای رقابتی برای انرژی الکتریکی، تعریف بازار سرویس های جانبی با هدف حفظ امنیت و کیفیت منبع تغذیه در فضای جدید ضرورت یافت. بخصوص کنترل فرکانس، که نیازمند نگهداری مقدار معینی ذخیره توان اکتیو (ذخیره بهره برداری) است، تا اینکه سیستم در همه زمان ها قادر به حفظ تعادل بین تولید و بار باشد. در عمل به سرویس های ذخیره متفاوتی جهت پاسخ به انواع مختلفی از رخدادهای احتمالی، در بازه های زمانی مختلف، نیازمند هستیم. تنظیم فرکانس معمولا شامل سه سطح کنترلی می باشد که بترتیب سطوح اولیه، ثانویه و ثالثیه نامیده می شوند که هر یک از سطوح کنترلی مطابق شکل (۱) تعریف می شوند. کنترل اولیه، کنترل اتوماتیک محلی که ذخیره توان اکتیو را بر خلاف تغییر فرکانس به سیستم تزریق می کند. فرض بر این است که رزرو اولیه با نرخ بسیار سریع برای برقراری تعادل بین تولید و بار و پایدارسازی فرکانس سیستم در مدت ۵ تا ۱۰ ثانیه توسعه یافته و می تواند برای چندین دقیقه تا دسترس پذیری رزروهای با پاسخ کندتر (ثانویه و ثالثیه) این تعادل را حفظ نماید. کنترل ثانویه، کنترل اتوماتیک مرکزی (AGC) ذخیره توان اکتیو را به منظور بازایی فرکانس و تنظیم مجدد برنامه مبادلات توان در مقدار مطلوب به سیستم تزریق می کند که پاسخ زمانی حدود ۱ دقیقه دارا می باشد. کنترل ثالثیه، تغییرات دستی توزیع مجدد بار و به مدار آمدن بعضی واحدهای تولیدی به منظور بازایی ذخیره ثانویه و فرکانس و همچنین تنظیم مجدد برنامه مبادلات توان به مقدار مطلوب، که در صورت ناکافی بودن ذخیره کنترلی ثانویه سیستم در مدت چندین دقیقه دسترس پذیر می شوند.



شکل ۱: سطوح کنترلی پاسخ فرکانسی در یک سیستم قدرت [۸]

معمولا، چندین مرحله از رفتار پاسخ فرکانسی پس از یک رویداد احتمالی وجود دارد که بواسطه عدم تعادل قدرت در یک شبکه ایجاد می شود، مرحله اول سرویس پاسخ اینرسی IR است که آزاد کننده ذاتی انرژی در ماشین های سنکرون است. به دنبال این مرحله سرویس پاسخ اولیه PFR برای پایدارسازی فرکانس به یک مقدار حالت دائمی با خطای مجاز از مقدار اسمی آن است. بزرگی و زمان استقرار این دو سرویس بر روی بیشترین افت فرکانس یا فرکانس نادیر سیستم تاثیر می گذارد، که نقطه حداقل فرکانس در پاسخ فرکانسی شبکه است این نقطه مربوط به پایداری فرکانسی شبکه است. پس از آن پاسخ ثانویه فرکانس SFR است که به نظر می رسد که PFR را تقلیل می دهد، و سپس، پاسخ فرکانس ثالثیه TFR دوباره تولید را برنامه ریزی می کند. بیان نرخ تغییر فرکانس ROCOF و تنها به عنوان یک شماره مطلق، با معنای نرخ سقوط فرکانس از نرمال ارائه می شود این در حالی است که بارها و میراسازی آنها بر نوسانات فرکانس، ثابت اینرسی H و ویژگی قدرت/فرکانس ژنراتورها مستقیما بر مشخصه فرکانسی شبکه تاثیر گذار می باشد. گاورنر، یک کنترل کننده بازخورد محلی است که فرکانس سیستم را حس می کند و بر روی دریچه بخار (آب، گاز) توربین ژنراتور عمل می کند. گین حلقه بازخورد به طور معمول مشخصه دروپ گاورنر نامیده می شود و کسری ظرفیتی گاورنر را مشخص می کند که گاورنر در پاسخ به آن برای یک انحراف فرکانس داده شده در حالت پایدار توسعه می دهد. گاورنرها دارای باند مرده فرکانسی برنامه ریزی شده بعضا باند مرده کوچکتر از ۳۶ مگاهرتز یا برابر آن دارد. معمولا کفایت PFC به عنوان توانایی سیستم برای جلوگیری از افت فرکانس سیستم طی بازه زمانی نادیر (هرتز) fNAD پایین آمدن به زیر حد مشخص fMIN (هرتز)، اشاره می کند. تنظیم حد پایین فرکانس سیستم در مدلسازی ها معمولا متناظر با بالاترین آستانه فعالسازی رله های با عملکرد حداقل فرکانس می باشد. برای فریم زمان 5-30 PFR (ثانیه) دستورالعمل دیسپچینگ می تواند ثابت در نظر گرفته شود. رمپ ریت های کنترل اتوماتیک تولید بر حسب مگاوات بر دقیقه هستند و بنابراین

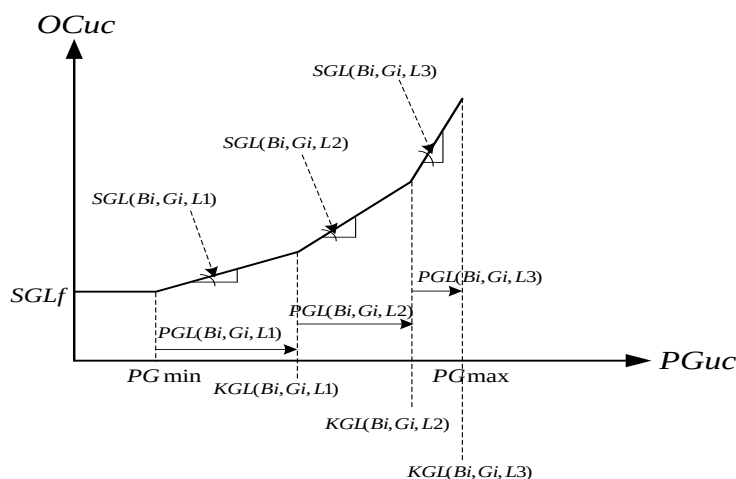
پاسخ فرکانسی AGC در بازه زمانی PFR تقریباً ثابت می باشد. سپس، دینامیک فرکانس سیستم بستگی به لختی، ممان اینرسی و غیره دارد [۹].

۳- فرمولاسیون مدل پاسخ فرکانسی پیشنهادی تحت شرایط بازار برق

مدل برنامه ریزی اشتراک واحدهای نیروگاهی مقید به امنیت کلاسیک SCUC با استفاده از تکنیک حل برنامه ریزی مختلط صحیح خطی MILP پیشنهاد کردیم. محدودیت نرخ شیب افزایش و کاهش تولید و محدودیت‌های انتقال در هر دو شرایط عادی و احتمالی خروج اجباری را با استفاده از یک پخش بار DC مبتنی بر سناریو پردازی مدل می کند. تابع هدف در (۱) نشان داده شده است. ورودی CR می تواند برای هزینه های خارجی پیشنهاد شده (به عنوان مثال، کسانی که فراتر از هزینه فرصت از دست رفته) برای تامین ظرفیت رزرو، و در مورد P10، هزینه برای فعال کردن گاورنر اجازه دهد. این مدل همچنین از هزینه های غیرقابل انعطاف برای هر دو انرژی و ذخیره استفاده می کند [10]:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^{NT} \{VOLL * ENS_t + \sum_{\gamma=1}^{NR} VOIR_{\gamma} * IR_{t,\gamma} + \sum_{i=1}^{NG} [C_i^E(u_{i,t}, u_{i,t-1}, P_{i,t}) + \sum_{\gamma=1}^{NR} C_i^R(Pres_{i,t,\gamma}, \gamma_{i,t})]\} \quad (1)$$

اما در سیستم قدرت با روش بهره برداری سستی، در برنامه SCUC حداقل نمودن هزینه کلی تولید انرژی توسط نیروگاه های حرارتی مد نظر قرار می گرفت. که این هزینه ها شامل هزینه های راه اندازی، خاموشی، تولید انرژی الکتریکی واحدهای حرارتی و همچنین هزینه خریداری ذخیره چرخان از ژنراتورهای روشن شبکه می شد. هزینه بهره برداری از واحدهای حرارتی، یک تابع چند جمله ای درجه دوم از میزان تولید توان اکتیو ژنراتور می باشد که مستقیماً توسط نیروگاه ها مشخص می شود. در فضای بازار رقابتی برای هر دوره تسویه همزمان بازار روزانه انرژی و رزرو، لزوماً این هزینه ها بر هزینه های واقعی تولید انرژی نیروگاه های حاضر در بازار منطبق نمی باشد. معمولاً تولیدکنندگان قیمت پیشنهادی تولید انرژی و ذخیره چرخان خود را برای هر ساعت بازار روز آینده بترتیب به صورت بخش های افزایشی، بر مبنای هزینه های حاشیه ای تولید هر بخش و درصدی از بالاترین هزینه افزایشی پیشنهاد می دهند. شکل (۲) هزینه پیشنهادی قیمت-توان یک واحد حرارتی را در سه بخش برای حضور در بازار اشتراکی روز آینده نشان می دهد. بنابراین در حالت کلی هزینه بهره برداری واحدهای حرارتی در باسهای مختلف شبکه با توجه به انرژی تولیدی و هزینه های ثابت (فعالیت در حداقل توان تولیدی) مطابق بلوک روابط (۲) محاسبه می شود:



شکل (۲): تابع هزینه تکه ای خطی تولید توان اکتیو بر حسب هزینه های افزایشی

$$\begin{aligned}
OC_{uc}(Bi, Gi, t) &= A(Bi, Gi, ti) \times u_{TH}(Bi, Gi, ti) \\
&+ \sum_{K=L1}^{Li} (PGL(Bi, Gi, L, ti) \\
&\times SGL(Bi, Gi, L, ti)) \\
PGL(Bi, Gi, L, t) &\leq KGL(Bi, Gi, L, ti) \\
&- PG_{min-TH}(Bi, Gi), \quad Li = L1 \\
PGL(Bi, Gi, L, t) &\leq KGL(Bi, Gi, L, t) \\
&- KGL(Bi, Gi, L-1, ti), \quad Li \\
&= L2, \dots, NL-1 \\
PGL(Bi, Gi, L, t) &\leq PG_{max-TH}(Bi, Gi) \\
&- KGL(Bi, Gi, L-1, ti), \quad Li = NL \\
PGL(Bi, Gi, L, t) &\geq 0, \quad Li = 1, \dots, NL, \quad t \in T, \\
&Bi \in Bus, \quad Gi \in GENCOs \\
A(Bi, Gi) &= SGL.f(Bi, Gi) \times PG_{min-TH}(Bi, Gi), \quad t \in T, \\
&Bi \in Bus, \quad Gi \in GENCOs \\
PG_{TH}(Bi, Gi, ti) &= PG_{min-TH}(Bi, Gi).u_{TH}(Bi, Gi, ti) \\
&+ \sum_{K=L1}^{Li} (PGL(Bi, Gi, L, ti))
\end{aligned} \tag{2}$$

که $Nl(Bi, Gi, ti)$ تعداد کل بخش های پیشنهادی ظرفیت تولید برای فروش انرژی الکتریکی توسط واحد حرارتی، $PGL(Bi, Gi, L, ti)$ مقدار انرژی خریداری شده از هر بخش پیشنهادی توسط بازار اشتراکی، $KGL(Bi, Gi, L, ti)$ ماکزیم ظرفیت تولید انرژی در هر بخش پیشنهادی، پارامترهای $SGL(Bi, Gi, L, ti)$ و $SGL.f(Bi, Gi, L, ti)$ بترتیب هزینه افزایشی تولید انرژی متناظر با بخشهای پیشنهادی ظرفیت واحد حرارتی و هزینه ثابت فعالیت در کمترین سطح تولید انرژی می باشد. در حالت کلی سود حاصل از تامین ذخیره چرخان بر روی واحدهای حرارتی در باسهای مختلف شبکه مطابق نیاز بازار خدمات جانبی مطابق روابط (۳) و (۴) محاسبه می شود:

$$SR_{income-TH}(ti) = \sum_{b=1}^{Bi} \sum_{g=1}^{Gi} (sr_{genco-TH}(Bi, Gi, ti). SR_{Price-TH}(Bi, Gi, ti)) \tag{3}$$

$$sr_{genco-TH}(Bi, Gi, ti) \leq (PG_{max-TH}(Bi, Gi).u_{TH}(Bi, Gi, ti) - PG_{TH}(Bi, Gi, ti)) \tag{4}$$

محدودیت حداقل و حداکثر تولید توان اکتیو، توسط واحدهای حرارتی بعنوان یکی دیگر از قیود نیروگاهی مطرح است که تاثیر چشمگیری در برنامه ریزی روزانه مبادلات و تسویه بازار اشتراکی توان می گذارد. این محدودیت مطابق بلوک روابط (۵) مدل می شود:

$$\begin{aligned}
PG_{TH}(Bi, Gi, ti) \\
\geq PG_{min-TH}(Bi, Gi).u_{TH}(Bi, Gi, ti) \\
PG_{TH}(Bi, Gi, ti) \leq PG_{max-TH}(Bi, Gi).u_{TH}(Bi, Gi, ti)
\end{aligned} \tag{5}$$

برای محدود نمودن خسارات ناشی از تنش های مکانیکی در محرک اولیه واحدهای حرارتی به سبب راه اندازی و تعطیلی پی در پی، اغلب یک حداقل زمانی برای تعداد ساعتهایی که یک واحد حرارتی باید از هنگامی که راه اندازی می شود، به سیستم متصل باشد، وضع می کنند به طور معمول محدودیت مشابهی در مورد تعداد ساعتهایی که یک واحد از زمانی که تعطیل شده، باید بدون فعالیت بماند، نیز مقرر می شود. این حدود تضمین کننده فروکش کردن گرادیان دما در توربین نیروگاه است. بنابراین این محدودیت ها نیز با توجه به تاثیر قابل ملاحظه در برنامه ریزی تولید و روند تسویه بازار اشتراکی، باید در فرمولاسیون برنامه روتین UC در نظر گرفته شوند. محدودیت حداقل زمان روشن بودن واحد تولیدی حرارتی مطابق سه رابطه جبری زیر مدلسازی می شوند:

$$\begin{aligned}
G(Bi, Gi) \\
\sum_{tk=1}^{ti+UTi(Bi, Gi)-1} (1 - u_{TH}(Bi, Gi, tk)) = 0 \\
\sum_{tk=ti}^{ti+UTi(Bi, Gi)-1} u_{TH}(Bi, Gi, tk) \geq UTi(Bi, Gi). (u_{TH}(Bi, Gi, ti) - u_{TH}(Bi, Gi, ti-1))
\end{aligned} \tag{6}$$

$$G(Bi, Gi) + 1 \leq t_i \leq T - UTi(Bi, Gi) + 1 \quad (7)$$

$$\sum_{tk=ti}^T u_{TH}(Bi, Gi, tk) - u_{TH}(Bi, Gi, ti) + u_{TH}(Bi, Gi, ti - 1) \geq 0$$

$$T - UTi(Bi, Gi) + 2 \leq t_i \leq T \quad (8)$$

که $G(Bi, Gi)$ تعداد دوره هایی که واحد تولیدی حرارتی Gi واقع بر روی باس Bi در شبکه باید بواسطه محدودیت حداقل زمان روشنایی واحد در آغاز دوره برنامه ریزی ۲۴ ساعت جدید، به سیستم متصل بماند. این مفهوم طبق روابط زیر در فرمولاسیون روتین UC مدلسازی می شود:

$$G(Bi, Gi) = \text{Min} \left(T, \left((UTi(Bi, Gi) - \text{Ton}(Bi, Gi)) \cdot (1 - u_{TH}^0(Bi, Gi, ti)) \right) \right) \quad (9)$$

$\text{Ton}(Bi, Gi)$ تعداد دوره هایی که قبل از شروع برنامه ریزی ۲۴ ساعته جدید برای سیستم، واحد تولیدی Gi روی باس Bi در شبکه روشن بوده است و $UTi(Bi, Gi)$ حداقل تعداد دوره هایی که واحد تولیدی حرارتی باید پس از اینکه راه اندازی شد در وضعیت روشن متصل به سیستم باقی بماند که گاها این امر منجر به تولید زیانده واحدهای نیروگاهی خواهد شد. محدودیت حداقل زمان خاموشی واحد تولیدی حرارتی به طور مشابه با حداقل زمان روشن بودن، سه رابطه جبری را مطابق زیر برای فرمولاسیون روتین UC شامل می شود:

$$\sum_{tk=1}^{L(Bi, Gi)} u_{TH}(Bi, Gi, tk) = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{tk=ti}^{L(Bi, Gi) + 1} (1 - u_{TH}(Bi, Gi, tk)) \geq DTi(Bi, Gi) \cdot (u_{TH}(Bi, Gi, ti - 1) - u_{TH}(Bi, Gi, ti))$$

$$L(Bi, Gi) + 1 \leq t_i \leq T - DTi(Bi, Gi) + 1 \quad (11)$$

$$\sum_{tk=ti}^T 1 - u_{TH}(Bi, Gi, tk) - u_{TH}(Bi, Gi, ti - 1) + u_{TH}(Bi, Gi, ti) \geq 0$$

$$T - DTi(Bi, Gi) + 2 \leq t_i \leq T \quad (12)$$

که $Li(Bi, Gi)$ تعداد دوره هایی که واحد تولیدی حرارتی Gi واقع بر روی باس Bi در شبکه، باید بواسطه محدودیت حداقل زمان خاموشی واحد در آغاز دوره برنامه ریزی ۲۴ ساعت جدید، خاموش باقی بماند. این مفهوم طبق رابطه زیر در فرمولاسیون UC مدل می شود که اندیس $\text{Toff}(Bi, Gi)$ تعداد دوره هایی که قبل از شروع برنامه ریزی ۲۴ ساعته جدید برای سیستم، واحد تولیدی Gi روی باس Bi در شبکه خاموش بوده است و $DTi(Bi, Gi)$ حداقل تعداد دوره هایی که واحد تولیدی حرارتی باید پس از اینکه خاموش شد، در وضعیت خاموشی باقی بماند.

$$L(Bi, Gi) = \text{Min} \left(T, \left((DTi(Bi, Gi) - \text{Ton}(Bi, Gi)) \cdot (1 - u_{TH}^0(Bi, Gi, ti)) \right) \right)$$

ما شش مشخصه برای ارائه سرویس فرکانس اولیه PFR بر اساس الزامات قابلیت اطمینان بخش قبل و یک مشخصه برای ذخیره ثانویه معرفی کرده ایم. اولین ویژگی تضمین می کند که منابع به اندازه کافی اینرسی سنکرون تهیه کرده اند به طوری که بیشترین تغییر فرکانس به زمان از یک حد که می تواند باعث تحریک رله ROCOF و یا منجر به ناپایداری و یا تحریک UFLS شود تجاوز نمی کند. این محدودیت در (۱۴) نشان داده شده است:

$$\sum_{i=1}^{NG} \{u_{i,t} * H_i * S_i^{\max}\} + H_L^{\text{eq}} * L_t \geq I_A^{\text{Req}} - IR_{t, \text{Inertia}} \quad \forall t \in NT \quad (14)$$

ویژگی دوم این است که تضمین کند ظرفیت PFR کافی در دسترس باشد. همانطور که این محدودیت فقط الزام مبتنی بر ظرفیت است، آن سرعت پاسخ را در بر نمی گیرد. این محدودیت در (۱۵) نشان داده شده است. مشارکت منابع به این ظرفیت PFR در آینده مورد بحث قرار می گیرد. خصوصیت سوم برای این است که اطمینان حاصل شود

که PFR دارای یک تنظیم دروپی است که برای فرکانس پاسخ به اندازه کافی برای جلوگیری از تحریک UFLS و محدود کردن انحراف f^{ss} از مقدار نامی و همچنین عدم حساس بودن به فرکانس محدود کننده است.

$$\sum_{i=1}^{NG} P1_{i,t}^0 \geq P1_A^{0Req} - D * L_t * \frac{\Delta f_{max}}{f_0} - IR_{t,P10} \quad \forall t \in NT \quad (15)$$

معادلات (۱۶) تا (۲۲) سهم هر ژنراتور فراهم کننده ظرفیت PFR و حساسیت آن به فرکانس را شرح می دهند. معادله (۱۶) یک منحنی معادل دروپی را برای تبدیل به واحدهای Hz/MW ایجاد می کند. معادله (۱۷) با ظرفیت PFR از منحنی دروپی ژنراتور برابر است. سرویس PFR کامل باید در طول یک انحراف فرکانس ماکزیمم، مانند الزام اروپایی ۲۰۰ مگاهرتز در دسترس باشد. این الزام احتمالاً از الزامات اتصال گسترده متصل خواهد شد تا مانع از انحراف های فرکانس از رسیدن به سطح پایین حالت پایدار شود. معادله (۱۸) که متغیر عدد صحیح را تعیین می کند، نشان می دهد که آیا سقف واحد در دسترس برای ارائه تمام PFR آن است. معادله (۱۹) به همراه (۲۰) تضمین می کند که منابع سرویس PFR با سقف و گاورنرهای فعال شده دقیقاً برابر با رابطه منحنی دروپی آنها خواهد شد. اگر طراحی بازار نیز PFR را برای رخدادهای فرکانس بیش از حد مجاز در نظر بگیرد، یک معادله اضافی مشابه با این معادلات باید با تمرکز بر روی سقف در جهت منفی (یعنی بین P و P_{min}) اضافه شود. معادله (۲۰) نیازمند آن است که واحد باید به صورت آنلاین باشد تا گاورنر آن فعال شود. معادله (۲۱) برای واحدهایی که در مجموعه قرار دارند برابر با صفر است و از لحاظ فیزیکی قادر به فراهم کردن ظرفیت PFR نیستند (به عنوان مثال واحدهای با گاورنرهای همیشه قفل شده، واحدهای عملیاتی با حالت فلوئی توربین، حالت کنترل فشار لغزشی، نیروگاه های باد و خورشید فاقد توانایی های پیشرفته، واحدهای آبی تحت محدودیت جریان، و غیره). بنابراین، (۲۲-۳) نیز برابر صفر است، زمانی که باند مرده گاورنر واحد بیش از حد بزرگ است. داشتن یک باند مرده گاورنر که DB^{max} آن بیش از حد بزرگ برای اپراتور بازار همانند همان واحد دارای یک گاورنر غیر فعال است. فرضیه ای وجود دارد که DB^{max} برای تضمین انعطاف پذیری کمتر از یا برابر با Δf^{max} فراهم می کند:

$$R_i^{eq} = \frac{R_i * f_0}{P_i^{max}} \quad \forall i \in NG \quad (16)$$

$$P1_{i,t}^0 \leq \frac{Y_{i,t}}{R_i^{eq}} (\Delta f^{max} - DB_i) \quad \forall i \in NG, \forall t \in NT \quad (17)$$

$$P_{i,t} + \frac{1}{R_i^{eq}} (\Delta f^{max} - DB_i) \geq P_i^{max} Y_{i,t} - P_i^{max} X_{i,t} \quad \forall i \in NG, \forall t \in NT \quad (18)$$

$$P1_{i,t}^0 \geq \frac{X_{i,t}}{R_i^{eq}} (\Delta f^{max} - DB_i) - P_i^{max} (1 - Y_{i,t}) \quad \forall i \in NG, \forall t \in NT \quad (19)$$

$$Y_{i,t} \leq u_{i,t} \quad \forall i \in NG \quad \forall t \in NT \quad (20)$$

$$Y_{i,t} = 0 \quad \forall i \in G_{nogov} \quad \forall t \in NT \quad (21)$$

$$DB_i \leq DB^{max} + f_0 (1 - Y_{i,t}) \quad \forall i \in NG \quad \forall t \in NT \quad (22)$$

ویژگی چهارم این است که اطمینان حاصل شود که PFR به اندازه کافی سریع برای جلوگیری از تحریک UFLS باشد و به طور کامل در مدت زمان محدود (t^{ss}) برای اطمینان از پایداری و محدود کردن ریسک به کار رود. شکل (۳) فرایندی را برای ترکیب سرعت تحریک کردن و استفاده کامل از PFR در این طراحی بازار نشان می دهد. از آنجایی که پاسخ های منابع مستقل به دینامیک سیستم بستگی خواهد داشت، یک شبیه سازی دینامیکی (Dynamic Sim1) پس از SCUC اولیه اجرا می شود. آن از P و P_1^0, u, γ و دیاگرام های بلوک واحد مستقل، با یک دیاگرام تک بلوک اضافی که بیان کننده بقیه اتصالات، با فرض اینکه بقیه سیستم قادر به تامین نیازهای الزامات PFR خود خواهد بود. جزئیات واحد مستقل و "بقیه اتصالات" دیاگرام های بلوک محدود شده نیستند و می تواند به همان اندازه که اپراتور بازار انتخاب می کند، دقیق باشد. پس از اینکه شبیه سازی دینامیکی حل شود، الزامات (۲۳) و (۲۴) بررسی می شوند تا اطمینان حاصل شود که PFR به اندازه کافی در t^{nadir} و t^{ss} داده می شود:

$$\sum_{i=1}^{NG} P1_{i,t}^{ss} \geq P1_A^{ssReq} - LD^{ss} \quad \forall t \in NT \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} P1_{i,t}^{nadir} \geq P1_A^{nadirReq} - LD^{nadir} \quad \forall t \in NT \quad (24)$$

$P1^{nadir}$ بر اساس اولویت پاسخ برای زمان نادیر است و $P1^{ss}$ براساس چگونگی ارتباط اتصال باید به f^{ss} خود برسد. اگر تخطی ها وجود داشته باشد، شبیه سازی دینامیکی (Dynamic Sim2) یکبار برای هر واحدی که سرویس PFR آن در جواب

حل اولیه انتخاب نشده است ($\gamma_i=0$) اما قادر به تامین این سرویس می‌باشد تکرار می‌شود، بنابراین ($i \notin G_{nogov}$) از جمله آنهایی که خاموش هستند در حالیکه تنظیم $\gamma_i = 1$ انجام می‌شود و اگر آفلاین باشد، تنظیمات اولیه به شکل $u_i = 1$ و $P_i = P_i^{\min}$ تغییر می‌کند. فاکتورهای حساسیت مشارکت کننده مربوط به پاسخ حالت دائمی (۲۵) یا پاسخ نادیر (۲۶)، وابسته به محدودیت‌هایی که برآورده نشده اند هستند، از نتایج Dynamic Sim2 محاسبه می‌شوند، در حالیکه که حساسیت منابعی که بطور اصلی سرویس PFR فراهم می‌کنند (۲۶)، (۲۷) از Dynamic Sim1 محاسبه می‌شوند.

$$\alpha_{i,t}^{ss} = \left[\frac{P_{i,t}^{ss}}{P_{i,t}^0} \right] \text{ from Dynamic Sim2 } \forall i : \hat{\gamma}_{i,t} = 0 \quad \forall t \in NT \quad (25)$$

$$\alpha_{i,t}^{nadir} = \left[\frac{P_{i,t}^{nadir}}{P_{i,t}^0} \right] \text{ from Dynamic Sim2 } \forall i : \hat{\gamma}_{i,t} = 0 \quad \forall t \in NT \quad (26)$$

$$\alpha_{i,t}^{ss} = \left[\frac{P_{i,t}^{ss}}{P_{i,t}^0} \right] \text{ from Dynamic Sim1 } \forall i : \hat{\gamma}_{i,t} = 1 \quad \forall t \in NT \quad (27)$$

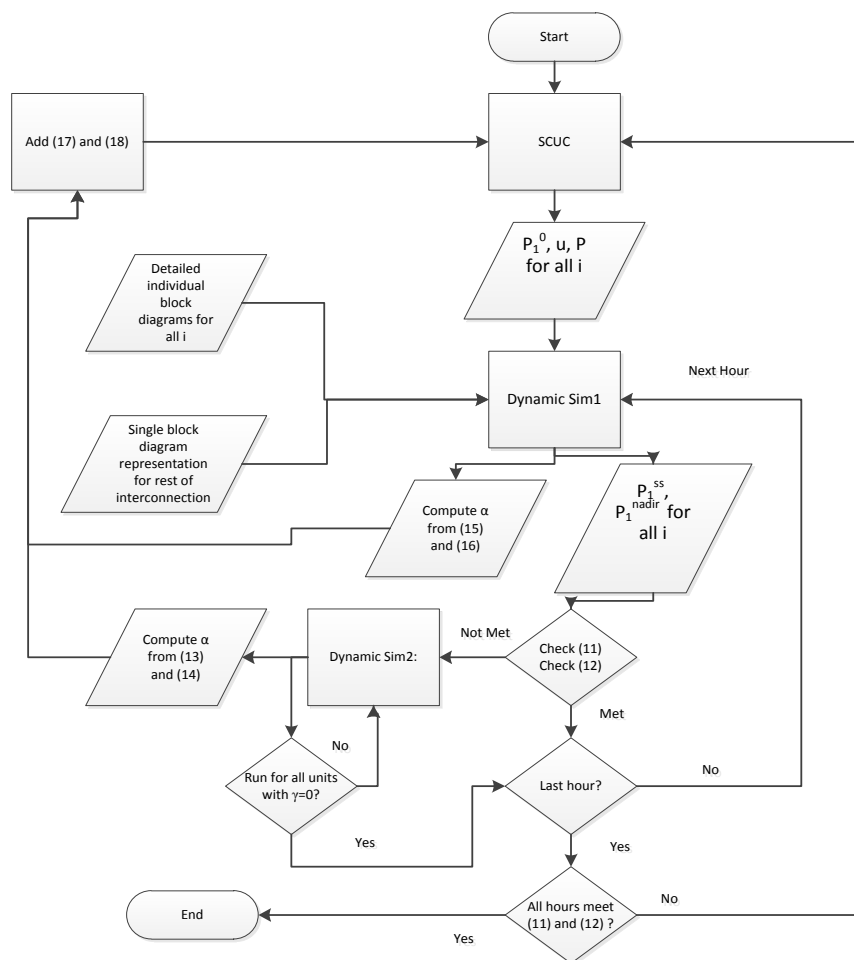
در روابط (۲۵) تا (۲۸)، $\hat{P}_{i,t}^0$ و $\hat{\gamma}_{i,t}$ و $P_{i,t}^0$ و γ مقادیری از نتایج حل اولیه SCUC هستند. معادلات جدید در حل بعدی مسئله SCUC در روابط (۲۹) و (۳۰) نشان داده شده است. این مشابه شبیه سازی تجزیه بندر برای حل SCUC با محدودیت های AC است، به جز اینکه در اینجا، برش‌ها به صورت تجربی محاسبه می‌شوند و برای هر ساعت اجرا می‌شود. اگر برای هر ساعت روابط (۱۵) و (۱۶) ارضاء شود، پس مسئله حل می‌شود:

$$\alpha_{i,t}^{nadir} = \left[\frac{P_{i,t}^{nadir}}{P_{i,t}^0} \right] \text{ from Dynamic Sim1 } \forall i : \hat{\gamma}_{i,t} = 1 \quad \forall t \in NT \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} \alpha_{i,t}^{ss} * P_{i,t}^0 \geq P_A^{ss \text{ Req}} - \alpha_{L,t}^{ss} * D * L_t * \frac{\Delta f^{\max}}{f_0} - IR_{t,P1ss} \quad \forall t \in NT \quad (29)$$

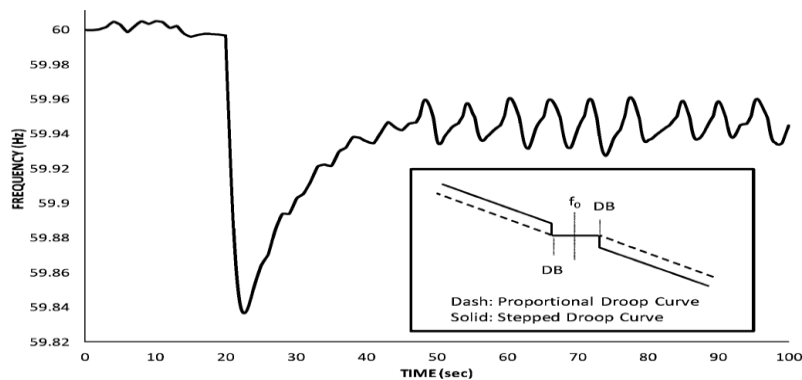
$$\sum_{i=1}^{NG} \alpha_{i,t}^{nadir} * P_{i,t}^{nadir} \geq P_A^{nadir \text{ Req}} - \alpha_{L,t}^{nadir} * D * L_t * \frac{\Delta f^{\max}}{f_0} - IR_{t,P1nadir} \quad \forall t \in NT \quad (30)$$

ویژگی پنجم این است که اطمینان حاصل شود که پاسخ PFR پایدار است و باعث ناپایداری یا رفتار فرکانس نوسانی نمی‌شود. این تنها با اجازه دادن به منحنی های دروپ تناسبی انجام می‌شود. شکل (۳) فلوچارت برای اطمینان از سرعت درستی پاسخ PFR نشان می‌دهد.

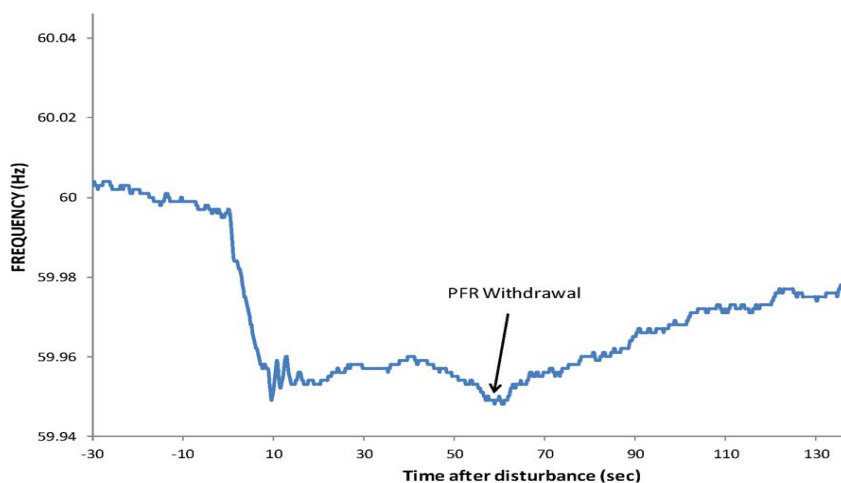


شکل (۳): فلوچارت برای اطمینان از سرعت درستی پاسخ PFR

برای نشان دادن اثرات اجازه دهید که منحنی‌های دروپ پله‌ای شکل (۴) که یک پاسخ دینامیکی شبیه سازی شده فرکانسی با تمام منابع با استفاده از منحنی دروپ پله ای است، نشان دهیم. تغییرات سیستم باعث ایجاد نوسان می‌شود زمانی که گاورنرهای پله ای وارد و خارج از باندهای مرده شان شدند. این شکل همچنین تفاوت بین یک منحنی دروپ پله‌ای و منحنی تناسبی را بطور واضح "پله" در توان نشان می‌دهد زمانی که فرکانس گاورنر از باند مرده عبور می‌کند. همانطور که دروپ های فرکانس پایین تر از باند مرده است، مقدار زیادی از توان به دلیل پله منحنی دروپ تزریق می‌شود. این امر موجب افزایش فرکانس می‌شود، که موجب افزایش فرکانس بالای باند مرده می‌شود و موجب کاهش شدید توان از PFR می‌شود و بدون هیچ گونه تاثیر میرایی واقعی ادامه می‌یابد. این چیزی است که می‌تواند این تاثیرات نوسان را ایجاد کند.



شکل (۴): پاسخ فرکانس شبیه سازی شده پس از اختلال با واحدهای پاسخ گاورنر منحنی دروپ پله ای و نشان دادن تناسب در برابر منحنی های دروپ پله ای



شکل (۵): شیب فرکانس دوم به دلیل خروج PFR

ششمین مشخصه این است که PFR پایدار را تضمین کند، بطوری که بعد از رسیدن به f_{ss} یک بهبود ثابت با هیچ خروجی از PFR قبل از ذخیره ثانویه برای بهبود و بازیابی فرکانس توسعه یابد. در طراحی بازار پیشنهاد شده که ما به حداقل زمان نیاز داریم که سرویس PFR باید پس از استقرار آن بدون خروج، در دسترس باشد. شکل (۵) یک رخداد از اتصال ایالات متحده شرقی را نشان می دهد که در آن منابع از PFR خارج می شوند و خطری همانند کاهش فرکانس ایجاد می کند در حالی که آن در حال بازیابی فرض شده است. در نتیجه، یک افت فرکانس دومی هم می تواند شکل بگیرد که می تواند به همان اندازه افت اولیه شدید باشد. خصوصیات پنجم و ششم هر دو قوانین را به مشوق ترجیح می دهند. می توان استدلال کرد که در هر دو مورد ممکن است در هنگام نقض هر یک از قوانین به پاسخ مقداری اضافه شود. به عنوان مثال، منحنی های دروپ پله ای با فرکانس معین، انرژی بیشتری را در مقایسه با یک منحنی دروپ تناسبی با همان باند مرده ارائه می دهند (شکل ۳). نیروگاه های توان بادی که یک پاسخ اینرسی مصنوعی را ارائه می دهند می توانند یک پاسخ سریع برای یک دوره کوتاه مدت ارائه دهند و سپس برای بازیابی انرژی برداشته شوند. هنگامی که در چنین شرایطی قرار داریم طرح های بازار باید مزایایی را در پیش بگیرند، در حالی که مانع از بروز معایب می شوند. اگر انرژی بیشتری مورد نیاز است و یک منبع با منحنی دروپ پله ای می تواند آن را در هزینه های پایین ارائه دهد، و تجزیه و تحلیل نشان می دهد که آن بر پایداری تاثیر نمی گذارد، پس از آن طراحی باید آن پاسخ را بگیرد. با چارچوب ساخته شده در فلوچارت شکل (۳)، می توان این ویژگی ها را به عنوان انگیزه های تشویقی پیاده سازی انجام داد. با این حال، برای سادگی ما این دو را به عنوان قوانین در طراحی بازارمان حفظ می کنیم. آخرین ویژگی این است که اطمینان حاصل شود که ذخیره ثانویه به اندازه کافی برای بازگشت فرکانس به مقدار نامی آن در یک زمان وجود دارد تا اطمینان حاصل شود که سیستم به سرعت به حالت عادی برگردد. پس از استقرار کامل PFR، ذخایر ثانویه به طور معمول پس از یک تاخیر ارائه می شود. محدودیت ذخیره ثانویه در (۵) تا (۳۱) نشان داده شده است. اینها محدودیت های رایج در تسویه بازار امروز است که اطمینان از ذخیره ثانویه کافی در دسترس است و می تواند فرکانس را به مقدار نامی در مدت محدودیت زمانی مورد نیاز t^{rec} برساند. از آنجا که تعریف ما از

ذخایر ثانویه به ذخایری اشاره می کند که فرکانس را به سطح نامی باز می گرداند، ذخایر ممکن است شامل ذخیره غیر چرخان از واحدهای راه اندازی سریع باشد که می توانند راه اندازی و همگام سازی با شبکه و انرژی را در یک دوره کوتاه مدت تهیه کند (به عنوان مثال ۱۰-۱۵ دقیقه). این در (۳-۳۱) نشان داده شده است. الزامات ثانویه کل در (۳۲) تا (۳۴) نشان داده شده است. در نهایت، (۳۵) تضمین می کند که مجموع انرژی هر واحد، PFR و ذخیره ثانویه چرخان از حداکثر ظرفیت آن فراتر نمی رود:

$$P_{i,t}^{spin} \leq u_{i,t} * t^{rec} * RR_i \quad \forall i \in NG \quad \forall t \in NT \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^{NG} P_{i,t}^0 + P_{i,t}^{spin} \geq P_A^{spinReq} + P_A^{0Req} - D * L_t * \frac{\Delta f^{max}}{f_0} - IR_{t,P2spin} \quad \forall t \in NT \quad (32)$$

$$P_{i,t}^{nspin} = (1 - u_{i,t}) * QSC_i \quad \forall i \in NG \quad \forall t \in NT \quad (33)$$

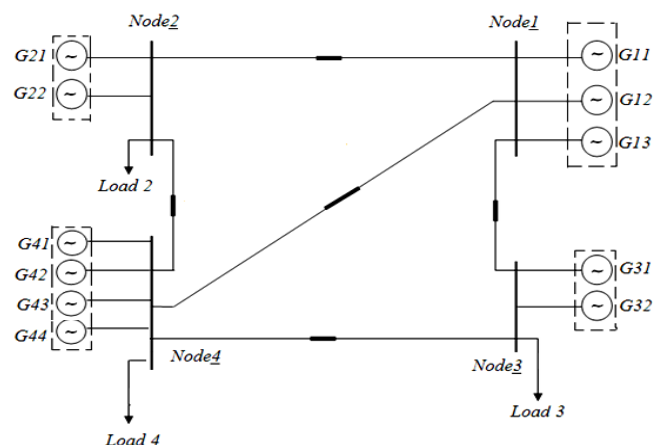
$$\sum_{i=1}^{NG} P_{i,t}^0 + P_{i,t}^{spin} + P_{i,t}^{nspin} \geq P_A^{spinReq} + P_A^{0Req} - D * L_t * \frac{\Delta f^{max}}{f_0} - IR_{t,P2nspin} \quad \forall t \in NT \quad (34)$$

$$P_{i,t} + P_{i,t}^0 + P_{i,t}^{spin} \leq u_{i,t} * P_i^{max} \quad \forall i \in NG \quad \forall t \in NT \quad (35)$$

مشارکت هر ناحیه متعادل می تواند از یک نسبت نواحی متعادل سازی بار و / یا تولید با اتصال متقابل باشد. الزامات اضافی می تواند بر اساس نیازهای قابلیت تحویل، و یا به عنوان مثال، سیستم هایی که در خطرات مختلف برای جزیره سازی هستند.

۴- مطالعات عددی و نتایج شبیه سازی

در این بخش، مطالعات شبیه سازی برای اعتبارسنجی و ارزیابی کارایی مدلسازی پیشنهادی در حوزه قابلیت اطمینان با هدف بهبود پاسخ فرکانسی اولیه (PFR) و ثانویه تحت شرایط بازارهای برق اشتراکی انجام می شود. که اطلاعات پایه در ارتباط با بازار و واحدهای حرارتی شامل گاورنر و رمپ ریت و غیره در ادامه ارائه شده است و نتایج حاصل از شبیه سازی برای سرویس های کنترل فرکانسی یک شبکه تست بحث می گردد. مطالعات سیستمی برای یک دوره زمانی بهره برداری مورد توجه قرار گرفته که برای دوره های بیشتر مدل پیشنهادی قابل بسط و توسعه دارا می باشد. سیستم قدرت ما یک شبکه ۴ باسه شامل BUS01, BUS02, BUS03, BUS04, است که ۱۱ ژنراتور را، G11, G12, G13, G21, G22, G31, G32, G41, G42, G43, شامل می باشد مجموع تقاضای سیستم ۶۵۰ مگاوات به صورت توان ثابت یا بار استاتیکی مورد توجه می باشد که البته قابلیت میراسازی فرکانس را دارا می باشد. انواع رزروهایی که برای بازگرداندن فرکانس سیستم در بازه زمانی مختلف بعد وقوع خروج اجباری یک واحد در شبکه داریم به صورت رزرو اینرشیال inertial، پاسخ فرکانسی اولیه سریع PFR، چرخان spin و غیر چرخان Non-spin و رزرو تا نادیر تایم p1nadir و حالت پایدار اولیه p1ss می باشد. ارزش کمبود هر نوع رزرو بترتیب ۱۰۰۰، ۲۵۰۰، ۴۰۰۰، ۳۰۰۰ و ۲۰۰۰ دلار بر مگاوات ساعت است. اطلاعات مربوط به قیمت هر خدمت رزرو در بازار خدمات جانبی مطابق جدول (۱) می باشد. در اینجا بازار انرژی و خدمات جانبی اشتراکی با تسویه به طور همزمان در نظر گرفته شده است قیمت تسویه بازار اشتراکی بر اساس گرانترین واحد موجود در بازار انرژی تعیین می گردد که البته کلیه ژنراتورها ملزم به ارائه ضرایب تابع هزینه خود به بهره بردار مستقل سیستم هستند که این اطلاعات در جدول (۴-۲) آمده است.



شکل (۶): سیستم قدرت ۴-باسه تست مورد مطالعه

جدول (۱): اطلاعات مربوط به قیمت هر خدمت در بازار خدمات جانبی

Bus(GENCO)	inertial	PFR	spin	Non-spin	p1ss	p1nadir
BUS01.G11	3.5	5	10.1	12	5	6
BUS01.G12	3.2	5	10.3	12	5	6
BUS01.G13	3.1	5	10.5	12	5	6
BUS02.G21	2.5	4	20.7	16.1	7	8
BUS02.G22	2.3	4	20.7	16.2	7	8
BUS03.G31	4.5	3	30.5	14.1	8	9
BUS03.G32	4.2	3	30.5	14.2	8	9
BUS04.G41	5.5	6	40.1	15.1	9	10
BUS04.G42	5.7	6	40.1	15.2	10	11
BUS04.G43	5.8	6	40.1	15.3	11	12
BUS04.G44	5.8	6	40.1	15.5	12	13

جدول (۲): ضرایب تابع هزینه تولید انرژی واحدهای حرارتی تسلیم شده به بازار انرژی

Bus(GENCO)	A \$	B (\$/MWh)	C (\$^2/MWh)
BUS01.G11	350	10	0.015
BUS01.G12	250	12	0.0250
BUS01.G13	200	14	0.03
BUS02.G21	180	18	0.032
BUS02.G22	180	18	0.035
BUS03.G31	150	20	0.038
BUS03.G32	150	20	0.038
BUS04.G41	150	25	0.04
BUS04.G42	150	25	0.042
BUS04.G43	150	25	0.045
BUS04.G44	150	25	0.048

نرخ خرابی سه ژنراتور متصل به باس ۱ شبکه ۵ خرابی در طی یکسال است و ژنراتورهای متصل به باس ۲ تعداد ۳ خرابی در سال را تجربه می کنند و این در حالی است که واحدهای متصل به باس ۳ هر یک دو بار در سال و ۴ واحد متصل به باس چهار هر کدام یکبار خرابی در سال را تجربه می کنند. در اینجا حداکثر ظرفیت تولیدی واحدهای حرارتی با توان ظاهری نامی آنها برابر

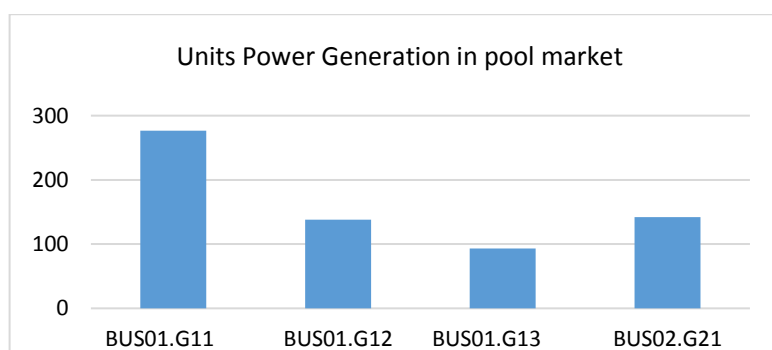
فرض نشده است که توان ظاهری برای سه واحد G11 و G12 و G13 بترتیب ۳۵۰، ۲۵۰ و ۲۰۰ مگاوات آمپر می‌باشد. دو واحد G2 و G21 هر دو ۱۸۰ مگاوات آمپری و دو واحد متصل به باس سوم و چهار واحد متصل به باس ۴ شبکه تست همه ۱۵۰ مگاوات آمپری هستند. ظرفیت تولید توان اکتیو این واحدها ۳۵۰، ۲۵۰ و ۲۰۰ برای واحدهای متصل به باس ۱، این ظرفیت برای واحدهای متصل به باس ۲ بترتیب ۱۸۰ و ۱۷۰ مگاوات است. ظرفیت توان اکتیو واحدهای متصل به باس ۳ بترتیب ۱۲۰ و ۱۱۰ مگاوات است این در حالی است که ظرفیت توان اکتیو واحدهای متصل به باس چهار شبکه تست بترتیب ۱۰۰، ۹۰، ۸۰ و ۵۰ مگاوات می‌باشد. نرخ رمپ ریت واحدها بر حسب مگاوات بر دقیقه برای سه واحد متصل به باس ۱ بترتیب ۸، ۸ و ۶ مگاوات بر دقیقه می‌باشد. نرخ رمپ ریت واحدهای متصل به باس ۲ و ۳ بترتیب معادل ۴ و ۲ مگاوات بر دقیقه می‌باشد. نرخ رمپ برای واحدهای متصل به باس ۴ معادل ۳ مگاوات بر دقیقه می‌باشد. در این شبکه تست واحدهای سریع راه انداز هم متصل به باسهای ۳ و ۴ در نظر گرفته شده است که دو واحد G31 و G32 هستند که طی مدت ۱۰ دقیقه یعنی زمان t_{rec} وارد مدار می‌شوند و قادرند ظرفیت تولید خود را به ترتیب به ۶۵ و ۵۰ مگاوات برسانند. این در حالی است که هر چهار واحد متصل به باس ۴ هر چهار واحد قابلیت راه اندازی سریع را دارا می‌باشند که طی مدت بازبایی کامل فرکانس به مقدار نامی قادرند توان تولیدی خود را بترتیب تا ۴۵، ۴۰، ۲۵ و ۲۰ مگاوات افزایش دهند. باید متذکر این نکته شد که ژنراتورهای G21 متصل به باس ۲ و ژنراتور G44 متصل به باس ۴ مجهز به سیستم گاورنر نبوده یا این امکانات را در اختیار بازار برق اشتراکی بنا به تصمیم مالکان قرار نمی‌دهند. ثابت اینرسی برای واحدهای متصل به باس ۱ شبکه بترتیب ۱، ۱ و ۱،۴ ثانیه می‌باشد برای ژنراتورهای متصل به باس دوم بترتیب ۱،۲ و ۱،۳ ثانیه است و همچنین برای ژنراتورهای متصل به باس سوم ۱،۳ و ۱،۲ ثانیه است و برای چهار ژنراتور متصل به باس ۴ بترتیب ۱،۱، ۱،۱۵، ۱،۶ و ۱،۷ ثانیه است. مشخصه دروپی هر واحد حرارتی متصل به باس Bi بر حسب $p.u. Hz/p.u. MW$ بترتیب برای باس اول شبکه ۰،۰۵، ۰،۰۵ و ۰،۴۵ است. برای واحدهای متصل به باس دوم هر دو ۰،۰۴ و برای واحدهای باس سوم هر دو ۰،۰۳۵ است و برای کلیه واحدهای متصل به باس چهارم ۰،۰۳ است. اما مقدار عددی باند مرده واحدهای متصل به باس ۱ شبکه بترتیب ۰،۰۲۶، ۰،۰۲۶، ۰،۰۲۵، هرگز است برای واحدهای متصل به باسهای ۲ و ۳ شبکه ۰،۰۲۳ و ۰،۰۲۲ هرگز می‌باشد و باند مرده واحدهای متصل به باس ۴ شبکه همگی ۰،۰۲۱ هرگز می‌باشد. ثابت میراسازی بار ۰،۲۵ بر حسب $p.u. MW/p.u. Hz$ در نظر گرفته شده است. اینرسی معادل بار ۰،۱۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. اینرسی مورد نیاز سیستم ۹۵۰ مگاوات آمپر در نظر گرفته شده است برای اینکه بیشترین انحراف فرکانسی ۰،۲۵ هرگز در نظر گرفته شود. فرکانس نامی عملکرد شبکه مورد نظر ۶۰ هرگز است بعلاوه، زمان بازبایی فرکانس پس از اغتشاش نظیر خروج یک واحد حرارتی $t_{rec}=15$ دقیقه در نظر گرفته می‌شود. زمان نادیر متناسب با فرکانس نادیر t_{nadir} معادل ۴ ثانیه در نظر گرفته شده است. زمان متناسب با $t_{ss}=30$ ثانیه در واقع زمانی است که بعد خروج اجباری واحد حرارتی مجدداً شبکه در یک فرکانس کاری پایین‌تر به صورت پایدار $f_{ss}=59.85$ هرگز عملکرد خواهد داشت. بعد از یک خروج با کمبود تولید فرکانس شبکه افت خواهد کرد بیشترین مقدار افت با فرکانس نادیر شبکه شناخته می‌شود که برای شبکه تست معادل ۵۹،۷۵ هرگز در نظر گرفته شده است و این در حالی است که ماکزیمم باند مرده ای که برای سیستم بعد یک خروج اجباری واحد حرارتی برای شبکه تحت مطالعه مجاز می‌باشد معادل ۰،۱۳ هرگز در نظر گرفته شده است تا این مقدار افت در سیستم در واقع اغتشاش محسوب نمی‌شود و تجهیزات واکنشی به این مقدار افت فرکانس در شبکه نشان نخواهد داد در حالی که اگر از این مقدار افت فرکانس تجاوز نماید سیستم PFR و AGC واکنش نشان داده و تلاش می‌کنند تا فرکانس سیستم را به مقدار مطلوب بازگردانند. ارزش بار از دست رفته مشترکین به طور میانگین ۱۰۰۰ دلار برای هر مگاوات ساعت در نظر گرفته شده است. نیازمندی ظرفیت PFR معادل ۱۰ در صد بار کل شبکه در نظر گرفته شده است. نیازمندی توان اکتیو در حالت کار دائمی شبکه در فرکانس زیر فرکانس نامی $P1ss_Req$ معادل ۵ درصد کل بار شبکه در نظر گرفته شده است و توان مورد نیاز شبکه در زمان نادیر را هم ۸۵ درصد $P1ss_Req$ در نظر می‌گیریم. میزان توان اکتیو رزرو ثانویه یا چرخان در اینجا ۳۵ درصد بار کل در نظر گرفته شده است و برای رزرو غیرچرخان ۳۰ درصد است. در اینجا فلوچارت حل مسئله در دو مرحله اجرا می‌گردد، و در نهایت نتایج شبیه سازی برای متغیرهای مسئله شامل واحدهای در مدار قرار گرفته u ، متغیر نشان دهنده خروج واحد در هر وضعیت Vi ، متغیر توان اکتیو تولیدی واحد حرارتی Pit ، هزینه تولید انرژی هر واحد C_Ei ، میزان نقصان رزرو IR ، متغیر $P1O$ ظرفیت کامل ارائه شده واحد برای PFR در هر وضعیت خروج اجباری مرتبه اول برای سیستم تولید شبکه تحت مطالعه، متغیر میزان رزرو ثانویه چرخان $P2spin$ و غیرچرخان $P2non_spin$ برای بازگرداندن فرکانس شبکه از مقدار پایدار زیر نامی به مقدار نامی، متغیر $P1SS$ میزان ظرفیت تولید واحد در حالت پایدار بعد اغتشاش که فرکانس زیر مقدار نامی قرار دارد. متغیر $P1nadir$ در واقع توان دسترس‌پذیر هر واحد در زمان نادیر می‌باشد، متغیر LD_ss مقدار میراسازی بار تا زمان حالت پایدار می‌باشد. متغیر ENS مقدار انرژی تامین نشده مشترکین طی کلیه خروج های اجباری مرتبه اول می‌باشد. متغیر X نشان‌دهنده داشتن ظرفیت کامل بالادست برای هر واحد بعد خروج یک واحد حرارتی می‌باشد و متغیر $gama$ نشان‌دهنده انتخاب گاورنر یک واحد برای فراهم نمودن خدمات PFR در بازار خدمات جانبی می‌باشد. با اجرای مدل با توجه به

مفروضات و پارامترهای ورودی مسئله واحدهایی که به عنوان فراهم آورنده انرژی و خدمات جانبی برای یک ساعت مورد مطالعه انتخاب می‌شوند مطابق جدول (۳) می‌باشد.

جدول (۳): واحدهایی که به عنوان فراهم آورنده انرژی و خدمات جانبی برای یک ساعت

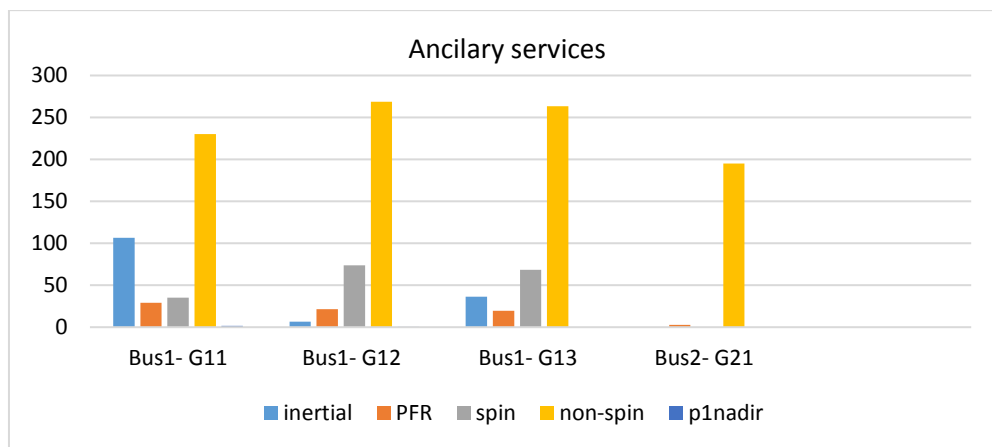
Bus (GENCO)	BUS1.G11	BUS1.G12	BUS1.G13	BUS2.G21	BUS2.G22	BUS3.G31	BUS3.G32	BUS4.G41	BUS4.G42	BUS4.G43	BUS4.G44
Status	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

تحت شرایط نرمال بازار انرژی با تابع هدف سود ماکزیمم یا هزینه مینیمم واحدهای تولیدی میزان سطح تولید انرژی را برای مالکان نیروگاه حرارتی تعیین می‌کند که مطابق شکل (۷) می‌باشد.



شکل (۷): میزان تولید انرژی واحدهای حرارتی تحت شرایط نرمال

هزینه تولید انرژی توسط هر یک از ۴ واحد حاضر در بازار انرژی بر اساس تابع هزینه بترتیب معادل ۴۲۶۶,۸۵، ۳۳۸۳,۳۵، ۱۷۶۸ و ۳۳۷۶,۴۵ دلار ارزیابی می‌شود. با در نظر گرفتن کلیه خروجی‌های مرتبه اول واحدهای حرارتی خدمات جانبی که سیستم قدرت پس از هر خروج قادر به فراهم نمودن می‌باشد، مطابق شکل (۸) خواهد بود. همان‌طور که از نتایج قابل رویت می‌باشد برای اینکه فرکانس سیستم در محدوده مجاز از پیش تعریف شده باقی بماند پس از خروج ژنراتور G11 از باس ۱، شبکه قدرت بایستی پنج نوع خدمات جانبی همزمان شامل اینرسیال، پاسخ فرکانسی سریع اولیه و نادیر تایم، رزرو چرخان و غیرچرخان را فراهم کند که این خدمات پس از خروج واحد G12 و G13 چهار سرویس اینرسیال، PFR و رزرو چرخان و غیرچرخان شامل می‌شود و در وضعیت خروج واحد G21 این خدمات جانبی بایستی شامل پاسخ فرکانسی سریع PFR و رزرو غیرچرخان non-spin باشد. نتایج شبیه‌سازی به طور دقیق برای میزان مشارکت حداکثری تولید هر واحد در PFR بعد خروج مرتبه اول در جدول (۴) به نمایش در آمده است. از نتایج شبیه‌سازی قابل رویت است که ژنراتور G21 بر روی باس ۲ شبکه ۴ باسه مورد مطالعه به دلیل بلاک تجهیز گاورنر خود در تامین تولید حداکثری برای پاسخ فرکانسی سریع اولیه در کلیه خروجی‌های مرتبه اول نقشی ایفا نمی‌کند. بعد از صفر و مثبت نمودن شیب منحنی فرکانس سیستم دو رزرو چرخان و غیرچرخان در کنار واحدهای سریع راه‌انداز بکار گرفته می‌شوند تا فرکانس را به مقدار نامی خود بازگردانند، مقادیر عددی ذخیره چرخان و غیرچرخان مربوطه در جدول (۵) به نمایش در آمده است.



شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی برای خدمات جانبی سیستم قدرت پس از هر خروج مرتبه اول

جدول (۴): میزان مشارکت حداکثری در تولید هر واحد بعد خروج مرتبه اول

Unit outage	BUS1.G11	BUS1.G12	BUS1.G13	BUS2.G21
Bus1.G11	-	18.667	16.667	No gov
Bus1.G12	26.133	-	16.667	No gov
Bus1.G13	26.133	18.667	-	No gov
Bus2.G21	26.133	18.667	16.667	No gov

جدول (۵): مقادیر عددی ذخیره چرخان و غیرچرخان برای رزرو ثانویه بازار خدمات جانبی

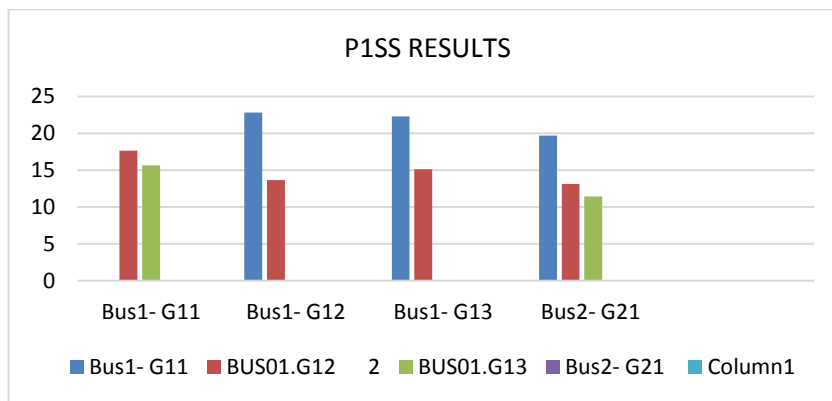
Unit outage/SR	BUS1.G11	BUS1.G12	BUS1.G13	BUS2.G21
Bus1.G11	-	93.267	90.0	38.17
Bus1.G12	47.089	-	90	38.17
Bus1.G13	47.089	93.26	-	38.17
Bus2.G21	47.089	93.26	90	-
Unit outage/non-SR	BUS1.G31	BUS1.G32	BUS4.G41/42	BUS2.G43/44
Bus1.G11	65	50	45/40	25/20
Bus1.G12	65	50	45/40	25/20
Bus1.G13	65	50	45/40	25/20
Bus2.G21	65	50	45/40	25/20

همان طور که از نتایج شبیه‌سازی برای جدول فوق دیده می‌شود واحدهای متصل به باسهای ۳ و ۴ شبکه مورد مطالعه به اندازه QSC خود توانایی تامین توان در زمان ۱۵ دقیقه و مشارکت در بازگرداندن فرکانس شبکه را دارا می‌باشند. متغیر X و گاما گفتیم که نشاندهنده دارا بودن ظرفیت بالادست انرژی واحد حرارتی برای خدمات PFR و مجهز بودن آن واحد به گاورنر و انتخاب برای مشارکت در خدمات جانبی می‌باشد که نتایج شبیه‌سازی برای وضعیت مورد مطالعه سیستم قدرت ۴-باسه در جدول (۶) آمده است.

جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی برای وجود ظرفیت بالادست خالی ژنراتورها برای آرایه خدمات جانبی

Unit outage/X	BUS1.G11	BUS1.G12	BUS1.G13	BUS2.G21
Bus1.G11	-	1	1	-
Bus1.G12	1	-	1	-
Bus1.G13	1	1	-	-
Bus2.G21	1	1	1	-

همان طور که از نتایج شبیه‌سازی قابل استنتاج است بعد هر خروج مرتبه اول با توجه به شرایط بازار انرژی مابقی واحدها ظرفیت بالادست برای ارائه خدمات PFR و رزرو ثانویه را دارا می‌باشند.



شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی برای متغیر P1SS یعنی مقدار توان در دسترس پس از هر خروج مرتبه اول هنگامی که فرکانس در حالت پایدار زیر فرکانس نامی

مقدار میراسازی بار تحت شرایط هر واحد بدین ترتیب می‌باشد که بعد خروج واحد G11 از باس ۱ مقدار بار با کاهش فرکانس به اندازه ۰,۳۴۵ مگاوات کاهش می‌یابد بعد از خروج واحد G12 از باس ۱ مقدار بار با کاهش فرکانس به اندازه ۰,۳۱۵ مگاوات کاهش می‌یابد بعد از خروج واحد G13 از باس ۱ مقدار بار با کاهش فرکانس به اندازه ۰,۳۱۴ مگاوات کاهش می‌یابد و در نهایت پس از خروج اجباری واحد G21 از باس ۲ مقدار بار با کاهش فرکانس به اندازه ۰,۳۰۹ مگاوات کاهش نشان می‌دهد در واقع بار به طور ذاتی بنحوی کمک کننده برای بازگرداندن فرکانس به حالت پایدار اولیه زیر مقدار نامی و در مرحله دوم به مقدار نامی می‌باشد. همان طور که می‌دانیم زمانی را که فرکانس به پایین ترین مقدار خود طی حالت گذاری سیستم تجربه می‌کند را نادیر تایم تعریف کردیم که هر یک از واحدهای باقیمانده در سیستم تولید قادر هستند تا با استفاده از سیستم گاورنر پیشرفته خود توانی معادل P1nadir را به سیستم تزریق نمایند تا شیب منفی منحنی فرکانس سیستم صفر گردد که برای وضعیت مورد مطالعه نتایج شبیه‌سازی در جدول (۷) به نمایش در آمده است.

جدول (۷): نتایج شبیه‌سازی توان تولیدی در زمان نادیر توسط واحدهای حرارتی

P1nadir	BUS1.G11	BUS1.G12	BUS1.G13	BUS2.G21
Bus1.G11	-	16.234	14.283	0
Bus1.G12	21.584	-	12.701	0
Bus1.G13	21.150	14.198	-	0
Bus2.G21	19.027	12.679	11.064	-

با توجه به خروج‌ها مقدار انرژی تامین نشده مشترکین به طور بهینه بعد اجرای مدل پیشنهادی محاسبه می‌شود که بعد خروج G11 از باس BUS01 مقدار انرژی تامین نشده مشترکین 0.151 مگاوات است، بعد خروج G12 از این باس مقدار انرژی تامین نشده معادل ۰,۱۹۵ مگاوات و بعد خروج G13 معادل ۰,۱۵۱ مگاوات و در نهایت بعد خروج واحد G21 از باس ۲ انرژی تامین نشده مشترکین معادل ۰,۰۶۷ مگاوات می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل تحلیلی برای خدمات پاسخ فرکانسی نامبرده را بر اساس قابلیت گاورنر و اینرسی هر یک از واحدهای نیروگاه‌های حرارتی تحت شرایط بازار اشتراکی با تسویه همزمان انرژی و رزرو ارائه شده است. اعتبارسنجی مدل پیشنهادی پاسخ فرکانسی برای ذخیره اینرشیال، رزرو اولیه سریع PFR، رزرو ثانویه بر روی یک شبکه ۴-باسه شامل ۱۱ واحد حرارتی مورد آزمون قرار گرفته است و نتایج عددی گواه این ادعا است که مدل پیشنهادی قادر است مقادیر متغیرهای مدل را به درستی تعیین کند. بنحوی که بعد هر خروج فرکانس سیستم قدرت در محدوده قرار گرفته و بعد زمان ۱۵ دقیقه به فرکانس نامی بازگردانده شود. بعلاوه، مقادیر ممان اینرسی کل سیستم به نحوی از واحدهای منتخب در مدار فراهم می‌گردد که شیب منفی افت فرکانس در چند ثانیه ابتدایی بعد خروج یک واحد حرارتی برای نمونه طی ۳ ثانیه به حداقل رسیده و بعد گاورنر نیروگاه‌های دیگر این شیب منفی منحنی فرکانس را به صفر رسانده مثبت می‌کنند تا اینکه در نهایت رزرو ثانویه شامل چرخان و غیرچرخان فرکانس را از وضعیت پایدار زیر فرکانس نامی به مقدار نامی برساند.

- ENTSO-E, UCTE Operational Handbook Policy 1, Load-Frequency Control and Performance, Mar. 2009 .
- Western Electricity Coordinating Council, White Paper on Frequency Responsive Reserve Standard, Apr. 2005 .
- J. Eto, J. Undrill, P. Mackin, H. Illian, C. Martinez, M. O'Malley, and K. Coughlin, Use of Frequency Response Metrics to Assess the Planning and Operating Requirements for Reliable Integration of Variable Renewable Generation, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, Tech. Rep. LBNL-4142E, Dec. 2010 .
- National Grid Frequency Response Working Group, Frequency Response Technical Sub-Group Report, Tech. Rep., Nov. 2011.
- Fei Teng, Vincenzo Trovato and Goran Strbac, "Stochastic Scheduling With Inertia-Dependent Fast Frequency Response Requirements," IEEE Trans. Power Syst., 2015, pp. 1-10.
- Héctor Chávez, Ross Baldick and Sandip Sharma, "Governor Rate-Constrained OPF for Primary Frequency Control Adequacy," IEEE Trans. Power Syst., Vol. 29, No. 3, May. 2014.
- E. Ela, V. Gevorgian, A. Tuohy, B. Kirby, M. Milligan, and M. O'Malley, "Market designs for the primary frequency response ancillary service—Part I: Motivation and design part," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 1, pp. 421–431, Jan. 2014.
- S. Sharma, S. Huang, and N. D. R. Sarma, "System inertial frequency response estimation and impact of renewable resources in ERCOT interconnection," in Proc. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Jul. 24–29, 2011, pp. 1–6.
- M. Li and J. D. McCalley, "Influence of renewable integration on frequency dynamics," in Proc. 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Jul. 22–26, 2012, pp. 1–7.
- H. Ahmadi and H. Ghasemi, "Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints," IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, no. 4, pp. 1536–1545, Jul. 2014.

تنظیم بهینه توان راکتیو احتمالی در بازار برق ترکیبی با وجود عدم قطعیت بار با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری

محمد مهدی اسماعیلی^۱، میلاد رضایی^۲

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۰۴

چکیده

در این پژوهش یک الگوریتم احتمالی جدیدی برای تولید و تنظیم توان راکتیو بهینه در بازارهای برق ترکیبی ارائه شده که چند مرحله ای و محدود شده غیر خطی و چند هدفه می باشد. و با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار و مجموعه ای از بارهای پیش بینی شده احتمالی توسط تابع توزیع احتمال (PDF) یک تابع پرداخت بازار کل و سه مولفه ای مطرح شده که به عنوان تابع هزینه اقتصادی مرحله اول که شامل هزینه تولید توان راکتیو و هزینه تلفات انرژی و هزینه انتقال آن می باشد و همچنین هزینه علاوه بر مسائل اقتصادی، مسائل فنی از جمله حاشیه امنیت ولتاژ مورد انتظار و اختلاف آن با قرارداد های انرژی و ذخیره چرخان و همچنین حداکثر ذخیره توان راکتیو محلی و حداقل سازی تراکم بار مورد بررسی قرار گرفته و در مرحله آخر یک تابع چند هدفه احتمالی با استفاده از ضرائب سنجش جهت یافتن بهترین برنامه زمان بندی بازار توان راکتیو مطرح شده و بر روی شبکه ۲۴ باسه IEEE با الگوریتم رقابت استعماری شبیه سازی و در نرم افزار مطلب مدل سازی شده است و نتایج آن نیز ارائه می شود و همچنین در این پژوهش در مورد انواع بازارهای توان از نظر تسویه و زمان اجرا نیز مورد بررسی قرار گرفته است که هر کدام از این بازار ها دارای نقاط ضعف و قوت خاص خود خواهند بود.

واژگان کلیدی: توان راکتیو، عدم قطعیت، رزرو چرخان

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان، دانشکده فنی و مهندسی، گرگان، ایران: m.esmaeili20000@gmail.com

۲- عضو انجمن هوا و فضای ایران، تهران، ایران

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت در نقاط مختلف دنیا در گذشته حالت انحصاری داشته و تصمیم‌گیری در مسائل گوناگون مربوط به آن، چه در فاز برنامه‌ریزی^۱ و چه در فاز بهره‌برداری^۲ تحت تسلط یک شرکت بزرگ بود. تولید، انتقال و توزیع برق همگی از وظایف انحصارگر مذکور می‌باشند. وجود شرکت‌های انحصارگر در صنعت برق مشابه هر صنعت دیگر باعث از بین رفتن رقابت، کاهش کیفیت محصول، ایجاد اینرسی جهت تغییرات در صنعت، عادلانه نبودن قیمت‌ها، ایجاد سود غیرنرمال برای انحصارگر و بالاخره عدم رضایت مصرف‌کنندگان می‌شود. جهت رفع این مشکل و ایجاد شکوفایی و رشد در صنعت برق در طول دهه‌های اخیر در اکثر کشورهای دنیا با مسئله تجدید ساختار در صنعت برق و ورود شرکت‌های خصوصی به این عرصه روبرو هستیم. مسئله تجدید ساختار باعث شده است که اصول بازارهای رقابتی وارد صنعت برق شده و شرکت‌های گوناگون در بخش‌های تولید، انتقال و توزیع با یکدیگر به رقابت بپردازند [۱۰]. حرکت آزادسازی صنعت برق باعث شده که مسائل فنی و اقتصادی سیستم تا حد زیادی از یکدیگر جدا شده و هر یک به طور مستقل مورد بررسی قرار گیرد. این مسئله باعث بروز مشکلات گوناگونی در شبکه‌ها شده که از لحاظ فنی و چه از لحاظ اقتصادی می‌گردد. به همین جهت برای اینکه بهره‌برداری بهینه و امن از شبکه تضمین شود لازم است که یک نهاد مستقل و بدون سود به نام بهره‌بردار مستقل سیستم، ISO^۳، تشکیل گردد که وظیفه‌ی آن هماهنگی میان شرکت‌کنندگان مختلف بازار برق به منظور بهره‌برداری امن از شبکه است.

توان اکتیو یا انرژی الکتریکی بدون شک مهم‌ترین کالایی است که در بازار برق مبادله می‌شود. اما این کالا خصوصیات فنی منحصر بفردی دارد که باعث می‌شود تسویه و بسته شدن بازار برق به سادگی دیگر کالاها انجام نشود. مثلاً انرژی الکتریکی به سادگی قابل ذخیره کردن نیست و مانند دیگر کالاها نمی‌توان برای آن انبار یا نوعی محل ذخیره‌سازی در نظر گرفت بلکه در هر لحظه می‌بایست در هر لحظه‌ای میزان کل تولید و مصرف آن کاملاً با یکدیگر برابر بوده و تفاوت زیادی باهم نداشته باشند. البته به هر حال همواره در شبکه قدرت مقداری عدم تعادل میان تولید و مصرف انرژی وجود دارد که این مسئله باعث تغییرات فرکانس شبکه می‌شود. خصوصیت دیگری که توان اکتیو دارد این است که برای اینکه امکان انتقال آن در شبکه وجود داشته باشد می‌بایست حتماً شبکه در یک حالت مناسب و نرمال کار کند و در حالات غیرنرمال شبکه (به لحاظ پایداری، حاشیه‌های امنیتی و ...) به هیچ‌وجه امکان انتقال انرژی میان تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان شبکه وجود ندارد. به این دلایل و برای اینکه بهره‌برداری از شبکه به صورت امن انجام شود یک سری خدمات یا کالاهای دیگر علاوه بر انرژی الکتریکی لازم است در این صنعت تولید شود که به آن‌ها خدمات جانبی^۴ می‌گویند. تعیین اینکه چه مسائلی از شبکه جزء خدمات جانبی محسوب می‌شود در نقاط مختلف دنیا متفاوت است اما در اکثر بازارهای دنیا مسائلی چون تنظیم و تعقیب بار، ذخیره چرخان و غیر چرخان، توان راکتیو و کنترل ولتاژ، حفظ پایداری شبکه و ... را شامل می‌شود.

مسئله توان راکتیو و کنترل ولتاژ یکی از مهم‌ترین خدمات جانبی است که نقش بسیار مهمی در پایداری شبکه و بهره‌برداری بهینه از بازار دارد. کمبود توان راکتیو در شبکه باعث کاهش ولتاژ شین‌ها، افزایش تلفات شبکه، گرم شدن ترانس‌ها و دیگر تجهیزات سیستم، کاهش پایداری شبکه و افزایش امکان فروپاشی ولتاژ در شبکه می‌گردد. به همین منظور بسیار لازم و ضروری است که نیازهای راکتیو شبکه به طور مناسبی تأمین شود. توان راکتیو به شدت به ولتاژ شین در یک شبکه قدرت وابسته است و بنابراین بر امنیت شبکه تأثیر بسزایی خواهد داشت. یکی از دلایل اصلی خاموشی‌های سراسری اخیر در سیستم‌های قدرت جهان، ناکافی بودن توان راکتیو و در نتیجه فروپاشی ولتاژ بوده است. ازجمله این خاموشی‌های سراسری را می‌توان در ۲۳ سپتامبر ۲۰۰۳ در سوئد و دانمارک، ۲۸ سپتامبر ۲۰۰۳ در ایتالیا و همچنین اوت ۲۰۰۳ در آمریکا و کانادا نام برد [۱۸-۳۸].

۲- توابع هدف و مدل سازی تنظیم بازار توان راکتیو

- مرحله اول

۱- هزینه تولید توان راکتیو برای هر شرکت‌کننده در بازار (COST(Q)) که شامل هزینه تولید ژنراتور یا سنکرون و هزینه تولید کندانسورهای سنکرون و جبران‌کننده‌های استاتیکی (شامل خازن‌ها و ادوات FACTS) می‌باشد.

1 Planning
2 Operation
3 Independent System Operator
4Ancillary service

– هزینه تولید توان راکتیو ژنراتور سنکرون

ساختارهای مختلفی برای پرداخت توان راکتیو برای ژنراتور سنکرون وجود دارد. [۳۵] با توجه به منحنی قابلیت ژنراتور سنکرون یک منحنی هزینه توان راکتیو درجه دوم برای ژنراتور سنکرون مطرح شده که به سه دسته تقسیم می‌شوند. که در این مدل منحنی هزینه‌های آمادگی و هزینه تلفات ناشی از افزایش میزان تولید توان راکتیو و هزینه فرصت از دست رفته ژنراتور در نظر گرفته شده است [۲۴] که فرمول آن بدین صورت است و با توجه به هزینه تابع پرداخت آن محاسبه خواهد شد.

$$Cost(Q_{gi}) = \alpha_{q,i} Q_{g,i}^2 + b_{q,i} Q_{gi} + C_{q,i} \quad (1)$$

– هزینه تولید کندانسور سنکرون

کندانسور سنکرون یک ماشین سنکرون بدون محور خروجی می‌باشد. به عبارت دیگر، یک موتور بدون بار است که تنها می‌تواند توان راکتیو را تأمین کند و دارای شرکت پاسخ‌دهی بالا بوده و توانایی تأمین ولتاژ بسیار خوبی را دارد. منحنی توان راکتیو آن شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری است. هزینه‌های بهره‌برداری شامل هزینه انرژی مصرف شده برای غلبه بر اصطکاک مکانیکی، تلفات الکتریکی و هزینه تعمیر و نگهداری می‌باشد. که در این رابطه Q_c توان راکتیو خروجی کندانسور، σ_c هزینه بهره‌برداری برحسب $\$/MVar-h$ و B_c هزینه سرمایه‌گذاری برحسب $\$/MVar-h$ می‌باشد.

$$Cost(Q_{ci}) = (\beta_{ci} + \sigma_{ci}) Q_{ci} \quad (2)$$

– هزینه توان راکتیو جبران‌کننده‌های استاتیکی: هزینه مربوط به جبران‌کننده‌های استاتیکی مشابه کندانسورهای سنکرون بوده و دارای هزینه اجرایی اندکی بوده و هزینه تولید توان راکتیو آنها براساس هزینه‌های سرمایه‌گذاری محاسبه می‌گردند. جبران‌کننده‌های استاتیکی معمولاً شامل بانک‌های خازنی، راکتورها و ادوات FACTS می‌باشند. و مشابه فرمول کندانسور سنکرون بوده و فقط پارامتر σ باید صفر در نظر گرفته شود.

$$Cost(Q_{ci}) = (\beta_{ci} + \sigma_{ci}) Q_{ci} = (\beta_{ci}) Q_{ci}$$

$$\beta_{ci} = \frac{\text{Capital investment cost}}{8760 \times \text{lifespan} \times \text{average usagerate}} (\$/Mvar - h) \quad (3)$$

۳- الگوریتم تسویه‌ی بازار چندمنظوره احتمالی مطرح شده

در بازارهای برق، هم بررسی مسائل اقتصادی و هم مسائل فنی طی تسویه‌ی بازار توان راکتیو از اهمیت برخوردار می‌باشد. در نظر گرفتن یکی از این مسائل بدون توجه به مورد دیگر در یک برنامه‌ی زمان‌بندی توان راکتیو بهینه و امن منجر نخواهد گردید. در نتیجه، در این بخش، با در نظر گرفتن و بررسی مسائل اقتصادی و نیز مسائل فنی، یک الگوریتم جدید و چندمنظوره شش مرحله‌ای برای تسویه بازار توان راکتیو بهینه و در بازارهای برق ترکیبی پیشنهاد گردیده است. به منظور دستیابی به فرایند تسویه بازار به صورت مؤثرتر، این الگوریتم مطرح شده به دنبال یافتن بهترین برنامه‌ی زمان‌بندی بازار با توجه به موارد عدم قطعیت پیش‌بینی بار می‌باشد.

۴- شبیه سازی و ارائه نتایج تاثیر برنامه ریزی توان راکتیو پیشنهادی

باتوجه به قانون ۱۰ بهره‌برداری^۱ NERC تنها توان راکتیو تولیدی توسط ژنراتورهای سنکرون را می‌توان بعنوان سرویس کمکی در نظر گرفت و برای جبران و مساعدت مالی مناسب و مطلوب می‌باشد [۲۹]. در اغلب سیستم‌های قدرت، بهره‌بردار سیستم بدلیل انتقال توان الکتریکی توسط خطوط انتقال، باید به مالکان سیستم انتقال هزینه و شارژ پرداخت نماید. اغلب مکانیزم‌های پرداخت هزینه انتقال انرژی پیشنهاد نموده‌اند که از دو بخش متناسب با شارش توان اکتیو و راکتیو استفاده گردد [۲۳]. روش MVAr-Mile روشی رایج جهت پرداخت هزینه انتقال توان راکتیو توسط خطوط می‌باشد [۱۴] که در این شبیه‌سازی نیز از این

1 North American Electric Reliability Council

روش استفاده شده است. بنابراین بهره‌بردار سیستم باید باتوجه به طول خط(مایل)، هزینه هر MVar برای هر واحد طول خط($\$/MVar - mile$) و اندازه شارش توان راکتیو در خط بابت انتقال انرژی به مالکین سیستم انتقال هزینه پرداخت نماید. اما بهتر است که هزینه برنامه‌ریزی توان راکتیو نیز در نظر گرفته شود. با این وجود در این شبیه‌سازی تنها RPTC برای تنظیم بازار توان راکتیو در نظر گرفته شده است. همچنین لازم به ذکر است که در بازارهای برق، بسیار مهم است که هم مسائل فنی و هم اقتصادی در زمان تنظیم بازارهای توان راکتیو در نظر گرفته شوند. با توجه یکی از موارد فوق بدون در نظر گرفتن دیگری نمی‌توان برنامه‌ریزی توان راکتیو مناسب و بهینه‌ای را صورت داد. این شبیه‌سازی در ۵ مرحله انجام می‌شود که شامل موارد زیر می‌باشد:

مرحله ۱: کاهش هزینه کلی مورد انتظار بازار - در این مرحله بدلیل اهمیت جنبه اقتصادی بازار، الگوریتم بهینه‌سازی سعی می‌نماید تا بهترین برنامه‌ریزی بازار را با توجه به کمترین هزینه بازار پیدا نماید.

مرحله ۲: افزایش حاشیه امنیت ولتاژ مورد انتظار - در این مرحله مفهوم حاشیه امنیت ولتاژ سیستم با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار برای مساله طراحی و اجرا می‌شود. برای بررسی میزان حاشیه امنیت ولتاژ از شاخص L_{mn} برای تمامی خطوط انتقال شبکه تست استفاده می‌شود که هرچه این شاخص از یک کمتر باشد، میزان حاشیه امنیت ولتاژ بیشتر است.

مرحله ۳: افزایش میزان ذخیره توان راکتیو محلی - در این مرحله نواحی کنترل ولتاژ مشخص می‌گردند و میزان ذخیره توان راکتیو هر ناحیه معین و برنامه‌ریزی می‌شود. هر ناحیه کنترل ولتاژ شامل برخی باس‌هایی می‌باشد که مشخصات الکتریکی آن‌ها به هم نزدیک بوده و از بقیه نواحی به اندازه کافی دور می‌باشند. هرگونه تغییر در تولید و یا جذب توان راکتیو یک باس در VCA، تأثیری بزرگ بر ولتاژ دیگر باس‌های آن ناحیه دارد. بسته به شرایط موجود و تغییر قراردادهای باید بهره‌بردار سیستم برنامه‌ریزی را متناسباً تغییر دهد تا انحرافی رخ ندهد. در این مرحله این هدف پیگیری می‌شود. لازم به ذکر است که در هنگام تنظیم بازار توان راکتیو، فرض می‌گردد که مسئولیت برقراری تعادل مصرف توان راکتیو سیستم برعهده ژنراتور باس اسلک می‌باشد.

مرحله ۴: کاهش احتمال وقوع پیشامد در سیستم انتقال - در این مرحله میزان بارپذیری خطوط و تراکم آن‌ها بررسی شده تا از احتمال وقوع پیشامد کاسته شود.

مرحله ۵: تابع هزینه چندهدفه مبتنی بر احتمال - سرانجام با توجه به نتایج مراحل قبل، تابع چندهدفه برای یافتن پاسخ مساله توسط الگوریتم ICA تنظیم و بهینه می‌گردد.

با توجه به توضیحات فوق، در این بخش نتایج شبیه‌سازی بازار توان راکتیو توسط روش پیشنهادی و الگوریتم ICA ارائه می‌گردد. شبیه‌سازی الگوریتم و روش پیشنهادی بر روی شبکه تست ۲۴ باس IEEE اجرا می‌شود و نتایج آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی برای این شبکه ارائه شده و نتایج حاصل از بهینه‌سازی توسط الگوریتم پیشنهادی بررسی می‌گردد. همچنین پارامترهای مورد استفاده برای هر یک از کدهای بهینه‌سازی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده برای الگوریتم بهینه‌سازی ICA

ICA	پارامتر
۱۰۰۰	حداکثر تکرار(تعداد دهه‌ها)
۲۰	تعداد جمعیت اولیه
۱۰	تعداد امپریالیست
۰,۱	نرخ انقلاب
۲	ضریب جذب
۰,۵	ضریب زاویه جذب
۰,۱	Zeta
۰,۹۹	ضریب میرایی

با توجه به در نظر گرفتن حاشیه امنیت ولتاژ باس‌ها، ولتاژ باس‌ها در محدوده مجاز بوده که علت آن می‌تواند در توجه تابع هدف به اهداف کلیه مراحل باشد. همچنین تلفات خطوط در خط‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ بیشترین مقدار را دارد که این پروفیل با توجه به برنامه‌ریزی بدست آمده برای مرحله پنجم رسم شده است. همچنین G10 و G11 نیز تولیدی بنا به درخواست اپراتور شبکه دارند. در جدول ۲ نتایج مقدار شاخص L در هر مرحله و برای تمامی خطوط ارائه شده است.

جدول ۲. مقادیر شاخص L در سناریوی دوم

From Bus	To Bus	Stage1	Stage2	Stage3			Stage4	Stage5
				VCA1	VCA2	VCA3		
1	2	0.022263	0.019078	0.0254	0.009139	0.005571	0.022561	0.013306
1	3	0.220455	0.222478	0.215034	0.219924	0.200333	0.234207	0.20926
1	5	0.014316	0.007513	0.009359	0.008678	0.010537	0.022842	0.007031
2	4	0.100001	0.095231	0.092926	0.101137	0.087682	0.109795	0.096147
2	6	0.007802	0.016268	0.018456	0.00648	0.025674	0.005772	0.012455
3	9	0.083752	0.099533	0.089096	0.094959	0.113785	0.081173	0.08742
3	24	0.11731	0.105882	0.12154	0.112393	0.107297	0.117443	0.120905
4	9	0.024172	0.020277	0.017372	0.025521	0.013978	0.032468	0.020795
5	10	0.027634	0.034758	0.033329	0.033603	0.054139	0.018652	0.035577
6	10	0.291812	0.290038	0.288559	0.292498	0.287961	0.294891	0.290626
7	8	0.014856	0.009242	0.062845	0.049828	0.054509	0.036621	0.021569
8	9	0.057945	0.02245	0.050561	0.034076	0.040873	0.014243	0.007553
8	10	0.211034	0.173142	0.088972	0.108996	0.099237	0.132514	0.152839
9	11	0.131301	0.134152	0.08511	0.116418	0.12153	0.082181	0.123879
9	12	0.135026	0.127233	0.137694	0.10947	0.120491	0.142826	0.122752
10	11	0.00228	0.001456	0.04355	0.016485	0.010502	0.048634	0.007364
10	12	0.002712	0.006297	0.006605	0.021375	0.009933	0.008854	0.006888
11	13	0.055352	0.041584	0.114075	0.063646	0.04181	0.124056	0.060451
11	14	0.011868	0.025234	0.07836	0.009141	0.014325	0.089981	0.001722
12	13	0.059359	0.056195	0.067316	0.078562	0.050539	0.068688	0.069253
12	23	0.117661	0.104379	0.113518	0.029498	0.103397	0.119356	0.075812
13	23	0.033032	0.023474	0.021203	0.068128	0.028085	0.025352	0.01604
14	16	0.043342	0.083141	0.072197	0.047777	0.081805	0.115739	0.013026
15	16	0.020402	0.026645	0.005853	0.003353	0.015255	0.01945	0.032154
15	21	0.033352	0.079284	0.08574	0.057339	0.052804	0.034996	0.074705
15	21	0.033352	0.079284	0.08574	0.057339	0.052804	0.034996	0.074705
15	24	0.071454	0.065071	0.073787	0.068722	0.065867	0.071528	0.073438
16	17	0.018419	0.022974	0.061135	0.035936	0.002841	0.014986	0.024512
16	19	0.038306	0.040963	0.047953	0.005089	0.047562	0.04104	0.008054
17	18	0.012482	0.012998	0.036108	0.019123	0.002134	0.009969	0.020506
17	22	0.025243	0.011309	0.031908	0.005097	0.001385	0.019527	0.05976
18	21	0.019918	0.01349	0.008237	0.003095	0.040598	0.011683	0.005251
18	21	0.019918	0.01349	0.008237	0.003095	0.040598	0.011683	0.005251
19	20	0.048704	0.051149	0.057111	0.02153	0.056727	0.051106	0.023243
19	20	0.048704	0.051149	0.057111	0.02153	0.056727	0.051106	0.023243
20	23	0.034319	0.035682	0.038775	0.020605	0.038575	0.035581	0.021119
20	23	0.034319	0.035682	0.038775	0.020605	0.038575	0.035581	0.021119
21	22	0.010971	0.030332	0.051227	0.020013	0.032197	0.011165	0.067134

با توجه به جدول فوق مقدار شاخص L برای مرحله دوم از مراحل دیگر کمتر می‌باشد که این امر طبیعی بوده و بدلیل در نظر گرفتن شاخص شبکه در این مرحله می‌باشد. هرچند این شاخص در مرحله پنجم نیز مقدار مناسبی دارد که در این مرحله کلیه

مراحل در نظر گرفته شده است. بنابراین با در نظر گرفتن این شاخص میزان حاشیه امنیت ولتاژ شبکه به بیشترین مقدار خود می‌رسد که در مرحله آخر نیز این شاخص در هر خط مقداری بسیار کم و نزدیک به صفر دارد و حاشیه امنیت بالا می‌باشد. در جداول ۳ تا ۵ مقدار توان ظاهری، توان راکتیو و توان اکتیو جاری شده در هر خط شبکه در این سناریو ارائه شده است.

جدول ۳. مقدار توان ظاهری جاری شده در هر خط در سناریوی دوم

From Bus	To Bus	Stage1	Stage2	Stage3			Stage4	Stage5	MaxLimit
				VCA1	VCA2	VCA3			
1	2	20.27292	15.65697	25.15938	14.04656	36.25689	20.91906	11.6312	175
1	3	25.27343	25.38537	24.5413	25.26862	22.41161	27.19045	23.80594	175
1	5	59.58779	59.24767	59.77667	59.49612	59.01555	60.07861	59.46235	175
2	4	42.26278	41.87228	41.62811	42.50902	41.34491	43.22586	41.95987	175
2	6	47.67865	47.59045	47.83725	47.84165	47.77801	47.85654	47.79063	175
3	9	27.38775	28.81201	28.69148	29.10424	30.62711	27.78034	28.00806	175
3	24	210.3194	209.2028	211.7927	211.1152	209.1069	211.872	210.7331	400
4	9	36.77509	36.657	36.56568	36.69679	36.43812	37.00308	36.63496	175
5	10	14.81597	16.22682	15.52521	15.83327	20.20608	13.2796	16.17196	175
6	10	89.6264	89.81552	89.63463	89.44003	89.78365	89.34754	89.5745	175
7	8	113.9294	114.1342	117.2073	116.1101	116.528	115.185	114.4926	175
8	9	38.07794	37.20076	37.77844	37.34875	37.42303	37.1575	37.18137	175
8	10	36.58502	33.18285	25.67467	27.37132	26.68411	29.22294	31.12574	175
9	11	112.5681	113.2439	108.043	111.3552	112.1546	107.7465	112.044	400
9	12	124.789	124.3609	125.3928	122.5333	124.1185	125.7917	123.588	400
10	11	153.5465	153.857	153.3492	153.9251	153.8172	153.5031	153.7196	400
10	12	166.7559	166.8874	167.436	166.7959	167.0788	167.5708	166.5396	400
11	13	90.58055	88.11461	105.996	91.78079	88.38275	108.877	90.97815	500
11	14	177.5523	178.9456	178.7421	177.9823	177.9698	180.2489	178.2136	500
12	13	70.45427	69.8135	72.46243	75.86879	68.41554	72.85891	73.08944	500
12	23	229.8549	229.5216	231.0584	227.8915	229.8992	231.3326	228.4594	500
13	23	226.6715	226.4099	228.7812	229.0624	226.5509	228.9731	227.1679	500
14	16	379.4286	385.2517	371.1355	380.279	384.4069	373.0445	377.9022	500
15	16	117.4591	121.1948	113.5152	114.1358	118.3807	115.9944	122.6829	500
15	21	216.4349	219.1105	220.0996	218.1348	217.9757	216.7567	218.7297	500
15	21	216.4349	219.1105	220.0996	218.1348	217.9757	216.7567	218.7297	500
15	24	215.8224	214.2912	217.51	216.4881	214.2395	217.4547	216.3711	500
16	17	324.8609	324.4272	326.979	324.1778	323.168	324.1786	324.8116	500
16	19	119.5661	120.0905	126.3714	110.5965	123.2886	124.0816	111.2314	500
17	18	188.3408	188.3754	197.3061	189.1183	186.0369	187.3909	190.9299	500
17	22	141.0079	140.4365	140.2235	140.3751	140.2035	140.8377	140.9471	500
18	21	62.80954	62.30965	60.3088	60.05615	72.96215	60.73483	60.49146	500
18	21	62.80954	62.30965	60.3088	60.05615	72.96215	60.73483	60.49146	500
19	20	49.46541	50.54595	51.91428	39.42548	52.90483	49.11776	39.96709	500
19	20	49.46541	50.54595	51.91428	39.42548	52.90483	49.11776	39.96709	500
20	23	107.8908	108.6451	108.42	102.7446	109.8801	106.6719	102.8969	500
20	23	107.8908	108.6451	108.42	102.7446	109.8801	106.6719	102.8969	500
21	22	156.8477	157.7593	158.9703	157.5569	158.0267	156.9737	159.6758	500

با توجه به جداول فوق مشخص است که برنامه‌ریزی بازار توان راکتیو میزان شارش توان در خطوط شبکه را بگونه‌ای تنظیم نموده‌است که هیچ خطی از میزان ماکزیمم خود تجاوز ننموده است. این امر بدلیل در نظر گرفتن هدف در مرحله چهارم می‌باشد که میزان بارپذیری خطوط را نیز در برنامه‌ریزی تداخل داده است. البته لازم به ذکر است که توان عبوری از خطوط در مراحل چهارم و پنجم که ترم بارپذیری در نظر گرفته شده است کمتر از مراحل دیگر می‌باشد که عبارتی در این مراحل حاشیه امنیت

شبکه جهت وقوع خطا و پیشامد بیشتر شده است. مقادیر منفی توان نشان‌دهنده خلاف جهت بودن شارش توان می‌باشد. طبق نتایج واضح است که اگر بهره‌بردار سیستم میزان رزرو توان راکتیو را بصورت کلی تعیین نماید، رزرو VCA1 بسیار کمتر از VCA2 و VCA3 می‌باشد و مقادیر مناسب و کافی بنظر نمی‌رسد. بنابراین در حالت وجود اغتشاش در VCA1 اندازه ولتاژ باس‌های VCA1 ممکن است افت نماید و شبکه دچار فروپاشی شود. اما همانگونه که مشخص است اگر برنامه‌ریزی بصورت محلی انجام شود، میزان رزرو دقیق برای هر ناحیه بخصوص در حالت وجود اغتشاش حتی در شبکه موجود می‌باشد. بنابراین واضح است که بهره‌بردار سیستم باید رزرو توان راکتیو را در هر ناحیه کنترلی ولتاژ بصورت محلی در نظر بگیرد که در مرحله پنجم نیز این امر باعث شده است که توان راکتیو کافی در هر ناحیه وجود داشته باشد. با توجه به نتایج واضح است که با استفاده از الگوریتم احتمالی برای حل مساله، بهره‌بردار سیستم برنامه‌ریزی بازار توان راکتیو مناسب و کارآمدی در شبکه با وجود سرویس‌های کمکی پیش‌رو با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار که احتمال و خطا را به مساله وارد می‌کند، بدست می‌آورد.

نتیجه‌گیری

در سیستم‌های قدرت نظم‌یافته، بازار توان راکتیو یکی از مهمترین سرویس‌های کمکی می‌باشد که تأثیری برجسته بر قابلیت و امنیت سیستم قدرت دارد. تقریباً در تمامی بازارهای برق، مسئولیت تامین توان راکتیو مناسب بر بازار بر عهده بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO) می‌باشد. در حال حاضر روشی کلاسیک برای شفاف نمودن بازار توان راکتیو وجود ندارد. در بازارهای برق متفاوت روش‌های مختلفی برای تامین توان راکتیو مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به فلسفه اصلی بازارهای برق، بهره‌بردار سیستم سعی می‌نماید تا توان راکتیو را با کمترین هزینه ممکن تامین نماید. اما در سیستم‌های قدرت، شبکه انتقال بخشی کلیدی می‌باشد که توان الکتریکی را از ژنراتورها به مصرف‌کننده‌ها منتقل می‌نماید. در اغلب بازارهای برق، به منظور تبادل توان الکتریکی در خطوط، باید ظرفیت خطوط جبران گردد. همچنین تامین توان راکتیو یک سرویس کمکی مهم می‌باشد که تقریباً در تمامی بازارهای برق، توسط قراردادهای تجاری با شریکان بازار برقرار می‌شود. بدلیل تأثیر برجسته برنامه‌ریزی توان راکتیو بر قابلیت و امنیت سیستم، در هنگام برنامه‌ریزی و تنظیم بازار راکتیو مسائل فنی مختلفی از جمله جنبه‌های اقتصادی باید در نظر گرفته شوند. در این پژوهش الگوریتم و فرمولبندی جدیدی برای تامین توان راکتیو در بازارهای برق ترکیبی ارائه گردید. تابع هزینه کلی در نظر گرفته شده شامل هزینه تامین توان راکتیو، هزینه تلفات انتقال و هزینه انتقال انرژی می‌باشد. از سوی دیگر بازار توان راکتیو برروی پایداری ولتاژ، اندازه ولتاژ تمامی باس‌ها، شارش توان در خطوط انتقال تأثیر می‌گذارد و می‌تواند قراردادهای توان راکتیو را تغییر دهد. بنابراین الگوریتم سعی نموده است تا حاشیه پایداری ولتاژ سیستم و میزان رزرو توان راکتیو در هر ناحیه کنترلی ولتاژ را افزایش دهد. بعلاوه کاهش احتمال وقوع پیشامد در خطوط و دیگر اهداف نیز به الگوریتم اضافه گردید. اما این اهداف باید در برنامه‌ریزی سیستم در نظر گرفته شوند و در شرایط سیستم‌های مختلف و با توجه به مایحتاج سیستم، بهره‌بردار می‌تواند تأثیر هر هدف را با تغییر ضریب وزن‌های هر ترم در تابع چندهدفه کاهش دهد. طبق نتایج ارائه شده مشخص است که کمترین هزینه برای مرحله سوم بدست آمده است. اما اگر اپراتور تنها به این برنامه‌ریزی اکتفا نماید، شبکه دارای ولتاژ مناسب و یا حاشیه بارپذیری مناسب نمی‌باشد بخصوص در نواحی در نظر گرفته شده این امر محقق نمی‌گردد. همچنین با توجه به جداول مشخص است که مقدار هر هدف در هر مرحله مربوطه بهترین مقدار است، اما بقیه اهداف بدرستی رعایت نمی‌گردد. پس لازم است که کلیه مراحل در مرحله ۵ در نظر گرفته شود. بنابراین مرحله ۵ که کاملترین مرحله است، بهترین برنامه‌ریزی بازار توان راکتیو را دارد. در این مرحله بهترین حاشیه امنیت ولتاژ سیستم، کمترین هزینه، بیشترین بارپذیری و ... برآورده شده است. لازم به ذکر است که باتوجه به این اطلاعات نمی‌توان بطور قطع برنامه‌ریزی بدست آمده را بهترین دانست و باید اطلاعات تکمیل شده‌تری نیز مانند میزان انحراف کلی هر مرحله و ... در دسترس باشد که از حوصله این پژوهش خارج بوده و می‌توان در تحقیقات آتی آن را بررسی نمود.

- پیرایش، ابوالفضل، (۱۳۸۵)، بهبود مکانیزم های تامین و قیمت گذاری توان راکتیو در بازارهای رقابتی الکتریسیته بر پایه بازار، رساله دکترا، دانشگاه صنعتی شریف.
- ربیعی، عبدالرضا، (۱۳۸۸)، توسعه الگوی اقتصادی فنی قیمت گذاری توان راکتیو در سیستم های تجدید ساختار شده، رساله دکترا، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- رضا اسکندرزاده، رضا، (۱۳۹۱)، بررسی روش های قیمت گذاری و تسویه بازار توان راکتیو، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- Pirayesh, M. Vakilian, R. Feuillet, N. Hadi-Said, A conceptual structure for value based assessment of dynamic reactive power support in power markets, *Electr. Power Syst. Res.* 77 (2007) 761–770 .
- Rabiee, H. Shayanfar, N. Amjadi. 2009, Multiobjective clearing of reactive power market in deregulated power systems , *Applied Energy*, Vol. 86, Issue 9, pp-1555-1564.
- Amin Kargarian, Mahdi Raoofat, Mohammad Mohammadi, Probabilistic reactive power procurement in hybrid electricity markets with uncertain loads, *Electric Power Systems Research* 82 (2012) 68–80.
- Grigg, P. Wong, P. Albrecht, R. Allan, M. Bhavaraju, R. Billinton, Q. Chen, C. Fong, S. Haddad, S. Kuruganty, et al. The IEEE Reliability Test System 1996. A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(3): 1010-1020, 1999.
- Lehmköster, Security constrained optimal power flow for an economical operation of FACTS-Devices in liberalized energy markets, *IEEE Trans. Power Deliv.* 17 (April) (2002) 603–608.
- California's ISO Filing in front of Energy Regulatory Commission, April 1996.
- Carmen Lucia Tancredo Borges, Vinícius Ferreira Martins, Multistage expansion planning for active distribution networks under demand and Distributed Generation uncertainties, *Electrical Power and Energy Systems* 36 (2012) 107–116.
- F.M. Echavarren, E. Lobato, L. Rouco, Steady-state analysis of the effect of reactive generation limits in voltage stability, *Elect. Power Syst. Res.* 79 (2009) 1292–1299.
- Federal Energy Regulatory Commission Order No. 888. <<http://www.ferc.gov/legal/maj-ord-reg/land-ord.asp>>
- FERC Staff Report. 2005, Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption, Federal Energy Regulatory Commission, Docket No. AD05-1-000.
- H. Chen, C. Canizares, A. Singh, ANN-based Short-Term Load Forecasting in Electricity Markets. *IEEE/PES WM-2001*, Columbus, Ohio, January, 2001.
- El-Samahy, K. Bhattacharya, C. Canizares, M.F. Anjos, J. Pan, A procurement market model for reactive power services considering system security, *IEEE Trans. Power Syst.* 23 (2008) 137–149.
- J. Barquin Gil, T. G. S. Román, J. J. Alba Rios, P. Sanchez Martin. 2000, Reactive power pricing: a conceptual framework for remuneration and charging procedures, *Power Systems*, *IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 2, pp-483-489.
- J. Bialek, Allocation of transmission supplementary charge to real and reactive loads, *IEEE Trans. Power Syst.* 13 (1998) 749–754.
- J. Zhong, E. Nobile, A. Bose, K. Bhattacharya. 2004, Localized reactive power markets using the concept of voltage control areas, *Power Systems*, *IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 3, pp-1555-1561.
- J. Zhong, K. Bhattacharya, Reactive power management in deregulated power systems—a review, *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting* 2 (2002) 1287–1292.
- J. Zhong, K. Bhattacharya 2002, Toward a competitive market for reactive power, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 4, pp-1206-1215.
- K. Bhattacharya, J. Zhong, Reactive power as an ancillary service, *IEEE Trans. Power Syst.* 16 (2001) 294–300.

- K. Kargarian, M. Raoofat, and Mohammad Mohammadi. 2012, Probabilistic reactive power procurement in hybrid electricity markets with uncertain loads, *Electric Power Systems Research* Vol. 82, NO. 1, pp. 68-80.
- K. Kargarian, M. Raoofat. 2011, Stochastic reactive power market with volatility of wind power considering voltage security. *Energy*, Vol. 36, NO. 5, pp. 2565-2571.
- K. Singh, N.P. Padhy, J.D. Sharma, Social welfare maximization considering reactive power and congestion management in the deregulated environment, *Electr. Power Comp. Syst.* 38 (2010) 50-71 .
- M. J. Rider, V. L. Paucar. 2004, Application of a nonlinear reactive power pricing model for competitive electric markets, *Generation, Transmission and Distribution*, IEE Proceedings, vol. 151, no. 3, pp-407-414.
- M. Shahidehpour, H. Yamin, Z. Li, *Market Operations in Electric Power Systems*, Wiley, New York, 2002.
- N. Amjady, A. Rabiee, H. A. Shayanfar 2010, A stochastic framework for clearing of reactive power market. *Energy*, Vol. 35, NO. 1, pp. 239-245.
- N. Amjady, A. Rabiee, H. Shayanfar. 2010, Pay-as-bid based reactive power market, *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp-376-381.
- N. Yang, C. W. Yu, F. Wen, C. Y. Chung. 2007, An investigation of reactive power planning based on chance constrained programming. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29 NO. 9, pp: 650-656.
- National Electricity Market Management Company, Guide to ancillary services in the National Electricity Market, Issued August, 2001.
- National Grid Company (NGC) Reactive Market Report. 2006, Eighteenth Tender Round for Obligatory and Enhanced Reactive Power Service, Available on <http://www.nationalgrid.com/uk/electricity>.
- NERC Operating Policy-10 on Interconnected Operation Services, North Amer. Elect. Reliability Council, Draft-3.1, 2000 .
- P. Frias, T. Gómez, D. Soler, 2008, A reactive power capacity market using annual auctions. *Power Systems*, IEEE Transactions on. Vol. 23, NO. 3, pp. 1458-1468.
- P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- P. Lagonotte, J.C. Sabonnadiere, J.Y. Leost, J.P. Paul, Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France, *IEEE Trans. Power Syst.* 4 (1989) 479-486.
- R. Baldick. 2004, Reactive issues - reactive power in restructured markets, *Power and Energy Magazine*, IEEE, vol. 2, no. 6, pp-14-17.
- S. Hao. 2003, A reactive power management proposal for transmission operators, *Power Systems*, IEEE Transactions on , vol. 18, no. 4, pp-1374-1381.
- S. Hasanpour, R. Ghazi, M. H. Javidi. 2009, A new approach for cost allocation and reactive power pricing in a deregulated environment, *Electr Eng*, pp-27-34.
- S. Phichaisawat, Y.H. Song, X.L. Wang, X.F. Wang, Combined active and reactive congestion management with FACTS devices, *Electr. Power Comp. Syst.* 30 (2002) 1195-1205.
- Saini, A. Saraswat. 2013, Multi-objective reactive power market clearing in competitive electricity market using HFMOEA, *Applied Soft Computing*, vol. 13, no. 4, pp-2087-2103.
- Saraswat, A. Saini, A. K. Saxena. 2012, Day-Ahead Zonal Reactive Power Market Clearing Model for Competitive Markets: A Multi-objective Approach, *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, Fourth International Conference on.
- T. Plavsic, I. Kuzle, Two-stage optimization algorithm for short-term reactive power planning based on zonal approach, *Electr. Power Syst. Res.* 81 (2011) 949-957.
- X. Wang, P. Guo, X. Huang. 2011, A review of wind power forecasting models, *Energy procedia*, Vol. 12, pp. 770-778.
- Y. Dai, Y. X. Ni, F. S. Wen, Z. X. Han. 2000, Analysis of reactive power pricing under deregulation, *Power Engineering Society Summer Meeting*, IEEE, vol. 4, pp-2162-2167.

- Y. Zhao, M. R. Irving, Y. Song. 2005, A cost allocation and pricing method for reactive power services in the new deregulated electricity market environment, IEEE transmission and distribution conference, Asia and Pacific, Dalian, China.

مکان‌یابی بهینه سکشنلایزر، ریکلوزر و نشانه‌گر خطا در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم NSGAI

حمید حیاتی^۱

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۳/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۰۴

چکیده

قابلیت اطمینان یکی از مهمترین پارامترهایی است که در این چند دهه اخیر بشدت مورد توجه قرار گرفته است و فعالیت های گسترده ای در زمینه شناسایی شاخص ها و بهبود قابلیت اطمینان صورت گرفته است. خاموشی ها و به عبارتی قطع برق مهمترین مسئله در مطالعات قابلیت اطمینان است. خطاهای شبکه فشار متوسط توزیع بیشترین تاثیر را بر قابلیت اطمینان مصرف کنندگان انتهای دارد. از این رو شرکت های توزیع به دنبال افزایش قابلیت اطمینان شبکه توزیع هستند. یکی از راهکارهای افزایش قابلیت اطمینان بکارگیری تجهیزات حفاظتی و کلیدزنی در شبکه توزیع است. در این مقاله روشی برای جایابی همزمان سکشنلایزر، ریکلوزر و نشانه‌گر خطا با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه NSGAI به منظور کمینه کردن هزینه کلی و بهبود شاخص های قابلیت اطمینان ارائه شده است. چهار شاخص قابلیت اطمینان SAIFI، SAIDI، MAIFI و ENS در تابع هدف پیشنهادی در نظر گرفته شده اند. روش ارائه شده بر روی فیدر ۸۲ باسه شهرک صنعتی دزفول اجرا شده و نتایج آن ارائه شده است.

واژگان کلیدی: قابلیت اطمینان، ریکلوزر، سکشنلایزر، نشانه‌گر خطا، الگوریتم NSGAI

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر شرکت‌های توزیع علاقه بیشتری به بهبود وضعیت قابلیت اطمینان و کیفیت برق تحویلی به دلیل تجدید ساختار نشان می‌دهند و همه‌ی شرکت‌ها برای رقابت با یکدیگر به دنبال جلب رضایت بیشتر مشتری‌های خود هستند و مساله قطع برق مصرف کنندگان مختلف و هزینه آن‌ها اهمیت خاصی یافته است. باید توجه شود که سیستم توزیع نقش مهمی در ارتباط بین سیستم انتقال و مصرف کنندگان دارد، و معمولاً در حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد مشکلات قابلیت اطمینان از این قسمت نشئت می‌گیرد. (کاظم پور چورسی، محسن، دشتی، رضا دشتی (۱۳۹۳)).

در سیستم‌های فشار متوسط می‌توان با نصب و جایابی مناسب کلیدها در شبکه توزیع به قابلیت اطمینان مورد نظر رسید. با توجه به اینکه حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد خطاها در خطوط توزیع بصورت گذرا بوده و بطور خودکار رفع می‌گردند معمولاً در این نوع سیستم‌ها برای رفع خطاهای گذرا، کلید تغذیه کننده خط را یک بار و بعضی مواقع دو بار باز و بسته می‌نمایند تا از رفع خطای واقع شده اطمینان حاصل شود. این عمل توسط ریکلوزر به منظور حذف خطاهای گذرا، ایزوله کردن خطاها، مدیریت ساختار شبکه و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان سیستم انجام می‌شود و چون هزینه هر دستگاه ریکلوزر در مجموع هزینه‌های احداث شبکه قابل توجه است، لذا استفاده از آن‌ها باید دارای توجیه اقتصادی باشد. بنابراین لازم است که تعداد و مکان نصب ریکلوزرها با توجه به اهداف اقتصادی در کنار هدف ارتقاء عملکرد شبکه بصورت بهینه تعیین شود (Dehghani, Nematollah, Dashti, Rahman. (2011)). البته مشکل ریکلوزر در این است که اگر خطای دائمی ظاهر شود، ریکلوزر بعد از چند بار قطع و وصل در نهایت دستور کلی برای قطع مدار را صادر می‌کند که وقتی ریکلوزر به طور دائمی بی‌برق شود همه انشعابات توزیع قطع می‌شد درحالی که ممکن است فقط یک قسمت جزئی اتصالی کرده باشد. برای رفع این عیب سکشنالایزر به عنوان مکمل ریکلوزر استفاده می‌شود. سکشنالایزر در قسمت‌های مختلف بعد از ریکلوزر قرار می‌گیرد و بعد از رخ داد اتصالی، محدوده را تشخیص می‌دهد و فقط همان قسمت را قطع می‌کند.

از طرفی مکانیابی محدوده‌ی خطا یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های شرکت‌های توزیع است. به همین دلیل از روش‌های ارزان و هوشمند دیگر مانند نصب نشانه‌های خطا استفاده می‌شود. نشانه‌گرهای خطا سیگنال جریان اتصال کوتاه و یا جریان هجومی خطی را که بر روی آن قرار دارند فوری شناسایی می‌کنند و تیم تعمیر را به محل منطقه‌ی معیوب در شبکه راهنمایی می‌کنند. این کار جدا کردن مدار آسیب دیده و بازایی منبع تغذیه‌ی نرمال را سرعت می‌بخشد. به طور کلی نشانه‌گر خطا می‌تواند هزینه‌های عملیاتی و وقفه در خدمات را با شناسایی پاره‌خط حاوی خطا کاهش دهد (Jen-Hao Teng, Senior Member, IEEE, Wei-Hao Huang, and Shang-Wen Luan (2013)).

مقالات زیر تعدادی از روش‌های جایابی جداگانه‌ی نشانه‌گرهای خطا، ریکلوزر و سکشنالایزر را بیان می‌کند. تاثیر کلیدهای ریکلوزر و سکشنالایزر بر بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان بصورت کمی مورد مطالعه قرار داده است (R. Chen, K. Allen, and R. Billinton 1995). روش پیشنهادی تعیین محل خطا را به روش توپولوژیکی سیستم‌های توزیع و وضعیت نشانه‌گرهای خطا نشان می‌دهد (I. Dzafic, P. Mohapatra, and H. T. Neisius 2010). جایابی نشانه‌گر خطا در سیستم توزیع الگوریتم ازدحام ذرات بهبود یافته مورد مطالعه قرار داده است (کاظم پور چورسی، محسن، دشتی، رضا دشتی (۱۳۹۳)). جایابی نشانه‌گر خطا در سیستم‌های توزیع با در نظر گرفتن دستگاه‌های کنترلی و حفاظتی با استفاده از یک رویکرد چند هدفه بیان می‌کند (Shahsavari, Alireza, Mazhari, Seyed Mahdi, Student Member, IEEE, Fereidunian, Alireza, Member, IEEE, and Lesani, Hamid, (2013)). جایابی بهینه ریکلوزر و ژنراتورهای توزیع شده با هدف قابلیت اطمینان با استفاده از الگوریتم Ant Clony بیان می‌کند (Lingfeng Wang, Student Member, IEEE, and Chanan Singh 2008). جایابی سوئیچ و ریکلوزر در سیستم توزیع با توجه به عدم اطمینان بارها، نرخ خرابی و نرخ تعمیر بیان می‌کند (Roorkee 247667, Indiaa. Vinay Pant). در این مقاله تاثیر جایابی بهینه چند نوع وسیله حفاظتی به ویژه ریکلوزر، سکشنالایزر و نشانه‌گر خطا در افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه با در نظر گرفتن خطاهای گذرا و دائم صورت گرفته است.

۲- تابع هدف

در این روش تابع هدف انتخابی براساس معیارهای قابلیت اطمینان و هزینه (هزینه نصب، نگهداری و تعمیرات) تعریف می‌شود که بصورت زیر است:

$$F = w_1 COST + w_2 (SAIFI) + w_3 (SAIDI) + w_4 (MAIFI)$$

در اینجا cost - تابع هزینه که فرمول آن به شرح زیر است:

$$COST = \sum_{t=1}^T (N_r CC_r + N_{FID} CC_{FID}) \left[\frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m - 1} \right] - \text{دوره ی سرمایه گذاری } T \text{ در اینجا}$$

$$+ \sum_{t=1}^T (N_r MC_r + N_{FID} MC_{FID} + CENS)(1+i)^{-t}$$

N_r - تعداد ریکلوزر ها

C_r - هزینه نصب ریکلوزر

N_{FID} - تعداد نشانه گر خطا

C_{FID} - هزینه نصب نشانه گر خطا

i - نرخ بهره

C_R - هزینه تعمیرات و نگهداری سالانه هر ریکلوزر و سکشنالایزر

C_{FID} - هزینه تعمیرات و نگهداری سالانه ی FID

$CENS$ - هزینه انرژی توزیع نشده

در فرمول تابع هدف SAIFI متوسط دفعات خاموشی سیستم است که بیانگر این است هر یک از مشترکین شبکه چند بار بطور متوسط در طول دوره مورد بررسی ممکن است قطع شوند که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$SAIFI = \frac{1}{NC_T} \sum_{s=1}^S \left\{ \lambda_s \sum_{k=1}^K [I_{s,k} \times NC_k] \right\}$$

که در آن

λ_s : نرخ خرابی سکشن s

NC_k : تعداد مشترکین بار k

NC_T : تعداد کل مشترکین

K : تعداد کل نقاط بار

S : تعداد کل سکشن ها

$I_{s,k}$: متغیر باینری نشان دهنده ایجاد وقفه در تغذیه بار k در صورت رخداد خطا در سکشن k است که به صورت زیر

تعریف می شود:

$$I_{s,k} = \begin{cases} 1 & \text{اگر خطای سکشن S باعث وقفه در تغذیه بار k ام شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

SAIDI متوسط زمان قطعی هر مشترک در دوره است که این بیانگر میانگین مدت زمانی است که هر مصرف کننده در طول

دوره ی مورد بررسی با قطعی روبه رو می شود که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$SAIDI = \frac{1}{NC_T} \sum_{s=1}^S \left\{ \lambda_s \sum_{k=1}^K [D_{s,k} \times NC_k] \right\}$$

که در این رابطه:

$D_{s,k}$: زمان خاموشی مشترکین باس k ام ناشی از خطا در سکشن s

MAIFI شاخصی است که متوسط دفعات خاموشی گذرا هر مشترک را بیان می کند که بصورت زیر محاسبه می شود:

$$MAIFI = \frac{1}{NC_T} \sum_{s=1}^S \left\{ \lambda_{ms} \sum_{k=1}^K [I_{s,k} \times NC_k] \right\}$$

که در آن λ_{ms} نرخ خرابی گذاری سکشن s را نشان می دهد.

هزینه انرژی توزیع نشده به صورت زیر محاسبه می شود:

$$CENS = \sum_{s=1}^S \left\{ \lambda_s \sum_{k=1}^K P_{NS,s,k} \times \sum_{l=1}^4 [\alpha_{l,s} \times D_{s,k} \times C_{KWh-l}] \right\}$$

که در اینجا: $P_{NS,s,k}$: توان بار قطع شده در سکشن k ناشی از خطای سکشن s

$\alpha_{l,s}$: درصد تعرفه بار نوع l در سکشن s

C_{KWh-l} : قیمت هر کیلو وات ساعت انرژی از تعرفه نوع l

اثر حضور FI بر زمان مکانیابی خطا با استفاده از تابع هدف زیر بررسی می شود که بصورت زیر است:

$$T_1 = \frac{R_1}{\sum_{i=1}^n R_i} * T_0$$

در اینجا T_0 - متوسط زمان خطایابی کل فیدر بدون وجود نشانه گر خطا

R_i : مجموع طول ناحیه نام به وجود آمده بین نشانه گر ها و ادوات حفاظتی دیگر که فرمول آن بصورت زیر است:

$$R_i = \sum_j Z_{ij}$$

که در آن:

Z_{ij} - طول خطوط موجود در ناحیه R_i

۳- روش محاسبه شاخص های قابلیت اطمینان

برای محاسبه شاخص های قابلیت اطمینان با فرض خطا در تک تک سکشن ها، عملیات بازیابی بار انجام شده و زمان خاموشی هر نقطه بار محاسبه می شود. با وجود ریکلوزر و سکشنالایز، وضعیت نقاط بار فیدر با توجه به محل خطا از لحاظ تجربه خاموشی به صورت زیر خواهد بود:

- ۱- اگر محل خطا بالادست ریکلوزر قرار گیرد، تمام نقاط بار خاموشی را تجربه خواهند کرد.
- ۲- اگر محل خطا بین مکان ریکلوزر و سکشنالایز اتفاق بیفتد، بارهای بالادست ریکلوزر بدون وقفه خواهند بود و بارهای پایین دست ریکلوزر خاموشی را تجربه خواهند کرد.
- ۳- اگر مکان خطا در پایین دست سکشنالایز باشد، تنها بارهای پایین دست سکشنالایز خاموشی رو تجربه کرده و بارهای بالادست سکشنالایز بدون وقفه خواهند بود.
- ۴- بعد از تعیین وضعیت وضعیت خاموشی نقاط بار، ابتدا با باز کردن نزدیکترین کلیدهای جداکننده بالادست و پایین دست محل خطا، منطقه خطا ایزوله می شود و عملیات بازیابی برای بارهای دچار وقفه آغاز می شود و زمان خاموشی برای بارهای مذکور به صورت زیر محاسبه می شود:
- ۵- بارهای بالادست منطقه خطا با عملیات کلیدزنی دوباره توسط منبع اصلی برقرار می شوند. زمان وقفه برای این بارها به اندازه زمان لازم برای کلیدزنی است.
- ۶- بارهای پایین دست منطقه خطا به دو دسته تقسیم می شوند. یک دسته که با عملیات مانور می شوند و زمان خاموشی آنها به اندازه زمان مورد نیاز برای انجام مانور است و دسته دیگر بارهایی است که از طریق مانور برقرار نمی شوند و زمان خاموشی آنها به اندازه زمان تعمیر خطا خواهد بود.
- ۷- بارهای واقع در منطقه خطا نیز بایستی تا زمان تعمیر خطا وقفه را تحمل کنند.

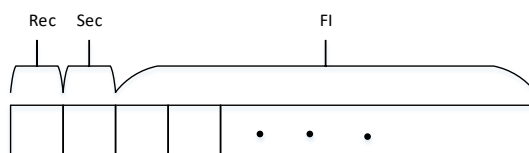
۴- حل مساله با الگوریتم NSGAI

مسائل بهینه سازی از نظر تعداد توابع هدف و معیار های بهینه سازی به دو دسته تقسیم مسائل بهینه سازی تک هدفه و چند هدفه تقسیم می شوند.

الگوریتم NSGAI جزو روش های مستقیم حل مسائل مکانیابی چند هدفه می باشد. باتوجه به سرعت و دقت بیشتر نسبت به سایر روش ها و همچنین ارائه یک سیستم پشتیبان تصمیم، به عنوان رهیافتی تازه در مسائل مکانیابی چند هدفه جانشین مناسبی برای روش های تجزیه و سنتی خواهد بود. روش کار این الگوریتم به شرح زیر است:

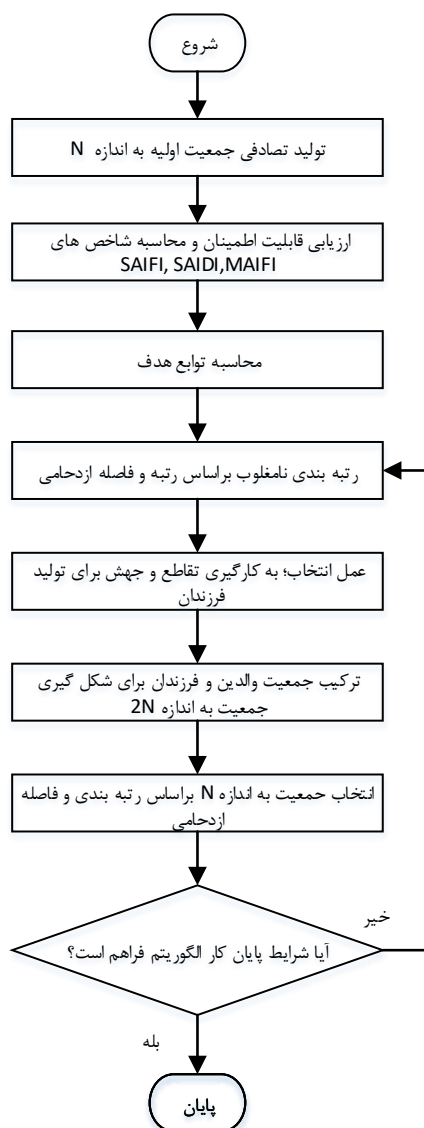
- ۱- ایجاد جمعیت اولیه

- ۲- محاسبه معیارهای برازندگی
 - ۳- مرتب کردن جمعیت براساس شرطهای غلبه کردن
 - ۴- محاسبه فاصله ازدحامی
 - ۵- انتخاب
- ساختار یک کروموزوم در این مساله به صورت شکل ۱ می باشد:



شکل ۱- ساختار یک کروموزوم پیشنهادی

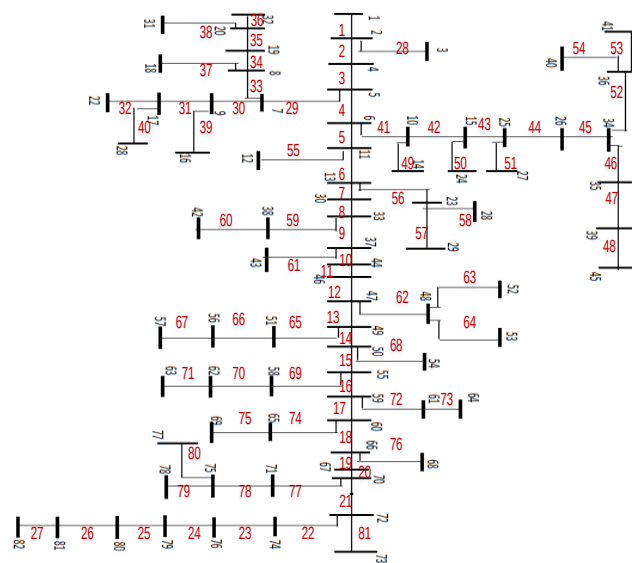
که ژن اول مربوط به ریکلوزر، ژن دوم مربوط به سکشنالایزر و ژن های آخر مربوط به نشانه گر خطا می باشند. فلوچارت این الگوریتم در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

۵- شبیه سازی

مطالعات بر روی دیاگرام تک خطی فیدر ۸۲ شینه شهرک صنعتی دزفول انجام شده که در شکل ۳ آمده است:



4

شکل ۳- دیاگرام شبکه تست پیشنهادی

اطلاعات اولیه مورد استفاده در برنامه شامل هزینه هر وسیله حفاظتی مورد استفاده و هزینه تعمیرات و نگهداری سالانه در جدول زیر آمده است:

جدول ۱

هزینه	موارد
۲۰۰۰۰۰۰	ریکلوزر
۴۰۰۰۰۰۰	نشانه گر خطا
۵۰۰۰۰۰۰	سکشنالایزر
۳۰۰۰۰۰۰۰	هزینه تعمیرات و نگهداری

پارامتر های الگوریتم NSGAII در جدول ۲ ذکر شده اند:

جدول ۲ پارامتر های الگوریتم پیشنهادی

مقادیر	پارامتر های الگوریتم پیشنهادی
۵۰	تعداد جمعیت اولیه
۰,۹	احتمال جهش
۰,۱	احتمال تقاطع
۱۵	تعداد ژن های یک کروموزوم
۵۰۰	تعداد تکرارها
۹۷ دقیقه	زمان تعمیر
۳۳ دقیقه	زمان کلیدزنی
۴۵ دقیقه	زمان مانور

نتایج به دست آمده از اجرای برنامه‌ی الگوریتم پیشنهادی در جدول ۳ ذکر شده‌اند. ستون اول مکان ریکلوزر، ستون دوم مکان سکشنلایزر را نشان می‌دهد و ستون سوم مکان نشانه‌گرهای خطا را مشخص می‌کنند. ستون‌های بعدی مقادیر ترم‌های تابع هدف را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود سه جواب بهینه نامغلوب حاصل شده است. پاسخ اول در سه ترم اول تابع هدف غالب است ولی در مورد شاخص MAIFI در مقایسه با دو پاسخ دیگر مغلوب است. در این پاسخ مکان ریکلوزر و سکشنلایزر به ترتیب در سکشن‌های ۶ و ۹ انتخاب شده و مکان نشانه‌گرهای خطا در ۵، ۷، ۱۶، ۲۱، ۵۲ قرار داده شده است. در این حالت شاخص‌های SAIFI، SAIDI و MAIFI به ترتیب دارای مقادیر ۱۵.۳۰، ۴۱.۷۵، ۰.۴۱ هستند و مجموع هزینه‌ها مقدار ۲.۸۵ بدست آمده است. می‌توان گفت که اگر کاهش شاخص‌های دائم قابلیت اطمینان مورد نظر باشد، پاسخ اول به عنوان پاسخ بهینه انتخاب خواهد شد. در غیر اینصورت اگر کاهش MAIFI اهمیت بیشتری از دید طراحان داشته باشد آنگاه یکی از پاسخ‌های دوم و یا سوم بایستی انتخاب شود. بدیهی است هر چه بدنبال کاهش شاخص MAIFI باشیم مکان ریکلوزر به ابتدای فیدر نزدیک‌تر خواهد شد.

جدول ۳ نتایج الگوریتم NSGA II

ریکلوزر	سکشنلایزر	نشانه گر خطا	SAIFI	SAIDI	COST	MAIFI
۶	۱۹	۵۰،۱۶،۲۱،۵۲	۱۵.۳۰	۴۱.۷۵	۲.۸۵	۰.۴۱
۲	۱۱	۵۰،۱۶،۲۱،۵۲	۱۶.۸۵	۴۲.۶۶	۳.۱۰	۰.۰۰
۲	۱۴	۵۰،۱۶،۲۱،۵۲	۱۷.۰۷	۴۲.۷۴	۳.۰۸	۰.۰۰

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر مساله جایابی کلیدهای ریکلوزر، سکشنلایزر، نشانه‌گر خطا بر روی فیدر ۸۲ باسه شهرک صنعتی دزفول مورد مطالعه قرار گرفته است که این کار با هدف به تعادل رساندن هزینه‌ها و ۴ شاخص قابلیت اطمینان MAIFI، SAIDI، SAIFI و ENS صورت گرفته است. مدل پیشنهادی با الگوریتم NSGAII شبیه‌سازی شده است که نتایج به دست آمده در جدول ۳ ذکر شده‌اند. طبق جدول ۳ سه جواب بهینه نامغلوب به دست می‌آید که پاسخ اول با توجه به شاخص‌های مورد نظر بر دو پاسخ دیگر غالب است اما باید توجه داشت که اگر شاخص MAIFI مورد نظر باشد دو پاسخ دیگر اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. باتوجه به ماهیت و ساختار شبکه‌های توزیع، استفاده از ادوات کلید زنی برای محدود سازی ناحیه خاموشی و کاهش مشترکین تأثیرپذیر از خطا، امری اجتناب ناپذیر است. تعیین بهترین آرایش و ترکیب برای این تجهیزات می‌تواند به بهبود قابلیت اطمینان و افزایش رضایتمندی مشترکین کمک کند.

مکان‌یابی ریکلوزر و سکشنلایزر به عنوان یکی از این ادوات، برای ارتقا قابلیت اطمینان و کاهش تعداد و مدت تداوم خاموشی‌ها در سیستم صورت می‌پذیرد. در این مقاله مدلی ریاضی جهت مکان‌یابی بهینه ریکلوزر و سکشنلایزر در شبکه‌های توزیع در قالب یک تابع هدف ارائه شده است. در مدل مزبور شاخص‌های قابلیت اطمینان نشان دهنده تعداد و مدت تداوم خاموشی‌ها لحاظ شده‌اند.

- کاظم پور چورسی، محسن، دشتی، رضا دشتی (۱۳۹۳). جایابی نشانگر خطا در سیستم توزیع با الگوریتم ازدحام ذرات بهبودیافته، کنفرانس ملی فناوری، انرژی و داده با رویکرد مهندسی برق و کامپیوتر
- Dehghani, Nematollah, Dashti, Rahman.(2011). Optimization of Recloser Placement to Improve Reliability by Genetic Algorithm. Energy and Power Engineering, 2011, 3, 508-512.
 - Jen-Hao Teng, Senior Member, IEEE, Wei-Hao Huang, and Shang-Wen Luan. (2013). IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS.
 - R. Chen, K. Allen, and R. Billinton, "Value-based distribution reliability assessment and planning," IEEE Trans. Power Del., no. 1, pp.۴۲۹-۴۲۱ Jan. 1995.
 - Dzafic, P. Mohapatra, and H. T. Neisius, "Composite fault location for distribution management systems," in Proc. IPEC 2010 Conf.
 - Shahsavari, Alireza, Mazhari, Seyed Mahdi, Student Member, IEEE, Fereidunian, Alireza, Member, IEEE, and Lesani, Hamid, (2013). IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS.
 - Lingfeng Wang, Student Member, IEEE, and Chanan Singh, Fellow, IEEE, Reliability-Constrained Optimum Placement of Reclosers and Distributed Generators in Distribution Networks Using an Ant Colony System Algorithm, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part c: applications and reviews, 38 (6), november 2008.
 - Switch and recloser placement in distribution system considering uncertainties in loads, failure rates and repair rates Afroz Alam*, Vinay Pant, Biswarup Das Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, Roorkee 247667, Indiaa

بهینه‌سازی فرآیند برشکاری تخلیه الکتریکی سیمی آلیاژ تیتانیوم Ti-6AL-4V با استفاده از
الگوریتم اجتماع ذرات چند هدفه
محمدرضا مرکی

مطالعه آزمایشگاهی حذف فلز جیوه از آب با استفاده از غشای اولترافیلتراسیون ماتریس
مرکب تیتانیوم دی اکسید/ پلی سولفون
کیوان حسینی، محسن دهقانی قناتغستانی

مدلسازی بهینه پاسخ فرکانسی اولیه در بازار برق با تسویه همزمان انرژی و خدمات جانبی
محمدرضا نیک فرجام، عبدالرضا توکلی

تنظیم بهینه توان راکتیو احتمالی در بازار برق ترکیبی با وجود عدم قطعیت بار با استفاده از
الگوریتم رقابت استعماری
محمد مهدی اسماعیلی، میلاد رضائی

مکانبازی بهینه سکشنالایزر، ریکلوزر و نشانگر خطا در شبکه توزیع با استفاده از الگوریتم
NSGAII
حمید حیاتی

پژوهش‌های نوین مهندسی

۰۲۱ ۳۳۲ ۲۰ ۲۴۸۷ ۰۲۱ ۴۳۸ ۵۷۱ ۲۴
۰۲۶ ۳۲۷۲ ۴۷۸۷ ۰۲۶ ۳۲۷۴ ۷۱ ۵۸
تهران: افسریه، ۱۵ متری چهارم، کوچه ۳۸، پلاک ۲۸، واحد ۲
کرج: چهارراه هفتتیر، خیابان لاله ۱، پلاک ۱۴، طبقه همکف