

تحلیل سازگاری الکترومغناطیسی در یک کانال شامل کابل فشار متوسط و مخابراتی

روح‌اله امیرآبادی فراهانی^۱، دانشجو کارشناسی ارشد؛ فرامرز فقیهی^۲، استادیار؛ سید ابراهیم افجه‌ای^۳، استاد

۱- دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات - گروه برق قدرت - تهران - ایران - r.farahani1990@gmail.com

۲- دانشگاه آزاد اسلامی - واحد علوم و تحقیقات - گروه برق قدرت - تهران - ایران - faramarz.faghihi@srbiau.ac.ir

۳- دانشگاه شهید بهشتی - دانشکده برق و کامپیوتر - تهران - ایران - e-Afjei@sbu.ac.ir

چکیده: تحلیل سازگاری الکترومغناطیسی در فضای اطراف کابل‌های فشار متوسط یکی از مسائل مهم تحقیقاتی بوده و در این راستا استانداردهای متنوعی نیز تدوین شده‌است. در این مقاله فضای الکترومغناطیسی اطراف کابل‌های فشار متوسط شبیه‌سازی شده و اثر پوشش الکترومغناطیسی کابل‌ها در کاهش میدان‌های الکترومغناطیسی در یک فضا شامل یک مدار ۲۰kV و کابل مخابراتی بررسی شده‌است. شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای مبتنی بر المان محدود با مدل‌سازی در چهار حالت اعم از داشتن یا نداشتن پوشش الکترومغناطیسی هر یک از دو نوع کابل در محیط با تلف انجام شده‌است. مطابق تحقیقات پیشین، هیچ گزارشی مبنی بر تعیین فاصله مجاز مجاورتی کابل‌های فشار متوسط و مخابراتی در محیط با تلف با بیشینه‌ای از میدان به‌روش المان محدود در دسترس نیست. حال آنکه در کاربردهای عملی کابل‌کشی بسیار مهم و راهگشا بوده که نقطه عطف مقاله به شمار می‌رود. در نهایت نتایج براساس محدودیت ارائه شده در استاندارد ICNIRP مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. در راستای راستی‌آزمایی نتایج مجدداً شبیه‌سازی در نرم‌افزار مبتنی تفاضل محدود CST انجام گردید، همچنین اندازه‌گیری میدان‌های الکترومغناطیسی کابل‌های فشار متوسط تک‌هسته‌ای نیز در آزمایشگاه فشار متوسط انجام شد که هر دو حکایت از اعتبار روش مدل‌سازی و نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود در این مقاله دارد.

واژه‌های کلیدی: سازگاری الکترومغناطیسی، معادلات ماکسول، المان محدود، کابل‌های فشار متوسط، کابل‌های مخابراتی

Electromagnetic Compatibility (EMC) in a Canal Consist of High Voltage and Telecommunication Cable

R. Amirabadi Farahani¹, MS Student; F. Faghihi², Assistant Professor; S. E. Afigheei³, Professor

1- Islamic azad university, Science and Research Branch, Faculty of Electrical Engineering, Tehran, Iran, Email: R.farahani1990@gmail.com

2- Islamic azad university, Science and Research Branch, Faculty of Electrical Engineering, Tehran, Iran, Email: Faramarz_faghihi@hotmail.com

3- Shahid Beheshti, Faculty of Electrical Engineering, Tehran, Iran, Email: E-Afjei@sbu.ac.ir

Abstract: Electromagnetic Compatibility (EMC) analysis around High Voltage (HV) cables is one of the important research problems, which several standards are published. In this paper, field simulation of HV cable space based on finite element method (FEM) is proposed to identify cable shielding effectiveness for a permitted distance of HV cable and communication cable proximity. FEM simulation method is performed for four situations including shielded cable or simple cable (cable with or without shield) for each type of HV and communication cable in losses environment. As authors are aware there is no research report for the amount of proximity distance for HV cable and communication cable in losses spaces in spite of partial approach in cabling route. Finally, simulation result is evaluated by comparison with ICNIRP standard constraints. FEM simulation results are validated by FDM based simulation software (CST); Also electromagnetic field measurement for one-core medium voltage voltage laboratory. Both of them illustrates the authentication of FEM modeling of and simulation results of the investigation.

Keywords: Electromagnetic compatibility, maxwell equation, finite element, high power cable, telecommunication cable.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۰۶

نام نویسنده مسئول: فرامرز فقیهی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - حصارک - دانشگاه علوم و تحقیقات - دانشکده مهندسی برق.

۱- مقدمه

جاری نمودن جریان در کابل، تا مقدار فرکانس ۱۰۰MHz بررسی شده است. سپس اثر پوشش الکترومغناطیسی و اتصال به زمین سینی کابل را مورد بررسی قرار داده و در نهایت نتیجه گیری شده که در صورت عدم اتصال سینی کابل به پتانسیل صفر و همچنین یکپارچه نبودن سطح سینی (فاصله دار بین بخش های مجاور) حصول سازگاری الکترومغناطیسی امکان پذیر نمی باشد.

در [۱۳] تجربیات و آزمایشات مرتبط با کابل کشی فشار متوسط و فشار ضعیف در کنار یکدیگر بدون اثر تداخلی بررسی شده و در نهایت با بررسی اتصالات و نحوه کابل کشی پیشنهاداتی در خصوص سازگاری الکترومغناطیسی مطرح شده است. در [۱۴] نمونه ای از بررسی میدان الکترومغناطیسی خطوط ریل قطار بر روی کابل مخابراتی هم جوار خود و بررسی سازگاری الکترومغناطیسی در طول یک مسیر معین مورد تحقیق قرار گرفته است. در این مقاله میدان الکترومغناطیسی بر مبنای استاندارد اتحادیه بین المللی مخابرات [۸] بررسی شده و مبنای تحلیل میدان الکترومغناطیسی المان محدود قرار داده است. در [۱۵] اثرات نصب و مسیردهی و خمش های مختلف در ولتاژ القایی کابل های تک هسته زره دار بررسی شده، که برای عبور آن ها از سینی کابل استفاده می گردد. در این مقاله برای کاهش میدان های الکتریکی و مغناطیسی در سینی های کابل روش مثلی برای عبور کابل پیشنهاد شده تا میدان های الکترومغناطیسی اطراف کابل به حداقل مقدار خود برسد.

در [۱۶] میدان الکتریکی اطراف یک شبکه ۲۲۰kV در چهار حالت زاویه پوشش الکترومغناطیسی با شبکه کابل ها بررسی شده و نشان داده شده که میدان الکتریکی در کدام حالت های خود در بدترین و بهترین مقدار خود در حد فاصله سیم OPGW و هادی های فاز قرار دارد. مقادیر به دست آمده در [۱۶] بدون در نظر گرفتن تلفات محیطی بوده و حالت زاویه پوشش الکترومغناطیسی صفر آن یکی از مبنای های مقایسه برای شبیه سازی این مقاله می باشد. در [۱۷] نیز میدان مغناطیسی ایجاد شده در اطراف یک شبکه دومداره فشار متوسط بررسی شده و مقادیر به دست آمده در سه زاویه متفاوت پوشش الکترومغناطیسی مورد مقایسه قرار گرفته است. مقادیر میدان مغناطیسی در [۱۷] برای حالت زاویه پوشش الکترومغناطیسی صفر یکی از مبنای های مقایسه ای در این مقاله می باشد. همچنین در [۱۸] نیز میدان الکترومغناطیسی یک شبکه فشار متوسط در کانادا بررسی شده و اثر زاویه پوشش الکترومغناطیسی در پخش میدان الکترومغناطیسی و همچنین اندازه میدان الکترومغناطیسی اطراف هادی های فاز در فواصل عرضی از شبکه را به جهت بررسی میزان استاندارد و مجاز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین [۱۸] نیز یکی از مبنای های نتایج شبیه سازی این نوشتار نیز می باشد.

در این مقاله میدان الکترومغناطیسی ناشی از کابل فشار متوسط و میزان تأثیر تداخلی بر کابل مخابراتی مورد نظر می باشد. در این نوع تداخل تنها تداخل القایی مطرح شده و تداخل فرکانسی وجود ندارد.

بارهای الکتریکی ساکن باعث ایجاد میدان الکتریکی شده و حرکت یکنواخت بارها (جریان الکتریکی ثابت)، میدان مغناطیسی ایجاد نموده و حرکت شتاب دار آن ها (جریان الکتریکی متغیر) موجب تشعشع الکترومغناطیسی می شود [۱]. بر اساس نظریه الکترومغناطیسی، میدان های الکترومغناطیسی، ولتاژها یا جریان هایی را در مدارات هم جوار خود القا نموده و برعکس، ولتاژها و جریان ها می توانند میدان های الکترومغناطیسی را در اطراف خود نیز ایجاد کنند [۱]. از طرفی، نویز یک سیگنال ناخواسته است [۲]، بنابراین کاهش نویز، در واقع کاهش میدان های الکترومغناطیسی یا ولتاژها و جریان های مزاحم در سیستم ها است [۳]. با نصب و بکار گیری کابل های فشار متوسط به صورت هم جوار با کابل های مخابراتی، نویز در سیستم های مخابراتی پدیدار شده و بایستی برای حل این موضوع راه کارهای خاصی را در نظر داشت تا بتوان از سطح اثرات مخرب به وجود آمده از این هم جوار کاسته و به حد مجاز استاندارد رساند [۴]. راه کارهای متنوعی در این زمینه مطرح شده و این راه کارها در قالب مبحثی به نام سازگاری الکترومغناطیسی مطرح شده که قبلاً نیز از عبارات تداخل الکترومغناطیسی یا تداخل در فرکانس رادیویی استفاده می شد؛ ولی امروزه از واژه مثبت سازگاری بجای تداخل استفاده می شود [۵].

در بحث سازگاری الکترومغناطیسی استانداردهای متنوعی بیان شده و در همه این استانداردها سازگاری الکترومغناطیسی یکی از مباحث مهم محیطی بشمار آورده می شود [۱]. به طور مثال در مجموعه استانداردهای موسسه تحقیقات الکتریکی آمریکا محیطها را با هدف بررسی اثر الکترومغناطیسی به پنج محیط یا کلاس تقسیم می نماید. کلاس یک مربوط به محیط های حساس (آزمایشگاه های حساس پزشکی و ...)، کلاس دو محیط های همچون مناطق مسکونی اداری و ...، کلاس سه مربوط به محیط های تجاری و کارگاه ها، کلاس چهار محیط های صنعتی معمولی و کلاس پنج مربوط به محیط های صنعتی سنگین می باشد [۶]. البته در استانداردهای سازگاری الکترومغناطیسی به طور خاص برای برخی مکان ها همچون پست های برق، شبکه های انتقال و توزیع و ... نیز شرایط و محدودیت هایی نیز تعیین شده است [۷]. علاوه بر استاندارد کمیسیون الکتروتکنیکی بین المللی [۶]، دیگر استانداردها نیز در این زمینه تدوین شده که از جمله آن ها می توان کمیته بین المللی اختلالات رادیویی [۸]، موسسه بین المللی استاندارد [۹]، موسسه استانداردهای ملی آمریکا [۱۰] و همچنین سازمان ملی استاندارد ایران [۱۱] اشاره نمود که همه این مدارک تدوینی خود گواه بر اهمیت موضوع سازگاری الکترومغناطیسی می باشد.

تحقیقات متنوعی در زمینه سازگاری الکترومغناطیسی انجام شده است. به طور مثال در [۱۲] اتصالات سینی کابل و بررسی اثر سازگاری الکترومغناطیسی این اتصالات در فرکانس های مختلف با

مغناطیسی بوده و بی‌شک در هر جا که متغیرهای ولتاژ و جریان متغیر با زمان وجود داشته باشد هر دو این میدان‌ها پدید می‌آیند [۱]. در این مقاله هر دو میدان الکتریکی و مغناطیسی هم در شبیه‌سازی‌ها و هم در نتیجه‌گیری‌ها مورد توجه قرار گرفته و اثر پوشش الکترومغناطیسی برای هر دو میدان در تمامی حالات محاسبه شده‌است.

در فرمول‌های (۱) تا (۴) معادلات اصلی توصیف یک میدان الکترومغناطیسی آورده شده که با معادله پیوستگی جریان (فرمول (۵)) ترکیب شده‌است [۲۳]. به‌طور کلی برای توصیف میدان الکترومغناطیسی در فضاهای مختلف از معادلاتی موسوم به معادلات موج استفاده نموده که این معادلات در فضا دارای پارامترهای مختص خود بوده و به فرم کلی فرمول‌های (۶) و (۸) برای فضای نمونه (i) تعریف می‌شود [۱]. همچنین جریان مورد نظر در محاسبات مربوط به فضای اطراف یک کابل فشار متوسط منتج از دو جریان می‌باشد، یکی جریان سطحی (J_s) و دیگری جریان القایی (J_i) که هر دو این رابطه‌ها براساس فرمول (۶) با یکدیگر ارتباط خواهند داشت [۲۳].

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla^2 (A_x + A_y) - \mu_i \epsilon_i \frac{\partial^2 (A_x + A_y)}{\partial t^2} = -\mu_i (J_s + J_i) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (6)$$

$$\oint J \cdot ds = I, (J = J_s + J_i) \quad (7)$$

$$\nabla^2 (A_x + A_y) - \mu_i \epsilon_i \frac{\partial^2 (V_x + V_y)}{\partial t^2} = -\frac{(\rho_s + \rho_i)}{\epsilon_i} \quad (8)$$

که E، B، D، H، A، μ ، ϵ ، ρ و V به ترتیب معرف میدان الکتریکی، چگالی میدان مغناطیسی، چگالی میدان الکتریکی، چگالی جریان الکتریکی، چگالی بار سطحی، میدان مغناطیسی، پتانسیل مغناطیسی، ضریب نفوذپذیری مغناطیسی، ضریب گذردهی الکتریکی، ولتاژ و زمان می‌باشد.

۳- استانداردهای بررسی میدان‌های الکترومغناطیسی

تا به امروز بررسی‌های متنوعی در خصوص انواع سازگاری الکترومغناطیسی در فرکانس‌های مختلف انجام شده‌است [۲۳]. به‌طورمثال در [۱۲] به بررسی محدودسازی تشعشعات الکترومغناطیسی حاصل از جریان سطحی و میدان مغناطیسی خارجی در فرکانس‌های ۱۰۰ kHz تا ۳۰ MHz انجام پذیرفته است.

در این تحقیق به‌نوعی اثر تداخلات میدان‌های مغناطیسی بر روی محفظه تمام بسته آلومینیومی مورد بررسی قرار گرفته و به‌نوعی شکل رایج تحقیق‌های انجام‌شده در زمینه سازگاری الکترومغناطیسی نیز می‌باشد [۱۲]. با بررسی مقالات منتشرشده در زمینه سازگاری

این موضوع به دلیل پایین بودن طول محوری آنتن متداخل و فرکانس کاری کم آن می‌باشد و همان‌طور که گفته شد تداخل‌گر در این مسئله کابل‌های انتقال قدرت و قربانی کابل مخابراتی می‌باشد.

برای حل مسئله مورد طرح، میدان الکترومغناطیسی کابل فشار متوسط واقعی و کابل مخابراتی از انواع متداول دارای پوشش الکترومغناطیسی و بدون پوشش الکترومغناطیسی مورد استفاده در شبکه برق و مخابرات کشور ایران، مورد بررسی قرار گرفته‌است. شرایط مرزی در همه حالت‌ها با تلفات محیطی اعمال شده و با مقایسه با مقادیر مندرج در استاندارد حدود مجاز میدان الکترومغناطیسی بررسی و تبیین شده‌است. برای این موضوع چهار حالت "هر دو کابل بدون پوشش الکترومغناطیسی"، "کابل مخابراتی بدون پوشش الکترومغناطیسی و کابل فشار متوسط دارای پوشش الکترومغناطیسی"، "کابل فشار متوسط بدون پوشش الکترومغناطیسی و کابل مخابراتی دارای پوشش الکترومغناطیسی"، "هر دو کابل دارای پوشش الکترومغناطیسی" در نرم‌افزار اجزاء محدود کامسول مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده‌است و جهت اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری میدان نیز آورده شده‌است؛ همچنین از نرم‌افزار تفاضل محدود CST برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی المان محدود نیز استفاده شده‌است [۸].

۲- روش‌های محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی

بررسی میدان‌های الکترومغناطیسی در یک یا چندین فضا براساس معادلات ماکسول صورت می‌گیرد [۱۹، ۲۰]. ترکیب این معادلات و معادله پیوستگی جریان در نهایت منجر به معادلات موج گشته که معرف پتانسیل مغناطیسی و الکتریکی در یک فضای الکترومغناطیسی می‌باشد. این معادلات از جمله معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بوده که پاسخ به آن‌ها از طریق روش‌های معمول نیز صورت نمی‌گیرد [۱]. یک معادله دیفرانسیل با مشتق جزئی توصیفی ریاضی از نحوه ارتباط متغیرهای وابسته و مستقل در یک پدیده فیزیکی از طریق ضرب متغیرها یا مشتقات جزئی آن‌ها بوده و به‌صورت کلی به‌منظور پاسخ‌دهی به آن‌ها از شرایط اولیه و مرزی استفاده می‌گردد [۱]. حل این معادلات با استفاده از روش‌های عددی (المان محدود، تفاضل محدود و...) انجام پذیرفته و نرم‌افزارهای تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی مبتنی بر روش‌های عددی مذکور پاسخ معادلات را به دست می‌دهند [۲۱].

از جمله نرم‌افزارهای تحلیل و بررسی فضای الکترومغناطیسی می‌توان آنسیس (Ansys)، کامسول (Cmsol)، ماکسول (Maxwell) و غیره را نام برده که در همگی آن‌ها معادلات موج براساس روش المان محدود، تحلیل می‌شود. در شبیه‌سازی مسئله مورد نظر در این مقاله، از نرم‌افزار کامسول استفاده شده که در زمینه تحلیل فضای الکترومغناطیسی از نرم‌افزار کامسول کمتر استفاده شده‌است [۲۲]. در طرح مسائل مربوط به الکترومغناطیسی بایستی این موضوع را در نظر داشت که میدان‌های الکترومغناطیسی متشکل از میدان الکتریکی و

بیشتر مورد توجه قرار گرفته و عمدتاً به بحث‌های مربوط به تجهیزات فرکانس بالا مربوط شده، چرا که ناسازگاری ایجاد شده توسط تجهیزات فرکانس بالا همچون انواع فرستنده‌های رادیویی، موبایل و ... به مراتب بیشتر از ناسازگاری‌های به وجود آمده توسط میدان‌های فرکانس پایین همچون خطوط انتقال و ... می‌باشد [۲۵] و [۲۶]. در جدول ۲ نمونه‌ای از حدود استاندارد کارکرد تجهیزات برای کار در محیط‌های عمومی از کمیته بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیر یونیزه (ICNIRP) ارائه شده است [۲۸].

جدول ۲- بخشی از جدول استاندارد کمیته بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیر یونیزه (ICNIRP) در خصوص میزان میدان الکترومغناطیسی مجاز برای کارکرد صحیح تجهیزات برای محیط‌های عمومی در فرکانس‌های مختلف (متغیر f معرف فرکانس می‌باشد)

بازه فرکانسی	میدان الکتریکی (V/m)	میدان مغناطیسی (A/m)
تا ۱ Hz	-	1.63×10^5
۱-۸ Hz	۲۰,۰۰۰	$1.63 \times 10^5 / f^2$
۸-۲۵ Hz	۲۰,۰۰۰	$2.0 \times 10^4 / f$
۰/۰۲۵ - ۰/۶۵ kHz	۵۰۰/f	۲۰/f
۰/۸۲-۶۵ kHz	۶۱۰	۲۴/f

۴ طرح مسئله و شبیه‌سازی

همان‌طور که در بخش پیشین بدان اشاره شد به منظور رعایت سازگاری الکترومغناطیسی در فضاهای مختلف پژوهش‌های بسیاری انجام شده است. از این‌رو در این نوشتار هدف بر آن است تا یکی از رایج‌ترین اجرائیات شبکه‌های دفنی کابل‌کشی را از حیث وجود و یا عدم وجود پوشش الکترومغناطیسی کابل مورد بررسی و آنالیز قرار داده و بررسی شود که در صورت نبود پوشش الکترومغناطیسی کابل چند نوع میدان تداخلی در محیط کانال تولید شده و به چه میزان می‌باشد.

بدین منظور یک کانال دفنی با عرض دو متر و عمق یک متر و سی سانتی‌متر در نظر گرفته و در آن کابل فشار متوسط با سطح ولتاژ ۲۰ kV (ساخت شرکت ابهر) برای انتقال توان ۵۰۰ kVA مجاور کابل مخابراتی (ساخت شرکت کابل کرمان) براساس استاندارد عبور داده شده است [۳۰]. نحوه محاسبه بدین صورت است که میدان الکترومغناطیسی فضای اطراف به شرایط کابل‌ها و شرایط مرزی دفن کابل‌ها بستگی داشته و باید این فضا به جهت تحلیل مش‌بندی شود [۱۹].

در حالت کلی ورودی‌های مسئله این مقاله شامل جریان سطحی (I_s)، سطح پتانسیل، ضرایب نفوذپذیری مغناطیسی و گذردی الکتریکی بوده که از آنجا که مواد به‌کاررفته در کابل تماماً همگن متصور شده است لذا پارامترهای مسئله تماماً خطی در نظر گرفته شده است [۱]. همچنین آن‌چه که به‌عنوان شرایط مرزی مسئله مطرح بوده زمین، پتانسیل صفر و تعریف آن در هر مسئله می‌باشد.

الکترومغناطیسی مشاهده می‌شود تحقیقات عمدتاً برای فرکانس‌های بالا صورت گرفته و سازگاری الکترومغناطیسی در فرکانس‌های پایین کمتر بررسی شده است. به عبارتی در بحث تداخلات الکترومغناطیسی اگر چهار روش را برای تداخل در نظر گرفته شود (هدایتی، القایی، خازنی و انتشاری) [۲۵]، بخش عمده پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه به تداخلات غیرالقایی اختصاص یافته است [۲۶]. این درحالی است که یکی از بحث‌های اصلی کیفیت توان در شبکه‌های قدرت بحث نویز در سیستم‌های جریان ضعیف از جمله سیستم‌های مخابراتی بوده و از عمده عوامل تأثیرگذار بر روی این سیستم‌ها میدان‌های الکترومغناطیسی تولیدی توسط ادوات فشار متوسط و تأثیر آن‌ها بر محیط اطراف به واسطه القا می‌باشد [۴].

از جمله ادوات فشار متوسط می‌توان به هادی‌های انتقال توان اشاره نمود. همان‌طور که در بخش قبلی توضیح داده شد استانداردهای متنوعی برای میزان میدان‌های مجاز الکترومغناطیسی ارائه شده و در تمامی آن‌ها دو رویکرد اصلی در نظر گرفته شده است [۷].

۳ رویکرد ایمنی

از نقطه نظر استاندارد میدان‌های الکترومغناطیسی در فضاهای مختلف بایستی به‌گونه‌ای باشد تا به حاضران قرار گرفته در آن فضا آسیبی رسانده نشود. از جمله آسیب‌های مطرح در این زمینه به بیماری‌های سرطان، آلزایمر و همچنین بیماری‌های افسردگی اشارات فراوانی شده و به همین منظور آزمایشگاه‌ها و مؤسسات فراوانی در سراسر دنیا تأسیس شده تا آخرین پژوهش‌ها در این زمینه را انجام داده و از خطرات احتمالی در آینده جلوگیری شود. آزمایشگاه ملی بررسی امواج انتشاری (NRL) با هدف بررسی میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی در فرکانس ۵۰ Hz تدوین شده و جدول زیر حداکثر مقادیر مجاز میدان در دو محیط معمولی و پرفرت‌وآمد را نشان می‌دهد [۲۷].

جدول ۱- میزان میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی مجاز در فضاهای مختلف

بر اساس استاندارد موسسه NRL

محیط	میدان مغناطیسی مجاز (μT)	میدان الکتریکی مجاز (kV/m)	چگالی جریان القایی (mA/m ²)
معمولی	۵۰۰	۱۰	۱۰
عمومی و پرفرت‌وآمد	۱۰۰	۵	۲

۳ رویکرد انتشار

در این رویکرد کارکرد صحیح تجهیزات و دستگاه‌های مختلف بررسی شده و عمده محدودیت‌های مختلف در آن نیز مربوط به کارکرد صحیح تجهیزات می‌باشد. به عبارتی می‌توان گفت تجهیزات الکتریکی مختلف بایستی قادر باشند تا در محیطی با این شرایط بدون ایجاد هرگونه اختلال و تأثیرپذیری کار خود را به‌طور صحیح انجام دهند [۲۷]. رویکرد انتشار در استانداردها و منابع مختلف به نسبت رویکرد ایمنی



شکل ۳- اندازه گیری میدان تداخلی سه کابل فشار متوسط تک هسته ای مجاور در آزمایشگاه مرکز تحقیقات فشار متوسط و مواد مغناطیسی دانشگاه علم و صنعت ایران

۴ ۴- تحلیل و اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی

براساس جدول ۲ که بر مبنای استاندارد می باشد [۸]، با هدف رعایت سازگاری الکترومغناطیسی در یک مجموعه باید میدان های الکتریکی و مغناطیسی اطراف کابل فشار متوسط به ترتیب برابر 1000 V/m و 40 A/m بوده و همچنین میدان های الکتریکی و مغناطیسی اطراف کابل مخابراتی به ترتیب برابر 610 V/m و $24/4 \text{ A/m}$ باشد (فرکانس کابل مخابراتی بین $1/5 \text{ kHz}$ تا 3 kHz می باشد [۳۱]).

در شکل های ۴ و ۵ به عنوان نمونه خروجی نرم افزار کامسول برای میدان های الکتریکی و مغناطیسی برای حالت اول که هر دو کابل بدون پوشش الکترومغناطیسی است در نرم افزار کامسول آورده شده است.

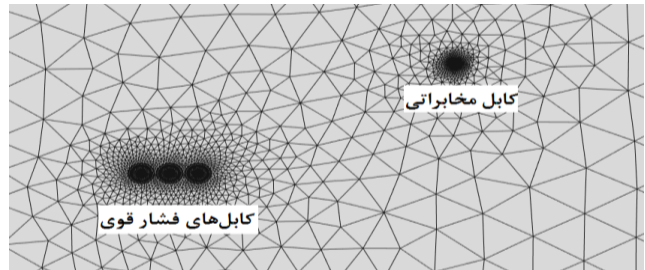
مشاهده می گردد مقادیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی هر دو توسط منبع تداخلی یعنی کابل فشار متوسط تولید شده و این میدان ها بر روی کابل مخابراتی نیز مؤثر واقع شده است. مقدار حداکثر این تداخل در جداول ۳ و ۴ به عنوان مبنای مقایسه ای آورده شده که از حد استاندارد بسیار بالاتر شده است.



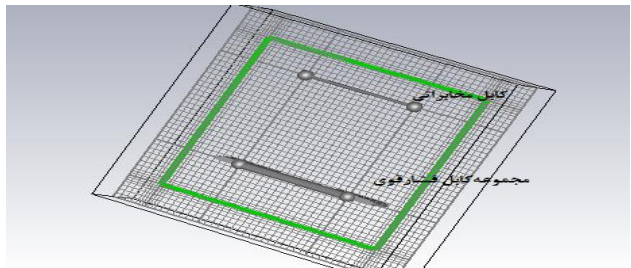
شکل ۴- خروجی نرم افزار برای میدان مغناطیسی (A/m) در حالت اول هر دو کابل بدون پوشش الکترومغناطیسی

در حالت هایی که پوشش الکترومغناطیسی کابل مورد نظر قرار گیرد در شرایط مرزی حل مسئله، شرط سیستم زمین در محلی غیر از کناره های کانال باید لحاظ شود (براساس [۱۱]) برای پوشش الکترومغناطیسی کابل باید از دو محل ابتدا و انتها خود به سیستم زمین متصل شده و از این رو می توان گفت که پوشش الکترومغناطیسی کابل در شرایط مسئله همان سیستم زمین بوده و پتانسیل صفر برای آن در نظر گرفته خواهد شد [۷].

در این مسائل تعداد 41142 مش در نرم افزار کامسول و 39780 در نرم افزار CST برای تحلیل ایجاد شده و بر اساس تجربه در حل مسائل المان محدود هر فضا بسته به حساسیت، در نرم افزار کامسول حداقل به پنج مثلث و در CST بر مبنای تفاضل محدود حداقل به ده مکعب تقسیم شده است [۲۹]. علاوه بر محدودیت ارائه شده، هر خط مستقیم یک بخش و هر خط مدور به چهار بخش تقسیم شده است. در شکل ۱ و ۲ مش بندی فضای مسئله در نرم افزار کامسول CST آورده شده است.



شکل ۱- مش بندی فضای مورد مطالعه در نرم افزار کامسول



شکل ۲- مش بندی فضای مورد مطالعه در نرم افزار CST

در این مسئله چهار حالت برای وجود و یا عدم وجود پوشش الکترومغناطیسی کابل در کانال در نظر گرفته شده و در نهایت براساس استاندارد - که کابل های به کار رفته بایستی دارای پوشش الکترومغناطیسی باشد- بررسی اثر تداخلی با وجود پوشش الکترومغناطیسی انجام شده است [۷]. در شکل ۳ تصویری از آزمایش نشان داده شده است. همان طور که در این شکل پیداست، از صفحات پوشش الکترومغناطیسی لانه زنبوری به جهت جلوگیری از ورود نویز منابع دیگر استفاده شده؛ در نهایت مقادیر به دست آمده براساس نسبت ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی و ضریب گذردهی الکتریکی هوا و خاک با هدف تاثیر گذاری تلفات محیطی مجدداً محاسبه شده است.

مغناطیسی در جداول ۳ و ۴ به همراه مقادیر استاندارد (ICNIRP) آورده شده است. در این جداول بیشترین مقدار تأثیرگذار در اطراف کابل‌ها که عموماً در نزدیک‌ترین فاصله به هسته کابل موردنظر می‌باشند به‌عنوان مبنای مقایسه‌ای با مقادیر آزمایشی و استاندارد قرار گرفته است.

جدول ۳- بیشترین مقدار میدان‌های الکتریکی به‌دست‌آمده برحسب ولت‌برمتر برای چهار حالت در نرم‌افزارهای کامسول، CST، آزمایش و استاندارد برای هر دو مجموعه فشار متوسط و مخابراتی

میدان الکتریکی	شماره حالت	کامسول	CST	آزمایش	استاندارد
اطراف کابل فشار متوسط	حالت اول	۱۳۳۴۵	۱۲۱۷۹	۱۲۸۴۲	۱۰۰۰۰
	حالت دوم	۱۴	۷	۱۵	۱۰۰۰۰
	حالت سوم	۱۲۰۶۳	۱۲۰۷۶	۱۲۰۸۹	۱۰۰۰۰
	حالت چهارم	۱۳	۱۱	۱۵	۱۰۰۰۰
اطراف کابل مخابراتی	حالت اول	۵۹۰۰	۵۶۴۳	۵۳۰۰	۶۱۰
	حالت دوم	۱۶	۱۵	۱۸	۶۱۰
	حالت سوم	۱۶	۱۳	۱۵	۶۱۰
	حالت چهارم	۳	۲	۷	۶۱۰

جدول ۴- بیشترین مقدار میدان‌های مغناطیسی به‌دست‌آمده برحسب آمپربرمتر برای چهار حالت در نرم‌افزارهای کامسول، CST، آزمایش و استاندارد برای هر دو مجموعه فشار متوسط و مخابراتی

میدان مغناطیسی	شماره حالت	کامسول	CST	آزمایش	استاندارد
اطراف کابل فشار متوسط	حالت اول	۱۳۵۳	۱۲۷۳	۱۴۹۰	۴۰۰
	حالت دوم	۱۳	۱۸	۲۱	۴۰۰
	حالت سوم	۱۲۱۴	۸۹۰	۱۴۶۲	۴۰۰
	حالت چهارم	۱۴	۷	۱۳	۴۰۰
اطراف کابل مخابراتی	حالت اول	۳۹	۴۷	۱۷	۲۴/۴
	حالت دوم	۱/۵	۲/۵	۴	۲۴/۴
	حالت سوم	۱	۰/۷۵	۳	۲۴/۴
	حالت چهارم	۰/۳	۰/۱	۲	۲۴/۴

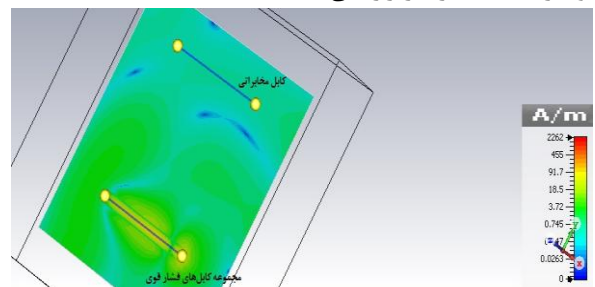
با بررسی جداول ۳ و ۴ و خروجی‌های به‌دست آمده می‌توان موارد زیر را نتیجه‌گیری نمود:

- میدان الکتریکی در اطراف کابل مخابراتی در حالت اول در بیشترین مقدار قرار دارد. در این حالت هر دو کابل در حالت غیرمجاز خود بهره‌برداری شده و به‌دلیل عدم استفاده از پوشش الکترومغناطیسی مقادیر میدان در مقدار غیر استاندارد قرار گرفته بنابراین می‌توان گفت به جهت اجرای یک شبکه شامل کابل فشار متوسط هم‌جوار با کابل مخابراتی همان‌طور که در [۱۶] نیز گفته شده است داشتن پوشش الکترومغناطیسی برای کابل مخابراتی الزامی می‌باشد. میدان الکتریکی و مغناطیسی در اطراف کابل فشار متوسط بر روی سیستم فشار متوسط اثرگذار می‌باشد. این حالت برای مواردی که در آن از پوشش الکترومغناطیسی برای کابل فشار متوسط استفاده نمی‌گردد (حالت اول و سوم) هر دو میدان الکتریکی و مغناطیسی از حدود

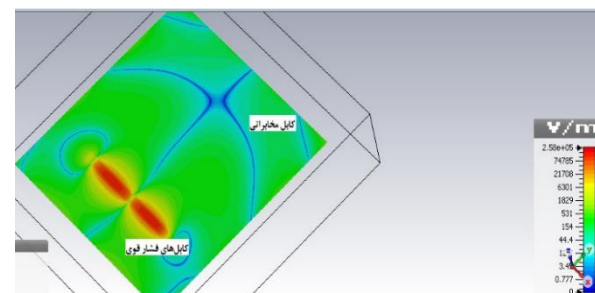


شکل ۵- خروجی نرم‌افزار برای میدان الکتریکی (V/m) در حالت اول- هر دو کابل بدون پوشش الکترومغناطیسی

به‌عنوان نمونه خروجی نرم‌افزار CST برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی که در آن تنها کابل مخابراتی دارای پوشش الکترومغناطیسی می‌باشد در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که در این حالت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی اطراف کابل فشار متوسط از حدود استاندارد خود خارج بوده و شرایط استاندارد برقرار نمی‌باشد.



شکل ۶- خروجی نرم‌افزار CST برای میدان مغناطیسی (A/m) برای حالت سوم، کابل فشار متوسط بدون پوشش الکترومغناطیسی و کابل مخابراتی دارای پوشش الکترومغناطیسی



شکل ۷- خروجی نرم‌افزار CST برای میدان الکتریکی (V/m) برای حالت سوم، کابل فشار متوسط بدون پوشش الکترومغناطیسی و کابل مخابراتی دارای پوشش الکترومغناطیسی

شبه‌سازی در هر چهار حالت به‌ترتیب، "هر دو کابل بدون پوشش الکترومغناطیسی"، "کابل مخابراتی بدون پوشش الکترومغناطیسی و کابل فشار دارای پوشش الکترومغناطیسی"، "کابل فشار متوسط بدون پوشش الکترومغناطیسی و کابل مخابراتی دارای پوشش الکترومغناطیسی" و "در نهایت هر دو کابل دارای پوشش الکترومغناطیسی" در دو نرم‌افزار کامسول و CST انجام شده و مقادیر عددی خروجی نرم‌افزاری و آزمایشی برای میدان‌های الکتریکی و

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش قرار گرفتن کابل‌های فشار متوسط و مخابراتی به لحاظ سازگاری الکترومغناطیسی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در فاصله استاندارد این دو مجموعه، نتایج به دست آمده دال بر وجود پوشش الکترومغناطیسی قطعی برای کابل فشار متوسط با هدف جلوگیری از میدان تداخلی $1/3 \text{ kV/m}$ و 1350 A/m توسط سیستم فشار متوسط می‌باشد. هرچند کابل مخابراتی می‌تواند بدون پوشش الکترومغناطیسی استفاده شود اما داشتن پوشش الکترومغناطیسی برای هر دو کابل می‌تواند موجب کاهش احتمالات بروز تداخلات القایی به دلیل تخریب پوشش الکترومغناطیسی یکی از مجموعه کابل‌ها را داشته باشد. همچنین در این راستا در نظر گرفتن تلفات محیطی تأثیر بسیار مهمی در دقت پاسخ معادلات ماکسول نیز دارد. محاسبات سازگاری الکترومغناطیسی در این مقاله براساس معادلات موج انجام پذیرفته و پاسخ به این معادلات براساس روش المان محدود و تفاضل محدود انجام شده که پاسخ به این معادلات براساس شرایط مرزی و دامنه‌ای مسئله انجام می‌گیرد. لزوم استاندارد در نوع اجرائیات، داشتن پوشش الکترومغناطیسی برای هر دو کابل بوده و در نهایت براساس نتایج عددی به دست آمده از هر دو شبیه‌سازی و آزمایش انجام گرفته برای میدان‌های تداخلی بیانگر وجود پوشش الکترومغناطیسی برای کابل‌های مخابراتی به عنوان شرط حداقلی به منظور جلوگیری از هرگونه تداخل در کابل مخابراتی می‌باشد. به عنوان تحقیقات آتی بررسی اثر سینی و نردبان کابل بر توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی در هم‌جواری کابل‌های فشار متوسط و مخابراتی در حالات چهارگانه این مقاله - به خصوص در صورت قطعی اتصال زمین سینی و نردبان کابل - بسیار جالب خواهد بود.

سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند در راستای انجام آزمایشات از همکاری صمیمانه جناب آقای دکتر حسین حیدری - ریاست محترم مرکز تحقیقات فشار متوسط و مواد مغناطیسی دانشگاه علم و صنعت ایران - مراتب تقدیر و تشکر خود را اظهار نمایند.

پیوست

جدول ۵- بیشترین مقدار میدان‌های الکتریکی به دست آمده بر حسب ولت بر متر برای چهار حالت در نرم‌افزارهای کامسول، CST، آزمایش و استاندارد برای هر دو مجموعه فشار متوسط و مخابراتی در حالت بهره‌برداری از پنجاه درصد

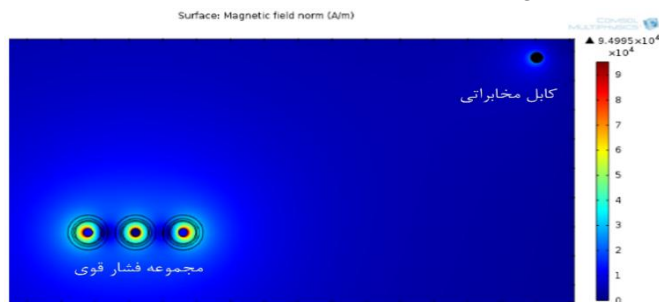
ظرفیت نامی شبکه فشار متوسط

میدان الکتریکی	شماره حالت	کامسول	CST	آزمایش	استاندارد
اطراف کابل	حالت اول	۱۲۷۵۰	۱۱۸۷۱	۱۲۱۳۲	۱۰۰۰۰
	حالت دوم	۴	۶	۹	۱۰۰۰۰
فشار متوسط	حالت سوم	۱۱۶۵۲	۱۱۸۵۹	۱۱۵۴۸	۱۰۰۰۰
	حالت چهارم	۷	۶	۱۱	۱۰۰۰۰

استاندارد خارج شده و علاوه بر سیستم‌های هم‌جوار بر خود سیستم نیز اثرگذار می‌باشد.

در حالت دوم که تنها کابل فشار متوسط دارای پوشش الکترومغناطیسی می‌باشد میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در حدود مجاز خود قرار دارند؛ اما در این حالت با ایجاد آسیب در پوشش الکترومغناطیسی کابل فشار متوسط، میدان‌ها در اطراف کابل مخابراتی افزایش خواهد یافت. در این حالت ریسک بهره‌برداری بالا می‌باشد.

مشاهده می‌گردد که میدان الکتریکی در اطراف کابل مخابراتی در حالت سوم در مقدار استاندارد خود قرار دارد. داشتن پوشش الکترومغناطیسی در یک سیستم برای کابل مخابراتی با وجود کابل فشار متوسط بدون پوشش الکترومغناطیسی، موجب افزایش میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی حول کابل مخابراتی می‌شود هرچند که میدان درون کابل مخابراتی به شدت تضعیف شده است. در شکل ۸ خروجی میدان مغناطیسی از نرم‌افزار کامسول برای نمایش افزایش میدان مغناطیسی برای حالت سوم ارائه شده و نشان داده شده است.



شکل ۸- خروجی نرم‌افزار کامسول برای میدان مغناطیسی (A/m) در حالتی که کابل فشار متوسط بدون پوشش الکترومغناطیسی و کابل مخابراتی دارای پوشش الکترومغناطیسی

در صورتی که علاوه بر کابل مخابراتی مجموعه فشار متوسط دارای پوشش الکترومغناطیسی باشد (حالت چهارم)، با آسیب دیدن پوشش الکترومغناطیسی کابل مخابراتی، سیستم مخابراتی از حیث آسیب‌پذیری از تداخلات الکترومغناطیسی محفوظ خواهد ماند. این موضوع به علت عدم تداخل منبع تداخل‌گر (کابل‌های فشار متوسط) می‌باشد [۳۰].

براساس معادلات ماکسول که در بخش دوم بدان اشاره گردید میدان‌های الکترومغناطیسی رابطه مستقیمی با مقدار جریان دارند. اما همان‌طور که در جداول پیوست مشاهده می‌گردد در صورت کاهش جریان به پنجاه درصد ظرفیت نامی (با فرض ثابت بودن ولتاژ) میدان‌های الکتریکی - ضمن تغییرات ناچیز نسبت به قبل - برای حالات بدون پوشش الکترومغناطیسی کابل فشار قوی همچنان در مقدار غیرمجاز خود قرار داشته و میدان‌های مغناطیسی نیز با وجود کاهش شدید همچنان در مقادیر غیرمجاز خود برای حالات اول و سوم قرار دارد.

Distribution Lines," Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), vol. 23, no. 2, pp. 323-338, 2011.

[14] L. D. P. Satsios K.J, "The influence of nonhomogeneous earth on the inductive interference caused to telecommunication cables by nearby AC electric traction lines," IEEE Transaction On Power Delivery, vol. 15, no. 1 ,pp.1016 - 1021, 2000.

[15] Martin T. Arentsen, Adrian Expethit, "MVAC submarine cable , magnetic fields measurements and analysis," 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp1-6, 2017.

[16] S. T. Sayan Sarkar, "Study Of Electrical Field Distortion Around Man-Made Object Under High Voltage Lines," India Conference (INDICON), Annual IEEE, vol. 10, no. 1, 2015.

[17] Y. S. Kim, "Analysis Of Magnetic Field for Power Transmission Line With Multiple AC Singular Currents by Coupling of Fourier Series Expansion and FEM," IEEE Transaction On Magnetic, vol. 49, no. 5, 2015.

[18] M. F. M. Ghassemi, "Effects of Tower, Phase Conductors and Shield Wires on the Electrical Field around a Tower Window during Live-line Work," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22,no.6,pp. 3413 – 3420, 2015.

[19] H.Javadi, Principles Of High Voltage Engineering, TEHTAN, Power and Water University of Technology, 2004.

[20] M. Jafarboland, A. Shirzadi, " Controller Design for BPMSM with Consideration of Coupling between T orque and Magnetic Suspension Windings", Tabriz Journal of Electrical Engineering, vol. 47, no. 3, autumn 2017.

[21] R. Emadifar, S. Tohidi , " Analysis of Magnet Shape Effect on Cogging Torque and EMF Waveform of AFPM Generators Using FEM Methods" Tabriz Journal of Electrical Engineering, vol. 47, no. 3, autumn 2017.

[22] A. Darabi, A. Behniafar, "Finite Element Modeling of an Inversed Design Circumferential Flux Cylindrical Hysteresis Motor in Steady State Condition", Tabriz Journal of Electrical Engineering, vol. 47, no. 3, autumn 2017.

[23] B. Constantin, Advanced Engineering Electromagnetics, Tehran: IHU, 2001.

[24] Z. Q. Zhu; H.Y. Li, "Recent developments and comparative study of magnetically geared machines" CES Transactions on Electrical Machines and Systems, vol. 2, no. 1, march 2018.

[25] M. I. Montrose, EMC and the Printed Circuit Board:Design, Theory, and Layout Made Simple, Wiley-IEEE Press, 1999.

[26] Emrah Tas, Frederic Pythoud, "Design, Implementation, and Evaluation of Proficiency Testing in EMC Conducted Immunity," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol59, no 4, 2017.

[27] E. B. M.Motaei, Electromagnetic compatibility engineering, Tehran: SARVNEGAR, 2013.

[28] ICNIRP, International Commission On Non-Ionizing Pardition Protection, ICNIRP, 2008.

[29] IEC61442, Test methods for accessories for power cables with rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV), International Electrotechnical Commission, 2005.

[30] H. Baghban, COMSOL Modeling, tehran: kiyan, 2014.

[31] NRL, Electric And Magnetic Field And Your Health Information On Electric And Magnetic Fields Associated With Transmission Lines,Distribution Lines And Electrical Equipment, National Radiation Labratory, 2010.

۶۱۰	۴۹۲۸	۵۱۶۱	۵۶۹۲	حالت اول	اطراف کابل مخابراتی
۶۱۰	۱۳	۷	۳	حالت دوم	
۶۱۰	۱۳	۱۰	۱۲	حالت سوم	
۶۱۰	۵	۱	۲	حالت چهارم	

جدول ۶- بیشترین مقدار میدان‌های مغناطیسی به‌دست‌آمده برحسب آمپربرتر برای چهار حالت در نرم‌افزارهای کامسول، CST، آزمایش و استاندارد برای هر دو مجموعه فشارمتوسط و مخابراتی در حالت بهره‌برداری از پنجاه درصد ظرفیت نامی شبکه

فشارمتوسط

میدان مغناطیسی	شماره حالت	کامسول	CST	آزمایش	استاندارد
اطراف کابل فشار متوسط	حالت اول	۶۷۹	۵۶۲	۷۳۴	۴۰۰
	حالت دوم	۱۰	۱۱	۱۵	۴۰۰
	حالت سوم	۵۹۸	۵۱۴	۷۲۱	۴۰۰
اطراف کابل مخابراتی	حالت چهارم	۱۱	۹	۱۰	۴۰۰
	حالت اول	۱۵	۲۳	۱۱	۲۴/۴
	حالت دوم	۱	۱/۵	۳	۲۴/۴
مخابراتی	حالت سوم	۰/۲۵	۰/۵	۱/۵	۲۴/۴
	حالت چهارم	۰/۱	۰/۱	۱/۵	۲۴/۴

مراجع

[1] D. K. Cheng, Electromagnetic Feild and Wave, Tehran, 2011.

[2] R. W. Hilbig, Mitigation Quality Power, ANDISHE VA FARHANE JAVIDAN, 2010.

[3] M. R. Yazdani, Electromagnetic compatibility and Noise Reduction Methods, Azad University, 2015.

[4] A. D. Hossein Hosseinian, Electrical Power System Quality, Tehran: Tehran, 2004.

[5] A. Nemati, EMC In Electronics And Communicative Systems. (digital circuits design of high frequency), Tehran: Amir Kabir University, 2007.

[6] IEC61000-4-8, International Standard Electromagnetic Compatibility(EMC), CEC, 2007.

[7] IEC61000-3-6, International Standard Electromagnetic Compatibility(EMC), 2007.

[8] CISPR12, International Commision On Non-Ionizing Pardition Protection, 1999.

[9] ISO11451-1, Road Vehicles,Vehicle Test Methods For Electrical Disturbances From Narrowband Radiated Electromagnetic Energy ,Part 1-General Principles And Terminology, Switzerland, 2005.

[10] American National Standard Dictionary for Technologies of Electromagnetic Compatibility (EMC),Electromagnetic Pulse (EMP), and Electrostatic Discharge (ESD), 1994.

[11] ISNO-IEC61000-4-8, Iranian National Standardization Organization, IRAN, 2012.

[12] P. S. d. merwe, "Cable Tray Connections for Electromagnetic Interference (EMI) Mitigation" IEEE Transaction On Electronmagnetic Compability, vol. 53, no. 2, 2011.

[13] k. M. P. B. H.k Agarwal, "Partially And Fully Insulated Conductor Systems For Low And Medium Voltage Over Head