

کمینه‌سازی میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی ناشی از خطوط انتقال هوایی با استفاده از الگوریتم NSGA-II مبتنی بر بهینه‌سازی چند هدفه

سید میثم سیدبرزگر^{۱*}، معصومه خودسوز^۲

۱- استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲- استادیار، دانشگاه علم و فناوری مازندران،

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۳، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۴)

چکیده

کاهش میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به طراحی مطلوب دکل‌های فشارقوی و خطوط انتقال وابسته است. در این راستا پارامترهای زیادی لازم است به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شوند. تغییر همزمان این پارامترها در رسیدن به سطح میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مناسب امری لازم است. بر این اساس ابزارهای بهینه‌سازی به منظور دستیابی به موثرترین طراحی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله، بهینه‌سازی‌ها با توجه به کمینه‌سازی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به صورت تابعی دو هدفه مستقل با استفاده از روش NSGA-II انجام شده است. ارتفاع هادی فاز و محافظ، فاصله هادی‌های فاز از یکدیگر، فاصله هادی محافظ از بخش مرکزی دکل، فاصله مابین هادی‌ها در باندل، مقدار شکم هادی فاز و محافظ در وسط اسپین، متغیرهایی هستند که در این مقاله به آنها توجه شده است. در کنار هر یک از این متغیرها، قيودی در نظر گرفته شده است که مقدار متغیرها را به لحاظ آرایش فیزیکی، حفاظت الکتریکی و نیروهای مکانیکی محدود ساخته است. در این مقاله محاسبات و کمینه‌سازی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با استفاده از روش اجزاء محدود توسط نرم‌افزار COMSOL به صورت لینک با نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. نتایج به دست آمده بر اساس الگوریتم ارائه شده نشان داده که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب ۲۱/۷ درصد و ۳۴/۱ درصد نسبت به حالت اولیه کاهش یافته است. در نتیجه این امر، دامنه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در فاصله ۱ m از سطح زمین کاهش چشم‌گیری نسبت به حالت اولیه کسب نموده است.

کلیدواژه‌ها: میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، بهینه‌سازی چند متغیره، قيود حفاظتی، روش اجزاء محدود

۱. مقدمه

خطوط انتقال انرژی الکتریکی هوایی، روش‌های متعددی مطرح و مورد بررسی قرار گرفته است. این روش‌ها به دو گروه مختلف روش‌های ذاتی^۱ و غیر ذاتی^۲ تقسیم می‌شوند [۲].

در روش ذاتی، پارامترهای هندسی و الکتریکی عامل میدان مغناطیسی، برای کاهش میدان مغناطیسی (یا چگالی شار مغناطیسی) اصلاح می‌شوند [۳]. از راه حل‌های موجود در این گروه می‌توان به مواردی هم‌چون تغییر آرایش دکل و هادی‌ها، روش جابه‌جایی فاز و باندل کردن فازها اشاره کرد.

روش غیرذاتی بر مبنای قرار دادن تجهیزات اضافی به عنوان سیستم تضعیف میدان در نزدیکی منابع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بنا نهاده شده است. این روش با توجه به فناوری به کار رفته در تضعیف میدان به دو دسته غیرفعال و فعال تقسیم می‌گردد [۴].

قرار گرفتن در معرض میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی فرکانس‌های کم در حد شبکه قدرت ممکن است باعث اثرات محیطی ناخواسته شود. افرادی که در مجاورت ۵۰ m از خط انتقال زندگی می‌کنند، ۲۳٪ بیشتر از افرادی که در مسافت ۵۰ m تا ۱۰۰ m زندگی می‌کنند مبتلا به سرطان می‌گردند. با توجه به این امر مهم، سازمان‌های شناخته شده محیط زیست در امر بهداشت و سلامت، سطوح محدودی را برای مواجهه با امواج الکترومغناطیسی تعیین کرده‌اند [۱].

در میان تجهیزات شبکه قدرت، خطوط هوایی نقش بسزایی در انتقال انرژی الکتریکی در یک شبکه ایفا می‌نمایند، گستردگی آنها در مناطق مختلف عامل بسیار مهمی در انتشار امواج الکترومغناطیسی در سطح زمین می‌باشد. به منظور جلوگیری از اثرات زیان‌بار امواج الکترومغناطیسی با فرکانس پایین ناشی از

¹ Intrinsic

² Extrinsic

عددی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی فرضیات متعددی را در نظر گرفته‌اند که در دقت جواب‌ها تاثیرگذار می‌باشند. به علاوه عدم در نظر گرفتن تمامی پارامترهای دکل و خط فشارقوی که در کمینه‌سازی میدان‌ها موثر هستند و همچنین رعایت نکردن قیود الکتریکی، مکانیکی و حفاظتی در این امر را می‌توان از نقاط ضعف این مراجع دانست [۸-۱۱]. در این مقاله با توجه به دقت روش‌های مبتنی بر اجزاء محدود در تحلیل هم‌زمان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، از نرم‌افزار مبتنی بر اجزاء محدود COMSOL استفاده شده است [۱۲]. بهینه‌سازی بر اساس روش الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب^۱ [۱۳] انجام و پارامترهای خط و دکل فشارقوی با در نظر گرفتن قیود الکتریکی، مکانیکی و حفاظتی در راستای کمینه‌سازی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تحت تابعی دو هدفه بهینه شده‌اند. به منظور انجام محاسبات از لینک دو نرم‌افزار COMSOL و MATLAB استفاده شده است. لینک این دو نرم‌افزار محیط بسیار قدرتمندی را برای انجام محاسبات اجزاء محدود بر اساس تصمیمات روش بهینه‌سازی در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

در این مقاله در بخش دوم به بررسی روش NSGA II پرداخته شده است. در بخش سوم روش اجزاء محدود بررسی شده است. پارامترهای مهم در بهینه‌سازی، توابع هدف بکار رفته در بخش چهارم، روندنمای پیشنهادی در بخش پنجم و نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی در بخش ششم ارائه شده است. در نهایت در بخش هفتم از این مقاله نتیجه‌گیری بیان گردیده است.

۲. بهینه‌سازی چند هدفه

همان‌طور که بیان گردید، برای پیشگیری از خطا در تصمیم‌گیری، روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه در سال‌های گذشته مورد توجه قرار گرفته و با پیشرفت روز افزون همراه بوده‌اند. روش‌های متفاوتی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چند هدفه وجود دارد که به دو دسته کلی روش‌های تجزیه و روش‌های مستقیم تقسیم می‌شوند.

در روش‌های تجزیه، مسئله بهینه‌سازی چند هدفه ابتدا به یک مسئله تک هدفه تبدیل شده و سپس حل می‌شود. این در حالی است که در روش‌های مستقیم مسئله بهینه‌سازی چند هدفه به همان صورت چند هدفه حل می‌گردد.

هر کدام از روش‌های تجزیه با تدابیر خاصی سعی در ساده کردن مسئله و سپس حل آن دارند. این روش‌ها به منظور تبدیل

با توجه به مشکلات پیش‌رو در روش‌های غیرذاتی، استفاده از روش‌های ذاتی در طراحی دکل‌های فشارقوی و خطوط انتقال از اهمیت فراوانی برخوردار است. در این راستا استفاده از رویکرد تحلیلی بر اساس استانداردهای بین‌المللی [۵] و مدل‌سازی اجزاء محدود [۶] استفاده شده است.

همان‌طور که در روش‌های ذاتی به آن اشاره شد، تغییرات ساختاری در آرایش خطوط انتقال عامل بسیار مهمی در کاهش میدان الکتریکی و مغناطیسی است. با توجه به تنوع پارامترها، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی می‌تواند روشی مفید و کاربردی تلقی شود. طراحی بهینه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر اساس منابع تولید آن و شرایط نقاطی که باید بهینه شود مشخص می‌گردد. معمولاً ممکن است از ترکیب روش‌های مختلف برای کاهش میدان الکتریکی و مغناطیسی استفاده شود.

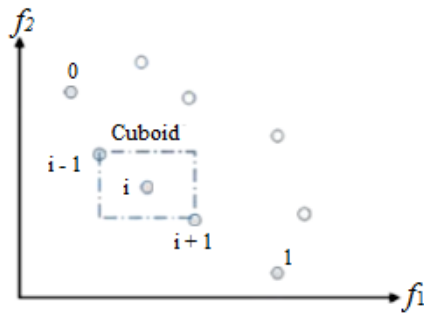
انتخاب تابع هدف و وزن پارامترها نقش تعیین‌کننده‌ای در بهینه‌سازی آرایش خطوط انتقال انرژی دارد. استفاده از پارامترهای مختلف در یک تابع هدف، برای به حداقل رساندن هم‌زمان شدت میدان الکتریکی و مغناطیسی می‌تواند در شرایط بهینه خاصی به‌دست آیند که ممکن است پیامدهای جانبی خاصی را در بر داشته باشند. از جمله این پیامدها می‌توان به مقدار گرادیان سطح هادی (میدان الکتریکی سطحی)، سر و صداها قابل شنیدن، تلفات توان ظاهری، تداخلات رادیویی، تلفات کرونا، القاء متقابل در فازها و اثرات خازن‌های فازها اشاره کرد [۷].

با توجه به مشکلات ناشی از تابع تک هدفه و مستقل بودن میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، بهینه‌سازی می‌تواند به‌عنوان یک مسئله دو هدفه تلقی گردد. در این راستا، به‌دست آوردن مجموعه‌ای بهینه از راه‌حل‌ها برای به حداقل رساندن شدت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را می‌توان در نظر گرفت.

مدل‌های چند هدفه به منظور بهینه‌سازی در یک مجموعه پیوسته از جواب‌ها به کار می‌روند و در نهایت، یک مدل ریاضی را در اختیار می‌گذارند که حل آن می‌تواند گزینه‌های طراحی را در اختیار برنامه‌ریز قرار دهد. این فرآیندها حل جواب بهینه را تضمین نمی‌کنند، اما تنها روش موجود برای حل مسائلی هستند که توابعی مستقل برای بهینه‌سازی را در کنار یک‌دیگر قرار می‌دهند.

مراجعی که در این زمینه تحقیقات خود را ارائه نموده‌اند از تابع‌ای تک هدفه در راستای کمینه‌سازی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی استفاده نموده‌اند. این مقالات جهت ساده‌سازی حل

¹ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II)



شکل (۱): فاصله ازدحامی پاسخ نام در الگوریتم بهینه‌سازی NSGA- II

$$d_i^1 = \frac{|f_1^{i+1} - f_1^{i=1}|}{f_1^{\max} - f_1^{\min}}$$

$$d_i^2 = \frac{|f_2^{i+1} - f_2^{i=1}|}{f_2^{\max} - f_2^{\min}}$$

$$d_i = d_i^1 + d_i^2$$

در این رابطه f_1^{i+1} مقدار تابع هدف اول در جواب $i+1$ ، $f_1^{i=1}$ مقدار تابع هدف اول در جواب $i-1$ ، f_1^{\max} بیشترین مقدار تابع هدف اول در همان جبهه، f_1^{\min} کمترین مقدار تابع هدف اول در همان جبهه d_i^1 فاصله ازدحامی نام در تابع هدف اول و فاصله d_i^2 فاصله ازدحامی نام در تابع هدف دوم و در نهایت d_i فاصله ازدحامی نام است. برای محاسبه فاصله ازدحامی در حالت کلی از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

$$d_i^j = \frac{|f_j^{i+1} - f_j^{i=1}|}{f_j^{\max} - f_j^{\min}}$$

$$d_i = \sum_{j=1}^m d_i^j$$

در این رابطه f_j^{i+1} مقدار تابع هدف نام در جواب $i+1$ ، $f_j^{i=1}$ مقدار تابع جواب نام در جواب $i-1$ ، f_j^{\max} بیشترین مقدار تابع جواب نام، f_j^{\min} کمترین مقدار تابع نام در جواب نام، d_i^j فاصله ازدحامی نام در هدف نام و d_i فاصله ازدحامی نام در تمام اهداف نام است.

۳. روش اجزاء محدود

روش اجزای محدود که به اختصار FEM^۲ نامیده می‌شود، یک روش حل عددی می‌باشد که با توسعه کامپیوتر، به سرعت گسترش یافته است. با استفاده از روش اجزاء محدود، مسائلی که

یک مسئله چند هدفه به یک مسئله تک هدفه، به اجبار یک‌سری از اطلاعات فضای تصمیم را از دست می‌دهند که برای حل این مشکل باید مسئله چندین بار حل شود که بسیار وقت‌گیر است. همچنین هر باری که مسئله با این روش‌ها حل شود، یک جواب متفاوت به دست می‌آید. این در حالی است که روش‌های مستقیم با این مشکلات روبه‌رو نیستند و بسیار سریع‌تر و دقیق‌تر جواب بهینه را به دست می‌آورند. از جمله روش‌های مستقیم می‌توان به الگوریتم‌های تکاملی^۱ MOPSO، NSGA-II و ... اشاره کرد. الگوریتم کلی NSGA-II که یکی از حالت‌های چند هدفه الگوریتم ژنتیک می‌باشد در این مقاله مورد توجه قرار گرفته است.

۲-۱. الگوریتم ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب (NSGA-II)

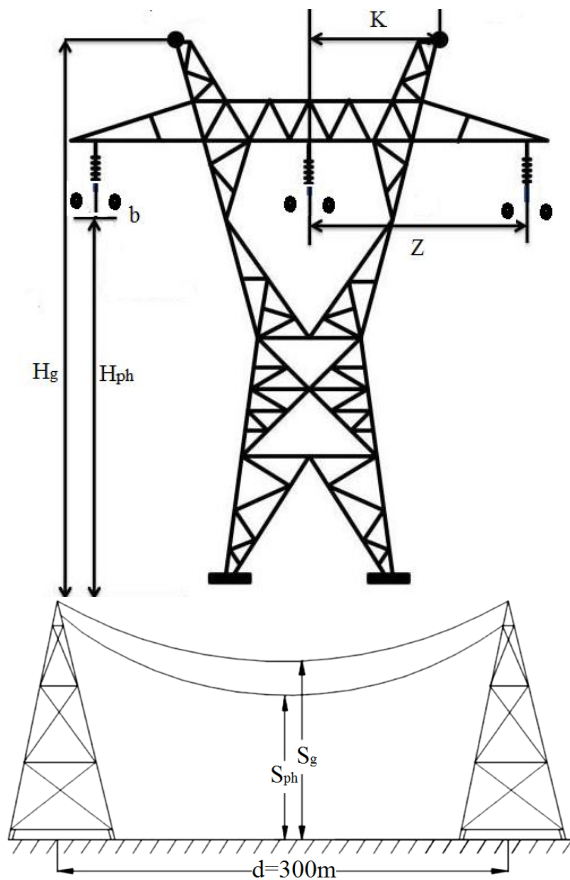
الگوریتم NSGA-II راه‌حل سریع‌تری نسبت به سایر روش‌ها در رتبه‌بندی دارد و لذا پیچیدگی‌های محاسباتی زیادی ندارد. همچنین این الگوریتم از فاصله ازدحامی برای به‌دست آوردن جبهه جواب یکنواخت‌تر نسبت به سایر الگوریتم‌ها و تخمین چگالی نقاط حول جواب‌ها استفاده می‌نماید. لازم به ذکر است از فاکتور فاصله ازدحامی برای انتخاب بهتر جواب‌ها از نظر پراکندگی بر روی یک جبهه استفاده می‌شود. به‌طور کلی اصول کار الگوریتم NSGA-II را می‌توان به شرح ذیل بیان نمود:

- ۱- ایجاد جمعیت اولیه
- ۲- محاسبه معیارهای برازندگی
- ۳- مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط‌های غلبه کردن
- ۴- محاسبه فاصله ازدحامی
- ۵- انتخاب: به محض این که جمعیت اولیه بر اساس شرط‌های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود. این انتخاب بر اساس رتبه جمعیت و فاصله ازدحامی صورت می‌پذیرد.
- ۶- انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید.
- ۷- تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش.
- ۸- جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل.
- ۹- تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می‌شوند.

با توجه به شکل (۱) [۱۴]، در حالت دو هدفه، فاصله ازدحامی برای پاسخ نام توسط مجموعه روابط (۱) محاسبه می‌شود.

^۲ Finite Element Method

^۱ Multi Objective Particle Swarm Optimization



شکل (۲): پروفیل و متغیرهای دکل و خط انتقال.

۴-۲. قیود

به منظور بهینه‌سازی متغیرهای خط و دکل مورد مطالعه، لازم است تا هر یک از پارامترها در بازه‌های مشخص تغییر داده شوند. از آنجایی که این تغییرات می‌بایست به لحاظ فنی و بهره‌برداری قابلیت اجرایی داشته باشند، قیود الکتریکی، حفاظتی و مکانیکی باید برای آنها در نظر گرفته شده است که در مراجع بصورت محدود مورد توجه قرار گرفته است. در ادامه به بررسی هریک از این قیود پرداخته شده است.

در تعیین مقدار تغییرات در شکم سیم همواره بیشینه نیروی مکانیکی وارد شده به دکل از طرف سیم مطابق رابطه (۴)، [۱۵] و همچنین بیشینه حد میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی مطابق جدول (۱) به ترتیب به‌عنوان قیدهای مکانیکی و الکتریکی لحاظ شده است.

$$y = \frac{(T - \mu g)}{\mu} \left[\cosh\left(\frac{\mu x}{(T - \mu g)}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

در این رابطه μ وزن واحد طول هادی و T مقدار کشش هادی در مختصات (x, y) است.

فاصله هادی‌های فاز نسبت به هم به‌عنوان دیگر پارامتر موثر

به وسیله معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی و شرایط مرزی معین تقریب زده می‌شود را می‌توان برای اشکال گوناگون با مرزهای نامنظم و ابعاد مختلف حل کرد. این روش در تحلیل توزیع پتانسیل و میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به یک ابزار مهم تبدیل شده است. در این روش با تقسیم فضای مورد نظر به قسمت‌های کوچک و با فرض خطی بودن روابط داخل آنها، سعی شده است تا معادلات دیفرانسیل تحلیل گردد. ایده اصلی این روش، جداسازی و ترکیب می‌باشد. جداسازی برای تحلیل هر بخش و ترکیب به منظور تحلیل هم‌زمان کل مدل است. معادلات اساسی به‌کار رفته در روش اجزاء محدود که معادلات ماکسول می‌باشد در رابطه (۳) آورده شده است.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \cdot D &= \rho \end{aligned} \quad (3)$$

۴. متغیرها، قیود و تابع هدف

۴-۱. متغیرها

خط انتقال انتخاب شده در این مقاله در سطح ولتاژ نامی ۱۳۲ کیلو ولت طراحی شده است. دکل‌های استفاده شده از نوع H52 می‌باشد که خط با باندل دوتایی بر روی آن سوار شده است [۱۱]. آرایش دکل مورد مطالعه در شکل (۲) و متغیرهای به‌کار رفته در طراحی خط در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): متغیرهای طراحی خط و دکل مورد مطالعه.

اندازه	نشان اختصاری	پارامتر خط و دکل
6 m	Z	فاصله بین هادی‌های فاز
5 m	K	فاصله بین سیم محافظ تا محور برج
0.3 m	b	فاصله بین هادی‌ها در هر فاز
18 m	H _{ph}	ارتفاع هادی‌های فاز
9 m	S _{ph}	ارتفاع هادی‌های فاز در وسط شکم خط
24 m	H _g	ارتفاع سیم محافظ
13 m	S _g	ارتفاع سیم محافظ در وسط شکم خط
<5000 V/m	E _{base}	حد میدان الکتریکی در مناطق عمومی برای مدت طولانی
<100 μT	B _{base}	حد میدان مغناطیسی در مناطق عمومی برای مدت طولانی

مطالعه، بازه تغییرات متغیرهای بهینه‌سازی با در نظر گرفتن قیود آنرا می‌توان بر اساس اطلاعات جدول (۲) بیان نمود. از آنجایی که شکم هادی خط نزدیک‌ترین فاصله ممکن به سطح زمین است، محاسبات میدان الکتریکی و مغناطیسی با توجه به نوع آرایش دکل و قیود به کار رفته، در این نقطه انجام شده است.

جدول (۲): محدوده تغییرات متغیرهای بهینه‌سازی و قیود مربوطه.

واحد	قیود	محدوده تغییرات	پارامتر خط و دکل
m	اثر متقابل فازها و استقامت عایقی بین هادی و دکل	$5 < Z < 8$	فاصله بین هادی های فاز
m	استقامت عایقی زنجیره مقرر	$15 < H_{ph} < 21$	ارتفاع هادی‌های فاز
m	بیشینه نیروی مکانیکی وارد به دکل، بیشینه حد میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین و فاصله از سیم محافظ	$6 < S_{ph} < 12$	ارتفاع هادی‌های فاز در وسط شکم خط
m	زاویه حفاظتی و فاصله سیم محافظ از هادی فاز	$21 < H_g < 27$	ارتفاع سیم محافظ
m	بیشینه نیروی مکانیکی وارد به دکل و فاصله از هادی فاز	$10 < S_g < 16$	ارتفاع سیم محافظ در وسط شکم خط
m	زاویه حفاظتی	$3 < K < 7$	فاصله بین سیم محافظ تا محور برج
m	فاصله عایقی بین فازها	$0.2 < b < 0.5$	فاصله بین هادی‌ها در هر فاز

۳-۴. تابع هدف

تابع هدف بهینه‌سازی ارائه شده در این مقاله بر مبنای کمینه‌سازی مستقل اثرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به عنوان یک تابع هدف دو متغیره مطابق رابطه (۷) در نظر گرفته شده است. بر این اساس هر یک از توابع میدان الکتریکی و مغناطیسی با استفاده از الگوریتم NSGA-II بهینه شده و جبهه پاره‌تو مورد نیاز را به دست خواهد داد.

$$F_1 = \min \{ \max E(x, y, z) \}$$

$$F_2 = \min \{ \max B(x, y, z) \}$$

(۷)

در این روابط F_1 تابع هدف کمینه‌سازی میدان الکتریکی، F_2 تابع هدف کمینه‌سازی میدان مغناطیسی، E دامنه میدان الکتریکی و B دامنه میدان مغناطیسی در مختصات (X, Y, Z) است. از آنجایی که بهینه‌سازی برای دو تابع هدف انجام می‌گیرد الزاما تمامی جواب‌های برای هر یک از توابع هدف بهینه نهایی نخواهد بود بلکه در پایان فرایند بهینه‌سازی، بهترین پاسخ‌ها توسط الگوریتم NSGA-II ارائه خواهد شد تا کاربر بنابر اولویت خود حالت مطلوب را انتخاب نماید. همواره تصمیم‌گیری بر اساس یک تابع هدف راحت‌تر از انتخاب حالت بهینه از بین چندین تابع هدف است. لذا می‌توان از تجمیع توابع هدف استفاده نمود. در این مقاله با استفاده از رابطه (۸) می‌توان به این شرایط

در بهینه‌سازی با توجه به فاصله عایقی بین فازها و هم‌چنین به واسطه استقامت عایقی بین هادی و دکل محدود خواهد شد.

عامل محدودکننده در ارتفاع هادی‌های فاز از سطح زمین، استقامت عایقی زنجیره مقرر به واسطه طول عایقی آن است. زنجیره مقرر علاوه بر این که باید استقامت عایقی مناسب در برابر ولتاژ و اضافه ولتاژهای فرکانس قدرت را داشته باشد، بلکه می‌بایست اضافه ولتاژهای ناشی از کلیدزنی و صاعقه را نیز بدون آنکه دچار شکست الکتریکی گردد تحمل نماید. تحت چنین شرایطی لازم است تا با توجه به فاصله در نظر گرفته شده برای هادی فاز از سطح زمین، طول زنجیره مقرر تعیین و از طریق مشخصه ولتاژ زمان در رابطه (۵) [۱۶] شرایط تخلیه الکتریکی در آن بررسی گردد.

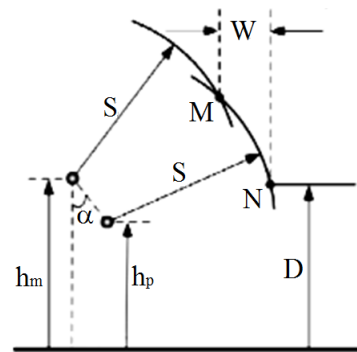
$$V(t) = (400 + \frac{700}{t^{0.75}}) I_s \quad (5)$$

در این رابطه، I_s طول زنجیره مقرر بر حسب متر و t زمان سپری شده بعد از اصابت صاعقه بر حسب μs است.

در تغییر ارتفاع سیم محافظ و هم‌چنین فاصله افقی آنها از یکدیگر، ناحیه حفاظتی که برای هادی‌های فاز ایجاد می‌گردد و هم‌چنین استقامت عایقی در ازای فاصله آن از هادی فاز به‌عنوان قیود در نظر گرفته شده است. تعیین ناحیه حفاظتی برای سیم محافظ با در نظر گرفتن زاویه خارجی آن مطابق شکل (۳) تعیین می‌گردد. این زاویه مطابق با رابطه ارائه شده توسط Rizk در (۶) نظر گرفته شده است [۱۷].

$$\alpha_p = \tan^{-1} \left(\frac{\zeta (h_m^E - h_p^E) I_c^F}{h_m - h_p} \right) \quad (6)$$

در این رابطه، α_p زاویه حفاظتی سیم محافظ، h_m و h_p به ترتیب ارتفاع هادی محافظ و فاز از زمین، I_c^F کمینه جریانی که منجر به شکست عایقی می‌گردد و ضرایب ζ ، E و F مطابق جدول ارائه شده در مرجع [۱۷] تعریف می‌شوند.



شکل (۳): آرایش هادی فاز و سیم محافظ با در نظر گرفتن زاویه حفاظتی سیم محافظ.

با توجه به متغیرهای بیان شده برای خط و دکل مورد

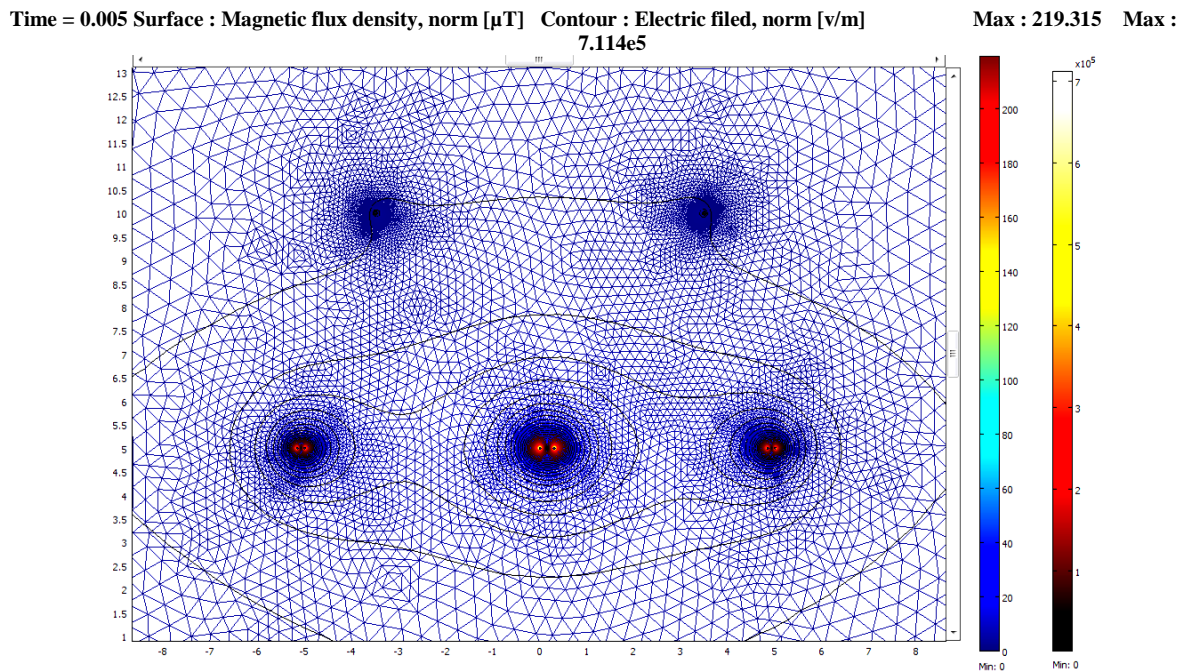
الکتریکی و مغناطیسی برای تمامی نقاط مورد نیاز با استفاده از روش اجزاء محدود تحت ولتاژ فرکانس شبکه قدرت با دقت بالایی انجام گیرد. خط مورد مطالعه با اتصال به یک منبع سه فاز متقارن جریان ۳۰۰ A را از خود عبور می‌دهد. اندازه‌گیری‌ها در ارتفاع ۱ m از سطح زمین در نقاط مختلف با فاصله عرضی ۴۰ m از مرکز دکل انجام شده است. شکل (۴) بزرگ‌نمایی از خط مورد بررسی شبیه‌سازی شده را به همراه تغییرات میدان الکتریکی به صورت Contour بر حسب V/m و چگالی شار مغناطیسی به صورت Surface مش‌بندی شده بر حسب μT در زمانی که هادی مرکزی در بیشینه دامنه ولتاژ و جریان خود قرار دارد، نشان می‌دهد.

دست پیدا کرد و مجموعه حالاتی که الگوریتم به‌عنوان پاسخ بهینه در نظر گرفته است را از میان حالت‌های جبهه پره‌تو استخراج نمود. در این رابطه E_{base} و B_{base} مقادیر حدی توصیه شده توسط استاندارد است.

$$F = \min \left\{ \frac{F_1}{E_{base}} + \frac{F_2}{B_{base}} \right\} \quad (۸)$$

۵. الگوریتم پیشنهادی

به منظور تحلیل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در این مقاله از روش مبتنی بر اجزاء محدود استفاده شده است. با به‌کارگیری نرم‌افزار COMSOL این امکان فراهم می‌باشد تا تحلیل‌های

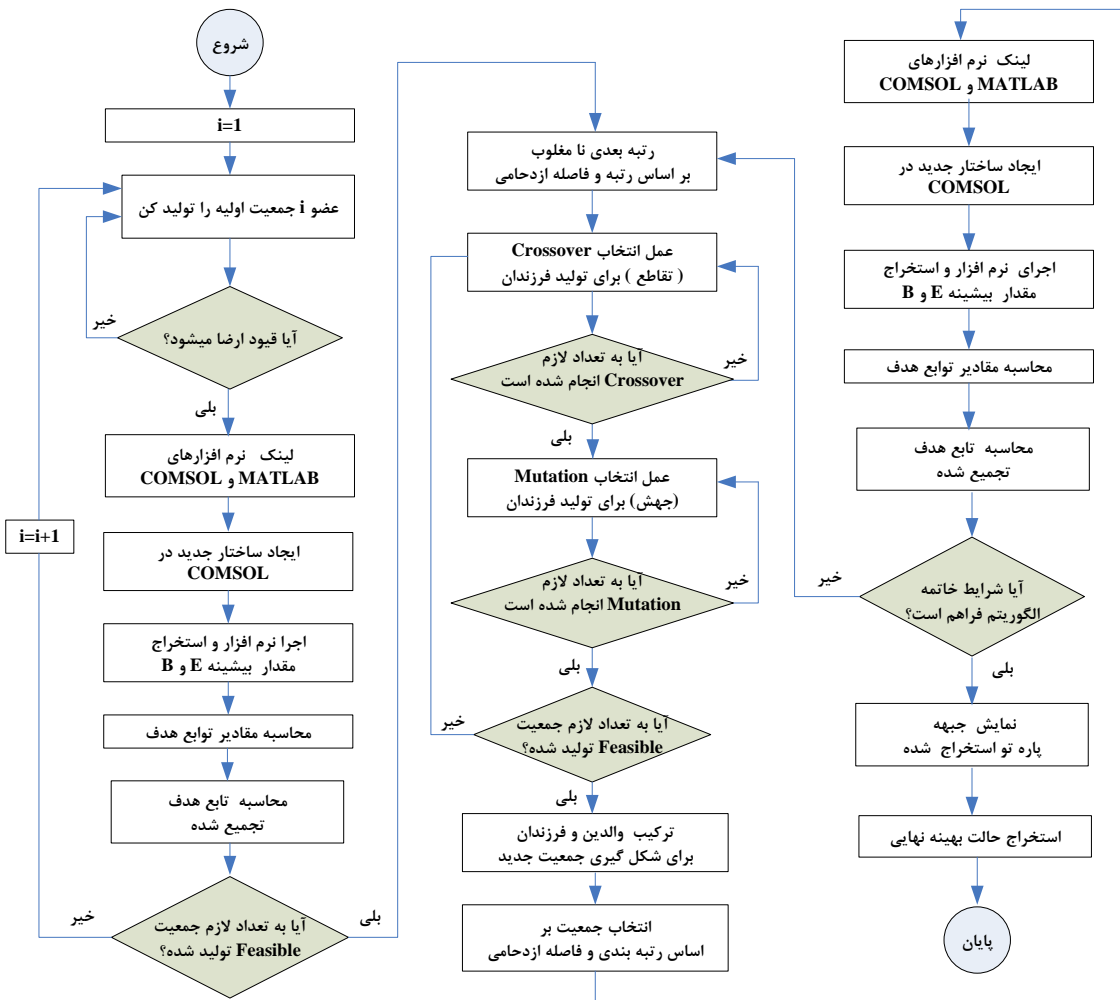


شکل (۴): تغییرات میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی در نرم‌افزار COMSOL.

جدول (۳): پارامترهای الگوریتم NSGA II و مقادیر آنها.

پارامترهای الگوریتم NSGA II	مقادیر تعریف شده برای هر پارامتر
جمعیت اولیه	۲۰۰
نرخ تقاطع	۰/۷
نرخ جهش	۰/۳
احتمال جهش	۰/۰۵
تعداد تکرار (شرط توقف الگوریتم)	۱۵۰

با توجه به این که شکم یک سیم در خط هوایی نزدیک‌ترین بخش آن به زمین است، قابلیت ایجاد اثرات میدانی بیشتری را در سطح زمین دارد. از این رو شبیه‌سازی بر اساس متغیرهای دکل فشارقوی و محاسبه فلش سیم در پایینی‌ترین نقطه از خط هوایی انجام و نتایج حاصل از آن استخراج شده است. روند اجرایی NSGA-II در تعیین جبهه پره‌تو توسط الگوریتم ارائه شده در این مقاله در شکل (۵) نمایش داده شده است. هم‌چنین مقادیر تعریف شده برای المان‌های الگوریتم NSGA-II به منظور بهینه‌سازی میدان الکتریکی و مغناطیسی با توجه به جدول (۳) ارائه شده است.



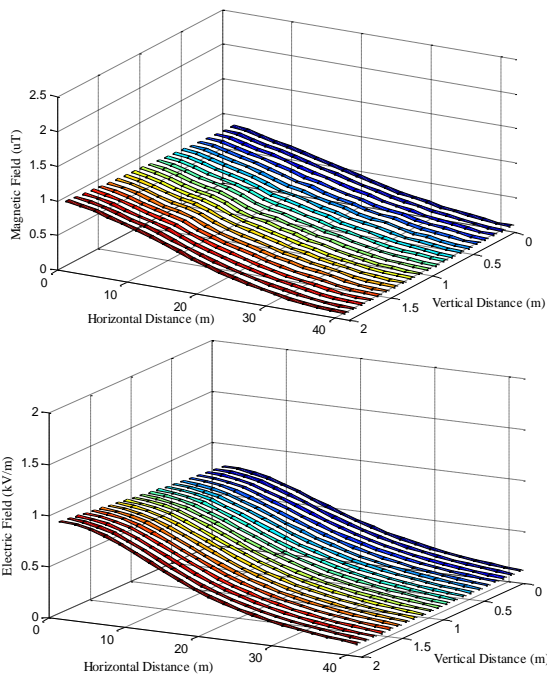
شکل (۵): روندنمای الگوریتم پیشنهاد شده.

۶. نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده برای حالت‌های قبل و بعد از بهینه‌سازی پرداخته شده است. پارامترهای شبیه‌سازی با توجه به قیودی که برای آنها در نظر گرفته شده برای حالت‌های قبل و بعد از کمینه‌سازی مقادیر میدان الکتریکی و مغناطیسی، در فاصله ۱ m از سطح زمین در جدول (۴) ارائه شده است. حالت بهینه تعیین شده از میان ۲۰ دسته جوابی که به عنوان جواب بهینه در خروجی الگوریتم پیشنهادی ثبت گردیده، انتخاب شده است. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، هر یک از متغیرها در محدوده تغییراتی که برای آنها در نظر گرفته شده است به مقداری بهینه بر اساس کمینه‌سازی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی دست یافته‌اند. با متغیرهای بهینه به‌دست آمده در این مقاله پارامترهای خط فشارقوی مورد مطالعه نیز با در نظر گرفتن قیود الکتریکی، حفاظتی، عابقی و ساختاری اصلاح و مورد تجدید ساختار قرار

الگوریتم پیشنهادی در این مقاله مطابق شکل (۵) در سه ستون ارائه شده است. در ستون اول به تولید جمعیت اولیه مورد نیاز پرداخته شده است. با در نظر گرفتن قیود مسئله تنها حالت‌هایی که منجر به جواب خواهند شد وارد مرحله بعد می‌شوند که این کار حجم بالایی از محاسبات اضافی را در لینک COMSOL و MATLAB حذف خواهد نمود. در ستون دوم از الگوریتم، با تولید جمعیت اولیه مورد نیاز به تعداد کافی عمل رتبه‌بندی نامغلوب بر اساس رتبه و فاصله ازدحامی انجام شده و عملگرهای تقاطع و جهش در راستای تولید جمعیت جدید فعال می‌شوند. چنانچه این عملگرها هر یک به تعداد کافی انجام شده باشند، جمعیت جدید شکل گرفته و با توجه به الگوریتم NSGA-II، جمعیت مورد نظر انتخاب خواهد شد. با بارگذاری داده‌های جمعیت انتخابی در نرم‌افزار COMSOL مقادیر تابع هدف در ستون سوم به‌دست آمده و چنانچه شرط خاتمه الگوریتم فراهم باشد، فرایند به پایان خواهد رسید.

با مقایسه نتایج به دست آمده در دو حالت دیده می شود که استفاده از روش بهینه سازی NSGA-II بیشینه میدان الکتریکی را 493 V/m و همچنین بیشینه میدان مغناطیسی را $1/146 \mu\text{T}$ کاهش داده است. همان طور که بیان گردید، با توجه به این که بهینه سازی بر اساس دو تابع هدف انجام شده است، نتایج به دست آمده همواره بهینه ترین حالت نبوده اما یقیناً این پاسخ جبهه پاره توای می باشد که پارامترها و قيود مورد نظر در آن ها به طور کامل لحاظ و بهینه شده است.



شکل (۷): تغییرات میدان های الکتریکی و مغناطیسی به ازای فواصل مختلف طولی و عرضی پس از بهینه سازی.

۷. نتیجه گیری

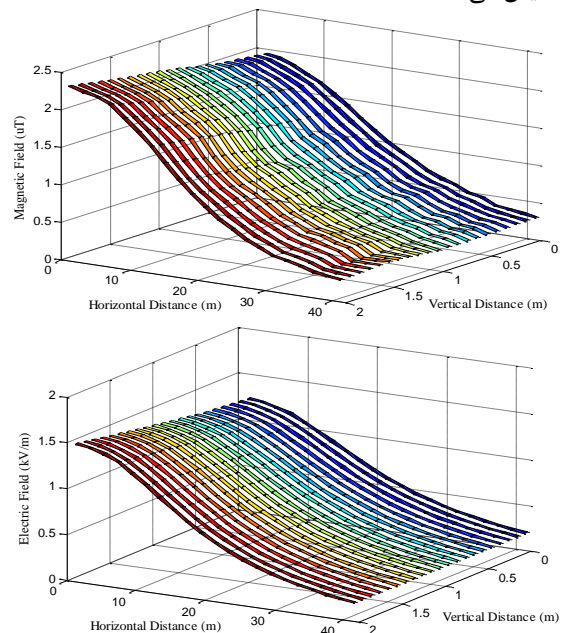
هدف از این مقاله کمینه سازی میدان های الکتریکی و مغناطیسی در خطوط انتقال انرژی است. در این راستا پارامترهای متعددی از دکل فشارقوی و خط انتقال مورد بررسی قرار گرفته است که بهینه سازی مقادیر آنها با استفاده از روش NSGA II انجام شده است. با توجه به مستقل بودن توابع هدف، بهینه سازی دو هدفه در این مقاله در نظر گرفته شده است. بهینه سازی پارامترهای خط و دکل لازم است بر مبنای دستیابی به مدلی با قابلیت بهره برداری و اجرایی انجام گیرد که بر این اساس قيود الکتریکی، مکانیکی و حفاظتی برای هر یک از پارامترهای بهینه سازی در نظر گرفته شده است و در نتیجه این امر جبهه پاره تو در هر مرحله جمعیتی با پارامترهای ممکن را به دست خواهد داد. الگوریتم پیشنهادی مطابق روش NSGA II مجموعه ای شامل ۲۰ دسته جواب بهینه را در خروجی ایجاد خواهد نمود که حالت

گرفته است. به طور کلی اجرای بهینه سازی در این مقاله نشان دهنده آن است که انجام این روند نه تنها به کمینه سازی میدان های الکتریکی و مغناطیسی معطوف می شود، بلکه قابلیت بهره برداری از آرایشی را فراهم می نماید که در آن ارتفاع هادی های فاز و محافظ، فاصله بین هادی های فاز، فاصله بین باندل ها، فاصله بین هادی محافظ از مرکز دکل و طول زنجیره مقرره مقادیری منطقی و بهینه را کسب می نمایند.

جدول (۴): مقادیر پارامترهای بهینه سازی برای دو حالت قبل و بعد از اجرای الگوریتم.

متغیرهای بهینه سازی	قبل از بهینه سازی	بعد از بهینه سازی
Z (m)	۶	۵/۳
K(m)	۵	۴/۸
b(m)	۰/۳	۰/۳۶
Hph(m)	۱۸	۱۹/۲
Sph(m)	۹	۱۱/۶
Hg(m)	۲۴	۲۶/۴
Sg(m)	۱۳	۱۶/۸
E _{max} (V/m)	۱۳۷۴	۸۸۱
B _{max} (μT)	۲/۱۶۵	۱/۰۱۹

تغییرات بیشینه مقدار میدان الکتریکی و مغناطیسی به دست آمده از شبیه سازی برای حالت های قبل و بعد از بهینه سازی استخراج و در شکل (۶) و (۷) به صورت سه بعدی نمایش داده شده است. شکل (۶) برای حالت قبل از بهینه سازی مربوط به آرایش متداولی است که دکل و خط انتقال در شبکه نصب گردیده است. شکل (۷) این تغییرات را برای بعد از بهینه سازی نمایش می دهد.



شکل (۶): تغییرات میدان های الکتریکی و مغناطیسی به ازای فواصل مختلف طولی و عرضی قبل از بهینه سازی.

- [9] Ranković, Aleksandar, V. Mijailović, D. Rozgić, and D. Četenović, "Optimization of Electric and Magnetic Field Emissions Produced by Independent Parallel Overhead Power Lines," *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Vol.14, No. 2, pp 199-216, 2017.
- [10] A. Salameh, M. Nejdawi, and O. A. Alani, "Using the Nonlinear Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm to Reduce the Magnetic Fields From Overhead High Voltage Transmission Lines," *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, Vol. 4, No.1, pp 18-31, 2010.
- [11] Król, Krzysztof, and W. Machczyński, "Optimization of Electric and Magnetic Field Intensities in Proximity of Power Lines Using Genetic and Particle Swarm Algorithms," *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 67, No. 4, pp 829-843, 2018.
- [12] A.Ayad, W.Krika, H.Boudjell, F.Benhamida, A.Horch, "Simulation of the Electromagnetic Field in the Vicinity of the Overhead Power Transmission Line," *European Journal of Electrical Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 49-53, 2019.
- [13] Stewart, J. Theodor, Janssen, Ron. & V. Herwijnen, Marjan, "A Genetic Algorithm Approach to Multi-objective Land Use Planning," *Computers and Operations Research*, Vol. 31, No.14, Pp. 2293-2313, 2004.
- [14] L. Wang, T.-G. Wang, and Y. Luo, "Improved Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)-II In Multibjective Optimization Studies of Wind Turbine Blades," *Applied Mathematics and Mechanics-English Edition*, Vol. 32, No. 6, pp. 739-748, 2011.
- [15] Yan, Bo, X. Lin, W. Luo, Z. Chen, and Z. Liu. "Numerical Study on Dynamic Swing of Suspension Insulator String in Overhead Transmission Line under Wind Load." *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.25, No. 1, pp. 248-259, 2010.
- [16] Z. Datsios, P. Mikropoulos, and T. Tsovilis, " Insulator String Flashover Modeling with the Aid of An Atpdraw Object," In 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), pp. 1-5, 2011.
- [17] P. Mikropoulos, and T.Tsovilis, " Lightning Attachment Models and Perfect Shielding Angle of Transmission Lines," In 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp. 1-5, 2009.

مطلوب از بین آنها انتخاب و بر اساس آن نتایج به‌دست آمده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده دیده شده است که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب ۲۱/۷ درصد و ۳۴/۱ درصد نسبت به حالت اولیه کاهش یافته است.

۸. مراجع

- [1] Y.Jayalakshmi, S.N. Deepa, "Exposure to Electromagnetic Environment in Vicinity to Power Transmission Lines and Possible Health Effects: A Review," *International Journal of Engineering Technology Science and Research (IJETS)*, Vol 4, No 10, pp 81-89, 2017.
- [2] Suprianto, Bambang, M.Munoto, and A.Dwinugraha, "Analysis of Electromagnetic Field on Transmission Line to Human Using Infinite Element Method," *World Journal of Research and Review (WJRR)*, Vol. 5, No. 3, pp 61-66, 2017.
- [3] CIGRÉ Working Group C4.204, "Mitigation Techniques of Power-Frequency Magnetic Fields Originated from Electric Power Systems," *CIGRÉ Technical Brochure*; CIGRÉ: Paris, France, pp 75-83, 2009.
- [4] K. Yamazaki, T. Kawamoto, H.Fujinami, "Requirements for Power Line Magnetic Field Mitigation Using a Passive Loop Conductor," *IEEE Transaction on Power Delivery*. Vol.15 No.2, pp 646-651, 2000.
- [5] M.Nafar, G.Solookinejad, and M.Jabbari, "Magnetic Field Calculation of 63kv Transmission Lines," *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, Vol.17, No.2, pp 218-224, 2013.
- [6] B. Rachedi, F. Berrouk, and A. Babouri, "Modelling of Electromagnetic Field Generated by High Voltage Lines Using Comsol Multiphysics," 8th International Conference on Electrical Engineering, 1-4, , 2014.
- [7] X. Fang, W. Wang, L.He, Z. Huang, Y. Liu, and L. Zhang, "Research on Improved NSGA-II Algorithm and Its Application in Emergency Management," *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2018, pp 1-13, 2018.
- [8] Bravo-Rodríguez, Juan Carlos, Juan Carlos del-Pino-López, and Pedro Cruz-Romero, "A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems," *Energies*, Vol.12, No.7, pp 1-20, 2019.

Magnetic and Electric Fields Minimization of Transmission Lines Using NSGA-II Algorithm Based on Multi-Objective Optimization

S. M. Seyyed Barzegar^{*}, M. Khodsuz

Shahrood University of Technology

(Received: 16/10/2018, Accepted: 20/07/2019)

Abstract

Reduction of electric and magnetic fields depends on the optimum design of high voltage tower and transmission lines. In this regard, many parameters need to be considered as variables whose simultaneous variations are necessary to obtain appropriate electric and magnetic field levels. Consequently, optimization programs have been used to achieve the most effective design. In this manuscript, optimization with respect to minimization of electric and magnetic fields, has been considered. Optimization process is based on NSGA II method. Phase and Shielding conductors' height, phase conductors' distance from each other, Shielding conductor distance from the central part of tower, conductors' distance in bundle, midspan phase conductor sag and midspan Shielding conductor sag are the considered variables in this study. Along these mentioned variables, there are some constraints that limit the amount of variables in terms of physical arrangement, electrical protection and mechanical forces. In this article, COMSOL software as a link to MATLAB software has been implemented for optimization and calculation of electric and magnetic fields. The results obtained from the proposed algorithm show that each of the electric and magnetic fields decreased 21.7% and 34.1% respectively compared to the initial state. Consequently, within one-meter distance of the earth's surface, electric and magnetic fields show dramatic reduction in magnitude, compared to the initial state.

Keywords: Electric and Magnetic Fields, Multi-Variable Optimization, Protection Constrains, Finite Element Method

^{*} Corresponding author E-mail: seyedbarzegar@shahroodut.ac.ir