

بسم الله الرحمن الرحيم

کارافن

دوفصلنامه علمی - ترویجی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

سال چهاردهم - شماره چهل و دوم

پاییز و زمستان ۱۳۹۶

درجه‌ی علمی - ترویجی دوفصلنامه کارافن طی شماره ۳/۱۸/۶۰۸۳۷ در تاریخ

۱۳۹۲/۰۴/۳۰ از طرف کمیسیون بررسی نشریات علمی کشور، وزارت علوم،

تحقیقات و فناوری ابلاغ گردیده است.

دوفصلنامه علمی - ترویجی کارافن در پایگاه استنادی علوم کشورهای اسلامی

ISC نمایه می‌شود.

صحت آرا و اندیشه‌های مندرج در هر مقاله، به عهده‌ی نویسنده(ها) است.

آدرس: تهران، میدان ونک، خیابان برزیل شرقی، پلاک ۴، سازمان مرکزی دانشگاه فنی و حرفه‌ای،

دفتر فصلنامه کارافن، کدپستی: ۱۴۳۵۷۶۱۱۳۷

تلفن: ۰۲۱-۴۲۳۵۰۱۱۵

پست الکترونیک: karafan@tvu.ac.ir

وبسایت نشریه: <http://karafan.tvu.ac.ir>

دوفصلنامه علمی - ترویجی دانشگاه فنی و حرفه‌ای
سال چهاردهم - شماره چهل و دوم
پاییز و زمستان ۱۳۹۶

کارافنی

صاحب امتیاز: دانشگاه فنی و حرفه‌ای
مدیرمسئول: دکتر ابراهیم صالحی عمران
سرمدیر: دکتر نعمت‌الله عزیزی
مدیر داخلی: دکتر آذرچهر صحت
مدیر اجرایی: اکرم حسن
ویراستار: علیرضا استواری
ویراستار بخش انگلیسی: هاله فریار



طراحی و اجرای جلد:
مهندس محمد مشتاقی
سمیرا دانسرشت

اعضای هیأت تحریریه:

استاد دانشگاه مازندران و دانشگاه فنی و حرفه‌ای
استاد دانشگاه کردستان
استاد دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای
دانشیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای
استادیار پژوهشکده مطالعات فرهنگی و اجتماعی
استادیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای
استادیار دانشگاه فنی و حرفه‌ای

دکتر ابراهیم صالحی عمران
دکتر نعمت‌الله عزیزی
دکتر سیدعلی اصغر قریشی
دکتر مسعود شفیعی
دکتر سیدحیدر میرفخرالدینی
دکتر ویدا تقوائی
دکتر رضا مهدی
دکتر مهدی علینقی‌زاده اردستانی
دکتر معراج رجائی

آدرس: تهران، میدان ونک، خیابان برزیل شرقی، پلاک ۴، سازمان مرکزی دانشگاه فنی و حرفه‌ای، دفتر فصلنامه کارافن

کدپستی: ۱۴۳۵۷۶۱۱۳۷

تلفن: ۰۲۱-۴۲۳۵۰۱۱۵

پست الکترونیک: karafan@tvu.ac.ir
وبسایت نشریه: <http://karafan.tvu.ac.ir>

* صحت آرا و اندیشه‌های مندرج در هر مقاله، به عهده‌ی نویسنده(ها) است.

* فصلنامه کارافن در ویراست مقالات آزاد است.

اساتید محترمی که در داوری و ارزیابی مقالات این شماره همکاری داشته‌اند:

ساسان پیری - مصطفی جعفری - سجاد شفیعی - حامد شمسی - کریم علی‌اکبری -
محمدعلی علیپور - سیدياسر فخرموسوی - مریم مجیدزاده - محمدرضا مدبرنیا - نگین
معزی - مجتبی معصوم‌نژاد - داوود وارسته‌نسب - سعید وحیدی‌فر

راهنمای نگارش و نحوه‌ی ارسال مقالات علمی - ترویجی دوفصلنامه کارافن

۱. هدف نشریه کارافن انتشار نتایج پژوهش‌ها، مقالات و تجربیات علمی و کاربردی استادان و پژوهشگران دانشگاه و خارج از دانشگاه در محورهای مصوب کارافن است که به دو زبان فارسی و انگلیسی چاپ خواهد شد.
۲. زمان فرایند داوری مقالات حداکثر ۳ ماه می‌باشد.
۳. مقالات از طریق پایگاه اینترنتی نشریه (لینک آن در سایت دانشگاه فنی و حرفه‌ای می‌باشد) به نشانی karafan.tvu.ac.ir قابل ارسال است و تمامی فرایند داوری و پی‌گیری از طریق سایت امکان‌پذیر می‌باشد.
۴. نویسنده مسوول مکاتبات ابتدا باید در سامانه‌ی کارافن (بخش حساب کاربری) به‌عنوان «نویسنده» ثبت‌نام نموده، فرم مربوط به اطلاعات فردی را با دقت تکمیل و برای بارگذاری مقاله، به قسمت «ارسال مقاله» مراجعه نماید. لازم به‌ذکر است نویسنده باید پیش از بارگذاری فایل‌های مربوطه، مقاله را براساس راهنمای تدوین مقالات کارافن تنظیم نماید.
۵. آثار ارسالی نباید قبلاً در هیچ نشریه‌ای به چاپ رسیده یا همزمان به مجله‌ی دیگری ارسال شده باشند.
۶. هر مقاله توسط ۲ داور متخصص در موضوع مقاله، ارزیابی می‌گردد و پس از کسب دو نظر موافق و تأیید هیأت تحریریه، در نوبت چاپ قرار می‌گیرد.
۷. مقالات می‌بایست در نرم‌افزار Microsoft word 2010-2013 یا بالاتر در قطع وزیری تهیه شود و تعداد کل صفحات حداکثر از ۲۰ صفحه بیشتر نباشد.
۸. فایل هر مقاله باید در نسخه‌های الکترونیکی Word و Pdf همراه فرم تعهدنامه‌ی نویسنده‌ها (در فایل جداگانه‌ای در قسمت راهنمای نویسنده‌ها قرار گرفته است)، در وبگاه مجله بارگذاری شود.
۹. برای داوری منصفانه و علمی مقاله، ضروری است نویسنده‌ی مسوول مکاتبات یک نسخه از مقاله (ترجیحاً نسخه‌ی word) را بدون ذکر مشخصات فردی در سامانه بارگذاری نماید. و در نسخه‌ی Pdf مقاله، کلیه‌ی مشخصات فردی نویسنده(ها) (اعم از مرتبه علمی، میزان تحصیلات، شماره تماس، نام سازمان/محل خدمت، ایمیل و...) را درج نماید.
۱۰. عنوان جداول در بالا و تصاویر در پایین آنها نوشته شود و می‌بایست شامل منابع و مأخذ مورد استفاده باشند و به ترتیب شماره‌گذاری شوند.
۱۱. در مقاله‌های به زبان فارسی، تمام اعداد در متن و جدول‌ها (به‌جز فهرست منابع انگلیسی) فارسی تایپ شوند.
۱۲. هر مقاله باید به‌ترتیب دارای بخش‌های زیر باشد تا در فهرست مقاله‌های قابل داوری ثبت شود:

- **عنوان:** تکراری نبوده و فاقد ابهام و نارسایی باشد به نحوی که با محتوای مقاله همخوانی داشته باشد.
 - **چکیده:** باید دربرگیرنده‌ی طرح موضوع، مسأله، هدف، روش تحقیق، یافته‌ها و نتیجه باشد. چکیده فارسی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کلمه و چکیده انگلیسی نیز عیناً برگردان کامل چکیده‌ی فارسی باشد.
 - **واژه‌های کلیدی:** شامل ۵-۷ کلمه که به‌صورت تک‌واژه، معرف محتوای مقاله بوده و امکان جست‌وجوی مخاطبین را فراهم آورد. (به دو زبان فارسی و انگلیسی).
 - **چارچوب مقاله:** تمامی عنوان‌های به‌کار رفته از مقدمه تا نتیجه‌گیری می‌بایست به‌صورت سلسله‌مراتبی شماره‌گذاری شود. و چارچوب مقاله به شرح زیر است:
 - **مقدمه:** شامل مبانی نظری و تجربی و بیان مسأله است.
 - **اهداف و سوالات پژوهش**
 - **روش‌شناسی**
 - **یافته‌ها**
 - **نتیجه‌گیری:** باید منطقی، مفید و روشن‌کننده‌ی بحث و ارائه‌ی یافته‌های تحقیق باشد.
 - **تشکر و قدردانی:** سپاسگزاری از کسانی که در تهیه و تدوین مقاله راهنمایی و همکاری کرده‌اند.
 - **پی‌نوشت‌ها:** اصطلاحات، معادل‌های خارجی و توضیحات ضروری هستند که باید در متن مقاله به ترتیب شماره‌گذاری شده و در انتهای مقاله، قبل از فهرست منابع آورده شوند.
 - **فهرست منابع:** شایسته است از منابع جدید و معتبر به‌گونه‌ای در تنظیم مقالات استفاده شود که حداقل نیمی از آنها در ۵ سال اخیر منتشر شده باشند. ضروری است ابتدا منابع فارسی و به‌دنبال آن منابع خارجی با توجه به الگوی زیر تدوین گردد. همچنین در منابع با سال متفاوت انتشار، نگارنده(گان) به ترتیب صعودی سال انتشار آورده شوند.
 - **ترتیب نگارش فهرست منابع با استفاده از الگوی APA:**
- کتاب‌ها:** نام‌خانوادگی نویسنده، حرف اول نام نویسنده (سال انتشار)، «عنوان کتاب»، نام مترجم یا مصحح، محل نشر، نام ناشر.

مثال:

نوروزی چاکلی، ع.؛ حسن زاده، م. و نورمحمدی، ح. (۱۳۸۸)، «سنجش علم، فناوری و نوآوری»، تهران، مرکز تحقیقات سیاست علمی کشور.

مقاله‌ها: نام خانوادگی نویسنده، حرف اول نام نویسنده (سال انتشار)، «عنوان مقاله»، نام مجله، جلد، شماره مجله، شماره صفحه‌های مقاله در مجله.

مثال:

براتی مارنانی، ا. (۱۳۸۹)، «بررسی فرهنگ سازمانی بیمارستان شهید هاشمی‌نژاد تهران»، مدیریت سلامت، ج ۱۳، ش ۴۰، صص ۶۳-۷۲.

مقالات کنفرانسی: نام خانوادگی نویسنده، حرف اول نام نویسنده (سال نشر)، عنوان مقاله، نام کنگره، سال، ماه، روز، نام شهر، کشور.

مثال:

ثقفی، م.؛ شریفی، م. و هلجی‌اسدی، م. (بهار ۱۳۸۴)، «بررسی پتانسیل باد سیاهپوش در استان قزوین برای احداث نیروگاه برق بادی»، پنجمین همایش ملی انرژی، تهران، ایران.

پایان‌نامه: نام خانوادگی نویسنده، حرف اول نام نویسنده (سال انتشار)، عنوان کامل پایان‌نامه، مقطع تحصیلی، نام دانشگاه، صفحات.

مثال:

مشکینیان، ع. (۱۳۸۱)، «بررسی و ارزشیابی محیطی و بیولوژیکی میزان غلظت سرب در کارگران خدمات شهری شاغل در یکی از مناطق پر ترافیک تهران»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد بهداشت حرفه‌ای، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پزشکی، صفحات ۵۳ تا ۵۷ و ۸۸ تا ۹۴.

منابع الکترونیک: نام خانوادگی نویسنده(ها)، نام نویسنده(ها)، (سال انتشار)، نام مقاله، نام نشریه ژورنال، سال انتشار ماه: شماره مقاله. نام سایت اینترنتی.

مثال:

Sharma, C.M. (2003), "Effect of exposure to aluminum on fish in acidic

waters", See information in: <http://www.geocities.com/chhatra-sharma/ecotooxiology.pdf>.17p.

۱۳. ارجاع منابع در متن مقاله به شیوهی (APA) باشد، به نحوی که ابتدا نام خانوادگی نویسنده(ها)، سال انتشار و صفحه ذکر شود:

مثال: (پازوکی، ۱۳۹۳، ۵۰)

۱۴. عکس‌ها، تصاویر، نمودارها و جداول، با کیفیت مناسب و با اشاره به منبع مورد استفاده (نام خانوادگی نویسنده، سال انتشار، شماره صفحه) تهیه شود.

۱۵. عکس‌ها، تصاویر و نمودارها حداقل با وضوح ۳۰۰ نقطه در اینچ (300 dpi) با قالب مناسب Tiff و اندازه‌ی A5 تهیه و علاوه بر متن، در فایل جداگانه‌ای ضمیمه مقاله شوند.

۱۶. مسوولیت هر مقاله از نظر علمی، ترتیب اسامی نویسنده‌ها و پی‌گیری به عهده‌ی نویسنده مسوول آن خواهد بود. نویسنده مسوول باید تعهدنامه ارسال مقاله را از سایت دانلود و پس از تکمیل، در هنگام ثبت‌نام ارسال نماید.

۱۷. تعداد و ردیف نویسنده‌های مقاله به همان صورتی که در تعهدنامه ارائه شده، مورد قبول است. تقاضای حذف یا تغییر در ترتیب اسامی نویسنده‌ها فقط قبل از داوری نهایی و با درخواست کتبی تمامی نویسنده‌ها و اعلام علت درخواست، قابل بررسی است.

۱۸. گواهی پذیرش مقاله پس از اتمام مراحل داوری و ویراستاری و تصویب نهایی هیأت تحریریه توسط مدیر مسوول فصلنامه صادر و به اطلاع نویسنده مسوول خواهد رسید.

۱۹. کارافن مقالات تأیید شده را ویرایش می‌کند.

۲۰. مطالب مطرح شده در مقالات الزاماً دیدگاه کارافن نیست.

۲۱. صحت آرا و اندیشه‌های مندرج در هر مقاله، به عهده‌ی نویسنده(ها) است.

۲۲. چاپ مقالات منتشر شده در کارافن با ذکر مأخذ در سایر مجله‌ها و کتاب‌ها بلامانع است.

فهرست مقالات

- یادداشت سردبیر ۱۳
نعمت‌الله عزیزی
- تبیین ساختار شناسایی و اولویت‌دهی مشاغل سبز در حوزه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر:
انرژی بادی ۱۵
لادن رضی‌کردمحلّه - مریم لاریجانی
- پایدارسازی و کنترل سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ۳۳
مهدی صبری
- کنترل مقاوم برای مدل نامعین سیستم تعلیق نیمه‌فعال خودرو ۵۷
مجتبی معصوم‌نژاد
- مدل‌سازی و بهینه‌سازی ساختار سلول خورشیدی لایه‌نازک CIGS به‌منظور افزایش بازدهی. ۸۱
معراج رجایی
- جایابی مکان بهینه‌ی SVC و TCSC در شبکه‌های انتقال برق به کمک تخمین‌زن فازی با
رویکرد افزایش پایداری استاتیکی ولتاژ ۹۵
محمدعلی علیپور
- به‌کارگیری نرم‌افزار PSpice در بررسی عملکرد مدارهای فرمان ترستور ۱۲۳
محمدرضا مدبرنیا - عبدالرضا توکلی
- طراحی مگنت سیستم رزونانس مغناطیسی هسته‌ای برای کاربردهای چاه‌نگاری ۱۴۳
بهنام اسدی - معصومه محمدیان - وحید اسماعیلی - حسین آفریده
- مطالعه‌ی عددی تأثیر زبری سطح دیواره‌ی داخلی لوله بر طول پیش از انفجار ۱۶۱
محسن آزموده



یادداشت سردبیر

نعمت‌الله عزیزی

استاد علوم تربیتی دانشگاه کردستان

در تداوم تحولات آموزشی کشور به‌ویژه در مقطع آموزش عالی و تلاش برای تحکیم پیوند نظام آموزش عالی کشور با مقتضیات بازار کار، تأسیس دانشگاه فنی و حرفه‌ای نقطه‌ای عطفی است که می‌تواند ضمن کاهش دامنه و شعاع شکاف میان نظام دانشگاهی کشور با نظام اقتصادی و ارائه‌ی آموزش‌هایی مرتبط‌تر با نیاز واقعی بخش‌های مختلف جامعه، الگوی کارآمدتری از یک نهاد دانشگاهی به‌دست دهد. این الگو نه تنها به مأموریت‌های مرسوم آموزشی و پژوهشی می‌پردازد بلکه می‌تواند به نمادِ نسل نوین دانشگاهی مبدل شود که هم دانش‌آموختگانی کارآفرین تحویل جامعه دهد و هم به‌عنوان یک نهاد علمی مسوول، در خصوص حل و فصل چالش‌های مبتلا به جامعه، مسوولیت اجتماعی داشته باشد و نسبت به آسیب‌شناسی و ارائه‌ی راهکارهای نوین برای برطرف کردن آنها اهتمام ورزد. بی‌تردید ساختار، فرایندها و فعالیت‌های جاری در این دانشگاه نوپا، پیچیده، چندوجهی و گسترده بوده و نیازمند بهره‌گیری از تمام ظرفیت‌های علمی و فکری اساتید، پژوهشگران و کارشناسان دانشگاه و همچنین نیروهای اثرگذار فکری در محیط خارج از آن می‌باشد. اگرچه احصا و اطلاع از اندیشه‌های نو و تجارب ارزشمند صاحب‌نظران، محققان و اساتید و دانشجویان و به اشتراک‌گذاری آنها می‌تواند به انجا مختلف انجام گیرد اما با عنایت به رویکرد استراتژیک این دانشگاه و اهتمام مدیریت عالی آن، فصلنامه علمی - ترویجی کارافن یکی از مؤثرترین راه‌هایی است که می‌تواند در این مسیر همراهی کند.

فصلنامه کارافن که اکنون وارد **سیزدهمین** سال انتشار خود گردیده است، در فاز جدید فعالیت‌هایش می‌کوشد ضمن حفظ ماهیت میان‌رشته‌ای خود و اتخاذ افقی رو به گسترش به‌عنوان یک نشریه‌ی معتبر، و نیز رعایت موازین علمی و آکادمیک در راستای تبدیل شدن به یک مرجع علمی اثرگذار و معتبر در نظام دانشگاهی کشور حرکت کند تا در آینده‌ای نزدیک با اعتلای استانداردهای علمی و پژوهشی خود به نشریه‌ای دارای درجه‌ی اعتبار علمی - پژوهشی تبدیل گردد. برای نیل به این مهم، فصلنامه کارافن، منحصراً به داوری و چاپ نتایج مطالعاتی اقدام خواهد نمود که نو و بدیع بوده و برآیند پژوهش میدانی

اساتید و پژوهشگران باشد. در ضمن بررسی و چاپ پژوهش‌های میان‌رشته‌ای و نتایج حاصل از پایان‌نامه‌های دانشجویان دوره دکتری نیز در اولویت خواهند بود. توفیق همگان را در توسعه مرزهای علم و دانش آرزومندم.

تبیین ساختار شناسایی و اولویت‌دهی مشاغل سبز در حوزه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر: انرژی بادی

لادن رضی کردمحلله

دانشجوی دکتری آموزش محیط‌زیست، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

مریم لاریجانی*

استادیار دانشگاه پیام نور، گروه آموزش محیط‌زیست، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۶/۲۹ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۰/۰۴

چکیده

با توجه به اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر در حل بحران انرژی و آلودگی هوا، در این مقاله عوامل زمینه‌ساز و ابعاد مشاغل سبز شناسایی و تحلیل می‌شود. در این تحقیق از روش گراند تئوری^۱ (نظریه‌ی زمینه) با روش نمونه‌گیری هدفمند (گلوله برفی) و معیار اشباع نظری استفاده شد. برای گردآوری اطلاعات از تکنیک مصاحبه‌ی نیمه‌عمیق با ۵۰ خبره بهره گرفته شد و با استفاده از شاخص‌ها و مؤلفه‌های حاصل از آن، پرسشنامه‌ای محقق‌ساخته بین صاحبان مشاغل انرژی بادی توزیع شد. براساس نتایج، مشاغلی که سبب حل بحران مهم زیست‌محیطی مدیریت بهینه‌ی انرژی و آلودگی هوا می‌شوند، شاخص‌های لازم برای سبز بودن را دارند و شش نوع از مشاغل تعیین شده در حوزه‌ی انرژی بادی، سبز هستند؛ اما درجه‌ی سبز بودن آنها متفاوت است که براساس اهمیت سبز بودن طبقه‌بندی شدند.

واژه‌های کلیدی

انرژی بادی، انرژی تجدیدپذیر، درجه‌ی سبز، شغل سبز، گراند تئوری.

* نویسنده‌ی مسوول مکاتبات: larijani.research@yahoo.com

۱. مقدمه

آلودگی محیط زیست، اثر گازهای گلخانه‌ای، تغییرات آب‌وهوایی و بارش باران‌های اسیدی، از مهم‌ترین زیان‌های ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی است. به همین دلیل استفاده بهینه از انرژی در فرایند توسعه اقتصادی همواره به عنوان یک هدف مهم در توسعه پایدار مدنظر بوده است. برای اجتناب از تأثیر بیشتر این زیان‌ها، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر یا انرژی‌های سازگار با محیط زیست همچون انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی زمین گرمایی و... پیشنهاد می‌شود.

در جدول ۱، مقدار آلودگی ناشی از مصرف این نوع سوخت‌ها در مقایسه با دیگر منابع انرژی نشان داده شده است. بحران انرژی در دهه ۷۰، شوک بزرگی بود که جهان را از خواب آسوده‌ی استفاده بی‌رویه از این منبع خدادادی بیدار کرد و به سمت بهره‌گیری از دیگر منابع انرژی و مصرف بهینه‌ی آنها سوق داد (معینی و دهقان‌منشادی، ۱۳۸۹، ۴۵).

جدول ۱. مقدار آلاینده‌های خروجی فناوری‌های مختلف تولید انرژی

نوع نیروگاه	NOx	CO ₂	CO	SO ₂
زغال سنگ	۰/۱۵۴۷-۳/۰۹۳۸	۸۶/۴۷۲۵	-	۰/۱۰۸۳-۳/۹۴۴۶
گاز طبیعی	۰/۰۰۷۷-۱/۵۴۶۹	۴۹/۰۳۷۲	-	۰/۴۶۴۱
نفت	۰/۰۰۷۷-۱/۵۴۶۹	۷۲/۳۹۵۶	-	-
میکروتوربین	۰/۶۱۸۸	۱۸۴/۰۸۲۹	۰/۱۷۰۲	۰/۰۰۰۹۲۸
موتور احتراق داخلی (گازی)	۴/۷۹۵۴	۱۷۰/۱۶۰۷	۱/۲۲۲۱	۰/۰۲۳۲
موتور احتراق (دیزلی)	۴/۳۳۱۴	۲۳۲/۰۳۷۳	۲/۳۲۴	۰/۴۶۴۱
پیل سوختی	۰/۰۰۰۰۴۶	.	.	۰/۰۳۷۱
انرژی خورشیدی (فتوولتائیک)
انرژی بادی

انرژی‌های تجدیدپذیر، به خصوص انرژی باد از ویژگی‌ها و مزایای بیشتری نسبت به دیگر منابع انرژی برخوردارند، از جمله: نیاز نداشتن توربین‌های بادی به سوخت، رایگان بودن انرژی باد، توانایی تأمین بخشی از انرژی برق، کمتر بودن نسبی قیمت انرژی حاصل از باد نسبت به انرژی‌های فسیلی، هزینه‌های کمتر سرمایه‌گذاری در زمینه انرژی باد در بلندمدت، تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار انرژی و نیز قدرت مانور زیاد برای بهره‌برداری در هر ظرفیت و اندازه از چند وات تا چندین مگاوات، نیاز نداشتن به آب و زمین زیاد برای نصب و نداشتن آلودگی محیط زیست نسبت به سوخت‌های فسیلی (قراگوزلو و رازی، ۱۳۹۰، ۶).

در این تحقیق، ابتدا با کمک روش تحقیق گراند تئوری که نوعی پژوهش کیفی است، عوامل زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی تأثیرگذار بر روند سبز بودن مشاغل، و نیز شغل سبز به‌عنوان پدیده‌ی محوری با زیرمقوله‌های تبیین شغل سبز، بهره‌وری سبز و رشد و تعالی زیست‌محیطی مشاغل (سبزسازی) شناسایی شد. همچنین با کمک مؤلفه‌ها و شاخص‌های سبز بودن حاصل از مرحله‌ی اول، پرسشنامه‌های محقق‌ساخته تهیه شد و سبز بودن و درجه‌ی آن در شش نوع از مشاغل تعیین شده در حوزه‌ی انرژی بادی شامل نصاب توربین بادی، بازرس عملکرد توربین بادی (برق)، بازرس عملکرد توربین بادی (مکانیک)، مدیر عملیات انرژی بادی، حسابرس انرژی و تکنیسین فنی توربین بادی بررسی شد.

بشر از گذشته‌ی بسیار دور به شیوه‌های مختلف از انرژی باد استفاده کرده است. انرژی باد، انرژی حاصل از هوای متحرک است. سهم انرژی باد در اقتصاد انرژی کشورهای مختلف متفاوت است. مهندسان پس از آزمایش‌های عملی فراوان به این نتیجه رسیده‌اند که میانگین سرعت باد برای به‌صرفه بودن تبدیل انرژی باد به برق حدود ۲۳ کیلومتر در ساعت است. براساس یک قانون طبیعی، سرعت باد در نواحی پهناور با عرض جغرافیایی افزایش می‌یابد؛ بنابراین مکان‌های مناسب برای دستگاه‌های بادی، بر فراز تپه‌های گرد و صاف، دشت‌ها یا سواحل باز و فواصل کوهی که مثل قیف عمل می‌کنند، هستند. از انرژی باد می‌توان توسط توربین‌های بادی، برق تولید کرد. بازده این ماشین‌های بادی ۳۰ تا ۴۰ درصد است که از نیروگاه‌های فسیلی با بازده ۳۰ تا ۳۵ درصد بیشتر است؛ ولی بهره‌وری آنها به شدت و سرعت باد بستگی دارد؛ یعنی یک توربین بادی نمی‌تواند در طول سال، بیست و چهار ساعته کار کند؛ این موضوع یک ضعف به‌شمار می‌رود. از سال ۱۹۹۰، براساس دیدگاه محیط‌زیستی، انرژی باد با توجه بسیار مواجه شد، زیرا باد سوخت پاک است و هیچ آلودگی آبی و هوایی نیز ایجاد نمی‌کند (رسولی، ۱۳۸۹، ۳۲).

انرژی باد منافع اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی زیادی دارد؛ از جمله: ۱. نداشتن هزینه‌های اجتماعی (این هزینه‌ها در تمام گزینه‌های متعارف انرژی (فسیلی) وجود دارد)؛ ۲. کاهش اتکا به منابع انرژی وارداتی که از مهم‌ترین دلایل رویکرد کشورهای صنعتی به انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد است؛ ۳. تقویت ساختار اجتماعی و اقتصادی مناطق روستایی.

توسعه‌ی این صنعت، چه در کشورهای سرمایه‌داری و پیشرفته و چه در کشورهای در حال توسعه، تحولات و پیشرفت‌های آشکاری را در مناطق روستایی در پی خواهد داشت. اشتغال‌زایی و ایجاد شغل در این صنعت در مقایسه با دیگر صنایع انرژی از همه بیشتر است. عقیده بر این است که تولید انرژی از سوخت‌های غیرفسیلی، هنر است و می‌تواند منشأ بسیار مهمی در کارآفرینی باشد؛ زیرا هم ظرافت‌های یک فناوری

پیشرفته را داراست و هم موجب صرفه‌جویی در فرآورده‌های نفتی و مشتقات آن به‌عنوان سوخت می‌شود و در سالم‌سازی محیط زیست بسیار تأثیرگذار است. به‌عبارت ساده‌تر توسعه‌ی پایدار و نقش‌آفرینی در مدیریت منابع با هدف کاهش خسارات زیست‌محیطی و افزایش ظرفیت اشتغال از موضوعات مهم این بررسی محسوب می‌شود (قراگوزلو و رازی، ۱۳۹۰، ۹).

۲. پیشینه‌ی تحقیق

براساس بررسی‌های به‌عمل آمده در اتحادیه‌ی اروپا در سال ۲۰۱۰ و آژانس بین‌المللی انرژی‌های نو در سال ۲۰۱۳، مشاغل مربوط به انرژی بادی همگی سبز معرفی شدند؛ اما به‌دلیل مسائل اقتصادی (هزینه‌های راه‌اندازی و تجهیزات ویژه‌ی مورد نیاز و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری) پس از زیست‌توده و انرژی خورشیدی بیشترین تعداد مشاغل سبز را ایجاد کردند. البته این مشاغل، به مشکلات و خطرهای فیزیکی شامل سقوط از ارتفاع، برق‌گرفتگی در طول ساخت‌وساز، تعمیر و نگهداری، قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی سمی و نانومواد در طول ساخت و دفع/بازیافت دچارند که از درجه‌ی سبز بودن آنها کاسته است (Amin, 2013; Bulgarelli & Evans-Klock, 2010).

تحقیقات در ایالات متحده‌ی آمریکا، مشاغل حوزه‌ی انرژی بادی را منبع بالقوه فرصت‌های شغلی جدید سبز معرفی می‌کند. انرژی‌های تجدیدپذیر، بخش اساسی از «اقتصاد سبز»، و انرژی باد، تأمین‌کننده‌ی مشاغل سبز است و سریع‌ترین بخش در حال رشد در انرژی‌های تجدیدپذیر به‌شمار می‌رود. مشاغل حوزه‌ی انرژی باد، سه بخش تولید، توسعه و بهره‌برداری، و تعمیر و نگهداری را شامل می‌شود (Hamilton & Liming, 2010).

ایجاد شغل این صنعت از دیگر صنایع انرژی بیشتر است. در اروپا نصب ۱ مگاوات برق بادی برای ۱۵ تا ۱۹ نفر شغل ایجاد می‌کند که این رقم در کشورهای در حال توسعه به‌راحتی می‌تواند دو برابر شود (صابری و همکاران، ۱۳۹۱، ۳).

به گفته‌ی شورای دفاع از منابع طبیعی، مزارع بادی در آمریکا نزدیک به ۱۱۰۰ شغل ایجاد می‌کنند و همچنین می‌توانند برای جوامع مرتبط با مزرعه‌های بادی، ده‌ها میلیون دلار مزیت مالی داشته باشند. در طی چهارده مرحله‌ی مختلف ایجاد یک مزرعه‌ی بادی ۲۵۰ مگاواتی، ۱۰۷۹ شغل ایجاد می‌شود. موقعیت‌های شغلی زیادی برای مهندسی طراحی و ساخت، نصب و اندازه‌گیری و دیگر موارد در این زمینه

وجود دارد. علاوه بر این فرصت‌های شغلی، مزارع بادی همچنین از طریق مالیات‌های جدید، پرداخت اجاره‌ی کمتر به زمینداران و درآمد توسعه‌ی اقتصادی، به احیای جوامع در سرتاسر آمریکا کمک می‌کنند.

جدول ۲. ظرفیت مزارع بادی نصب شده در نیروگاه‌های بادی ایران (<http://www.sabaniroo.co.ir>)

ردیف	نوع توربین	تعداد توربین	ظرفیت (مگاوات)	مجموع ظرفیت (مگاوات)
توربین‌های نصب شده در پروژه‌ی منجیل				
۱	توربین ۳۰۰ کیلووات (هرزویل)	۱۲	۰/۳	۳/۶
۲	توربین ۵۰۰ کیلووات (پسکولان)	۱	۰/۵	۰/۵
۳	توربین ۵۵۰ کیلووات (پسکولان)	۱۰	۰/۵۵	۵/۵
۴	توربین ۶۶۰ کیلووات (هرزویل)	۱۵	۰/۶۶	۹/۹
۵	توربین ۶۶۰ کیلووات (پسکولان)	۲۲	۰/۶۶	۱۴/۵۲
۶	توربین ۶۶۰ کیلووات (سیاهپوش)	۳۳	۰/۶۶	۷۸/۲۱
توربین‌های نصب شده در پروژه‌ی بینالود				
۷	توربین ۶۶۰ کیلووات	۴۳	۰/۶۶	۳۸/۲۸
توربین‌های نصب شده در شهرهای مختلف				
۸	توربین ۶۶۰ کیلووات (تبریز)	۳	۰/۶۶	۱/۹۸
۹	توربین ۶۶۰ کیلووات (زابل)	۱	۰/۶۶	۰/۶۶
۱۰	توربین ۶۶۰ کیلووات (اصفهان)	۱	۰/۶۶	۰/۶۶
۱۱	توربین ۶۶۰ کیلووات (ماهشهر)	۱	۰/۶۶	۰/۶۶
۱۲	توربین ۶۶۰ کیلووات (اردبیل)	۱	۰/۶۶	۰/۶۶
۱۳	توربین ۶۶۰ کیلووات (شیراز)	۱	۰/۶۶	۰/۶۶
۱۴	توربین ۷۱۰ کیلووات (خواف)	۱	۰/۷۱	۰/۷۱
جمع کل ظرفیت نصب شده		۱۴۴		۹۰/۱۷

امروزه، مزارع بادی حدود ۵۰/۰۰۰ مگاوات انرژی پاک و تجدیدپذیر را - که معادل انرژی تولیدی ۱۲ سد هوور است - تولید می‌کنند و صنعت انرژی‌های بادی حدود ۷۵/۰۰۰ آمریکایی را به استخدام خود

درمی آورد. تنها در چهار سال گذشته، تولیدات مرتبط با انرژی‌های بادی در این کشور، ۱۷۰ درصد افزایش داشته است. آمار دقیق مشاغل مرتبط با یک مزرعه‌ی بادی ۲۵۰ مگاواتی عبارت‌اند از: ۴۳۲ نفر برای مراحل تولید توربین‌ها، ۸۰ نفر برای طراحی و برنامه‌ریزی، ۱۸ نفر برای فروش و توزیع، ۲۷ نفر برای تعمیر و نگهداری، ۲۷۳ نفر برای کار کردن در زمینه‌ی مسائل عمرانی مزرعه‌ی بادی مانند جاده‌ها و فونداسیون‌ها، ۲۰۲ نفر برای نصب توربین‌ها و ۴۷ نفر برای کارهای الکتریکی مرتبط با توربین‌ها مثلاً ارتباطات با شبکه‌ی برق اصلی (Phil, 2012, 6).

ایران به دلیل موقعیت خاص جغرافیایی و قرار گرفتن در یک منطقه‌ی کم‌فشار و مجاورت با مناطق پرفشار شمال و شمال غرب، به‌طور کلی در زمستان و تابستان در مسیر بادهای عمده (در زمستان از سمت اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه و نیز آسیای مرکزی و در تابستان از طرف اقیانوس هند و همچنین شمال غرب) قرار دارد.

در سال ۱۳۸۱، سازمان انرژی‌های نو ایران، پروژه‌ی ملی پتانسیل‌سنجی و تهیه‌ی اطلس رنگی باد کشور را اجرا کرد؛ این پروژه در سال ۱۳۸۸ خاتمه یافت و براساس آن برای احداث نیروگاه‌های بادی به شرح جدول ۱ اقدام شد. مجموع ظرفیت مزارع بادی نصب‌شده در ایران تا پایان سال ۱۳۹۲ معادل ۹۰ مگاوات است.

از دیگر اقدامات مهم در زمینه‌ی انرژی باد، ساخت توربین‌های بادی در داخل کشور و تلاش برای بومی‌سازی این صنعت بوده است. نخستین کارخانه‌ی ساخت توربین‌های بادی در کشور در سال ۱۳۷۹ به بهره‌برداری رسید. در ابتدا این کارخانه قادر به ساخت ۷۰ درصد از قطعات توربین‌های بادی بود؛ اما هم‌اکنون، همسو با سیاست بومی‌سازی صنعت توربین باد، قطعات متعدد مورد استفاده در مونتاژ ناسل در داخل کشور تولید می‌شود (نوراللهی و همکاران، ۱۳۹۰، ۴).

۳. روش تحقیق

این تحقیق، نخستین پژوهش در این زمینه در کشور است که در دو مرحله انجام گرفت: **مرحله‌ی نخست:** از روش گراند تئوری استفاده شده که نوعی شیوه‌ی پژوهش کیفی است. با روش نمونه‌گیری هدفمند (گلوله برفی) و معیار اشباع نظری، ۵۰ خبره‌ی محیط زیست در این مطالعه شرکت کردند. برای گردآوری اطلاعات از تکنیک مصاحبه‌ی نیمه‌عمیق بهره گرفته شد؛ سپس همه‌ی داده‌ها با استفاده از دستورالعمل‌های گراند تئوری (کدگذاری باز، محوری و انتخابی)، کدگذاری شدند (استراس و کوربین،

۱۳۸۷، ۵۸). براساس داده‌ها، مفاهیم و مقوله‌ها در گروه‌ها (محیطی، علی، واسطه‌ای، محوری، راهبردی و پیامد) تعیین شد؛ سپس الگوی پارادایمی آن طراحی و شاخص‌های شناسایی مشاغل سبز مشخص شد. **مرحله ی دوم:** برای بررسی و تطبیق مقوله‌ها و شاخص‌های سبز مشاغل، پرسشنامه ی «بسته پاسخ» طراحی شد. در این پرسشنامه ی محقق ساخته، همه ی مقوله‌ها، مؤلفه‌ها و شاخص‌های مشاغل سبز مدنظر قرار گرفت؛ برای هر مقوله، شاخص‌ها و مؤلفه‌هایی تعریف و سؤال‌های پرسشنامه براساس آنها طراحی شد. پرسشنامه ی مذکور به‌صورت پرسشنامه ی ترکیبی بسته پاسخ با طیف لیکرت پنج درجه‌ای همیشه (کاملاً)، غالباً، گاهی اوقات، به‌ندرت، هرگز، و «باز پاسخ» برای تشریح چگونگی فرایند در سه بخش طراحی شد. در بخش اول در ابتدای پرسشنامه برای آشنایی پاسخ‌دهندگان توضیحاتی از اصطلاحات و واژگان به‌شرح زیر ارائه شد؛ سپس در بخش دوم، مشخصات عمومی پرسش‌دهندگان مطابق جدول زیر از آنها پرسیده شد. در بخش سوم، سؤالات مطابق مقوله‌ها، مؤلفه‌ها و شاخص‌های حاصل از گراندد تئوری (جدول ۱) طراحی شد.

جدول ۳. مقوله‌ها، مؤلفه‌ها و شاخص‌های حاصل از گراندد تئوری

مقوله	مؤلفه	شاخص
مقوله ی محوری: بهره‌وری سبز مشاغل	تبیین شغل سبز، بهره‌وری مشاغل با حفاظت از محیط‌زیست (مشخصات شغل سبز و فرایند سبزسازی برای بهره‌وری اقتصادی و زیست‌محیطی سؤال می‌شود).	مشخصات زیست‌محیطی مشاغل
مقوله ی محیطی: زیرساخت‌های سیاست‌گذاری و تکنولوژیکی شغل سبز	نقش عاملان مشاغل سبز (نهاده‌ها و مسوولیت‌ها)، پتانسیل‌ها، امکانات و محرک سبز	قوت‌ها و ضعف‌ها، تهدیدها و فرصت‌های مشاغل سبز
مقوله ی راهبردی: مدیریت سبز	استانداردها و شاخص‌های زیست‌محیطی و مدیریت سبز (رعایت چه استانداردها و شاخص‌های زیست‌محیطی ضروری است؟ چگونه مدیریت سبز (مدیریت منابع آلاینده و منابع پایه) اجرا می‌شود و ضرورت آن در هر شغل و ارتباط شغل با مسائل زیست‌محیطی و... چیست؟)	زنجیره ی تأمین سبز مشاغل
مقوله ی علی: آلودگی هوا و بحران انرژی	چالش‌های زیست‌محیطی و حل بحران انرژی با کمک مشاغل سبز (مشاغل چه مشکلات زیست‌محیطی را ایجاد می‌کنند؟ چه مشکلات زیست‌محیطی و بحران انرژی را رفع می‌کنند؟ آیا آگاهی از مشکلات وجود دارد؟ و...)	تأثیر مشاغل سبز بر آلودگی هوا و حل بحران انرژی
مقوله ی واسطه‌ای: توانمندسازی زیست‌محیطی مشاغل	آموزش زیست‌محیطی و فرهنگ‌سازی سبز (توانمندسازی زیست‌محیطی از طریق انواع آموزش زیست‌محیطی و سلامت، اطلاع‌رسانی و همراهی سمن‌ها در تحقق مشاغل سبز چقدر مؤثر بوده است؟ و...)	تأثیر آموزش زیست‌محیطی بر عملکرد سبز مشاغل، تأثیر تبلیغات زیست‌محیطی بر عملکرد سبز
مقوله ی پیامد: منافع اقتصادی و زیست‌محیطی	سودآوری اقتصادی - اکولوژیکی و رویکرد اکوسیستمی به منافع اقتصادی (اقتصاد سبز) (تأثیر مسائل اقتصادی، سودآوری، حمایت مادی، تنظیم بازار و بازگشت سرمایه در روند تحقق و گسترش سبز مشاغل بررسی می‌شود).	کاهش هزینه ی مشاغل از طریق مدیریت زیست‌محیطی و افزایش سود مشاغل از طریق مدیریت زیست‌محیطی

به منظور برآورد حد روایی پرسشنامه و سؤال‌های طرح شده در آن، از نظر خبرگان، کارشناسان و استادان مسلط به موضوع پژوهش و پرسشنامه استفاده شد. اصلاحات خبرگان و استادان، پژوهشگر را از روایی پرسشنامه و تطابق موضوع با سؤال‌ها و قابلیت استفاده و به‌جا بودن سؤال‌های طرح شده مطمئن ساخت و مشخص شد که سؤال‌ها تا چه اندازه قدرت توضیح‌دهی مدل و آزمون فرضیه‌ها را خواهند داشت. این پرسشنامه‌ی محقق ساخته، پانزده بخش دارد که به‌منظور بررسی روایی آن، نظر ۱۸ نفر از خبرگان، استادان و پژوهشگران محیط‌زیست کشور در قالب پاسخ به گزینه‌های پنج درجه‌ای لیکرت از «کاملاً موافقم» تا «کاملاً مخالفم» اخذ شد. با توجه به اینکه بیش از ۷۰ درصد خبرگان به صحت و درستی سؤال‌های بخش‌های مختلف پرسشنامه رأی کاملاً موافق دادند، سؤال‌ها پذیرفته شد.

به‌منظور تعیین پایایی پرسشنامه نیز از ضریب آلفای کرونباخ استفاده شد. با توجه به اینکه مقدار آلفای کرونباخ برای تک‌تک سؤالات تحقیق بیش از ۰/۷ به‌دست آمد، در پایایی پرسشنامه تأیید شد. همچنین ضریب آلفای کرونباخ پرسشنامه ۰/۸۹۰ برآورد شد.

مشاغل بررسی شده‌ی حوزه‌ی انرژی بادی عبارت‌اند از: نصاب توربین بادی، بازرس عملکرد توربین بادی (برق)، بازرس عملکرد توربین بادی (مکانیک)، مدیر عملیات انرژی بادی، حسابرس انرژی و تکنیسین فنی توربین بادی. پرسشنامه بین صاحبان مشاغل مذکور پخش شده و جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شد. به‌دلیل هدفمندی و محدود بودن تعداد افراد موجود، از روش نمونه‌گیری تمام‌شماری استفاده شد.

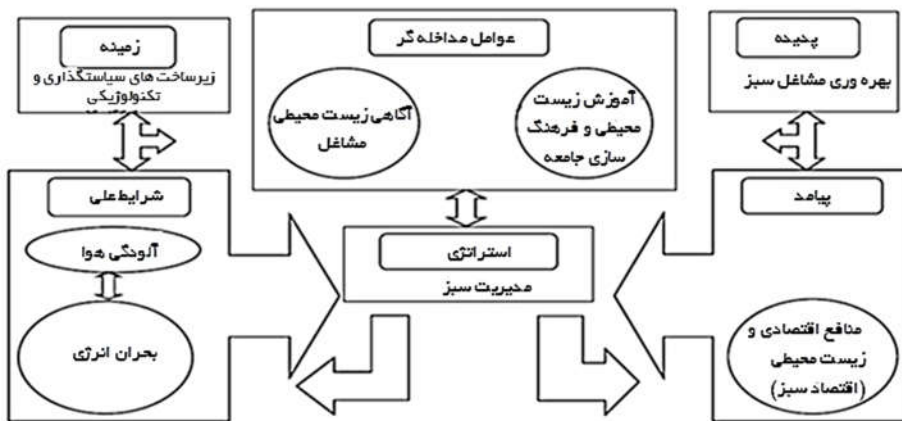
در آمار استنباطی و برای برآورد نتایج مربوط به مشاغل سبز و به‌دست آوردن مقادیر لازم برای تجزیه و تحلیل‌های آماری از آزمون کولموگروف - اسمیرنوف، t تک‌نمونه‌ای و آزمون فریدمن توسط نرم‌افزار آماری SPSS ویرایش ۲۱ استفاده می‌شود.

۴. تحلیل نتایج

۴-۱. یافته‌های مرحله‌ی نخست تحقیق

در یک پژوهش کیفی با استفاده از نظریه‌ی زمینه‌ای بعد از استخراج مقولات عمده و تعیین مقوله‌ی مرکزی در مرحله‌ی کدگذاری انتخابی، نظریه‌ی زمینه‌ای با استفاده از مقولات عمده ارائه می‌شود. در این پژوهش نیز با استفاده از تعقیب خط اصلی داستان در چارچوب یک مدل پارادایمی که دربرگیرنده‌ی شرایط، فرایندها، تعاملات و پیامد است، نظریه‌ی زمینه‌ای ارائه شد. بر این اساس، مقوله‌ی عمده شغل سبز است. آگاهی زیست‌محیطی،

چالش‌های زیست‌محیطی و حل بحران انرژی با کمک مشاغل سبز که خود از مسائل اجتماعی، زیست‌محیطی، حقوقی، فرهنگی و اقتصادی متأثرند، به‌عنوان شرایط علی بر پدیده‌ی مورد بحث اثرگذارند. در این بین آموزش و توانمندسازی زیست‌محیطی و فرهنگ‌سازی سبز به‌عنوان شرایط مداخله‌گر در جهت ترغیب صاحبان مشاغل به ایجاد شغل سبز و سبزسازی شغل عمل می‌کنند که این شرایط سه‌بعدی در تعامل و کنش متقابل با هم سبب ایجاد مشاغل سبز و حل بحران انرژی می‌شوند که پیامد آن رویکرد اکوسیستمی به منافع اقتصادی و سودآوری اقتصادی و اکولوژیکی است. بدین ترتیب شرایط این مدل پارادایمی ارائه شده‌اند (شکل ۱).



شکل ۱. الگوی پارادایمی مشاغل سبز

با توجه به نبود تعریف جامع مشاغل سبز و طبقه‌بندی مناسب و کاربردی در این خصوص، براساس نتایج این تحقیق، مفاهیم و مقولات به‌دست آمده به شرح زیر بیان می‌شود.

۱-۱-۴. تعریف شغل سبز

شغل سبز، چرخه‌ی سبز اقتصادی با نگرش به آینده است که شاخص‌های سبز در سراسر فرایند شغل (چرخه‌ی درونی و بیرونی) و ارتباط آن با افراد شاغل و محیط اطراف آن رعایت شود؛ به دیگر سخن، یک فرایند سیستمی با رویکرد بهبود مستمر است که همه‌ی اجزای آن در تعامل با یکدیگر و محیط به‌صورت دوسویه و برگشت‌پذیرند و بین مسوولیت‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی همگرایی وجود دارد.

۲-۱-۴. طبقه‌بندی مشاغل

- مشاغل سبز: مشاغلی هستند که شاخص‌های سبز در آنها ملاحظه می‌شود؛

- شغل‌های ذاتاً سبز با رویکرد اقتصاد سبز (کاهش تولید و انتشار کربن، کارآمدی انرژی) که مشاغل حوزه‌ی انرژی بادی در این گروه قرار می‌گیرند؛
- شغل‌های ذاتاً سبز با رویکرد آموزش و پژوهش در راستای ارتقای محیط‌زیست.



شکل ۲. مشاغل ذاتاً سبز

۲-۴. یافته‌های مرحله‌ی دوم تحقیق

در این مرحله یافته‌های حاصل از جمع‌آوری پرسشنامه به شرح زیر ارائه می‌شود.

۲-۴-۱. بررسی نرمال بودن داده‌ها

برای تشخیص آزمون‌های پارامتری یا ناپارامتری مناسب باید ابتدا نرمال بودن داده‌ها بررسی شود.

جدول ۴. بررسی نرمال بودن داده‌ها

ردیف	متغیر	آماره‌ی کولموگروف - اسمیرنوف	سطح معنی‌داری
۱	بازرس عملکرد توربین بادی (برق)	۱/۲۵۱	۰/۰۸۷
۲	تکنیسین فنی توربین بادی	۰/۸۷	۰/۴۳۵
۳	بازرس عملکرد توربین بادی (مکانیک)	۱/۰۹۷	۰/۱۸
۴	نصاب توربین بادی	۱/۲۷۳	۰/۰۷۸
۵	مدیر عملیات انرژی بادی	۰/۷۹۹	۰/۵۴۵
۶	حسابرس انرژی	۰/۸۲۵	۰/۵۰۴

با توجه به سطح معنی‌داری که برای هر پنج متغیر بیشتر از $0/05$ است، در سطح اطمینان ۹۵ درصد فرض نرمال بودن توزیع جوامع مورد نظر رد نمی‌شود، بنابراین می‌توان از آزمون‌های پارامتری برای آزمون این متغیرها استفاده کرد.

۲-۲-۴. آزمون t برای تشخیص سبز بودن

نتایج آزمون t برای تشخیص سبز بودن هر شش شغل حوزه‌ی انرژی بادی در جدول‌های زیر آورده شده است. با توجه به سطوح معنی‌داری در جدول زیر که از $0/05$ کمتر است، فرض صفر مبنی بر $\mu=3$ رد می‌شود و چون میانگین شغل‌های هر شش شغل از ۳ بیشتر است، همه‌ی این مشاغل در سطح معنی‌داری $0/05$ ، به عنوان شغل سبز محسوب می‌شوند.

جدول ۵. آزمون t برای تشخیص سبز بودن شغل

گروه شغلی	میانگین	t آماره	P-value
بازرس عملکرد توربین بادی (برق)	۳/۷۸۳۶	۵/۶۳۳	۰/۰۰۰
تکنیسین فنی توربین بادی	۳/۶۴۳۷	۵/۷۷۴	۰/۰۰۰
بازرس عملکرد توربین بادی (مکانیک)	۳/۸۲۱۸	۸/۱۹۹	۰/۰۰۰
نصاب توربین بادی	۴/۰۱۱۵	۱۰/۱۰۸	۰/۰۰۰
مدیر عملیات انرژی بادی	۳/۷۰۶۹	۷/۲۵۹	۰/۰۰۰
حسابرس انرژی	۳/۶۱۷۸	۵/۵۴۱	۰/۰۰۰

۳-۲-۴. آزمون فریدمن

آزمون فریدمن رابطه‌ی میان متغیرها را نشان می‌دهد. با استفاده از این آزمون می‌توان وجود یا عدم وجود اختلاف بارز میان فراوانی‌های مشهود را بررسی کرد.

جدول ۶. نتیجه‌ی آزمون فریدمن برای اولویت‌بندی متغیرها

آماره‌ی کای اسکوئر	۱۴/۶۵۶
درجه‌ی آزادی	۵
سطح معنی‌داری	۰/۰۱۲

سطح معنی‌داری در جدول بالا کمتر از $0/05$ است، بنابراین مشاغل از نظر اهمیت در یک سطح قرار ندارند. میانگین رتبه‌ی آنها در جدول زیر آمده است:

جدول ۷. اولویت‌بندی گروه‌های مشاغل سبز

متغیر	میانگین رتبه
نصاب توربین بادی	۴/۱۳
بازرس عملکرد توربین بادی (برق)	۳/۷۳
بازرس عملکرد توربین بادی (مکانیک)	۳/۶۲
مدیر عملیات انرژی بادی	۳/۲۸
حسابرس انرژی	۳/۱۶
تکنسین فنی توربین بادی	۳/۰۹

با توجه به میانگین رتبه‌ها در جدول بالا، رتبه‌بندی مشاغل سبز در گروه‌ها به‌ترتیب اهمیت در سبز بودن به‌صورت زیر است:

۱. نصاب توربین بادی؛

۲. بازرس عملکرد توربین بادی (برق)؛

۳. بازرس عملکرد توربین بادی (مکانیک)؛

۴. مدیر عملیات انرژی بادی؛

۵. حسابرس انرژی؛

۶. تکنسین فنی توربین بادی.

مشاغل ذاتاً سبز همه‌ی شاخص‌های سبز (شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی) را بایستی رعایت کنند؛ هر شش شغل همه‌ی شاخص‌های سبز را رعایت می‌کنند. هر کدام از این شاخص‌ها به تعدادی زیرشاخص تقسیم می‌شود که در مجموع پانزده زیرشاخص می‌شوند. ماهیت مشاغل دارای درجه‌ی سبز بودن بیشتر، به‌گونه‌ای است که تعداد زیرشاخص‌های بیشتری را رعایت می‌کنند که در زیر تشریح می‌شود:

۱. نصاب توربین بادی

نصاب توربین بادی شغلی است از حرفه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر - بادی که شایستگی‌های نقشه‌خوانی و جانمایی اجزای مزرعه‌ی باد، همکاری در حمل و نقل توربین بادی و کمک در احداث و آماده‌سازی جاده‌های دسترسی نیروگاه بادی، همکاری در گودبرداری، آرماتوربندی و بتن‌ریزی فونداسیون به‌همراه نصب سیستم ارت در فونداسیون، مونتاژ و نصب قطعات مختلف توربین باد، تأمین و تدارک و نصب

تجهیزات الکتریکی فشار قوی، آزمودن و فعال‌سازی اولیه‌ی توربین بادی و مستندسازی اطلاعات و آموزش به تکنیسین‌های مزرعه‌ی باد را داراست.

نصاب توربین بادی در مراحل نصب و احداث به‌گونه‌ای عمل می‌کند که سیستم‌های نصب‌شده همه‌ی شاخص‌های سبز (شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی) را رعایت کنند؛ ضمن آنکه در فرایند کاری خود استانداردهای زیست‌محیطی و مدیریت زنجیره‌ی تأمین سبز را نیز لحاظ می‌کنند و به‌طور مستقیم شاخص‌های سبز را اجرا می‌کنند و با نصب مناسب تجهیزات، سبب تولید انرژی سبز با کیفیت مناسب می‌شوند که در نهایت به تغییر رفتار مشتریان در خرید و مصرف سبز می‌انجامد.

۲. بازرسی عملکرد توربین بادی (برق)

بازرسی عملکرد برق توربین بادی، یکی از مشاغل مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر بادی است که باید شایستگی بازرسی عملکرد و کنترل سیستم‌های الکترونیکی، نوسانات، تغییرات، قطع یا ایجاد اشکال در شبکه‌ها و دستگاه‌ها و تهیه‌ی گزارش از عملکرد برق توربین بادی را دارا باشد. در این عنوان شغلی، استانداردهای زیست‌محیطی برای دستیابی به اهداف شغلی رعایت می‌شوند و نیز به رعایت شاخص‌های اقتصادی از طریق نظارت بر اجرای استانداردها و افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی ریالی کمک می‌شود؛ اما این شغل برای دستیابی به شاخص‌های سبز، به طراحی و ساخت تجهیزات و مدیریت مناسب خرید و هزینه‌کرد وابسته است؛ در صورتی که آنها اهداف سبز شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی را لحاظ کرده باشند، بازرسی نیز با بازبینی آن تجهیزات به اهداف سبز دست خواهد یافت. مدیریت حوادث و ایمنی برای جلوگیری از مشکلات بهداشتی و زیست‌محیطی ضروری است. این شغل به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر اجرای شاخص‌های سبز تأثیرگذار است.

۳. بازرسی عملکرد توربین بادی (مکانیک)

بازرسی عملکرد مکانیکی توربین بادی، از مشاغل وابسته به انرژی‌های تجدیدپذیر بادی است که بایستی شایستگی بازرسی عملکرد گیربکس، بازرسی عملکرد پره و روتور توربین باد، بازرسی عملکرد سیستم یاو، یاتاقان‌ها، شفت اصلی و ترمزها در توربین باد، بازرسی قسمت‌های داخلی و خارجی برج و ناسل توربین باد و تهیه‌ی گزارش از عملکرد مکانیکی توربین باد را داشته باشد.

بازرسی عملکرد مکانیکی توربین باد به‌منظور حصول اطمینان از کارکرد ایمن و مستمر توربین باد، امری ضروری است. برای مثال آسیب دیدن پره‌ها، بیرینگ‌ها، گیربکس و دیگر تجهیزات توربین باد می‌تواند بر عملکرد کلی توربین باد تأثیرات چشمگیری داشته باشد و حتی در مواردی می‌تواند سبب وارد آمدن

خسارات جبران‌ناپذیری شود. از این رو بازرس عملکرد مکانیکی توربین بادی، به کاهش چشمگیر تأثیرات منفی وارد بر توربین باد بسیار کمک می‌کند.

در این عنوان شغلی نیز همانند بازرس برق توربین بادی، استانداردهای زیست‌محیطی برای دستیابی به اهداف شغلی رعایت شده و نیز به رعایت شاخص‌های اقتصادی از طریق نظارت بر اجرای استانداردها و افزایش بهره‌وری و صرفه‌جویی ریالی کمک می‌شود؛ اما این شغل برای دستیابی به شاخص‌های سبز، وابسته به طراحی و ساخت تجهیزات و مدیریت مناسب خرید و هزینه‌کرد است و در صورتی که در این موارد، اهداف سبز شاخص‌های اجتماعی و اقتصادی لحاظ شده باشد، بازرس نیز با بازبینی آن تجهیزات به اهداف سبز دست خواهد یافت. مدیریت حوادث و ایمنی برای جلوگیری از مشکلات بهداشتی و زیست‌محیطی ضروری است. این شغل به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر اجرای شاخص‌های سبز تأثیرگذار است. شباهت دو شغل بازرس مکانیکی و برق در نتایج آزمون فریدمن نیز مشهود است و اختلاف بسیار کمی بین این دو دیده می‌شود (به‌ترتیب ۳/۷۳ و ۳/۶۲)؛ اما حساسیت بازرس مکانیکی بیشتر از بازرس برق است؛ زیرا ممکن است کل توربین بادی را از کار بیندازد؛ برای نمونه عملکرد نامناسب در بازرسی و نگهداری تجهیزات، سبب از کار افتادن بخشی از نیروگاه بادی منجیل شده است.

۴. مدیر عملیات انرژی بادی

مدیر عملیات انرژی بادی از دیگر مشاغل وابسته به انرژی‌های تجدیدپذیر بادی است که باید شایستگی

مدیریت کارکنان، نگهداری، امور مالی و برنامه‌ریزی را به‌شرح زیر دارا باشد:

- معرفی و نگهداری روش‌های مختلف تأمین اطلاعات مدیریت درباره‌ی انرژی؛
- توزیع اطلاعات جمع‌آوری شده بین تمام کارکنان؛
- تهیه و تنظیم خط‌مشی‌ها و اقدامات مربوط به حفظ محیط‌زیست؛
- ارتقای دانش و آگاهی کل سازمان در مورد انرژی؛
- معرفی و پی‌گیری در مورد روش‌های نگهداری بهتر وضعیت انرژی؛
- تعیین نیازهای آموزشی سازمان برای مهارت‌های مربوط به انرژی و درک آنها؛
- تعیین روش‌های مختلف افزایش بازدهی انرژی؛
- برنامه‌ریزی در سرمایه‌گذاری برای کاهش مصرف انرژی و تقلیل آلودگی محیط؛
- تشکیل جلسات ادواری برای بررسی اهداف و خط‌مشی‌های از پیش تعیین شده.
- این عنوان شغلی به‌طور مستقیم با شاخص‌های سبز ارتباط ندارد؛ بلکه با تدوین، اجرا و نظارت بر برنامه‌ها، خط‌مشی‌ها و سیاست‌گذاری‌ها در زمینه‌ی انرژی به گونه‌ای عمل می‌کند که به اجرای همه‌ی

شاخص‌های سبز (شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی) در فرایند انرژی پاک منجر شود.

۵. حسابرس انرژی

حسابرس انرژی به تطبیق عملیات شرکت با برنامه و بودجه‌ی مصوب و رسیدگی به ترازنامه و حساب سود و زیان شرکت و تصدیق مطابقت آنها با کارت‌ها و دفترهای شرکت و ارائه‌ی گزارش لازم به مجمع عمومی، ارائه‌ی گزارش در زمینه‌ی پیشنهاد افزایش یا کاهش سرمایه‌ی شرکت به مجمع عمومی فوق‌العاده، مطالعه‌ی گزارش سالیانه‌ی هیأت مدیره و اظهارنظر درباره‌ی مندرجات آن و گزارش کتبی موارد لازم به هیأت مدیره و مجمع عمومی می‌پردازد.

این عنوان شغلی نیز به‌طور مستقیم به شاخص‌های سبز نمی‌پردازد، بلکه با رسیدگی و نظارت بر برنامه و بودجه در زمینه‌ی انرژی به‌گونه‌ای عمل می‌کند که به اجرای همه‌ی شاخص‌های سبز (شاخص‌های زیست‌محیطی، اجتماعی، اقتصادی و بهداشتی) در فرایند انرژی پاک منجر شود.

۶. تکنیسین فنی توربین بادی

تکنیسین توربین‌های بادی در حوزه‌ی برق - مکانیک - صنایع شیمیایی فعال است و باید دارای شایستگی بررسی و نصب در توربین (back up) قسمت‌های الکتریکی و مکانیکی توربین بادی، بررسی و نصب سیستم ذخیره‌کننده‌ی انرژی‌های بادی، بررسی و نصب کنترلرها و سیستم پایش توربین‌های بادی، تحلیل خطاهای پیش‌آمده در توربین‌های بادی به‌هنگام نصب و راه‌اندازی توربین برای تجزیه و تحلیل باشد. این شغل با افراد شاغل در زمینه‌ی انرژی‌های نو و نصابان سیستم‌ها و توربین‌های بادی در ارتباط است. در این عنوان شغلی، استانداردهای زیست‌محیطی برای دستیابی به اهداف زیست‌محیطی انرژی سبز به‌طور مستقیم باید رعایت شود؛ ضمن آنکه مدیریت مواد شیمیایی خطرناک مستعمل و پسماندهای تولیدی نیز باید انجام گیرد.

تمام مشاغل حوزه‌ی انرژی بادی که هدف آنها حل دو بحران مهم زیست‌محیطی کاهش آلودگی هوا از طریق کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و تولید انرژی سبز است، شاخص‌های لازم برای سبز بودن را دارند.

انرژی باد نیز مانند دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر از ویژگی‌ها و مزایای بیشتری نسبت به سایر منابع انرژی برخوردار است که اهم این مزایا عبارت‌اند از: نیاز نداشتن توربین‌های بادی به سوخت که در نتیجه از مصرف سوخت‌های فسیلی می‌کاهد، رایگان بودن انرژی، توانایی تأمین بخشی از تقاضای انرژی برق، کمتر بودن نسبی قیمت انرژی حاصل از باد نسبت به انرژی فسیلی، تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد

سیستم پایدار انرژی، قدرت مانور زیاد برای بهره‌برداری در هر ظرفیت و اندازه (از چند وات تا چندین مگاوات) (نیاز نداشتن به آب، نیاز نداشتن به فضای زیاد برای نصب، نداشتن آلودگی محیط زیست در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، افزایش قابلیت اطمینان در تولید انرژی برق و ایجاد اشتغال. همه‌ی شاخص‌های سبز مشاغل در مزایای انرژی بادی وجود دارد.

۵. بحث

نتایج این تحقیق با تحقیقات و شواهدی که در کسب فرصت‌های شغلی در سبز شدن اقتصاد وجود دارد، کاملاً همخوانی داشت. گزارش مشترک مشاغل سبز یونپ، اتحادیه‌ی سبز - آبی آمریکا، اتحادیه‌ی کارگری و سازمان‌های محیط‌زیستی نشان داد که کشورهایی مانند چین و کره‌ی جنوبی، اجرای برنامه‌های متمرکز بر اشتغال را سرلوحه‌ی سبز کردن اقتصاد خود قرار داده‌اند. هم‌اکنون کشورهای در حال حرکت به سمت اقتصاد سبز، اشتغال‌زایی سبز را در رأس سیاست‌های خود قرار داده‌اند تا با سرمایه‌گذاری بیشتر در بخش‌های سبز به اقتصادی پایدار دست یابند.

بین سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۰۳۰ به سبب کمبود منابع و محدودیت انرژی، سرمایه‌گذاری سبز، رشد اشتغال سازگار یا حتی مؤثرتر از کارها طبق روال را طلب می‌کند. مطالعات ملی کشورها نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری سبز بیشتر در سرمایه‌گذاری کوتاه‌مدت در حال انجام است. محرکان اشتغال‌زایی در گذار به اقتصاد سبز عبارت‌اند از: ایجاد شغل غیرمستقیم و انتخاب ابزار سیاست‌گذاری مناسب که می‌تواند به‌طور چشمگیری تحت تأثیر نتایج اشتغال باشد (Union nation environment programme, 2011, 12). مهم‌ترین محرک‌های سبز مدیریت آب، کاهش کربن، انرژی تجدیدپذیر و بازده انرژی هستند و بزرگ‌ترین محرک سبز به صرفه‌جویی در انرژی و بازده آن اختصاص دارد. با سرمایه‌گذاری‌های بزرگ زیربنایی در راه‌آهن، شبکه‌های توزیع برق و صرفه‌جویی در انرژی ساختمان می‌توان بازده انرژی را افزایش داد. پس از آن آب و منابع کم‌کربن و انرژی تجدیدپذیر به عنوان محرک‌های اصلی سبز آمده‌اند که با سرمایه‌گذاری آموزشی در زمینه‌ی نیروهای کارگر در این بخش‌ها) انرژی‌های تجدیدپذیر، آب و فاضلاب، مدیریت زیرساخت‌های انرژی، شبکه‌ی گسترش ساختمان، راه‌آهن و وسایل نقلیه‌ی کم‌کربن و منابع دیگر کم‌کربن تراز مناسبی از اقتصاد سبز به دست می‌آید (Evans-Klock & Lettmayer, 2011, 46). این موضوع با نتایج تحقیق که آموزش را عامل مداخله‌گر اصلی می‌داند، تطبیق دارد.

با توجه به رشد روزافزون جمعیت و گسترش استفاده از منابع موجود، انسان در تکاپوی شناسایی و به‌کارگیری منابع جدید انرژی است. با توجه به مشکلات انرژی‌های رایج از جمله آلودگی محیط‌زیست، از میان گزینه‌های مختلف، منابع تجدیدپذیر در اولویت قرار دارد. این منابع علاوه بر نامتناهی بودن، بیش از سایر انرژی‌ها با محیط زیست سازگار است. محدودیت انرژی‌های فسیلی و رشد روزافزون تقاضای انرژی، افزایش استانداردهای زندگی، گرم شدن بیش از حد کره‌ی زمین و در نهایت مشکلات زیست‌محیطی موجب شده که هر روز شاهد پیشرفت‌هایی در زمینه‌ی فناوری و استفاده از انرژی‌های نو باشیم (بن‌سعد و صمدیار، ۲۰۱۰، ۸۶). نتایج این تحقیق نیز یافته‌های شرایط علی و راهبرد مدیریت سبز حرکت به سمت انرژی نو را تأیید می‌کند.

۶. نتیجه‌گیری

اقتصاد سبز باید با حفظ سلامت عملکرد اکوسیستم‌های زمین، به ریشه‌کنی فقر و همچنین رشد پایدار اقتصادی، ارتقای شمول اجتماعی، بهبود رفاه بشری و ایجاد فرصت‌های اشتغال و کار مناسب برای همگان کمک کند. حرکت به سوی اقتصاد سبز و پایدار، نیازمند تغییر ساختار تولید، توزیع، مصرف و یافتن جایگزین‌های ابتکاری توسعه است در این تحول مهم همکاری و مشارکت یکایک گروه‌ها و نهادهای اجتماعی الزامی است. فرایندهای اقتصاد سبز در کشورهای در حال توسعه می‌تواند فرصت‌های موفقی ایجاد کند که به ریشه‌کن کردن فقر و حل بحران‌های زیست‌محیطی کمک کند. توسعه‌ی پایدار و مشاغل سبز باید در زمینه‌های ملی تعریف شوند، به‌طوری که روش‌ها و راه‌حل‌های خاص هر کشور قابل تعریف باشد. این کار می‌تواند سبب ترویج نوعی رویکرد بخشی به اقتصاد و شناخت همه‌ی بخش‌هایی شود که فرصت‌های سبز در آنها وجود دارد.

منابع

۱. استراس، آ. و کوربین، ج. (۱۳۸۷)، «نظریه‌ی مبنایی»، ترجمه‌ی بیوک محمدی، تهران، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی.
۲. بن‌سعد، ف. و صمدیار، م. (۱۳۹۰)، «سازوکار مکانیسم توسعه پاک (CDM) چالش‌ها، موانع و راهکارهای رفع آن‌ها در مدیریت انرژی کشور»، تهران، نخستین همایش مدیریت انرژی در صنایع نفت و انرژی.
۳. رسولی، س.ج. (۱۳۸۹)، «وضعیت برق بادی در ایران فرصت‌ها و راهبردها»، ماهنامه صنعت برق، شماره‌ی ۱۵۸، ص ۳۵-۳۰.
۴. شرکت دانش بنیان صبا نیرو (۱۳۹۱)، پروژه‌های انجام شده نیروگاه‌های بادی، <http://sabanirroo.co.ir>.
۵. صابری، ع.؛ صابری، ح. و صابری، ب. (۱۳۹۱)، «ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی باد با استفاده از روش MIRR از دیدگاه سهامداران و شرکای بخش خصوصی»، نخستین کنفرانس انرژی بادی ایران.

۶. قراگوزلو، ع. و رازی، س. (۱۳۹۰)، «مدیریت منابع انرژی‌های تجدیدپذیر براساس تفکر کارآفرینی پایدار»، ماهنامه‌ی کار و جامعه، شماره‌ی ۱۳۹، ص ۱۳-۴.
۷. معینی، س. و دهقان منشادی، م. (۱۳۸۹)، «انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگاه آنها در تأمین انرژی»، ماهنامه‌ی گستره‌ی انرژی، سال چهارم، شماره‌ی ۴، ص ۴۵-۴۸.
۸. نوراللهی، ی.؛ اشرف، س.م.ع. و زمانی، م. (۱۳۹۰)، «پتانسیل سنجی انرژی باد برق منطقه‌ای باختر با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نشریه‌ی انرژی ایران، دوره‌ی ۱۴، شماره‌ی ۱.
9. Amin, A.Z. (2013), "Renewable energy and jobs", IRENA, international renewable energy agency, Abu Dhabi.
10. Bulgarelli, A. & Evans-Klock, C. (2010), "Skills for green jobs", European synthesis report.
11. Evans-Klock, C. & Lettmayr, C.F. (2011), "Skills for green jobs: A global view", International labour office.
12. Hamilton, J. & Liming, D. (2010), "Careers in wind energy", Office of occupational statistics and employment projections, BLS.
13. Phil, J. & Steger, C. (2012), "American wind farms: Breaking down the benefits from planning to production", Natural resources defense council.
14. Union nation environment programme (2011), "Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication - A synthesis for policy makers", www.unep.org/greeneconomy.

پایدارسازی و کنترل سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

مهدی صبری*

گروه برق، واحد بین‌المللی جلفا، دانشگاه آزاد اسلامی، جلفا، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۱۴ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۰۹/۲۶

چکیده

الگوریتم جست‌وجوی کوکو (CS) در این مقاله برای نصب بهینه‌ی پایدارساز سیستم قدرت (PSS) طراحی شده در یک سیستم قدرت چندماشینه معرفی شده است. مشکل تنظیم پارامتر PSS به‌عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی که توسط الگوریتم CS حل شده، فرموله شده است. یک مقدار ویژه براساس تابع هدف شامل نسبت میرایی و فاکتور میرایی از حالت‌های الکترومکانیکی میراشونده‌ی کُند برای مشکل طراحی PSS در نظر گرفته شده است. عملکرد CS که براساس PSSها (CSPSS) با الگوریتم ژنتیک (GA) ارائه شده، بر پایه‌ی PSS (GAPSS) و PSSها (CPSS) متعارف در شرایط عملیاتی و اختلالات مختلف مقایسه شده و نتایج حاصل از CSPSS از طریق تجزیه و تحلیل در حوزه‌ی زمان توسعه داده شده و مقادیر ویژه و شاخص‌های عملکردی تأیید شده است. همچنین اثر الگوریتم پیشنهادی در ارائه‌ی ویژگی‌های میرایی خوب، به تأیید رسیده است.

واژه‌های کلیدی

انتگرال قدر مطلق مقدار خطا (IAE)، انتگرال قدر مطلق خطای ضرب‌شده در زمان (ITAE)، پایدارساز سیستم قدرت (PSS)، پایدارساز سیستم قدرت مرسوم (CSPSS)، پایدارساز سیستم قدرت بر مبنای الگوریتم ژنتیک (GAPSS)، پایدارساز سیستم قدرت بر مبنای جست‌وجوی کوکو (CSPSS).

* نویسنده‌ی مسوول مکاتبات: m.sabri@iauj.ac.ir

۱. مقدمه

سیستم‌های قدرت ممکن است نوسانات پایدار را تجربه کنند. این نوسانات ممکن است به قطع برق جزئی یا کلی بینجامد (Rogers, 2000). یکی از انواع معروف نوسانات، حالت‌های بین منطقه‌ای است که از نوسانی بودن محوطه‌ی یک نسل با توجه به مناطق دیگر نتیجه می‌شود. نوع دیگر، نوسانی بودن ژنراتورها در یک منطقه است که در برابر یکدیگر قرار دارند و به‌عنوان حالت محلی شناخته شده است (Eremia & Shahidehpour, 2013; Machowski et al., 2009). پایدارساز سیستم‌های قدرت (PSS) برای ارائه‌ی یک سیگنال کنترل کمکی به سیستم تحریک به‌منظور کاهش هر دو نوع از نوسانات استفاده می‌شود (Machowski et al., 2009).

در چند سال گذشته، روش‌های هوش مصنوعی (AI) برای حل مشکلات مرتبط با طراحی PSS بررسی شده است. تحقیقات چندی درباره‌ی شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANN) برای طراحی PSS صورت گرفته است (Kumar et al., 2001; El-Razaz & El-hameed, 2001; Segal et al., 2004). این شبکه عملکرد سیستم را افزایش می‌دهد، اما مشکل اصلی این کنترل‌کننده، زمان آموزش طولانی و انتخاب تعداد لایه‌ها و سلول‌های عصبی در هر لایه است. یکی دیگر از روش‌های کنترل منطق فازی (FLC) توجه زیادی را در برنامه‌ی کنترل جلب کرده است (Megala & Rajan, 2014; Rout & Panda, 2010). نیازی به یک مدل مناسب بر مبنای محور S نخواهد بود و می‌توان آن را براساس اطلاعات زبانی به‌دست آمده از دانش قبلی از سیستم کنترل طراحی کرد؛ با این حال، نتایجی بهتر از کنترل متعارف به‌دست می‌آید. دریافت سیگنال‌های مؤثر در هنگام طراحی FLC کاری سخت و اجتناب‌ناپذیر است. روش‌های قوی مانند H_{∞} (Bica & Dulau, 2015)، H_2 (Peng et al., 2011) و μ - سنتز (Yue & Schluter, 2003) نیز برای طراحی PSS استفاده شده است. این روش‌ها تکراری‌اند و عدم قطعیت سیستم باید در یک شکل خاص انجام گیرد. از دیگر سو، ترتیب تثبیت‌کننده‌ها به پایداری براساس محور s است و ساختار پیچیده از جمله تثبیت‌کننده را افزایش و کاربرد آنها را کاهش می‌دهد. در تحقیقی، روش تغییر قطب برای طراحی PSS نشان داده شده (El-Sherbiny et al., 2003)، اما این روش پیچیدگی الگوریتم محاسباتی و مشکل ذخیره‌سازی حافظه داشته و فرض در دسترس بودن کامل را دارد.

به‌تازگی، الگوریتم‌های بهینه‌سازی به مشکل طراحی PSS افزوده شده‌اند. روش شبیه‌سازی آیلینگ (SA) در تحقیقی (Abdio, 2000) برای پارامترهای تنظیم PSS ارائه شده، اما ممکن است با گرفتن بهینه‌ی محلی شکست بخورد. یکی دیگر از روش‌ها مانند جست‌وجوی ممنوع (TS) در تحقیق دیگری (Abdio, 1999) (Abdel-Magid & 1999) برای طراحی PSS معرفی شده است. به‌رغم اثر ابزار بهینه‌سازی در طراحی

PSS، بهره‌وری با استفاده از توابع هدف افزایش و تعداد زیادی از پارامترهای بهینه‌سازی شده کاهش می‌یابد. همچنین این روش بسیار وقتگیر است. الگوریتم ژنتیک (GA) در (Abodo & Magid- Abdel, 2000) برای طراحی بهینه‌ی PSS توسعه یافته است و به زمان اجرای بسیار طولانی بسته به اندازه‌ی سیستم تحت مطالعه نیاز دارد. همچنین با تکرار بازنگری راه‌حل‌های بهینه را افزایش می‌دهد. بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) برای طراحی پارامترهای PSS بررسی شده است (Jalalivand & Khalkhali, 2011). در الگوریتم PSO به صورتی خوش‌بینانه است که سبب تنظیم مناسب سرعت و جهت آن می‌شود. علاوه بر این، الگوریتم نمی‌تواند مشکلات پراکندگی و بهینه‌سازی را برطرف کند و از همگرایی آهسته در مرحله‌ی جست‌وجوی انتخابی، توانایی جست‌وجوی محلی مناسبی ندارد که ممکن است به مشکل حداقل راه‌حل محلی منجر شود. یک الگوریتم محاسبات تکاملی به نسبت جدیدتر، به نام باکتری جست‌وجوگر (BF) در پژوهشی (Passino, 2002) نشان داده شده و به تازگی توسط محقق (Abd-Elazim & Ali, 2013) منتشر شده است. الگوریتم BF به جهت جست‌وجوی تصادفی بستگی دارد که ممکن است به تأخیر در رسیدن به راه حل جهانی بینجامد.

یک الگوریتم فوق‌ابتکاری جدید شناخته شده به عنوان الگوریتم CS، براساس زندگی یک خانواده‌ی پرند است که برای طراحی بهینه‌ی پارامترهای PSS بررسی شده است. مسئله‌ی طراحی PSS، یک عمل بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم CS است. تثبیت‌کننده‌ها برای تغییر همه‌ی حالت‌های الکترومکانیکی به یک منطقه‌ی از پیش تعریف شده براساس محور S تنظیم شده‌اند تا ثبات نسبی را اعلام کنند. اعتبارسنجی CSPSS روی یک سیستم قدرت چندماشینه در حالت‌های عملیاتی متعدد در مقایسه با GAPSS و CPSS که از طریق تجزیه و تحلیل در حوزه‌ی زمان، مقادیر ویژه و شاخص‌های عملکردی اعمال می‌شود، توسعه داده شده است. نتایج ارزیابی اطمینان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی، عملکردی قوی را برای شدت نوسانات در حالت‌های مختلف بارگذاری و اختلالات فراهم می‌کند.

۲. فرمولاسیون مسئله

۲-۱. مدل سیستم قدرت

یک سیستم قدرت به طور کلی می‌تواند با مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل غیرخطی فرموله شود:

$$\dot{X} = f(X, U) \quad (1)$$

که در آن $X = [\delta, \omega, E_q', E_{fd}, V_f]^T$ و U سیگنال‌های خروجی PSS است.

در مسئله‌ی تنظیم PSS، مدل‌های افزایشی خطی در اطراف یک نقطه‌ی تعادل معمولاً استفاده می‌شود. بنابراین، معادله‌ی حالت یک سیستم قدرت با تعداد n ماشین و m PSS را می‌توان به شکل زیر تشکیل داد:

$$\dot{X} = (AX + BU) \quad (2)$$

که در آن A یک ماتریس $5n \times 5n$ و معادل $\partial f / \partial X$ است. در حالی که B یک ماتریس $5n \times m$ و معادل $\partial f / \partial U$ است. هم A و هم B در یک نقطه‌ی خاص عامل، برآورد شده است. X یک بردار حالت $5n \times 1$ و U یک بردار ورودی $m \times 1$ متر است.

۲-۲. ساختار کنترل PSS

ساختار CPSS با توجه به سهولت تنظیم آنلاین مطلوب است. تجزیه و تحلیل جامع از اثرات پارامترهای مختلف CPSS در عملکرد دینامیکی کلی سیستم قدرت در (Kundur et al., 1989) بررسی شده است. این نشان می‌دهد که انتخاب مناسب پارامترهای CPSS عملکرد رضایت‌بخش در طول اختلالات سیستم را نتیجه می‌دهد. ساختار چندمین PSS برابر است با:

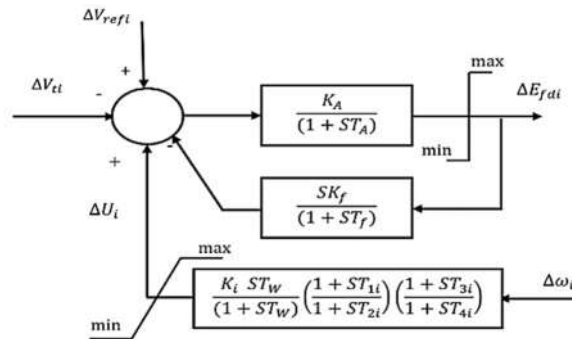
$$\Delta U_i = K_i \frac{ST_{iw}}{1 + ST_{iw}} \left[\frac{1 + ST_{li}}{1 + ST_{ri}} \frac{1 + ST_{ri}}{1 + ST_{ri}} \right] \Delta \omega_i \quad (3)$$

این ساختار شامل یک افزایش، یک فیلتر شست‌وشو، و جبران پویا و محدود مطابق شکل ۱ است. سیگنال خروجی ΔU_i به‌عنوان یک سیگنال ورودی کمکی تغذیه می‌شود و سیستم تحریک را تنظیم می‌کند. سیگنال ورودی $\Delta \omega_i$ انحراف در سرعت سنکرون است. برای جبران تأخیر فاز بین تحریک و گشتاور الکتریکی دو مدار پیش‌فاز - پس‌فاز استفاده می‌شود. محدودکننده برای جلوگیری از سیگنال خروجی از PSS از رسیدن سیستم تحریک به فوق اشباع گنجانده شده است (Eremia & Shahidehpour, 2013). در این مقاله، مقدار ثابت زمان شست‌وشو (T_{iw}) در ۱۰ ثانیه نگه داشته می‌شود، مقدار ثابت زمان T_{2i} و T_{4i} در یک مقدار معقول ۰/۰۵ ثابت شده است. دستاورد تثبیت‌کننده‌ی K_i و ثابت زمان T_{1i} و T_{3i} باید از لحاظ عددی مشخص شوند.

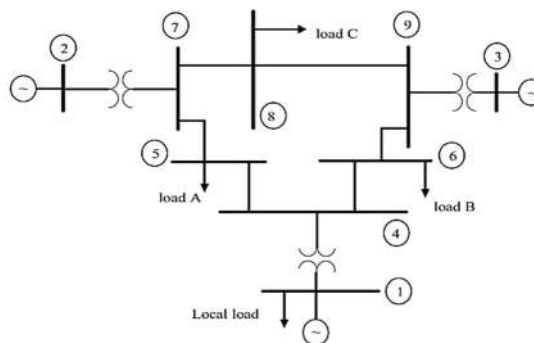
۲-۳. سیستم تحت مطالعه

دستگاه سه‌ماشینه، نه‌باسه در شکل ۲ نشان داده شده است. اطلاعات سیستم با جزئیات در منابع (Fouad & Anderson, 1977) نشان داده شده است. سه وضعیت عملیاتی مختلف به‌عنوان بار سبک،

نرمال و سنگین برای نشان دادن برتری الگوریتم پیشنهادی در طراحی قوی PSS در نظر گرفته شده و ژنراتور و سطح بارگذاری در جدول ۱ برای این حالت‌های بارگذاری داده شده است.



شکل ۱. بلوک دیاگرام PSS نام با سیستم تحریک



شکل ۲. سیستم تست سه‌ماشینه

جدول ۱. حالت‌های بارگذاری برای سیستم برحسب پریونیت (pu)

سنگین		نرمال		سبک		بار و ژنراتور	سیستم تست چندماشینه
Q	P	Q	P	Q	P		
۱/۸۱۴۳	۳/۵۷۳۰	۰/۶۲۰۵	۱/۷۱۶۴	۰/۲۲۳	۰/۹۶۴۹	ژنراتور ۱	ژنراتور
۰/۷۱۲۷	۲/۲۰	۰/۰۶۶۵	۱/۶۳۰	۰/۱۹۳۳	۱/۰۰	ژنراتور ۲	
۰/۴۳۱۳	۱/۳۵	۰/۱۰۸۶	۰/۸۵	۰/۲۶۶۸	۰/۴۵	ژنراتور ۳	
۰/۹	۲/۰	۰/۵	۱/۲۵	۰/۳۵	۰/۷	بار A	بار
۰/۶	۱/۸	۰/۳	۰/۹	۰/۳	۰/۵	بار B	
۰/۶۵	۱/۶	۰/۳۵	۱/۰	۰/۲	۰/۶	بار C	
۰/۶۵	۱/۶	۰/۳۵	۱/۰	۰/۲	۰/۶	بار محلی ژنراتور ۱	

۳. روش‌های بهینه‌سازی

بررسی اجمالی الگوریتم جست‌وجوی کوکو، رفتار اصلاح گونه‌های کوکو و آیت‌های اساسی از الگوریتم پیشنهادی در بخش زیر بررسی شده است.

۳-۱. رفتار اصلاح کوکو (CS)

CS یک الگوریتم جست‌وجوی فوق‌ابتکاری است که به‌تازگی توسط یانگ (Yang, 2010) معرفی شده است. این الگوریتم از الزام انگلی بودن نوزادان برخی از گونه‌ی کوکوها که روی تخم خود در لانه‌ی پرندگان دیگر می‌خوابند (ممکن است از گونه‌های مختلف باشند) الهام گرفته شده است. در لحظه‌ی مناسب مرغ کوکو به لانه‌ی میزبان پرواز می‌کند، یک تخم را از لانه هل می‌دهد، یک تخم را باقی می‌گذارد و پرواز می‌کند. کل فرایند در حدود ۱۰ ثانیه طول می‌کشد. جنس ماده ممکن است به ۵۰ لانه در طول یک فصل بارگذاری مراجعه کند. پرندگان میزبان ممکن است تشخیص دهند که آن تخم خودشان نیست یا آنها را دور بریزند یا لانه را رها کنند و لانه‌ی جدیدی در جای دیگری درست کنند. این روند موجبات تکامل تخم کوکو را که ادعای شبیه بودن تخم پرندگان میزبان محلی را دارد، فراهم می‌آورد (Yang & Deb, 2010).

علاوه بر این، زمان خوابیدن روی تخم در برخی از گونه‌ها نیز شگفت‌انگیز است. کوکوها انگلی اغلب لانه‌ای را انتخاب می‌کنند که پرند در آن فقط روی تخم خود می‌خوابد. به‌طور کلی، تخم کوکو کمی زودتر از تخم پرند میزبان بیرون می‌آید. این قضیه به‌طرز پیچیده‌ای با تمام فرزندان میزبان تفاوت دارد. جوجه‌ی این پرند بسیار بزرگ‌تر از جوجه‌های میزبان است و نیاز دارد تا انحصار مواد غذایی عرضه شده توسط پدر و مادر را در اختیار گیرد. این جوجه با فشار دادن دیگر تخم‌ها آنها را از لبه‌ی لانه پایین می‌اندازد. اگر تخم پرند میزبان قبل از تخم کوکوها بیرون آید، جوجه‌ی کوکو، جوجه‌ی دیگر را به همین ترتیب از لانه به بیرون خواهد انداخت.

۳-۲. پروازهای باج‌گیرانه (Lévy flights)

استفاده از Lévy flights هم برای جست‌وجوی محلی و هم جهانی یک جزء مهم از CS است (Yang & Deb, 2009). روند Lévy flights یک فرایند تصادفی است که توسط یک سری از جهش‌های آنی توسط یک تابع چگالی احتمال که دارای یک قانون توان مشخص است انتخاب شده است. این فرایند نشان‌دهنده‌ی الگوی جست‌وجو به‌صورت تصادفی بهینه است و اغلب در طبیعت یافت می‌شود

(Bhargava et al., 2013). در هنگام تولید یک تخم جدید، یک Lévy flights انجام گرفته با شروع در محلی که یک تخم به صورت تصادفی انتخاب شده است، اگر مقدار تابع هدف در این مختصات جدید بهتر از تخم دیگری که به صورت تصادفی انتخاب شده باشد، پس از آن تخم به این موقعیت جدید تغییر مکان می‌دهد. یکی از مزایای استفاده از CS در مقابل الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر این است که فقط یک پارامتر (بخشی از لانه که ترک شده است (Pa)) نیاز به تنظیم دارد. استفاده از Lévy flights به عنوان روش جست‌وجو بدان معناست که همزمان CS می‌تواند تمام بهینه‌ها را در یک فضای طراحی پیدا کند؛ این روش در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها عملکرد خوبی دارد. (Rajabioun, 2011)

۳-۳. اجرای جست‌وجوی کوکو (CS)

هر تخم در لانه یک راه‌حل را نشان می‌دهد و یک تخم کوکو یک راه‌حل جدید را معرفی می‌کند. هدف این است که از راه‌حل‌های جدید با پتانسیل بهتر به جای یک راه‌حل نه‌چندان خوب در لانه استفاده شود. هر لانه یک تخم برای موارد ساده دارد. الگوریتم می‌تواند به موارد پیچیده‌تر توسعه یابد که در آن هر لانه تخم‌های متعددی دارد که هر کدام نماینده‌ای از مجموعه‌ای از راه‌حل‌هاست. برای اعمال این جست‌وجو به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی، سه قانون زیر ارائه شده‌اند (Yang & Deb, 2013; Abd-Elaziz & Ali, 2015): ۱. کوکوها لانه‌های تصادفی برای تخم‌گذاری تخم‌های خود را انتخاب می‌کنند. کوکو می‌تواند تنها روی یک تخم در یک زمان بخوابد؛ ۲. فرایند انتخاب دلایل اعمال می‌شود، به طوری که تنها بهترین تخم‌ها به نسل بعدی منتقل می‌شوند؛ ۳. تعداد لانه‌های میزبان در دسترس مشخص است و یک میزبان می‌تواند تخم خارجی با احتمال $P_a \in [0.1]$ را تشخیص دهد. پرنده میزبان در صورت تشخیص تخم کوکو، ممکن است آن را دور بیندازد یا لانه‌ی خود را برای امنیت کوکو رها کند.

فرض آخر را می‌توان توسط یک عامل Pa از تعداد n لانه تقریب زد که توسط لانه‌های جدید تغییر داده شده‌اند. کیفیت یک راه‌حل نسبت به تابع هدف برای یک مسئله خیلی خوب است. شکل‌های دیگر تناسب را می‌توان در یک راه یکسان در تابع تناسب GA تعیین کرد. براساس این سه قانون، فلوچارت CS در شکل ۳ نشان داده شده و پارامترهای CS در ضمیمه آورده شده است. هنگام ایجاد یک راه‌حل جدید X_i^{t+1} برای کوکوی i ام، یک Lévy flights انجام می‌گیرد:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \oplus \text{Lévy}(\lambda) \quad (4)$$

که در آن $\alpha > 0$ اندازه‌ی گام است که باید با مقیاس‌های مشکل بهینه‌سازی متناسب باشد. محصول \oplus به معنای پیاده‌روی با ورود عاقلانه در فرایند ضرب است. اساساً Lévy flights مدل یک پیاده‌روی تصادفی است، در حالی که گام‌های تصادفی خود را از توزیع Lévy برای مراحل بزرگ کشیده است:

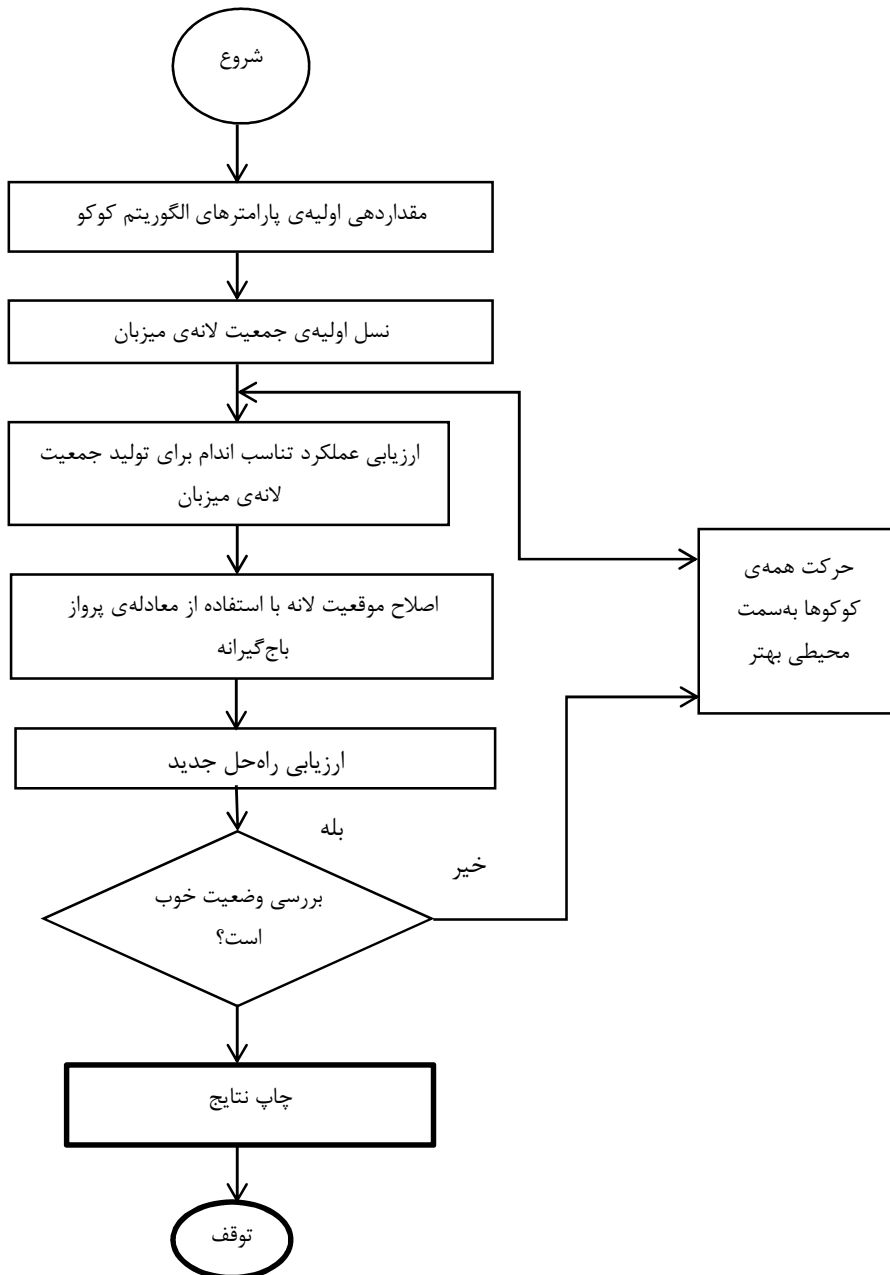
$$Lévy \sim u = t^{-\lambda}, (1 < \lambda \leq 3) \quad (5)$$

این واریانس بی‌نهایت، یک معنای بی‌نهایت دارد. در اینجا قدم‌ها اساساً از فرایند پیاده‌روی تصادفی با قانون توزیع طول گام با یک دم سنگین تشکیل می‌شوند. برخی از راه‌حل‌های جدید باید توسط گام Lévy پیرامون بهترین راه‌حل‌های کنونی باشند تا این موضوع سرعت جست‌وجوی محلی را افزایش دهد. با این حال، بخش شایان توجهی از راه‌حل‌های جدید باید توسط میدان تصادفی دور تولید شوند و مکان‌ها باید به اندازه‌ی کافی از بهترین راه‌حل حاضر دور باشند. به کمک این روش، سیستم مطمئن خواهد شد که در بهینه‌ی محلی به دام نخواهد افتاد.

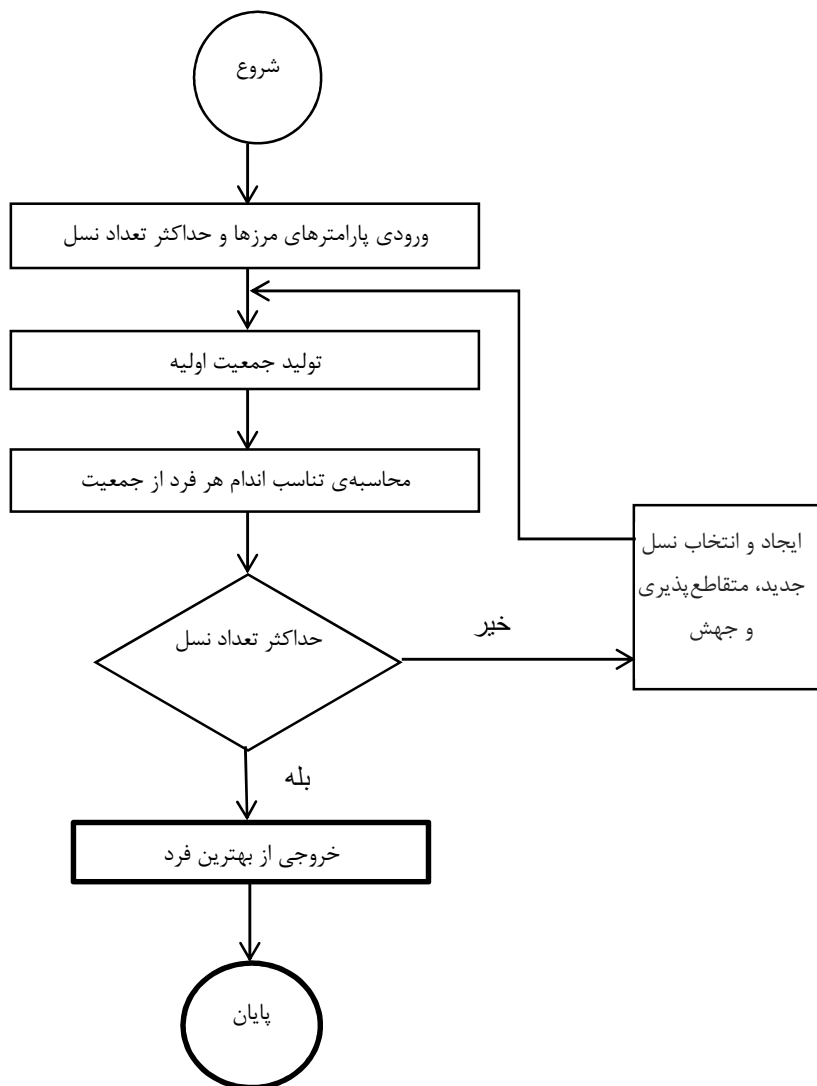
۳-۴. الگوریتم ژنتیک

حیوانات در قلمرو خود، با توجه به نقش «بقای اصلح» تکامل می‌یابند و همچنین تولیدمثل می‌کنند. در طبیعت، حیوانات به‌طور مداوم برای غذا، سرپناه و درمان فعالیت می‌کنند؛ بنابراین تنها اصلح زنده خواهد ماند و ضعیف‌ترین هلاک خواهد شد. این سازوکار از بین بردن بی‌فایده‌ها، قرن‌ها به‌خوبی کار کرده و به روشی خوب برای بهینه‌سازی تبدیل شده است. GA مانند یک روش بهینه‌سازی است و براساس سازوکار انتخاب طبیعی و ژنتیک طبیعی عمل می‌کند. روند جست‌وجوها مشابه تکامل طبیعی موجود بیولوژیکی است که در آن نسل موجودات، زاده شده و بزرگ می‌شوند تا زمانی که قادر به رشد باشند. دقیقاً مثل قلمرو حیوانات، تنها اصلح برای تولیدمثل زنده خواهد ماند، در حالی که ضعیف‌ترین حذف خواهد شد (Haupt & Haupt, 2004).

یک فلوچارت برای الگوریتم GA در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی کوکو



شکل ۴. فلوچارت الگوریتم ژنتیک

چهار پارامتر اصلی بر عملکرد GA تأثیر می‌گذارد: اندازه‌ی جمعیت، تعداد نسل، نرخ متقاطع و نرخ جهش. اندازه‌ی جمعیت بزرگ‌تر و تعداد زیاد نسل‌ها، احتمال به‌دست آوردن راه‌حل بهینه‌ی نزدیک به راه‌حل جهانی را افزایش می‌دهد، اما به‌طور چشمگیری زمان پردازش را نیز افزایش می‌دهد. نرخ متقاطع در میان کروموزوم‌های پدر و مادر یک فرایند طبیعی مشترک است و به‌طور سنتی از $0/6$ تا 1 است. در متقاطع،

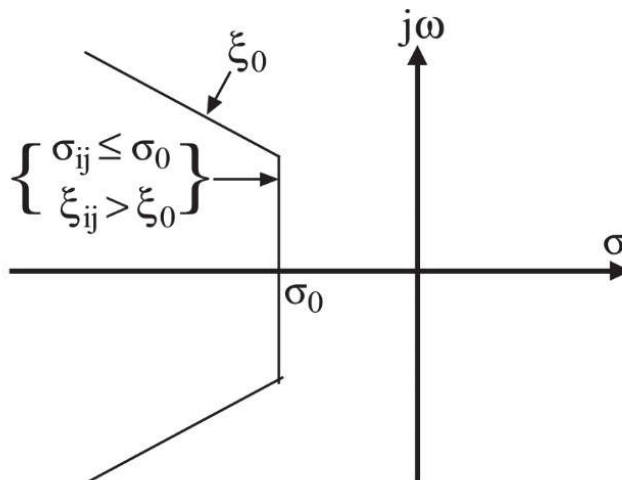
تبادل اطلاعات پدر و مادر، فرزند را تولید می‌کند. برخلاف متقاطع، جهش یک فرایند نادر و شبیه به تغییری ناگهانی در فرزندان است و می‌تواند به‌طور تصادفی با انتخاب یک کروموزوم از جمعیت و سپس تغییر خودسرانه‌ی برخی از اطلاعات آن انجام گیرد. مزیت جهش این است که به‌طور تصادفی مواد ژنتیکی جدید را در روند تکاملی معرفی می‌نماید. شاید از این طریق از رکود در اطراف حداقل محلی اجتناب شود. معمولاً نرخ جهش کوچک کمتر از ۰/۱ استفاده می‌شود (همان). پارامترهای GA در ضمیمه آورده شده است.

۴. تابع هدف

جهت رسیدن به میرایی بیشتر برای نوسانات فرکانس پایین، پارامترهای PSS ممکن است برای به حداقل رساندن فرمول D- شکل زیر تنظیم شود:

$$J_t = \sum_{j=1}^{np} \sum_{\sigma_{ij} \geq \sigma_0} (\sigma_0 - \sigma_{ij})^2 + \sum_{j=1}^{np} \sum_{\xi_{ij} \geq \xi_0} (\xi_0 - \xi_{ij})^2 \quad (6)$$

سیستم مقادیر ویژه‌ی حلقه‌ی بسته در بخش D شکل جا داده شده که با $\sigma_{ij} \leq \sigma_0$ و $\xi_{ij} > \xi_0$ همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده، بسته شده است.



شکل ۵. بخش D- شکل در نیمه‌ی چپ محور S

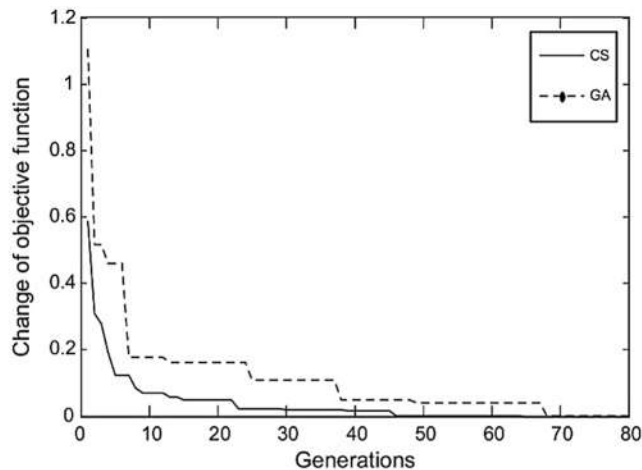
در این مقاله، σ_0 و ξ_0 انتخاب می‌شوند تا به ترتیب $0/5 -$ و $0/1 +$ باشند (Ali, 2014). محدودیت‌های معمولی از پارامترهای بهینه‌سازی برای K [۵۰-۱] و برای T_{1i} و T_{3i} [۰/۰۶-۱] هستند. در نهایت، به حداقل رساندن J_t به قرار زیر است:

$$\begin{aligned} K_i^{min} &\leq K_i \leq K_i^{max} \\ T_{li}^{min} &\leq T_{li} \leq T_{li}^{max} \\ T_{3i}^{min} &\leq T_{3i} \leq T_{3i}^{max} \end{aligned} \quad (7)$$

هدف از بهینه‌سازی، جست‌وجو برای مجموعه‌ی تنظیم بهینه‌ی پارامترهای PSSهاست که منعکس‌کننده‌ی حداقل زمان نشست و فراجش سیستم است. علاوه بر این، اهداف افزایش مربوط به ویژگی‌های نوسانات کم هستند، دستیابی به یک عملکرد خوب در شرایط عملیاتی مختلف و در نهایت طراحی یک کنترل سفارش پایین برای اجرای آسان است.

۵. نتایج و شبیه‌سازی

این قسمت، بخش شناخته شده‌ای از الگوریتم CS ارائه شده در طراحی PSS در مقایسه با PSS بهینه‌سازی شده با GA و CPSS را نشان می‌دهد (Ali, 2014). تغییر توابع هدف با دو الگوریتم بهینه‌سازی در شکل ۶ نشان داده شده است و بیش از تکرار، CS و GA را کاهش می‌دهد. مقدار نهایی تابع هدف برای هر دو الگوریتم $J_t = 0$ است و نشان می‌دهد تمام حالت‌ها به بخش D شکل مشخص شده در محور S منتقل شده‌اند و به تابع هدف پیشنهاد شده رسیده‌اند. علاوه بر این، CS با سرعت بیشتری (۴۶ نسل) در مقایسه با GA (۶۸ نسل) همگرا می‌شود. همچنین زمان محاسباتی (CPU) از هر دو الگوریتم براساس میانگین زمان CPU گرفته شده، مقایسه شده است تا راه‌حل را همگرا کند. میانگین CPU برای CS، ۳۶/۴ و برای GA ۴۸/۶ ثانیه است. روش پیشنهاد CS و GA از طریق نرم‌افزار Matlab برنامه‌ریزی شده است. زمان اشاره شده‌ی CPU متوسط ترکیبی از ۱۰ کد کامپیوتری است. مقادیر ویژه‌ی سیستم و نسبت میرایی از حالت مکانیکی با سه حالت بارگذاری مختلف در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۶. تغییرات توابع هدف

جدول ۲. مدل‌های مکانیکی و γ در حالت‌های مختلف بارگذاری و کنترل (مقادیر پررنگ شده مدهای ناپایدار را نشان می‌دهد)

انواع بار	بدون تثبیت‌کننده	CPSS	GAPSS	CSPSS
بار سبک	$+0/01 \pm 0/02, -0/12$	$-0/19 \pm 0/69, 0/26$	$-1/06 \pm 0/72, -0/83$	$-1/11 \pm 0/62, -0/87$
	$-0/58 \pm 6/04, 0/09$	$-2/35 \pm 4/15, 0/49$	$-3/73 \pm 6/32, 0/51$	$-6/28 \pm 6/49, 0/69$
	$-0/96 \pm 7/77, 0/12$	$-3/24 \pm 5/22, 0/52$	$-3/49 \pm 8/12, 0/4$	$-3/64 \pm 6/00, 0/52$
بار نرمال	$+0/15 \pm 1/49, -0/1$	$-2/41 \pm 0/75, 0/3$	$-1/13 \pm 0/69, 0/85$	$-1/17 \pm 0/69, 0/86$
	$-0/35 \pm 8/14, 0/04$	$-2/41 \pm 4/42, 0/47$	$-4/27 \pm 7/02, 0/52$	$-6/85 \pm 6/99, 0/70$
	$-0/67 \pm 11/62, 0/06$	$-3/32 \pm 5/34, 0/52$	$-3/61 \pm 8/72, 0/38$	$-0/96 \pm 7/77, 0/12$
بار سنگین	$+0/32 \pm 1/62, -0/19$	$-0/33 \pm 0/89, 0/34$	$-1/71 \pm 0/72, 0/85$	$-1/31 \pm 0/72, 0/83$
	$+0/15 \pm 7/82, -0/02$	$-1/96 \pm 4/32, 0/41$	$-3/52 \pm 6/72, 0/46$	$-7/99 \pm 5/42, 0/83$
	$-0/36 \pm 12/22, 0/03$	$-3/09 \pm 5/25, 0/5$	$-3/79 \pm 8/91, 0/39$	$-4/63 \pm 7/32, 0/53$

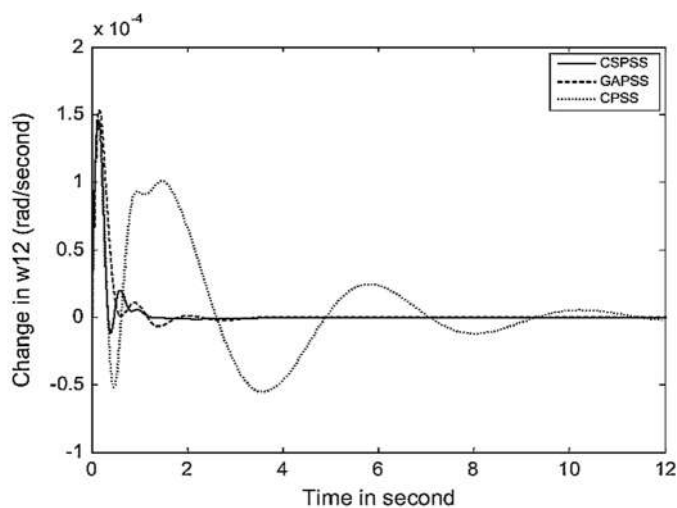
واضح است که حالت‌های الکترومکانیکی با CSPSS به سمت چپ از محور S منتقل شده و مقادیر عوامل میرایی به میزان چشمگیری برای بارهای سبک، نرمال و سنگین به ترتیب در حالت بارگذاری افزایش یافته است ($\sigma = -1/10, -1/17, -1/31$). همچنین، نسبت میرایی مربوط به کنترل‌کننده‌های CSPSS بزرگ‌تر از آنهایی است که مربوط به GAPSS و CPSS هستند. از این رو، CSPSS عملکرد قوی به‌دست آمده از ویژگی‌های میرایی برتر از حالت الکترومکانیکی را فراهم می‌کند. جدول ۳ مقادیر پارامترهای PSSها را براساس تابع هدف ارائه شده با استفاده از CS، GA و روش متداول نشان می‌دهد.

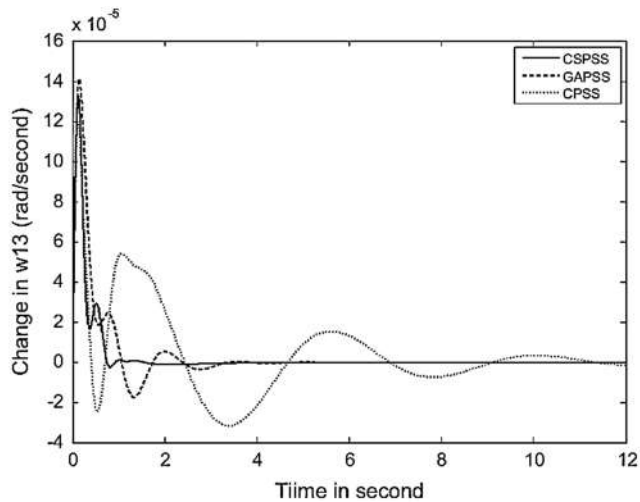
جدول ۳. پارامترهای PSS برای الگوریتم‌های مختلف

CPSS	GA	CS	پسرها
$K=۱۴/۴۳۸۶$ $T_1=۰/۲۶۵۲$ $T_3=۰/۸۹۵۲$	$K=۲۵/۳۶۹۶$ $T_1=۰/۴۶۸۴$ $T_3=۰/۷۴۲۸$	$K=۴۴/۲۴۵۸$ $T_1=۰/۴۲۴۳$ $T_3=۰/۳۵۷۸$	PSS1
$K=۵/۱۶۵۹$ $T_1=۰/۵۲۴۲$ $T_3=۰/۲۰۳۲$	$K=۷/۸۱۸۷$ $T_1=۰/۲۹۱۸$ $T_3=۰/۱۴۲۹$	$K=۸/۲۴۵۱$ $T_1=۰/۴۵۷۳$ $T_3=۰/۱۷۳۴$	PSS2
$K=۸/۳۲۸۷$ $T_1=۰/۵۸۷۱$ $T_3=۰/۴۲۶۸$	$K=۳/۵۳۱۴$ $T_1=۰/۵۱۲۱$ $T_3=۰/۳۷۳۱$	$K=۴/۶۲۶۱$ $T_1=۰/۲۳۵۸$ $T_3=۰/۱۷۸۱$	PSS3

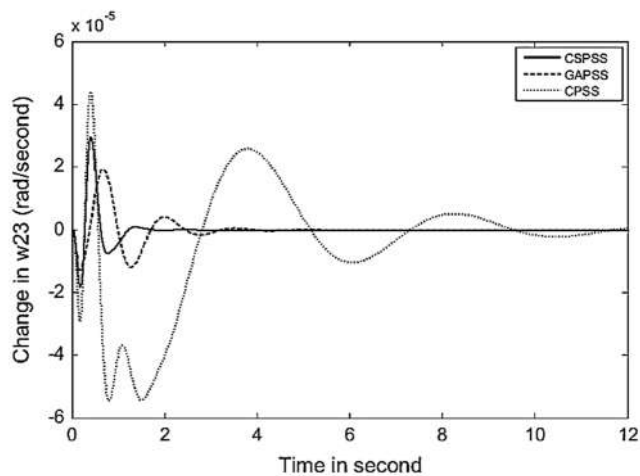
۵-۱. پاسخ در حالت بار طبیعی

شکل‌های ۷ تا ۹، پاسخ‌های $\Delta\omega_{12}$ و $\Delta\omega_{13}$ را با توجه به ۲۰ درصد افزایش گشتاور مکانیکی ژنراتور—۱ در حالت بارگذاری طبیعی نشان می‌دهد. روشن است که سیستم با CSPSS ارائه شده بیش از GAPSS و CPSS تثبیت شده است.

شکل ۷. تغییرات $\Delta\omega_{12}$ در بار نرمال



شکل ۸. تغییرات $\Delta\omega_{13}$ در بار نرمال

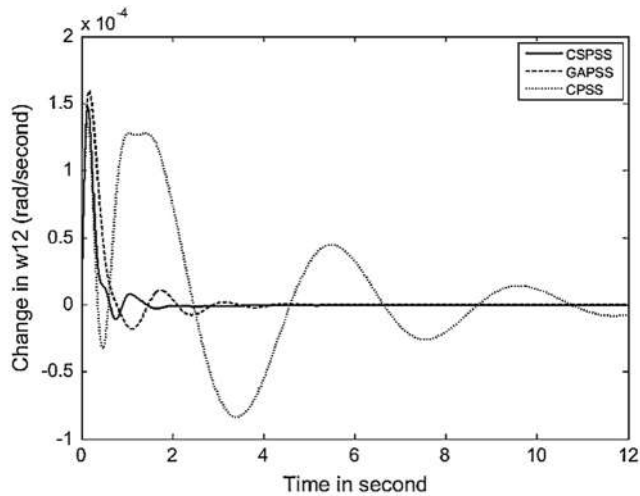


شکل ۹. تغییرات $\Delta\omega_{23}$ در بار نرمال

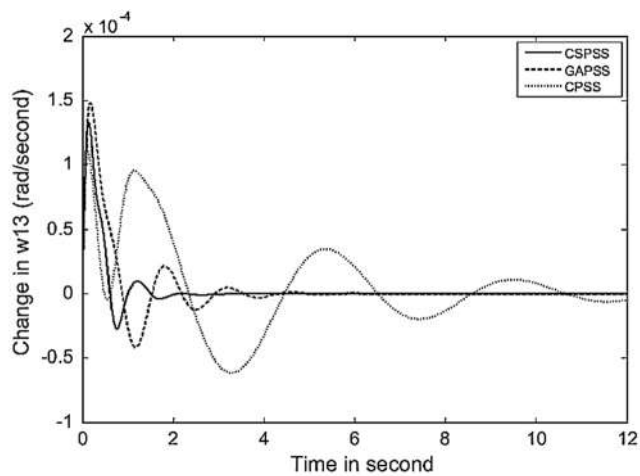
همچنین میانگین حل و فصل بار برای کاهش نوسانات سیستم حدود $1/0.5$ با CSPSS، $1/6$ ثانیه برای GAPSS و 7 با CPSS است. بنابراین طراحی کنترل کننده برای تأمین منابع کافی جهت میرایی نوسانات فرکانس پایین کافی است.

۲-۵. پاسخ در حالت بار سبک

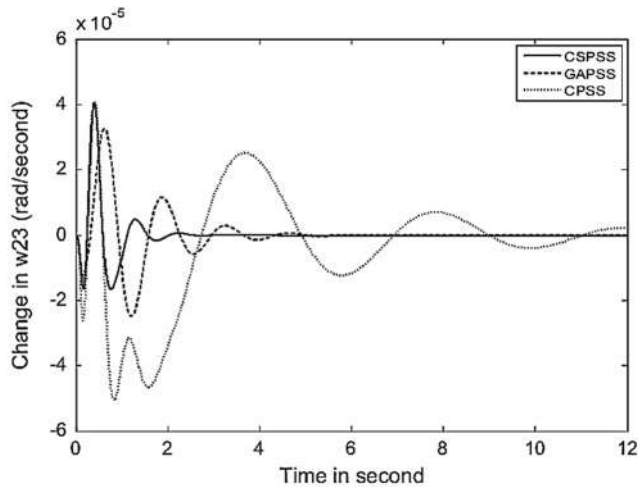
پاسخ‌های سیستم در حالت بارگذاری سبک با همان پارامترهای کنترل‌کننده در شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ نشان داده شده است. واضح است از CSPSS پیشنهادی، ویژگی‌های میرایی خوبی برای حالت سیستم نوسانی فراهم می‌آورد و سیستم را به‌طور مکرر تثبیت می‌کند.



شکل ۱۰. تغییرات Δw_{12} در بار سبک



شکل ۱۱. تغییرات Δw_{13} در بار سبک

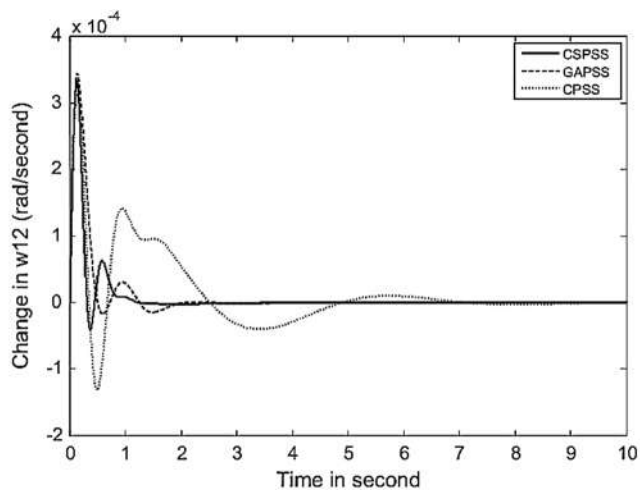


شکل ۱۲. تغییرات Δw_{23} در بار سبک

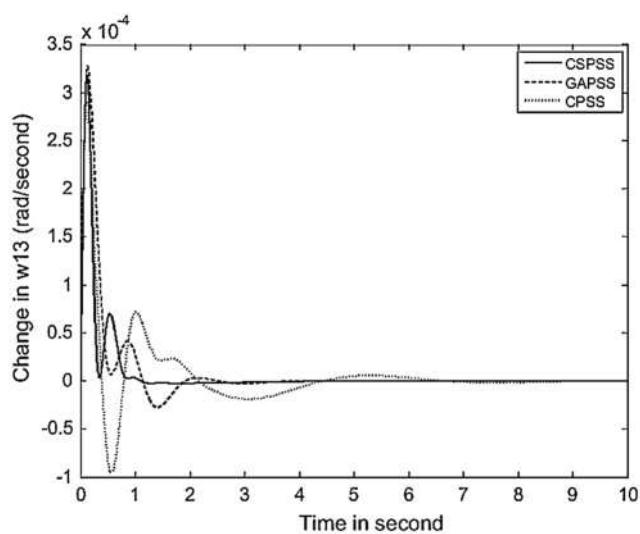
همچنین میانگین حل و فصل بار نوسانات $1/6, 2/6, 1/46$ برای T_s CSPSS، GAPSS و CPSS هستند. از این رو، CSPSS پیشنهادی، کنترل‌کننده‌ی GAPSS و CPSS را به‌طور مؤثر در کاهش نوسانات بهبود می‌بخشد و زمان نشست را کمتر می‌کند.

۳-۵. پاسخ در حالت بار سنگین

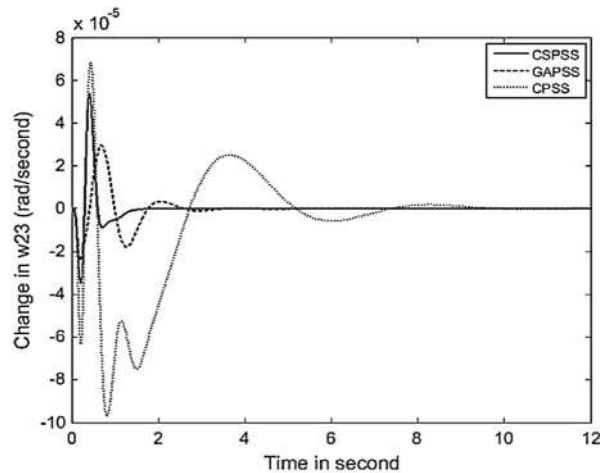
پاسخ سیستم در حالت بارگذاری سنگین در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نشان داده شده است. برتری CSPSS در کاهش زمان نشست و میرایی نوسانات سیستم قدرت تأیید شده است. همچنین میانگین زمان‌های نشست از این نوسانات $1/3, 5/3, 1/43$ ، $T_s=1$ به‌ترتیب برای CSPSS، GAPSS و CPSS است. از این رو، کنترل‌کننده‌ی CSPSS تا حد زیادی ویژگی‌های میرایی سیستم قدرت را افزایش می‌دهد. از طرفی، زمان نشست این کنترل‌کننده کوچک‌تر از آن است که در برخی منابع (Abd-Elazim & Ali, 2013 ; Ali, 2014) بیان شده است.



شکل ۱۳. تغییرات $\Delta\omega_{12}$ در بار سنگین



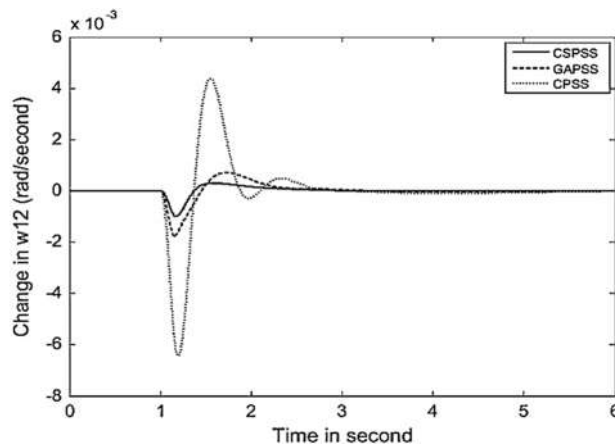
شکل ۱۴. تغییرات $\Delta\omega_{13}$ در بار سنگین



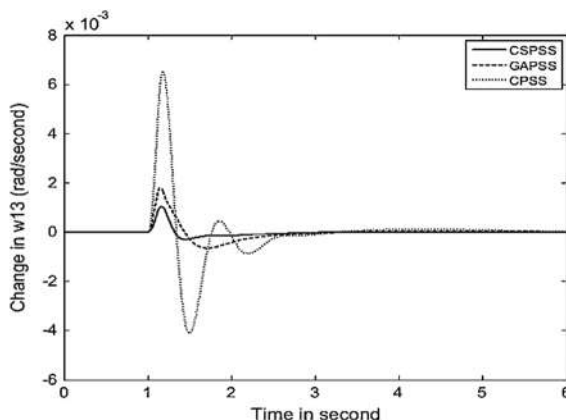
شکل ۱۵. تغییرات Δw_{23} در بار سنگین

۴-۵. پاسخ در حالت اختلال شدید

اعتبار سنجی از عملکرد در حالت اختلال شدید با اعمال یک خطای سه فاز از مدت زمان شش چرخه در ۱ ثانیه در نزدیکی باس ۷، تأیید شده است. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ پاسخ‌های A6012 و A6013 در حالت بارگذاری سنگین را نشان می‌دهد. از این شکل‌ها، می‌توان دید CS براساس PSSها با استفاده از تابع هدف ارائه شده، میرایی برتر و عملکرد قوی‌تری در مقایسه با روش‌های دیگر معرفی می‌کند.



شکل ۱۶. تغییرات Δw_{12} در حالت اختلال شدید



شکل ۱۷. تغییرات $\Delta\omega_{13}$ در حالت اختلال شدید

۶. شاخص پایداری و عملکرد

استحکام کنترل‌کننده‌ی ارائه شده از طریق برخی از شاخص‌های عملکرد نشان داده شده است. از انتگرال قدر مطلق مقدار خطا (IAE)، و انتگرال قدر مطلق خطای ضرب‌شده در زمان (ITAE) استفاده می‌شود:

$$IAE = \int_0^{\infty} (|\Delta\omega_{12}| + |\Delta\omega_{23}| + |\Delta\omega_{13}|) dt \quad (8)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t(|\Delta\omega_{12}| + |\Delta\omega_{23}| + |\Delta\omega_{13}|) dt \quad (9)$$

جالب توجه است که هر چه مقدار این شاخص کمتر باشد، پاسخ سیستم از نظر ویژگی‌های حوزه‌ی زمان بهتر است (Ali, 2015). از جدول ۴ روشن است که در مقایسه با کسانی که از BATPSS، GAPSS و CPSS (Ali, 2014) استفاده کرده‌اند، مقادیر اجرای این سیستم با CSPSS کوچک‌تر است. داده‌های جدول ۴ تأیید می‌کند که فراجاهش، زمان نشست و انحراف سرعت همه‌ی واحدها تا حد زیادی با استفاده از CS پیشنهادی براساس PSSهای تنظیم شده کاهش یافته‌اند.

جدول ۴. شاخص‌های عملکرد برای الگوریتم‌های مختلف

$IAE \times 10^{-4}$				$ITAE \times 10^{-4}$				انواع بار
CSPSS	BATPSS	GAPSS	CPSS	CSPSS	BATPSS	GAPSS	CPSS	
۰/۲۹۱۶	۰/۲۹۴۹	۱/۵۱۴۸	۴۲/۲	۰/۰۵۴۱	۰/۰۶۴۴	۰/۴۲۶۴	۷/۳۹	بار سبک
۰/۷۰۰۲	۰/۷۰۳۶	۱/۸۴۵	۳۵/۵۶	۰/۰۶۶۷	۰/۰۶۷۶	۰/۶۰۲۸	۱۶/۳	بار نرمال
۰/۹۴۴۷	۰/۹۴۹۸	۳/۵۰۶۷	۴۷/۹	۰/۱۰۰۹	۰/۱۰۰۹	۱/۱۷۳۶	۲۵/۷۶	بار سنگین

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، الگوریتم CS برای طراحی بهینه‌ی پارامترهای PSSها ارائه شد. مشکل تنظیم پارامترهای PSSها به‌عنوان مسئله‌ی بهینه‌سازی فرموله شده و الگوریتم CS برای دستیابی به پارامترهای مطلوب استفاده شده است. یک مقدار ویژه براساس تابع هدف، منعکس‌کننده‌ی ترکیبی از فاکتور میرایی و رتبه‌ی میرایی برای شرایط عملیاتی مختلف بهینه شده است. نتایج شبیه‌سازی، استحکام و برتری کنترل‌کننده پیشنهادی در ارائه‌ی ویژگی میرایی خوب در نوسانات سیستم در دامنه‌ی گسترده‌ای از حالت‌های بارگذاری را نشان می‌دهد. علاوه بر این، CSPSS پیشنهادی نشان می‌دهد که از دیگر کنترل‌کننده‌های دارای شاخص‌های عملکرد متفاوت، مؤثرتر است. استفاده از الگوریتم پیشنهادی در سیستمی با مقیاس بزرگ، محدوده‌ی کاری این موضوع در آینده است.

منابع

1. Abdel-Magid YL, Abido MA. (2003), "Optimal multi-objective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms," IEEE Trans Power Syst., 18 (3): 1125–32.
2. Abd-Elazim, S.M. & Ali, E.S. (2013), "A hybrid particle swarm optimization and bacterial foraging for optimal power system stabilizers design", Int J. electr. Power energy syst., 46(1):334–41.
3. Abd-Elaziz, A.Y. & Ali, E.S. (2015), "Cuckoo search algorithm based load frequency controller design for nonlinear interconnected power system", Int J. electric power energy syst., 73 C: 632–43.
4. Abido, M.A. (2000), "Simulated annealing based approach to PSS and FACTS based stabilizer tuning", Int J electric power energy syst., 22(4):247–58.
5. Abido, M.A. & Abdel-Magid, Y.L. (1999), "A tabu search based approach to power system stability enhancement via excitation and static phase shifter control", Int J electric power syst. Res., 52(2):133–43.
6. Ali, E.S. (2014), "Optimization of power system stabilizers using BAT search algorithm", Int J. electric power energy syst., 61(C): 683–90.
7. Ali, E.S. (2015), "Speed control of induction motor supplied by wind turbine via imperialist competitive algorithm", Energy, 89C:593–600.
8. Anderson, P.M. & Fouad, A.A. (1977), "Power system control and stability", Iowa: Iowa State University Press.
9. Bhargava, V.; Fateen, S.E.K. & Petriciolet, A.B. (2013), "Cuckoo search: A new nature inspired optimization method for phase equilibrium calculations", Fluid phase equilib, 337:191–200.
10. Dulau, M. & Bica, D. (2015), "Design of robust control for single machine infinite bus system", Procedia tech., 19: 657–64.
11. El-Razaz, Z.S. & El-Hameed, M.A. (2001), "An artificial neural network based power system stabilizer for multi-machine power system", Int. Arab J. Sci. Eng., 26 (1B):29–40.
12. El-Sherbiny, M.K.; Hasan, M.M.; El-Saady, G. & Yousef, A.M. (2003), "Optimal pole shifting for power system stabilization", Int. J. electric power syst. Res., 66(3): 253–8.
13. Eremia, M. & Shahidehpour, M. (2013), "Handbook of electrical power system dynamics: Modeling, stability, and control", 1st edition, Wiley-Blackwell.
14. Haupt, R.L. & Haupt, S.E. (2004), "Practical genetic algorithms", 2nd ed. John-Wiley & Sons Inc.
15. Jalilvand, A. & Khalkhali, R.A.E. (2011), "Optimal design of PID power system stabilizer in multimachine power system using PSO and genetic algorithm", Int rev. electric eng., 6(2):907–12.
16. Kumar, J.; Kumar, P.P.; Mahesh, A. & Shrivastava, A. (2001), "Power system stabilizer based on artificial neural network", in: international conference on power and energy systems, Chennai, p. 1–6.

17. Kundur, P.; Klein, M.; Rogers, G.J. & Zywno, M.S. (1989), "Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability", IEEE trans. power syst., 4(2):614–26.
18. Machowski, J.; Bialek, J. & Bumby, J. (2009), "Power system dynamics stability and control", 2nd edition, John –Wiley, New York.
19. Megala, M. & Rajan, C.C.A. (2014), "Design of fuzzy logic power system stabilizer in multimachine power system", Adv. Intell. Syst. Comput., 247:49–57.
20. Passino, K.M. (2002), "Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control," IEEE contr. Syst. Mag., 22(3):52–67.
21. Peng, Y.; Zhu, Q.M. & Nouri, H. (2011), "Robust H2 power system stabilizer design using LMI techniques", In: proceedings of international conference on modeling, identification and control (ICMIC), p. 405–10.
22. Rajabioun, R. (2011), "Cuckoo optimization algorithm", Appllied soft computing, 11:5508–18.
23. Rogers, G. (2000), "Power system oscillations", The Springer international series in engineering and computer science.
24. Rout, K.C. & Panda, P.C. (2010), "Power system dynamic stability enhancement of SMIB using fuzzy logic based power system stabilizer", In: power electronics and instrumentation engineering communications in computer and information science, Vol. 102; 2010. p. 10–4.
25. Segal, R.; Sharma, A. & Kothari, M.L. (2004), "A self-tuning power system stabilizer based on artificial neural network", Electric power energy syst., 26(6):423–30.
26. Yue, M. & Schlueter, R.A. (2003), "L-Synthesis power system stabilizer design using a bifurcation subsystem based methodology", IEEE trans. power syst., 18 (4):1497–506.
27. Yang, X.S. (2010), "Engineering optimization: An introduction with metaheuristic applications", John - Wiley & Sons.
28. Yang, X.S., Deb, S. (2010), "Engineering optimization by cuckoo search", Int J. math model numer optimization, 1(4):330–43.
29. Yang, X.S., Deb, S. (2009), "Cuckoo search via Lévy flights", In: proceedings of world congress on nature & biologically inspired computing", Springer, USA, p. 210–4.
30. Yang, X.S. & Deb, S. (2013), "Multiobjective cuckoo search for design optimization", comput. Oper. res., 40: 1616–24.

ضمیمه

- (الف) پارامترهای الگوریتم CS به شرح زیر است: حداکثر نسل = ۱۰۰؛ تعداد لانه = ۵۰؛ $PA = ۰/۲۵$.
- (ب) پارامترهای GA به شرح زیر است: حداکثر نسل = ۱۰۰؛ اندازه جمعیت = ۵۰؛ احتمال متقاطع = ۰/۷۵؛ احتمال جهش = ۰/۱.

کنترل مقاوم برای مدل نامعین سیستم تعلیق نیمه فعال خودرو

مجتبی معصوم نژاد*

استادیار، دانشکده فنی و حرفه‌ای شهید چمران رشت، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، گیلان، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۲۱ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۳۰

چکیده

امروزه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی معرفی روش‌های کنترل پیشرفته برای سیستم تعلیق نیمه‌فعال خودرو انجام می‌گیرد. هدف تلاش‌ها در این زمینه، دستیابی به ایمنی هر چه بیشتر سرنشینان و راحتی فرمان‌پذیری و سواری خودرو است. از طرفی اغتشاشات و عدم قطعیت در سیستم‌های دینامیکی کاربردی اجتناب‌ناپذیر است که سیستم تعلیق نامعین خودرو نیز از این امر مستثنا نخواهد بود. به همین سبب در این مقاله ساختار کنترلی متشکل از نیروی کنترلی مود لغزشی، استراتژی منطق فازی و فیلتر تخمین‌زننده پیشنهاد شده است که دارای مقاومت زیادی در مواجهه‌ی همزمان با اغتشاشات جاده و نامعینی‌های سخت‌افزاری سیستم است. بهبود کیفیت عملکرد کنترل‌کننده‌ی مود لغزشی با هوشمندسازی انتخاب پارامترهای آن به کمک منطق فازی و استفاده از تخمین‌زننده‌ی نیرومند در پالایش داده‌های مخدوش سیستم نامعین از نوآوری‌های ساختار پیشنهادی است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده‌ی عملکرد مطلوب سیستم تعلیق نیمه‌فعال خودرو در مواجهه با اغتشاشات جاده‌ای و نامعینی‌هاست.

واژه‌های کلیدی

سیستم تعلیق نیمه‌فعال، فیلتر تخمین‌زننده، کنترل مود لغزشی، منطق فازی، نامعینی.

۱. مقدمه

سیستم تعلیق، خودرو را به چرخ‌ها متصل کرده و نیروهای وارد شده از زمین به خودرو را مستهلک می‌کند و به این ترتیب به خودرو قابلیت می‌دهد که با امنیت و راحتی مقبولى رانده، هدایت یا متوقف شود. سیستم تعلیق که به شاسی متصل است، شامل چرخ‌ها و لاستیک‌ها، فنرها، کمک‌فنرها و تعدادی میله و اتصالات از جمله سیستم فرمان می‌شود. راحتی در سواری به‌طور مستقیم به شتاب عمودی بدنه‌ی خودرو وابسته است. امنیت سواری نیز به حد تماس لاستیک‌ها با سطح زمین بستگی دارد، به‌گونه‌ای که هر چه لاستیک‌ها بیشتر با سطح جاده در تماس باشند، امنیت سفر بیشتر خواهد بود. طراحان توجه ویژه‌ای به سیستم تعلیق دارند تا به‌وسیله‌ی آن راحتی و امنیت سواری را بهبود ببخشند (Lajqi & Pehan, 2012).

مهندسان و محققان همواره در تلاش بوده‌اند تا به درک کاملی از رفتار دینامیکی وسایل نقلیه دست یابند تا راحتی سرنشینان را با کاهش ارتعاشات درون خودرو بهبود ببخشند و از سوی دیگر امنیت سرنشینان را با بهبود فرمان‌پذیری و خوش‌سواری افزایش دهند. سه نوع سیستم تعلیق وجود دارد: غیرفعال، فعال و نیمه‌فعال. سیستم تعلیق غیرفعال طراحی ساده‌ای دارد و از نظر قیمت بسیار مناسب است. در سیستم تعلیق غیرفعال، پارامترهای سفتی فنر و ضریب کمک‌فنر ثابت‌اند و به همین دلیل برای محدوده‌ی خاصی از فرکانس‌های ورودی از سمت جاده مؤثر واقع می‌شوند. برای غلبه بر این مشکل، سیستم‌های تعلیق فعال و نیمه‌فعال ابداع شدند. سیستم تعلیق فعال با وارد کردن نیروی کنترلی خارجی توسط عملگر هیدرولیکی، توانایی وفق دادن شرایط سیستم با ورودی‌های متفاوت جاده را ایجاد کرده است (Chen et al., 2017; Gao et al., 2010). سان و همکارانش جنبه‌های تئوری و عملی طراحی سیستم تعلیق فعال را بررسی کرده‌اند (Sun et al., 2013; Sun et al., 2016). شیوه‌های مختلف کنترلی از قبیل کنترل بهینه‌ی درجه‌ی دوم خطی (Raju & Narayanan, 1991)، منطق فازی (Yoshimura et al., 1999)، روش‌های شبکه‌ی عصبی (Eski & Yildirim, 2009)، کنترل مود لغزشی (Yoshimura et al., 2001) و کنترل تطبیقی (Pan et al., 2016) تاکنون برای هدایت سیستم تعلیق فعال به‌کار رفته است. با این حال هزینه‌ی زیاد، پیچیدگی، نیاز به منبع انرژی اضافه و دشواری در پیاده‌سازی سخت‌افزار کنترلی در سیستم‌های تعلیق فعال از جنبه‌های منفی این نوع سیستم به‌شمار می‌آیند که سبب شده محققان در مواردی به استفاده از سیستم‌های تعلیق نیمه‌فعال علاقه‌مند شوند. این سیستم تعلیق، ترکیبی از فواید سیستم‌های تعلیق غیرفعال و فعال را داراست. ایده‌ی این روش به‌سبب به‌کارگیری دمپرهای حاوی سیالاتی با خواص الکترونیکی و مغناطیسی قابل اجراست. در این سیالات با تغییر میدان مغناطیسی، مقدار

گرانروی سیال تغییر خواهد کرد و در نتیجه ضریب دمپر را می توان تنظیم کرد. تاکنون پژوهش های فراوانی در زمینه ی سیستم های تعلیق نیمه فعال صورت گرفته است (Horton & Crolla, 1986; Karnopp et al., 1974; Margolis, 1982; Verros et al., 2000). همچنین به تازگی تحقیقات بسیاری در زمینه ی طراحی کنترل کننده ی مناسب برای این نوع سیستم تعلیق صورت گرفته است. برخی از روش های کنترلی نظیر اسکای هوک (Sammier et al., 2003) و مدلی که از تأخیر زمانی استفاده کرده است (Hac & Youn, 1993)، به منظور کنترل ارتعاشات سیستم تعلیق به کار گرفته شده اند و نتایج قابل قبولی را ارائه کرده اند؛ اما استفاده از دمپرهایی با قابلیت تغییر گرانروی سیال، پیچیدگی هایی را در مدل دینامیکی سیستم ایجاد می کند که سبب تمایل به استفاده از روش های کنترل پیشرفته ی بالا شده است. از جمله می توان به کنترل خطی مرتبه ی دوم بهینه (Brezas et al., 2015)، استراتژی کنترل فازی (Shojaei et al., 2013) و استفاده از شبکه ی عصبی (Guo et al., 2004) اشاره کرد. همچنین ترکیبی از روش کنترلی اچ – بی نهایت و الگوریتم بهینه سازی توسط لی و همکاران استفاده شده است (Li et al., 2017). همچنین برخی محققان از روش کنترلی مود لغزشی به منظور غلبه بر اغتشاشات وارد بر سیستم بهره گرفته اند (Fei & Xin, 2012; Yao et al., 2013). تنگ و همکارانش روشی مرکب از مشاهده گر حالت و منطق فازی را معرفی کرده اند (Tang et al., 2017).

اغلب مدل سازی ها از سیستم های دینامیکی صنعتی، دارای پارامترهای مخدوش اند و مدل سیستم تعلیق نیمه فعال خودرو نیز از این امر مستثنا نیست. نامعینی در سیستم ممکن است ناشی از مدل آن یا وسایل اندازه گیری باشد؛ بنابراین در سیستم تعلیق خودرو، عوامل ایجاد نامعینی های موجود را می توان خطا در محاسبه ی مقدار دقیق سفتی فنر و ضریب دمپر و نیز دقیق نبودن حسگرهای اندازه گیری عنوان کرد که به ترتیب زمینه ساز ایجاد نویز سیستم و نویز اندازه گیری هستند. در چند دهه ی گذشته، شناسایی متغیرهای حالت و پارامترهای یک مدل دینامیکی از روی داده های اندازه گیری شده ی ناقص و مخدوش با نویز، کانون توجه محققان قرار گرفته است. فیلترهای کالمن و اچ – بی نهایت از معروف ترین روش های شناسایی مدل و پالایش داده های مخدوش هستند (Simon, 2006). فیلتر کالمن در صورت وجود اطلاعات کافی در مورد نویزهای فرایند، دارای عملکرد مناسبی است، به گونه ای که میانگین مجذور خطای تخمین را حداقل می کند. همچنین فیلتر اچ – بی نهایت مستقل از اطلاعات نویزهای فرایند، به وسیله ی یک حد بالای محدودکننده تخمینی ارائه می دهد که در مقابل نامعینی های مدل مقاوم است (معصوم نژاد و همکاران، ۲۰۱۴). استفاده از تکنیک نقاط سیگما و پیاده سازی تبدیل آنسنتد بر روی هر یک از فیلترها، به شکل گیری مدل توسعه یافته ی

فیلترهای تخمین‌زننده منجر می‌شود (Li & Jia, 2010; Van Der Merwe, 2004). در این مقاله ساختار کنترلی مقاومی به‌منظور کنترل ارتعاشات سیستم تعلیق نیمه‌فعال معرفی شده است. این ساختار شامل کنترل‌کننده‌ی مود لغزشی برای محاسبه‌ی مقدار نیروی وارد شده از دمپر مغناطیسی و استراتژی منطق فازی برای تنظیم ضرایب کنترل‌کننده است. همچنین با افزودن نویزهای سیستم و اندازه‌گیری، مدل دینامیکی سیستم تعلیق نیمه‌فعال به‌صورت نامعین در نظر گرفته شده است. بنابراین به‌منظور پالایش داده‌های مخدوش سیستم الگوریتم تخمین‌زننده نیز وارد ساختار کنترلی می‌شود. از الگوریتم‌های بهبودیافته‌ی فیلتر کالمن و فیلتر چ — بی‌نهایت به‌عنوان تخمین‌زننده در این ساختار استفاده شده و نتایج آن با یکدیگر مقایسه شده است. در بخش دوم مقاله، مدل دینامیکی سیستم تعلیق نیمه‌فعال ارائه و در بخش سوم، ساختار کنترلی پیشنهادی تشریح شده است. شبیه‌سازی رفتار سیستم و نتایج آن در بخش چهارم آورده شده و در پایان در بخش پنجم، نتیجه‌گیری ارائه شده است.

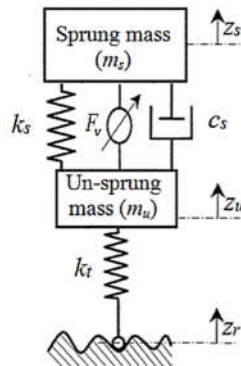
۲. مدل دینامیکی سیستم تعلیق نیمه‌فعال خودرو

مدل‌های مختلفی به‌منظور مطالعه‌ی رفتار ارتعاشی خودرو، وجود دارند. خودرو، نوعی سیستم ارتعاشی پیچیده است که دارای درجه‌ی آزادی زیادی است، ولی با در نظر گرفتن درجات آزادی مهم آن که در تحلیل اهمیت زیادی دارند، می‌توان این سیستم پیچیده را ساده کرد. سیستم تعلیق خودرو به‌طور معمول به‌صورت یک‌چهارم ساده می‌شود که همین سیستم ساده‌شده‌ی دو درجه‌ی آزادی، بیانگر بخش زیادی از خصوصیات رفتاری سیستم کامل است. مدل یک‌چهارم زمان پیوسته‌ی سیستم تعلیق نیمه‌فعال خودرو نشان داده شده در شکل ۱ بدین صورت است (Guo et al., 2004).

$$m_s \ddot{z}_s + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_u) + k_s (z_s - z_u) \quad (1)$$

$$m_u \ddot{z}_u + c_s (\dot{z}_u - \dot{z}_s) + k_s (z_u - z_s) + k_t (z_u - z_r) = -F_v \quad (2)$$

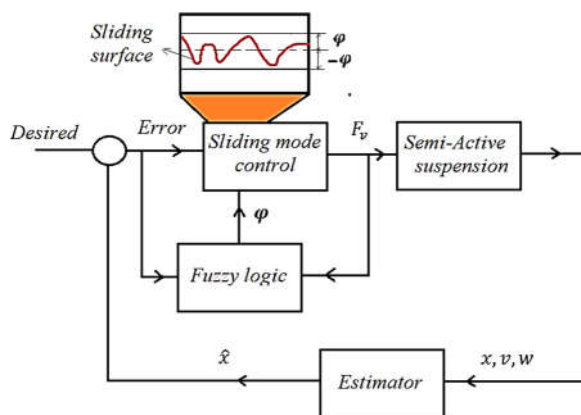
در معادلات بالا، m_s جرم بدنه‌ی خودرو و m_u جرم چرخ‌ها و اجزای متصل است که در اصطلاح به‌ترتیب جرم معلق و جرم نامعلق خوانده می‌شوند. z_u و z_s به ترتیب جابه‌جایی عمودی جرم معلق و جرم نامعلق هستند. همچنین در این مدل، جرم غیرمعلق (لاستیک) توسط ورودی سطح جاده z_r تحریک می‌شود. ضریب سختی فنر با k_s و ضریب میرایی کمک فنر با c_s تعریف شده‌اند و قابلیت ارتجاعی لاستیک خودرو نیز با پارامتر k_t نشان داده شده است. علاوه بر این، F_v نیروی وارد شده به سیستم از طریق دمپر مغناطیسی است.



شکل ۱. مدل شماتیک دو درجه‌ای آزادی یک چهارم خودرو (Guo et al., 2004)

۳. طراحی ساختار کنترلی پیشنهادی

کنترل سیستم تعلیق خودرو براساس پاسخ سیستم به ورودی‌های متفاوت جاده در نظر گرفته می‌شود که در آن برآورده کردن اهدافی چون راحتی سرنشینان و امنیت آنها مدنظر قرار می‌گیرد. در این بخش، ساختار کنترل مقاوم پیشنهادی بررسی می‌شود. این ساختار شامل کنترل کننده‌ی مود لغزشی برای تعیین مقدار نیروی وارد شده به سیستم از طریق کمک فنر مغناطیسی، استراتژی منطق فازی به منظور تنظیم پارامتر تعیین کننده‌ی کنترلر مود لغزشی و الگوریتم تخمین زنده برای فیلتر کردن داده‌های مخدوش با نویز است. بلوک نمودار کنترلی پیشنهادی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. شماتیک بلوکی ساختار کنترلی پیشنهادی

۳-۱. الگوریتم تخمین زنده

در این مقاله به منظور پالایش داده‌های مخدوش در سیستم تعلیق نیمه‌فعال، دو ابزار نیرومند فیلتر کالمن و فیلتر اچ - بی نهایت پیش‌بینی شده است. استفاده از تکنیک نقاط سیگما و پیاده‌سازی تبدیل آنسند بر روی هر یک از فیلترها به شکل‌گیری مدل توسعه‌یافته‌ی فیلترهای تخمین‌زنده منجر می‌شود که در زیر الگوریتم هر یک از این دو تشریح شده است.

۳-۱-۱. فیلتر کالمن آنسند

مدل دینامیکی زمان گسسته برای یک مسئله‌ی فیلترینگ غیرخطی به‌صورت زیر تعریف شده است (Van Der Merwe & Wan, 2001).

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (3)$$

$$y_k = h(x_k) + v_k \quad (4)$$

که در آن بردار متغیرهای حالت سیستم، y_k بردار مشاهده‌گر و w_k و v_k مقادیر نویزهای گوسی سفید هستند و داریم:

$$w_k = N(0, Q), \quad v_k = N(0, R) \quad (5)$$

کالمن فیلتر آنسند کلاسیک شامل چهار مرحله است که عبارت‌اند از:

مرحله ۱. شرایط اولیه

$$\hat{x}_0 = E(x_0) \quad (6)$$

$$P_0 = E(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T \quad (7)$$

که در آن \hat{x}_0 و P_0 به‌ترتیب مقادیر بردار حالت اولیه و کوواریانس خطای اولیه هستند.

مرحله ۲. محاسبه‌ی مقادیر نقاط سیگما

$$\chi_{0,k-1} = \hat{x}_{k-1} \quad (8)$$

$$\chi_{i,k-1} = \hat{x}_{k-1} + \left(\sqrt{(L + \lambda) P_{k-1}} \right)_i \quad (9)$$

$$\chi_{i+L,k-1} = \hat{x}_{k-1} - \left(\sqrt{(L + \lambda) P_{k-1}} \right)_i \quad (10)$$

$$w_0 = \frac{\lambda}{(L + \lambda)} \quad (11)$$

$$\omega_0^{(m)} = \frac{\lambda}{(L + \lambda)} \quad (12)$$

$$\omega_0^{(c)} = \frac{\lambda}{(L + \lambda)} + (1 - \alpha^2 + \beta) \quad (13)$$

$$\omega_i^{(m)} = \omega_i^{(c)} = \frac{1}{2(L + \lambda)} \quad (14)$$

$$\lambda = \alpha^2 (L + \kappa) - L \quad (15)$$

که در آن $i=1,2,\dots,L$ ، بعد بردار متغیر حالت است. χ_i مقادیر نقاط سیگما است که براساس مقادیر میانگین (\hat{x}) و کوواریانس (P) بردار حالت در لحظه ی قبل (χ_{k-1}) محاسبه می شوند. $\omega_i^{(m)}$ و $\omega_i^{(c)}$ ، وزن های تبدیل آنستند مرتبط با i امین نقطه ی سیگما هستند. α و β و κ ضرایب طراحی هستند که توسط طراح انتخاب می شوند. همچنین κ ، مثبت نیمه معین بودن ماتریس کوواریانس را تضمین می کند.

مرحله ی ۳. به روز رسانی در زمان

$$\chi_{i,k|k-1} = f(\chi_{i,k-1}, u_k) \quad (16)$$

$$\hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(m)} \chi_{i,k-1} \quad (17)$$

$$P_k^- = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} [\chi_{i,k-1} - \hat{x}_k^-] [\chi_{i,k-1} - \hat{x}_k^-]^T \quad (18)$$

$$\hat{y}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(m)} h(\chi_{i,k-1}) \quad (19)$$

که در آن \hat{x}_k^- و \hat{y}_k^- مقادیر میانگین تخمین زده شده از قبل x و y در لحظه ی k هستند.

مرحله ی ۴. به روز رسانی مقادیر اندازه گیری شده

$$P_{k|k-1}^{yy} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} [h(\chi_{i,k-1}) - \hat{y}_k^-] [h(\chi_{i,k-1}) - \hat{y}_k^-]^T \quad (20)$$

$$P_{k|k-1}^{xy} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(C)} [\chi_{i,k-1} - \hat{x}_k^-] [h(\chi_{i,k-1}) - \hat{y}_k^-]^T \quad (21)$$

$$K_k = (P_{k|k-1}^{xy}) (P_{k|k-1}^{yy})^{-1} \quad (22)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - \hat{y}_k^-) \quad (23)$$

$$P_k = P_k^- - K_k P_{k|k-1}^{yy} K_k^T \quad (24)$$

که در آن مقادیر P^{xy} ، P^{yy} و K_k به ترتیب نشان‌دهنده‌ی کوواریانس خطای y ، کراس — کوواریانس خطای بین بردارهای حالت و مشاهده‌گر و ضریب کالمن هستند.

۳-۱-۲. فیلتر اچ — بی‌نهایت آنستند

در مقالات متعددی (Li & Jia, 2010; Simon, 2013) به بیان نحوه‌ی عملکرد فیلتر آنستند اچ — بی‌نهایت پرداخته شده که در آنها به‌منظور بهبود عملکرد فیلتر اچ — بی‌نهایت برای مسائل فیلترینگ غیرخطی از نقاط سیگما استفاده شده است. در این مبحث، ابتدا به معرفی فیلتر اچ — بی‌نهایت پرداخته و سپس بحث، بر فیلتر پیشنهادی متمرکز شده است. چنانچه معادلات مدل دینامیکی فرایند و مشاهده‌گر مطابق معادلات ۱ و ۲ باشند و w_k و v_k به ترتیب مقادیر نویزهای فرایند و اندازه‌گیری فرض شوند که دارای انرژی محدود بوده $I_2 = [0, +\infty]$ و مشخصات آماری نامعلوم دارند، به‌طوری که:

$$\sum_{k=0}^{\infty} w_k^T w_k < \infty, \quad \sum_{k=0}^{\infty} v_k^T v_k < \infty \quad (25)$$

فیلتر اچ — بی‌نهایت نیاز دارد به‌ازای هر $x_0 \in R^n$ و w_k و $v_k \in I_2$ یک خطای برآورد کوچک یکنواخت e_k را فراهم آورد.

$$e_k = y_k - \hat{y}_k \quad (26)$$

هدف نهایی در استفاده از فیلتر اچ — بی‌نهایت، مشخص کردن یک تخمین \hat{y}_k است که تابع ارزش ل نشان داده شده در معادله‌ی ۲۷ را حداقل کند.

$$J = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \|e_k\|_2^2}{\|x_0 - \hat{x}_0\|_{P_0^{-1}}^2 + \sum_{k=0}^{N-1} (\|w_k\|_{Q_k^{-1}}^2 + \|v_k\|_{R_k^{-1}}^2)} \quad (27)$$

که در آن ماتریس $P_0 > 0$ بیانگر دانش قبلی است که طراح درباره‌ی تخمین x_0 دارد. $Q > 0$ و $R > 0$ ماتریس‌های مثبت معین متقارن هستند که طراح براساس مشخصات مسئله انتخاب می‌کند (Li & Jia, 2010).

باید توجه کرد که ماتریس‌های Q و R ماتریس‌های وزنی فیلتر بوده و از مقادیر ماتریس‌های کوواریانس خطای فیلتر UKF متمایزند (Ni & Li, 2011). در ضمن عبارت $\|x\|_S^2$ بدین وسیله تعریف می‌شود.

$$\|x\|_S^2 = x^T S x \quad (28)$$

تعیین مقدار کمینه‌ی تابع J نشان داده شده در معادله‌ی ۲۷ به‌آسانی امکان‌پذیر نیست؛ از این رو به‌جای آن، یک حد انرژی انتخاب می‌شود و در پی یک استراتژی تخمین است که این حد آستانه را برآورد کند (Simon, 2013). بنابراین در فیلتر اچ - بی نهایت سعی می‌شود بهترین تخمین y_k از میان همه‌ی \hat{x}_k ‌های ممکن حاصل آید، به‌طوری که:

$$\supremum J < 1/\theta \quad (29)$$

که در آن $\theta > 0$ ، یک حد انرژی است که توسط طراح انتخاب می‌شود. الگوریتم UHF که اولین بار توسط لی و همکارش ارائه شد (Li & Jia, 2010)، با توجه به خواص فیلترهای اچ - بی نهایت و UKF شامل چهار مرحله است:

مرحله‌ی ۱) شرایط اولیه مقادیر \hat{x}_0 و P_0 در نظر گرفته می‌شود:

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \quad (30)$$

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] \quad (31)$$

مرحله‌ی ۲) یک مجموعه‌ی نقاط سیگما براساس متغیرهای حالت تخمین زده شده در لحظه‌ی $k-1$ تولید می‌شود:

$$\chi_{0,k-1} = \hat{x}_{k-1} \quad (32)$$

$$\chi_{i,k-1} = \hat{x}_{k-1} + \left(\sqrt{(L + \lambda) P_{k-1}} \right)_i \quad (33)$$

$$\chi_{i+L,k-1} = \hat{x}_{k-1} - \left(\sqrt{(L + \lambda) P_{k-1}} \right)_i \quad (34)$$

$$\omega_0^{(m)} = \frac{\lambda}{(L + \lambda)} \quad (35)$$

$$\omega_0^{(c)} = \frac{\lambda}{(L + \lambda)} + (1 - \alpha^2 + \beta^2) \quad (36)$$

$$\omega_i^{(m)} = \omega_i^{(c)} = \frac{1}{2(L + \lambda)} \quad (37)$$

$$\lambda = \alpha^2 (L + k) - L \quad (38)$$

مرحله ی ۳) مقادیر میانگین و کوواریانس متغیرهای تخمین زده شده را می توان از طریق انتشار نقاط سیگمای تعیین شده در معادلات ۳۹ تا ۴۱، توسط مدل دینامیکی غیرخطی به دست آورد:

$$\chi_{i,k|k-1} = f(\chi_{i,k-1}, u_{k-1}) \quad (39)$$

$$\hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(m)} \chi_{i,k|k-1} \quad (40)$$

$$P_k^- = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} (\chi_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-) (\chi_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-)^T \quad (41)$$

مرحله ی ۴) مقادیر مشاهده گر تخمین زده می شود و به روزرسانی ماتریس های کوواریانس با استفاده از روابط ۴۲ تا ۴۷ به دست می آید.

$$\hat{y}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(m)} h(\chi_{i,k|k-1}) \quad (42)$$

$$P_{k|k-1}^{yy} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} \left(h(\chi_{i,k|k-1}) - \hat{y}_k^- \right) \left(h(\chi_{i,k|k-1}) - \hat{y}_k^- \right)^T \quad (43)$$

$$P_{k|k-1}^{xy} = \sum_{i=0}^{2L} \omega_i^{(c)} (\chi_{i,k|k-1}^x - \hat{x}_k^-) \left(h(\chi_{i,k|k-1}) - \hat{y}_k^- \right)^T \quad (44)$$

$$K_k = P_{k|k-1}^{xy} (R + P_{k|k-1}^{yy})^{-1} \quad (45)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - \hat{y}_k^-) \quad (46)$$

$$P_k = P_k^- - \begin{bmatrix} P_{k|k-1}^{xy} & P_k^- \end{bmatrix} R_{e,k}^{-1} \begin{bmatrix} P_{k|k-1}^{xy} \\ P_k^- \end{bmatrix}^T \quad (47)$$

که در آن ماتریس $R_{e,k}$ به وسیله معادله ۴۸ تعریف می شود.

$$R_{e,k} = \begin{bmatrix} R + P_{k|k-1}^{yy} & P_{k|k-1}^{xy} \\ P_{k|k-1}^{xy} & -\theta^2 I + P_k^- \end{bmatrix} \quad (48)$$

پارامتر θ باید به گونه ای انتخاب شود که مثبت معین بودن ماتریس کوواریانس P_k را تضمین کند و داریم:

$$\theta^2 = \gamma \max\{eig(P_k^- + P_k^- P_{k|k-1}^{xy} R_{e,k}^{-1} P_k^- P_{k|k-1}^{xy T})^{-1}\} \quad (49)$$

که در آن $\max\{eig(A)\}$ بیانگر بیشترین مقدار ویژه ی ماتریس A و γ پارامتر طراحی بزرگتر از یک است که توسط طراح انتخاب می شود. الگوریتم UHF دارای مراحل همانند الگوریتم UKF است، به گونه ای که می توان نتیجه گرفت اگر $\theta \rightarrow \infty$ میل کند، UHF و UKF دارای نتایج مشابهی خواهند بود.

۲-۳. کنترل مود لغزشی

کنترل کننده ی مود لغزشی از یک قانون کنترلی غیرپیوسته برای هدایت متغیرهای حالت سیستم به یک سطح لغزش در فضای حالت در زمان مشخص و محدود (فاز رسیدن) و نگه داشتن آنها در این محدوده برای تمام دنباله ی زمانی (فاز لغزش) استفاده می کند. فایده ی این روش این است که دینامیک سیستم در شرایط حضور در فاز لغزش از مرتبه ی کوچکتر (کاهش یافته) خواهد بود و حساسیت سیستم به نامعینی های مدل و اغتشاشات وارد بر آن کاهش خواهد یافت.

معادله ی زمان پیوسته ی دینامیک سیستم به فرمی که در زیر آمده است، بازنویسی می شود. مقدار نیروی کنترلی مود لغزشی از روشی که در ادامه توضیح داده می شود قابل دستیابی است.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (50)$$

گام اول در طراحی کنترل کننده ی مود لغزشی، محاسبه ی سطح لغزش است. سطح لغزش به گونه ای انتخاب می شود که در صورتی که حالت های سیستم روی آن قرار گیرند، در یک زمان محدود به صورت نمایی به نقطه ی تعادل همگرا شوند. در صورتی که هدف از کنترل سیستم دینامیکی پایدار باشد، سطح لغزش براساس حالت سیستم و مشتقات آن، و اگر هدف کنترلی، ردیابی باشد، سطح لغزش براساس

خطای ردیابی سیستم و مشتقات آن بیان می‌شود. هدف کنترلی در این پژوهش، پایداری متغیرهای حالت سیستم تحت ورودی خارجی (ورودی جاده) است که در این صورت خطای سیستم برابر با مقدار خروجی الگوریتم تخمین‌زننده به‌دست می‌آید؛ بنابراین داریم:

$$e(t) = \hat{x}(t) \quad (51)$$

در این شرایط، سطح لغزش به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که خطای سیستم (e) با سرعت و مشخصات عملکردی مناسب به سمت صفر میل کند. به‌طور معمول از معادله‌ی زیر برای این منظور استفاده می‌شود:

$$s = \left(\frac{d}{dt} + \mu \right)^{n-1} \quad (52)$$

که در آن μ یک عدد حقیقی مثبت است و n مرتبه‌ی سیستم را نشان می‌دهد. براساس مدل‌سازی که در بخش قبل صورت گرفته، مرتبه‌ی سیستم برابر ۲ است؛ بنابراین معادله‌ی سطح لغزش به‌صورت زیر خواهد بود:

$$s = \dot{e} + \mu e \quad (53)$$

گام دوم انتخاب نیروی کنترلی مناسب است، به‌گونه‌ای که سطح لغزش جذب‌کننده باشد. به‌عبارت دیگر u باید به‌گونه‌ای انتخاب شود تا سیستم به‌سمت سطح لغزش میل کند. حال تابع لیپانوف را برای سیستم بالا در نظر می‌گیریم:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (54)$$

که تابعی مثبت معین است. بنابراین شرط پایداری سیستم با کوچک‌تر از صفر قرار دادن مشتق تابع لیپانوف حاصل می‌شود:

$$\dot{V} = \dot{s}s < 0 \quad (55)$$

حال مقدار \dot{s} را محاسبه می‌کنیم و در معادله‌ی بالا قرار می‌دهیم:

$$\dot{s} = \frac{d}{dt} s = \ddot{e} + \mu \dot{e} \quad (56)$$

با محاسبه و جایگذاری \ddot{e} در معادله‌ی بالا خواهیم داشت:

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} = \ddot{\hat{x}} + \mu \dot{e} = f(x) + g(x)u + \mu \dot{e} \quad (57)$$

با مساوی صفر قرار دادن رابطه‌ی بالا مقدار نیروی کنترلی به دست آمده را با \tilde{u} نام گذاری می کنیم:

$$\tilde{u} = \frac{f(x) + \mu \dot{e}}{g(x)} \quad (58)$$

برای اینکه نیروی کنترلی شرط پایداری را برآورده کند و سیستم را به سمت سطح لغزش میل دهد، رابطه‌ی به دست آمده در بالا را در تابع sign ضرب می کنیم؛ بنابراین داریم:

$$u = \tilde{u} \text{sign}(s) \quad (59)$$

اما یکی از ایرادهای اساسی روش کنترلی مود لغزشی که در کاربردهای عملی ظاهر می شود، پدیده‌ی چترینگ است. این پدیده شامل ارتعاشات فرکانس بالای باقی مانده است که به واسطه‌ی طبیعت گسسته‌ی قانون کنترلی اتفاق می افتد و در عین حال با فرکانس سوئیچ زنی محدود ابزار آلات دنیای واقعی ترکیب می شود. ساده ترین روش برای کاهش تأثیرات پدیده‌ی چترینگ استفاده از روشی براساس یک تقریب پیوسته است. این روش یک تقریب پیوسته را در معادله‌ی نیروی کنترلی قرار می دهد:

$$h(s) = \begin{cases} \text{sign}(s) & |s| > \varphi \\ \frac{s}{\varphi} & |s| \leq \varphi \end{cases} \quad (60)$$

بنابراین در معادله‌ی نیروی کنترلی به جای تابع $\text{sign}(s)$ از تقریب آن $h(s)$ استفاده می شود. با استفاده از تابع $h(s)$ متغیرهای حالت سیستم در زمان محدود به لایه‌ی مرزی $|s| \leq \varphi$ می رسند و متعاقباً در آن باقی می مانند؛ بنابراین می توان ادعا کرد که به شرایط پایداری می رسند. اما انتخاب پارامتر φ ضخامت لایه‌ی مرزی را معین می کند. برای $\varphi \rightarrow 0$ این لایه به همان سطح لغزش محدود می شود که در این وضعیت کنترل کننده‌ی مود لغزشی با پایداری و چترینگ زیاد خواهد بود که یکی مطلوب سیستم و دیگری نامطلوب است. از طرف دیگر، با افزایش پارامتر φ ، پاسخ سیستم ملایم می شود و در عوض نسبت به اغتشاشات حساس تر عمل می کند. درواقع در درون لایه‌ی مرزی مسیرهای سیستم پیش بینی ناپذیر است. در مورد تابع $h(s)$ و به ویژه پارامتر φ که تعیین کننده‌ی ضخامت لایه‌ی مرزی است، نوع انتخاب تعیین کننده خواهد بود. به همین دلیل به منظور هوشمندسازی انتخاب این پارامتر از استراتژی منطقی فازی استفاده شده است.

۴. شبیه‌سازی و نتایج

در این مرحله، برای بررسی مقاوم بودن الگوریتم کنترلی پیشنهادی و قرار دادن آن در شرایط عملی، ابتدا به مدل دینامیکی سیستم تعلیق نیمه‌فعال خودرو، نویزهای w_k و v_k افزوده می‌شود و سپس با استفاده از فیلترهای تخمین‌زننده، نویز سیستم فیلتر شده و مشخصه‌های پالایش شده بررسی می‌شود. مدل دینامیکی زمان گسسته سیستم تعلیق نیمه‌فعال خودرو بدین صورت است:

$$\begin{bmatrix} x_{1,k+1} \\ x_{2,k+1} \\ x_{3,k+1} \\ x_{4,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{3,k} * dt + x_{1,k} \\ x_{4,k} * dt + x_{2,k} \\ \vdots \\ z_s * dt + x_{3,k} \\ \vdots \\ z_u * dt + x_{4,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{bmatrix} \quad (61)$$

که در آن مقادیر موقعیت و سرعت جرم معلق و همچنین موقعیت و سرعت جرم نامعلق، متغیرهای بردار طراحی هستند. همچنین مقادیر \ddot{z}_s و \ddot{z}_u از معادله‌های ۱ و ۲ به‌دست می‌آیند. بردار حالت $x_k = [z_s, z_u, \dot{z}_s, \dot{z}_u]^T$ و بردار مشاهده‌گر عبارت است از $y_k = [z_s, z_u]^T$. نویز فرایند w_k و نویز مشاهده‌گر v_k ، نویزهای گوسی سفیدند که دارای ماتریس کوواریانس به‌ترتیب $Q = 0.004 \times \text{diag}\{1,1,1,1\}$ و $R = 0.01 \times \text{diag}\{1,1,1,1\}$ هستند. مدل دینامیکی زمان پیوسته با دوره‌ی زمانی ۰/۰۱ ثانیه گسسته شده است و سیستم با اعمال نیروی کنترلی مود لغزشی اجرا می‌شود.

مقادیر عددی مربوط به پارامترهای سیستم دینامیکی مدل‌شده در معادله‌های ۱ و ۲ در جدول ۱ آورده شده است.

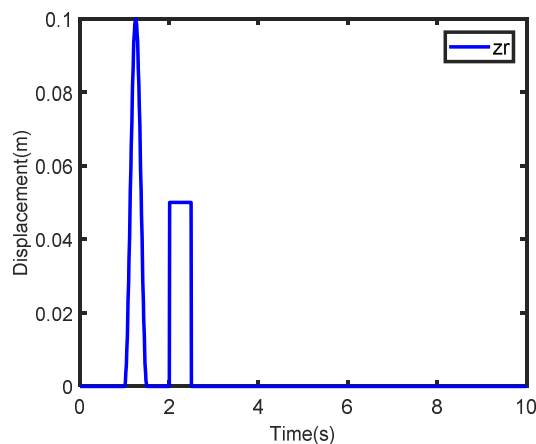
جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

m_s	m_u	k_s	c_s	k_t
۲۹۰ kg	۶۰ kg	۱۶۸۰۰ N/m	۲۰۰ N.s/m	۱۹۰۰۰ N/m

در این بخش با وارد کردن ورودی دلخواه به سیستم به‌عنوان ورودی جاده‌ی شبیه‌سازی رفتار سیستم انجام می‌گیرد و تأثیر ساختار کنترلی پیشنهادی در نحوه‌ی عملکرد سیستم بررسی می‌شود. ورودی جاده در این مسئله به‌صورت زیر تعریف شده است:

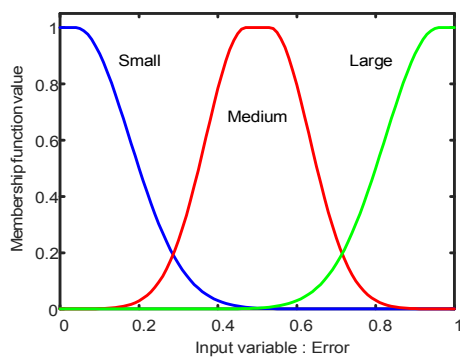
$$z_r(t) = \begin{cases} a(1 - \cos(8\pi t)) & 1 < t < 1.5 \\ b & 2 < t < 2.5 \\ 0 & \text{باقی مانده} \end{cases} \quad (۶۲)$$

که در آن a و b دامنه‌ی نوسانات جاده هستند و مقادیر آنها به ترتیب $۰/۵$ و $۰/۱$ است. شکل ۳ نمودار ورودی جاده را نشان می‌دهد که به لاستیک خودرو وارد می‌شود.

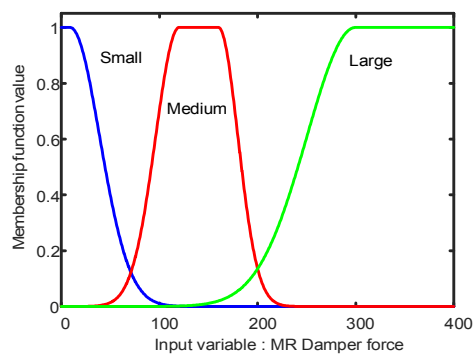


شکل ۳. ورودی جاده‌ی وارد شده به لاستیک

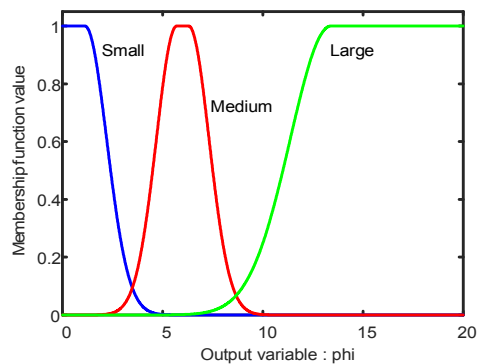
همان‌طور که توضیح داده شد، نحوه‌ی انتخاب پارامتر تنظیم لایه‌ی مرزی سطح لغزش در کنترل‌کننده‌ی مود لغزشی حائز اهمیت است که در این پژوهش از استراتژی منطق فازی برای تنظیم این پارامتر استفاده شده است. ورودی‌های در نظر گرفته شده برای منطق فازی دو پارامتر خطای سیستم در لحظه‌ی کنونی و مقدار نیروی محاسبه شده برای دمپر با میرایی متغیر توسط کنترل‌کننده در لحظه‌ی قبل هستند و در نهایت خروجی فازی پارامتر φ به عنوان تعیین‌کننده‌ی میزان لایه‌ی مرزی برای سطح لغزش است. نحوه‌ی تعریف توابع عضویت برای ورودی‌های اول و دوم و همچنین خروجی فازی به ترتیب در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده است. برای هر کدام از ورودی‌ها و خروجی سیستم فازی سه تابع عضویت کوچک، متوسط و بزرگ در نظر گرفته شده است که نمودار رفتار آنها در بازه‌ی تغییراتشان در شکل‌های ۴ تا ۶ نمایان است. همچنین از رابط فازی نوع ممدانی برای محاسبات فازی استفاده شده است.



شکل ۴. نمودار توابع عضویت ورودی اول کنترل فازی



شکل ۵. نمودار توابع عضویت ورودی دوم کنترل فازی



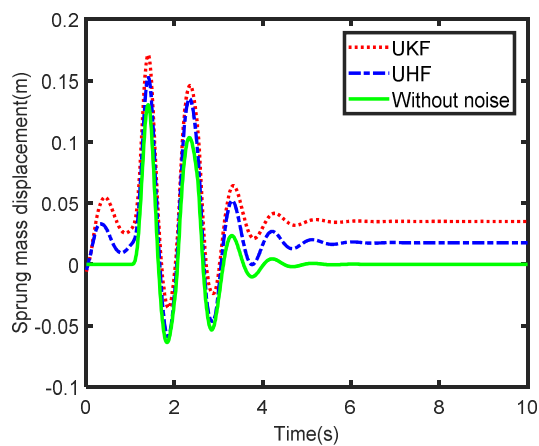
شکل ۶. نمودار توابع عضویت خروجی کنترل فازی

با توجه به توابع عضویت تعریف شده برای ورودی‌ها و خروجی مورد نظر، ۹ قانون نوشته شده است که در مجموع تعیین کننده‌ی پهنای باند سطح لغزش کنترل کننده است. قوانین نوشته شده در منطق فازی در ادامه آورده شده است:

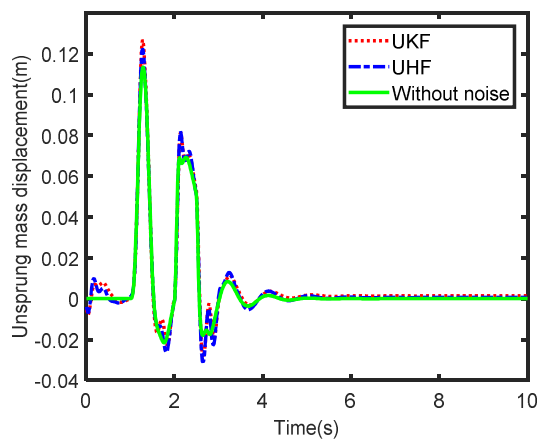
۱. اگر خطا کوچک و نیروی دمپر بزرگ باشد، φ بزرگ است.
۲. اگر خطا کوچک و نیروی دمپر متوسط باشد، φ متوسط است.
۳. اگر خطا کوچک و نیروی دمپر کوچک باشد، φ کوچک است.
۴. اگر خطا متوسط و نیروی دمپر بزرگ باشد، φ بزرگ است.
۵. اگر خطا متوسط و نیروی دمپر متوسط باشد، φ کوچک است.
۶. اگر خطا متوسط و نیروی دمپر کوچک باشد، φ کوچک است.
۷. اگر خطا بزرگ و نیروی دمپر بزرگ باشد، φ بزرگ است.
۸. اگر خطا بزرگ و نیروی دمپر متوسط باشد، φ متوسط است.
۹. اگر خطا بزرگ و نیروی دمپر کوچک باشد، φ متوسط است.

در نهایت شبیه سازی رفتار سیستم ارتعاشی با حضور نیروی کنترلی مود لغزشی فازی و الگوریتم های تخمین زنده اچ — بی نهایت و فیلتر کالمن انجام گرفت، با این توضیح که همه‌ی مراحل شبیه سازی در نرم افزار Matlab صورت پذیرفت. نمودار رفتار هر یک از متغیرهای حالت در طول مدت شبیه سازی در شکل های ۷ تا ۱۰ نشان داده شده است. نمودار حالت بدون نویز در شکل های ۷ تا ۱۰ در شرایطی به دست آمده است که در شبیه سازی از قرار دادن نامعینی ها در مدل سیستم چشم پوشی شده و سیستم تعلیق خودرو به صورت ایده آل فرض شده است؛ بنابراین در این حالت تأثیر الگوریتم تخمین زنده در ساختار کنترلی پیشنهادی حذف شده است.

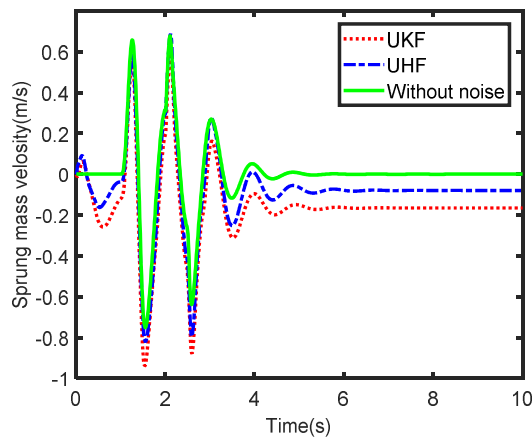
مقایسه‌ی سه نمودار به دست آمده برای هر یک از متغیرهای حالت سیستم نشان می دهد که رفتار سیستم ارتعاشی مخدوش با نویز، تخمین زده شده با فیلتر اچ — بی نهایت نسبت به حالتی که از فیلتر کالمن برای تخمین آن استفاده شود، با دقت بیشتری همراه است. علاوه بر آن، ترکیب کنترل کننده‌ی مود لغزشی فازی با هر کدام از تخمین زنده ها که ساختار کنترلی پیشنهادی در این پژوهش است، پاسخ قابل قبولی به ورودی جاده داشت و به خوبی توانست موقعیت و سرعت هر کدام از جرم های معلق و نامعلق خودرو را با کیفیت قابل قبولی پایدار کند.



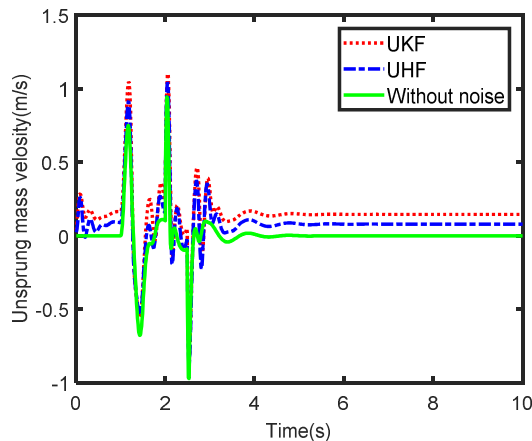
شکل ۷. نمودار جابه‌جایی جرم معلق در شرایط به کارگیری سه حالت فیلتر کالمن، فیلتر اچ - بی نهایت و بدون نویز



شکل ۸. نمودار جابه‌جایی جرم نامعلق در شرایط به کارگیری سه حالت فیلتر کالمن، فیلتر اچ - بی نهایت و بدون نویز



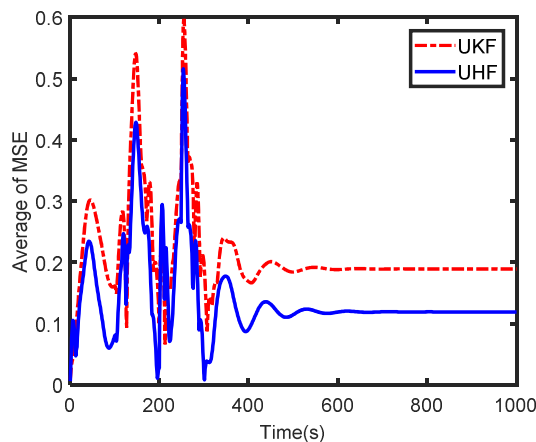
شکل ۹. نمودار سرعت جرم معلق در شرایط به کارگیری سه حالت فیلتر کالمن، فیلتر اچ - بی نهایت و بدون نویز



شکل ۱۰. نمودار سرعت جرم نامعین در شرایط به کارگیری سه حالت فیلتر کالمن، فیلتر اچ - بی نهایت و بدون نویز

شکل ۱۱ نمودار تغییرات خطای الگوریتم‌های تخمین زنده‌ی اچ - بی نهایت و فیلتر کالمن را در طول فرایند شبیه‌سازی سیستم نشان می‌دهد. نمودارهای شکل ۱۱ به خوبی رفتار مقاوم‌تر فیلتر آنستند اچ - بی نهایت را در مواجهه با نامعینی‌های سیستم نشان می‌دهد.

به منظور دستیابی به اطمینان بیشتر از چگونگی عملکرد الگوریتم‌های تخمین‌زننده و مقایسه‌ی رفتار آنها با یکدیگر، یک دسته‌ی ۵۰۰ تایی نویز تصادفی ایجاد شد. سیستم دینامیکی تعلیق خودرو تحت هدایت الگوریتم کنترلی پیشنهادی هر بار با اضافه شدن یک نمونه از این نویزهای تصادفی اجرا شد و رفتار متغیرهای حالت سیستم به دست آمد. همچنین مقادیر میانگین مجذور خطای متغیرهای حالت سیستم برای این دسته‌ی ۵۰۰ تایی نویز تصادفی به‌ازای فیلترهای آنستند اچ - بی نهایت و آنستند کالمن ذخیره شد. مقدار میانگین و واریانس داده‌های مذکور در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات خطای الگوریتم‌های آنستند اچ - بی نهایت و آنستند کالمن فیلتر

جدول ۲. میانگین و واریانس میانگین مجذور خطا برای ۵۰۰ دسته نویز تصادفی به‌ازای دو فیلتر کالمن آنستند و اچ - بی نهایت آنستند

میانگین مجذور مربعات خطا		الگوریتم
واریانس	میانگین	
۰/۰۲۶۴	۰/۳۳۳۳	UKF
۰/۰۰۴۸	۰/۱۶۱۴	UHF

مقایسه‌ی مقادیر جدول ۲ نشان می‌دهد زمانی که از الگوریتم فیلتر اچ - بی نهایت آنستند بهره برده شد، خطای سیستم نسبت به حالت ایده‌آل به‌طور چشمگیری کمتر از حالتی است که سیستم با حضور تخمین‌زننده‌ی کالمن آنستند اجرا می‌شود. به عبارت دیگر فیلتر مقاوم اچ - بی نهایت در تخمین متغیرهای

حالت مشاهده شده و مشاهده نشده دارای تخمین بهتری نسبت به فیلتر کالمن است. همچنین کنترل کننده ی تلفیقی با فیلتر UHF در مواجهه با نویزهای تصادفی دارای واریانس تابع میانگین مجذور مربعات خطای بسیار ناچیزی است که این موضوع تأکیدی بر مقاوم بودن کنترل کننده ی تلفیقی پیشنهادی در این مقاله در کاربردهای عملی است.

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش ساختاری متشکل از کنترل کننده ی مود لغزشی فازی و الگوریتم تخمین زننده برای کنترل ارتعاشات سیستم دینامیکی تعلیق خودرو پیشنهاد شد. ساختار مورد نظر با حضور کنترل کننده ی مود لغزشی مقاومت مطلوبی به اغتشاشات وارد شده از سمت جاده داشته است که پاسخهای به دست آمده از شبیه سازی سیستم، گواه این عملکرد است. همچنین اهمیت انتخاب پارامتر طراحی سطح لغزش در نحوه ی عملکرد کنترل کننده ی مود لغزشی بررسی شد. به همین دلیل به منظور هوشمندسازی رفتار نیروی کنترلی از منطق فازی استفاده شد. قوانین فازی به گونه ای نوشته شده است که پهنای باند سطح لغزش کنترل کننده به واسطه ی تغییرات پارامترهای مؤثر در رفتار سیستم تنظیم شود. علاوه بر این، عملکرد الگوریتم فیلتر اچ - بی نهایت آنستند در مقایسه با الگوریتم فیلتر کالمن آنستند برای مدل دینامیکی سیستم تعلیق نیمه فعال خودرو با نویزهای گوسی سفید بررسی شد. نتایج نشان می دهد که تخمین زننده ی بهبود یافته ی اچ - بی نهایت دارای پایداری بیشتری در مواجهه با نویزهای ناشی از عدم قطعیت مدل است، به گونه ای که خطای ردیابی متغیرهای حالت سیستم را بیشتر از ۴۸ درصد کاهش داده است.

منابع

۱. معصوم‌نژاد، م.؛ معافی، س.ع.؛ جمالی، ع. و نریمان‌زاده، ن. (۲۰۱۴)، «طراحی بهینه‌ی فیلتر ترکیبی کالمن و H بی‌نهایت، با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفی»، مهندسی مکانیک مدرس، ج ۱۴، ش ۲، ص ۱۲۸-۱۳۳.
2. Brezas, P.; Smith, M.C. & Hault, W. (2015), "A clipped-optimal control algorithm for semi-active vehicle suspensions: Theory and experimental evaluation", *Automatica*, 53, 188-194 .
3. Chen, S.A.; Wang, J.C.; Yao, M. & Kim, Y.B. (2017), "Improved optimal sliding mode control for a non-linear vehicle active suspension system", *Journal of sound and vibration*, 395, 1-25 .
4. Eski, I. & Yildirim, Ş. (2009), "Vibration control of vehicle active suspension system using a new robust neural network control system", *Simulation modelling practice and theory*, 17(5), 778-793 .
5. Fei, J. & Xin, M. (2012), "Robust adaptive sliding mode controller for semi-active vehicle suspension system", *International Journal of innovative computing, information and control*, 8(1), 691-700.
6. Gao, H.; Sun, W. & Shi, P. (2010), "Robust sampled-data h-infinity control for vehicle active suspension systems", *IEEE transactions on control systems technology*, 18(1), 238-245.
7. Guo, D.; Hu, H. & Yi, J. (2004), "Neural network control for a semi-active vehicle suspension with a magnetorheological damper", *Modal analysis*, 10(3), 461-471.
8. Hac, A. & Youn, I. (1993), "Optimal design of active and semi-active suspensions including time delays and preview", *Transactions-American society of mechanical engineers journal of vibration and acoustics*, 115, 498-498.
9. Horton, D. & Crolla, D. (1986), "Theoretical analysis of a semi active suspension fitted to an off-road vehicle", *Vehicle system dynamics*, 15(6), 351-372.
10. Karnopp, D.; Crosby, M.J. & Harwood, R. (1974), "Vibration control using semi-active force generators", *Journal of engineering for industry*, 96(2), 619-626.
11. Lajqi, S. & Pehan, S. (2012), "Designs and optimizations of active and semi-active non-linear suspension systems for a terrain vehicle", *Strojniški vestnik-journal of mechanical engineering*, 58(12), 732-743.
12. Li, W. & Jia, Y. (2010), "H-infinity filtering for a class of nonlinear discrete-time systems based on unscented transform", *Signal Processing*, 90(12), 3301-3307.
13. Li, Z.; Kolmanovsky, I.; Atkins, E.; Lu, J.; & Filev, D. (2017), "H-infinity filtering for cloud-aided semi-active suspension with delayed information", in *time delay systems*, pp. 283-297: Springer.
14. Margolis, D.L. (1982), "Semi-active heave and pitch control for ground vehicles", *Vehicle system dynamics*, 11(1), 31-42.

15. Ni, P. & Li, S. (2011), "Unscented H_∞ filter based simultaneous localization and mapping", Paper presented at the control conference (CCC), 30th Chinese.
16. Pan, H.; Sun, W.; Gao, H. & Jing, X. (2016), "Disturbance observer-based adaptive tracking control with actuator saturation and its application", IEEE transactions on automation science and engineering, 13(2), 868-875.
17. Raju, G. & Narayanan, S. (1991), "Optimal estimation and control of non-stationary response of a two-degree-of-freedom vehicle model", Journal of sound and vibration, 149(3), 413-428.
18. Sammier, D.; Sename, O. & Dugard, L. (2003), "Skyhook and H_∞ control of semi-active suspensions: some practical aspects", Vehicle system dynamics, 39(4), 279-308.
19. Shojaei, A.; Metered, H.; Shojaei, S. & Oyadiji, S.O. (2013), "Theoretical and experimental investigation of magneto-rheological damper based semi-active suspension systems", International journal of vehicle structures & systems, 5(3/4), 109.
20. Simon, D. (2013), "Optimal state estimation: Kalman, h infinity, and nonlinear approaches", John-Wiley & Sons.
21. Sun, W.; Gao, H. & Kaynak, O. (2013), "Adaptive backstepping control for active suspension systems with hard constraints", IEEE/ASME transactions on mechatronics, 18(3), 1072-1079.
22. Sun, W.; Pan, H. & Gao, H. (2016), "Filter-based adaptive vibration control for active vehicle suspensions with electrohydraulic actuators", IEEE transactions on vehicular technology, 65(6), 4619-4626.
23. Tang, X.; Du, H.; Sun, S.; Ning, D.; Xing, Z. & Li, W. (2017), "Takagi-Sugeno fuzzy control for semi-active vehicle suspension with a magnetorheological damper and experimental validation", IEEE/ASME transactions on mechatronics, 22(1), 291-300.
24. Van Der Merwe, R. (2004), "Sigma-point Kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models.
25. Van Der Merwe, R. & Wan, E.A. (2001), "The square-root unscented Kalman filter for state and parameter-estimation", Paper presented at the acoustics, speech, and signal processing, Proceedings, (ICASSP'01), IEEE international conference on.
26. Verros, G.; Natsiavas, S. & Stepan, G. (2000), "Control and dynamics of quarter-car models with dual-rate damping", Journal of vibration and control, 6(7), 1045-1063.
27. Yao, J.I.; Shi, W.K.; Zheng, J.Q. & Zhou, H.P. (2013), "Development of a sliding mode controller for semi-active vehicle suspensions", Journal of vibration and control, 19(8), 1152-1160.
28. Yoshimura, T.; Kume, A.; Kurimoto, M. & Hino, J. (2001), "Construction of an active suspension system of a quarter car model using the concept of sliding mode control", Journal of sound and vibration, 239(2), 187-199.
29. Yoshimura, T.; Nakaminami, K.; Kurimoto, M. & Hino, J. (1999), "Active suspension of passenger cars using linear and fuzzy-logic controls", Control engineering practice, 7(1), 41-47.

مدل سازی و بهینه سازی ساختار سلول خورشیدی لایه نازک CIGS به منظور افزایش بازدهی

معراج رجایی

استادیار، دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و حرفه‌ای شریعتی، دانشگاه فنی حرفه‌ای، تهران، ایران

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۲۹

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۲

چکیده

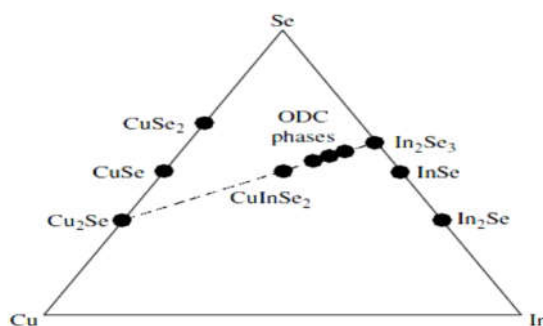
سلول خورشیدی فیلم نازک CIGS از بهترین انتخاب‌ها برای تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته است. سلول‌های خورشیدی لایه نازک CIGS، به دلیل بازدهی زیاد و قیمت کم در ساخت، توجه محققان را جلب کرده‌اند. در این پژوهش به بررسی عملکرد و عوامل مؤثر بر بازدهی سلول‌های خورشیدی پرداخته شده است. پارامترهای مختلف ساختار با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی سیلواکو (اتلس) بهبود یافت تا بیشترین بازده ممکن برای ساختار فراهم شود. تغییر ضخامت لایه‌ها و مقادیر مختلف نسبت مولی گالیوم دو عامل مؤثر در افزایش بازده‌اند. با تغییرات مولی به کار گرفته شده به منظور دستیابی به تطبیق حداکثری با استفاده از روابط ذکر شده به مقادیر بهینه‌ای این ساختارها دست یافته شد. نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روابط تئوری و همچنین به صورت فیزیکی تحلیل و بررسی شدند. بازدهی نهایی در مقایسه با مدل اولیه‌ی سلول در حدود ۵/۹ درصد افزایش پیدا کرد. در پایان منحنی ولتاژ - جریان سلول پایه ترسیم و به صورت عددی و گرافیکی با مراجع مقایسه شد. نزدیکی نتایج شبیه‌سازی با نتایج عملی، و همچنین مقایسه‌ی آنها با مقادیر تئوری، صحت شبیه‌سازی ساختار را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی

بازدهی، سلول خورشید CIGS، شبیه‌ساز سیلواکو، منحنی ولتاژ - جریان.

۱. مقدمه

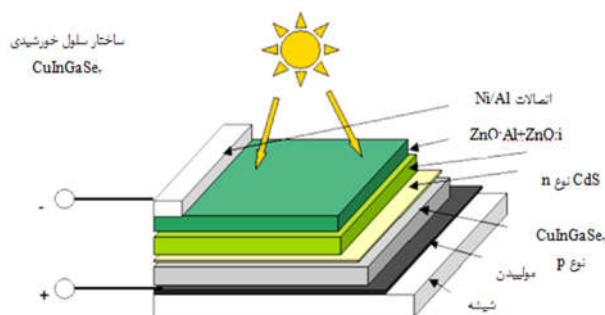
سلول CIGS شامل ترکیبات نیم‌رسانا از گروه I-III-VI است. این ترکیبات چهارگانه به‌صورت ABC2 هستند که در آن A مس (Cu)، B گالیوم (Ga) یا ایندیم (In)، C گوگرد (S) سلینیوم (Se) یا تریوم (Te) است. این ترکیبات انعطاف زیادی در خواص ساختاری و الکتریکی دارند و به همین دلیل جایگاه وسیعی در ساخت سلول‌های خورشیدی دارند. بخش فعال آنها، شامل دو آلیاژ سه‌تایی، CIS و CGS است که هر دو ساختار مشابهی دارند (Karki et al., 2012; Green, 2003; Çaldıran et al., 2017)، با این تفاوت که عناصر گروه دو جدول تناوبی، با عناصر گروه یک، مثل مس و عناصر گروه سه مثل ایندیم یا گالیوم جایگزین شده است. هر اتم مس و ایندیم با دو اتم سلینیوم، دو پیوند کووالانسی برقرار می‌کند و هر اتم سلینیوم با یک اتم مس و یک اتم ایندیم، دو پیوند برقرار می‌کند. پیوند بین اتم‌ها، با این حقیقت مشخص می‌شود که اتم، با دریافت یا ارائه‌ی تعداد مورد نیاز الکترون، به میانگین چهار الکترون ظرفیت دست یابد. فازهای ممکن سیستم CIS، مشخص شده در دیاگرام فاز سه‌گانه در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. نمودار فاز سه‌تایی سیستم CIS

اشکال بزرگ سلول‌های CIS ولتاژ مدار باز اندک آنهاست؛ در نتیجه به‌علت داشتن گاف انرژی ۱/۰۲ الکترون ولت عملکردشان محدود می‌شوند. سلول CIGS دارای گاف انرژی‌ای است که با افزودن درصد گالیوم به نسبت ترکیب Ga/In+Ga، یا با افزودن مقدار x در فرمول شیمیایی $\text{Cu}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ ، افزایش می‌یابد. این نسبت یا مقدار x ممکن است در مس ایندیم سلینید (CIS) خالص، متفاوت با یک باشد و در مس گالیوم سلینید (CGS) خالص به صفر نزدیک باشد. برخلاف سلول‌های سیلیکونی، سلول‌های $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Se}_2$ و CdTe نه تنها در برابر تابش نور خورشید تخریب نمی‌شوند، بلکه تحقیقات نشان می‌دهد در صورت قرار

گرفتن در شرایط ایده آل تابش نور، عملکرد بهتری خواهند داشت. از دیگر مزیت های این سلول ها می توان به وجود گاف نواری مستقیم اشاره کرد که سبب می شود این مواد در مقایسه با سیلیکون، نور بیشتری جذب کنند. سلول های CdTe دارای گاف نواری ۱/۴ الکترون ولت هستند و بیشترین بازدهی ثبت شده برای این سلول ها ۱۶/۵ درصد بوده است. با استفاده از مواد مشابه و تغییر در مقدار (نسبت) گالیوم در سلول های CIGS، با تنظیم گاف انرژی سلول، طیف منطقه ی خاصی مدیریت می شود. یکی از خواص CIGS این است که به راحتی توسط عوامل خارجی تحت اعوجاج قرار نمی گیرد. در مقابل، اعوجاج با نقص های ذاتی مواد، کنترل می شود. اگر مواد، مقدار ناچیزی مس داشته باشند و در فشار زیاد بخار سلیوم گرم شوند، نمونه های نوع p تولید می شوند؛ در حالی که مواد با مس اضافه و سلیوم بیضی شکل تمایل به نوع n شدن دارند. در سلول های فتوولتائیک کالکوپریت برای رابط، اغلب از اصل اتصال ناهمگن استفاده می شود که بین دو لایه یا ناحیه هایی از نیم رساناهای بلوری ناهمسان اتفاق می افتد. برای دقت بیشتر، نیم رسانای نوع n، گاف نواری بیشتری از نیم رسانای نوع p دارد. یک سلول فتوولتائیک معمولی براساس فیلم های چندبلوری کالکوپریت چهارگانه است که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. طرح نمونه از یک سلول فتوولتائیک براساس CIGS

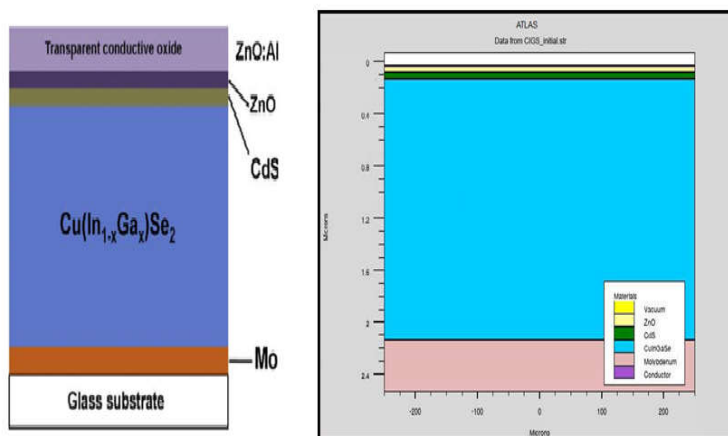
لایه ی ZnO با گاف انرژی ۳/۳ الکترون ولت به طور معمول به عنوان نیم رسانای نوع n استفاده می شود و لایه ی پنجره ی شفاف برای این است که عبور تابش خورشیدی از طریق سلول آسان شود. جذب تابش خورشیدی و ایجاد جفت های الکترون - حفره در نیم رسانای نوع p اتفاق می افتد، یعنی کالکوپریت به عنوان جذب کننده مشخص می شود. ضرایب جذب زیاد، استفاده از لایه های نازک به ضخامت چند میکرون با غلظت ناخالصی زیاد و نقص های ذاتی را امکان پذیر می کند. از سوی دیگر در طول تشکیل اتصال ناهمگن،

لایه‌های داخلی تولید شده درصد نقص زیادی دارند و احتمال بازترکیب حامل‌ها در لایه‌ی داخلی بسیار زیاد است. اتصال ناهمگن CIGS/ZnO مناسب برای انتقال حامل‌ها به حساب نمی‌آید، زیرا یون‌های ایجاد شده در طول آماده‌سازی ZnO، بازترکیب جفت الکترون — حفره‌ها را در لایه‌ی داخلی تقویت می‌کنند و ممکن است به سطح جذب‌کننده آسیب برسانند. به همین دلیل، یک لایه‌ی بسیار نازک CdS با گاف انرژی ۲/۴ الکترون ولت بین ZnO و لایه‌ی جذب‌کننده استفاده شده که به‌طور معمول با روش لایه‌نشانی حمام شیمیایی فراهم می‌شود. با استفاده از یک لایه بافر، به تنظیم گاف انرژی بهتر بین پنجره و لایه‌ی جذب می‌توان دست یافت. افزایش گاف انرژی لایه‌ی جذب، سبب افزایش غلظت گالیوم، $x = \text{Ga}/(\text{In} + \text{Ga})$ و به تبع آن، افزایش نسبی ولتاژ مدار باز می‌شود. افزایش گاف انرژی سبب افزایش خمشی نواری و افزایش ولتاژ مدار باز می‌شود و عامل پرکنندگی بزرگ‌تری با سلول‌های کمتر مورد نیاز در هر آرایه‌ی فتوولتاییک ایجاد می‌کند. کاهش عملکرد با افزایش نسبت گالیوم ممکن است با این حقیقت توجیه شود که گاف انرژی وسیع‌تر برای لایه‌ی جذب، سهم کمتر فوتون‌ها و نفوذ عمیق‌تر، برای تولید جریان نوری را موجب می‌شود. صرف‌نظر از رابطه‌ی بالا، تحقیقات و آزمایش‌ها نشان می‌دهند افزودن گالیوم، از طریق تطابق بهتر با طیف خورشیدی، برای عملکرد و بازده سلول سودمند است. پارامتر مهم در اتصال ناهمگن، الگوی تنظیم باندهای ظرفیت و هدایت در هر دو طرف لایه‌های اتصال است؛ زیرا تأثیری قوی بر انتقال جریان در سراسر اتصال ناهمگن و عملکرد سلول‌های خورشیدی دارد.

۲. ساختار لایه‌های CIGS

متداول‌ترین روش ساخت سلول‌های CIGS به ساختارهای Substrate معروف است و بیشترین بازده مربوط به این روش است. در این ساختار، ابتدا بستر قرار می‌گیرد که به‌طور معمول از جنس شیشه است. بر روی شیشه، الکتروود زیرین لایه‌نشانی می‌شود که مولیبدن (Mo)، بهترین گزینه است. بعد از آن لایه‌ی CIGS از نوع p، سپس لایه‌ی بافر (CdS) از نوع n، ZnO به‌عنوان لایه‌ی شفاف نوع n و در آخر هم الکتروود رویی که به‌طور معمول از جنس ZnO:Al است لایه‌نشانی می‌شود. تطبیق باند ظرفیت در اتصال ناهمگن CIGS/CdS تقریباً مستقل از نرخ غلظت گالیوم بوده و در حدود ۱ الکترون ولت است. ایجاد مقادیر مثبت یا منفی، به اندازه‌ی گاف انرژی جذب بستگی دارد. تنظیم مطلوب بین باندهای هدایت در لایه‌ی درونی CIGS/CdS با اختلاف انرژی بزرگ‌تر از صفر در نظر گرفته می‌شود که هم‌ترازی (تنظیم) باند نامیده می‌شوند. یکی از اهداف اصلی پژوهش‌های امروزی درباره‌ی فتوولتاییک‌ها و توسعه‌ی آنها،

ساخت سلول های نازک تر با استفاده از مواد نیم رسانای کمتر به منظور کاهش زمان تولید و کاهش هزینه به دلیل افزایش قیمت ایندیم و هزینه های عناصر مرکب است. ضخامت یک سلول خورشیدی پارامتر بسیار مهمی است و انتخاب ضخامت بهینه، اغلب تابعی از عوامل متضاد متعدد است. اگر بتوان ضخامت استاندارد لایه ی جاذب CIGS در سلول های خورشیدی فیلم نازک CIGS را به مقدار بسیار جزئی کاهش داد، عملکرد سلول های فتوولتاییک مؤثرتر است و به افزایش بازده منجر می شود. ساخت لایه ی جاذب نازک تر، به علت کوچک تر شدن دانه ها و بزرگ تر شدن مرز دانه ها، با تلفات باز ترکیب همراه شده است. همچنین با احتمال زیاد باز ترکیب اتصال پستی به علت تولید حامل نزدیک به اتصال پستی و افزایش باز ترکیب تونلی نزدیک به واسطه، همراه شده است. تلاش های اخیر، بر ساخت فیلم های بسیار نازک تر، بدون افت کارایی و کاهش بهره وری سلول، متمرکز شده اند. ساختار و تصویر گرافیکی سلول خورشیدی CIGS مطابق شکل ۳ به طور معمول روی لایه های مختلف فلز و نیم رسانا و بستری مناسب از لایه های زیر تشکیل شده است.



شکل ۳. ساختار گرافیکی CIGS

لایه ی ۱) آلومینیوم ناخالص شده با زینک اکسید (ZnO:Al) که کار آن، هدایت فوتون دریافت شده است. لایه ی ۲) لایه ی زینک اکسید (ZnO:i) که به عنوان لایه ی TCO استفاده می شود. لایه ی TCO باید دارای گاف انرژی بزرگ، برای اطمینان از جذب حداکثر نور خورشید باشد. این لایه باید شفاف نیز باشد تا حداکثر فوتون ها را جذب کند.

لایه‌ی ۳) لایه‌ی n_cds (سولفید کادمیوم)، که نیم‌رسانایی از نوع n است و به‌عنوان لایه‌ی بافر بین لایه‌های TCO و CIGS عمل می‌کند. این لایه سبب عملکرد بهتر سلول خورشیدی می‌شود. لایه‌ی ۴) لایه‌ی جاذب CIGS که لایه‌ی اصلی و فعال سلول خورشیدی و نوعی نیم‌رسانای چندبلوری از نوع p است. این لایه دارای گاف انرژی مستقیم است و با لایه‌ی بافر، یک پیوند $p-n$ را تشکیل می‌دهد. لایه‌ی ۵) لایه‌ی مولیبدن (Mo) که فلز دیرگداز است و به‌عنوان اتصال عقب استفاده می‌شود و نقش جمع کردن حامل‌ها از لایه‌ی جذب و ارائه‌ی آن به یک بار خارجی را دارد؛ بنابراین باید دارای مقاومت کم باشد. لایه‌ی ۶) زیرلایه‌ی سلول خورشیدی، که از جنس نوعی شیشه ($soda$) یا پلاستیک است. این ماده، مقاومت زیادی در برابر خوردگی دارد و قیمت آن مناسب است.

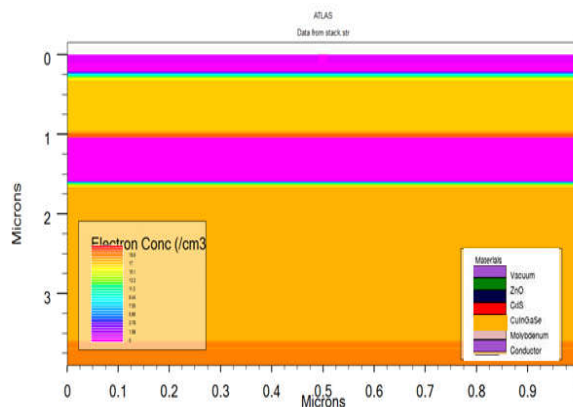
این مقاله با در نظر گرفتن دو نوع از مهم‌ترین بازترکیب‌های ممکن شامل بازترکیب اوژه و بازترکیب شاکی = رید = حال بررسی شده است. بدین منظور با محاسبه‌ی نرخ تولید و بازترکیب خالص ساختار سلول خورشیدی با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته، مقدار بهینه‌ی ضخامت محاسبه شده و نشان داده شده که با بهینه‌سازی ضخامت، کارایی سلول افزایش و هزینه‌ی تولید کاهش می‌یابد.

۳. شبیه‌سازی یک نمونه سلول خورشیدی CIGS

تحقیقاتی در سال‌های اخیر (Coutts, 1999, 77-184; Gjessing et al., 2010; Wang et al., 2012; Feldman et al., 2014) درباره‌ی ساختار سلول خورشیدی فیلم نازک CIGS برای رسیدن به بازده زیاد انجام گرفته است. مدل و شبیه‌سازی‌ها براساس داده‌های واقعی از سلول‌های CIGS تجربی گزارش شده، در نظر گرفته شده است. پارامترهایی که در این تحقیق برای شبیه‌سازی یک سلول خورشیدی CIGS استفاده شده‌اند، عبارت‌اند از: گذردهی نسبی ϵ_r ، الکترون‌گاتیوی χ_e ، تحرک‌پذیری باند الکترون μ_n ، تحرک‌پذیری باند حفره μ_p ، غلظت پذیرنده N_A ، غلظت اهداکننده N_D ، چگالی مؤثر حالت در باند هدایت N_c ، چگالی مؤثر حالت در باند ظرفیت N_v ، گاف انرژی‌ها E_g ، ضخامت لایه‌های CdS و ZnO . لایه‌های این ساختار $ZnO/CdS/CIGS/Mo$ هستند. میدان الکتریکی سلول در شکل ۴ و پارامترهای مورد نیاز این برنامه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. پارامترهای مهم شبیه سازی سلول CIGS

•/۵	ZnO	CdS	CIGS
ϵ_r	۹	۱۰	۱۳/۶
$\chi^e(\text{eV})$	۴	۳/۷۵	۳/۸۹
$\mu_n (\text{cm}^2/\text{Vs})$	۵۰	۱۰	۳۰۰
$\mu_p (\text{cm}^2/\text{Vs})$	۵	۱	۳۰
NA ($1/\text{cm}^3$)	۰	۰	8×10^{17}
ND ($1/\text{cm}^3$)	5×10^{17}	5×10^{17}	5×10^{17}
NC ($1/\text{cm}^3$)	$2/3 \times 10^{18}$	$2/3 \times 10^{18}$	$2/3 \times 10^{18}$
NV ($1/\text{cm}^3$)	$1/8 \times 10^{19}$	$1/8 \times 10^{19}$	$1/8 \times 10^{19}$
$E_g (\text{eV})$	۳/۳	۲/۴	۱/۲
Thickness (nm)	۵۵	۵۰	۲۰۰

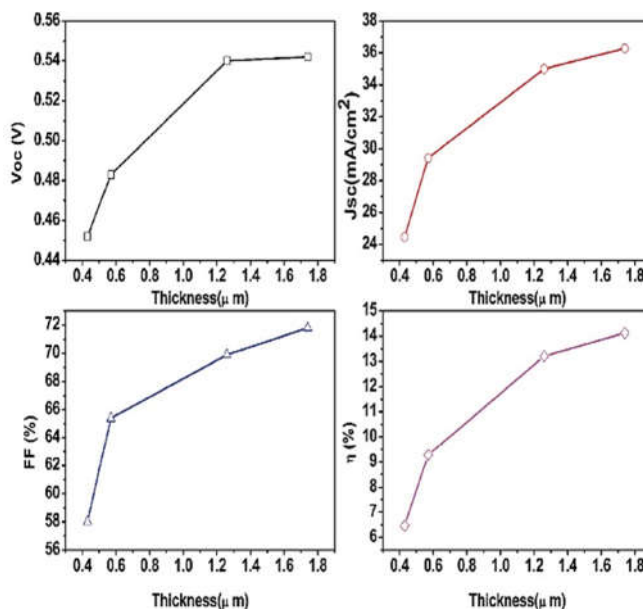


شکل ۴. ساختار گرافیکی سلول خورشیدی CIGS

۴. تغییر ضخامت لایه ی جاذب CIGS

در این بخش تغییر ضخامت لایه ی جاذب CIGS که لایه ی اصلی و فعال در سلول خورشیدی است، با توجه به تحقیقات اشاره شده و بازه ی تغییرات ضخامت لایه ی جاذب CIGS از ۰/۴ تا ۱/۸ میکرومتر بررسی و شبیه سازی شده است. همان طور که در شکل ۵ به ترتیب، نتایج خروجی سلول و نمودار تغییرات جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، فاکتور پرکنندگی و بازده برحسب تغییرات ضخامت نشان داده شده است، همه ی پارامترها با افزایش ضخامت لایه ی جاذب CIGS افزایش می یابند؛ زیرا با افزایش ضخامت لایه ی

جاذب، فوتون‌های بیشتری جذب این لایه می‌شوند و به تولید الکترون - حفره کمک می‌کنند. نکته‌ی دیگر این است که برای مقادیر کمتر از ۱ میکرومتر، همه‌ی پارامترها با شدت بیشتری تضعیف می‌شوند.



شکل ۵. نمودار تغییرات جریان اتصال کوتاه، ولتاژ مدار باز، فاکتور پرکنندگی و بازده برحسب تغییرات ضخامت

درجه‌ی توزیع عناصر در لایه‌ی CIGS یک میدان الکتریکی اضافی در لایه‌ی جاذب تولید می‌کند. مسلم است نسبت مولی گالیوم در لایه‌ی جاذب دارای تأثیر مهمی در عملکرد سلول CIGS است. در ادامه به بررسی توزیع یکنواخت گالیوم در لایه‌ی جاذب و مقایسه با داده‌های واقعی از سلول CIGS پرداخته شده است.

جدول ۲ پارامترهای یک سلول CIGS تجربی ساخته شده در (Shockley & Queisser, 1961) در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این تفاوت‌ها به علت مقادیر مختلف پارامترهای پایه‌ای، ضخامت جذب‌کننده و نواحی مختلف قطعه است. علت تفاوت در جریان اتصال کوتاه این است که این نرم‌افزار از تمام سطح لایه‌ی بالایی به عنوان یک اتصال استفاده می‌کند، اما در حالت واقعی به صورت شبکه‌ای اتصالات سلول بالایی را با لایه‌های بعدی مرتبط می‌کند.

جدول ۲. مشخصات و پارامترهای سلول CIGS

ضخامت لایه جذب کننده CIGS=2μm					
۱	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰	Ga/(Ga+In)
۰/۹۹۴	۰/۸۲۵	۰/۷۳۰	۰/۶۹۷	۰/۵۶۸	ولتاژ مدار باز (V)
۲۰/۸	۲۷/۳	۳۱/۳	۳۵/۶	۳۶/۲	جریان اتصال کوتاه (mA/cm ²)
۵۰/۸	۶۸/۱	۷۵/۱	۸۰/۷	۷۶/۵	ضریب پراکندگی
۱۰/۱۵	۱۵/۳۵	۱۷/۱۵	۲۰/۰۵	۱۵/۷	بازده تبدیل (%)

۵. تغییر نسبت مولی گالیوم لایه ی جاذب CIGS

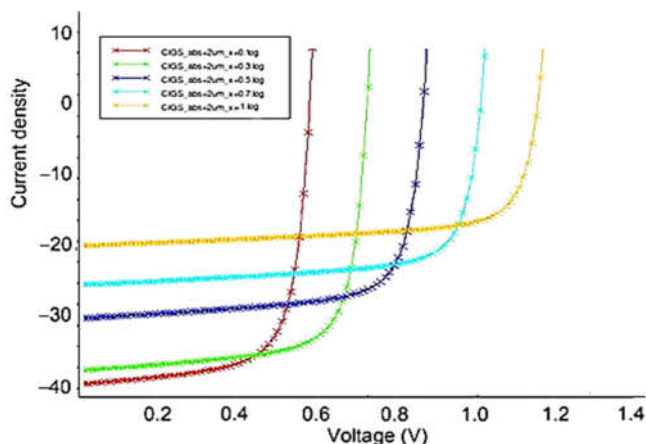
دستیابی به رفتار فتوولتاییک و رسیدن به بازدهی بهینه در سلول های CIGS به رعایت نسبت های مشخص بین این عناصر وابسته است. بدیهی است ضخامت لایه ها بر نسبت های مورد نظر تأثیر زیادی دارد. در تحقیقات مختلف، رابطه ی حاکم بر گاف انرژی به غلظت گالیوم به صورت تجربی معرفی شده است. با توجه به اهمیت حضور گالیوم در ساختار، X طبق رابطه ی ۱ تعریف می شود.

$$\frac{Ga}{Ga + In} = x \quad (۱)$$

همچنین ارتباط تجربی گاف نواری برحسب پارامتر X مطابق با رابطه ی ۲ تعریف می شود.

$$E_g (eV) = 1.011 + 0.664x + 0.249x(1 - x) \quad (۲)$$

با توجه به تغییرات X از صفر (نبود گالیوم) تا یک (نبود ایندیم)، محدوده ی گاف نواری از ۱/۰۲ تا ۱/۷ تغییر می کند. رابطه ی ۲ نیز نشان می دهد که با توجه به افزایش حضور گالیوم در ساختار سبب افزایش گاف نواری می شود. حداکثر بازده سلول خورشیدی فتوولتاییک CIGS تجربی به دست آمده تا امروز، مربوط به زمانی است که نسبت مولی گالیوم حدود ۰/۳ در باند انرژی حدود ۱/۱ الکترون ولت است. شبیه سازی نتایج تجربی اندازه گیری شده در مقالات، این مسئله را تأیید می کند (Feldman et al., 2014; Shockley & Queisser, 1961) و نشان می دهد که نسبت $Ga/Ga+In$ برابر ۰/۳ بیشترین بازده را تولید می کند. شکل ۶ نمودار مشخصه های ولتاژ - جریان سلول CIGS در مقادیر مختلف گالیوم در لایه ی جاذب را نشان می دهد.



شکل ۶. منحنی مشخصه‌های ولتاژ - جریان سلول CIGS با لایه‌ی جذب‌کننده ۲ میکرومتر به ازای مقادیر مختلف نسبت مولی گالیوم

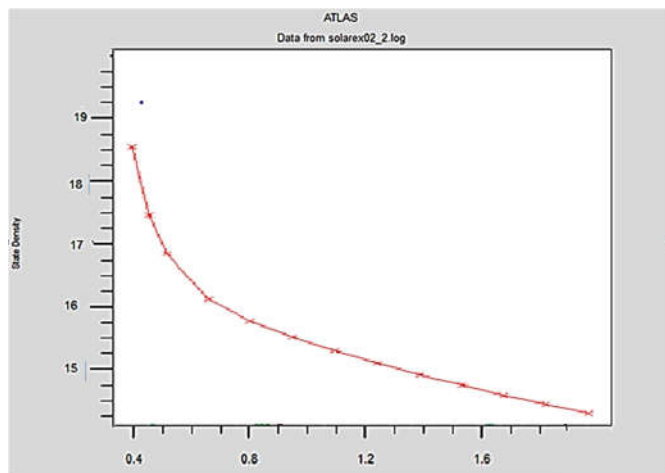
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت گالیوم، شکاف باند لایه‌ی جاذب افزایش می‌یابد، ترم بازترکیب کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه ولتاژ مدار باز سلول رو به بهبود می‌رود. اما به دلیل کاهش ثابت‌های جذب نوری در سلول و جذب نشدن نور در طول موج‌های بلند طیف، جریان اتصال کوتاه رو به کاهش است. در غلظت‌های زیاد گالیوم، افزایش چگالی تله‌ها سبب می‌شود جریان اتصال کوتاه به شدت افت کند، به طوری که اثر کاهش جریان بر افزایش ولتاژ غالب می‌شود و بازده شروع به کاهش می‌کند. نتیجه‌ی شبیه‌سازی نشان می‌دهد بیشترین بازده سلول به ازای نسبت مولی گالیوم حدود ۰/۳ در باند انرژی حدود ۱/۱ الکترون ولت است. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات و پارامترهای سلول CIGS با لایه‌ی جذب‌کننده ۲ میکرومتر با مقادیر مختلف نسبت مولی گالیوم

ضخامت لایه جذب کننده CIGS=2μm					
۱	۰/۷	۰/۵	۰/۳	۰	Ga/(Ga+In)
۰/۹۹۴	۰/۸۲۵	۰/۷۳۰	۰/۶۹۷	۰/۵۶۸	ولتاژ مدار باز (V)
۲۰/۸	۳۷/۳	۳۱/۳	۳۵/۶	۳۶/۲	جریان اتصال کوتاه (mA/cm ²)
۵۰/۸	۶۸/۱	۷۵/۱	۸۰/۷	۷۶/۵	ضریب پرکنندگی
۱۰/۱۵	۱۵/۳۵	۱۷/۱۵	۲۰/۰۵	۱۵/۷	بازده تبدیل (%)

۶. تغییر ضخامت لایه ZnO

در این قسمت ساختار سلول با تغییر ضخامت لایه شفاف ZnO بررسی می شود. تأثیر این تغییر ضخامت بر عملکرد کلی سلول ارزیابی شده و با استفاده از ابزارهای شبیه سازی بازده بهینه تعیین گردیده است. با توجه به اینکه در نتایج تجربی که در مرجع (Kokate et al., 2018) اشاره شده است، ضخامت بهینه ی لایه ZnO از ۰/۴ میکرومتر تا ۱/۸ میکرومتر است. همان طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، کاهش ضخامت لایه شفاف در افزایش بازده سلول مؤثر خواهد بود؛ زیرا با کاهش ضخامت لایه شفاف، نور کمتری منعکس می شود و فوتون های بیشتری به لایه جاذب GIGS می رسد.

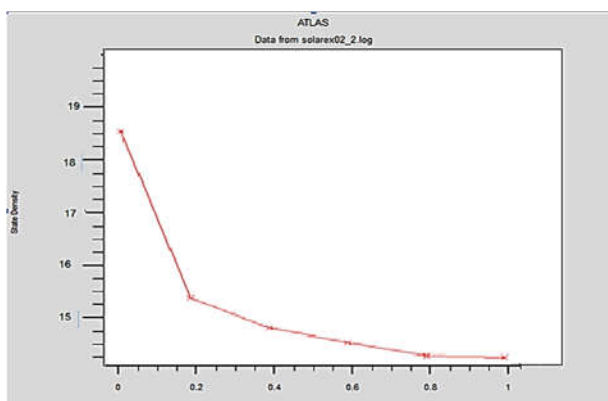


شکل ۷. نمودار تغییرات بازده با تغییر ضخامت لایه شفاف ZnO

۷. تغییر ضخامت لایه CdS

با قرار دادن لایه نازک CdS نوع n بر لایه جاذب نوع pCIGS به عنوان لایه ی بافر بین لایه های TCO و لایه ی جاذب CIGS یک پیوند p-n تشکیل می شود، زیرا با اتصال سه لایه به یکدیگر، به علت اختلاف در غلظت الکترون و حفره ی لایه ها، الکترون ها از لایه های پنجره و بافر نوع n به لایه ی جاذب نوع P انتشار می یابند. در نتیجه بخشی از لایه های پنجره و بافر، دارای بار مثبت می شوند، در حالی که بخشی از لایه ی جاذب SGIC دارای بار منفی است. بدین ترتیب یک ناحیه ی تخلیه و یک پتانسیل داخلی در پیوند ایجاد می شود. وقتی نور از سمت لایه ی پنجره به سطح سلول تابانده شود، پیش از رسیدن به لایه ی جاذب، باید از لایه های پنجره و بافر عبور کند. فوتون هایی با انرژی کمتر از ۳/۳ الکترون ولت از لایه ی

ZnO عبور خواهند کرد. بعضی از فوتون‌های با انرژی بیشتر از $2/4$ الکترون ولت و کمتر از $3/3$ الکترون ولت در لایه‌ی CdS جذب خواهند شد. در این میان، درصد زیادی از فوتون‌ها به لایه‌ی جاذب می‌رسند. فوتون‌هایی که انرژی بیشتری دارند جذب لایه‌ی جاذب شده و سبب برانگیختگی الکترون‌ها از باند ظرفیت به باند هدایت می‌شوند و بدین ترتیب حفره‌هایی در باند ظرفیت ایجاد خواهد شد. الکترون‌های تولید شده به طرف ناحیه‌ی تخلیه انتشار می‌یابند و سرانجام در اثر پتانسیل داخلی پیوند به سمت لایه‌های بافر و پنجره رانده می‌شوند و بدین ترتیب در تولید جریان الکتریکی بیرونی مشارکت می‌کنند. در نتایج تجربی (Feng et al., 2014) ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی CdS از 0.3 میکرومتر تا 0.7 میکرومتر ذکر شده است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، کاهش ضخامت لایه‌ی CdS سبب افزایش بازده سلول در مقایسه با حالت اولیه می‌شود.



شکل ۸. نمودار تغییرات بازده با تغییر ضخامت لایه‌ی شفاف CdS

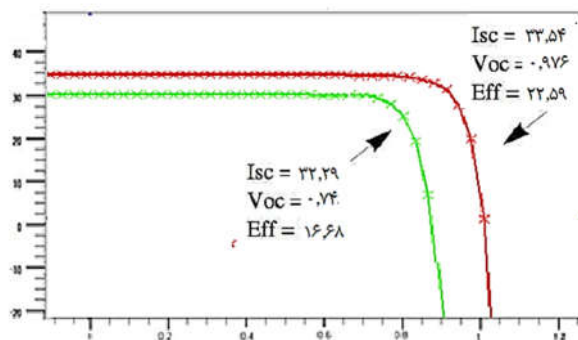
۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عملکرد و عوامل مؤثر بر پارامترهای خروجی سلول خورشیدی فیلم نازک CIGS با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز SILVACO که قابلیت زیادی در شبیه‌سازی ادوات نیمه‌هادی دارد، پرداخته شد. پس از بررسی شرایط گوناگون از جمله تغییرات ضخامت لایه‌ها، جاذب CIGS، لایه‌ی شفاف ZnO، لایه‌ی CdS و بررسی حالت بهینه‌ی مقدار غلظت گالیوم عملکرد سلول تحلیل شده و مطابق با نتایج شبیه‌سازی یک حالت بهینه معرفی می‌شود. در حالت بهینه، نسبت $Ga/Ga+In$ برابر 0.3 ، ضخامت لایه‌ی جاذب CIGS 2 میکرومتر، ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی ZnO 0.4 میکرومتر، و ضخامت بهینه‌ی لایه‌ی CdS 0.3 میکرومتر

در نظر گرفته شده است. برای این سلول، چگالی جریان اتصال کوتاه برابر با ۳۳/۵۵ میلی آمپر و ولتاژ مدار باز ۰/۹۷۶ ولت به دست آمده است. بازده و فاکتور پرکنندگی این سلول به ترتیب ۲۲/۵۸ و ۷۹/۷۷ درصد است. با توجه به نتایج جدول ۴ و شکل ۹ — نشان دهنده نمودار جریان - ولتاژ سلول است - بازده نهایی در مقایسه با مدل اولیه سلول در حدود ۵/۹ درصد افزایش پیدا می کند.

جدول ۴. مقایسه پارامترهای اولیه و بهبود یافته

ضریب پرکنندگی (%)	بازده تبدیل (%)	ولتاژ مدار باز (V)	جریان اتصال کوتاه (mA/cm ²)	
۷۹/۹۱	۱۶/۶۷	۰/۷۴	۳۲/۲۹	مدل اولیه CIGS
۷۹/۷۷	۲۲/۵۸	۰/۹۸	۳۳/۵۴	مدل بهبود یافته CIGS



شکل ۹. نمودار جریان - ولتاژ سلول CIGS اولیه و بهبود یافته

منابع

1. Çaldıran, Z.; Biber, M.; Metin, O. & Aydoğan, Ş. (2017), "Improving the performance of the organic solar cell and improving the performance of the organic solar cell and the inorganic heterojunction devices using monodisperse Fe₃O₄ nanoparticles", Optik, International journal for light and electron optics 142.
2. Coutts, T. J. (1999), "A review of progress in thermo photovoltaic generation of electricity", Renewable and sustainable energy reviews 3.2-3, pp. 77-184.
3. Feldman, F.; Simon, M.; Bivour, M.; Reichel, C.; Hermle, M. & Glunz, S.W. (2014), "Efficient carrier-selective p-and n-contacts for Si solar cells", Solar energy materials and solar cells 131, pp. 100-104.
4. Feng, S.W.; Lai, C.M.; Tsai, C.Y. & Tu, L.W. (2014), "Numerical simulations of the current-matching effect and operation mechanisms on the performance of InGaN/Si tandem cells", Nanoscale Res Lett., 9(1):652.
5. Gjessing, J.; Marstein, E.S. & Sudbø, A. (2010), "2D back-side diffraction grating for improved light trapping in thin silicon solar cells", Opt express, 18 (6):5481-5495.
6. Green, M.A. (2003), "General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modeling," In progress in photovoltaics: Research and applications, pp. 333-340.
7. Karki, P.; Adhikary, B. & Sherpa, K.N. (2012), "Comparative study of grid-tied photovoltaic (PV) system in Kathmandu and Berlin using PV system, in sustainable energy technologies (ICSET), IEEE third international conference on.
8. Kokate, S.K.; Jagtap, C.; Baviskar, P.K. & Mohite, K. (2018), "CdS sensitized cadmium doped ZnO solar cell: Fabrication and characterizations", Optik international journal for light and electron optics 157, pp. 628-634.
9. Shockley, W. & Queisser, H.J. (1961), "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells", Journal of applied physics 32, pp. 510-519.
10. Wang, K.X.; Yu, Z.; Liu, V.; Cui, Y. & Fan, S. (2012), "Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light-trapping nanocone gratings", Nano letters 12.3, pp. 1616-1619.

جایابی مکان بهینه‌ی SVC و TCSC در شبکه‌های انتقال برق به کمک تخمین‌زن فازی با رویکرد افزایش پایداری استاتیکی ولتاژ

محمدعلی علیپور*

مربی، آموزشکده فنی و حرفه‌ای پسران داراب، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، فارس، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۲۵

چکیده

در سال‌های اخیر تقاضای انرژی الکتریکی روزبه‌روز در حال افزایش بوده است، در حالی که گسترش خطوط انتقال و افزایش ظرفیت تولید انرژی به علت محدودیت‌های محیطی و سیستمی، همسو با این افزایش تقاضا رشد نداشته است. در قبال این محدودیت‌ها، ادوات فکت نقش مهمی در عملکرد سیستم‌های قدرت دارند. از خانواده‌ی این وسایل کنترل سیستم‌های قدرت، می‌توان جبران‌کننده‌ی استاتیکی (SVC) و جبران‌کننده‌ی سری کنترل ترستور (TCSC) را نام برد که برای کاهش تلفات، پایداری استاتیکی ولتاژ، مدیریت تراکم خطوط انتقال و غیره استفاده می‌شوند. مسئله‌ی مهم در استفاده از این وسایل، تعیین مکان مناسب این تجهیزات است؛ زیرا در غیر این صورت، نتایج درست و مقبولی حاصل نمی‌شود. در این مقاله به کمک تخمین‌زن فازی محل مناسب SVC و TCSC را معلوم می‌کنیم تا پایداری استاتیکی ولتاژ در باس‌ها را افزایش دهیم. روش پیشنهادی به کمک نرم‌افزار Matlab و بسته‌ی نرم‌افزاری Matpower4 بر روی شبکه‌های ۱۴ و ۳۰ باس IEEE آزمایش شده و نتایج مقبولی به دست داده است. برای مطالعه‌ی پایداری استاتیکی ولتاژ از اعمال پخش بار تداومی (cpf)^۱ به کمک روش نیوتن رافسون استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی

ادوات فکت، پایداری استاتیکی ولتاژ، پخش بار تداومی، تخمین‌زن فازی، روش نیوتن رافسون.

* نویسنده‌ی مسؤول مکاتبات: alipour1352791@gmail.com

۱. مقدمه

سال‌هاست که در سیستم‌های قدرت، مسئله‌ی فروپاشی ولتاژ بخشی از نگرانی‌های صنایع الکتریکی بوده است. حوادث ناشی از فروپاشی و ناپایداری ولتاژ از موضوعات خیلی مهم در سراسر جهان است (Canizares, 1998). فروپاشی ولتاژ فرایندی تعریف می‌شود که در آن، اتفاقات مکرر همراه با ناپایداری ولتاژ سبب قطع یا کاهش غیرطبیعی ولتاژ در قسمت‌های مهم سیستم قدرت می‌شود، ولی ناتوانی سیستم قدرت در حفظ ولتاژ قابل قبول در همه‌ی باس‌ها، اختلالاتی در سیستم قدرت در پی خواهد داشت (kundur et al., 2004: 1387-1401). مثلاً در سیستم‌های قدرتی که مصرف‌کننده‌های زیادی را تغذیه می‌کنند، یا خطایی رخ داده است، یا کمبود توان راکتیو دارند، ناپایداری ولتاژ و در نهایت فروپاشی ولتاژ اتفاق می‌افتد (kundur et al., 2004: 1387-1401; Faur, 1996). نقطه‌ی فروپاشی ولتاژ به‌عنوان نقطه حداکثر بارگذاری سیستم‌های قدرت سیستم‌های قدرت شناخته می‌شود (Canizares, 1998). حد بارگذاری یک سیستم مقدار توانی است که سیستم بدون فروپاشی ولتاژ می‌تواند تأمین کند (Faur, 1996). بنابراین مسئله‌ی فروپاشی ولتاژ ارتباط نزدیکی با برنامه‌ریزی توان راکتیو دارد و برای افزایش امنیت سیستم قدرت از نظر فروپاشی ولتاژ، ذخیره‌ی توان راکتیو در سیستم در شرایط مناسب، ضروری است (Yorino et al., 2003: 3-10). از طرفی ادوات فکت به‌طور مستقیم یا با کنترل توان انتقالی از خطوط انتقال، کمک شایانی به بهبود عملکرد سیستم انتقال می‌کنند و پایداری سیستم قدرت را ارتقاء می‌بخشند (Zhang et al., 2007: 1819-1825). در سال‌های اخیر، تقاضای حداکثری مصرف و انتقال توان بین سیستم‌ها و تجهیزات، نگرانی‌ها درباره‌ی امنیت ولتاژ سیستم را دوچندان کرده است (Aijarapu & Chisty, 1992: 423-426). عملکرد سیستم‌های قدرت همراه با افزایش تقاضای نیاز برق، در سراسر دنیا بسیار مهم می‌شود. افزایش این نیاز، سیستم‌های برق را وادار می‌کند تا به‌دلیل محدودیت‌های محیطی و اقتصادی نزدیک حد بحران کار کنند. از طرفی مصرف انرژی با ولتاژ و فرکانس قابل قبول و با حداقل هزینه توسط مصرف‌کنندگان، موضوعات مهمی در عملکرد سیستم‌های انتقال برق است. ضریب اطمینان و امنیت از جمله پارامترهای مهم برای سیستم‌های برق هستند که باید اعمال شوند. منظور از ضریب اطمینان این است که سیستم در صورت تغییر نیاز به انرژی، دارای منابع و ذخایر کافی باشد. منظور از امنیت این است که با بروز رویدادهای احتمالی، سیستم می‌تواند به حالت اولیه بازگردد و همان خدمات را با همان کیفیت ارائه دهد. همه این اهداف با برنامه‌ریزی درست، و کنترل سیستم‌های تولید و انتقال برق قابل تحقق است. از آنجا که واحدهای تولید و انتقال باید در محدوده‌های بحران عمل کنند، مسائل ناپایداری ولتاژ در سیستم برق زمانی روی می‌دهد که نیاز به انرژی افزایش یابد و واحدهای تولید، پاسخگو نباشند. ناپایداری ولتاژ یکی از مسائل اصلی در سیستم‌های برق است. در مورد ناپایداری ولتاژ، باید گفت که ولتاژ

همه یا تعدادی از باس بارها به دلیل دریافت توان ناکافی، کاهش می‌یابند. در مورد ایجاد پایداری ولتاژ در زمان ناپایداری، خاموشی‌های جدی در بخش بزرگی از یک سیستم روی می‌دهد (Larsson, 2000). این خاموشی‌ها می‌تواند موجب بروز مسائل اقتصادی و اجتماعی شود. در واقع بیش از ۵۰ مورد بی‌ثباتی یا افت ولتاژ در سراسر جهان بین سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۹۶ گزارش شد. برای مثال افت ولتاژ در سیستم برق شمال آمریکا در دوم جولای ۱۹۹۶ موجب قطع و توقف خدمات‌رسانی به بیش از شش میلیون نفر شد (همان). رایج‌ترین روش‌های تجزیه و تحلیل پایداری ولتاژ، روش پخش بار تداومی، نقطه‌ی شکست، حداقل مقدار منفرد، و روش‌های بهینه‌سازی است. با رشد و پیشرفت سریع سیستم انتقال، خصوصاً استفاده‌ی روزافزون از امکانات انتقال به دلیل افزایش تولید صنایع، لازم است روش‌های جدید افزایش انتقال برق را با امکانات موجود در سیستم‌های انتقال کشف کرده و سطوح ضریب اطمینان و پایداری را حفظ کنیم. به عبارتی، رشد و پیشرفت سریع فناوری برق سبب تولید FACTS^۲ (سیستم انتقال AC انعطاف‌پذیر) شد. این سیستم بهترین سیستم برق در آینده است. کنترل‌کننده‌های FACTS اعم از جبران‌کننده‌ی همزمان استاتیکی (STATCOM^۳)، جبران‌کننده‌ی استاتیکی (SVC^۴)، جبران‌کننده‌ی سری کنترل تریستور (TCSC^۵)، جبران‌کننده‌ی سری همزمان استاتیکی (SSSC^۶) و کنترل‌کننده‌ی جریان برق (UPFC^۷) از جمله سیستم‌هایی هستند که می‌توانند پارامترهای شبکه را به سرعت و به روش مؤثری تغییر دهند و عملکرد سیستم را بهینه سازند (Hingorani & Gyugyi, 1999; Acha et al., 2004; Edris, 2000: 4-9; Marthur & Varma, 2002). این کنترل‌کننده‌ها برای تقویت عملکرد دینامیکی سیستم‌های برق برحسب ثبات زاویه/ولتاژ، ضمن بهبود قابلیت انتقال توان و پروفایل ولتاژ در شرایط حالت پایدار استفاده می‌شوند (Kirschner et al., 2005, 1-7; Yan & Chanan, 2001: 944-948; Perez et al., 2000: 1115-1120; Xingbin et al., 2003: 73-78; Pilotto et al., 1997: 364-371).

سیستم جبران‌کننده‌ی استاتیکی SVC، نوعی کنترل‌کننده بر مبنای راکتور TCR^۸ است. SVC برای تنظیم ولتاژ استفاده می‌شود (Hassan & Cheng, 2009). SVC به عنوان عناصر جبران‌کننده‌ی موازی برای حفظ ولتاژ باس‌ها استفاده می‌شوند و حد بارگذاری سیستم را افزایش می‌دهند. TCSC‌ها خازن‌های سری هستند که همراه با سیستم کنترلی خود برای تغییر راکتانس سری خط، سبب کاهش تلفات راکتو خط و تثبیت ولتاژ و افزایش حد بارپذیری سیستم می‌شوند؛ بنابراین در خطوط انتقالی که با افزایش بار کار می‌کنند، استفاده می‌شوند (Mollazei et al., 2007; Mínguez et al., 2007).

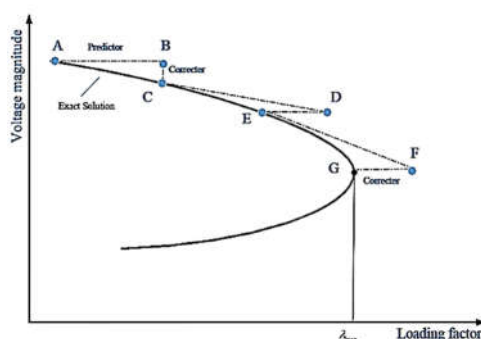
سیستم کنترل‌کننده‌ی یکنواخت توان (UPFC) از طریق توان واکنشی و کنشی قادر به کنترل است. از میان سیستم‌های FACTS، سیستم UPFC سیستمی بسیار ساده و روان است که می‌توان از آن در بهبود

پایداری حالت دائمی، پایداری دینامیکی و پایداری موقتی و گذرا استفاده کرد (Saadat, 2004). UPFC سیستمی است که می‌تواند با سه پارامتر الکتریکی عمل کند: ولتاژ خط، مقاومت ظاهری خط و زاویه‌ی فاز که این پارامترها توان انتقالی را تعیین می‌کنند. در سیستم‌های قدرت، در عمل، باس‌های مختلف سیستم، حساسیت‌های متفاوتی به پایداری ولتاژ در سراسر سیستم قدرت دارند. بعضی از باس‌ها حساسیت کمتر و بعضی حساسیت بیشتری دارند. مکان مناسب ادوات فکت می‌تواند پایداری ولتاژ را بهبود ببخشد (Zhang et al., 2007: 1819-1825). از این رو معیارهای متفاوتی برای تعیین مکان مناسب این ادوات استفاده و پیشنهاد می‌شود (Mansour et al., 1994: 757-763; Pilotto et al., 1997: 364-371; Verma, 2005; Sharma, 2006; Farsangi et al., 2006: 274-279).

این مقاله بر مکان‌یابی SVC و TCSC به کمک تخمین‌زن فازی برای پایداری استاتیکی ولتاژ باس‌ها متمرکز می‌شود. در قسمت ۲، پخش بار تداومی و در قسمت ۳ پایداری ولتاژ بررسی می‌شود. در قسمت ۴ عوامل موثر بر پایداری ولتاژ را بیان می‌کنیم. در قسمت ۵ فروپاشی ولتاژ را شرح می‌دهیم. در بخش ۶ به مدل‌های SVC و TCSC پرداخته شده است. قسمت ۷ به تخمین‌زن فازی اختصاص دارد. در قسمت ۸ نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های ۱۴ و ۳۰ باس و در نهایت در قسمت ۹ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهیم داشت.

۲. پخش بار تداومی

در پخش بار مرسوم، ماتریس ژاکوبین در محدوده‌ی پایداری ولتاژ، منفرد می‌شود که برای حل این مشکل از پخش بار تداومی استفاده می‌شود (Ajarapu & Christy, 1992). شکل ۱ طرح پیش‌بینی‌کننده - اصلاح‌کننده در حین پخش بار تداومی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. طرح پیش‌بینی‌کننده - اصلاح‌کننده در حین پخش بار تداومی
(Sarfi & Marefatjou, 2012: 803-809)

معادله‌های استفاده شده در پخش بار نیوتن - رافسون به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$P_i - \sum_{h=1}^N Y_{ij} V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (۱)$$

$$Q_i - \sum_{h=1}^N Y_{ij} V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (۲)$$

معادله‌ی جدید پخش بار با در نظر گرفتن ضریب بار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{Li} = P_{L0} + \lambda(K_{Li} S_{\Delta base} \cos \Phi_i) \quad (۳)$$

$$Q_{Li} = Q_{L0} + \lambda(K_{Li} S_{\Delta base} \sin \Phi_i) \quad (۴)$$

که P_{L0} و Q_{L0} به ترتیب میزان بار اکتیو و راکتیو اصلی در باس آم و λ پارامتر بار است. K_{Li} ضریبی است که همزمان با تغییر λ درصد تغییر بار را در باس آم مشخص می‌کند. $S_{\Delta base}$ کمیتی فرضی است که برای درجه بندی مقیاس و λ استفاده می‌شود. $\cos \Phi_i$ و $\sin \Phi_i$ به ترتیب ضریب توان اکتیو و راکتیو بار در باس آم هستند.

معادله‌ی پخش بار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F(\partial, V, \lambda) = 0 \quad (۵)$$

پس توان تولیدی اکتیو در باس آم به صورت معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

$$P_{Gi} = P_{G0} + (1 + \lambda K_{Gi}) \quad (۶)$$

P_{G0} و P_{Gi} به ترتیب مقدار اولیه‌ی توان اکتیو تولیدی و توان اکتیو تولیدی در باس آم و K_{Gi} ضریب ثابتی است که نرخ تغییرات تولید را بیان می‌کند. برای حل این مسئله، الگوریتم تداومی از مقدار معینی شروع می‌شود و از طرح پیش‌بینی کننده - اصلاح کننده برای یافتن راه حل‌هایی در سطوح مختلف بار استفاده می‌کند (Kalaivani & Kamaraj, 2011: 144-154).

۳. پایداری ولتاژ

پایداری سیستم قدرت را می‌توان به دو نوع تقسیم کرد: پایداری ولتاژ و پایداری زاویه، پایداری زاویه‌ی روتور، توان ماشین‌ها یا سیستم‌های سنکرون به هم متصل از یک سیستم قدرت است که در حالت سنکرون باقی می‌ماند (Kundur, 1994). در این نوع پایداری، معادلات زاویه - توان به راحتی حل می‌شوند؛ زیرا توان خروجی یک ماشین سنکرون با نوسان روتور، تغییر می‌کند. پایداری ولتاژ، توانایی یک

سیستم قدرت به حفظ ولتاژهای مطلوب در همه‌ی باس‌های در شرایط نرمال و بعد از خرابی است (همان). پایداری ولتاژ با تولید و انتقال انرژی کافی تحقق می‌یابد. واحدهای تولید و انتقال ظرفیت‌های مشخصی دارند. این ظرفیت‌ها نباید در سیستم قدرت سالم و ایمن از حد متعارف تجاوز کند. مسئله‌ی پایداری ولتاژ زمانی مطرح می‌شود که سیستم به شدت بارگیری شده باشد و همین، ظرفیت سیستم برق را از حد متعارف خارج می‌کند. سیستم برق زمانی وارد حالت بی‌ثباتی ولتاژ می‌شود که خرابی سیستم، افزایش مصرف، یا تغییر شرایط سیستم موجب افت پی در پی و کنترل‌ناپذیر ولتاژ شود. عامل اصلی که موجب ناپایداری ولتاژ می‌شود، ناتوانی سیستم قدرت در رفع نیاز توان راکتیو بارهاست (همان).

۴. عوامل تأثیرگذار بر پایداری ولتاژ

دلیل اصلی ناپایداری ولتاژ، کافی نبودن توان راکتیو در یک سیستم است که محدودیت‌های توان راکتیو ژنراتور و نیاز توان راکتیو در خطوط انتقال از دلایل اصلی آن است.

۴-۱. محدودیت‌های توان راکتیو ژنراتورها

ژنراتورهای سنکرون، سیستم‌هایی برای کنترل ولتاژ و کنترل توان راکتیو در سیستم‌های برق محسوب می‌شوند. در زمان تحلیل و آنالیز پایداری ولتاژ، قیود توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها نقش مهمی دارند. از جمله دلایل محدودیت توان راکتیو جلوگیری از صدمه رسیدن به سیم‌پیچ‌های تحریک و استاتور است که محدودیت جریان استاتور و محدودیت جریان تحریک را در پی خواهد داشت (Repo, 2001).

۴-۲. خطوط و مدارهای انتقال

انتقال توان اکتیو و راکتیو با خطوط و مدارهای انتقال صورت می‌گیرد. از آنجا که مدارهای انتقال عموماً طویل هستند، انتقال توان راکتیو با این مدارها به دلیل نیاز توان راکتیو، بسیار دشوار است (Ajjarapu & Christy, 1992: 423-426).

۵. فروپاشی ولتاژ

فروپاشی ولتاژ فرایندی است که رویدادهایی همراه با بی‌ثباتی مکرر ولتاژ، به کاهش ولتاژ در بخشی از سیستم منجر می‌شود. زمانی که سیستم قدرت تحت افزایش ناگهانی نیاز به توان راکتیو قرار گیرد، این نیاز با ذخایر توان راکتیو که از ژنراتورها و سیستم‌های جبران تأمین می‌گردد، رفع می‌شود. بیشتر اوقات،

این کار زمانی اعمال می‌شود که ذخایر کافی موجود باشد. گاهی، امکان رفع این نیاز به‌دلیل ترکیب رویدادها و شرایط سیستم وجود ندارد، از این‌رو فروپاشی ولتاژ و قطع همه یا قسمتی از سیستم روی می‌دهد (Kundur, 1994). برخی ابزارها چون تنظیم‌کننده‌ی اتوماتیک ولتاژ (AVRs) و تپ‌چنجر ترانسفورماتورهای قدرت، برای جبران کاهش توان راکتیو استفاده می‌شود. امروزه با پیشرفت الکترونیک قدرت، برای جبران توان راکتیو مورد نیاز ادوات فکت به‌کار برده می‌شود (Hingorani & Gyugyi, 1999; Acha et al., 2004; Edris, 2000: 4-9; Marthur & Varma, 2002).

۶. مدل‌های SVC و TCSC

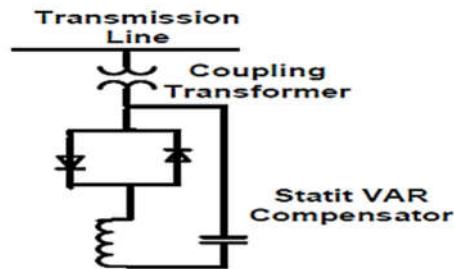
۶-۱. جبران‌کننده‌ی استاتیکی ولت آمپر راکتیو (SVC)

سیستم جبران‌کننده‌ی استاتیکی SVC، سیستمی الکتریکی است که در شبکه‌ی انتقال با ولتاژ بالا، توان راکتیو را با عملکرد سریع تأمین می‌کند (Deb, 2000; Song, & Johns, 1999). آنها از خانواده‌ی ادوات فکت هستند که ولتاژ را تنظیم و سیستم را پایدار می‌کنند (Hingorani & Gyugyi, 1999; Ryan, 2001: 160-161). برخلاف کندانسور سنکرون، سیستم جبران‌کننده‌ی SVC هیچ بخش متحرکی (غیر از دنده کلید) ندارد. قبل از اختراع SVC، جبران ضریب توان به کمک کندانسورهای سنکرون یا بانک‌های خازن انجام می‌شد. SVC یک سیستم اتومات تطبیق‌دهنده‌ی مقاومت ظاهری است که برای نزدیک کردن سیستم به ضریب توان واحد طراحی شده است. SVC‌ها در دو مکان از سیستم قدرت استفاده می‌شوند:

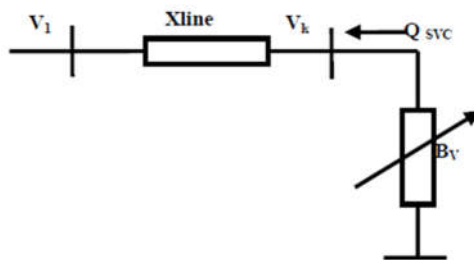
۱. متصل به سیستم‌های قدرت جهت تنظیم ولتاژ انتقال (SVC انتقال)؛

۲. نصب در نزدیک بارهای صنعتی بزرگ برای اصلاح ضریب توان (SVC صنعتی).

در کاربردهای سیستم انتقال، SVC ولتاژ شبکه را تنظیم می‌کند. اگر توان راکتیو سیستم از نوع خازنی باشد، SVC از راکتورهای که با تریستور کنترل می‌شوند برای مصرف توان راکتیو استفاده می‌کند و ولتاژ سیستم را کاهش می‌دهد. در شرایط بارگذاری القایی سیستم انتقال، بانک خازن به‌طور اتوماتیک راه‌اندازی می‌شود و از این طریق ولتاژ سیستم را افزایش می‌دهد. با اتصال راکتوری که با تریستور کنترل می‌شود و پیوسته تغییر می‌کند، همراه با بانک خازنی پله‌ای، به‌طور پیوسته توان راکتیو خازنی و سلفی تولید می‌کند. شکل ۲ مدل الکتریکی SVC را نشان می‌دهد. در این مقاله از حالت خازنی SVC استفاده شده که بلوک دیاگرام در شکل ۳ نشان داده شده است.



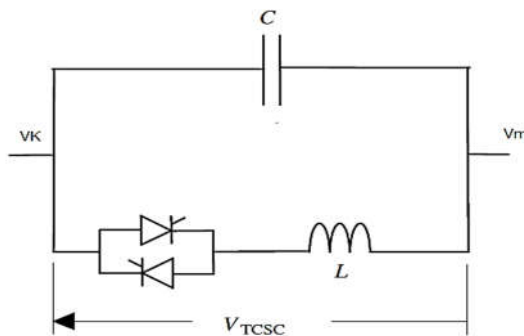
شکل ۲. مدل الکتریکی SVC (Sarvi & Marefatjou, 2012: 803-809)



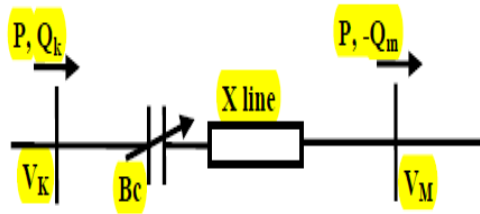
شکل ۳. بلوک دیاگرام یک SVC در مود خازنی

۲-۶. خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC)

خازن سری کنترل شده با تریستور می‌تواند برای کاهش راکتانس سری خط برای تثبیت ولتاژ در سمت دریافت توان و همچنین برای جلوگیری از شکست ولتاژ استفاده شود. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب مدل الکتریکی و بلوک دیاگرام آن را نشان می‌دهند



شکل ۴. مدل الکتریکی یک TCSC (Kundur, 1994)



شکل ۵. بلوک دیاگرام یک TCSC (همان)

۷. تخمین‌زن فازی استفاده شده

در این تحقیق از یک سیستم فازی برای تعیین مکان مناسب SVC و TCSC استفاده شد. هدف اصلی از این جایابی، بهبود پایداری استاتیکی ولتاژ در سیستم انتقال انرژی الکتریکی است. ورودی‌های سیستم فازی تحت مطالعه در مورد SVC و TCSC با هم فرق می‌کنند، هر چند خروجی سیستم فازی مکان مناسب این ادوات است اما در اینجا به‌طور جداگانه بررسی می‌شوند.

۷-۱. تخمین‌زن فازی برای تعیین مکان مناسب SVC

برای این تخمین‌زن از یک سیستم فازی از نوع ممدانی استفاده شده است که به روش مرکز ثقل نافازی می‌شود و برای ترکیب استلزام‌ها از قاعده‌ی min-max استفاده شده است که ورودی‌های آن عبارت‌اند از: (۱) اندازه‌ی ولتاژ باس‌ها؛ (۲) توان ظاهری تزریقی به هر باس و (۳) ضریب حساسیت تلفات خطوط انتقال نسبت به تزریق توان راکتیو به باس‌ها. خروجی آن همان مکان مناسب SVC است. اندازه‌ی ولتاژ باس‌ها و توان تزریقی به هر باس به کمک پخش بار نیوتن - رافسون محاسبه می‌شود و ضریب حساسیت تلفات خطوط نسبت به تزریق توان راکتیو از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید.

ضریب حساسیت تلفات درواقع از مساوی صفر قرار دادن نسبت تغییرات تلفات انتقال به تغییرات تزریق توان راکتیو به باس به‌دست می‌آید. ارتباط تلفات خط انتقال به توان اکتیو و راکتیو تزریقی به باس طبق فرمول ۷ است (Bhattacharya et al., 2001).

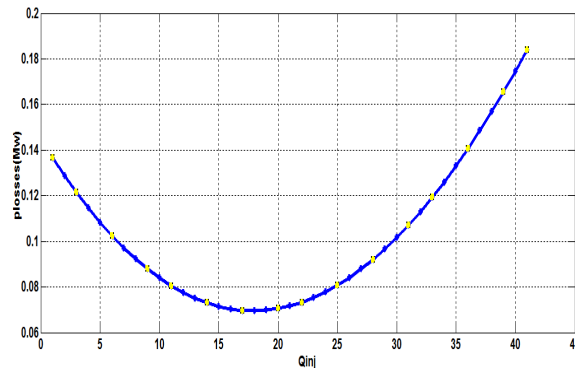
$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [\alpha_{i,j} (P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{i,j} (P_i Q_j - P_j Q_i)] \quad (7)$$

در فرمول ۷، P_i ، Q_i توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به باس‌ام است و ضرایب α ، β طبق روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند.

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (8)$$

$$\beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (9)$$

δ_i و r_{ij} به ترتیب زاویه‌ی ولتاژ باس i ام و مقاومت اهمی بین خط i زا است. براساس فرمول ۷، تلفات نسبت به توان راکتیو تزریقی از مرتبه‌ی دو است که نمودار آن مطابق شکل ۶ یک سهمی را تشکیل می‌دهد؛ پس در یک نقطه از این منحنی با تزریق توان راکتیو تلفات حداقل است.



شکل ۶. تغییرات تلفات کل سیستم با تغییر تزریق توان راکتیو به یک باس

با گرفتن مشتق و مساوی صفر قرار دادن مشتق، رابطه‌ی حساسیت تلفات به دست می‌آید که مطابق فرمول ۱۰ است.

$$SensL_i = \frac{\partial PL}{\partial Q_i} = 2 \sum_{j=1}^m (\alpha_{ij} Q_j + \beta_{ij} P_j) \quad (10)$$

در فرمول ۱۰، $SensL_i$ ضریب حساسیت تلفات است.

ورودی‌های تخمین‌زن فازی مطابق فرمول زیر نرمالیزه شده و سپس به تخمین‌زن اعمال می‌شوند.

$$y_{normaliz}(i) = \left(\frac{\max(y) - y(i)}{\max(y) - \min(y)} \right) \quad (11)$$

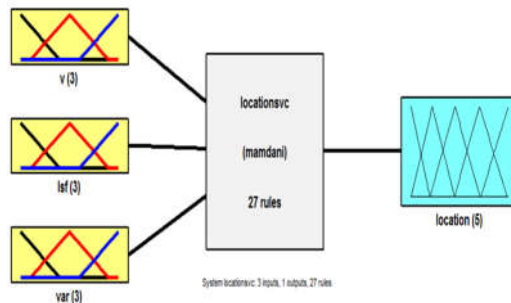
در فرمول ۱۱، y یک ورودی است که عنصر i ام آن نرمالیزه شده است.

هر کدام از ورودی‌ها و خروجی‌های تخمین‌زن به کمک توابع عضویتی به شرح زیر مدل می‌شوند:

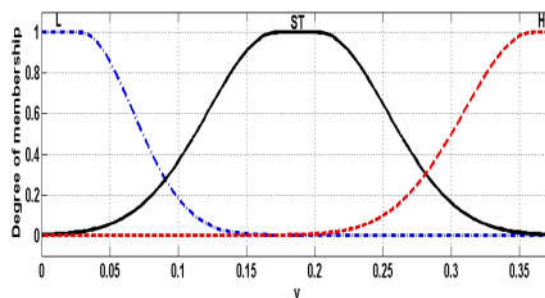
- متغیر ورودی ولتاژ باس‌ها دارای سه عضویت L و ST و H از نوع زنگوله‌ای؛
- متغیر ورودی ضریب حساسیت تلفات دارای سه عضویت N و Z و P از نوع زنگوله‌ای؛
- متغیر ورودی اندازه‌ی توان ظاهری تزریقی دارای سه عضویت L و ST و H از نوع زنگوله‌ای؛
- متغیر خروجی موقعیت SVC که دارای عضویت‌هایی به‌صورت Lm و m و n و mz و vmz است و از نوع مثلثی.

قوانین فازی حاکم بر سیستم استنتاج فازی که از نوع ممدانی است به‌صورت if- then هستند که پس از اعمال ورودی‌ها به FIS، خروجی مکان مناسب SVC را می‌دهد که خروجی بزرگ‌تر، مکان مناسب‌تر SVC است. L و ST و H به‌ترتیب به مفهوم کم و ثابت و زیاد و N و Z و P به‌ترتیب به مفهوم منفی و صفر و مثبت و Lm و m و n و mz و vmz به‌ترتیب به‌احتمال خیلی کم، احتمالاً، غیرممکن، به‌احتمال زیاد و به احتمال خیلی زیاد است.

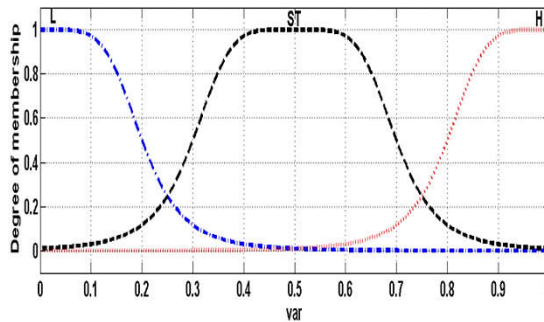
شکل‌های ۷ تا ۱۱، FIS و توابع عضویت‌های حاکم بر تخمین‌زن فازی را نشان می‌دهند.



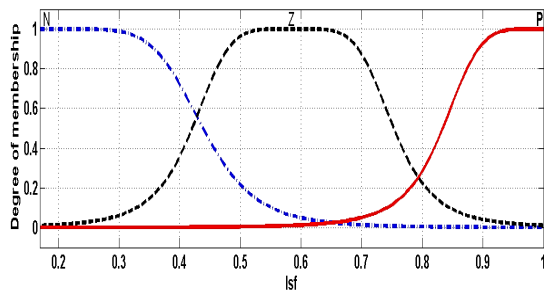
شکل ۷. FIS به کار گرفته شده



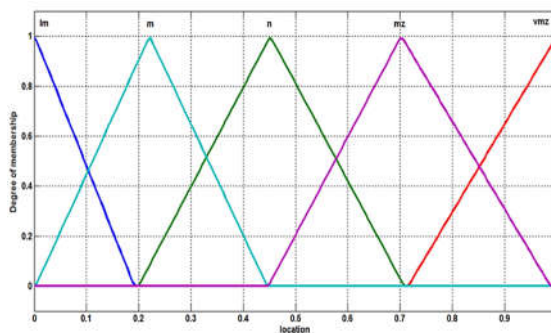
شکل ۸. تابع عضویت برای ورودی اندازه ولتاژ باس‌ها



شکل ۹. تابع عضویت برای ورودی اندازه‌ی توان ظاهری تزریقی باس‌ها



شکل ۱۰. تابع عضویت برای ورودی ضریب حساسیت تلفات راکتیو



شکل ۱۱. تابع عضویت برای خروجی تخمین‌زن فازی که موقعیت SVC را نشان می‌دهد.

۲-۷. تخمین‌زن فازی برای تعیین مکان مناسب TCSC

برای این تخمین‌زن از یک سیستم فازی از نوع ممدانی استفاده شده است که به روش مرکز ثقل نافازی می‌شود و برای ترکیب استلزام‌ها از قاعده‌ی min-max استفاده شده است که ورودی‌های آن عبارت‌اند از

(۱) مجموع ولتاژ باس‌ها با جابه‌جا کردن TCSC در هر خط انتقال؛ (۲) مجموع تلفات خطوط انتقال با جابه‌جا کردن TCSC در هر خط انتقال و خروجی تخمین‌زن مکان مناسب TCSC است. ورودی‌های مورد نظر مطابق فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند.

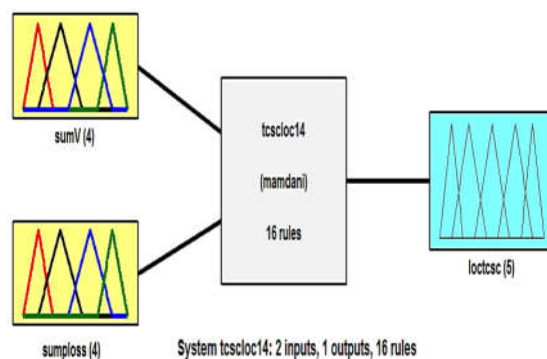
فرض کنیم TCSC در خط k ام نصب باشد؛ آن‌گاه مجموع ولتاژ باس‌ها و مجموع تلفات خطوط انتقال به‌ازای این TCSC را به‌صورت زیر به کمک پخش بار محاسبه می‌کنیم:

$$\text{sum}(V_k) = \sum_{i=1}^{n_{bus}} V_i \quad (12)$$

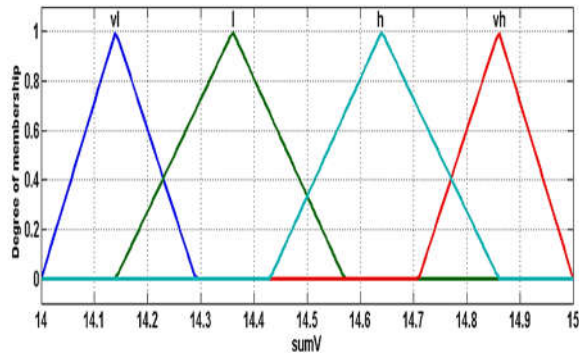
$$\text{sum}(Ploss_k) = \sum_{j=1}^{n_{line}} ploss_j \quad (13)$$

هرکدام از ورودی‌ها و خروجی‌های تخمین‌زن به کمک توابع عضویتی به‌شرح زیر مدل می‌شوند:

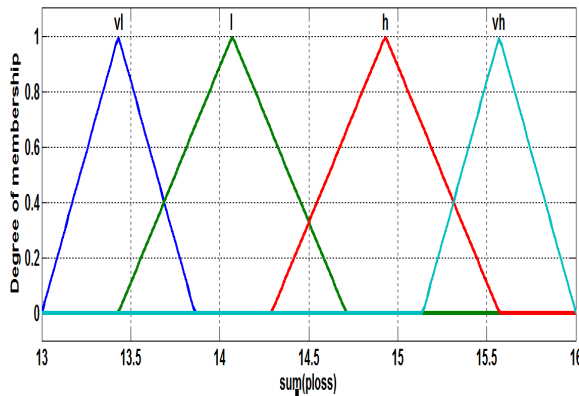
- مجموع ولتاژ باس‌ها نسبت به نصب TCSC در خط k ام با چهار عضویت VI-I-h-Vh به‌ترتیب مخفف خیلی زیاد، زیاد، کم و خیلی کم؛
 - مجموع تلفات خطوط انتقال نسبت به نصب TCSC در خط k ام با چهار عضویت VI-I-h-Vh به‌ترتیب مخفف خیلی زیاد، زیاد، کم و خیلی کم؛
 - خروجی که همان مکان TCSC است با ۵ تابع عضویت Vhp و hp و p و lp و vlp که به‌ترتیب، احتمال خیلی زیاد، احتمال زیاد، احتمالاً، احتمال کم و احتمال خیلی کم را بیان می‌کنند.
- شکل‌های زیر توابع عضویت‌ها و قوانین حاکم بر تخمین‌زن فازی را نشان می‌دهند.



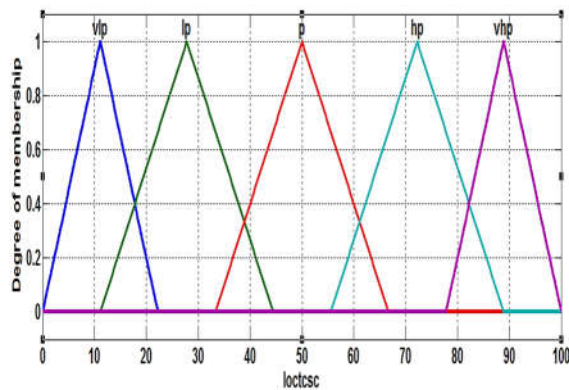
شکل ۱۲. FIS به کار گرفته شده



شکل ۱۳. تابع عضویت برای ورودی مجموع ولتاژ باس‌ها برای شبکه‌ی ۱۴ باس



شکل ۱۴. تابع عضویت برای ورودی تلفات حقیقی خط برای شبکه‌ی ۱۴ باس



شکل ۱۵. تابع عضویت برای خروجی تخمین‌زن فازی که موقعیت TCSC را نشان می‌دهد.

۸. نتایج شبیه‌سازی

۸-۱. تخمین مکان مناسب SVC و TCSC

۸-۱-۱. سیستم ۱۴ باس IEEE

اطلاعات این شبکه در مرجعی (Zimmerman & Murillo-Sanchez, 2007) آمده است. این شبکه از ۵ ژنراتور و ۲۰ خط انتقال تشکیل شده است که دارای ۱۱ باس بار است. کل تولید در این سیستم 272.4+78.5j مگاوات آمپر و کل بار شبکه 259+77.4j مگاوات آمپر است. مکان مناسب SVC و TCSC با توجه به تخمین‌زن‌های فازی طراحی شده در قسمت قبل، به‌ترتیب در باس ۹ و خط ۱۴ است. جدول‌های ۱ و ۲ خروجی تخمین‌زن فازی برای هر خط و هر باس را نشان می‌دهند. در این جدول‌ها مکان مناسب ادوات به‌ازای بیشترین درصد تخمین تعیین می‌شود که به‌صورت پررنگ در جدول‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱. خروجی تخمین‌زن فازی برای هر خط در شبکه‌ی ۱۴ باس (مکان TCSC)

درصد خروجی تخمین‌زن	از باس-به باس	شماره‌ی خط
۵۰	۱-۲	۱
۵۰	۱-۵	۲
۷۲/۲۱۷۹	۲-۳	۳
۵۰	۲-۴	۴
۵۹/۱۹۷۷	۲-۵	۵
۷۲/۲۱۹۰	۳-۴	۶
۷۲/۲۱۹۲	۴-۵	۷
۷۲/۲۱۹۵	۴-۷	۸
۷۲/۲۱۸۹	۴-۹	۹
۷۲/۲۱۵۷	۵-۶	۱۰
۷۲/۲۱۸۳	۶-۱۱	۱۱
۷۲/۲۱۹۶	۶-۱۲	۱۲
۷۲/۲۱۷۸	۶-۱۳	۱۳
۷۴/۱۲۵	۷-۸	۱۴
۷۲/۲۱۷۹	۷-۹	۱۵
۷۲/۲۱۹۴	۹-۱۰	۱۶
۷۲/۲۱۹۷	۹-۱۴	۱۷
۷۲/۲۱۹۲	۱۰-۱۱	۱۸
۷۲/۲۱۹۰	۱۲-۱۳	۱۹
۷۲/۲۱۹۴	۱۳-۱۴	۲۰

جدول ۲. خروجی تخمین زن فازی برای هر باس در شبکه‌ی ۱۴ باس (مکان SVC)

شماره‌ی باس	درصد خروجی تخمین زن
۱	۱۷/۶۰۱۵
۲	۶۳/۷۹۶۵
۳	۴۵/۲۳۸۸
۴	۲۹/۸۵۹۹
۵	۲۹/۵۰۰۸
۶	۳۷/۵۷۲۲
۷	۴۷/۳۶۶۷
۸	۳۰/۱۷۹۴
۹	۹۰/۸۲۱۴
۱۰	۵۰
۱۱	۵۰
۱۲	۵۰
۱۳	۵۰
۱۴	۵۰

۸-۱-۲. شبکه‌ی ۳۰ باس IEEE

اطلاعات این شبکه در یکی از منابع (همان) آمده است. این شبکه از ۶ ژنراتور و ۴۱ خط انتقال تشکیل شده که دارای ۲۰ باس بار است. کل تولید در این سیستم $191.65+100.64$ مگاوات آمپر و کل بار شبکه $189.2+107.2$ مگاوات آمپر است. مکان مناسب SVC و TCSC طبق تخمین زن فازی طراحی شده به ترتیب باس‌های ۱۱ و ۲۰ و خطوط ۱۶ و ۳۶ است که در جدول‌های ۳ و ۴ نتایج خروجی FIS برای هر خط و باس آمده و مکان مناسب به صورت پررنگ نشان داده شده است.

۸-۲. تأثیر SVC و TCSC مکان‌یابی شده بر پایداری استاتیکی ولتاژ باس‌ها

در کلیه موارد TCSC به طور معمول، ۸۰ درصد راکتانس خط را جبران کرده و SVC به طور معمول درصدی از کل بار راکتیو شبکه پس از افزایش بار را تأمین می‌کند. در ابتدا تأثیر SVC و سپس تأثیر TCSC و در نهایت تأثیر هر دو با هم در شبکه‌های مورد نظر بررسی می‌شود.

جدول ۳. خروجی تخمین‌زن فازی برای هر خط در شبکه‌ی ۳۰ باس (مکان TCSC)

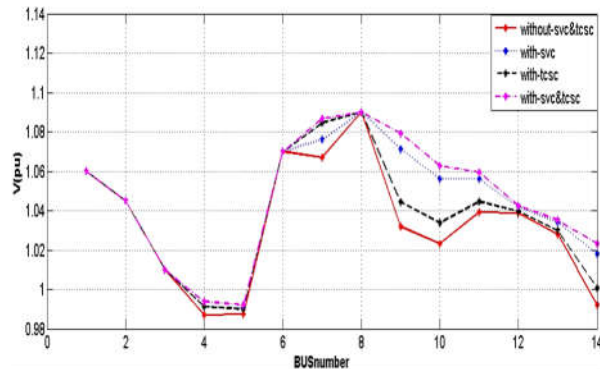
شماره‌ی خط	از باس - به باس	درصد خروجی تخمین‌زن
۱	۱-۲	۳۶/۳۱۰۲
۲	۱-۳	۴۰/۰۰۷۹
۳	۲-۴	۲۶/۵۸۰۸
۴	۳-۴	۳۸/۴۳۰۹
۵	۲-۵	۳۹/۶۴۰۰
۶	۲-۶	۲۸/۶۳۹۳
۷	۴-۶	۳۹/۸۹۱۰
۸	۵-۷	۳۸/۷۴۳۲
۹	۶-۷	۳۷/۹۱۵۱
۱۰	۶-۸	۳۹/۶۳۱۷
۱۱	۶-۹	۳۷/۲۳۳۱
۱۲	۶-۱۰	۹۲/۲۰۸۵
۱۳	۹-۱۱	۳۷/۸۱۴۸
۱۴	۹-۱۰	۴۰/۱۴۶۲
۱۵	۴-۱۲	۳۷/۸۰۹۰
۱۶	۱۲-۱۳	۵۰/۸۲۹۱
۱۷	۱۲-۱۴	۳۷/۵۹۲۵
۱۸	۱۲-۱۵	۳۶/۱۲۱۴
۱۹	۱۲-۱۶	۳۶/۳۰۲۸
۲۰	۱۴-۱۵	۳۷/۸۲۰۳
۲۱	۱۶-۱۷	۳۷/۲۹۱۹
۲۲	۱۵-۱۸	۳۶/۴۵۱۶
۲۳	۱۸-۱۹	۳۷/۳۳۶۳
۲۴	۱۹-۲۰	۳۸/۲۹۶۴
۲۵	۱۰-۲۰	۴۱/۵
۲۶	۱۰-۱۷	۳۹/۲۱۸۷
۲۷	۱۰-۲۱	۴۲/۳۷۱۲
۲۸	۱۰-۲۲	۴۰/۷۰۷۵
۲۹	۲۱-۲۲	۴۰/۹۱۷۵
۳۰	۱۵-۲۳	۴۱/۴۵۰۵
۳۱	۲۲-۲۴	۳۷/۸۴۹۰
۳۲	۲۳-۲۴	۳۷/۸۰۷۶
۳۳	۲۴-۲۵	۳۶/۸۴۰۸
۳۴	۲۵-۲۶	۳۹/۷۵۰۸
۳۵	۲۵-۲۷	۳۶/۰۶۹۸
۳۶	۲۸-۲۷	۴۹/۵۷۹۸
۳۷	۲۷-۲۹	۳۸/۳۸۶۹
۳۸	۳۰-۲۷	۳۶/۷۱۹۱
۳۹	۲۹-۳۰	۳۷/۶۴۲۵
۴۰	۸-۲۸	۳۷/۲۸۸۵
۴۱	۶-۲۸	۳۷/۹۲۵۸

جدول ۴. خروجی تخمین‌زن فازی برای هر باس در شبکه‌ی ۳۰ باس (مکان SVC)

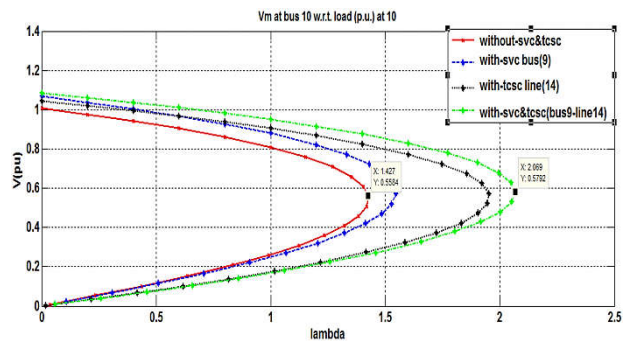
شماره‌ی باس	درصد خروجی تخمین‌زن
۱	۳۸/۷۷۸۳
۲	۲۱/۳۴۷۲
۳	۱۴/۹۳۵۳
۴	۱۲/۵۹۳۷
۵	۲۶/۷۵۴۵
۶	۶/۷۵۶۴
۷	۶/۴۰۱۷
۸	۱۶/۴۱۱۴
۹	۱۲/۵۰۱۳
۱۰	۳۰/۴۸۱۵
۱۱	۶۸/۵۷۵۲
۱۲	۱۸/۰۱۰۳
۱۳	۶/۳۷۲۰
۱۴	۳۲/۹۷۴۵
۱۵	۶/۳۶۲۱
۱۶	۲۶/۱۴۶۱
۱۷	۹/۵۴۶۷
۱۸	۱۸/۶۴۶۱
۱۹	۶۱/۸۴۲۳
۲۰	۷۱/۳۲۶۶
۲۱	۲۱/۷۰۴۷
۲۲	۵۴/۵۶۲۶
۲۳	۲۱/۰۶۶۲
۲۴	۲۲/۳۲۰۹
۲۵	۵۰
۲۶	۵۰
۲۷	۵۰
۲۸	۵۰
۲۹	۲۲/۳۷۰۸
۳۰	۵۰

۸-۲-۱. شبکه‌ی ۱۴ باس

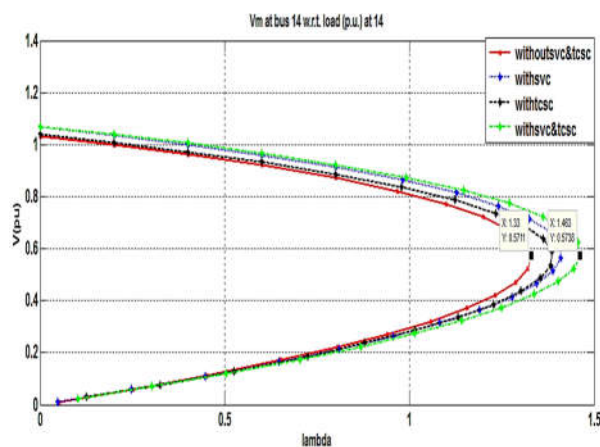
برای بررسی تأثیر SVC و TCSC در این شبکه ابتدا بار اکتیو و راکتیو شبکه را ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهیم تا شبکه دچار بحران شود؛ سپس تأثیر SVC و TCSC را بررسی می‌کنیم. یک SVC با مقدار ۶۰ مگاوات آمپر را در باس شماره‌ی ۹ قرار می‌دهیم؛ سپس به کمک روش cpf ضریب بارگذاری روی هر باس را محاسبه می‌کنیم. شکل‌های زیر پروفایل ولتاژ و منحنی cpf شبکه‌ی مورد نظر را با SVC و TCSC نشان می‌دهند.



شکل ۱۶. پروفایل ولتاژ شبکه‌ی ۱۴ باس با نصب SVC و TCSC در آن



شکل ۱۷. منحنی cpf شبکه‌ی ۱۴ باس برای باس ۱۰ با نصب SVC و TCSC در آن



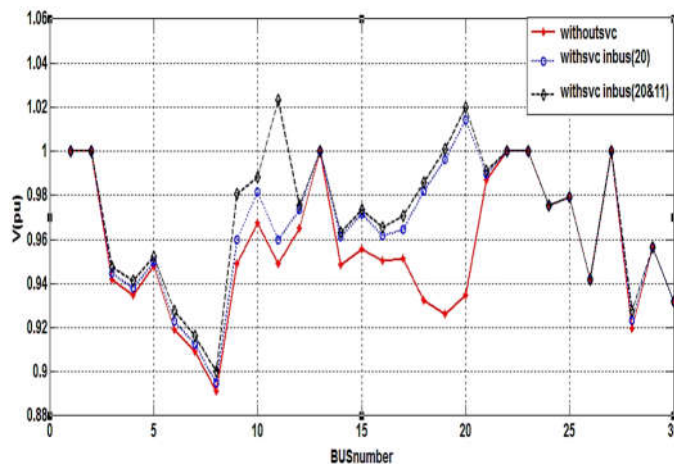
شکل ۱۸. منحنی cpf شبکه‌ی ۱۴ باس برای باس ۱۴ با نصب SVC و TCSC

جدول ۷. مقدار λ در شبکه‌ی ۱۴ باس

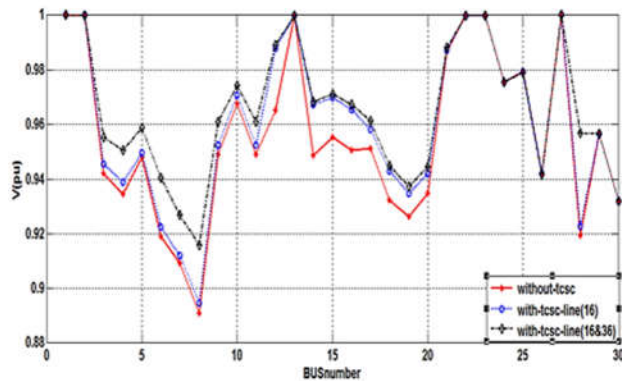
14bus	svc&tcsc-Without	with-svc	with-tcsc	with-svc&tcsc
λ Bus10	۱/۴۲۷	۱/۵۴۷	۱/۹۵۳	۲/۰۶۹
λ Bus14	۱/۳۳	۱/۴۱۰	۱/۳۸۶	۱/۴۵۶

۸-۲-۲. شبکه‌ی ۳۰ باس

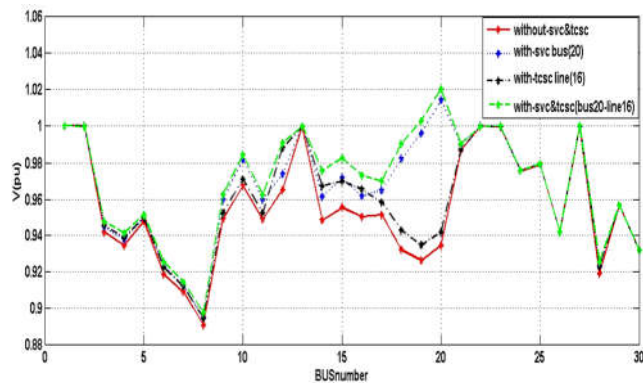
برای بررسی تأثیر SVC و TCSC در این شبکه ابتدا بار اکتیو و راکتیو شبکه را ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهیم تا شبکه دچار تنش شود. سپس تأثیر SVC و TCSC را بررسی می‌کنیم. مطابق جدول‌های ۳ و ۴، در باس ۲۰ و خط ۱۶، احتمال مکان مناسب SVC و TCSC بیشتر است. ولی در اینجا علاوه بر این دو مورد، باس ۱۱ و خط ۳۶ که در اولویت بعدی هستند، نیز آزمایش می‌شوند. در ابتدا یک SVC به اندازه‌ی ۴۵ مگاوات آمپر را در باس شماره‌ی ۲۰ و سپس یک SVC با مقدار ۲۰ مگاوات آمپر را در باس شماره‌ی ۱۱ قرار می‌دهیم. برای بررسی اثر TCSC، ابتدا آن را در خط ۱۶ و پس در خط ۳۶ قرار می‌دهیم. سپس به کمک روش cpf ضریب بارگذاری روی هر باس را محاسبه می‌کنیم. شکل‌های زیر پروفایل ولتاژ و منحنی cpf شبکه‌ی مورد نظر را با SVC و TCSC نشان می‌دهند.



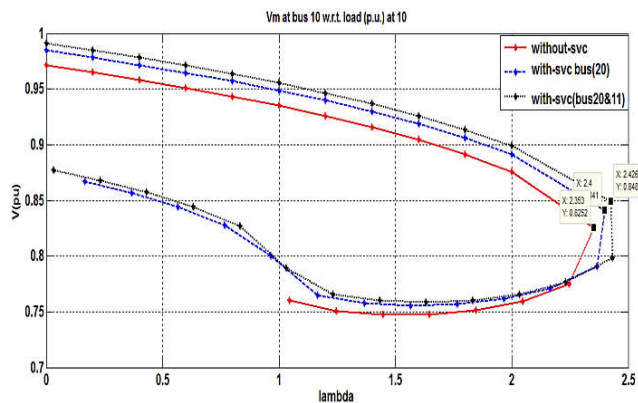
شکل ۱۹. پروفایل ولتاژ شبکه‌ی ۳۰ باس با نصب SVC



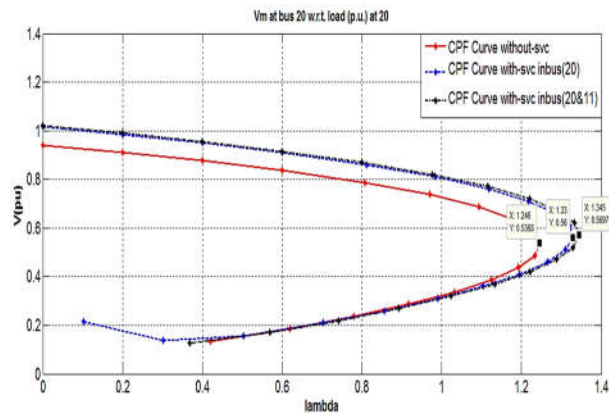
شکل ۲۰. پروفایل ولتاژ شبکه‌ی ۳۰ باس با نصب TCSC



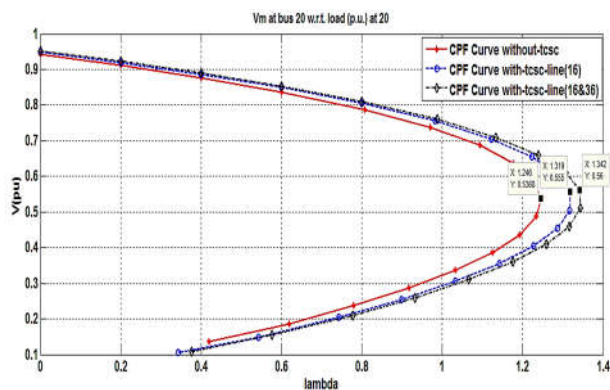
شکل ۲۱. پروفایل ولتاژ شبکه‌ی ۳۰ باس با نصب TCSC و SVC



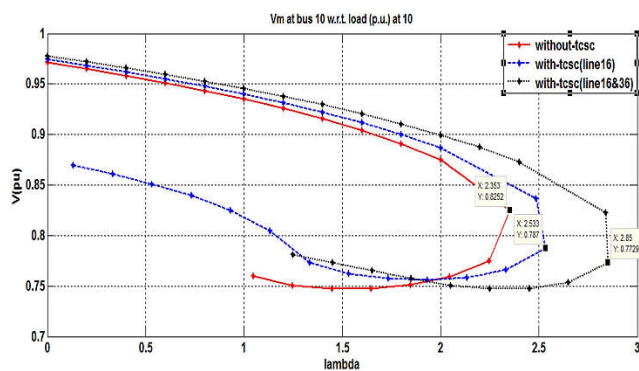
شکل ۲۲. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۱۰ با نصب SVC



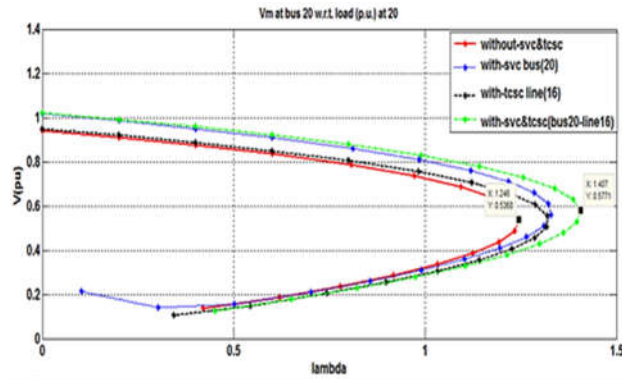
شکل ۲۳. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۲۰ با نصب SVC



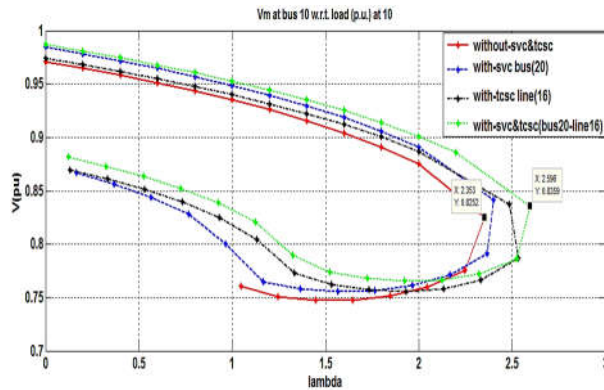
شکل ۲۴. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۲۰ با نصب TCSC



شکل ۲۵. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۱۰ با نصب TCSC



شکل ۲۶. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۲۰ با نصب SVC و TCSC



شکل ۲۷. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۱۰ با نصب SVC و TCSC

جدول ۸. مقدار λ در شبکه‌ی ۳۰ باس

30bus	λ Bus10	λ Bus20
Without-SVC & TCSC	۲/۳۵۳	۱/۲۴۶
with-SVC (20)	۲/۴	۱/۳۳
with-SVC (11 & 20)	۲/۴۳۲	۱/۳۴۵
with-TCSC (line16)	۲/۵۳۲	۱/۳۱۹
with-TCSC (line16 & 36)	۲/۸۵	۱/۳۴۲
with-SVC (20) & TCSC (16)	۲/۵۹۶	۱/۴۰۷

۹. نتیجه گیری

در این تحقیق مکان یابی SVC و TCSC به کمک تخمین زن فازی نشان داده شد. هدف کلی، جاییابی با رویکرد پایداری استاتیکی ولتاژ است. نتایج نشان می دهند اگر مکان مناسبی برای SVC و TCSC تعیین شود، این ادوات در بهبود پروفایل ولتاژ و پایداری استاتیکی ولتاژ سیستم کمک شایانی خواهند کرد. در اینجا از تخمین زن فازی برای یافتن مکان مناسب SVC و TCSC استفاده شده است و روش پیشنهادی به خوبی مکان مناسب را تخمین می زند. نتایج شبیه سازی بر روی شبکه های استاندارد ۱۴ و ۳۰، دلیلی بر صحت روش پیشنهادی است که در شبکه های پیچیده تر با خطوط انتقال و باس های بیشتری نیز به راحتی کاربرد دارد. همچنین از یافته های به دست آمده می توان نتیجه گرفت که استفاده ی همزمان از SVC و TCSC در شبکه های الکتریکی - در صورت داشتن توجیه اقتصادی - پایداری استاتیکی و ظرفیت بارگذاری سیستم را افزایش می دهد.

پی‌نوشت‌ها

1. Continuation Power Flow (CPF)
2. Flexible AC Transmission Systems (FATS)
3. Static Synchronous Compensator (STATCOM)
4. Static VAR Compensator (SVC)
5. Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)
6. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)
7. Unified Power Flow Controller (UPFC)
8. Thyristor Controlled Reactor (TCR)
9. Automatic Voltage Regulators (AVR)

منابع

1. Acha, E.; Fureret-Esquivel; G.R.; Ambriz-Perez, H. & Angeles-camacho, C. (2004), "FACTS: modeling and Simulation in power networks", John-Wiley & Sons, New York.
2. Ajarapu, V. & Christy, C. (Feb. 1992), "The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis", IEEE Trans. on power systems, Vol. 7, No. 1, pp. 426-423.
3. Bhattacharya, K.; Bollen, M.H.J, Daadler, J.E. (2001), "Operation of restructured power systems", by Chalmers University of Technology, Kluwer academic publishers.
4. Canizares, C.A. (1998), "Applications of optimization to voltage collapse analysis", IEEE/PES summer meeting, San Diego, July 14.
5. Deb, A.K. (2000), "Power line ampacity system: Theory, modeling and applications", CRC press, pp. 169–171, ISBN: 978-0-8493-1306-6.
6. Elgerd, I.O. (1971), "Electric energy system theory: An introduction", McGraw-Hill.
7. Edris, A. (2000), "FACTS technology development: An update", IEEE Eng. Rev. 20 (3), pp.4-9.
8. Faur, Z.T. (1996), "Effects of FACTS devices on static voltage collapse phenomena", M.S. dissertation, Dept. Elect. Eng., Univ. of Waterloo.
9. Farsangi, M.M; Nezamabadi-Pour, H. & Lee, K.Y. (2006), "Multiobjective VAR planning with SVC for a Large power system using PSO and GA", Power system conference & exposition, pp. 274-279.
10. Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. (1999), "Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible ac transmission systems", IEEE Press, New York.
11. Hassan, M.O.; Cheng, S.J. (March 2009), "Steady-state modeling of svc and tcsc for power flow analysis", IMECS 2009, Hong Kong.

12. Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. (1999), "Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible ac transmission systems", IEEE, ISBN: 0-7803-3455-8, VASE SVC 3 VA 4.
13. Kundur, P. (January 1994), "Power system stability and control", McGraw-Hill education; 1st edition. (1994).
14. Kundur, P.; Paserba, J.; Ajarapu, V.; Andersson, G.; Bose, A.; Canizares, C.A.; Hatziargyriou, N.; Hill, D.; Stankovic, A.; Taylor, C.; VanCutsem, T. & Vittal, V. (May 2004), "Definition and classification of power system stability", IEEE Trans. on power systems, Vol. 19, No. 2, pp.1387-1401.
15. Kirschner, L.; Retzmann, D.; Thumm, G. (2005), "Benefits of FACTS for power system enhancement", Transmission and distribution conference and exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES, pp.1-7.
16. Kalaivani, R., Kamaraj, V. (2011), "Modeling of shunt FACTS devices for voltage stability enhancement," ISSN 1450-216X, Vol. 61, No.1, pp. 144-154.
17. Larsson, M. (2000), "Coordinated voltage control in electric power systems", Doctoral dissertation, Lund University.
18. Mansour, Y. et al. (May 1994), "SVC placement using critical modes of voltage instability", IEEE Trans. on power systems, Vol. 9, No. 2, pp.757-763.
19. Marthur, M.R. & Varma, R.K. (2002), "Thyristor based-FACTS controllers for electrical transmission systems", John-Wiley & Sons, New York.
20. Mínguez, R.; Milano, F.; Zárate-Miñano, R. & Conejo, A.J. (Nov. 2007), "Optimal network placement of SVC devices", IEEE Trans. On power systems, Vol. 22, No. 4.
21. Mollazei, S. et al. (Nov. 2007), "Multi-objective optimization of power system performance with TCSC using the MOPSO algorithm", IEEE Trans.on power systems.
22. Pilotto, L.A.S.; Ping, W.W.; Carvalho, A.R.; Wey, A.; Long, W.F.; Alvarado, F.L. & Edris, A. (Jan. 1997), "Determination of needed FACTS controllers that increase asset utilization of power systems", Power delivery, IEEE transactions on, Vol. 12, Issue: 1, pp. 364 – 371.
23. Perez, M.A.; Messina, A.R.; Fuerte-Esquivel, C.R. (20 July 2000), "Application of FACTS devices to improve steady state voltage stability", Power engineering society summer meeting, IEEE, Vol. 2, 16, pp. 1115 – 1120.
24. Repo, S. (2001), "On-line voltage stability assesment of power system - an approach of black-box modelling", Tampere University of technology publications, #344.
25. Ryan, H.M. (2001), "High voltage engineering and testing", IEEE, pp. 160–161, ISBN 978-0-85296-775-1, VASE SVC 5.

26. Sharma, A.K. (2006), "Optimal number and location of tcsc and load ability enhancement in deregulated electricity markets using MINLP," International journal of emerging electric power systems, Vol. 5, Issue 1, Article 6.
27. Sarvi, M. & Marefatjou, H. (2012), "Performance of SVC and UPFC in static voltage stability margin enhancement in two area power system with continuation power flow method", International electrical engineering journal, Vol. 3 No. 3, pp. 803-809
28. Saadat, H.(2004), "Power system analysis", (Book style) McGraw-Hill international editions.
29. Song, Y.H. & Johns, A.T.(1999), "Flexible AC transmission systems", IEEE, ISBN 0-85296-771-3.
30. Verma, M.K. (2005), "Optimal placement of SVC for static and dynamic voltage security enhancement", international journal of emerging electric power systems, Vol. 2, Issue 2, Article 1050.
31. Xingbin, Y.; Chanan, S.; Jakovljevic, S.; Ristanovic, D. & Garng, H. (Sept. 2003) , "Total transfer capability considering FACTS and security constraints", Transmission and distribution conference and exposition, IEEE PES-Vol. 1, 7-12, pp.73 – 78.
32. Yan, O. & Chanan, S. (July 2001), "Improvement of total transfer capability using TCSC and SVC", Power engineering society summer meeting, IEEE, Vol. 2, 15-19, pp. 944-948.
33. Yorino, N.; El-Araby, E.E.; Sasaki, H. & Harada, S. (Feb. 2003), "A new formulation for FACTS allocation for security enhancement against voltage collapse", IEEE Trans, on power systems, Vol. 18, No. 1, pp.3-10.
34. Zhang, J.; Wen, J.Y.; Cheng, S.J. & Jia, M. (Nov. 2007), "A novel SVC allocation method for power system voltage stability enhancement by normal forms of diffeomorphism", IEEE Trans. on power systems, Vol. 22, No. 4, pp.1819-1825.
35. Zimmerman, R.D. & Murillo-Sanchez .C.E. (September 21, 2007), "A MATLAB power system, simulation package".

طراحی مگنت سیستم رزونانس مغناطیسی هسته‌ای برای کاربردهای چاه‌نگاری

بهنام اسدی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

معصومه محمدیان *

مدرس، دانشکده فنی و حرفه‌ای دکتر شریعتی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

وحید اسماعیلی

دانش آموخته‌ی دکتری، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

حسین آفریده

استادیار، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۷

چکیده

ابزار اندازه‌گیری رزونانس مغناطیسی هسته‌ای، در بررسی و تعیین مشخصات مخزن‌های نفتی اهمیت زیادی دارد و درباره‌ی نوع سیال داخل سازند اطلاعاتی در اختیار می‌گذارد. اساس آنالیز این ابزار، استفاده از اندازه‌گیری‌های آسایش و انتشار برای درک ساختار سنگ مخزن و نوع سیالات درون آن‌هاست که به برآورد قابلیت تراوایی مطلق مخازن حاوی هیدروکربن و نوع سیال منجر می‌شود. ساختارهای مختلفی از این ابزار با توجه به نوع مگنت قابل ارائه است که در تحقیق به‌اختصار به آن‌ها پرداخته و نمونه‌ای برای ایجاد میدان مغناطیسی عرضی موازی با سازند داخل چاه شبیه‌سازی شده است. آنتن پیچیده شده در اطراف مگنت، میدان مغناطیسی عمود بر میدان ایستای حاصل از مگنت ایجاد می‌کند. میدان مغناطیسی ایستای حاصل از مگنت، میدانی گردانی است که با افزایش فاصله از مگنت کاهش می‌یابد. در این تحقیق از نرم‌افزار CST برای طراحی مگنت دائمی دستگاه و شبیه‌سازی به‌ازای جنس‌ها و ابعاد مختلف مگنت استفاده شده است. پس از بررسی پارامترهای مختلف، مگنتی از جنس فرت پایه Y22H به شعاع ۳ و طول ۸۲/۸ اینچ به‌عنوان مگنت مناسب معرفی شد. بررسی اثرهای دمایی داخل چاه بر پاسخ مغناطیسی مگنت، نشان داد بزرگی میدان مغناطیسی در ناحیه‌ی حساس با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین محفظه‌ای از جنس آلایژ بریلوم — مس یا استیل ضدزنگ سخت شده به‌عنوان محفظه‌ی نگهدارنده مگنت طراحی شد که ماده‌ای غیرمغناطیسی است و اثر آن بر میدان حاصل از مگنت بررسی شد. سپس تأثیرات دیواره‌ی سیمانی چاه بر میدان نیز بررسی شد. همچنین با توجه به اینکه ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ماده‌ی فرت در گستره‌ی ۱/۶۵ — ۱/۴۵ است، تأثیرات تغییر این پارامتر بر میدان حاصل از مگنت بررسی شد. افزایش ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی، موجب کاهش مقدار میدان مغناطیسی تولیدی در عمق بررسی داخل سازند شد. تأثیرات شعاع مگنت بر میدان تولید شده نیز از دیگر موارد تحلیل شده است که دستگاه با قطر ۶ اینچ، عمق نفوذ بیشتری نسبت به ابزار مشابه با قطر ۴/۵ اینچ نشان داد و در نتیجه ابزار مناسبی برای بررسی عمق‌های بیشتر از سازند است.

واژه‌های کلیدی

ابزارهای چاه‌پیمایی، رزونانس مغناطیسی هسته‌ای، زمان آسایش، فرکانس لارمور، مگنت دائمی، میدان مغناطیسی ایستا.

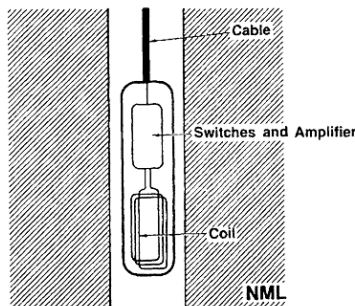
* نویسنده‌ی مسؤول مکاتبات: mohamadian@aut.ac.ir

۱. مقدمه

رزونانس مغناطیسی هسته‌ای (NMR)^۱ به یک اصل فیزیکی یعنی پاسخ هسته به میدان مغناطیسی منتسب است. بسیاری از هسته‌ها دارای ممنتوم مغناطیسی هستند. آن‌ها مانند آهنرباهای چرخنده عمل می‌کنند. این هسته‌ی مغناطیسی چرخنده می‌تواند با میدان مغناطیسی خارجی واکنش نشان دهد و سیگنال‌های قابل اندازه‌گیری تولید کند. برای بیشتر عناصر، سیگنال‌های تشخیص داده شده اندک هستند؛ اما هیدروژن دارای ممنتوم مغناطیسی به نسبت بزرگ است و در آب و هیدروکربن‌های موجود در فضاهای متخلخل به‌وفور یافت می‌شود. کمیت‌هایی که در نگاره‌برداری NMR اندازه‌گیری می‌شوند، شامل دامنه و زوال سیگنال است. دامنه‌ی سیگنال NMR متناسب با تعداد هیدروژن‌های موجود است و برای به‌دست آوردن تخلخل کالیبره می‌شود. این تخلخل از تأثیرات چشمه‌های رادیواکتیو و لیتولوژی مبرا است. با این حال زوال سیگنال NMR در طول هر چرخه‌ی اندازه‌گیری (که زمان آسایش نامیده می‌شود) بهترین اطلاعات را درباره‌ی خواص پتروفیزیکی فراهم می‌کند.

زمان آسایش به‌اندازه‌ی فضاهای متخلخل وابسته است. برای مثال فضاهای متخلخل کوچک زمان آسایش را کاهش می‌دهند و کوتاه‌ترین زمان آسایش، مربوط به آب‌های چسبیده به رس‌ها و سطوح ماتریکس است. فضاهای متخلخل بزرگ، زمان آسایش طولانی دارند و حاوی سیالاتی هستند که به سهولت حرکت می‌کنند. برخی از کاربردهای روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای عبارت‌اند از تشخیص زون‌های مخزنی با مقاومت کم، ارزیابی مخازن نفت و گاز با لیتولوژی پیچیده، تعیین حجم و تشخیص نفت‌های سنگین یا دارای گرانروی متوسط، مطالعه‌ی سازندهای با تخلخل یا تراوایی کم، تعیین اشباع نفت باقی‌مانده، به‌دست آوردن توزیع تخلخل و توزیع اندازه‌ی حفره‌ها، تعیین نوع هیدروکربن و تعیین تراوایی.

تخلخل به‌دست آمده از اندازه‌گیری NMR هیچ سهمی از ماتریکس ندارد، بنابراین به کالیبره کردن نتایج به‌دست آمده با لیتولوژی سازند نیازی نخواهد بود. در صورتی که تخلخل اندازه‌گیری شده توسط ابزارهای نگاره‌برداری مرسوم تحت تأثیر همه‌ی مؤلفه‌های سنگ مخزن که بخش اعظم آن را ماتریکس تشکیل می‌دهد، قرار می‌گیرند. بنابراین نمی‌توان آن‌ها را ابزارهای مناسبی برای نگاره‌برداری سیال در نظر گرفت.

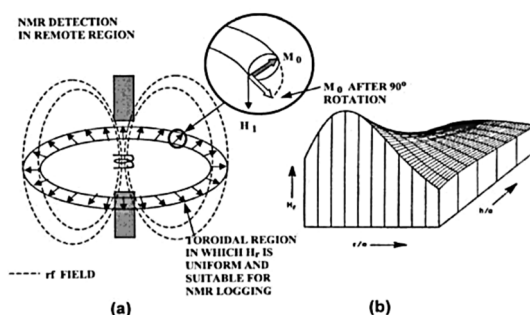


شکل ۱. طرح اولیه‌ی ابزار چاه‌نگاری^۲ مغناطیسی هسته‌ای

در سال ۱۹۴۶، پورشل و بلاخ^۲ NMR را کشف کردند. در سال ۱۹۴۸، روسل واریان^۳ حرکت تقدیمی آزاد پروتون در میدان مغناطیسی زمین (فرکانس لارمور ۲ کیلوهرتز) را اثبات کرد و یک روش برای استفاده از آن به منظور اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین و گرادیان در این میدان را بیان داشت. این ابزار بر پایه‌ی مشاهده‌ی حرکت تقدیمی آزاد پروتون در میدان مغناطیسی زمین در فرکانس حدود ۲ کیلوهرتز بود. در این سیستم سیم‌پیچ (شکل ۱) دارای طول ۱/۷۵ متر و عرض ۱۵ سانتی‌متر بود. در عمل سیم‌پیچ با یک جریان dc قوی برای تولید یک میدان به مدت چند ثانیه انرژی داده می‌شد تا یک مغناطش هسته‌ای ایجاد شود. سپس جریان ناگهان خاموش می‌شد و همان سیم‌پیچ برای دریافت سیگنال حاصل از حرکت تقدیمی آزاد پروتون در میدان مغناطیسی زمین استفاده می‌شد. زمان مرگ ابزار در حدود ۳۰ میلی‌ثانیه بود (بعدها به ۲۱ میلی‌ثانیه کاهش یافت) در نتیجه بخشی از آب در فضای منافذ بازمان آسایش کمتر از زمان مرگ قابل اندازه‌گیری نبود؛ از این رو این ابزار قادر به تشخیص آب و نفت در فضای منافذ و نیز اندازه‌گیری تخلخل کل نبود (Dunn et al., 2002).

برای غلبه بر مشکلات استفاده از میدان مغناطیسی زمین، دانشمندان، مگنت‌های دائمی را برای ایجاد یک میدان همگن در محیط خارج از مته به کار گرفتند. در طراحی جکسون، دو مگنت استوانه‌ای با قطب‌های مثبت در خلاف جهت یکدیگر در یک محفظه قرار گرفتند. این مگنت‌ها میدان پایایی را ایجاد می‌کردند که به صورت شعاعی متقارن بود. در صفحه‌ی افقی عمود بر محور مرکزی یک ناحیه‌ی چنبره‌ای وجود داشت که مؤلفه‌ی شعاعی میدان مغناطیسی H_r می‌توانست به هر درجه‌ای در طول نواحی تعیین شده همگن باشد. یک سیم‌پیچ نیز در وسط مگنت‌های مخالف قرار می‌گرفت و یک پالس ۹۰ درجه در ناحیه‌ی حساس تولید می‌کرد. جفت‌شدگی مغناطش حاصل از حرکت تقدیمی و سیم‌پیچ امکان آشکارسازی

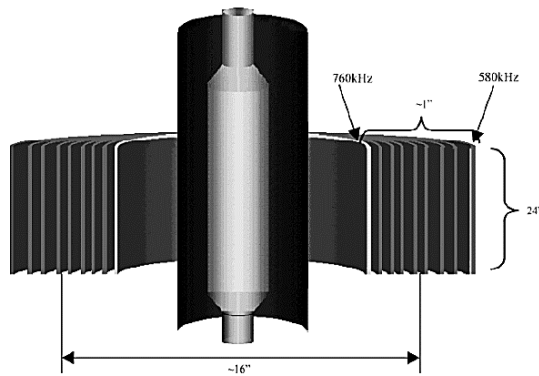
سیگنال NMR را فراهم می‌ساخت. مشکل اساسی طراحی جکسون آن بود که موقعیت و قدرت میدان ناحیه‌ی چنبره‌ای، تمایل به تغییر در طول زمان عملکرد داشت. دلایل آن، تغییر در میدان مغناطیسی محلی زمین، دمای سازند و پارامترهای مکانیکی مگنت‌های دائمی تولیدکننده‌ی میدان بود.



شکل ۲. (a) ناحیه‌ی چنبره‌ای میدان همگن حاصل از دو مگنت استوانه‌ای مخالف؛ (b) منحنی سه‌بعدی میدان شعاعی H_r برحسب تغییرات h/a و فاصله‌ی شعاعی r/a (همان)

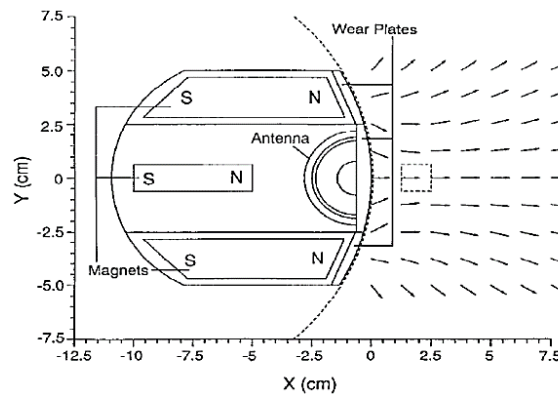
فناوری بعدی اختراع چاه پیمایی NMR با استفاده از آهنربای دائمی و فرکانس رادیویی پالسی (RF) در سال ۱۹۷۸ توسط لوس‌آلاموس پدید آمد. این فن از آهنربای دائمی برای تولید میدان B_0 در سازند^۴ احاطه‌کننده‌ی ابزار و از RF پالسی برای دست‌کاری سیستم اسپین هسته‌ی سیالات سازند استفاده می‌کرد. ابزار MRIL نوامار که در سال ۱۹۹۱ برای واقع‌نگاری چاه‌های نفتی تجاری ساخته شد، از یک آهنربای استوانه‌ای بسیار طولی برای تولید میدان مغناطیسی عرضی موازی با سازند داخل چاه استفاده می‌کرد. سیم‌پیچ RF در اطراف مگنت پیچیده می‌شود و میدان B_1 عمود بر B_0 را فراهم می‌کند. در این حالت اگرچه یک میدان ایستا با گرادیان چشمگیری تولید می‌شود، SNR با افزایش قدرت میدان در طول حجم حساس افزایش می‌یابد. از آنجا که قدرت میدان ایستای B_0 به‌صورت $1/r^2$ تغییر می‌کند، حلقه‌های با شعاع مختلف را می‌توان با انتخاب فرکانس‌های برانگیزش منطبق بر شرایط رزونانسی انتخاب کرد (شکل ۳).^۵ محفظه‌ی این دستگاه باید از مواد غیرفلزی ساخته شود تا سیم‌پیچ RF و سازند داخل مته تداخل نداشته باشند.

با وجود این، تومار تا حد زیادی، حجم حساس و SNR را با به‌کارگیری گرادیان مغناطیسی دائمی افزایش می‌دهد. در سال ۱۹۹۲ گروه کلینبرگ (Kleinberg et al., 1992) دستگاه NMR چاه‌نگاری جدیدی را معرفی کردند که پایه و اساس $^5\text{PNMT}$ شرکت شلمبرژه را تشکیل داد. این دستگاه از مفهوم هندسه‌ی جکسون میدان‌های دافع تولیدکننده‌ی نواحی همگن استفاده می‌کرد (همان).



شکل ۳. لایه‌های هم‌مرکز حجم‌های حساس ایجاد شده با انتخاب فرکانس‌های برانگیزش متناسب با قدرت میدان متغیر

شکل ۴ طرح آهنربای دستگاه را نشان می‌دهد. دو آهنربای میله‌ای به صورت عرضی نسبت به چاه مغناطیده شده‌اند و یک ناحیه‌ی همگن ایجاد می‌کنند. سومین مگنت برای افزایش قدرت میدان به کار گرفته می‌شود. سیم‌پیچ RF نشان داده شده در این شکل به عنوان آنتن، بین دو آهنربای میله‌ای برانگیزنده قرار می‌گیرد.



شکل ۴. طرح کلی شلمبرژه PNMT

۲. فیزیک NMR

اولین گام برای اندازه‌گیری NMR، هم‌جهت کردن هسته‌های مغناطیسی با میدان مغناطیسی پایای B_0 است. وقتی B_0 بر هسته‌های مغناطیسی اعمال شود، B_0 گشتاوری را بر روی هسته‌ها اعمال می‌کند که سبب هم‌جهت شدن محورهای اسپین هسته با B_0 می‌شود. با اعمال گشتاور بر روی جسم در حال

چرخش، محور آن عمود بر گشتاور حرکت می‌کند. این حرکت، حرکت تقدیمی^۶ نامیده می‌شود. فرکانس حرکت تقدیمی، فرکانس لارمور ($f = \gamma B_0 / 2\pi$) نامیده می‌شود. γ نسبت ژیرومغناطیسی است که معیاری از قدرت مغناطیس شدن هسته‌ای است.

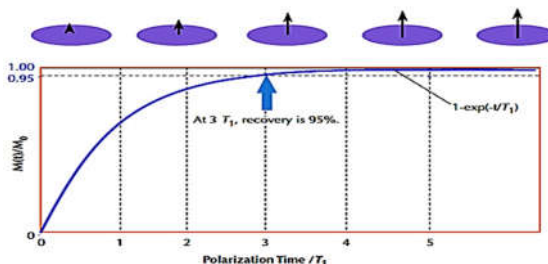
بعد از اعمال میدان، مکان‌هایی که در جهت میدان قرار می‌گیرند، بیشتر از آن‌هایی هستند که جهت‌گیری نمی‌کنند. این حالت، سبب ایجاد یک قطبش میکروسکوپی خالص در جهت میدان اعمالی می‌شود:

$$M_0 = N \frac{\gamma^2 \hbar^2 I(I+1)}{3(4\pi)^2 K T} B_0 \quad (1)$$

K ثابت بولتزمن، T دمای مطلق (کلوین)، h ثابت پلانک و I عدد کوانتومی اسپین هسته است. بعد از اینکه پروتون‌ها در میدان مغناطیسی پایا به خط شدند، گفته می‌شود که قطبیده‌اند. این قطبیدگی بلافاصله حاصل نمی‌شود، بلکه با یک ثابت زمانی T_1 که زمان آسایش طولی^۷ نامیده می‌شود افزایش می‌یابد (Fukushima & Roeder, 1981):

$$M_z(t) = M_0 \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{T_1}\right)} \right) \quad (2)$$

t مدت زمان قرار گرفتن پروتون‌ها در معرض میدان مغناطیسی B_0 ، T_1 مدت زمانی رسیدن مغناطش به ۳۶ درصد مقدار نهایی خود و $3T_1$ مدت زمانی است که ۹۵ درصد قطبش حاصل می‌شود. درواقع، T_1 یکی از آسایش‌های قابل اندازه‌گیری زمان است که آهنگ برگشت اسپین‌های هسته و هم‌جهت شدن بردار M_0 با میدان خارجی را نشان می‌دهد. آسایش T_1 به دلیل اندرکنش و تبادل انرژی بین اسپین‌های همسایه است. برگشت مغناطش M_0 به جهت میدان B_0 در طول محور z یک فرایند نمایی است که توسط رابطه‌ی ۲ بیان می‌شود.

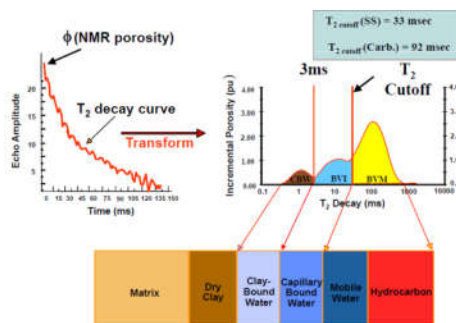


شکل ۵. منحنی آسایش T_1

دومین گام در چرخه‌ی اندازه‌گیری NMR واژگون‌سازی^۸ مغناطش از جهت طولی به صفحه‌ی عرضی است. این واژگون‌سازی توسط اعمال میدان مغناطیسی نوسانی B_1 که عمود بر میدان پایای B_0 است، انجام می‌گیرد. برای این کار، فرکانس B_1 باید با فرکانس لارمور پروتون‌ها در میدان B_0 برابر باشد. تغییر سطح انرژی پروتون‌ها در اثر جذب انرژی فراهم شده توسط B_1 را تشدید مغناطیسی هسته‌ای گویند. پس از اعمال پالس RF ۹۰ درجه که با اعمال قدرت کافی سبب خم شدن کامل M_0 در صفحه‌ی $x-y$ عرضی می‌شود، هسته شروع به هم‌جهت شدن با میدان B_0 می‌کند. آسایش عرضی شامل از بین رفتن مغناطش در صفحه‌ی $x-y$ است که با رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$M_{xy}(t) = M_0 e^{-\frac{t}{T_2^*}} \quad (۳)$$

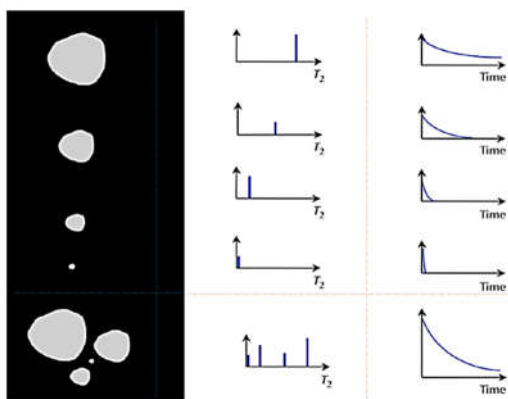
این واپاشی به‌طور معمول نمایی است و واپاشی القای آزاد (FID)^۹ نامیده می‌شود. ثابت زمانی واپاشی القای آزاد (T_2^*) بسیار کوتاه (کمتر از چند ده میکروثانیه) است. FID از ناهمگنی‌های میدان ناشی از گرادیان میدان مغناطیسی و از فرایندهای مولکولی معین در ماده ناشی می‌شود. ناهمگزی ایجاد شده توسط ناهمگنی‌های میدان پایای B_0 برگشت‌پذیر است. در صورتی که پالس B_1 ۱۸۰ درجه اعمال شود، بردارهای مغناطش پروتون در صفحات عرضی می‌توانند مجدداً هم‌فاز شوند. اگر بردار مغناطش عرضی دارای زاویه‌ی فاز α باشد، اعمال پالس B_1 ۱۸۰ درجه زاویه‌ی فاز را به $-\alpha$ تغییر خواهد داد. درواقع، ترتیب فاز بردارهای مغناطش عرضی معکوس می‌شوند، به‌طوری که بردارهای آهسته‌تر جلوی بردارهای سریع‌تر قرار می‌گیرند. بردارهای سریع‌تر از بردارهای آهسته‌تر سبقت می‌گیرند و مجدداً هم‌فازی رخ می‌دهد و سیگنالی تولید می‌شود که در سیم‌پیچ گیرنده قابل ثبت است. این سیگنال پژواک اسپین نامیده می‌شود (Cowan, 2005).



شکل ۶. توزیع T_2 سیگنال NMR برای شناسایی مؤلفه‌های سیالات در مخازن ماسه‌سنگی (Romero et al., 2009)

۲-۱. تفسیر نتایج حاصل از NMR

منحنی‌های آسایش نشان داده شده در شکل ۷، تأثیر اندازه‌ی حفره‌ها بر زمان‌های آسایش و پیچیدگی منحنی آسایش حاصل را نشان می‌دهد. سیالات قرار گرفته در مجاورت سطوح جامد انرژی‌شان را به سرعت انتقال می‌دهند و از سهم آن‌ها در سیگنال اندازه‌گیری شده می‌توان چشم پوشید. با افزایش اندازه‌ی حفره‌ها، پاسخ سیگنال‌های NMR حاصل از سازند سنگی را می‌توان اندازه‌گیری کرد.



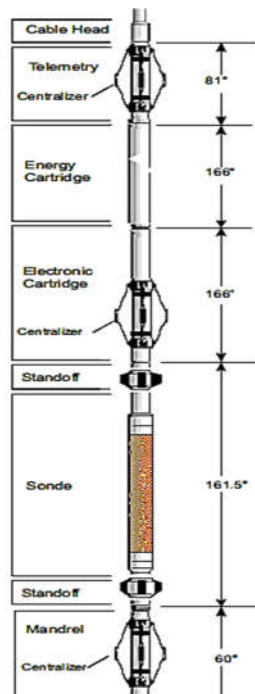
شکل ۷. زمان آسایش برای اندازه‌های مختلف حفره (Tyshko, 2016)

با تغییر پارامترهای آزمایش نظیر زمان قطبش TW و زمان بین پالس‌های ۱۸۰ درجه TE ابزار NMR می‌تواند برای تشخیص انواع سیالات سازند براساس زمان‌های آسایش آن‌ها تنظیم شود (شکل ۶). با بررسی مشخصه‌های NMR سیالات توده‌ای از قبیل آب‌شور، نفت و گاز در شرایط مخزن، تفاوت‌ها در T_1 و T_2 و این سیالات، اساس طبقه‌بندی NMR را تشکیل می‌دهد (Prammer, 1995).

۳. مقایسه‌ی دو نوع ابزار متداول

دو نوع ابزار NMR که بسیار مورد توجه شرکت‌های نفتی است، ابزارهای متعلق به شرکت‌های هالی برتون (MRIL) و شلمبرژه (CMR) است. در ابزار CMR متعلق به شرکت شلمبرژه، شدت میدان مغناطیسی در حدود ۴۷۰ G و فرکانس رزونانسی ۲ کیلوهرتز است. همچنین دارای رزولوشن عمودی ۱۵ سانتی‌متر، با حجم حساس بسیار کوچک نسبت به ابزار MRIL است. مقدار SNR در آن کمتر است و میدان مغناطیسی

همگنی با یک فرکانس معلوم دارد. این دستگاه تحت تأثیر چین و چروک دیواره‌ی چاه‌ها قرار می‌گیرد (Codd & Seymour, 2008).



شکل ۸. ساختار دستگاه NMR نوعی

در مقابل در ابزار MRIL متعلق به شرکت هالی برتون، شدت میدان مغناطیسی گرادیانی در حدود ۱۷ گاوس بر سانتی‌متر در محدوده‌ی ۱۵۰-۲۰۰ گاوس است. این ابزار در مرکز چاه قرار می‌گیرد. رزولوشن عمودی برابر با ۶۰ سانتی‌متر است و ضخامت حجم حساس ۱ میلی‌متر به قطر ۳۵-۴۳ سانتی‌متر از مرکز دستگاه است. ابزار می‌تواند در فرکانس‌ها و عمق‌های مختلف کار کند، SNR بهتری نسبت به ابزار CMR دارد و تحت تأثیر دیواره‌ی چاه قرار نمی‌گیرد. ناحیه‌ی تحت بررسی در این ابزار، استوانه‌های هم‌مرکز به شعاع‌های ثابت هستند؛ بنابراین می‌توان هر دو طرف ابزار داخل سازند را بررسی کرد. عمق بررسی این ابزار، از ابزار شلمبرژه بیشتر است (همان). با توجه به این تفاوت‌ها، معایب و مزیت‌ها، در این تحقیق، مگنتی دائمی طراحی شده است که به‌عنوان قلب دستگاه واقع‌نگاری رزونانس مغناطیسی هسته‌ای، وظیفه‌ی ایجاد میدان مغناطیسی ایستای B_0 در سازند داخل چاه را بر مبنای مدل دوم اشاره شده دارد.

۴. پیکربندی دستگاه NMR

دستگاه تحت بررسی در این تحقیق، شامل یک آهنربای استوانه‌ای به قطر ۴/۵ یا ۶ اینچ، یک آنتن، یک کارتریج الکترونیکی و یک یا دو کارتریج ذخیره‌ی انرژی (همچون شکل ۸) است. بیرون نگهدار سیال^{۱۰}، تمرکزگرها^{۱۱} و نگه‌دارنده‌ها^{۱۲} قسمت‌های اختیاری هستند، اما همیشه توصیه می‌شوند باید براساس اندازه‌ی چاه انتخاب شوند. استفاده از بیرون نگهدار سیال اثر بارگذاری گل را کاهش و نسبت سیگنال به نویز را افزایش می‌دهد. تمرکز گر‌ها و نگه‌دارنده‌ها، هر دو به قرارگیری دستگاه در مرکز چاه کمک می‌کنند. نگه‌دارنده‌ها همچنین با دورنگه داشتن بدنه‌ی فایبرگلاس دستگاه از دیواره‌ی چاه از آن محافظت می‌کنند (Halliburton, 2008 & Coates et al., 1999).

طول آنتن دستگاه ۲۴ اینچ بوده و در اطراف مگنت پیچیده شده است و وظیفه‌ی آن، ارسال توالی و همچنین دریافت سیگنال پژواک اسپین است. مهم‌ترین نکته‌ای که باید در این ابزارها لحاظ شود، همخوانی فرکانس پالس ارسالی توسط آنتن و فرکانس لارمور پروتون‌های مواد داخل چاه است؛ زیرا تنها در این صورت است که پدیده‌ی رزونانس اتفاق خواهد افتاد و می‌توان سیگنال حاصل را توسط آنتن دریافت و آنالیز کرد. دستگاه‌های متداول NMR در گستره‌ی فرکانسی ۹۰۰-۶۰۰ کیلوهرتز عمل می‌کنند. در حالت دو فرکانسی، لایه‌هایی برانگیخته می‌شوند که چند میلی‌متر از هم فاصله دارند و با محور چاه هم‌مرکزند. لایه‌ها در فرکانس‌های $f_c + \Delta f$ و $f_c - \Delta f$ کیلوهرتز برانگیخته می‌شوند که f_c از ۶۰۰ تا ۹۰۰ کیلوهرتز بوده و Δf از مرتبه‌ی چند کیلوهرتز است. به‌طور معمول دستگاه‌ها با قطر ۶ اینچی و ۴/۵ اینچی در فرکانس رادیویی در محدوده‌ی فرکانس استاندارد (۷۰۰ تا بیش از ۷۵۰ کیلوهرتز) و فرکانس پایین (۶۰۰ تا ۶۵۰ کیلوهرتز) کار می‌کنند. قطر ناحیه‌ی مورد بررسی توسط ابزار ۶ اینچی، در فرکانس‌های ۷۵۰ و ۶۰۰ کیلوهرتز و در دمای اتاق در رابطه‌ی ۴ از جدول ۱ ذکر شده است. بر این اساس، میدان مغناطیسی متناسب با این فرکانس‌ها نیز با رابطه‌ی ۵ به‌دست می‌آید.

جدول ۱. میدان و عمق بررسی دستگاه ۶ اینچی در دو فرکانس ۶۰۰ و ۷۵۰ کیلوهرتز

	$f_c(\text{kHz})$		
	۷۵۰	۶۰۰	
$d_e = \frac{430}{\sqrt{f_c}}$ (Akkurt, 1996)	۱۵/۷ اینچ	۱۷/۵۶ اینچ	(۴)
$f = \frac{\gamma B_0}{2\pi} \rightarrow B_0 = \frac{2\pi f}{\gamma} (\text{Gauss})$	۱۷۶	۱۴۰	(۵)

با توجه به مقادیر محاسبه شده، مگنت مورد نظر باید توانایی تولید این میدان‌های مغناطیسی را در فاصله‌های داده شده داشته باشد.

۴-۱. انتخاب جنس مگنت

با توجه به موضوعات مطرح شده و همچنین با در نظر گرفتن اینکه میدان مورد نیاز برای استفاده در برنامه‌های چاه‌پیمایی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای در حد چند صد گاوس است، مگنت‌های دائمی گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در محیط‌های داخل چاه هستند (Mitchell, 2014). مگنت‌های دائمی، مگنت‌هایی هستند که میدان مغناطیسی آن‌ها در شرایط عادی از بین نمی‌رود. آن‌ها از مواد فرومغناطیسی سخت ساخته می‌شوند و با قرار گرفتن در معرض یک میدان مغناطیسی قوی، خصوصیات آن میدان را به ارث می‌برند. سرامیک (فریت)، آلنیکو، ساماریوم کبالت و نئودیمیوم آهن از مهم‌ترین مگنت‌های دائمی به شمار می‌روند و امروزه، به‌ویژه در بخش صنعت کاربرد گسترده‌ای دارند.

مگنت‌های دائمی با میدان مغناطیسی پایین می‌توانند مصالحه‌ی مناسبی بین قدرت میدان مغناطیسی و شواهد تجربی برای استفاده در صنعت و بررسی مواد غیرهمگن ایجاد کنند. مزایای متعددی از ابزارهای با میدان مغناطیسی پایین در مقایسه با همتایان ابررسانای با میدان مغناطیسی بالا وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از استفاده نشدن از ماده‌ی خنک‌کننده، قیمت کم، ملاحظات ایمنی کمتر (از میدان سرگردان می‌توان چشم پوشید) و تنوع طراحی از جمله دسترسی راحت به آرایه‌های مختلف مگنت. از این رو مگنت‌های فریت گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در ابزار NMR هستند. این آهنرباها از لحاظ اقتصادی نیز از آهنرباهای دیگر ارزان‌ترند و در محیط‌های مرطوب فوق‌العاده‌اند و فاقد خوردگی هستند.

۵. شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش به شبیه‌سازی مگنت ابزار رزونانس مغناطیسی هسته‌ای پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار CST Studio پرداخته شده است. همان‌طور که اشاره شد، دستگاه‌های مرسوم در این کاربرد، به‌صورت استوانه‌ای با قطرهای مناسب برای چاه‌های حفاری با اندازه‌های ۶ اینچی یا ۴/۵ اینچی در فرکانس رادیویی در محدوده‌ی فرکانس استاندارد (۷۰۰ تا بیشتر از ۷۵۰ کیلوهرتز) و فرکانس پایین (۶۰۰ تا ۶۵۰ کیلوهرتز) طراحی می‌شوند. این انتخاب با استفاده از روبش^{۱۳} فرکانس انجام می‌گیرد تا فرکانس دارای بیشترین بهره‌ی تقویت حاصل شود. آنتن استفاده شده در این ابزار در این محدوده‌ی فرکانس، بیشینه‌ی بهره‌ی تقویت را ایجاد می‌کند. از طرفی عمق مورد بررسی نیز بر توان آنتن مؤثر است؛ زیرا افزایش عمق بررسی سبب

تضعیف توان آنتن می‌شود و در نتیجه باید عمق بهینه به‌دست آید. با توجه به مقادیر محاسبه شده، مگنت مورد نظر باید توانایی تولید این میدان‌های مغناطیسی را در فاصله‌های داده شده، داشته باشد.

۵-۱. هندسه‌ی آهنربا

دستگاه NMR دارای یک آهنربای دائمی بزرگ استوانه‌ای به قطر ۴/۵ یا ۶ اینچ است که میدان مغناطیسی پایا تولید می‌کند. یک آنتن که آهنربای دستگاه را احاطه کرده است، به‌عنوان فرستنده‌ی میدان نوسانی و گیرنده‌ی پژواک - اسپین به‌کار می‌رود. چون طول آنتن تعیین‌کننده‌ی حجم تحت بررسی است، آنتن بلندتر در ازای تفکیک قائم کمتر نمودارگیری را سریع‌تر می‌کند.

قبل از شروع شبیه‌سازی، ابتدا باید شعاع مگنت مورد نظر معین شود. با توجه به اندازه‌ی نوعی چاه‌ها (حفاری شده با مته‌ی ۸/۵ اینچی)، از بین دو نوع ابزار معرفی شده‌ی متداول، ابزار ۶ اینچی در اینجا مبنا قرار گرفته است. دلیل دیگر این انتخاب، عمق بررسی است. با توجه به محاسبات انجام گرفته، در فرکانس مشابه، ابزار با قطر بزرگ‌تر، عمق بررسی بیشتری از دیگری دارد و بنابراین می‌توان ناحیه‌های عمیق‌تری از سازند را بررسی کرد.

پس از تعریف هندسه‌ی ابزار، نوع ماده و جنس مگنت در نرم‌افزار تعریف می‌شود. پس از آن خاصیت مغناطیسی در هندسه‌ی تعریف شده و مقدار مغناطیس باقی‌مانده^{۱۴} برابر مقدار Br پایه‌ی فریت انتخاب‌شده قرار می‌گیرد. برای سهولت تهیه‌ی مگنت شبیه‌سازی شده از استانداردهای موجود در ساخت این فریت‌ها استفاده شده است که تهیه‌ی مگنت‌های با این استاندارد، راحت‌تر و از لحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه‌تر است.

۵-۲. انتخاب محفظه‌ی نگه‌دارنده‌ی مگنت

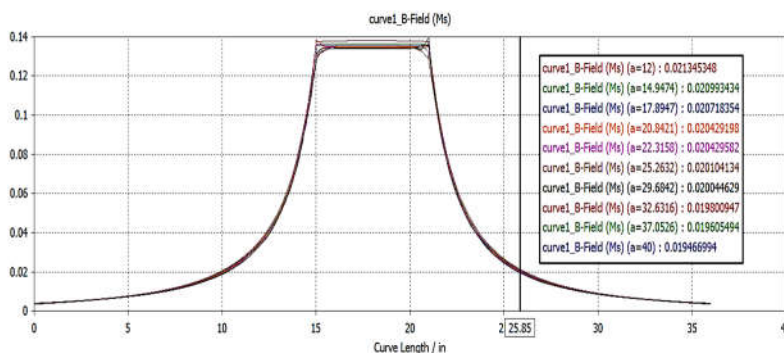
برای جلوگیری از وارد شدن ضربه به سیستم مگنت، باید آن را داخل یک محفظه‌ی مناسب قرار دهیم. محفظه‌ی مگنت باید از یک ماده‌ی غیرفرومغناطیسی انتخاب شود تا پاسخ بسیار ضعیف و قابل چشم‌پوشی به میدان‌های الکترومغناطیسی داشته باشد. برای این منظور استیل ضدزنگ نوع سخت شده^{۱۵} و آلیاژ بریلیم - مس^{۱۶} بهترین انتخاب‌ها هستند؛ هر دو مقاومت زیادی دارند و غیرفرومغناطیسی هستند.

۵-۳. شبیه‌سازی میدان B₀

با مشخص شدن جنس کلی مگنت و محفظه‌ی نگه‌دارنده و همچنین شعاع مگنت، می‌توان میدان مغناطیسی در اطراف یک مگنت را شبیه‌سازی کرد. قبل از شروع شبیه‌سازی میدان، استوانه‌ای در اطراف

مگنت به‌عنوان محیط داخل چاه و از جنس نفت تعریف می‌کنیم؛ بنابراین باید تغییرات میدان را داخل چنین محیطی بررسی کنیم. هندسه‌ی تعریف شده‌ی نهایی، شامل یک مگنت به شعاع ۳ اینچ و یک محفظه بریلوم - مس به ضخامت ۳ میلی‌متر است و استوانه‌ی بزرگی نیز به‌عنوان محیط داخل چاه - که همان سازند نفتی است - در نظر گرفته شده است. با داشتن این اطلاعات، هدف از این تحقیق به‌دست آوردن ابعاد دقیق مگنت و نوع فریت مناسب است. شبیه‌سازی را به‌ازای طول‌های مختلف از پایه‌های مختلف فریت، انجام خواهیم داد و در پی یک طول اپتیمم خواهیم بود که بتواند میدان مدنظر را در فاصله‌ی مورد نظر تولید کند. نتایج در شکل‌های زیر آمده است.

پس از بررسی نتایج شبیه‌سازی مگنت با ابعاد و مگنت‌های مختلف، مطابق با شکل ۹، مشاهده می‌شود که میدان مغناطیسی حاصل از مگنت تعریف شده به‌ازای طول ۸۰ اینچ به مقدار ۱۷۷/۴G مطلوب رسیده است؛ بنابراین فریت پایه Y22H با $B_r=0.311$ تسلا بهترین گزینه برای استفاده در طراحی مگنت مورد نظر است. حال با تغییر طول مگنت با گام‌های کوچک‌تر حول مقدار $a=40$ در پی طول اپتیمم مگنت برای ایجاد میدان مدنظر خواهیم بود. با شبیه‌سازی به‌ازای طول‌های مختلف در نهایت طول ۸۲/۸ اینچ به‌عنوان طول اپتیمم مگنت برای تولید میدان مورد نظر به‌دست آمد. (شکل ۹)



شکل ۹. منحنی تغییرات میدان مغناطیسی برحسب فاصله از مرکز مگنت به ازای مقدار $B_r=0.34T$ و طول مگنت از ۲۴ تا ۸۰ اینچ از فریت پایه Y22H

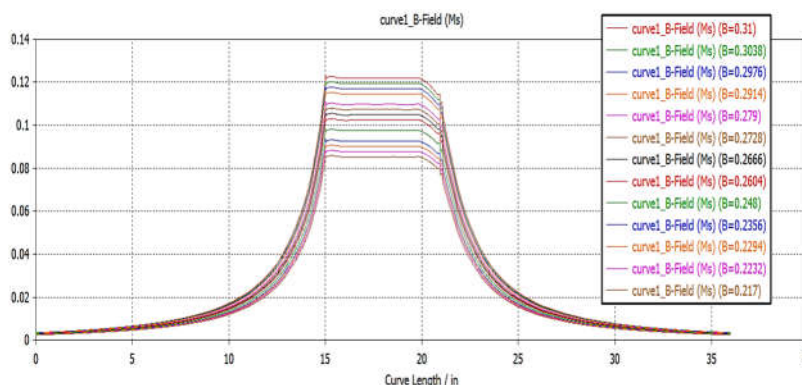
یکی از مزیت‌های مهم ابزار طراحی شده در این پروژه، کارکرد دو فرکانسی آن است؛ یعنی ابزار می‌تواند در دو فرکانس ۷۵۰ و ۶۰۰ کیلوهرتز استفاده شود. برای روشن شدن موضوع، منحنی تغییرات میدان برحسب فاصله در فرکانس ۶۰۰ کیلوهرتز در شکل ۹ آورده شده است که نشان می‌دهد میدان در فاصله‌ی ۸/۷۸ اینچ

از مرکز مگنت برابر ۱۴۲ گاوس است که در حدود ۲ گاوس با میدان لازم برای ایجاد فرکانس تشدید پروتون‌ها تفاوت دارد. دلیل این اختلاف هم تأثیر مش بندی و روش حل نرم افزار CST است.

۵-۴. بررسی اثر تغییرات دما

با توجه به اینکه مقدار مغناطیس پس ماند آهنربا وابسته به دماست، شبیه سازی میدان مغناطیسی B_0 حاصل از آهنربا در داخل سازند باید در دماهای مختلف صورت گیرد تا پاسخ دمایی آهنربا مشخص شود. با توجه به جدول‌های مربوط (Magnetics Global Standards Eclipse, 2015) مقدار Br برای فریت پایه Y22H در دمای ۲۵ درجه‌ی سلسیوس برابر ۰/۳۱ بوده و ضریب دمایی Br برای فریت برابر ۰/۲ درصد بر کلون است؛ و از طرفی چون در شبیه سازی به مقدار مغناطیس مانده‌ی Br نیاز داریم، مقدار Br در دماهای مختلف باید محاسبه شود.

شبیه سازی در دماهای مختلف، از دماهای اتاق تا بیشترین دمای ممکن داخل چاه انجام گرفت. با توجه به شکل ۱۰ (که تغییرات میدان مغناطیسی حاصل از مگنت به ازای طول ۸۲/۸ اینچ و شعاع ۳ اینچ را نشان می‌دهد) مشاهده می‌شود که افزایش دما سبب کاهش خاصیت مغناطیسی مگنت می‌شود. با افزایش دما، میدان مغناطیسی تولیدی در نقطه‌ی موردنظر کاهش می‌یابد، به طوری که در دمای ۱۷۵ درجه‌ی سلسیوس، اندازه‌ی میدان در ناحیه‌ی حساس به فاصله‌ی ۷/۸۵ اینچ از مرکز مگنت به مقدار ۱۲۳/۳ گاوس رسیده است. بنابراین با اینکه افزایش دما سبب کاهش خاصیت مغناطیسی مگنت شده است، با معلوم بودن پاسخ دمایی مگنت مورد نظر می‌توان دستگاه را در دماهای مختلف داخل چاه به کار بست.

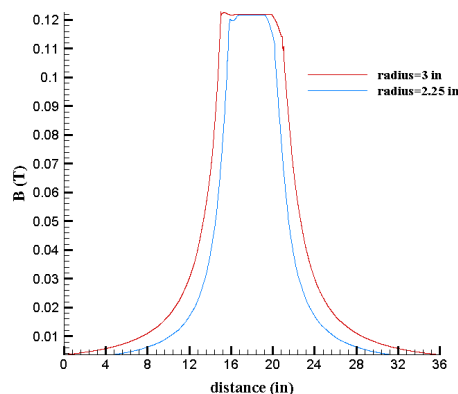


شکل ۱۰. اثر تغییرات دما بر تغییرات میدان مغناطیسی مگنت فریت

بنابراین میدان مغناطیسی پایای دستگاه که توسط مگنت طراحی شده تولید می‌شود، وابسته به دماست. در نتیجه، قدرت میدان مغناطیسی و گرادیان میدان - همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده - وابسته به دما خواهد بود. با داغ شدن مگنت، B_0 کاهش و برای فرکانس معلوم B_1 ، عمق بررسی نیز کاهش می‌یابد. چون وابستگی دمایی مگنت مشخص است، آگاهی از دمای مگنت و فرکانس B_1 منحصراً عمق بررسی دستگاه را تعیین می‌کند. با استفاده از اندازه‌ی میدان مغناطیسی حاصل از مگنت در دماهای مختلف، می‌توان تغییرات قطر بررسی دستگاه را برحسب تغییرات دما و فرکانس کاری به‌دست آورد. شکل ۱۰ منحنی تغییرات عمق بررسی دستگاه برحسب فرکانس را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دما به‌ازای فرکانس ثابت، عمق بررسی کاهش می‌یابد.

۵-۵. بررسی اثر شعاع مگنت

برای مشاهده‌ی اثر تغییرات شعاع مگنت بر میدان مغناطیسی حاصل، بار دیگر مگنتی با همان جنس و مشخصات را این بار با قطر ۴/۵ اینچ بررسی می‌کنیم. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود کاهش شعاع مگنت، سبب کاهش میدان مغناطیسی پایای B_0 در نقطه‌ی تحت بررسی خواهد شد؛ بنابراین برای یک فرکانس کاری مشخص، کاهش شعاع مگنت سبب کاهش عمق تحت بررسی می‌شود. برای مگنتی به قطر ۴/۵ اینچ، بزرگی میدان مغناطیسی در عمق بررسی متناسب با فرکانس ۷۵۰ کیلوهرتز (شعاع ۷/۸۵ اینچی از مرکز مگنت) به ۱۰۰ گاوس کاهش یافته است.



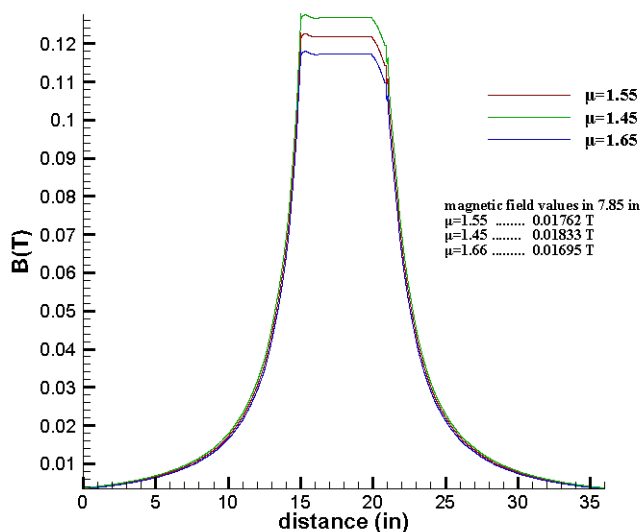
شکل ۱۱. منحنی تغییرات میدان مغناطیسی برحسب فاصله از مرکز مگنت برای مگنت ۴/۵ اینچی و ۶ اینچی

۵-۶. بررسی تغییرات ضریب نفوذپذیری مغناطیسی فریت

ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی فریت سخت در گستره‌ی $1/45-1/65$ است. در همه‌ی بخش‌های ارائه شده در این تحقیق از مقدار متوسط این بازه یعنی $1/55$ به عنوان ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی، برای شبیه‌سازی میدان مغناطیسی حاصل از فریت استفاده شد. با وجود این، در این بخش شبیه‌سازی میدان حاصل از مگنت به‌ازای دو مقدار $1/45$ و $1/65$ نیز انجام گرفت تا خطای شبیه‌سازی‌های صورت گرفته مشخص شود. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، افزایش ضریب نفوذپذیری نسبی، موجب کاهش بزرگی میدان، و کاهش و ضریب نفوذپذیری، سبب افزایش بزرگی میدان در نقطه‌ی تحت بررسی داخل حجم حساس شده است. آگاهی از تغییرات پاسخ مغناطیسی مگنت برحسب ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی سبب افزایش دقت در ساخت مگنت و همخوانی بیشتر نتایج شبیه‌سازی و تجربی خواهد شد.

۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای طراحی مگنت سیستم رزونانس مغناطیس هسته‌ای، همه‌ی عوامل اثرگذار در هنگام استفاده‌ی میدانی این سیستم در چاه‌پیمایی بررسی شد. در این زمینه، با توجه به نمونه‌های صنعتی موجود که در انحصار دو شرکت نفتی بزرگ است، اطلاعات علمی از طراحی این دستگاه‌ها ارائه نشده و صرفاً می‌توان مشخصات این دستگاه‌ها را مشاهده کرد. طراحی و بهینه‌سازی این دستگاه و بررسی پارامترهای اساسی آن از جمله اثر دما که از چالش‌های این دسته از ابزارهاست، اقدام شده است. مورد مهم دیگر، در نظر گرفتن مشخصات مگنت‌های صنعتی موجود در بازار است تا طراحی انجام گرفته قابلیت اجرای عملی داشته باشد. نتایج به‌دست آمده، به‌خوبی تطابق خروجی‌های مورد نظر را با مشخصات دستگاه‌های تجاری موجود نشان داد. از این رو با استناد به نتایج به‌دست آمده و بهینه‌سازی‌های انجام گرفته، می‌توان در قدم بعدی به ساخت سیستم رزونانس هسته‌ای بومی پرداخت.



شکل ۱۲. اثر ضریب نفوذپذیری مغناطیسی مگنت بر بزرگی میدان مغناطیسی تولید شده در حجم حساس

پی‌نوشت‌ها

1. Nuclear magnetic resonance
2. Logging
3. Bloch and Purcell
4. Russell Varian
5. Formation
6. Pulse nuclear magnetism tool
7. Spin precession
8. Lonitudinal relaxation time
9. Tipping
10. Free induction decay
11. Fluid excluder
12. Centralizer
13. Standoff
14. Frequency sweep
15. Remnant magnetization
16. Stainless steel
17. Beryllium copper

منابع

1. Akkurt, R. (1996), "Selection of optimal acquisition parameters for MRIL logs", the log analyst, Vol. 37, No. 6.
2. Codd, S.L. & Seymour, J.D. (2008), "Magnetic resonance microscopy", John-Wiley & Sons.
3. Cowan, B. (2005), "Nuclear magnetic resonance and relaxation", Cambridge University Press, UK.
4. Coates, G.R.; Xiao L. & Prammer, M.G. (1999), "NMR logging: principles and applications", Haliburton energy services Houston.
5. Dunn, K.J.; Bergman, D.J. & LaTorraca, G.A. (2002), "Nuclear magnetic resonance: Petro physical and logging applications", Elsevier Science Ltd., UK.
6. Eclipse magnetics global standards, www.eclipsemagnetics.com
7. Fukushima, E. & Roeder, S.B. (1981), "Experimental pulse NMR: A nuts and bolts approach", Addison-Wesley Press, MA.
8. Halliburton (2008), "Wireline and perforating services", MRIL-Prime catalogue.
9. Kleinberg, R.L.; Sezginer, A.; Griffin, D.D. & Fukuhara, M. (1992), "Novel NMR apparatus for investigating an external sample", Journal of magnetic resonance, Vol. 97, No. 3, pp. 466-485.
10. Kleinberg, R.L. (2001), "NMR well logging at Schlumberger, concepts in magnetic resonance part A", Vol. 13, No. 6, pp. 396-403.
11. Mitchell, J. (2014), "Low-field permanent magnets for industrial process and quality control", Progress in nuclear magnetic resonance spectroscopy, Vol. 76, pp. 1-60.
12. Prammer, M. (1995), "Lithology-independent gas detection by gradient-NMR logging", SPE annual technical conference, Society of petroleum engineers, Dallas, TX, p. 12.
13. Romero, P.; Gladkikh, M. & Azpiroz, G. (2009), "Applications of 2D-NMR maps and geometric pore scale modeling for petrophysical evaluation of a gas well", Computational geosciences, Vol. 13, No. 2, pp. 171-180.
14. Tyshko, A.A. (2016), "Development of nuclear magnetic resonance downhole logging tool for hydrocarbones search», PhD thesis, Vilnius gediminas technical university.

مطالعه‌ی عددی تأثیر زبری سطح دیواره‌ی داخلی لوله بر طول پیش از انفجار

محسن آزموده*

مربی، آموزشکده فنی و حرفه‌ای پسران بابایی، قزوین، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، قزوین، ایران

تاریخ دریافت مقاله: تاریخ پذیرش نهایی:

چکیده

امروزه فرایند گذر از احتراق به انفجار (DDT)، به علت استفاده از موج‌های انفجاری ناشی از این پدیده در موتورهای پالسی انفجاری، کاربردهای فراوانی به خصوص در صنعت یافته و در این میان تأثیر زبری بر این فرایند شایان ملاحظه است. در این پژوهش سعی شده با انتخاب زبری‌های مختلف و بررسی اثر آن بر طول پیش از انفجار، به این پرسش پاسخ داده شود که زبری در پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار چه تأثیری دارد. برای پاسخ به این پرسش از روش عددی استفاده شد. به طور کلی سعی شد تا با استفاده از دو نرم‌افزار گمبیت و فلوئنت، فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی بسته با سطح صاف و پنج سطح زبر مختلف به صورت عددی شبیه‌سازی شده و در نهایت با ترسیم دو نمودار سرعت - مکان و حداکثر انرژی جنبشی آشفستگی در دیواره - مکان این فرایند در شش سطح مذکور مقایسه شود. در نهایت نتیجه گرفته شد که افزایش زبری لوله سبب کاهش زمان لازم برای وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار و همچنین کاهش طول پیش از انفجار می‌شود. با توجه به تغییرات حداکثر انرژی آشفستگی در دیواره برحسب زبری می‌توان استدلال کرد افزایش زبری سبب افزایش آشفستگی جریان و به سبب آن، افزایش شتاب شعله‌ی آشفته می‌شود و پدیده‌ی گذر را تسهیل می‌کند.

واژه‌های کلیدی

زبری، طول پیش از انفجار، گذر از احتراق به انفجار.

۱. مقدمه

امروزه تحقیقات فراوانی در زمینه‌ی DDT^۱، عوامل مؤثر بر آن و نحوه‌ی کنترل آن در حال اجراست، زیرا استفاده از موج‌های انفجاری، به‌خصوص موج انفجار ناشی از پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار (DDT) کاربردهای فراوانی یافته است. امروزه به استفاده از موتورهای پالسی انفجاری، توجه فراوانی شده و بر این اساس، بررسی روش‌های گوناگون تسهیل فرایند گذر از احتراق به انفجار که کاربردهای فراوانی در صنعت دارد از اهمیت زیادی برخوردار شده است.

بررسی فرایند گذر از احتراق آشفته به انفجار به‌دلیل پیچیدگی‌های ذاتی آن بسیار دشوار است و به‌طور معمول از فناوری‌های پیشرفته استفاده می‌شود. مطالعات اخیر نشان داده است که هندسه‌ی مسیر جریان، نوع گاز، شرایط اولیه‌ی گاز (فشار و دمای اولیه) و نسبت هم‌ارزی مخلوط بر محل وقوع این پدیده تأثیر دارند؛ اما پژوهش‌هایی که تاکنون در این زمینه انجام گرفته، بدون در نظر گرفتن تأثیرات زبری بر این پدیده بوده است. از این رو، پژوهش حاضر در نظر دارد تا فرایند گذر از احتراق به انفجار را در لوله‌های با زبری متفاوت به‌صورت عددی بررسی و مقایسه کند. به‌طور کلی اهداف این نوشتار را در قالب موضوعات مورد بررسی، می‌توان به چهار قسمت تقسیم کرد: شرایط کلی لازم برای شروع پدیده‌ی انفجار و وقوع DDT مطالعه؛ شتاب‌گیری شعله در لوله‌های صاف، فرایند شتاب‌گیری آن و عوامل مؤثر بر طول پیش از انفجار بررسی؛ شتاب‌گیری شعله در لوله‌های زبر، فرایند شتاب‌گیری آن و رژیم‌های گوناگون پخش شعله در لوله‌های زبر تشریح؛ و پدیده‌ی آغاز انفجار و روش‌های مختلف آغاز انفجار، معیارها و شرایط لازم برای آغاز انفجار در لوله‌های صاف و در لوله‌های زبر نیز توضیح داده شده است.

۲. پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار

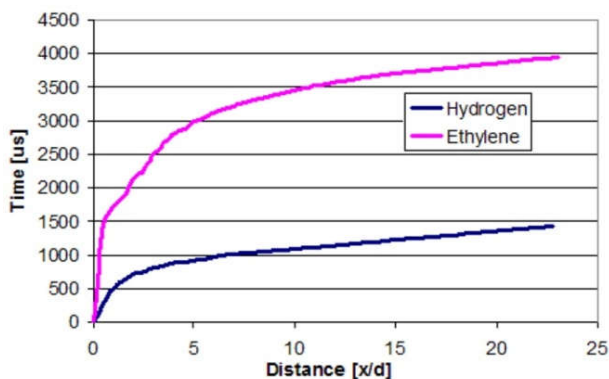
برای وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار، دو شرط اساسی باید رعایت شود:

۱. به‌منظور آغاز پدیده‌ی انفجار، قبل از هر چیز باید شعله باید به‌قدری شتاب بگیرد که به‌سرعت بسیار زیاد مورد نیاز برای وقوع پدیده‌ی انفجار برسد. این سرعت دست‌کم باید به اندازه‌ی سرعت صوت در محصولات احتراق باشد؛

۲. قطر روزنه‌ی اوریفیس‌ها باید به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد (دست‌کم به‌اندازه‌ی سلول انفجاری متناظر با مخلوط مورد آزمایش)، تا وقوع انفجار امکان‌پذیر شود.

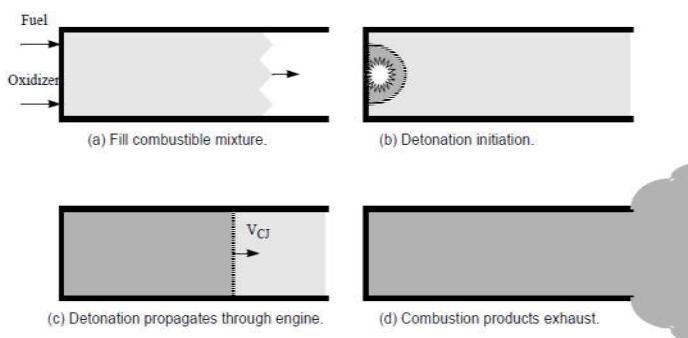
فرایند گذر از احتراق به انفجار قانونمند نیست و پدیده‌ای بسیار پیچیده است که عوامل مختلفی بر آن اثر

دارد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به عوامل نوع سوخت، نسبت هم‌ارزی مخلوط، قطر لوله‌ی انفجاری، دما و فشار اولیه اشاره کرد: (Chapin, 2005; Schultz, 2001; Wingerden, 2006).



شکل ۱. اثر نوع سوخت بر زمان وقوع گذر از احتراق به انفجار در شرایط یکسان

در شکل ۱ مراحل مختلف ایجاد پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار دیده می‌شود. در مرحله‌ی a لوله از مخلوط پر می‌شود. در مرحله‌ی b جرقه زده شده و احتراق آغاز می‌شود. در مرحله‌ی c احتراق مسیر خود را در لوله طی می‌کند. در مرحله‌ی d محصولات احتراق لوله را ترک می‌کنند (Chapin, 2005).



شکل ۲. مراحل ایجاد فرایند گذر از احتراق به انفجار

در ایجاد پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار، زمان از عوامل بسیار مهم است و در بیشتر تحقیقات بررسی می‌شود، زیرا در فاصله‌های زمانی مختلف فرایند سوختن و شتاب‌گیری شعله متفاوت است (Bollinger et al., 1961). بعد از ایجاد یک جرقه‌ی کوچک در انتهای لوله، یک شعله‌ی آرام ایجاد می‌شود و پس از گذشت اندک زمانی از تشکیل این شعله، چین‌خوردگی‌هایی در جلوی شعله به‌واسطه‌ی ناپایداری‌های محلی RT^2 ایجاد می‌شود. این چین‌خوردگی‌ها ممکن است به‌واسطه‌ی تأثیرات پخشی — حرارتی پایدار شوند یا از بین بروند.

همچنین نتیجه‌ی مطالعات، بیانگر این مطلب است که هر چقدر زبری دیواره‌ی لوله بیشتر باشد، رشد لایه‌ی مرزی سریع‌تر خواهد بود. درواقع، زبری دیواره‌ی لوله، پارامتری مهم و تأثیرگذار در میزان نرخ شتاب شعله است. در لوله‌هایی که در آنها از موانع استفاده شده و در آنهایی که نسبت انسداد، کوچک است (کمتر از ۱۰ درصد) ساختار شعله و نیز نحوه‌ی شتاب‌گیری شعله، بسیار شبیه به لوله‌ی ساده خواهد بود (Ciccarelli & Dorofeev, 2008).

لی و همکاران (Lee et al., 1985) برای اولین بار نشان دادند که برای لوله‌های با مانع، چندین رژیم پخش شعله‌ی گوناگون، می‌تواند وجود داشته باشد که براساس سرعت نهایی محاسبه شده، چهار نوع آن شامل خاموش‌شونده، اختناقی، شبه‌انفجاری و انفجاری چاپمن — جوگت است. از سوی دیگر نتایج آزمایش‌های جیو و همکاران (Gu et al., 1988) که در آنها فاصله‌ی بین صفحات روزنه‌دار، $0/5$ ، 1 و 2 برابر قطر لوله بود نشان می‌دهد که کمبود سرعت با فاصله‌ی بین صفحات سوراخ‌دار نسبت عکس دارد.

در لوله‌های صاف که در آنها از موانع استفاده نشده، کسری سرعت $2-1$ درصد است که در اثر به‌وجود آمدن لایه‌ی مرزی ایجاد می‌شود. بنابراین یکی از نتایج این آزمایش این است که این مقدار کسری سرعت به‌واسطه‌ی بالا رفتن اتلاف اندازه حرکت و اتلاف حرارت ناشی از زبری، شایان توجه دیواره است. فرایند آغاز پدیده‌ی انفجار به شیوه‌های بسیار متنوعی قابل مشاهده است، ولی در کل به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شود: آغاز انفجار به‌واسطه‌ی انعکاس موج ضربه یا متمرکز شدن موج ضربه و آغاز انفجار به‌واسطه‌ی ناپایداری‌ها یا فرایندهای اختلاط. دسته‌ی اول ذاتاً دربرگیرنده‌ی یک فرایند آغاز انفجار مستقیم است، زیرا در آنها قدرت موج ضربه به اندازه‌ای قوی است که گاز را محترق می‌کند و سبب شروع انفجار می‌شود. دسته‌ی دوم از روش‌های آغاز انفجار بسیار پیچیده است، زیرا بسیاری از ناپایداری‌ها و فرایندهای اختلاط را دربرمی‌گیرد. به‌طور معمول این نوع آغاز انفجار در لوله‌های صاف اتفاق می‌افتد؛ در

برای حل معادلات حاکم بر جریان، از روش حجم محدود استفاده شده است. در این روش ناحیه‌ی حل به حجم‌های کنترلی جداگانه‌ای تفکیک می‌شود. میدان محاسباتی به چند حجم کنترلی تقسیم می‌شود، به گونه‌ای که هر گره را یک حجم کنترلی احاطه کند و حجم کنترلی نباید دارای حجم‌های مشترک با یکدیگر باشد. به همین منظور از معادلات دیفرانسیلی حجم کنترل، انتگرال گرفته می‌شود. برای محاسبه‌ی انتگرال‌های لازم از پروفیل‌های قطعه به قطعه استفاده می‌شود که تغییر متغیر وابسته را در بین گره‌ها بیان می‌کند.

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

معادله‌ی بقای اندازه‌ی حرکت:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho B_i \quad (2)$$

معادله‌ی بقای انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} - \frac{\lambda}{C_p} \dot{q}_j^R \right) \quad (3)$$

معادله‌ی حالت:

$$P = \rho RT \quad (4)$$

معادله‌ی بقای گونه‌ها:

$$(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{\Gamma}_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (5)$$

معادلات آشفتگی (مدل k-ε استاندارد):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \dot{\epsilon} - Y_M + S_k \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \dot{\epsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \dot{\epsilon} u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\dot{\epsilon}}} \right) \frac{\partial \dot{\epsilon}}{\partial x_j} \right] + C_{1\dot{\epsilon}} \frac{\dot{\epsilon}}{k} (G_k + C_{3\dot{\epsilon}} G_b) - C_{2\dot{\epsilon}} \rho \frac{\dot{\epsilon}^2}{k} + S_{\dot{\epsilon}} \end{aligned} \quad (6)$$

زبری سطوح به‌طور چشمگیری دارای اشکال پیچیده و متنوع است. به‌عنوان یک نتیجه‌ی کلی غیرممکن است که بتوان هر سطح زبر را انحصاری توصیف کرد، زیرا هر سطح شامل تعداد بسیار زیاد و در عین حال طیف متنوعی از مقیاس‌های زبری^۵ بوده و در نتیجه برای تعریف شکل زبری‌ها، به گستره‌ی وسیعی از اندازه‌های مقیاس نیاز است.

روش عددی به‌کار رفته برای حل معادلات، مرتبه‌ی اول است و برای گام‌های زمانی از روش کاملاً ضمنی^۶ استفاده شده است (پاتانکار، ۱۳۸۲).

۴. مقایسه‌ی عددی و تجربی DDT

برای مدل‌سازی گذر از احتراق به انفجار در لوله‌های زبر، فشار اولیه در همه‌ی نواحی 100 kPa ، و دمای اولیه در کلیه‌ی نواحی یکسان و 300 K در نظر گرفته شد. دما در ناحیه‌ی شروع احتراق بیشتر از دمای لازم برای احتراق خودبه‌خودی ترکیب بود و برابر 2000 K تنظیم شد. با این دما مخلوط متان و اکسیژن به آرامی شروع به سوختن کرده و شعله داخل لوله شروع به حرکت می‌کند.

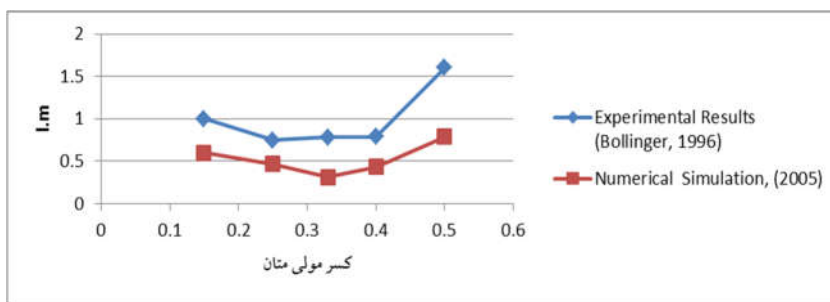
با گذشت اندک زمانی، جبهه‌ی شعله و امواج ایجاد شده در جلوی شعله و در ناحیه‌ی مواد نسوخته با هم کوپل می‌شوند و شروع به حرکت می‌کنند. با بررسی مدل‌های مختلف مشخص شد دمای اولیه در ناحیه‌ی گرم و اندازه‌ی ناحیه‌ی گرم شده، تأثیر بسیار اندکی بر طول پیش از انفجار دارند. البته دمای اولیه‌ی کل مخلوط و نیز فشار اولیه تأثیر به‌سزایی بر طول پیش از انفجار دارند. اندازه‌ی ناحیه‌ی با دمای زیاد، در همه‌ی آزمایش‌ها یک قوس کوچک به شعاع 1 سانتی‌متر در مرکز و سمت چپ لوله است، مانند آنچه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. خطوط هم‌دما در مدل ساخته شده پیش از آغاز حل

با گذشت زمان، دما، فشار و سرعت افزایش می‌یابد و شعله شتاب می‌گیرد. سرانجام در ناحیه‌ای از لوله پس از شتاب‌گیری لازم، پدیده‌ی DDT رخ می‌دهد. یکی از عوامل تأثیرگذار بر مکان DDT، درصد سوخت نسبت به اکسیژن است.

در این آزمایش ترکیبات مختلف از متان و اکسیژن بررسی و نتایج با داده‌های موجود در منابع (Bollinger et al., 1961) مقایسه شده و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است.



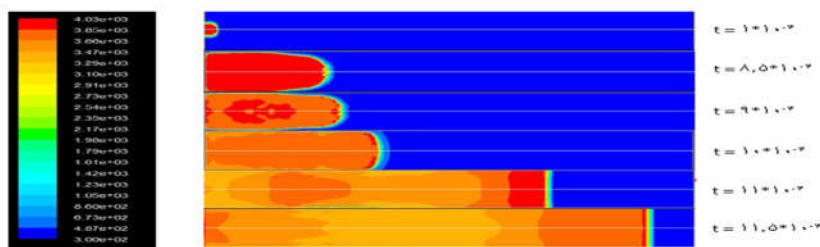
شکل ۶. مقایسه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای طول پیش از انفجار با نتایج تجربی

۵. گذر از احتراق به انفجار در لوله‌های زبر

برای بررسی رفتار شعله و فرایند گذر از احتراق به انفجار، ابتدا نحوه‌ی گسترش شعله در یک لوله با سطح صاف و سپس در یک لوله با بیشترین زبری آزمایش شده در این پژوهش (لوله‌ی با زبری ۵ میلی‌متر)، بررسی شده است.

۵-۱. بررسی رفتار شعله در یک لوله با سطح صاف

رفتار شعله در یک سطح صاف در شکل ۷ نشان داده شده است:



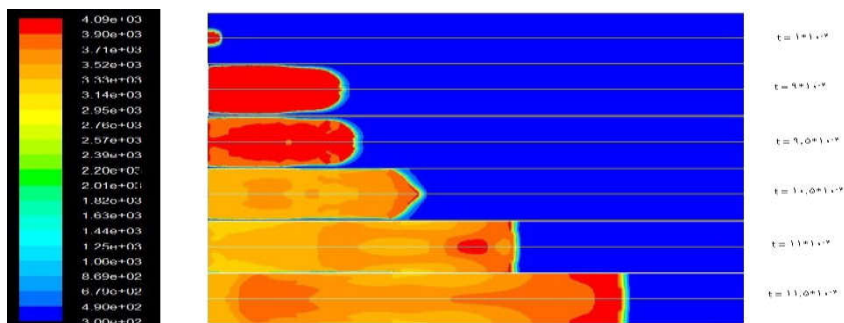
شکل ۷. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۵ میلی‌متر

در لوله‌ای با زبری ۵ میلی‌متر پدیده‌ی انفجار در $t=0.0007$ (s) رخ می‌دهد یعنی انفجار 0.0002 ثانیه زودتر از لوله با سطح صاف رخ می‌دهد؛ و منحنی انتهای شعله در زمان $t=0.0008$ (s) به‌صورت خط صاف درمی‌آید.

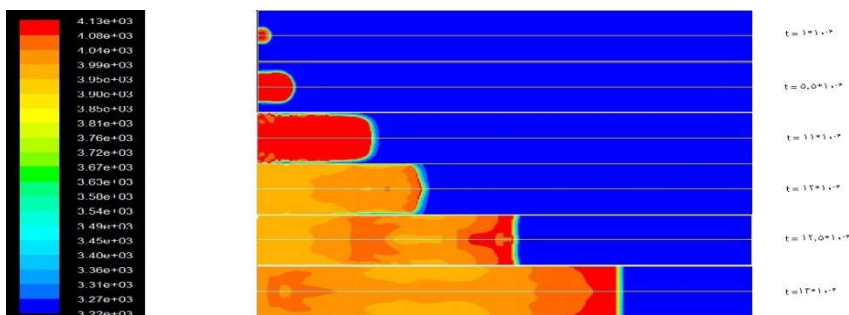
مقایسه‌ی سطح صاف با زبری ۵ میلی‌متر نشان می‌دهد که زبری سطح بر افزایش سرعت شعله تأثیر مستقیم دارد و موجب شتاب بیشتر جبهه‌ی شعله می‌شود و در نتیجه پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار زودتر رخ می‌دهد.

۵-۲. بررسی رفتار شعله در لوله‌هایی با زبری میانی

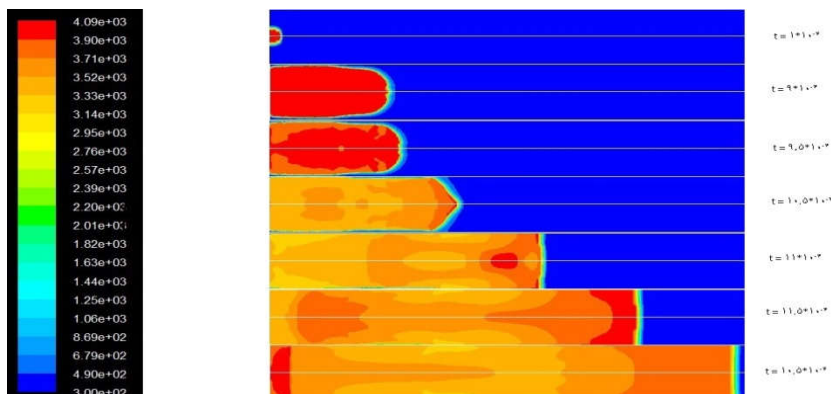
در ادامه شکل فرایند شعله و گذر آن از احتراق به انفجار در لوله‌های دیگر با زبری‌های متفاوت — که در این پروژه بررسی شده و پیشتر ذکر شده‌اند — جداگانه ارائه شده است:



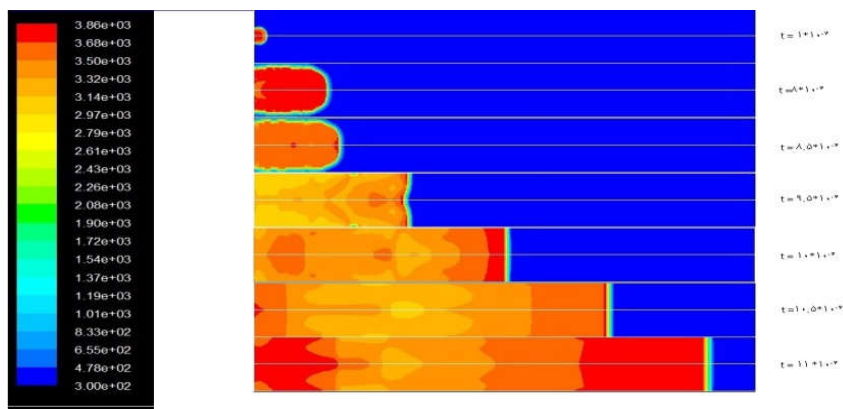
شکل ۸. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۴/۰ میلی‌متر



شکل ۹. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۸/۰ میلی‌متر



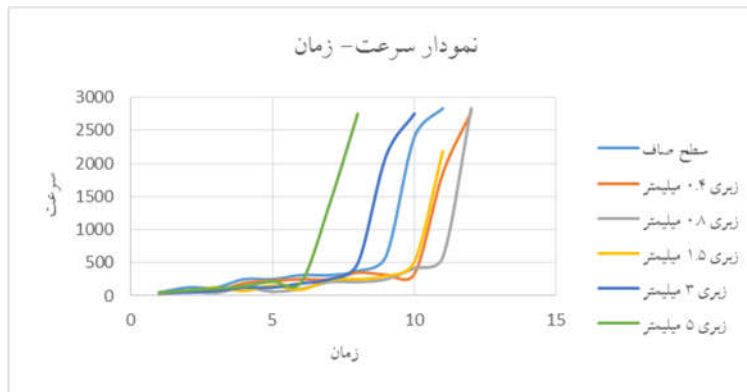
شکل ۱۰. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۱۱. فرایند گذر از احتراق به انفجار در لوله‌ی با زبری ۳ میلی‌متر

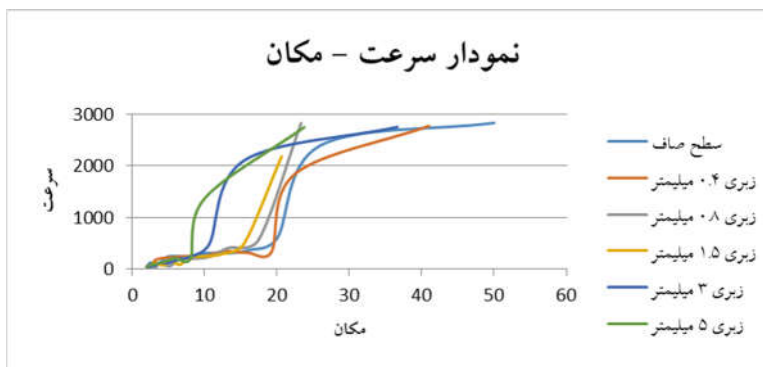
۶. نتیجه‌گیری

نتیجه‌ی آزمایش‌های عددی و محاسبات انجام گرفته، براساس دو مولفه بررسی و استخراج می‌شود: تغییرات سرعت شعله و همچنین انرژی جنبشی بیشینه نمودارهای زیر براساس محاسبات و نتایج تجزیه و تحلیل‌های نرم‌افزاری در چهار موضوع ارائه شده است: سرعت — مکان؛ سرعت — زمان؛ حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی دیواره — مکان؛ حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی دیواره — زمان.



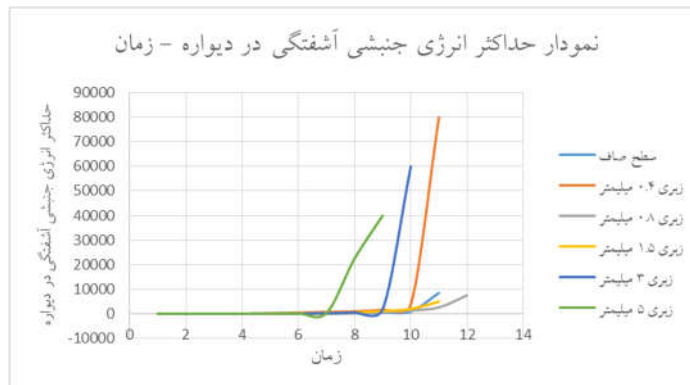
شکل ۱۲. نمودار سرعت شعله برحسب زمان در لوله‌هایی با زبری متفاوت

بررسی رابطه‌ی میان زمان و سرعت شعله در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که در لوله‌ی با زبری ۵ میلی‌متر (بیشترین زبری تحت آزمایش)، شعله در کوتاه‌ترین زمان به حداکثر سرعت خود می‌رسد و در لوله‌ی با زبری ۰/۴ میلی‌متر (کمترین زبری تحت آزمایش) این حداکثر سرعت در طولانی‌ترین زمان اتفاق می‌افتد. برای شعله در لوله‌های دیگر می‌توان گفت، شعله در لوله‌ی با زبری ۳ میلی‌متر، لوله‌ی با زبری ۱/۵ میلی‌متر و لوله‌ی با زبری ۰/۸ میلی‌متر به ترتیب از فاصله‌ی زمانی کم به زیاد، به بیشترین سرعت خود می‌رسد. بنابراین می‌توان مشاهده کرد که از زبری زیاد به کم، زمان رسیدن به حداکثر سرعت شعله بیشتر می‌شود. اگرچه شایان ذکر است که شعله در سطح صاف نسبت به سطوح زبر نظم یکسانی ندارد و در حد فاصل لوله‌های زبر ۱/۵ و ۳ میلی‌متر به بیشترین سرعت خود می‌رسد.



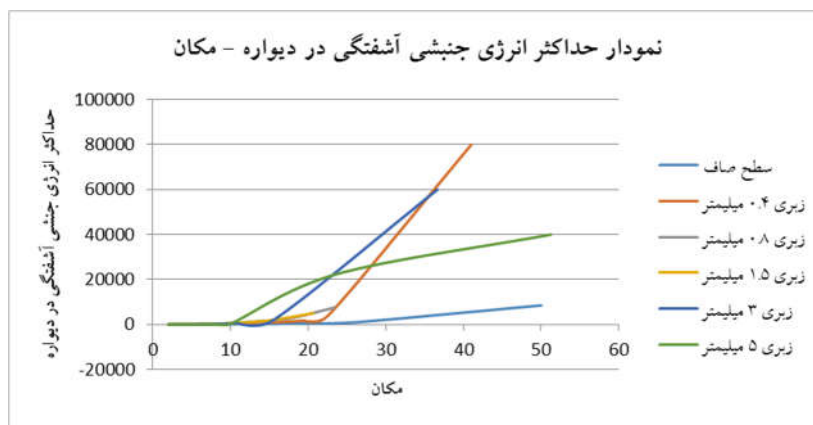
شکل ۱۳. نمودار سرعت شعله برحسب مکان در لوله‌هایی با زبری متفاوت

بررسی سرعت شعله — مکان در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که طول پیش از انفجار در لوله‌ی با زبری ۵ میلی‌متر کوتاه است و در سطح صاف، بیشترین حد را دارد. همچنین در همه‌ی زبری‌ها سرعت حداکثر یکسان است.



شکل ۱۴. نمودار حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی شعله در دیواره برحسب زمان در لوله‌هایی با زبری متفاوت

بررسی بعدی به رابطه‌ی حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی شعله در دیواره، زمان و مکان مربوط می‌شود. تغییر شیب حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی، معیاری از وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار است. همان طور که در شکل ۱۵ مشخص است، در زبری ۵ میلی‌متر این تغییر شیب زودتر رخ داده و به‌طور تقریبی با کاهش زبری، زمان وقوع تغییر شیب افزایش یافته است.



شکل ۱۵. نمودار حداکثر انرژی جنبشی آشفته‌گی شعله در دیواره برحسب مکان در لوله‌هایی با زبری متفاوت

تغییر شیب حداکثر انرژی آشفستگی در دیواره برحسب مکان، معیاری از وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار و به‌نوعی طول پیش از انفجار است. همان‌طور که شکل ۱۶ نشان می‌دهد، این تغییر شیب در زبری ۵ میلی‌متر زودتر رخ می‌دهد و تقریباً با کاهش زبری به تأخیر می‌افتد.

در مجموع، با بررسی نمودارهای بالا می‌توان نتیجه گرفت:

- افزایش زبری لوله، سبب کاهش زمان لازم برای وقوع پدیده‌ی گذر از احتراق به انفجار می‌شود؛
- افزایش زبری لوله سبب کاهش طول پیش از انفجار می‌شود.
- با توجه به تغییرات حداکثر انرژی آشفستگی در دیواره برحسب زبری می‌توان استدلال کرد که افزایش زبری، سبب افزایش آشفستگی جریان و به سبب آن، افزایش شتاب شعله‌ی آشفته می‌شود و پدیده‌ی گذر را تسهیل می‌کند.

پی‌نوشت‌ها

1. Deflagration to detonation transition (DDT)
2. Richtmyer-Meshkov
3. Gambit
4. Fluent
5. Roughness
6. Implicit

منابع

۱. پاتانکار، س. (۱۳۸۲)، «محاسبات عددی - کامپیوتری انتقال حرارت و حرکت سیالات»، ترجمه محمد مقیمیان، مشهد، انتشارات دانشگاه فردوسی.
2. Bollinger, L.E.; Fong, M.C. & Edse, R. (1961). "Experimental measurements and
3. Chapin, M.D. (2005), "Thesis: A study of deflagration to detonation transition in a pulsed detonation engine", A thesis presented to the academic faculty, Georgia Institute of Technology.
4. Ciccarelli, G. & Dorofeev, S. (2008), "Flame acceleration and transition to detonation in ducts progress in energy and combustion science".
5. Gu, L.S.; Knystautas, R. & Lee, J.H.S. (1988), "Influence of obstacle spacing on the propagation of quasi-detonation", In: Kuhl AL., et al., Editors dynamics of explosions, Vol. 104. Washington, DC: AIAA progress of astronautics and aeronautics; p. 230-47.
6. Kuznetsov, M.; Matsuk, I. Alekseev, V.; Breitung, W. & Dorofeev, S. (2005), "DDT in a smooth tube filled with a hydrogen-oxygen mixture", Shock waves.
7. Lee, J.H.; Knystautas, R. & Chan, C.K. (1985), "Turbulent flame propagation in obstacle-filled tubes", Proc. combust Inst.; 20: 1663-72.

8. Moen, I.O. (1982), "The influence of turbulence on flame propagation in obstacle environments", First international specialist meeting on fuel-air explosions, Montreal, University of Waterloo Press SM study No. 16, p. 101-13.
9. Schultz, E.; Wintenberger, E. & Shepherd, J. (2001), "Investigation of deflagration to detonation transition for applications to pulse detonation engine ignition systems", Source: Proceedings of the 16th JANNAF propulsion symposium, Chemical propulsion.
10. Soloukhin, R.I. (1961), "Deflagration to detonation transition in gases", Soviet Prikladn Mech Tech Phys. 4: 128.
11. Wingerden, K.; Bjerketvedt, V.D. & Bakke, J.R. (2006), "Detonation in pipes and in the open-source", <http://www.safetynet.de/Publications/articles/CMRNov99.pdf>.

معرفی کتاب



آموزش فنی و حرفه‌ای در ایران با تأکید بر آموزش‌های رسمی

مؤلف: شهناز جبل عاملی

ناشر: انتشارات دانشگاهیان

نوبت چاپ اول: ۱۳۹۵

آموزش و تربیت فنی و حرفه‌ای یکی از سه زیرمجموعه نظام آموزش در عصر کنونی به‌شمار می‌رود. در مقایسه با زیرنظام‌های آموزش و پرورش عمومی و آموزش عالی بسیار زودبازده است زیرا که در برخی از انواع آن کارآموز می‌تواند از مهارت‌های فراگرفته در فرایند آموزش بلافاصله در محیط واقعی کار بهره‌برداری کند.

با وجود این امتیاز نسبی، در کشورهایی مانند ایران که بیشتر گرفتار اقتصاد تک‌محصولی وابسته به خام‌فروشی ذخایر ملی - به‌جای اقتصاد درون‌زا و متکی بر صلاحیت‌ها و قابلیت‌های نیروی انسانی بومی - هستند، این نوع آموزش‌ها با بی‌توجهی و نابسامانی‌های چشم‌گیری روبه‌رو می‌شوند. خصوصیات اقتصادهای وابسته به خام‌فروشی ذخایر کشور، سهولت ورود بی‌برنامه تولیدات و فناوری‌های سایر کشورها به داخل و دور بودن نهادهای پژوهشی و آموزشی از فرایند شکل‌گیری و فرآوری این نوع تولیدات و فناوری‌ها و در نتیجه نسخه‌برداری تقلیدی از نظام‌ها و شیوه‌های آموزش و تربیت فنی و حرفه‌ای کشورهای خارجی است.

از این رو، در ایران پس از انقلاب مشروطیت انواع شیوه‌ها و مراکز گوناگون آموزش فنی و حرفه‌ای با کمک کشورهای مختلف و از طریق نهادها و سازمان‌های وابسته به دولت که مسوولیتی در آموزش نداشتند، شکل گرفت. از جمله می‌توان به هنرستان ایران و آلمان (آلمان)، مرکز آموزش شرکت نفت (انگلیس)، کانون کارآموزی تهران (بلژیک)، مرکز آموزش فنی و حرفه‌ای تبریز (فرانسه)، ذوب آهن اصفهان (شوروی سابق)، مرکز آموزش ماشین‌سازی اراک (چکسلواکی سابق)، مرکز آموزش تراکتورسازی تبریز (رومانی)، هنرستان‌های ارت (جامعه بین‌المللی یهود و فلسطین اشغالی)، هنرستان سونی در مشهد (ژاپن) و... اشاره کرد.

در کشور ما این نوع آموزش از ابتدا تاکنون دچار تحولات و تلاطم‌های گوناگون بوده و در هر مقطع زمانی براساس سلاقت و نیازهای واقعی یا احتمالی جامعه دچار دگرگونی‌هایی شده است. بنابراین برنامه‌ریزان پیوسته با نوعی سردرگمی و بلاتکنیکی مواجه بوده‌اند. از آنجا که شناخت گذشته و تاریخچه‌ی این گونه آموزش‌ها می‌تواند راه‌گشای

مناسبی برای حل این مشکل و نهایتاً ساماندهی وضعیت کنونی و برنامه‌ریزی دقیق‌تری برای وضعیت مطلوب و آینده کشور باشد، در این کتاب، آموزش و پرورش در مقاطع مختلف و با رویکرد آموزش‌های فنی و حرفه‌ای در سه مرحله مورد بررسی قرار گرفته است:

مرحله اول: قبل از برقراری نظام آموزش و پرورش نوین در ایران که آموزش فنی و حرفه‌ای نظام یافته نبود و دولت در برگزاری آن نقشی نداشت؛

مرحله دوم: پس از برقراری نظام نوین آموزش و پرورش تا قبل از پیروزی انقلاب اسلامی که در این دوره آموزش فنی و حرفه‌ای توسط دولت به رسمیت شناخته شد و در دل نظام آموزشی که نظامی الگو برداشته شده از تجربه کشورهای دیگر بود، قرار گرفت؛

مرحله سوم: آموزش فنی و حرفه‌ای در جمهوری اسلامی ایران که در آن سخن از استقلال و فرهنگ اسلامی به میان آمد و نگاه‌ها تغییر یافت و کوشش شد در جمهوری اسلامی ایران نظامی خاص برپا شود.

Numerical study of the effects of roughness of the inner wall of the pipe on the length of the pre-detonation

Mohsen Azmoodeh

Instructor of Shahid Babaei Technical and Vocational College, Technical and Vocational University, Qazvin, Iran

Received: 05/08/2017

Accepted: 15/11/2017

Abstract

Today, many research on the process of transition from Deflagration to Detonation Transition (DDT) has been found in many industries due to the explosive use in pulse detonation engines and in the meantime, the roughness effect is remarkable. In this research, by choosing different roughness and studying its effect on the length of the pre-detonation, it is tried to answer the question that what are the effects of roughness in the phenomenon of Deflagration to Detonation Transition. To answer this question, a numerical method was used. In general, it has been tried to simulate Deflagration to Detonation Transition numerically by using two Gambit and Fluent software in a closed tube with a smooth and five different rough surfaces and finally compare its results in six levels by plotting two velocity-location diagrams and maximum kinetic energy of turbulence in the wall-location of this process. The results show that the increase in pipe roughness reduced the time required for the occurrence of Deflagration to Detonation Transition and also reduced the length of pre-detonation. In view of the maximum variation in the turbulence energy in the wall based on roughness, it can be argued that increased roughness increases the turbulence of the flow, which in turn increases the turbulent flame acceleration and facilitates the transition phenomenon.

Keywords: Deflagration to Detonation Transition, Length of the pre-detonation, Roughness.

Magnet design of nuclear magnetic resonance system for using well-logging applications

Behnam Asadi

Graduate Student, Faculty of Energy and Physics Engineering, Amir Kabir University, Tehran, Iran

Masoumeh Mohammadian*

Lecturer of Dr. Shariati Technical and Vocational College, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

Vahid Esmaeili

Graduated Degree, Faculty of Energy and Physics, Amir Kabir University, Tehran, Iran

Hossein Afarideh

Assistant Professor, Faculty of Energy and Physics, Amir Kabir University, Tehran, Iran

Received: 08/08/2017

Accepted: 07/12/2017

Abstract

Nuclear Magnetic Resonance Measuring Instrument is an important tool for reviewing and specifying the characteristics of oil reservoirs that provides information on the type of fluid in the formation. The basis of the analysis of this tool is the use of longitudinal and vertical spin relaxation time measurements to understand the structure of the reservoir and the type of fluid inside them, which ultimately leads to an estimate of the absolute permeability of hydrocarbon reservoirs and fluid types. Various structures of this tool can be provided according to the type of magnet that is briefly described in this study and an example of these structures is simulated to create a parallel magnetic field with in-well formation. The antenna wrapped around the magnet creates a magnetic field perpendicular to the static field generated by the magnet. The static magnetic field produced by a gradient field magnet decreases with increasing distance from the magnet. Different depths of the formation can be studied by choosing different operating frequencies. The frequencies commonly used for these instruments are 600 to 900 kHz, and the depth and magnitude of the magnetic field at these frequencies obtained 7.85, 78.8, 176, and 140 Gauss, respectively. In this research, CST software has been used to design the device's permanent magnet and simulate it for different types of materials and dimensions of the magnet. Finally, after examining different parameters, a ferrite magnet Y22H with a radius of 3 inches and 82.8 inches long was introduced as a suitable magnet. Investigating the effects of temperature inside the well on the magnetic response of the magnet showed that the magnitude of the magnetic field in the sensitive region decreases with increasing temperature. Also, a beryllium-copper or hardened

stainless steel enclosure was designed as a magnet holder that was non-magnetic and its effect was investigated on the field of magnets. Then the effects of the cement wall of the well on the field were also studied. Also, considering that the relative magnetic coefficient of the ferrite material is in the range of 1.65-1.65, the effects of this parameter change on the field of magnets were investigated. The increase of the relative magnetic permeability coefficient decreases the amount of magnetic field produced at the depth of the internal examination formation. The effect of the magnet radius on the produced field has also been analyzed in other ways, showing that the device with a diameter of 6 inches showed greater depth of penetration than the instrument with a diameter of 4.5 inches, and as a result, the first one will be a suitable tool for investigating the depth of the formation.

Keywords: Larmor Frequency, Nuclear Magnetic Resonance, Permanent Magnet, Static Magnetic Field, Spin Relaxation Time, Well-Logging Tools.

The application of PSpice software in the investigation of the operation of thyristor gate trigger circuits

Mohammad Reza Modabernia

Instructor of Shahid Chamran Technical and Vocational College, Technical
and Vocational University, Rasht, Gilan, Iran

Abdolreza Tavakoli

Department of Eletcrical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad
University, Lahijan, Iran

Received: 12/12/2017

Accepted: 19/02/2018

Abstract

In this paper, an approach based on computer simulation has been introduced to instruct the structure and application of thyristor gate firing circuits, and the capabilities of the PSpice simulator used to simulate the power electronic circuits. The use of Diac in basic Dimmer circuit and second order Dimmer as an AC-AC converter, UJT with zero crossing detector and voltage source, PUT with zero crossing detector and current source pulse width modulation and gate IC driver have been analyzed theoretically and their results have been compared with the PSpice simulation outcomes to form an approach to instruct the application of thyristor gate trigger circuits. At first, these results tackle and meet the educational needs of students who are interested in applicable circuits and find them less in the power electronic references easily. Secondly, the students will be familiarized with the significant capabilities of Spice-based simulators in analyzing the large and complicated power electronic circuits. Finally, the proposed approach shows the students that there is no fundamental difference between the concepts of the theory presented in classrooms with simulation results that are close to reality.

Keywords: Gate Firing Circuits, Gate Trigger Circuits, Pulse Width Modulation, PWM Thyristor, PSpice.

* **Corresponding author:** mmodabernia@tvu.ac.ir

Optimal allocation of SVC and TCSC in power system by means of fuzzy estimator with the approach of increasing the static stability of the voltage

Mohammad Ali Alipour*

Instructor of Darab Technical and Vocational College, Technical and
Vocational University, Fars, Iran

Received: 25/11/2017

Accepted: 14/02/2018

Abstract

In recent years, the demand for electrical energy has been rising steadily, whilst the expansion of transmission lines and increased energy production capacity due to environmental and system constraints do not increase as much as this increase in demand. This rapid increasing in load demand forces power systems to operate near the critical limits due to economic and environmental constraints. FACT controllers such as SVC and TCSC are used for enhancing performance of power systems in terms of voltage/angle stability while improving the power transfer capability and voltage profile in steady state conditions. Finding the best location of FACTS devices make these as powerful tool for its aims. In this paper, we determine the location of SVC and TCSC for increasing the static voltage stability in buses by using fuzzy counter. This suggested way is tested by using both Matlab software and Matpower on networks with 14 and 30 IEEE buses, and acceptable results have been achieved. The continuous static load distribution (cpf) method was used to study the static stability of the voltage using the Newton-Raphson method.

Keywords: Continuous Load Distribution, FACT Controller, Flexible AC, Fuzzy Counter, Newton - Raphson Method, Static Stability of Voltage.

* **Corresponding author:** alipour1352791@gmail.com

Modeling and optimizing the CIGS thin film cell structure to increase efficiency

Meraj Rajaei*

Assistant Professor of Dr. Shariati Technical and Vocational College,
Technical and Vocational University, Tehran, Iran

Received: 13/11/2017

Accepted: 18/02/2018

Abstract

The CIGS thin film solar cells are one of the best choices for converting solar energy to electricity. They are extremely noticed by researchers for their high efficiency and low cost of construction. In this study, the performance and factors affecting the efficiency of solar cells have been investigated. The change in the thickness of the layers and the different values of the molar ratio of gallium are two effective factors in increasing the yield. The various parameters of the structure have been improved with the use of the Silvaco simulation software (Atlas) to provide the maximum possible returns for the structure. Therefore, in this research the efficiency of the solar cell is investigated by considering some of the most important cell curves after examining various conditions such as layer thickness variations (CIGS absorbent layer, transparent layer ZnO, CdS layer). Design of a multilayer cell with two or three different acceptor (and Ga) concentrations can have a significant effect on increasing the efficiency of these cells. The simulation results have been analyzed using theoretical relationships as well as physically, which was increased by about 5.9% compared with the original cell model and confirmed the accuracy of the structure simulation. In the end, the voltage-current curve of the base cell is plotted and extracted numerically and graphically using the TonyPlot sub-module and compared with the references. These results also suggest further characterizations to be made for the CIGS layers and the complete solar cells.

Keywords: Efficiency, Gallium molar ratio, Optimization, Simulator SILVACO, Thin layer cells CIGS.

* Corresponding author: m.rajaee@tvu.ac.ir

Robust control for the indefinite model of the semi-active suspension system

Mojtaba Masoumnejad*

Assistant Professor of Shahid Chamran Technical and Vocational College,
Technical and Vocational University, Rasht, Gilan, Iran

Received: 12/12/2017

Accepted: 19/02/2018

Abstract

Today, extensive research is being done on advanced control methods for a semi-active suspension system. Efforts are being made to achieve more safety for passengers and comfortable driving. On the other hand, the presence of disturbances and uncertainties in the dynamical systems are inevitable, and the uncertain suspension of the car will not be excluded. In this paper, a control structure consisting of sliding mode control, fuzzy logic method and predictive filter has been proposed that has high resistance in confrontation with road disturbances and uncertainty in dynamical system. Improving the performance of sliding mode controller by intelligently selecting its parameters with the help of fuzzy logic and using a powerful predictor in the refinement of uncertain damaged data system can be regarded as the innovation of the proposed algorithm. Simulation results show the optimal performance of a semi-active suspension system in the presence of road disturbances and uncertainties.

Keywords: Fuzzy logic, Predictive filter, Semi-active suspension, Sliding mode control, Uncertainty.

* **Corresponding author:** masoumnezhad_m@yahoo.com

Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms

Mehdi Sabri*

PhD Candidate, Department of Electrical Engineering,
Islamic Azad University Urmia Branch, Iran

Received: 05/08/2017

Accepted: 17/12/2017

Abstract

The Cuckoo Search algorithm (CS) is introduced in this paper for installing optimal Power System Stabilizers (PSSs) designed in a multi-machine power system. The problem of setting the PSSs parameter is formulated as an optimization problem solved by CS algorithm. A special value based on the objective function including the damping ratio and the damping factor of the lightly damped electromechanical modes, is considered for the PSSs design problem. The performance of the proposed CS based PSSs (CSPSS) has been compared with Genetic Algorithm (GA) based PSSs (GAPSS) and the Conventional PSSs (CPSS) under different operating conditions and disturbances. The results of CSPSS have been developed through time-domain analysis, special values and performance indicators. Also, the effect of the proposed algorithm in providing good damping characteristics has been confirmed.

Keywords: Conventional PSSs (CPSS), Cuckoo search based PSSs (CSPSS), Genetic algorithm based PSSS (GAPSS), Power system stabilizer (PSS), The integral of absolute value of the error (IAE), The integral of the time multiplied absolute value of the error (ITAE).

* Corresponding author: m.sabri@iaurmia.ac.ir

Explaining the green job identification and prioritization of renewable energy domain: Wind energy

Ladan Razi Kordmahaleh

PhD Student, Department of Environmental Education, Payame Noor University, Tehran, Iran

Maryam Larijani*

Assistant Professor of Department of Environmental Education, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: 20/09/2017

Accepted: 25/12/2017

Abstract

Considering the importance of renewable energy in solving the energy crisis and air pollution, in this article, the underlying factors and the dimensions of green jobs are identified and analyzed. In this research, grounded theory (field theory) was used with purposive sampling (snowball) and theoretical saturation criterion. Semi-structured interviews with 50 experts were used for collecting data. Using the indicators and its components, a researcher-made questionnaire was distributed among the suppliers of wind energy businesses. According to the results, the jobs that lead to solving the critical environmental energy and air pollution, have the necessary indicators required for greenness. Five types of jobs in the field of wind energy were introduced green, but their degree of greenness was different, and were classified according to the importance of being green.

Keywords: Green Degree, Green Job, Grounded Theory, Renewable Energy, Wind Energy.

* **Corresponding author:** larijani.research@yahoo.com

Contents

Explaining the green job identification and prioritization of renewable energy domain: wind energy	7
---	----------

Ladan Razi kordmahaleh – Maryam Larijani

Stabilization and control of the power system using meta-heuristic algorithms	8
--	----------

Mehdi Sabri

Robust control for the indefinite model of the semi-active suspension system.....	9
--	----------

Mojtaba Masoumnejad

Modeling and optimizing the CIGS thin film cell structure to increase efficiency.....	10
--	-----------

Meraj Rajaei

Optimal allocation of SVC and TCSC in power system by means of fuzzy estimator with the approach of increasing the static stability of the voltage.....	11
--	-----------

Mohammad Ali Alipour

The application of pspice software in the investigation of the operation of thyristor gate trigger circuits	12
--	-----------

Mohammad Reza Modabernia – Abdolreza Tavakoli

Magnet design of nuclear magnetic resonance system for using well-logging applications	13
---	-----------

Behnam Asadi – Masoumeh Mohammadian – Vahid Esmaeili – Hossein Afarideh

Numerical study of the effects of roughness of the inner wall of the pipe on the length of the pre-detonation	14
--	-----------

Mohsen Azmoodeh



Cover designer and implementation:
Mohammad Moshtaghi -

Samira Danaseresht

Editorial Board:

Dr. Ebrahim Salehi Omran:	Professor of Mazandaran University and Technical and Vocational University
Dr. Nematollah Azizi:	Professor of Kurdistan University
Dr. Seyyed Ali Asghar Ghoreishi:	Professor of Babol Noshirvani University of Technology
Dr. Masoud Shafiee:	Professor of Amir Kabir University of Technology
Dr. Seyyed Heydar Mirfakhreddini:	Associate Professor of Technical and Vocational University
Dr. Vida Taghvaei:	Associate Professor of Technical and Vocational University
Dr. Reza Mahdi:	Assistant Professor of Research Institute for Cultural and Social Studies
Dr. Mehdi Alinaqhzadeh Ardestani:	Assistant Professor of Technical and Vocational University
Dr. Meraj Rajaei:	Assistant Professor of Technical and Vocational University

Address: Central Organization of Technical and Vocational University, No. 4, Eastern Brazil St.,
Vanak Sq., Tehran, Iran,

Postal Code: 1435761137

Tel: (+98-21)42350115

Email: karafan@tvu.ac.ir

Website: <http://karafan.tvu.ac.ir>

In the Name of God

Karafan

**The Scientific – Extension Semi Annual of
Technical and Vocational University**

Autumn & Winter, 2017

Vol. 14, No. 42

**Due to certificate no. 3/18/60837 dated 21/07/2013
from the scientific publications review of Commission of the
Ministry of Science, Research and Technology this journal has
been licensed to publish.**

Address: Central Organization of Technical and Vocational University,
No. 4, Eastern Brazil St., Vanak Sq., Tehran, Iran

Postal Code: 1435761137

Tel: (+98-21)42350115

Email: karafan@tvu.ac.ir & Karafan2017@gmail.com

Website: <http://karafan.tvu.ac.ir>